

### 3.4 環境区分

環境区分の俯瞰では、環境問題をその取り組みの歴史から捉えることから始めた。まず、60年代から70年代にかけて行われた公害への取り組みは事後対応的・対処療法的なものであった。80年代以降、地球規模の環境問題が認識されるようになり、気候変動に対する緩和策・適応策などのように未然防止的な取り組みがなされているが、自然災害には事後対応的であるといえる。そして、今後予測される環境問題は、気候変動のような不確実性が高い事象や災害などの不連続性の高い事象が多く、従来の個別的対策ではなく包括的な取り組みが求められる。そして、環境に影響を及ぼす事象を予測し先手を打つという考え方が必要であり、対策が事後対応的であった異常気象や自然災害をも対象に含め、「環境設計・創造」という考え方が重要であると考え、これを環境区分の俯瞰における基本理念とした。さらに、俯瞰にあたっては、環境は人の健康を含む生命の持続性の基盤であることから「次世代のための環境」を前提とすること、普遍的な課題解決型科学技術の記載を目指すこと、さまざまな社会状況が変化しつつある2015年という時点を強く意識することとした。

これらの考え方は今後の研究開発の方向性を考慮する上で重要な視点であり、この視点から抽出された研究開発の推進が必要と考えられる。

上記の基本的考え方に沿って検討した結果、5つの項目が抽出された。

#### 1. 持続可能な人間居住

地球規模の問題に対処する意味でも、地域の問題の解決を図る意味でも、都市の環境負荷をどのようにして下げるかが重要な課題である。とりわけ、GHG発生量の多くを占める運輸・交通の今後のあり方、環境負荷が小さくても快適な居住環境の形成は優先的に取り組むべきである。今後、人口の急増が予想される開発途上国の都市環境の居住性を向上させると同時に環境負荷を低減する技術を開発できれば、日本が地球環境保全に大いに貢献できる。

#### 2. 生態系サービスの適正管理

人間社会と生態系との関係を踏まえた生物多様性や遺伝資源の研究開発も促進すべきである。そのためには、生物学や生態学など研究者に加えて、農学や林学、薬学、工学、経済学など、生態系や遺伝資源の利用を中心としてきた分野の研究者も加わった総合的な研究体制を整えることも必要となるであろう。

#### 3. 持続可能な生産と消費

製品のライフサイクルを通じて生じる環境負荷を把握し、より小さくするための研究開発はこれまでも日本で先進的に進めてられてきたが、今後も、いっそうの強化が求められる。産業の下流部門ではレアメタル、ベースメタル、リンなど、枯渇が懸念される元素の回収と再利用に係る技術を緊急に開発すべきである。

#### 4. 災害による環境への影響低減と環境の再創造

東日本大震災以降、防災や減災など、災害への取り組みの必要性が再認識されている。自然災害のリスクや災害に伴う工場などの事故による有害物質放出のリスク、住民とのリスクコミュニケーション、被災地の復興・再建の手法に関する研究開発もいっそうの努力が求められる分野である。

## 5. 観測・計測とその情報に基づく環境管理

情報に基づいた環境の管理は、環境の把握だけでなく、環境に影響を及ぼす事象を予測し先手を打つという点においても必要不可欠の分野である。本分野ではすでにさまざまな取り組みがなされ多くの実績が蓄積している。これらの実績を生かし活用していくための包括的なしくみの構築が求められている。同時に、既存の手法では不十分な観測・計測技術の進展など、残された課題への対応とそれを広く普及するための取り組みも忘れてはならない。

なお、環境分野における科学技術の研究開発においては、実現可能性や経済性と同時に社会的受容可能性に留意しなければならない。市民参加が不可欠となっている現状を踏まえれば、新たな技術が社会にどのように受け入れられるかまでを踏まえた研究開発でなければならない。そして、市民やマスメディアと専門家間のリスク認知に大きな乖離があることは古くから知られているが、福島第一原子力発電所事故後、それが以前より大きな問題となってきた。技術の受容可能性をどう評価するか、また、受容できる技術をどう開発していくかもひとつの課題である。

以上の5項目のもとに以下の33の研究開発領域を設定し俯瞰を実施した。

### 3.4.1 持続可能な人間居住

- 3.4.1.1 建築と住環境（室内環境、建物の環境性能、建物周辺の環境）
- 3.4.1.2 都市・地域計画（コンパクトシティ、インフラ管理含む）
- 3.4.1.3 モビリティとその管理
- 3.4.1.4 安全な水の供給（水道と安全性確保）
- 3.4.1.5 水環境管理（下水道、浄化槽、湖沼、水辺創造など）
- 3.4.1.6 人間居住による環境負荷（GHG排出、水、大気への排出、緑地の喪失）
- 3.4.1.7 都市環境と健康影響（大気、化学物質、緑地、熱環境等）
- 3.4.1.8 開発途上国の人間居住と適正技術

### 3.4.2 生態系サービスの適正管理

- 3.4.2.1 生物多様性の保全と持続的利用
- 3.4.2.2 陸域資源と生態系管理（含む陸水）
- 3.4.2.3 沿岸域および海洋の資源と生態系管理
- 3.4.2.4 流域レベルの生態系管理（森林から海まで）
- 3.4.2.5 生物多様性及び生態系サービスの評価
- 3.4.2.6 生態系サービスの管理システム・制度のための技術管理

### 3.4.3 持続可能な生産と消費

- 3.4.3.1 製造業におけるグリーン技術（ゼロエミッション、環境配慮設計、クリーナープロダクション）
- 3.4.3.2 サプライチェーンの環境マネジメント
- 3.4.3.3 LCAに基づく生産と消費管理
- 3.4.3.4 廃棄物の発生抑制

- 3.4.3.5 リサイクル技術 (都市鉱山含む)
- 3.4.3.6 水の循環利用技術
- 3.4.3.7 有害物質のマネジメント (PRTR、RoHS含む)
- 3.4.3.8 元素の循環と利用 (リン・窒素)
- 3.4.3.9 開発途上国による循環型技術 (農村型小規模バイオガス化装置)
  
- 3.4.4 災害による環境への影響低減と環境の再創造  
(図2.2.21では「定常時」「非定常時」として2階層で表現)

  - 3.4.4.1 自然災害 (地震、津波、台風、干ばつ、豪雨、豪雪、火山等) が地域環境へ及ぼすリスク
  - 3.4.4.2 人為的災害 (工場等での事故、危険物質運搬時の事故等) が環境へ及ぼすリスク
  - 3.4.4.3 災害のリスク (人間への被害、環境への被害) の予防対策
  - 3.4.4.4 災害発生直後の環境情報観測・把握手法とリスク軽減手法
  - 3.4.4.5 災害廃棄物処理と利活用
  - 3.4.4.6 自然環境の回復過程の促進
  - 3.4.4.7 社会環境の再創造手法

  
- 3.4.5 観測・計測とその情報に基づく環境管理

  - 3.4.5.1 地球規模の環境モニタリング (リモートセンシングと実測)
  - 3.4.5.2 地域の環境と人間活動の把握 (地域の環境計測、人間活動とその影響の把握)
  - 3.4.5.3 環境情報基盤の整備と活用 (ユビキタス情報、環境ビッグデータ、GIS)

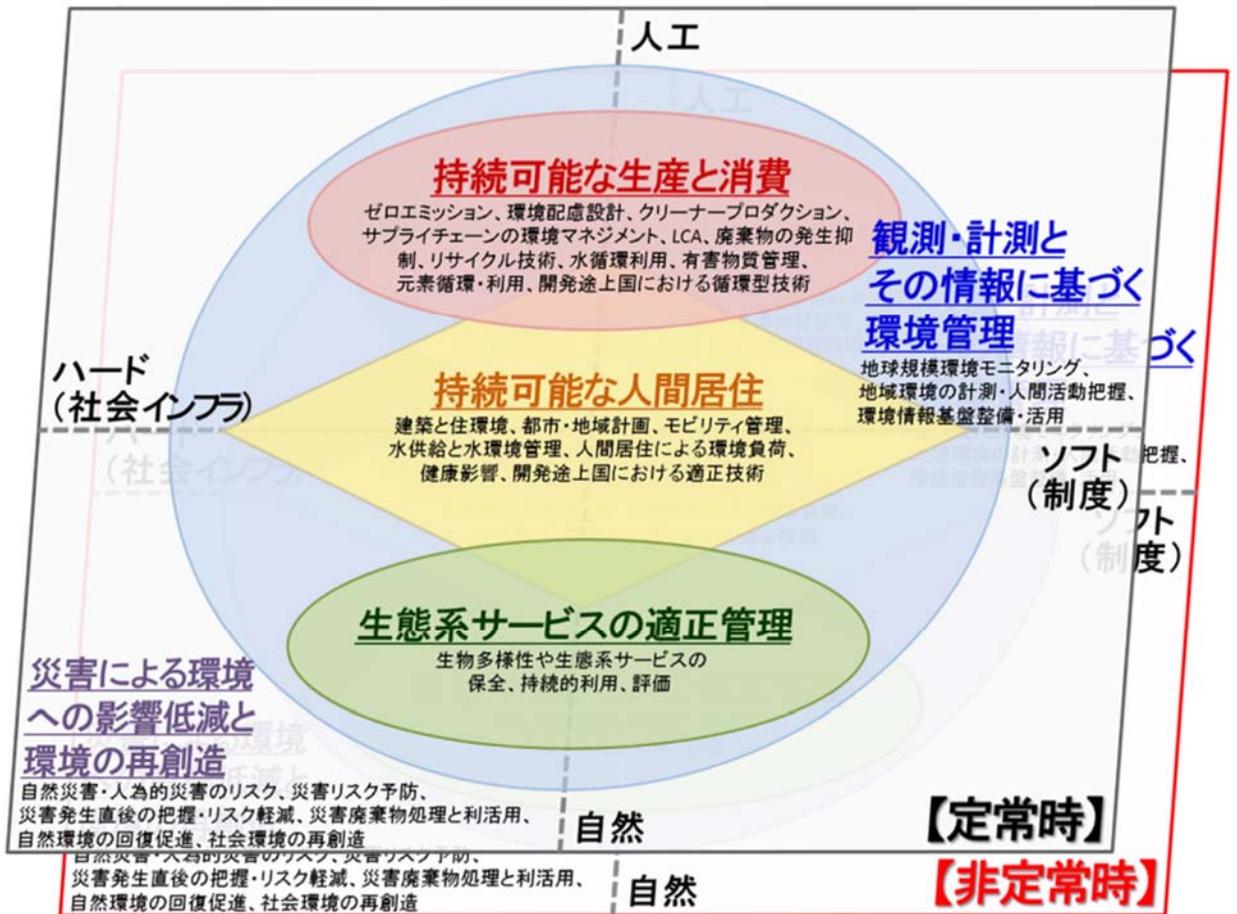


図 2.2.21 環境区分の俯瞰図 (再掲)

### 3.4.1 持続可能な人間居住

#### 3.4.1.1 建築と住環境（室内環境、建物の環境性能、建物周辺の環境）

##### (1) 研究開発領域名

建築と住環境（室内環境、建物の環境性能、建物周辺の環境）

##### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

人間が生活する環境を計測評価、制御、最適化、改善、保全する技術に関する研究開発領域である。社会状況の変化にともない、環境に求められる性能は変化していく。それに応える技術開発が求められる。

##### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

本領域は、人々が生活する上で適正な環境を保持するための技術開発領域である。そのためには、環境を計測評価し、適切な環境に是正し、環境を制御していく技術が求められる。かつ、そのために必要なエネルギー消費の削減や廃棄物の削減が求められることになる。建物内環境<sup>1,2)</sup>について言えば、ホルムアルデヒドなどの化学物質<sup>3)</sup>、カビや細菌などの微生物<sup>4)</sup>、ダニやねずみなどの小動物、音・光・温熱<sup>5)</sup>・臭気・電磁波などの物理環境、省エネ性能<sup>6,7)</sup>、バリアフリーなど多様な分野に及ぶ<sup>8)</sup>。また、建物外環境について言えば、日常安全・災害安全などの安全性<sup>9)</sup>、多様な健康影響要因による保健性<sup>10)</sup>、各種サービスを利用できるための利便性、緑地・景観・文化面などを含めた快適性<sup>11,12)</sup>、環境・社会・経済の諸点からの持続可能性にかかわる広義の環境が含まれる<sup>13)</sup>。

これら居住環境は、人が生活する上での基本条件を用意する上で重要な分野であるために、国内外と問わず、多くの研究開発が行われている。国際的には欧米および日本が研究をリードしており、中国、韓国、台湾、シンガポールなどでも研究が盛んである。近年では、特に中国が急激に伸びている。

室内化学物質分野では、個々の注目される物質の挙動や生体への影響度、対処策は解明・整備されてきたが、他物質との反応やそれによる二次的な汚染の問題は未解明な部分が多い。また、室内微生物分野においては、近年、抗菌処理や除菌処理を行う装置・器具なども増えてきたが、感染を防止する仕組みをより多様に組み入れていく技術開発が必要であろう。室内環境の制御は効率性から集中式をとることも多いが、個別にカスタマイズできることによる満足度の上昇効果が知られており、適切な方法論の開発も必要である。人によって環境に対する感覚はかなり異なり、また、若年層と高齢層の相違があることもよく知られている。個々に快適な環境を整備する技術開発は今後も続けられねばならない。近年の省エネ促進の社会状況の中で、活動効率も含めた居住環境の適正化こそが必要なはずであり、その技術開発も待たれるところである。

建物環境を総合的に評価する仕組みとして、日本では建築環境総合性能評価システム（CASBEE : Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency）<sup>14)</sup>が開発されている。似た試行は、海外でもあり（LEED : Leadership in Energy and Environmental Design（米国）、BREEAM : Building Research Establishment Environmental Assessment Method（イギリス）、GBTool : Green Building Tool（カナダ））、それぞれの地域性に根ざしたシステムとして発展してきている<sup>15)</sup>。このよう

な評価による建物の格付けなども進みつつあり、建物の環境性能をいかに社会に位置づけ、適切な環境配慮を促進するかが問われている。

建築外環境である住環境においては、安全性を担保するための災害リスク対処の技術は、災害発生予測の難しさ、社会のリスク認知への理解不足（リスク軽視・過剰反応の両方を含む）、対応方法の難しさも相まって十分に進んでいない。災害に加えて、犯罪に対する安全性も社会の注目をあびている。さまざまなセンサ機器の設置や情報分析の技術や社会基盤が整備されてはいるものの、犯罪は後を絶たない。重篤な犯罪をいかに未然に防ぐかは大きな技術開発課題である。

日本では人口減少社会に入り、便利施設が需要に伴って拡充されるような時代ではなくなった。そのため、今後は便利施設の縮小撤退が現実のものとなっていく。そのため、生活利便性をいかに保持するか、換言すれば同じ機能をいかに効率的に確保できるかが重要となる。公共サービスのあり方も含め、このような縮小社会におけるサービス技術開発は喫緊の課題である。同様なことが、快適性についてもいえるだろう。どのような場所でも快適性が得られるような空間開発を進めることが難しくなる可能性がある。その場合に、負担を最小化した局所的な快適性の維持保全が必要な技術となる。

住環境の中でも、持続可能性は今後に向けて大きな課題である。これは自然科学的な技術だけではなく、社会技術も含めた総合的な対応が必要となる。マネジメントシステムも含めた技術開発が重要になっていく。現在、例えば、国際標準化機構においても、スマートシティのマネジメントシステムについて、ISOが検討されている。適切なマネジメントは、技術開発だけでなく、国際標準化、デファクト化なども含め、戦略的な展開をも必要としている。住環境分野は自然科学と社会科学の融合的な技術開発が必要であり、学際的な研究開発体制の構築・支援も重要となっている。

#### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

この分野における研究開発は、狭い分野内で推進していくフェーズというよりも、すでに、社会制度や他分野との連携でいかに定着・具現化を進めるかというフェーズに来ている。もちろん、室内環境やエネルギー効率を高める個々の尖った技術開発は今後も続けられるであろうが、今後のブレークスルーはむしろ、分野間連携にあると思われる。例えば、福祉・医療とも連動した室内環境制御技術、モニタリングと連動した各種マネジメント技術、制度やルールを設計するメカニズムデザインと連動した制御技術などが考えられる。

残念ながら、現行のさまざまなルールは、主としてその分野のみを対象に構築されてきたものが多く、新たな技術やビジネスモデルとして連携していくためには、社会制度変革も合わせて行っていく必要がある。

環境マネジメントについては、世界標準化の動きがみられるが、居住環境に関する多くの分野がヨーロッパ主導である。ただし、近年、特に中国の進出がめざましく、日本としてもそのような活動にも力を入れていく必要がある。

#### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

室内空気質関連では、科学的知見を集約する試みがある<sup>16)</sup>。EUの試みについては、

Jantunen, et al. (2011) <sup>17)</sup> にまとめられている。そこでは、より詳細な健康影響の解明、暴露パターンの解明、原因物質解明方法の開発、換気とエネルギー、最適空気質コントロール手法の開発などの重要性が強調されている。世界保健機関（WHO）では学校における空気質の問題について検討し、レポートが出されている <sup>18)</sup>。

エネルギー関連では、日欧米でゼロエネルギー住宅のための研究が盛んに行われているだけでなく、すでに制度的な整備も始められている。米国ではエネルギー省の **Building America Program** がそのためのファンディングを行っている。日本でも、研究成果や社会普及の状況に呼応して、エネルギーの使用の合理化等に関する法律（省エネ法）が改正され、建物の省エネ性能に関する規制が進化してきている。中国、韓国でも近年の研究開発や実用化に向けた開発の動きはめざましい。

住環境関連では、強靱で持続可能なインフラに関する米国国立科学財団（NSF）研究費のプログラムが進められている <sup>19)</sup>。

#### （6）キーワード

環境評価、最適制御、保全技術、空気質、温熱環境、音環境、省エネ性能、ゼロエネルギー住宅、高齢化対応、防災性、防犯性、利便性、快適性、持続可能性、強靱性

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・大学のほか、国の研究機関としては、国立環境研究所が環境研究を先導している。住環境分野は、都市・建築関連の研究機関が基礎研究を推進している。
	応用研究・開発	◎	→	・CASBEEを開発し、実務的な環境評価の面では先端的なシステムの一つとなっている。
	産業化	◎	→	・環境技術は世界をリードしているが、米国・ヨーロッパよりは市場シェアが小さい。
米国	基礎研究	○	→	・室内空気質関連で、科学的知見を集約する試みがある <sup>6)</sup> 。
	応用研究・開発	◎	→	・LEEDで建物の環境性能評価の仕組みを開発し、先端的なシステムの一つとなっている。
	産業化	◎	→	・環境技術は世界をリードしており、市場シェアは1国でヨーロッパに匹敵する。
欧州	基礎研究	○	→	・EU全体および各国の研究費配分機関が研究プロジェクトを推進しており、先進的な研究が進められている。
	応用研究・開発	◎	→	・イギリスではBREEAMで建物の環境性能評価の仕組みを開発し、先端的なシステムの一つとなっている。 ・WHOでは学校における空気質の問題について検討し、レポートが出されている <sup>18)</sup> 。
	産業化	◎	→	・環境技術は世界をリードしており、環境政策を経済政策と連携させて推進している。
中国	基礎研究	○	↗	・近年、活発に国際会議を企画し、開催している。 ・中国科学院（CAS）の都市環境研究所（IUE）が都市環境研究を先導している。
	応用研究・開発	◎	↗	・近年、活発に国際会議を企画し、開催している。 ・欧米とともにゼロエネルギー住宅の開発の国際プロジェクトに参加している。
	産業化	△	↗	・主要国に比べると産業化は遅れている。
韓国	基礎研究	○	↗	・国立環境研究院（NIER）は環境分野の研究を先導している。
	応用研究・開発	◎	↗	・欧米とともにゼロエネルギー住宅の開発の国際プロジェクトに参加している。
	産業化	○	↗	・2009年に大統領直轄のグリーン成長委員会を組織し、グリーン国家戦略でグリーン産業の成長を目指している。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) Evans, G.W. (2003) "The built environment and mental health" *Journal of Urban Health: Bulletin of the New York Academy of Medicine*, **80**(4), 536-555.
- 2) Rashid, M., C. Zimring (2008) "A review of the empirical literature on the relationships between indoor environment and stress in health care and office settings: Problems and prospects of sharing evidence" *Environment and Behavior*, **40**(2), 151-190.
- 3) Salthammer, T., S. Mentese, R. Marutzky (2010) "Formaldehyde in the indoor environment" *Chemical Reviews*, **110**, 2536-2572.
- 4) Pasanen, A.-L. (2001) "A review: Fungal exposure assessment in indoor environments" *Indoor Air*, **11**, 87-98.
- 5) Yu, B.F., Z.B. Hu, M. Liu, H.L. Yang, Q.X. Kong, Y.H. Liu (2009) "Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health" *International Journal of Refrigeration*, **32**, 3-20.
- 6) Dounis, A.I., C. Caraiscos (2009) "Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment: A review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 1246-1261.
- 7) Swan, L.G., V.I. Ugursal (2009) "Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 1819-1835.
- 8) 室内環境学会 (編) (2010) 『室内環境学概論』 東京電機大学出版局
- 9) Carver, A.C., A. Timperio, D. Crawford (2008) "Playing it safe: The influence of neighborhood safety on children's physical activity: A Review" *Health & Place*, **14**, 217-227.
- 10) Moudon, A.V. (2009) "Real noise from the urban environment: How ambient community noise affects health and what can be done about it" *American Journal of Preventive Medicine*, **37**(2), 167-171.
- 11) Matsuoka, R.H., R. Kaplan (2008) "People needs in the urban landscape: Analysis of *Landscape and Urban Planning* contributions" *Landscape and Urban Planning*, **84**, 7-19.
- 12) Bowler, D., L. Buyung-Ali, T.M. Knight, A.S. Pullin (2010) "Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence" *Landscape and Urban Planning*, **97**, 147-155.
- 13) 浅見泰司 (編) (2001) 『住環境：評価方法と理論』 東京大学出版会
- 14) CASBEE (建築環境総合性能評価システム) <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/>
- 15) Kajiwar, Y., T. Inoue, T.N. Goh (2011) "Analysis of building environment assessment frameworks and their implications for sustainability indicators" *Sustainability Science*, **6**, 233-246.
- 16) Indoor air quality scientific findings resource bank <http://www.iaqscience.lbl.gov/>
- 17) Jantunen M., Oliveira Fernandes E., Carrer P., Kephelopoulos S. (2011) *Promoting actions for healthy indoor air (IAIAQ)*, European Commission Directorate General for Health and Consumers. Luxembourg.

- 18) WHO, Regional Office for Europe (2011) “Methods for monitoring indoor air quality in schools” Reprint of a meeting, Bonn, Germany, 4-5 April 2011, WHO, Regional Office for Europe.
- 19) NSF, Resilient and Sustainable Infrastructures  
[http://www.nsf.gov/funding/pgm\\_summ.jsp?pims\\_id=13545&org=NSF](http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=13545&org=NSF)

### 3.4.1.2 都市・地域計画（コンパクトシティ、インフラ管理含む）

#### (1) 研究開発領域名

都市・地域計画（コンパクトシティ、インフラ管理含む）

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

人間の居住と自然環境を持続可能にしつつ、温室効果ガス（GHG：Greenhouse Gas）を始めとする環境負荷を減らすことができ、インフラ管理という意味でも効率的な都市・地域計画の分野からのアプローチとして、すでに各国で認知されているコンパクトシティの動向とその実現のための政策的課題に関する研究開発領域である。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

人間の居住を持続可能なものとし、その一方で、緑地保全に配慮しつつ、エネルギー利用を効率化し、気候変動（地球温暖化）の主な原因となるGHGを削減するためには、人の居住や人、モノの移動の基盤となる都市・地域の空間形態自体から見直し、環境に配慮することも重要である。

建物や緑地の配置を変えて土地を効率的に利用しながら自然環境を守り、買い物や病院、職場などの土地利用の用途を混合させて歩きやすい範囲で生活が充足する集約拠点を形成し、それらをつなぐ移動をGHG排出の少ない公共交通で結ぶコンパクトシティ（集約型都市構造）という考え方が注目されている。これまでは、人口増加とモータリゼーションの進展によって次々に郊外が開発され、都市の拡大が進んできたが、現在は人口減少と少子高齢化の時代に入っており、このまま何もしなければ、将来は都市の至る所で空き地や空き家が増加することが懸念される。ますます公共交通も採算がとれず運営できなくなるなど、悪循環に陥ってしまう可能性もあり、特に高齢者で車が運転できない人は移動も困難になってしまう。コンパクトシティは、このような交通の面だけでなく、都市域をコンパクトにすることによるインフラ整備・維持管理の効率化と、それによる費用縮小という効果も期待されている。

コンパクトシティという言葉が初めて出現したのは1970年代とされる<sup>1)</sup>。その当時発表されたDantzig and Saaty (1974)の研究<sup>2)</sup>では、その定義が空間次元に加え時間次元も含めて都市空間を有効活用することとされた。その後、コンパクトシティに関する議論は一度断絶するものの、自然環境・生態系ベースで人間のテリトリーのコンパクト化を考える自然保護の立場、コミュニティ・ヒューマンベースで人間の住まい方としてのコンパクト化を考える建築・居住環境の立場、そして都市計画の立場の各分野で徐々にそのニーズが高まっていった<sup>3)</sup>。さらに、現在のようなサステナビリティや交通環境といった観点でコンパクトシティが議論されるようになったのは、1990年代以降である<sup>4)</sup>。欧米におけるコンパクトシティ論争について、カスバート (Cuthbert, 2006)によると、コンパクトシティの中心的な概念である密度について、果てしない論争が行われてきたが、明らかなことは二つあるという。一つは、自動車に依存した都市形態を志向する都市計画はもはやあり得ないこと、二つ目はこのプロセスを実現するためにも公共部門の地位・役割を確立・回復すべきだということである<sup>5)</sup>。我が国でも、引き続き今日まで「コンパクト性」や「コンパクトシティの定義」を巡って、空間モデルなどの

数量的あるいは文化的な視点での議論、実際の都市空間のコンパクト性の解析やタイプ分けなどの探求がなされている。コンパクトシティがもたらすと考えられるアウトプット、アウトカムの効果は、経済、交通、環境、社会分野でさまざまな指標を設定して、数量的解析的な調査研究が進められている<sup>6)</sup>。例えば、近年では、GHGの削減だけでなく、人々の生活の質（QOL：Quality of Life）の変化や、行政の財政負担の効率化、エネルギー分野からの低炭素化との関連など、さまざまな視点から、低炭素型都市やコンパクトシティの効果あるいは考慮すべき観点を示す研究が行われてきた。また、コンパクトシティを進める上での問題点、実現方策など、実際の政策に生かすための実務的な視点からの研究も進みつつある。

政策面では、2000年頃から青森市を始めとして自治体レベルでのコンパクトシティ推進が早くから表明されてきた。国レベルでは2006年の国土交通省社会資本整備審議会「新しい時代の都市計画はいかにあるべきか。（第一次答申）」で初めて集約型都市構造を目指すべきとの答申が具体的に示された。その後、2006年のまちづくり三法改正、2010年の「低炭素都市づくりガイドライン」策定・公表、2012年の都市の低炭素化の促進に関する法律制定・施行などを経て、2014年に都市再生特別措置法等の一部を改正する法律が施行され、具体的に都市機能誘導区域、居住誘導区域等を定める改正都市再生特別措置法に基づく立地適正化計画制度が設けられた。

海外でもコンパクトシティが推進されており、2010年にOECDが加盟国34カ国を対象に行った調査によると、少なくとも26カ国でコンパクトシティ政策あるいはそれに相当するアプローチが政策文書として示され、多くの国でそれを実施する手段（規制面、財政面問わず）も整えていることがわかっている<sup>7)</sup>。我が国を含め先進国、開発途上国を問わず、「コンパクトシティ」という言葉を使うかは別にして、都市のスプロールを抑制して、一定の密度の居住地形成と複合機能用途の適切な配置の土地利用により、コンパクトな構造をもった都市を目指す政策、計画、プロジェクトを進めることは、共通した認識になっているといえよう<sup>8)</sup>。

#### （4）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

実は、「コンパクトシティとは何ですか？」というシンプルな問いに答えることはいまだ容易ではない<sup>8)</sup>。それは、前述のようにさまざまな分野でそのニーズが高まってきたこと、そのため、立場により空間密度、集積性・連続性、混合土地利用、人口・住宅配置、都市施設配置、交通、近接性などの多様な視点から定義されること、その期待される効果も自動車依存低減、公共交通維持、健康増進、エネルギー消費・GHG削減、自然的土地利用の保全、中心市街地活性化、インフラ整備・維持管理コスト削減など、広範に及ぶことが一つの要因であろう。一方で、研究面では定義や是非に関する論争から、実現に向けた議論の段階に移っている。かつて、1990年代のコンパクトシティ論争で、批判的な立場での代表的な論者であったブレヘニ教授が所属していた英国レディング大学のホームページ<sup>9)</sup>でも、かつての論争の的となっていたコンパクトシティ政策への疑問というよりも、経済、社会、環境にできるだけマイナスの影響を及ぼさずに、確実にコンパクトシティを実現する政策・計画のあり方、都市のコンパクト化や市街地の封じ込め・集約化を具体的に計画、デザインする方法、都市のコンパクト化の効果を高める

手法、といった論点が示されている<sup>6)</sup>。

政策面でも、都市形成の歴史、社会的・政策的背景は国によって異なり、コンパクトシティに関する世界共通の政策パッケージが存在しているわけではない。例えば、「Smart Growth」、「New Urbanism / Neo Traditionalism」、「Transit-Oriented Development (TOD)」、「Eco City」、「Urban Village」、「Edge / Edgeless Cities」、「Urban Renaissance / Regeneration」、「Mega-Region」などのコンパクトシティに類似・相反する計画概念をさまざまな標語を用いて抽象化することが、コンパクトシティの国際的な共通理解をより難しいものにしてしているといえよう<sup>10)</sup>。現在行われている世界のコンパクトシティに関する取り組みは、文献7)に詳しい。ここでは、コンパクトシティ政策の成果に対する懸念の多くは、コンパクトシティの概念の誤解に基づくものであり、都市設計の仕方を工夫しコンパクトシティ政策を適切に策定すれば対処することができる<sup>11)</sup>と述べている。その上で、ビジョンの明確化、大都市圏内の各政府レベルにおける垂直的一貫性、企画立案・実施への継続的な市民参加、官民連携などによるインフラ整備を含む実施戦略のための投資資金調達、透明性、モニタリング、説明責任、報告の重要性を指摘している。

特に我が国においては、政府の進める政策のうち、都合のよりよい、実施可能なプロジェクトだけを導入して事足り、となりがちである<sup>6)</sup>。国土交通省モデルでは市街地境界は曖昧であり<sup>6)</sup>、コンパクトな都市を目指しているにも関わらず、中心部の居住者を減らし、郊外化を促進する制度・政策が併存している<sup>11)</sup>自治体が多く、法律上もまだ市街地調整区域での開発が可能である。コンパクトシティは「目的」ではなく、中心市街地活性化、環境負荷低減、行政コスト縮減、生活の質の向上など、おのおのの自治体が抱える課題を解決するための「手段」であり、その意味でも長期的な視点が重要であることを忘れてはならない。また、中山間地域は都市政策の範疇とは別の視点でとらえる必要があり、コンパクトシティで注目するのは都市の中の都心・駅周辺と郊外であることにも注意が必要である。

人口流入・増加が続くことを前提に形成される海外のコンパクトシティと比較すると、(自国内だけの)大きな人口減少・超高齢化社会ありきで語られる日本の集約型都市構造の形成もしくは賢い縮退(スマートシュリンク)の考え方は、世界的にかなり特殊な挑戦であることがわかる。「賢い縮退」の考え方を政府レベルで大規模に検討・実践している海外事例を見つけるのは難しい。そうした都市管理モデルは、まだ確立されていないともいえる<sup>10)</sup>。将来縮退する市街地を具体的に想定したコンパクトシティ像まで議論が進むと、途端に議論百出しまとまらないというのが現状である。即地的な是非のみならず、実現に至るいわばビジネスモデルがいまだ想定できていないことが大きな要因<sup>12)</sup>と指摘されている。また、人口減少過程では、中途半端な中心市街地への集約化、誘導政策を進めると、かえって都市のマネジメント費用を増大しかねない。ここには、プロセスの問題、居住地選択の問題などさまざまな問題を内包している。人口減少を前提とした都市空間の再編の可能性、手法などの提案、調査研究は課題の深刻さに比べて、まだ始まったばかりといえよう。世界最先端の研究課題でもある。まず、都市、地域空間の変動実態の解析、課題の解明、将来予測を進める必要がある<sup>6)</sup>。さらに、コンパクトシティを進めた際の行政コストの観点からは研究が行われてきており、国土交通省で

も行政コストを含むさまざまな評価指標が示されている<sup>13)</sup>。しかし、都市化した地域からの「撤退費用」の点については、ほとんど語られていない。ライフサイクルを終えた町の建築物やインフラを、そのまま打ち捨てておくわけにはいかない。地方財政の構造面ばかりではなく、都市・地域ランドスケープ・美観形成の観点からも、縮退の社会的価値を考える必要がある<sup>10)</sup>。

#### （5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・ 最近の再生可能エネルギーへの関心の高まりやスマートグリッド導入を考えると、既存の都市の構造の中で再生可能エネルギーをどう配置していくかという点で、コンパクトシティ政策とエネルギーとの関連はまだ研究の余地がある。
- ・ コンパクトシティはヒートアイランド現象を悪化させかねない<sup>7)</sup>という指摘もある。撤退した郊外を適切に緑化すれば気温上昇を抑えられるという研究結果もあり<sup>14)</sup>、都市の中の緑地配置を気象影響も考慮して設計していく必要がある。そのためには都市・地域計画の研究分野だけでなく領域気候モデルの研究分野との連携が必要である。また、ヒートアイランド現象は前述のエネルギー需要にも影響を及ぼしかねない。
- ・ 地球全体の気候変動との関連では、コンパクトシティは主に自動車依存低減によるGHG削減という気候変動に対する緩和策という面で着目されてきた。近年は気候変動により風水害が増加してきており、そのリスクが高い地区を避けて集約させるといった点では、気候変動への適応策にもなりうる。緩和策と適応策を考慮した土地利用という意味でのコンパクトシティに関する研究<sup>15, 16)</sup>はまだ始まったばかりである。一方で実務レベルではカナダで先進事例がある<sup>17, 18)</sup>が、評価や検証に関する研究が必要である。
- ・ 我が国では、東日本大震災以降、包括的な都市リスク管理の概念として「レジリエントシティ（Resilient City）」という標語も頻繁に使われるようになってきたが、海外の文献から、コンパクトシティの形成と防災の考え方の関係性を読み取るのは難しい<sup>10)</sup>。前述の気候変動適応策だけでなく防災分野全般という意味では、このような概念からのアプローチも重要である。我が国でも研究プロジェクト<sup>19)</sup>が進行しつつあり、世界をリードすることが期待される。
- ・ 経済成長の見込まれる開発途上国においては、自然を守りながら経済成長を促進するグリーン成長が重要であり、OECDでその一つの戦略としてコンパクトシティが位置づけられている<sup>7)</sup>。また、特に交通分野の低炭素化の戦略として、不必要な交通需要の抑制（AVOID）、低炭素交通モードへの利用転換（SHIFT）、交通エネルギー消費効率の改善（IMPROVE）の各戦略によるアプローチが提案されており<sup>20, 21)</sup>、コンパクトシティはAVOID戦略の一つとして位置づけられ、例えば、アジア地域で研究プロジェクト<sup>22)</sup>が行われた。また、国際的な取り組みとして、クリーン開発メカニズム（CDM：Clean Development Mechanism）に代わり開発途上国による適切な緩和行動（NAMA：Nationally Appropriate Mitigation Action）では、低炭素化に伴うコベネフィットを重視して各開発途上国が必要としている政策を提示する仕組み作りが進められており、先進国は財政、技術そして人材育成の分野でNAMA

への支援を行う。

(6) キーワード

コンパクトシティ、集約型都市構造、都市・地域計画、人口減少社会、超高齢化社会、  
インフラ整備・維持管理コスト削減、スマートシュリンク

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・サステイナブルシティやコンパクトシティ論を中心にその概念や論争などを検討した理論的な研究は、サステイナブルシティやコンパクトシティの考え方が出現した1990年代に多数みられ、その代表的なものとして林の研究<sup>23)</sup>があげられる。</li> <li>・日本で特にコンパクトシティという言葉が大きく取り上げられるようになってきた2001年から2002年にかけて、関連の学会誌や論文集に特集として取り上げられたり<sup>24-26)</sup>、学会でセッションが組み立てられるなど、コンパクトシティ導入の是非とその効果および留意すべき点について論争が繰り広げられた。</li> <li>・2001年にはコンパクトシティの取り組み状況と課題についてまとめた書籍<sup>4)</sup>が、2007年にはその続編として日本型コンパクトシティのあり方を提起した書籍<sup>5)</sup>がまとめられている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・近年も、さまざまな学会で再考すべき概念として特集<sup>27-32)</sup>が組まれている。</li> <li>・東京都市圏における私鉄沿線の高密度な土地利用は、コンパクトシティを意図していないが、結果的に公共交通志向型開発 (TOD: Transit-Oriented Development) となっている。</li> </ul>
	産業化	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・国土交通省東北地方整備局や中国地方整備局、そして自治体レベルでは青森市などの東北の都市を中心としてさまざまな行政主体がコンパクトシティ整備を推進する立場を明らかにした。</li> <li>・その後、ようやく中央省庁レベルで導入が検討され始め、2001年には都心居住の推進という形で国土交通省でもコンパクトシティの推進が示された<sup>33)</sup>。</li> <li>・富山市ではLRT (Light Rail Transit) を軸として居住地を誘導する政策を進めている。</li> </ul>
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・米国ではスプロールによる郊外への分散と都心の衰退が深刻化しており、直接的にはコンパクトシティを意図していないが、地域・都市圏レベルでの都市成長管理政策であるスマートグロースにコンパクトシティの概念が含まれている。</li> <li>・地区レベルの計画としては、TODの考え方が取り入れられてきた。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・農地保護の課題に直面していたポートランドでは、1970年代から州法により総合土地利用計画調整法を制定し、広域都市圏を構成する全市に都市成長境界線の採用を義務付けた。1994年には望ましい50年後の地域将来像を検討するためにPeter Calthorpeの協力で4つのシナリオを提示して住民の意見を求め、都市成長境界線の拡大を最小限に抑えた2040成長構想を作成した。ポートランドは現在も好事例として注目されている。</li> </ul>
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地域イノベーションクラスター・プログラムや持続可能な地域社会のためのパートナーシップ、地域再活性化イニシアチブなどの国レベルの政策が策定され、現在ではアーリントンやシカゴなどの多くの都市でコンパクトシティに相当する施策が進められている。</li> </ul>

欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>1990年、欧州委員会の「都市環境に関する緑書」により、サステイナブルシティが欧米の都市・地域計画の基本的なキーワードの一つとなったことに始まり、1998年に「EUにおける都市アジェンダに向けての意見書」が提出され、この中でサステイナブルな都市像としてコンパクトシティが推奨され、EUのコンパクトシティ推進の立場が明確にされた。</li> <li>英国のMike Jenks教授によるコンパクトシティ3部作<sup>34-36)</sup>に代表されるように、英国を始めとする欧州がこの分野をリードしてきた。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>英国やノルウェーではサステイナビリティの理念に対応して自動車依存型の都市をつくらないための方向性を示したガイダンスが示された。また、すでに廃止されているもののオランダではABCポリシーのように直接的に土地利用の高度化、コンパクト化を目指す試みもなされた。</li> </ul>
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>ドイツ、デンマーク、スウェーデン、フランス、スイスなど、多くの国でコンパクトシティの考え方が政策に取り入れられている。</li> <li>グリーンベルトの考え方をベースにスプロールを抑制し自然や農業を重視する政策や、高密度住宅地開発、都心での自動車流入抑制と歩行者・自転車空間を重視する政策、ブラウンフィールドの再開発、自動車に依存しない居住地開発など、国によりさまざまな政策が取り入れられている。</li> </ul>
中国	基礎研究	×	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>中国ではコンパクトシティは「緊湊城市」と訳され、欧州で始まり米国などで発展した理論として文献でも紹介されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>中国における都市化は急激に進行しており、各都市のコンパクト度や経済的持続可能性に関する研究が行われている。</li> </ul>
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>深セン市の光明新区やその他の都市の新都心でコンパクトシティの考え方が取り入れられているとされる。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>韓国でもコンパクトシティは欧州で始まった理論として紹介されている。</li> <li>1970年代からソウルを始めとする都市で、過剰な都市膨張と空地の消失を阻止するため、グリーンベルト政策が取り入れられてきたが、それがかえって都市内での住宅供給不足の原因になっており、近年になって境界の見直しが行われている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンパクトシティの概念は議論の段階ではあるが、政府は政策イニシアチブを打ち立てている。2011年に改訂された国土総合開発計画における都市戦略の中でコンパクトシティが明記されている。</li> <li>2010年の新都市計画基準では新都市における持続可能なグリーン成長を目指す都市、2009年の低炭素のグリーンシティのための都市計画ガイドラインでは、エネルギー効率のよい省エネ空間構造を達成するために交通政策を組み込んでアクセス性を向上させ、都市構造計画を再編成することとしている。</li> <li>2012年には国土海洋部 (MLTM) がOECDと共同で都市再生とコンパクトシティに関する国際会議を開催し、2013年からOECDと共同で韓国の都市へのコンパクトシティ政策の適用のための研究を行う計画であることを示した。</li> </ul>
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>ソンド新都市では都市機能を複合させ高度に集中させつつ、各種施設が全住民に近く移動がスムーズな効率的な都市を目指している。</li> <li>ソウルでも長期賃貸住宅を供給するSHIFT住宅プロジェクトが開始されている。</li> <li>韓国の実情に合わせた政策パッケージは十分に整備されておらず、今後の動向が注目される。</li> </ul>

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない  
 (註3) トレンド  
 ↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) 谷口守: 用語と解説「コンパクトシティ」, 交通工学, 37(2), pp.27-28, 2002.
- 2) Dantzig, G. B. and Saaty T. L. (監訳/森口繁一・訳/奥平耕造・野口 悠紀雄): コンパクトシティ -豊かな生活空間 四次元都市の青写真-, 日科技連出版社, 1974.
- 3) 中道久美子: 博士論文コンパクトシティ整備を通じた交通環境負荷低減策に関する総合的研究, 2009.
- 4) 海道清信: コンパクトシティ-持続可能な社会の都市像を求めて-, 学芸出版社, 2001.
- 5) 海道清信: コンパクトシティの計画とデザイン, 学芸出版社, 2007.
- 6) 海道清信: コンパクトシティ 第3回「コンパクトシティ その論点と課題」, 交通工学, 49(3), pp.56-61, 2014.
- 7) OECD: Compact City Policies -A Comparative Assessment-, OECD Publishing, 2013.
- 8) 谷口守・肥後洋平: コンパクトシティを再考する-最近の動向をふまえて-, 特集 コンパクトシティの現在, 土地総合研究, 春号, 土地住宅総合調査会, 2013.
- 9) PeBBu initiative: Domain 4- Performance Based Built Environment, Compact City, [http://www.reading.ac.uk/PeBBu/state\\_of\\_art/urban\\_approaches/compact\\_city/compact\\_city.htm](http://www.reading.ac.uk/PeBBu/state_of_art/urban_approaches/compact_city/compact_city.htm)
- 10) 村上迅: コンパクトシティ 第2回「コンパクトシティに関する海外での考え方と取り組み」, 交通工学49(2), pp.81-88, 2014.
- 11) 唐渡広志: 都市のコンパクト化は正当化できるか? : 郊外化と市場の失敗, 特集 コンパクトシティ, 日本不動産学会誌, 24(1), pp.23-28, 2010.
- 12) 中村英夫: コンパクトシティ 第2回「コンパクトシティ形成に向けた国の取り組み」, 交通工学, 49(1), pp.91-96, 2014.
- 13) 国土交通省都市局都市計画課: 都市構造の評価に関するハンドブック, [http://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/toshi\\_tosiko\\_tk\\_000004.html](http://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/toshi_tosiko_tk_000004.html)
- 14) Adachi, S. A., Kimura, F., Kusaka, H., Duda, M., Yamagata, T., Seya, S., Nakamichi, K. and Aoyagi, T.: Moderation of summertime heat-island phenomena via modification of the urban form in the Tokyo metropolitan area, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53(8), 2014.
- 15) Williams, K, Joynt, J. and Hopkins, D.: Adapting to climate change in the compact city: The suburban challenge, Built Environment, 36(1), pp.105-115, 2010.
- 16) 中道久美子, 山形与志樹, 瀬谷創: 東京都市圏の気候変動緩和・適応策の相互作用に関する土地利用シナリオのCO<sub>2</sub>排出量評価, 土木学会論文集D3, Vol.69, No.5, pp.I\_381-389, 2013.
- 17) Richardson, G. R. A. and Otero, J.: Land use planning tools for local adaptation to climate change. Government of Canada, 2012, <http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/files/landuse-e.pdf>
- 18) Smart Growth BC, British Colombia, <http://66.51.172.116/>

- 19) 環境情報技術を用いたレジリエントな国土のデザイン(研究代表者: 名古屋大学 林良嗣), 大学発グリーンイノベーション創出事業 グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス事業 環境情報分野,  
<http://www.sustrac.env.nagoya-u.ac.jp/grene/about.html>
- 20) Dalkman, H. and Brannigan, C.: Transport and Climate Change; Sustainable Transport, A Sourcebook for Policy-makers in Developing Cities, GTZ, 2007.
- 21) 中村英夫・林良嗣・宮本和明 (編著): 都市交通と環境―課題と政策, 運輸政策機構, 2004.
- 22) S-6-5アジアにおける低炭素都市・交通システム実現方策に関する研究(研究代表者: 名古屋大学 林良嗣), 環境省 環境研究総合推進費S-6,  
[http://2050.nies.go.jp/s6/theme/s\\_6\\_5\\_j.html](http://2050.nies.go.jp/s6/theme/s_6_5_j.html)
- 23) 林良嗣: 環境負荷削減のための都市の土地利用・交通政策, 環境研究, No.86, pp.66-73, 1992.
- 24) 日本不動産学会: 特集・都市のコンパクト化を考える, 日本不動産学会誌, Vol.15(3), 2001.
- 25) 交通工学研究会: 特集コンパクトな市街地と都市交通, 交通工学, Vol.37, 増刊号, 2002.
- 26) 日本都市計画学会: 特集: 人口減少化の居住と地域づくり. 都市計画. No.240. 2002.
- 27) 日本都市計画学会: 特集: 密度論再考. 都市計画. No.255. 2005.
- 28) 日本不動産学会: 特集コンパクトシティ, 日本不動産学会誌, No.92, 2010.
- 29) クッド研究所, 学芸出版社企画: 特集2 その後のコンパクトシティ, 季刊まちづくり, No.36, 2012.
- 30) 日本都市計画学会: 特集: 縮小社会における都市再編の手法〜コンパクトシティは実現可能か?. 都市計画. No.303. 2013.
- 31) 計画行政学会: スマートシュリンクとこれからの都市政策, 計画行政, Vol.36, No.4, 2013.
- 32) 日本地域開発センター: 特集 見えてきた!? 縮退時代のまちづくり, 地域開発, No.594, 2014.
- 33) 国土交通省社会資本整備審議会: 新しい時代に対応した都市計画はいかにあるべきか。(第一次答申),  
<http://www.mlit.go.jp/singikai/infra/toushin/images/04/021.pdf>, 2006.
- 34) Jenks, M, Burton, E. and Williams, K.: The Compact City: A Sustainable Urban Form? E&FN Spon, 1996.
- 35) Williams, K., Burton, E. and Jenks, M.: Achieving Sustainable Urban Form, E&FN Spon, 2000.
- 36) Jenks, M. and Burgess, R.: Compact Cities: Sustainable Urban Forms for Developing Countries, E&FN Spon, 2000.

### 3.4.1.3 モビリティとその管理

#### (1) 研究開発領域名

モビリティとその管理

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

人や物資のモビリティ（移動性）を支える交通・運輸部門は大量のエネルギー消費とインフラによって支えられており、大気汚染や騒音・振動の主因となっているとともに、温室効果ガス排出量も人間活動の約4分の1を占める。また、そのサービス利便性は国や地域の経済的・社会的持続可能性に影響を与える決定的要因の一つでもある。交通は交通主体（人や物資）・交通具（自動車や鉄道車両など）・交通路（道路や鉄道線路など）の3要素から構成され、それぞれについての研究の蓄積は膨大である。一方で、それら全体のシステムを検討する研究は必ずしも多くない。持続可能な社会を支える交通をつくり出すためには、システム全体を包括的に扱うフレームが必要である。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

##### 1. 交通を対象とした研究の従来動向

交通に関する研究を3要素それぞれから見た場合、交通主体に対しては主に経済学や地理学、心理学といった分野から、交通行動や交通網、交通活動が社会経済に与える影響といったさまざまな事象の調査分析が行われている。交通具については、自動車工学や鉄道工学といった、交通機関・手段ごとに発達した車両製造・維持管理を扱う工学分野があり、それを機械工学や電気工学といった基礎工学が支えている。また、交通路については土木工学の領域である。このように交通に関する学問分野は極めて多岐にわたっている。

また、多数の交通路から構成される交通網の整備や維持管理は国・自治体の基本的な事業の一つであり、その整備計画策定にかかる調査分析や策定手法、実施方法、評価といった観点から研究が進められてきている。主なアプローチとして、オペレーションズ・リサーチのような数理計画的手法、実態の調査分析をベースとする土木計画的手法、経済理論を交通部門に応用して分析を行う経済学的手法があげられる。これらは、交通主体の行動状況と、交通網の整備状況との相互関係を扱うものであるが、交通具については所与のものとして扱われるのが一般的である。また、交通活動の大半は他の活動に付随して生じる派生需要であるため、経済や人間活動のメカニズムの中で論じられることも多い。また、鉄道や航空、海運といった運輸産業は交通網と交通具を合わせもって計画し経営することから、その具体的な方法論が主に経営学の分野から研究されてきた。

##### 2. 交通部門の環境負荷・エネルギー消費に関する研究

交通活動はそのエネルギーを人力・畜力から化石燃料や電力に転換したことで、飛躍的なモビリティを提供できるようになったが、それと引き替えに環境負荷発生や化石燃料枯渇といった問題に寄与する運命となった。日本では1970年代後半から、自動車や鉄道による公害問題が深刻となり、その対策を検討すべく研究が集中的に行われた。モータリゼーション進展が日本より早かった欧米諸国ではより早く問題が生じたが、日本は

土地利用規制が緩く、幹線交通路のすぐ近くに密集市街地があるような地域が大都市を中心に多数あるため、被害がより深刻であった。同様の状況にあったのが米国カリフォルニア州である。対応として、厳しい大気汚染物質排出規制を車両に課すことが行われ、それをクリアするためのエンジンや排出装置といった部分の技術開発が大きく進んだ。その後、燃費向上や二酸化炭素排出削減が強い社会的要請となったが、現在でももっともその対応に大きく貢献しているのは車両革新であり、それを支えるのが車両に関する工学の進展である。自動車のシェアが高いために化石燃料への依存が極端に強いのが交通部門の特徴であったが、近年ではバイオエタノールの導入や、電気自動車・燃料電池自動車などの新エネルギー自動車も実用段階に入ってきている。

一方、自動車への依存を減らすという選択肢もある。モータリゼーションは環境・エネルギー問題のみならず、渋滞や都市拡散、交通事故といった負の効果をもたらすという観点から、大量輸送手段や徒歩・自転車による代替を図るというものである。ただし、これを実際に効果的に機能させるためには、これらの交通手段の利便性を自動車に対抗できるよう高めることが必要である。ヨーロッパでは鉄道・路面電車・バスという従来型交通機関を乗り越え、費用対効果や都市活性化へのインパクトの観点から洗練されたLRT（Light Rail Transit）<sup>1,2)</sup>やBRT（Bus Rapid Transit）<sup>3)</sup>という新しい交通機関が生まれ、開発途上国を含め世界に広がりつつある。このような交通路・交通具改善に関する研究が行われるとともに、社会心理学的手法を応用して交通主体の考え方を変容させるモビリティ・マネジメントの研究も近年進展している。さらに、交通需要発生状況を規定する都市・地域の構造も変えていく必要があるが、これに関連するコンパクトシティなどの動向は別項に譲る。

環境負荷発生・エネルギー消費量削減技術・施策の評価においては、その科学的な効果推計手法が必要であり、研究が進んでいる。国や都市レベルでの評価については方法論の整備や適用が進んでおり、政策目標のモニタリングにも用いられるようになりつつある。交通量・状況を推計した上でそれに環境負荷発生・エネルギー消費量原単位を乗じる構造が一般的である。交通計画・交通工学分野で開発が進められてきた交通需要予測モデルを応用するものと、産業連関分析や応用一般均衡分析といった経済学的手法を用いて、他の活動との代替・補完関係を考慮して交通活動量を推計するものがある。前者は交通サービスレベル変化の詳細な検討に、後者はリバウンド効果など、交通活動の変化が他の活動に及ぼす影響を含めた検討に適している。

交通具や交通路の環境負荷・エネルギー面からの評価手法としてライフサイクルアセスメント（LCA：Life Cycle Assessment）の適用も行われている。例えば、自動車は多数の部品を組み立てて製作することから、各部品の原材料採取・輸送や製造工程における環境負荷発生やエネルギー・資源消費の把握も丹念に行うことが必要である。また、走行時の環境負荷削減を意図する設計はしばしば製造・組み立て時の環境負荷増加を伴うことから、その包括的評価にも適している。LCAの普及によってデータベースが充実し、交通具の環境負荷やエネルギー・資源に関するインベントリ（目録）整備も可能となってきた。この情報を広く開示したり、環境負荷削減策の検討に用いたりする例が増加してきている。また、交通路はその建設時、および主な資材である鋼やコンクリートの製造時に膨大な二酸化炭素排出とエネルギー消費を伴うことから、その推計評価手法

開発も行われており、特にLCAの適用は日本でいち早く研究が進んでいる。交通路の計画・設計は供用後の交通需要（交通主体の行動決定）や交通具の挙動に影響を与えることで環境負荷・エネルギーを長期的に大きく変化させることがあり、その把握も含めたLCA手法の開発も行われている<sup>4)</sup>。

### 3. 近年における主要な課題

環境・エネルギーのみならず交通活動自体の社会経済的パフォーマンスを最適化することを意図した交通システムの変革への分野横断的取り組みが近年注目されている。その主な牽引力がICTである。交通においては、ICTを代替サービスと見る場合と補完サービスと見る場合がある。前者については、通信の発達でフェイストゥフェイスのコミュニケーションが不要となり交通需要が減少するという考え方と、むしろ交流が活発化し交通需要が増加するという考え方が存在するが、最近では日本で若年層の自動車保有が減少するなど、前者の傾向が現れつつある。ICT分野ではこれを環境負荷・エネルギー削減効果として扱う場合もある。一方、ITS (Intelligent Transport Systems) 技術によって交通活動を最適化する取り組みは先進国で精力的に研究開発と実用が進んでいる<sup>5)</sup>。その中で渋滞緩和やエコドライブ支援といったアプローチで環境負荷・エネルギーを削減する研究も行われている。日本ではETC (Electronic Toll Collection System) やVICS (Vehicle Information and Communication System) 導入による削減効果がすでに検証されており、環境負荷を削減できる経路や交通機関選択を案内するナビゲーションシステム、環境負荷の小さい公共交通や自動車・二輪車シェアなどに誘導する情報提供も進められている。

さらに、ICT活用をさらに進め、交通需要の適切な削減と、交通整流化による利便性・安心安全性向上を総合的に進める構想も、都市スマート化の一つの具体的取り組みとして先進国を中心に急速に進んでいる。それらの特徴は、従来あまり行われてこなかった交通具に関する分野と交通路に関する分野との協働である。一つの大きな目標は自動車の自動運転であるが、これを実現するためには車両技術はもとより、道路整備や交通管制技術の見直し、道路・沿道状況のデータベース化も必要である。このような取り組みを通じて、交通で結ばれるリアルな空間と、ICTで結ばれるバーチャルな空間が渾然一体となっていくことが見込まれる。

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

第一に、関連分野が多岐にわたっており、その間の障壁が高いことがあげられる。日本でも交通に関する学際的な学会は存在しておらず、既存学問分野から派生した学会が多数ある状態で、近年重要になっている交通システム全体を包括的にとらえ見直す取り組みに十分対応できない。特に交通路関連研究と交通具関連研究の間の交流が薄いため、新しい交通具の開発が交通路側の対応を経て実用化に至るまでの間の困難となっている。例えば、電気自動車や燃料電池自動車は充電・水素ステーションの整備が、新しい公共交通システムも軌道が整備されないと実用に至らない。ITSについては横断型でのITS世界会議が組織化されているが、学会というよりコンソーシアム的な存在である。また、交通政策は多数のステークホルダーが関わり、特に交通路関連研究は国・自治体や交通

事業者の関心が高いはずであるが、研究と実務の間に距離がある。対象地区を決めて関連分野が一堂に会し協働するプロジェクトベースでの研究が必要と考えられる。

#### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

交通分野の研究では基礎データを得るための実態把握や意識調査などに膨大な費用と時間を必要とすることが問題であったが、近年ではGPS・携帯情報端末やセンシング技術、ICカードの普及によって、大量のデータを容易に収集することができるようになった。これらのビッグデータを解析し活用する技術の進歩が求められている<sup>6,7)</sup>。また、自動運転やスマートシティの実現に向けたさまざまなビッグプロジェクトが各国で進んでいる<sup>8)</sup>。これらは環境負荷・エネルギー削減を目的の一つとしており、プロジェクト実施によって開発されるさまざまな周辺技術による効果も期待できる。

LRT・BRTを中心とした費用効率性の高い公共交通の普及は、欧米はもとより開発途上国で現在急速に広がっている。渋滞対策や都市開発が主な目的であるが、環境・エネルギー面での効果も期待され、特にアジア地域では膨大な効果が見込まれる。開発途上国による適切な緩和行動（NAMA：Nationally Appropriate Mitigation Action）の案件としても注目されており、そのプロジェクト提案や認証手続きにも資することが期待される<sup>9)</sup>。

#### （６）キーワード

ITS（Intelligent Transport Systems）、スマートシティ、自動運転、ICT、電気自動車・燃料電池自動車、LRT（Light Rail Transit）・BRT（Bus Rapid Transit）、ビッグデータ

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・車両技術、交通工学・計画手法とその環境・エネルギー分析への応用に関する研究は厚みがある。
	応用研究・開発	△	→	・各分野の厚みに比べ横展開が弱いのが問題。制度や財源の問題もあって実用になかなか至らない。
	産業化	○	→	・自動車関連については着実に進展しているが、新エネルギー導入についてはまだ実証段階。 ・公共交通については散発的な取り組みにとどまり、他国から取り残されている。他国への輸出競争力もない。
米国	基礎研究	○	→	・自動車・道路系だけでなく公共交通の研究も近年増えてきているがまだ弱い。
	応用研究・開発	○	→	・ITS・自動運転の分野で着実に進展。
	産業化	○	↑	・ICT関連分野が主導しスマート化の新しい流れをつくりビジネスを起こしている。ただし、有意な環境負荷削減効果を見せるまでには至っていない。
欧州	基礎研究	○	→	・環境分野に関しては先進的。ソフト技術の検討も進んでいる。
	応用研究・開発	○	→	・低環境負荷・省エネルギー型交通システムのソリューションを提示する実践的研究の場が多く、プロジェクトも多数行われている。
	産業化	◎	↑	・国・自治体の都市・交通政策として定着しており、新たな実践が次々に行われている。また、公共交通運営のノウハウをもつ国際企業も現れている。二酸化炭素排出大幅削減を達成する事例も多数。
中国	基礎研究	△	↑	・先進国の後追いの段階にある。新しい知見を生み出すレベルに至っていない。
	応用研究・開発	○	↑	・膨大な交通需要やそれに伴う環境・エネルギー問題に対応する観点から、実務的な研究が多数実施。
	産業化	◎	↑	・巨大な投資をバックに、先端的なプロジェクトが多数進む。ただし、環境・エネルギー面での検討はまだ十分な状況ではない。
韓国	基礎研究	○	→	・交通システムに特化した研究機関があり、日本に比べて組織的。
	応用研究・開発	○	→	・環境・エネルギー関係については他国に比べて進んでいるという状況ではない。
	産業化	○	→	・ソウルの都市圏交通システムや環境復元の取り組みは先進的として有名。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## （8）引用資料

- 1) 青山吉隆：LRT導入の課題と展望、国際交通安全学会誌 Vol.34, No.2、pp.6-10  
<http://www.iatss.or.jp/common/pdf/publication/iatss-review/34-2-01.pdf>
- 2) 松橋啓介、工藤祐揮：低炭素都市の実現に向けたLRTの役割、国際交通安全学会誌 Vol.34, No.2、pp.39-46  
<http://www.iatss.or.jp/common/pdf/publication/iatss-review/34-2-05.pdf>
- 3) 国土交通省：BRTの導入促進等に関する検討会 資料（2013年10月）  
[http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha\\_tk1\\_000011.html](http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_tk1_000011.html)
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所道路交通研究部道路環境研究室：社会資本のライフサイクルアセスメント（ポータルサイト）  
<http://www.nilim.go.jp/lab/dcg/lca/top.htm>
- 5) 野崎敬策：中長期ITS推進の動向と展望：環境(EST)ITSと防災・災害ITS、電子情報通信学会技術研究報告、ITS 111(219), 49-56, 2011
- 6) 国土交通省道路局道路交通管理課ITS推進室：ビッグデータを活用した道路行政の展開～IT技術によって道路ネットワークを賢く使う～、道路、Vol.877（2014年4月号）、pp.12-15
- 7) 馬渡真吾：道路交通分野のビッグデータ活用 米国におけるビッグデータへの取組～、道路、Vol.877（2014年4月号）、pp.28-31
- 8) 内閣府政策統括官（科学技術・イノベーション担当）：戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「自動走行システム」研究開発計画（2014年5月23日）  
[http://www8.cao.go.jp/estp/gaiyo/sip/keikaku/6\\_jidousoukou.pdf](http://www8.cao.go.jp/estp/gaiyo/sip/keikaku/6_jidousoukou.pdf)
- 9) 国際協力機構：気候変動対策支援ツール／緩和策 Ver. 2.0（2014年3月）  
[http://www.jica.go.jp/activities/issues/climate/mitigation\\_j.html](http://www.jica.go.jp/activities/issues/climate/mitigation_j.html)

### 3.4.1.4 安全な水の供給（水道と安全性確保）

#### （1）研究開発領域名

安全な水の供給（水道と安全性確保）

#### （2）研究開発領域の簡潔な説明

安全な水の供給は、健康な生活と健全な社会活動の維持に不可欠であるが、多方面で困難な課題に直面している。それらを包括的に解決し、安全な水供給を将来にわたり安定して継続するには、限りある資源と資産をいかに効率的かつ持続的に利用し、どのような方法論で的確に水の安全性を担保するかが鍵となる。水循環の中で水供給をとらえる系統的な研究と、水道の安全性を科学的かつ国民が理解しやすい形で管理する方法論の確立が求められる。

#### （3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

我が国の水道システムが抱える課題は、大きく以下に集約される。

##### 1. 水量に関わる課題

水資源の時間的・空間的な偏在、不安定化（豪雨・渇水の増加、降水・融雪パターンの変化）

##### 2. 水質に関わる課題

原水水質の低下、汚染物質の多様化、水の安全性やおいしさに対する要求水準の高まり

##### 3. 危機管理に関わる課題

大規模災害など非常時への備え、故障やヒューマンエラーへの備え

##### 4. 経営に関わる課題

施設維持更新費の増大、水需要量の減少に伴う事業収入減、技術者不足

水資源の偏在や不安定化をふまえて水利用の効率化が求められる中、第4期科学技術基本計画では、グリーンイノベーション推進のための重要課題の一つとして水循環システムの持続性強化を掲げている。また、水循環基本法が成立し、その効果的運用へ向け実効的な法整備が待たれている。したがって、水道システムを水循環の一部として俯瞰的にとらえ、その文脈の中で水供給のあるべき姿を探求するための知識の集積、技術開発、体制作りが求められる。具体的には、水循環サイクルにおける重要管理点の抽出と重要度の順位付け、安全な水供給の観点からみた水循環スケールの最適化、水道事業と下水再生事業の連携（革新的水処理技術の共同開発、戦略的な用途振り分け、料金体系の相互調整、実務者の相互研修など）に関する研究と、その成果を社会実装に結びつける政策的枠組みの構築が望まれる。

我が国の水道水の安全性は、水道水質基準を満たすことで担保されている。基準値は項目ごとに固有の数値で規定され、事業者は試験時に全水質項目が基準値以下であることを根拠に水の安全性を担保している。一方、水質は時々刻々と変動するという認識の下、基準値に統計的概念を取り入れる国もある。例えば米国では、急速ろ過法のろ過水濁度について、4時間ごとの測定データの毎月の最大値が1 NTU（Nephelometric

Turbidity Unit) 以下、かつ95%値が0.3 NTU以下を維持するよう規定している<sup>1)</sup>。水質が常に変動することは自明であり、日本でも同様の運用が水道水の安全性向上に寄与するか、国内の実測値に基づいて議論する必要がある。具体的には、過去の膨大な水質データを解析し水質の変動幅について統計的に調査する研究や、水質の常時監視を国内多地点で実施しデータを一元的に解析する大規模な研究協力体制の構築が望まれる。

水道を介した健康被害の多くは感染症であり、微生物の制御は今なお浄水処理の最重要課題である。水中の病原微生物は多種多様であり、特定の指標細菌の挙動だけで安全性を担保するには限界がある。近年、欧米では、定量的微生物リスク評価（QMRA：Quantitative Microbiological Risk Assessment）の概念が重要視されている。QMRAとは、人が微生物に曝露し健康を害するリスクを数学的に推定する手法である。オランダでは、1万人に一人の感染（ $10^{-4}$ の感染確率）は社会的に許容すると定め、水道水質基準に「QMRAによって腸管系ウイルス、クリプトスポリジウム、ジアルジアなどの年間感染リスクが $10^{-4}$ 以下と評価されること」と明示し、実務者が扱いやすいソフトウェアをツールとして配布している<sup>2)</sup>。日本でも同様の微生物リスク管理を目指すのか、その有効性や実務上の課題について、知見の集積が望まれる。その際、社会的に許容するリスクレベルに関する国民的な議論と理解が不可欠であり、そのための教育、啓発、情報提供のあり方などについて、リスクコミュニケーション研究など社会科学との連携が有効と期待される。

厚生労働省が示した新水道ビジョン<sup>3)</sup>では、水道の理想像として安全・強靱・持続を掲げている。強靱な水道とは、危機管理能力に優れたシステムを意味し、①非常時に速やかにもとのシステムを復旧できること、②非常時に利用可能な応急的設備を備えていること、③平時から複数の要素技術を併用しリスクを分散しておくこと、などの策があげられる。③はマルチバリア方式と呼ばれ、欧米など多くの国で重要な概念となっているが、日本では、浄水場への自家発電装置の導入など②の対策を手厚くする傾向があり、マルチバリア方式はむしろ無駄の多いシステムとして敬遠される傾向がある。リスク管理の観点からマルチバリアの強みは明らかであり、日本でもシステムの冗長性を許容する可能性と適切な許容幅（無駄と安全確保をどう線引きするか）について研究が求められる。さらに、水道システムの強靱さを比較可能な形で数値化し、直感的に理解しやすい形で国民に伝える方法論の確立が望まれる。

水道事業経営上の課題も顕在化している。日本の水道インフラの多くは高度経済成長期に整備されており、それらが一斉に更新時期を迎えている<sup>4)</sup>。一方、人口減少に伴う水道事業の収入減は避け難く、施設更新費を賄えない恐れがあり、特に中小規模の事業者でその懸念が大きい。施設の老朽化による漏水などの事故は、貴重な浄水を浪費するだけでなく、突然の断水・浸水などで社会生活に重大な影響を及ぼす恐れがある。よって、既存施設の戦略的な維持管理とスマートな縮小のための研究、具体的には、水道施設のダウンサイジング方法論の確立、施設更新計画立案支援ツールの開発、施設の長寿命化技術の開発などが望まれる。

国内の水道施設は更新需要が主となる中、日本の技術開発の停滞を避け技術者を持続的に養成するには、国外市場の開拓が有効である。ビジネスと国際協力を両立し日本と相手国にWin-Win関係を構築できる可能性もある。現在、浄水膜など一部の要素技術に

において日本の国際的評価は高いものの、施設の計画から保守まで含めたトータル水道システムとしての国際展開に日本は苦戦している。今後は、既存要素技術の改良や革新的新技術創出のための基礎研究を継続する一方で、日本に強みのある技術の国際規格化（ISO取得）や水道システムのパッケージ化など、国際競争力を高める取り組みが求められる。欧州では、水分野のイノベーションを加速させ研究・ビジネス・市民社会を結びつけることに特化した組織として2013年に欧州水イノベーション・パートナーシップ<sup>5)</sup>を発足しており、その効果や限界を分析することで、日本に有用な知見が得られる可能性がある。

以上より、安全な水供給の観点から研究開発が特に望まれる分野として以下があげられる。

1. 水循環を意識した水供給システムの構築と貴重な水資源の効率的利用
2. 水道水の安全性を担保する方法論の見直しと危機管理の強化
3. 水道施設の維持更新支援とスマートな施設縮小の方法論の確立
4. 日本発の水技術・水システムの国際競争力強化

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

日本の水道水質基準は、2003年に大幅改定が行われ、その後も最新の知見に照らして逐次改正が行われているが、基準設定の根本的な枠組み（スキーム）は制定以来変わらず、許容できる上限を固有値で示し、その値以下であれば安全とのロジックで運用されている。しかしながら、統計的推計や数値モデルの適用など、合理的なリスク管理手法がすでに開発されており、水道水の安全性を担保する方法論のパラダイムシフトを議論する時期に来ている。また、近年、リスク評価上は重大でないと推定される水質基準超過が給水停止につながり多大な社会的損失を生じる事態も発生しており<sup>6)</sup>、水道水質基準のスキーム再考と併せてその運用のあり方まで踏み込んだ検討が求められる。

水道システムを水循環の一部としてとらえることの重要性は学術的にすでに広く認識され、先行研究プロジェクトも存在するが、水道、下水道、環境水（河川・湖沼・地下水）、農業用水が厚生労働省、国土交通省、環境省、農林水産省に分割管理され、知見や統計も分散して存在するため、領域横断的な研究に取り組みにくい実態がある。よって、政策的課題として、水関連統計データの一元管理とデータベース化、水関連予算の府省を超えた流動化、共通ウェブサイトの開設と情報発信、関連府省共催による水シンポジウムの定期開催など、実効力のある水関連府省の連携強化が求められる。

#### (5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

欧州では、2007-2013年のEU第7次フレームワーク・プログラムによる水関連事業への助成総額が10億ユーロを超えている<sup>7)</sup>。また、2014年からスタートした新助成プログラムHorizon 2020では、安全で豊富な水供給の確保が主要課題とされ、第一回公募で1億6,500万ユーロ近くが水関連事業に配分される見込みである<sup>7)</sup>。

中国では、「国家中長期科学技術発展規画綱要」で制定する国家プロジェクトの一つとして、対象課題241件、公的資金投入額33.5億元の水プロジェクトを実施中である。研

究領域はモニタリング早期警戒、都市、湖、川、飲用水、政策の6分野で、水処理技術のボトルネックを解消し、重点流域を対象に水質改善、水源保護、水環境の浄化などに取り組むとしている。6分野いずれもすでにプロジェクトの第一段階を完了し、技術開発1,000件超、国内外の特許取得1,733件など、顕著な成果をあげている<sup>8)</sup>。また、まもなく施行される水質汚染防止行動計画(水十条)への総投資額は2兆元超と報道されている<sup>9)</sup>。中国では、水が将来の経済発展を制約しかねないとの危機感が強く、水処理研究への国家的投資は増大し続けている。

日本では、2009年度よりJSTが戦略的創造研究推進事業としてCREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究領域<sup>10)</sup>を推進し、浄水技術や水資源管理システムの開発に加え、水循環の文脈の中でその社会実装の提案を目指している点が特筆に値する。また、2014年度に創設された戦略的イノベーション創造プログラムでは「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」<sup>11)</sup>を課題とし、情報通信・ロボット技術の活用による国内インフラの高水準での維持、魅力ある維持管理市場の創造、海外展開の開拓を目指すとしており、安全な水供給の持続性を論ずるうえで注目に値する。

### (6) キーワード

水循環、安全、水道水質基準、リスク評価、施設維持更新、国際水ビジネス、府省連携

### (7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>産学がそれぞれまたは連携して基礎研究を継続。</li> <li>浄水膜など一部の要素技術で国際的評価が高い。</li> <li>省エネルギーや低CO<sub>2</sub>排出など環境関連技術で国際的評価が高い。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>要素技術の開発と社会実装の乖離が課題。</li> <li>国内最大規模の実証実験施設ウォータープラザが稼働し、官民が連携して先進的水システムの開発・評価・情報発信を本格化<sup>12)</sup>。</li> </ul>
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>ウォータープラザが水ビジネスの国際戦略拠点として機能<sup>12)</sup>。</li> <li>チーム水・日本としてオールジャパン体制での国際ビジネスを展開<sup>13)</sup>。</li> <li>大学や研究機関に産学連携や特許取得の支援組織を設置する動きあり。</li> </ul>
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>安全管理に統計的概念やリスク管理手法を取り入れる素地があり、QMRAの社会実装実現に特化した専門機関CAMRA (Center for Advancing Microbial Risk Assessment) が存在。</li> <li>省エネルギーや低CO<sub>2</sub>排出の技術で欧州や日本に遅れ。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>水とエネルギーの強靱なシステム構築のため府省連携や産学NGOの連携に努力<sup>14)</sup>。</li> <li>気候変動適応策として新規インフラ開発と既存インフラ強化を推進中<sup>15)</sup>。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>国際ビジネス展開で欧州水メジャーに遅れ。</li> <li>伸びる産業を重点的に育成する政治的合意形成がなく、国家安全保障や医療の向上という目標達成の一手段として水産業を支援<sup>16)</sup>。</li> </ul>

欧州	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>水関連研究に多額の公的資金を投入(2007-2013年で10億ユーロ超、2014年の新プログラムで年間1億6,500万ユーロ)<sup>7)</sup>。</li> <li>ドイツでは、2014年に新研究助成プログラムを開始し、浄水施設の省エネルギー推進技術の開発、浄水プロセスからエネルギーを生産する研究など、12プロジェクトに2,700万ユーロを支援<sup>17)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>オランダ応用科学研究機構(TNO)によるタンザニアでの分散型地下水処理技術提案<sup>18)</sup>など、EU圏の内外で実証試験を多数実施。</li> <li>細菌のリアルタイム検出<sup>19)</sup>など、実務ニーズをふまえた測定技術を開発。</li> </ul>
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>水分野の研究・ビジネス・市民社会を結びつける目的で2013年に欧州水イノベーション・パートナーシップ(EIP Water)を発足<sup>5)</sup>。</li> <li>フランスでは、宇宙研究との連携による水産業創出を支援。新産業創出が有望な分野として、増水予知、河川航行支援、地表水の効率管理、疫病の感染防止などを特定<sup>20)</sup>。</li> <li>ドイツでは、2008年に公的資金を投入して水産業支援NGO(German Water Partnership)を設立し、会員企業間の連携と情報共有を推進<sup>21)</sup>。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>水関連プロジェクトへの国家投資が多額。公的資金33.5億元を投資した大規模水プロジェクトでは、モニタリング早期警戒、都市、湖、川、飲用水、政策などの全6研究領域に取り組み、国内外の特許を1,733件取得<sup>8)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>突発的水環境リスク評価早期警戒技術システムを開発し、水源から蛇口まで、システム管理、早期警戒、モニタリング技術の研究開発を強化<sup>22)</sup>。</li> </ul>
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>水資源の汚染や不足が経済発展の制限になりかねないとの危機意識のもと、水関連の技術開発と産業化に公的資金を投入<sup>8)</sup>。</li> </ul>
韓国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>国をあげて水研究を支援。ECO-STAR(2004-2011)、SEAHERO(2007-2012)、Blue Water &amp; Green Energy、Eco-Smart(2011-2022)、G-Best(2011-2016)など、水関連の大規模国家プロジェクトを連動させ、多くは基礎研究から応用、産業化まで支援<sup>21, 23)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎研究を統轄する基礎技術研究会と、応用・産業技術研究を統轄する産業技術研究会を統合し、国家科学技術研究会を発足<sup>24)</sup>。</li> </ul>
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>強力な国家支援による水企業育成(ドーンソン、Kウォーターなど)<sup>23)</sup>。</li> <li>ODAによる水関連フィージビリティスタディとプロジェクト実施<sup>21)</sup>。</li> <li>「研究開発サービス業振興法」の制定に向けた動きを本格化。営利目的の研究開発サービス業を支援するため、政府が5年ごとに振興基本計画を策定するほか、専門担当者養成機関、研究開発サービス業協会などを設立する予定<sup>25)</sup>。</li> </ul>

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発(プロトタイプの開発含む)のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル(環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況(大幅に改善された/悪化しているなど)、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。)

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) 米国環境保護庁 (EPA), Comprehensive Surface Water Treatment Rules Quick Reference Guide: Systems Using Conventional or Direct Filtration.  
[http://www.epa.gov/ogwdw/mdbp/pdfs/qrg\\_mdbp\\_surfacewatertreatment\\_convent\\_direct.pdf](http://www.epa.gov/ogwdw/mdbp/pdfs/qrg_mdbp_surfacewatertreatment_convent_direct.pdf)
- 2) 伊藤禎彦, オランダの水道事情, 空気調和・衛生工学, 85巻9号, p.9-16, 2011.
- 3) 厚生労働省, 新水道ビジョン, 2013.  
<http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/newvision/dl/newvision-all.pdf>
- 4) 国土交通省, 日本の水資源, 2014.  
[http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo\\_mizsei\\_fr2\\_000012.html](http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_fr2_000012.html)
- 5) 欧州水イノベーション・パートナーシップ (EIP Water) .  
<http://www.eip-water.eu/>
- 6) 厚生労働省, 水道水源における消毒副生成物前駆物質汚染対応方策検討会資料.  
<http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000002gthr-att/2r9852000002gtmb.pdf>
- 7) JST CRDS デイリーウォッチャー, 欧州委員会プレスリリースにもとづく記事.  
<http://crds.jst.go.jp/dw/20140212/201402121214/>
- 8) JST CRDS デイリーウォッチャー, 中国科学報ネット版ニュースにもとづく記事.  
<http://crds.jst.go.jp/dw/20140606/201406061574/>
- 9) JST CRDS デイリーウォッチャー, 中国科学報ネット版ニュースにもとづく記事.  
<http://crds.jst.go.jp/dw/20140718/201407182417/>
- 10) JST CREST 「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究領域.  
<http://water.jst.go.jp/>
- 11) 内閣府, 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」研究開発計画.  
[http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/7\\_infura.pdf](http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/7_infura.pdf)
- 12) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), NewsRelease.  
[http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_0458A.html](http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_0458A.html)
- 13) チーム水・日本.  
<http://www.waterforum.jp/twj/>
- 14) 米国エネルギー省 (DOE), Ensuring the Resiliency of Our Future Water and Energy Systems.  
<http://www.energy.gov/articles/ensuring-resiliency-our-future-water-and-energy-systems>
- 15) 米国大統領府報道官室, FACT SHEET.  
<http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2014/07/16/fact-sheet-taking-action-support-state-local-and-tribal-leaders-they-pre>
- 16) 経済産業省, 産業技術調査事業報告書, 2013.  
[http://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2013fy/E002789.pdf](http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2013fy/E002789.pdf)
- 17) JST CRDS デイリーウォッチャー, ドイツ連邦教育研究省報道発表にもとづく記事.  
<http://crds.jst.go.jp/dw/20140423/201404231370/>

- 18) JST CRDS デイリーウォッチャー, オランダ応用科学研究機構ニュースにもとづく記事.  
<http://crds.jst.go.jp/dw/20130913/20130913885/>
- 19) JST CRDS デイリーウォッチャー, 欧州共同体研究開発情報サービスにもとづく記事.  
<http://crds.jst.go.jp/dw/20140624/201406242269/>
- 20) JST CRDS デイリーウォッチャー, フランス国立宇宙研究センター報道発表にもとづく記事.  
<http://crds.jst.go.jp/dw/20131105/201311051022/>
- 21) NEDO報告資料.  
<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g100115c05j.pdf>
- 22) JST CRDS デイリーウォッチャー, 中国科学報ネット版ニュースにもとづく記事.  
<http://crds.jst.go.jp/dw/20140609/201406091578/>
- 23) グローバルウォータージャパン連載記事.  
<http://gwaterjapan.com/writings/1211eneco.pdf>
- 24) JST CRDS デイリーウォッチャー, 在韓日本大使館情報にもとづく記事.  
<http://crds.jst.go.jp/dw/20140707/201407072465/>
- 25) JST CRDS デイリーウォッチャー, 在韓日本大使館情報にもとづく記事.  
<http://crds.jst.go.jp/dw/20140709/201407092463/>

### 3.4.1.5 水環境管理（下水道、浄化槽、湖沼、水辺創造など）

#### （1）研究開発領域名

水環境管理（下水道、浄化槽、湖沼、水辺創造など）

#### （2）研究開発領域の簡潔な説明

持続可能な水資源の確保のための、下水道、浄化槽のような汚水処理技術の開発・評価、都市および流域レベルでの管理に関する研究開発領域である。

#### （3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

水環境管理における主要な対策の一つとして、大型の集中処理システムである下水道は、大都市や人口密集地域において有効に機能しており、下水道技術は成熟しつつある。2014年7月には新下水道ビジョン<sup>1)</sup>がとりまとめられた。ここでは、循環型社会、強靱な社会、新たな価値の創造、国際社会などがキーワードとしてあげられており、実際、標準活性汚泥法のような通常の有機物除去から、窒素・リン除去などの高度処理、膜を利用して水循環を促進する膜分離活性汚泥法（MBR：Membrane BioReactor）などが普及しつつある。アナモックスプロセスのような新しい処理技術も実証段階にあり<sup>2)</sup>、さらには、メタン、一酸化二窒素のような排水処理由来の温室効果ガスの排出削減や2011年の東日本大震災を契機とした災害対応の研究・実装が進められている<sup>3-5)</sup>。ただし、人口が想定よりも少ないと費用を使用料で賄うことは難しく、一般財源が投入されているのが現状であり、今後の人口減少に伴う財源の確保やコスト削減のためのアセットマネジメントが盛んに検討されている<sup>6)</sup>。一方、分散型処理システムである浄化槽は、コンパクト化を中心とした研究開発がなされており、欧州の類似技術と比べても十分に小さく、単独処理浄化槽と同等程度の大きさになりつつあることから、単独処理浄化槽の合併転換の政策的な後押しが期待されている。また、震災時にも被害が極めて少ないことが報告されており、災害対応としての浄化槽研究も進められている<sup>7,8)</sup>。さらに、近年では、気候変動の緩和と適応、低炭素・資源循環・自然共生の社会創りなどの観点からも研究が進められつつある<sup>9)</sup>。

海外に目を向けると、上下水道サービスの国際規格（ISO 24510～24512）が発行されるなど<sup>10, 11)</sup>、グローバル化が進んでいる。アジア、アフリカを中心として水環境管理、排水処理のニーズが高く、大都市では下水道の導入に向けた試みがなされている。課題としては、下水道サービスを持続的に提供するための経済的な裏付けの確保に加え、ランニングコスト低減のための省エネ技術、多くの大都市が位置するデルタ地帯での下水道管きょ敷設の技術的な課題や維持管理の技術移転などがあげられる。さらに、上下水道サービスを扱うISOの委員会（ISO/TC 224）では、傘下にいくつものWGが設置されてアセットマネジメントや災害対応なども検討されているが、その中で、WG8では、分散型排水処理システムに関する規格作りも進められており<sup>12)</sup>、管理主体や汚泥清掃などの一連のサービスを網羅する形となっている。特に分散型の場合、浄化槽のような高度な処理技術からコンポストトイレやセプティックタンク（腐敗槽）など、技術バリエーションが非常に多く、それぞれ、処理能力や維持管理方法に大きな違いがあることから、このようなマネジメントの規格作りは重要な位置づけにある。

欧州では、排水処理指令に基づいて排水処理施設の整備が進められているが、技術評価に関する欧州規格が整備されており、民間による技術開発を適切に促進できる仕組みになっている<sup>13)</sup>。

アジアでは、我が国が主導するアジア水環境パートナーシップ (WEPA: Water Environment Partnership in Asia) にて、各国が水質管理上の目標を定め、必要とされる以下の取り組みが進められている<sup>14)</sup>。

1. 社会・経済状態や水環境の現状に見合った法規制、基準設定の見直し (例: 産業構造や排水の水質に基づく排水基準など)
2. 水環境管理戦略、流域レベルでのアクションプランの策定を通じた、地域の水環境管理の強化
3. 政策立案のための科学的根拠の強化・改善 (例: 限られた予算内で行う効果的な水質モニタリング、データ保管体制の改善)
4. 汚染源管理の強化 (例: 適切な生活排水処理の促進や汚染総量規制制度の導入)
5. 水質管理への汚染者負担原則の導入、市場メカニズムを活用した法令遵守のインセンティブ付与
6. 水環境管理に従事する国、地域レベルの組織の強化と技術的な能力開発推進
7. 民間企業、市民、コミュニティの水環境保全に対する意識啓発と参加促進

また近年では、排水処理からエネルギーなどの付加価値を生み出すための研究が進められている。メタン発酵のような古くからの研究が継続されている一方で、微生物燃料電池のような新たな発見から進められている研究もある<sup>15,16)</sup>。また逆に、バイオエタノールなどの燃料開発のように、新たに高濃度の排水の処理が必要となる新エネルギー系産業も目立ってきている。

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

社会経済の状況によって、市場に結びつきやすい応用的な研究が中心となっている現在、水処理の機能を革新的に向上させる上では、基礎研究としての現象把握やメカニズム解明を重要視していくことが肝要である。その意味で、微生物の挙動や群集としての特性を把握するための分子生物学的な解析技術の向上、ミクロ・マクロスケールでの物質収支を把握するための水質・ガスのセンサ技術、プロセス全体を数値モデルで表現し、適切な制御を行うための解析技術などの向上・低コスト化などが重要と考えられる。

一方、応用研究としても、高度処理はエネルギーとのトレードオフがあり、併せて、温室効果ガス排出にも配慮が必要である。例えば、窒素を除去する多くのプロセスでは、窒素除去をしない場合よりもエネルギーを消費し、かつ、 $N_2O$ が発生する。問題の中心は水であっても、エネルギーや気候変動など、さまざまな観点からさまざまなバウンダリーで評価していく必要がある。

また開発途上国においては、水環境管理に対する理解を深めるため、排水処理などの水環境改善による潜在的な経済効果の定量的な解析・評価方法の確立も重要な課題である。

### (5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

JSTが推進する戦略的創造研究推進事業で2009年に発足したCREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究領域では、膜分離などのトップレベルの技術から、微量化学物質や病原微生物のモニタリング、処理など、水の再生利用もふまえた持続可能な水利用に向けた研究が進められている<sup>17)</sup>。また、JSTのSATREPSでも、分散型技術でアフリカの持続可能な水・衛生システムを開発するなどの水関連プロジェクトが推進されている<sup>18)</sup>。

環境省の環境研究総合推進費では、気候変動が水資源に及ぼす影響やアジアの埋立地浸出水対策、貯水池の生態系サービスなどに関する研究が推進されている<sup>19)</sup>。

排水だけでなく、エネルギーや廃棄物、食料などの課題を含めて計画する考え方も広まってきている<sup>20-22)</sup>。ドイツの例では、循環を志向した大規模なプロジェクトがあり、ハンブルグの新興住宅地において雑排水、トイレ排水のバキュームネットワークを構築し、雨水を含めて再利用し、さらに、廃棄物、エネルギーとの組み合わせで相乗効果を有するような仕組みが検討されている<sup>23)</sup>。北九州では、海水淡水化プロセスに下水処理プロセスの一部を利用することにより、環境負荷を低減する統合システムのデモンストレーションが行われている<sup>24)</sup>。

新たなトレンドとしては、ナノテクノロジーの活用による水処理技術の開発がある。吸着、膜処理、光触媒、消毒・抗菌、センシングなどの分野で技術開発研究が進められているものの、コストや人・環境への影響についての更なる研究が必要とされている<sup>25)</sup>。

### (6) キーワード

生活排水、下水道、浄化槽、有機物、窒素、リン、高度処理

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	・大学および研究機関において研究が進められているが、基礎研究へのより大きなリソース配分が期待される。
	応用研究・開発	◎	↑	・下水道技術、特に膜技術は世界的に優位にある。 ・浄化槽をはじめとした分散型処理の技術開発は世界的に優位にある。
	産業化	○	↑	・要素技術は非常に高いレベルを有しているものの、施設の運営は行政主導で進められてきたため、要素技術に加えて管理・運営まで含めた一括提案については欧米企業の後塵を拝している部分がある。
米国	基礎研究	◎	↑	・微生物系の学会をはじめとして、微生物燃料電池の基礎研究が盛んに研究されている。
	応用研究・開発	◎	→	・環境保護庁（EPA）は、フィラデルフィア市をパイロット地域として、合流式下水道の越流問題など、都市水系の水質を守るグリーンインフラ研究に500万ドルを拠出 <sup>26)</sup> 。 ・人工湿地の研究が盛んに行われてきた。
	産業化	○	→	・GE社は大手膜メーカーを買収し、事業展開を加速させている。
欧州	基礎研究	◎	↑	・微生物学の自然化学的な基礎研究が根付いており、大学や国立研究機関に多くの著名な研究者がいる。 ・フランスでは、研究費のうち基礎・応用研究への投資割合が高い <sup>27)</sup> 。
	応用研究・開発	○	→	・北欧を中心として、ドライトイレ（コンポストトイレ）の開発・普及が進められてきている。 ・人工湿地の研究が盛んに行われてきた。 ・持続可能なリン利用に関するプラットフォームが立ち上がるなど、リン資源回収・利用に関する活動が活発である <sup>28)</sup> 。
	産業化	◎	↑	・EUの排水処理指令により、排水処理普及の向上が義務付けられている。 ・HAMBURG WASSERは、排水の再利用を含めた大型プロジェクトを進めている <sup>23)</sup> 。 ・欧州の多くの水メジャーがアジア・アフリカへの展開を進めている。 ・北欧を中心として、ドライトイレ（コンポストトイレ）の開発・普及が進められてきている。
中国	基礎研究	○	→	・大学、研究機関において、研究されている。 ・研究費のうち開発研究への投資が大きく、基礎研究の割合は小さい <sup>27)</sup> 。
	応用研究・開発	◎	↑	・主要大学における海外の企業との共同研究も多く、活発に研究されている。 ・膜分離技術におけるファウリング防止など、種々の実証研究が進められている。
	産業化	◎	↑	・下水処理率の向上が政策として強力に進められてきている。 ・南水北調プロジェクトに関連して多くの課題が指摘されている。 ・水質汚染対策「水十条」に2兆元以上投入される見通しである <sup>29)</sup> 。
韓国	基礎研究	○	→	・研究費のうち基礎研究への投資は日本と同程度である <sup>27)</sup> 。
	応用研究・開発	○	→	・韓国環境部は、富栄養化による藻類の大量発生に関して、国内主要6研究機関と覚書を締結し、藻類発生メカニズムから藻類抑制技術に至るまで広範囲にわたり研究を行うこととしている <sup>30)</sup> 。
	産業化	○	→	・米国を参考にしたTMDLs（Total Maximum Daily Loads）と呼ばれる総量規制が導入されたことにより、四大河川を中心に流域管理がなされて、地域の経済活動も活発化している。 ・食品廃棄物の汚水から自動車用バイオガス燃料を生産する施設が完成し、その他の有機性廃棄物への展開が進められている <sup>31)</sup> 。

## (註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

## (註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

## (註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) 国土交通省 (2014) 新下水道ビジョン  
[http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo\\_sewerage\\_tk\\_000307.html](http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000307.html)
- 2) 日本下水道事業団 (2010) アナモックス反応を利用した窒素除去技術の評価に関する報告書  
<https://www.jswa.go.jp/g/g4/g4g/pdf/gihyo-26.pdf>
- 3) 国土交通省 (2009) 下水道における地球温暖化防止実行計画策定の手引き  
<http://www.mlit.go.jp/common/000036176.pdf>
- 4) 東京都 (2013) 東京都下水道局事業概要 平成25年版  
<http://www.gesui.metro.tokyo.jp/gijyutou/jg25/jg25.htm>
- 5) 国土交通省 (2012) 下水道地震・津波対策技術検討委員会報告書  
[http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd\\_sewerage\\_tk\\_000170-1.html](http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000170-1.html)
- 6) 日本下水道事業団. アセットマネジメント (AM) 手法導入の本格的な支援の推進  
[https://www.jswa.go.jp/gesuidou\\_jigyuu/gyomushien\\_menu/pdf/2-1.pdf](https://www.jswa.go.jp/gesuidou_jigyuu/gyomushien_menu/pdf/2-1.pdf)
- 7) 環境省. 浄化槽サイト  
<https://www.env.go.jp/recycle/jokaso/eco/13.html>
- 8) 環境省. 循環型社会形成推進研究採択課題概要  
<http://www.env.go.jp/houdou/gazou/15438/jisedai.html#2107>
- 9) みずほ情報総研株式会社 (2014) 平成25年度アジアの低炭素社会実現のためのJCM大規模案件形成支援事業報告書、pp.237.
- 10) 下水道協会誌 (2013) TC224上下水道サービス第9回ハイファ総会報告
- 11) 下水道協会誌 (2014) 下水道分野における国際標準化の最新動向
- 12) 楊新泌 (2013) 分散型汚水処理の国際標準化に関する動向 (3) - ISO/TC224/WG8第3回リスボン会議の報告 -、月刊浄化槽、446、31-37.
- 13) 欧州における小規模排水処理施設の現状と認証制度、月刊浄化槽、446、13-21.
- 14) 環境省・地球環境戦略研究機構 (IGES) (2012) アジア水環境管理アウトック2012  
[http://www.wepa-db.net/pdf/1203outlook/01\\_jp.pdf](http://www.wepa-db.net/pdf/1203outlook/01_jp.pdf)
- 15) 東京大学 (2013) 生きた微生物が電気エネルギーを作り出す仕組みを解明 -微生物発電のメカニズム解明により、従来モデルに較べて1000倍以上の効率での電気生産が可能-  
<http://www.t.u-tokyo.ac.jp/epage/release/2013/2013040801.html>
- 16) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (2013) 微生物燃料電池の廃水処理性能向上、実用レベルに一活性汚泥法と同等の廃水処理性能を実現一

- [http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_100197.html](http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100197.html)
- 17) JST CREST 「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究領域  
<http://water.jst.go.jp/index.html>
- 18) JST. SATREPSの活動事例. 環境・エネルギー  
[http://www.jst.go.jp/global/case/environment\\_energy\\_1.html](http://www.jst.go.jp/global/case/environment_energy_1.html)
- 19) 環境省. 環境研究総合推進費. 実施課題一覧  
<http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/index.html>
- 20) International Water Association (2013) Water 21, August, 27-29.
- 21) International Water Association (2014) Water 21, April, 15-18.
- 22) 米国エネルギー省 (DOE) . Ensuring the Resiliency of Our Future Water and Energy Systems  
<http://www.energy.gov/articles/ensuring-resiliency-our-future-water-and-energy-systems>
- 23) Hamburg water cycle  
<http://www.hamburgwatercycle.de/>
- 24) NEDO (2014) 海水淡水化と下水処理を統合した新規水処理システムを開発 ―従来比30%以上の大幅な省エネ・低コスト化を実証―  
[http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_100254.html](http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100254.html)
- 25) Xiaolei Qu, et al. (2013) Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment, Water Research, 47, 3931-3946.
- 26) 国立環境研究所 (2014) アメリカ環境保護庁、都市の水質を守るグリーンインフラ研究のため国内5大学に500万ドルを提供  
<http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=12755>
- 27) 文部科学省 (2011) 科学技術要覧 平成23年版
- 28) European Sustainable Phosphorus Platform  
<http://www.phosphorusplatform.org/>
- 29) JST (2014) CRDS デイリーウォッチャー. 中国、水質汚染対策「水十条」に2兆元以上投入  
<http://crds.jst.go.jp/dw/20140718/201407182417/>
- 30) 国立環境研究所 (2013) 韓国環境部、緑藻の適切な管理に向けた研究開発で6研究機関と協力覚書締結  
<http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=12641>
- 31) 国立環境研究所 (2011) 韓国、食品廃棄物の汚水からバイオガス燃料を生成し、バス・ごみ収集車に利用  
<http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=5897>

### 3.4.1.6 人間居住による環境負荷（GHG 排出、水、大気への排出、緑地の喪失）

#### （1）研究開発領域名

人間居住による環境負荷（GHG排出、水、大気への排出、緑地の喪失）

#### （2）研究開発領域の簡潔な説明

生活の質（QOL：Quality of Life）を維持、向上させつつ居住に関わる活動に伴う環境負荷を少なくするためにさまざまな技術やシステムが開発されている。そのような技術やシステム群の導入を支援するための技術やシステムを構築するとともに、導入しやすくなるような社会的な仕組みを創出する。

#### （3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

人間居住による環境負荷は、エネルギーや製品、水など、資源の利用に伴い排出される汚染物質や温室効果ガス、廃棄物など物質の排出や、人間活動における土地や空間の利用による緑地の喪失など多岐にわたる。

物質の排出に伴う環境負荷については、省エネや節水など資源利用の効率化により環境負荷の排出そのものを減らすための技術開発や制度設計と、排気ガス処理や廃水処理、廃棄物処理など発生した環境負荷による環境影響を削減するための技術開発が行われている。一方で、土地や空間の利用に伴う負荷については、緑化などの人工物に自然共生的な要素を組み込む技術の開発や土地や空間を有効に活用するための制度設計が行われている。また、このような技術開発や制度設計を実社会のもとに実装していくための実証試験も行われている。

人間居住による環境負荷を削減するための技術・システム開発は多岐にわたり、個々の環境技術やシステムの開発、制度設計については他の研究開発領域で取りまとめられているためここでは対象とはしない。一方で、これらの技術やシステムを実社会に効率的に導入し、人間居住による環境負荷を総合的に削減していこうとする取り組みがある。このような取り組みは、人間居住の場としての最少のユニットである住宅レベルで導入されるものから、住宅のまとまりである地区やコミュニティといったスケールでまとめて導入し得るもの、もっと広い都市レベルといったスケールで導入されるものもあり、対象とする取り組みの特性により異なる。ここでは、地区やコミュニティといったスケールで人間居住に伴う環境負荷を削減するものとして導入されている取り組みについて、その社会への実装に関わる研究開発に焦点をあてる。

環境技術の社会への効率的な導入として近年注目を集めているのは、ICTを利用したスマートなシステムの構築である。特にエネルギーマネジメントの分野では、スマートメーターの導入とスマートグリッドの構築によりエネルギーの有効利用および再生可能エネルギーの利用拡大を図る試みが注目を集めている。この技術はもともと電力利用を対象として開発されたものであるが、基本となるのはICTを利用したリアルタイムでの情報把握と連携されたさまざまなシステムの効率的な運用であるため、電力以外のエネルギー（熱利用）の効率化、エネルギー以外の水利用などの資源管理やそれに伴う環境負荷の排出の管理にまで拡張していくことが可能である。特に、防災などの観点から自律分散型の社会インフラの重要性が指摘されており、それを支えるシステム技術として

有効なものである。さらには、利用電力量をスマートメーターにより表示することで、利用者側へのエネルギーの利用状況をリアルタイムで提供(見える化)することができ、エネルギーなどの資源の有効利用に対するインセンティブを創出する効果も期待できる。

スマートグリッドは、1990年代後半に電力系統の老朽化対策として米国で生まれた概念である。その後、グリーンニューディール政策の中で、再生可能エネルギーとセットで重要な政策課題となった。EUでも再生可能エネルギーの普及拡大と各国間での電力取引の活性化を図るために電力供給システムの信頼性の確保が問題となり、スマートグリッドの実証・普及事業が進められている。中国などの新興国では、増え続ける電力需要への対応と、電力供給システムの近代化のため、スマートグリッドの実証事業が進められている。また、韓国でも2009年にスマートグリッド事業団を設置し、国策としてスマートグリッドの実証事業を進めている。実証試験としては2008年のコロラド州ボルダー(米国)での実験を皮切りに、天津(中国)、アムステルダム(オランダ)、済州島(韓国)などで次々と開始されている<sup>1)</sup>。

日本国内では、スマートコミュニティの国際展開、国内普及のため経済界全体としての活動を推進する組織として「スマートコミュニティ・アライアンス」が2010年4月に経済産業省の主導で設立され、海外の動向把握、国際標準化に向けた取り組み、ロードマップの作成、HEMS機器の通信方式の詳細仕様作成などの活動を進めている。さらに、「次世代エネルギー・社会システム実証事業」として、横浜市、豊田市、けいはんな学研都市(京都府)、北九州市において、実証事業を2011年度より行った。これらはいずれもエネルギーシステムのマネジメントにとどまらず、交通システムや一般家庭におけるライフスタイルの変革も視野に入れたものとなっている。また、国内9地域においてスマートコミュニティの普及に向けた技術開発を行うことを目的とした「次世代エネルギー技術実証事業」が実施されている。さらに、東日本大震災の被災地域においても再生可能エネルギーの活用を前提とした「スマートコミュニティ導入促進事業」が開始されている<sup>2)</sup>。

これまでに述べたスマートコミュニティが主として都市を対象としたものであったのに対し、農山漁村地域における豊かな再生可能エネルギー資源を利用したスマートビレッジの構築を支援する取り組みを農林水産省が行っている<sup>3)</sup>。また、チャレンジ25地域づくり(環境省)<sup>4)</sup>、集約都市開発支援事業・先導的都市環境形成総合支援事業(国土交通省)<sup>5)</sup>、ICTまちづくり推進事業(総務省)<sup>6)</sup>など、各省庁からの支援のもとに国内のさまざまな地域においてスマート技術を利用したコミュニティづくりが始まっている。

一方で、電力以外のマネジメントにおけるICTの導入は、電力と比べると遅れている。熱については、地区内の複数熱源からの熱の効率的な管理を行うサーマルグリッドの実証実験が世界で初めての試みとして2014年8月に大阪で始まったところである<sup>7)</sup>。水については、マルタでは電力とともに水道にもスマートメーターを設置し、水道料金の徴収などに役立っている事例はあるものの、スマートメーターの導入については各国で検討されている段階である<sup>8)</sup>。

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック(科学技術的課題、政策的課題)

電力に関しては、スマートメーターの導入が進むとともに、スマートコミュニティの

実証試験が各国で進んでいる。また、さまざまな電力機器などをスマートシステムにつなぎ、制御管理していく技術開発が進んでいる。以上のように開発されつつある技術の実社会への導入という点から考えると、このようなシステムを利用することに対する利用者の受容性など、利用者側の視点に立った社会科学的な検討は少ない。デマンドレスポンス実証などスマートシステムの運転管理のための利用者に関する情報の収集と分析は進みつつあるが、スマートなシステムを導入することにより住民やコミュニティが長期的にどう変容し、そして環境負荷がどの程度削減されるかを予測するためには、社会科学的な検討のさらなる充実が必要である。実証試験においてもライフスタイルの変容まで着目して行われているものもあるが、多くは技術の導入可能性に焦点をあてたものであり、実際の利用者を巻き込みながら、さまざまな検討を進めていく必要がある。

また、電力、ガス、水道、下水道、ゴミ収集など、環境管理に関するサービスの実施者やサービス形態が異なることも、これらを統合してICTを用いてスマート化していく際に制度的な障害となる可能性がある。

なお、スマートコミュニティを構成する個々の技術開発は民間ベースでも進んでいくものと思われるが、実証試験の円滑な実施と地域住民の積極的な関与、さまざまなサービスの統合などを行っていく際には、地域の行政機関の積極的な関与が必要となる。一方で、地域の行政機関では、スマート化に関するプロジェクトを進めるうえでの人的資源や経済的基盤が不十分な場合が多く、今後の課題となるものと思われる。

#### （5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

前述した「次世代エネルギー・社会システム実証事業」において、例えば横浜市などでは広域な既成市街地を対象とした実証試験が行われ、2013年から一般住宅も含めた大規模なデマンドレスポンス実証が始まった<sup>9)</sup>。世界的に見ても既成市街地の一般住宅を対象とした実証試験はまだ限られており、このような実証試験の成果から既成市街地への導入可能性が高まると、社会全体への普及が加速されるであろう。

また電力以外では、前述したように「サーマルグリッド」の実証が大阪市で始まったところである。特に中心市街地や未利用熱源がある地区においては、その効率的な利用をはかるうえで注目されるものである。水道分野でも、フランスの水道事業者が今後4年間で約8,000戸にスマートメーターの導入を行うことを決定し、水道料金の検針の効率化をはかるとともに、ユーザーへの使用量の通知を行うことを計画している<sup>10)</sup>。

#### （6）キーワード

スマートコミュニティ、スマートシティ、スマートグリッド、スマートメーター、再生可能エネルギー、省エネ、省資源、節水

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	-	-	・（個々の技術により異なる）
	応用研究・開発	-	-	・（個々の技術により異なる）
	産業化	○	↑	・スマートグリッドに関する取り組みはやや他の先進国と比べて遅れて始まったものの、スマートグリッドを支える技術的な集積があり、現在さまざまな支援のもとに実証試験が開始されている。また、サーマルグリッドなど電力以外の分野への応用も進んでいる。 ・国内での実証試験のほかに、海外（米国、フランス、中国、インドなど）においても実証試験を開始している <sup>3)</sup> 。
米国	基礎研究	-	-	・（個々の技術により異なる）
	応用研究・開発	-	-	・（個々の技術により異なる）
	産業化	◎	↑	・グリーンニューディール政策の中で再生可能エネルギーとセットで重要政策課題となった。スマートメーターの整備が先行して実施された。 ・2008年にコロラド州ボルダーで世界で初めての実証プロジェクトを開始。その後、Smart Grid Demonstration Projectとして30の実証事業、Smart Grid Investment projectとして174の普及事業が2012年までに行われた <sup>1)</sup> 。
欧州	基礎研究	-	-	・（個々の技術により異なる）
	応用研究・開発	-	-	・（個々の技術により異なる）
	産業化	◎	↑	・2006年にSmart Grids Vision & Strategyを発表。スマートメーターの整備が先行して実施された。 ・2009年にアムステルダム（オランダ）で「インテリジェント・シティ」プロジェクトの開始。その後、マンハイム（ドイツ）、ニース（フランス）、ボーンホルム（デンマーク）など各国において、277の実証および普及事業の実施 <sup>11, 12)</sup> 。 ・水道分野でのスマートメーターの設置（フランス）の動き。
中国	基礎研究	-	-	・（個々の技術により異なる）
	応用研究・開発	-	-	・（個々の技術により異なる）
	産業化	△	↑	・2020年までのStrong and Smart Grid達成ビジョンを発表（2009年）。天津など13都市でエコシティ（Eco City）プロジェクトを実施しているが、その中でスマートグリッドも一部導入。
韓国	基礎研究	-	-	・（個々の技術により異なる）
	応用研究・開発	-	-	・（個々の技術により異なる）
	産業化	○	↑	・2009年にスマートグリッド事業団を設立。済州島での6,000戸を対象とした実証試験を開始。 ・2010年にスマートグリッド国家ロードマップを策定 <sup>1)</sup> 。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

## (註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、  
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

## (註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) 李秀澈・澤田貴之・伊藤賢次・松尾秀雄・佐土井有里 (2013) 韓国のスマートグリッド事業の推進戦略と成果——濟州道スマートグリッド実証事業を題材として——、名城論叢、14(1)、pp.111-137
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (2013) 再生可能エネルギー技術白書第2版、  
[http://www.nedo.go.jp/library/ne\\_hakusyo\\_index.html](http://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_index.html)、2013年12月12日
- 3) 農林水産省 (2012) 平成23年度食料・農業・農村白書「2. 食料・農業・農村の動向」(第4章 農村の振興・活性化)、  
[http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w\\_maff/h23/pdf/z\\_all\\_4.pdf](http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h23/pdf/z_all_4.pdf)、2012年4月24日
- 4) 環境省 (2014) チャレンジ25地域づくり事業、  
[http://www.env.go.jp/policy/local\\_challenge25/](http://www.env.go.jp/policy/local_challenge25/)、2014年8月16日参照
- 5) 国土交通省 (2014) 低炭素型の都市・地域づくり、  
[http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_mn\\_000011.html](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_mn_000011.html)、2014年8月16日参照
- 6) 総務省 (2014) ICTによる環境にやさしいまちづくり、  
[http://www.soumu.go.jp/menu\\_seisaku/ictseisaku/ictriyuu/02ryutsu02\\_03000064.html](http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictriyuu/02ryutsu02_03000064.html)、2014年8月16日参照
- 7) 大阪市 (2014) 熱版スマートグリッド「サーマルグリッドシステム」による建物間熱融通の実証実験を開始します、  
<http://www.city.osaka.lg.jp/kankyo/page/0000278412.html>、2014年8月12日
- 8) Automated Revenue management Services (2014) Smart Meters,  
<https://www.smartutilities.com.mt/wps/portal/Public%20Area/Services/SmartMeters/>、2014年8月22日参照
- 9) 横浜市 (2013) 横浜スマートシティプロジェクト(YSCP) 家庭部門 夏季 DR 実証 (速報) ~ デマンドレスポンス (DR) で最大ピークカット効果 15.2%を確認 ~、  
<http://www.city.yokohama.lg.jp/ondan/press/h25/131023press.pdf>、2013年10月23日
- 10) Sensus (2014) Sensus Announces First iPERL Smart Meter Rollout in France  
[http://sensus.com/web/uk/news/display?news\\_id=sensus-announces-first-iperl-smart-meter-rollout-in-france-uk](http://sensus.com/web/uk/news/display?news_id=sensus-announces-first-iperl-smart-meter-rollout-in-france-uk)、2014年2月
- 11) 日本貿易振興機構 (2011) 欧州のスマートグリッド戦略、ユーロトレンド 2011年7月
- 12) 日本貿易振興機構 (2011) 欧州主要国のスマート・グリッドへの取り組み、ユーロトレンド、2011年11月

### 3.4.1.7 都市環境と健康影響（大気、化学物質、緑地、熱環境等）

#### （1）研究開発領域名

都市環境と健康影響（大気、化学物質、緑地、熱環境等）

#### （2）研究開発領域の簡潔な説明

都市化は世界的に進行し、今や地球上の人口の約半数は都市に居住するようになっている。都市化は、産業化、グローバル化とともに地球環境変動の大きな駆動力ともなっている。開発途上国を中心に、都市の大気汚染や水質汚染の問題は顕在化しており、近隣国への越境汚染の問題も指摘されるようになった。また、世界的にも、残留性、生物濃縮性、長距離移動性が顕著で毒性を有するPersistent Organic Pollutants (POPs) や日々新たに生産される化学物質や新規素材などの生物や人への影響が危惧されている。地球温暖化による熱環境変動も、感染症分布の変化などを介し、人類の健康に影響を及ぼす可能性が指摘されている。一方、癌や生活習慣病、アレルギー疾患といったいわゆる「現代病」が先進国を中心に激増してきたが、これらの増加と都市環境要因との関連性を推測する研究も存在する。このように、都市環境とその変容が、生物や人類の健康に及ぼす影響を評価あるいは予測し、そのメカニズムを明らかにするとともに、リスクコミュニケーションを実践し、対策・軽減・未然防止に結びつけることを目的とする研究開発領域である。

#### （3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

近年、地方より都市への人口の移動と偏在が世界的に進み、今後、特に、開発途上国において顕著となることが推計されている<sup>1)</sup>。同時に、都市は産業化やグローバル化の拠点でもあり、地球環境変動の駆動力が密に存在する空間ともなっている。

産業化、都市化による化石燃料の大量消費は、温室効果ガス（GHG）の多量排出とともに、窒素酸化物、硫黄酸化物、あるいは、PM2.5をはじめとする粒子状物質などの大気汚染物質をも大量に排出し、経済発展の著しい開発途上国の大都市居住者を中心に、健康影響を顕在化させている。低質の化石燃料は、水銀や砒素、カドミウムなどの重金属や多環芳香族炭化水素の発生源ともなりうるため、これらによる健康影響も危惧される。事実、インドや中国をはじめとするアジア諸国やBRICSにおいて、粒子状物質増加による早期死亡や経済損失は、今後も年々増加するものと推計されている<sup>2)</sup>。加えて、これらの大気汚染物質は、長距離輸送と変質により、近隣の国々にも越境汚染による健康リスクを誘起しうる。一方、先進国においても、地表オゾンの増加とそれによる早期死亡は、今後も増加するものと推計されている<sup>2)</sup>。日本においても、オゾン、PM2.5や黄砂による越境汚染の問題、また、増加しつつあるアレルギー疾患の代表といえる花粉症の原因となるスギやヒノキの花粉の健康影響が危惧されている。そのため、国内外を問わず、大気汚染とその健康影響の速やかな現状把握と対策が急がれている。しかし、大気汚染による健康影響に関する研究は、主に欧米の先進国を中心に進展してはいるものの、開発途上国における実施例は概して少ない。日本においてさえも、PM2.5の観測地点は増加しつつあるが、健康影響に関する研究実施例は十分とはいえず、環境基準値も欧米の疫学研究データを基に決定されている。大気汚染物質に関しては、呼吸器系、

免疫系、循環器系に疾患をもつ人々や小児、高齢者などに影響が出現しやすいことが、先進国を中心に多々報告されている。今後は、このような高感受性（脆弱性）要因を念頭に置いた研究開発推進がますます重要性を増すものと考えられている。

開発途上国においては、過去の先進国における公害事例と同様に、都市上流域の開発・発展が、渇水や洪水、下水の流入などとともに、重金属や化学物質（農薬を含む）による水質汚染をもたらすケースも経験されている。上水の不足が顕在化し、下水の再利用の必要性が増している都市域もある。一方、先進国においては、過去に公害をもたらしたような高毒性物質の大量曝露やそれによる毒性影響発現の可能性は減じている。しかし、POPsによる健康影響、特に長期影響や経世代影響の問題が今なお危惧されている。また、低毒性物質の少量曝露によるかく乱影響（脳・神経系、免疫・アレルギー系、生殖・内分泌系への影響）の問題や日々増加する環境汚染物質の複合曝露による健康影響の問題も、未解決のまま残存している。

加えて、ナノマテリアルに代表されるような新規素材による健康影響も十分には明らかにされていない。後述（(7) 国際比較）のシェールガスの事例のように、新たなエネルギーの創出が、新たな環境汚染を生じる可能性も示唆されている。

一方、生活習慣病やアレルギー疾患などの「現代病」の増加と都市環境要因との関連性も指摘されている。実験的には、POPsによる糖尿病や脂肪肝などの生活習慣病の増悪<sup>3)</sup>、低毒性化学物質曝露による行動異常、アレルギー疾患増悪<sup>4)</sup>、ナノマテリアルによるアレルギー疾患増悪<sup>5)</sup>や発ガンの可能性などが報告されており、少なくとも部分的には細胞・分子レベルのメカニズムも明らかにされている。このように、都市環境要因の変容による「現代病」の増加・増悪の可能性について、今後も研究の集積が望まれる。

地球温暖化に関連し、地表オゾンの増加による健康影響の問題や水系感染症の増加、節足動物媒介感染症の分布変動、都市におけるヒートアイランド現象とも関連した熱中症の増加などの問題が危惧されている。多環芳香族炭化水素にも発ガン物質は存在するが、オゾン層の破壊に起因する紫外線増加による皮膚ガン増加の問題も危惧されている。

一方、都市環境要因による健康影響の予測、評価、メカニズムの解明に関する研究とともに、リスクコミュニケーションも重要であり、先進国を中心に個別的に実践的研究が推進されているが、十分とはいえない。

本領域においては、都市環境の変容による健康影響を明らかにし、対策、軽減、未然防止に結びつけることが最終目標となる。しかし、PM2.5の例にも代表されるように、発生源対策などにより影響を軽減することは可能ではあるものの、未然防止を達成することは困難であり、リスク管理の概念の普及と共有化に関する取り組みも、より重要になるものと考えられる。

#### （4）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

1. 都市環境要因、健康影響のいずれも多岐にわたるが、一部の都市環境要因による一部の健康影響が研究対象となっているに過ぎない。
2. 高感受性（脆弱性）集団を対象とした研究も端緒についたばかりという状況にある。
3. リアルワールドで想定される「環境要因の複合曝露による健康影響」の問題は、ほとんど手付かずの状況にある。

4. 死亡などの重大な健康影響に対し、比較的軽度の、しかし、QOL (Quality of Life) には密接に関連するというレベルの健康影響を客観的に評価することは今のところ困難である。
5. 既存疾患の増悪や「現代病」の増加・増悪における環境要因の寄与率推計は未確定である。
6. 疫学研究において、リアルワールドにおける曝露評価、特に個人曝露評価はしばしば困難である。長期的な観察研究や経世代影響に関する研究には時間と資金を要する。対象にできる環境要因と健康影響は限定的とならざるを得ない。
7. 実験的研究において、人への外挿手法が未確立である。
8. 越境汚染や地球環境問題の解決には、多国間にわたる対策、政策が不可欠であるが、その枠組みの作成や取り組みの進展は容易とはいえない。
9. 経済的発展、技術開発が政策的に優先、あるいは、先行し、環境問題、健康影響が後発的に発生・進展することが多く、早期診断、早期治療が困難な場合が多い。

以上のような広範囲にわたる都市環境要因による健康影響にかかる研究を、民間企業が限定的資金によって推進することは困難であり、また、収益性も少なくとも短期的には乏しいと考えられる。加えて、国民、人類の健康、未来を左右する公益性が最優先されるべき課題であることから、公的資金による戦略的かつ長期的な研究開発推進が必須と考えられる。

#### (5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・ 国連環境計画 (UNEP)、金採掘における水銀削減のため実践ガイドを公表 (2012/7/2) <sup>6)</sup>。
- ・ 国連環境計画 (UNEP)、開発途上国の化学物質リスク低減のため管理強化が必要とする報告書を発表 (2012/9/5) <sup>7)</sup>。
- ・ 米国環境保護庁 (EPA)、ナノ材料の健康や環境への影響を研究 (2012/12/11) <sup>8)</sup>。
- ・ 欧州環境局 (EEA)、新技術のもつ危険の兆候に予防原則による対応を求める報告書を発表 (2013/1/23) <sup>9)</sup>。
- ・ 米国環境保護庁 (EPA)、子どもの健康と環境に関する報告書『アメリカの子どもと環境第3版』を公表 (2013/1/25) <sup>10)</sup>。
- ・ 欧州委員会、PM2.5の長期曝露は動脈硬化や小児呼吸器疾患、出産への悪影響をもたらす可能性、神経発達・認知機能や糖尿病との関連性、循環器・呼吸器疾患による死亡との因果関係を指摘 (2013/1/31) <sup>11)</sup>。
- ・ 国連環境計画 (UNEP) と世界保健機関 (WHO)、内分泌かく乱物質に関する最新の報告書を発表し、更なる研究を求める報告 (2013/2/19) <sup>12)</sup>。
- ・ 米国環境保護庁 (EPA)、有害化学物質の健康や環境への潜在的リスクに対し、一般に使用されている23種の化学物質のリスク評価を開始すると発表。多くは難燃剤で神経発達影響の存在が示唆されている (2013/3/27) <sup>13)</sup>。
- ・ 欧州環境局 (EEA) と欧州委員会共同研究センター (JRC)、複数の環境要因による複合的な健康リスクの研究が必要とする『環境と人の健康』を公表。生活習慣病のリスクも指摘 (2013/5/30) <sup>14)</sup>。

- ・ アフリカ28カ国、国連環境計画（UNEP）で化学物質のライフサイクルにわたる安全管理を強化するためのロードマップ案を策定（2013/7/4）<sup>15)</sup>。
- ・ 米国環境保護庁（EPA）、環境汚染物質の健康リスク情報を収載している「統合リスク情報システム」（IRIS：Integrated Risk Information System）を強化（2013/7/31）<sup>16)</sup>。
- ・ 米国環境保護庁（EPA）、化学物質の脳発達への影響研究に300万ドルを提供と発表（2014/2/12）<sup>17)</sup>。
- ・ 欧州化学物質庁（ECHA）、REACH規則に基づく2014～2016年の物質評価計画（CoRAP：Community Rolling Action Plan）を公表（2014/3/26）<sup>18)</sup>。
- ・ 「短寿命気候汚染物質（SLCP：Short-Lived Climate Pollutants）削減のための気候と大気浄化の国際パートナーシップ（CCAC：Climate and Clean Air Coalition to Reduce Short-Lived Climate Pollutants）」、SLCP削減により気候や農業、健康の改善を図る取り組みに約1,000万ドル拠出合意（2014/4/4）<sup>19)</sup>。
- ・ 米国環境保護庁（EPA）、化学物質とナノ材料の健康と環境への影響理解のため、二大学に900万ドルを助成と公表（2014/4/10）<sup>20)</sup>。
- ・ フランス環境・持続可能な開発・エネルギー大臣、内分泌かく乱物質の国家戦略の内容を公表（2014/4/29）<sup>21)</sup>。
- ・ 気候変動による環境の大規模な変化が健康に及ぼす影響と必要な対策を研究する、イギリス国立健康研究所の健康保護研究ユニット（NIHR HPRU：The National Institute for Health Research Health Protection Research Unit）が発足（2014/5/7）<sup>22)</sup>。
- ・ 環境省、10万組の大規模な疫学調査「子どもの健康と環境に関する全国調査（エコチル調査）」を進行中<sup>23)</sup>。

## （6）キーワード

都市化、産業化、グローバル化、大気汚染、窒素酸化物、硫黄酸化物、PM2.5、黄砂、花粉、オゾン、水質汚染、土壌汚染、重金属、多環芳香族炭化水素、越境汚染、POPs、新規素材、現代病、健康影響、高感受性（脆弱性）要因、経世代影響、かく乱影響、複合曝露、複合影響、早期死亡、温暖化、熱中症、リスクコミュニケーション、リスク管理、未然防止

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↓	<ul style="list-style-type: none"> <li>水質に関しては、膜処理技術など、社会実装を重視した研究が展開されている。空気質に関してもいくつかの大学や研究所を中心として、基礎研究のレベルは高く、革新的な研究成果の発信もある。しかし、健康影響に関する疫学的研究、実験的研究ともに、予算面、人材面（特に若手の人材面）では、他領域や欧米、中国に比較し、十分とはいえない。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↓	<ul style="list-style-type: none"> <li>水質分野では、国の中央研究所に位置する研究組織が貧弱で、十分に機能していない。全体でも、研究費の規模を含め、十分な実用的研究成果を得られる体制になっているとはいえない。</li> </ul>
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>水質、空気質ともに、都市環境汚染は概ね改善から不変といった状況にある。近年、空気質を中心に、越境汚染の問題がクローズアップされている。福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による汚染も課題となっている。</li> <li>水処理用膜の国際的シェアは高く、海外での市場開発に貢献している。大気汚染物質削減、空気清浄技術のレベルも高く、国際的な大企業が存在し、世界に展開している。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>水質に関しては、下水再利用に関連した基礎研究など、多岐にわたり、かつレベルが高い。空気質に関しても、大規模な疫学研究が複数、長期にわたって実施されている。健康影響に関する疫学的な研究も実験的な研究も複数の機関で取り組みが進展してきている。予算面、人材面で日本を凌駕している。ナノマテリアル廃棄物への評価など、新しい研究も始まっている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>水質に関しては、下水処理水再利用の実用化に向けた検討が進んでいる。シェールガス掘削に関連する排水処理技術開発も活発である。空気質も含め、日本に比較し、大きな予算が配分されている。</li> </ul>
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>水質、空気質ともに、都市環境汚染は概ね改善から不変といった状況にある。しかし、資源採掘や災害に伴う局所的汚染も報告されている。空気質に関し、PM2.5の環境基準が年間平均値を12 µg/m<sup>3</sup>に強化された。</li> <li>水質に関しては、下水処理水直接飲用再利用が導入され、拡大していく趨勢にある。シェールガス掘削では、セラミック膜による処理が実用化された。空気質についても国際的大企業の取り組みが存在する。</li> </ul>
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>オランダやスイス、英国やドイツなど、研究所や大学における研究レベルは高い。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>オランダ、英国、フランス、ドイツなどの企業や研究所で研究・開発が進められている。EUにおけるREACH規制が存在し、それに関連する研究計画、化学物質評価計画、管理計画も提案されている。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>水質、空気質ともに、環境汚染は概ね改善から不変といった状況にある。他国企業による汚染物質排出も含め、越境汚染の問題も存在している。日本に比較し、化学物質の管理、規制は厳密である。また、予防原則の概念も浸透しているように見受けられる。物質循環も順調に進んでいると推察される。</li> <li>導入することが好ましいとのエビデンスが得られた場合、速やかに実用化が図られる傾向が認められることが、我が国との大きな差とも考えられる。国際的大企業の取り組みが存在する。</li> </ul>
中国	基礎研究	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究レベルは高いとはいえない。しかし、教員や学生の陣容が急速に拡大しており、研究レベルは上がっていくものと予想される。研究論文の事前チェック体制が整備されてきており、今後、国際誌におけるシェアが高まることに寄与するとも予想される。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>海外技術に依存している状況だが、これに追従する国内での研究開発が活発に行われており、やがて独自技術として定着していくものと考えられる。</li> </ul>

	産業化	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水質、空気質ともに、環境汚染は深刻である。エネルギー消費による大気汚染はもちろん、下水汚泥の発生量も急激に増加し、適正な処理処分が大きな課題となっている。不適正な処理により汚染された土壌や鉱山廃棄物における重金属汚染も大きな問題となっている。越境汚染物質の排出源の1つともなっている。</li> <li>・海外企業の技術に依存してきたが、国内の財閥系企業や地元企業が力をつけてきているように見受けられる。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・国家レベルでの大型プロジェクトが進められ、研究と実務の連携が重視されている。基礎研究レベルの向上にも寄与している。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・国家プロジェクトが推進され、温室効果ガス排出量評価、ライフサイクルアセスメントなどの領域の研究も包括した総合的な最適化も志向されている。下水汚泥について、陸上処分のための技術の開発などが活発に行われている。</li> </ul>
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水質、空気質ともに、環境汚染は概ね改善から不変といった状況にある。越境汚染の問題も存在している。</li> <li>・水質関連では、政府主導で水産業育成戦略が作成され、国際競争力を高める努力が継続されている。韓国水資源公社が国内用水供給のほか、海外展開に力を入れている。</li> </ul>

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) WHO. Children's environmental health.  
<http://www.who.int/ceh>
- 2) OECD. OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction.2012.  
<http://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/oecdenvironmentaloutlookto2050theconsequencesofinaction.htm>
- 3) Yanagisawa R, et al.: Env Health Persp 122: 277-283, 2014.
- 4) Koike E, et al.: Environ Health Persp 118 : 472-478, 2010.
- 5) Inoue K, et al.: Toxicol Appl Pharm 237: 306-316, 2009.
- 6) UNEP. Low-Mercury and Mercury-Free Solutions to Hand for Some Sectors of Gold Mining Industry at INC4 Meeting. 2012.  
<http://www.unep.org/newscentre/Default.aspx?DocumentID=2691&ArticleID=9207&l=en>
- 7) UNEP. Urgent Action Needed to Reduce Growing Health and Environmental Hazards from Chemicals: UN Report. 2012.  
<http://www.unep.org/newscentre/Default.aspx?DocumentID=2694&ArticleID=9266&l=en>
- 8) EPA. EPA and Consumer Product Safety Commission Collaborate to Research Health Impacts of Nanomaterials. 2012.

- <http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/d0cf6618525a9efb85257359003fb69d/b3bdde177a3e570985257ad1006309d2!OpenDocument>
- 9) EEA. The cost of ignoring the warning signs - EEA publishes ‘Late Lessons from Early Warnings, volume II’ . 2013.  
<http://www.eea.europa.eu/media/newsreleases/the-cost-of-ignoring-the>
- 10) EPA. EPA Releases New Report on Children's Health and the Environment in America. 2013.  
<http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/d0cf6618525a9efb85257359003fb69d/1fe31a8bc6eb3c4385257afe0061b1f4!OpenDocument>
- 11) EC. Environment: Newly found health effects of air pollution call for stronger EU air policies. 2013.  
[http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-13-72\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-72_en.htm)
- 12) UNEP. Effects of Human and Wildlife Exposure to Hormone-Disrupting Chemicals Examined in Landmark UN Report. 2013.  
<http://www.unep.org/newscentre/Default.aspx?DocumentID=2704&ArticleID=9403&l=en>
- 13) EPA. EPA Announces Chemicals for Risk Assessment in 2013, Focus on Widely Used Flame Retardants. 2013.  
<http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/d0cf6618525a9efb85257359003fb69d/c6be79994c3fd08785257b3b0054e2fa!OpenDocument>
- 14) EEA. Europe’s environment now healthier - but new risks emerging. 2013.  
<http://www.eea.europa.eu/highlights/europe2019s-environment-now-healthier-2013>
- 15) UNEP. African Nations Pledge Increased Efforts in Sound Management of Hazardous Chemicals. 2013.  
<http://www.unep.org/newscentre/Default.aspx?DocumentID=2723&ArticleID=9562&l=en>
- 16) EPA. EPA Strengthens Chemical Assessment Process to Protect Public Health. 2013.  
<http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/d0cf6618525a9efb85257359003fb69d/8a405bfd605159cd85257bb9005f6dd6!OpenDocument>
- 17) EPA. U.S. EPA Awards U.C. Davis \$800,000 to Study How Chemical Exposures May Impact Brain Development. 2014.  
<http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/d0cf6618525a9efb85257359003fb69d/206d2e120e50727e85257c7d00694a2d!OpenDocument>
- 18) ECHA. ECHA adopts the substance evaluation plan for 2014 - 2016. 2014.

- [http://echa.europa.eu/view-article/-/journal\\_content/title/echa-adopts-substance-evaluation-plan-for-2014-2016](http://echa.europa.eu/view-article/-/journal_content/title/echa-adopts-substance-evaluation-plan-for-2014-2016)
- 19) UNEP. CCAC Invests \$10 Million in New Work to Reduce Short-Lived Climate Pollutants, Focuses on Human Health. 2014.  
<http://www.unep.org/newscentre/Default.aspx?DocumentID=2764&ArticleID=10809&l=en>
- 20) EPA. EPA Awards Over \$9 Million to Universities for Research to Help Predict the Implications of Chemicals on Human Health and the Environment. 2014.  
<http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/d0cf6618525a9efb85257359003fb69d/bcb62b6c968ccac485257cb600705a2e!OpenDocument>
- 21) Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. Ségolène Royal préside le Conseil national de la transition écologique et présente la stratégie nationale contre les per-turbateurs endocriniens. 2014.  
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Segolene-ROYAL-preside-le-Conseil.html>
- 22) Met Office. How will climate change affect health in the UK?. 2014.  
<http://www.metoffice.gov.uk/news/releases/archive/2014/health-hpru>
- 23) 環境省. エコチル調査  
<http://www.env.go.jp/chemi/ceh/>

### 3.4.1.8 開発途上国の人間居住と適正技術

#### (1) 研究開発領域名

開発途上国の人間居住と適正技術

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

開発途上国において健康で文化的な人間居住を持続的に可能にする基盤としての水と衛生に関わるインフラ整備のために、健康リスク低減あるいはQOL (Quality of Life) 上昇の効果はもちろん、導入や維持管理に必要なコストや技術レベルの観点からも適正な技術を開発する。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

開発途上国における人間居住の基盤は、身体や財産の安全が確保されている条件では「水と衛生」であり、2000年9月に採択されたミレニアム開発目標 (MDGs: Millennium Development Goals) でも、2015年までに達成すべき8つの目標と18のターゲット、48の指標を掲げた中で、2015年までに「安全な飲料水及び衛生施設を継続的に利用できない人々の割合を半減する」としている。MDGsの水と衛生分野における現状は、「安全な飲料水へのアクセス」の目標達成に向けた取り組みが進展している一方で、「基礎的な衛生施設へのアクセス」の目標達成は大きく遅れており、衛生分野 (トイレ、汚水処理など) に国際的に焦点を当て、対応が促されている。

このような中、適正技術 (Appropriate technologies) の開発に注目が集まっている。適正技術は、かつては中間技術 (Intermediate technologies)、もう一つの技術 (Alternative technologies) とも言われ、いわゆる最先端の技術ではないものの、当該地域で供給可能な資材、資金、人材のもとで、地域住民に受容・維持される技術を指し、技術のもつ工学的合理性と使用者である住民の選好に適ったものである。例えば、トイレ・衛生にかかわる適正技術には、衛生改善とともに、し尿資源の活用、生活用水源である地下水・ため池などの表流水の水質保全、そして使い易さなどが求められる<sup>1)</sup>。

よって、適正技術に関する研究開発の方向性は、自然に応用研究・開発に偏りがちであり、先進国ですでに実用化、産業化された技術を開発途上国向けにモディファイするような方向での研究開発が主流である。一方、開発途上国の人間居住の改善を目的として、全く新しい原理を見出すような基礎研究の例は少ない。

前者の例として、我が国においては、JSTとJICAの共同で、研究開発およびそこで開発された技術の社会実装を支援する地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS) でプロジェクト<sup>2)</sup>が推進されており、その中で、熱帯での水再利用を目的とした膜分離活性汚泥法 (MBR: Membrane BioReactor) システム (東京大学・山本和夫教授の研究グループ) がタイで、UASB-DHSシステム (Up-flow Anaerobic Sludge Blanket・Down-flow Hanging Sponge) (東北大学・原田秀樹教授の研究グループ) がインドで、バイオトイレ (北海道大学・船水教授の研究グループ) がブルキナファソで、それぞれ技術の実証試験を行った。

また、土木学会環境工学委員会に設置された環境中間技術小委員会では、我が国がこれまでに開発してきた環境分野の適正技術 (環境中間技術と呼んでいる) の種類をリス

トアップするとともに、技術導入の際に配慮すべき項目などを整理し、同技術の普及を促進する活動を行っている。彼らは、環境中間技術は、費用対効果、維持管理技術だけを見ても、開発途上国のものだけでなく我が国の人口減少地域にも適用できるものとして注目している。

海外における適正技術の研究開発の事例には以下のようなものがある。

- ・ スイスのEAWAGにおける「途上国の水と衛生」研究分野（SANDEC）では、太陽光による水の消毒システムをはじめ、開発途上国向けの水供給・処理、下排水管理、都市固形廃棄物管理のための技術開発を行っている<sup>3)</sup>。
- ・ 国連大学のサステナビリティ高等研究所（UNU-IAS）では、開発途上国において持続可能な開発のために環境政策を計画、実施する支援ツールや情報基盤の整備を目的としたWater and Urban Initiativeを進めており、その中には、水処理や低炭素技術に関する適正技術も含まれる<sup>4)</sup>。
- ・ タイのアジア工科大学（AIT）では、ゲイツ財団（Bill & Melinda Gates Foundation）の支援を受けて、適切な処理・リサイクル技術でヒトの糞便を衛生的に分離する新たな衛生施設の開発を行っている<sup>5)</sup>。
- ・ 基礎研究の例では、ナノテクノロジーを開発途上国の水処理に利用しようとする試みがある<sup>6)</sup>。

産業化に関連して、（水と衛生に限らず）適正技術そのものに対する反論もある。International Development Enterprise（IDE）の創設者Paul Polakは、彼のブログの中で、適正技術開発の主体が市場向けにデザインするしたたかで強情な企業家ではなく、善意をもったもの作り屋だったために経済的な観点が欠落し、1973年にシューマッハーが提唱して始まった適正技術のムーブメントが終焉を迎えたとし、その代替としてBase of the Pyramid（BOP）ビジネスの考え方を推奨している<sup>7)</sup>。BOPは、世界人口でもっとも割合が高い貧困層をターゲットにして、彼らが購入できる商品を開発する考え方であり、薄利多売を目指した動きである。後述するように、ゲイツ財団などがスポンサーとなり、BOP型の適正技術の開発が進んでいる。

#### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

開発途上国における人間居住を支える適正技術の開発は、先進国で見られるような、少しでも清澄な飲み水を提供し、少しでも下排水から汚濁物質を取り除くために最大限の努力を尽くす技術開発とは、その思想が異なる。開発途上国のそれぞれの事情（人口動静、電力事情、技術を理解して維持管理ができる人材の数など）を考慮して、導入や維持のためのコストや、維持管理の容易さなどの境界条件のもとで、開発する技術のレベルを最適化する必要がある。言い換えると、明確な出口戦略のもとで技術開発が求められる。

開発途上国側の視点からは、先進国と同等の居住環境を求めて、最新技術を導入したいニーズがあるかもしれない。しかし、先進国の人間居住の課題の多くはその利便性・快適性であるのに対して、開発途上国ではいまだに健康リスクの低減が第一義的な目標であり、その対策には猶予がない。限られた時間や予算の中でできるだけ多くの人が技術の恩恵にあずかり、社会全体での健康リスクを低減するための技術開発を推進するた

めには、開発途上国と先進国の「平等」とは何か、そして開発途上国の中での「平等」とは何かについてコンセンサスを得ることが、政策的な課題といえる。

また、現在、開発途上国の人間居住に関するプロジェクトは、先進諸国の対外援助政府機関やNGOが独自に進めているケースが多い。中には、複数の国が同じ地域で類似したプロジェクトを推進していることもあり、より効率的に技術開発や導入を行うためには、国際機関などが中心となり交通整理を行うことも政策的な課題の一つである。

#### (5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・ ゲイツ財団は2012年に、近代的な公衆衛生施設を利用できない世界中の25億人のためにトイレを發明するコンテストを開催し、アイデアの実現に向けて資金提供を行うプロジェクトを決定した<sup>8)</sup>。このコンテストにおけるトイレの条件としては、水、電気、汚水処理システムがなくても稼働し、汚染物質を排出せず、できればエネルギーなどのリソースを生み出し、1日あたり5セントで稼働することが求められている。(7)の表中には一部だけを掲載しているが、米国および欧州を中心に、世界各国の研究機関や企業などによる実証レベルでのプロジェクトが実施されている(一部はすでに終了している)。
- ・ 日本でもゲイツ財団ほどの規模ではないものの、日本の技術力を開発途上国のニーズに結びつけるためのプロジェクト公募(例えば、See-D Contest<sup>9)</sup>)が行われている。また、JICAがBOP事業を支援するスキームを有している<sup>10)</sup>。
- ・ 情報の提供という重要な観点では、アジア13か国の各国環境大臣のリーダーシップのもとで参加するWater Environment Partnership in Asia (WEPA)が、下排水処理のための適正技術(現在稼働中の技術)に関するデータベースを構築し、ウェブ上で公開している<sup>11)</sup>。(7)に記載していない適正技術に関する情報も、本データベースから検索できるかもしれない。

#### (6) キーワード

水、衛生、持続可能な社会、開発途上国、適正技術

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・おおむね終了している。
	応用研究・開発	○	↗	・東京大学による熱帯向けMBRは、タイにおいて実証試験を実施している。東北大学他によるUASB-DHS技術は、インドにおいて実証試験を実施している。北海道大学他によるバイオトイレは、ブルキナファソにおいて実証試験を実施している。
	産業化	×	→	・水と衛生の分野での適正技術は、いまだ産業化には至っていない。
米国	基礎研究	○	→	・おおむね終了している。
	応用研究・開発	○	↗	・藻類を用いた排水処理技術（Quantitative Bioscience）、MFC（Microbial Fuel Cell）を用いた家庭排水からの発電（マサチューセッツ大学）、ヤシ殻を原料としたバイオフィルターを用いた排水処理（RTI International）、微生物による下水から燃料への転換技術（ワシントン大学）など、多くの技術開発プロジェクトが、ドイツ財団の援助を受けて実施中（一部はすでに終了）。
	産業化	×	→	・水と衛生の分野での適正技術は、いまだ産業化には至っていない。
欧州	基礎研究	○	→	・おおむね終了している。
	応用研究・開発	○	↗	・スイスEAWAGのSANDECによって、適正技術の開発が精力的に進められている。 ・尿を転用するドライトイレ（スイスEAWAG）、エネルギー産出型節水トイレ（英国Loowat社）、ナノ粒子を用いた汚泥からのバイオガス生産向上（バルセロナ大学）、ナノ膜を用いたトイレ（クラレンフィールド大学）など、多くの技術開発プロジェクトが、ドイツ財団の援助を受けて実施中（一部はすでに終了）。
	産業化	×	→	・水と衛生の分野での適正技術は、いまだ産業化には至っていない。
中国	基礎研究	○	→	・おおむね終了している。
	応用研究・開発	△	→	・国内の水質汚濁の問題に対応するために適正技術開発とその実証化が進められている <sup>12)</sup> 。
	産業化	×	→	・水と衛生の分野での適正技術は、いまだ産業化には至っていない。
韓国	基礎研究	○	→	・おおむね終了している。
	応用研究・開発	△	→	・韓国特許庁（KIPO）が適正技術のデータベース化を始めた <sup>13)</sup> 。
	産業化	×	→	・水と衛生の分野での適正技術は、いまだ産業化には至っていない。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) 高橋邦夫, 高村哲, 農業地域におけるエコサン・トイレの普及活動－現状と今後の展開, 一般社団法人海外環境協力センター会報
- 2) JST SATREPS, <http://www.jst.go.jp/global/>
- 3) EAWAG, Water and Sanitation in Developing Countries, [http://www.eawag.ch/forschung/sandec/gruppen/index\\_EN](http://www.eawag.ch/forschung/sandec/gruppen/index_EN)
- 4) UNU-IAS, Water and Urban Initiative, <http://ias.unu.edu/en/research/water-and-urban-initiative.html#outline>
- 5) AIT, AIT among UNESCO-IHE partners in Gates Foundation project, <http://www.ait.ac.th/news-and-events/2011/news/ait-among-unesco-ihe-partners-in-gates-foundation-project/?searchterm=AIT%20among%20UNESCO-IHE%20partners%20in%20Gates%20Foundation%20project#.VMXCAP6sV8E>
- 6) Brame, J., Li, Q., Alvarez, P.J.J. (2011) Nanotechnology-enabled treatment and reuse: emerging opportunities and challenges for developing countries. Trends in Food Science and Technology, 22, 618-624.
- 7) Paul Polak, The Death of Appropriate Technology I : If you can't sell it don't do it, <http://www.paulpolak.com/the-death-of-appropriate-technology-2/>
- 8) Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA) , Research projects funded by the Gates Foundation, <http://www.susana.org/en/resources/research/gates-foundation/all-projects>
- 9) See-D Contest, <http://see-d.jp/>
- 10) JICA, BOPビジネス支援センター, <http://www.bop.go.jp/list/jica>
- 11) WEPA, Database of technologies in operation, <http://www.wepa-db.net/technologies/top.htm>
- 12) QIAN Yi, WEN Xianghua, HUANG Xia (2007) Development and application of some renovated technologies for municipal wastewater treatment in China. Front. Environ. Sci. Engin. China, 1(1): 1-12
- 13) KIPO, Appropriate Technology, [http://www.kipo.go.kr/kpo/user.tdf;jsessionid=9863ca6b30d5fd041a9370704778aea0acc893dab8d4.e34RahyTbxmRb40Laxy-PahaRah0Ne0?a=user.english.html.HtmlApp&c=91016&catmenu=ek02\\_04\\_02](http://www.kipo.go.kr/kpo/user.tdf;jsessionid=9863ca6b30d5fd041a9370704778aea0acc893dab8d4.e34RahyTbxmRb40Laxy-PahaRah0Ne0?a=user.english.html.HtmlApp&c=91016&catmenu=ek02_04_02)

### 3.4.2 生態系サービスの適正管理

#### 3.4.2.1 生物多様性の保全と持続的利用

##### (1) 研究開発領域名

生物多様性の保全と持続的利用

##### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

生物多様性の現状や機能を評価するとともに、気候変動や土地利用の改変に伴う将来予測を行う。また、そうした科学的知見をもとに、生物多様性の保全や多様な生態系サービスを維持するうえで必要な社会制度を模索する研究を行う。

##### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

現在は第6の大量絶滅の時代とも言われ、地球規模での生物多様性の減少が起きている。生物多様性はそれ自体に歴史的な価値があるだけでなく、人類にさまざまな自然の恵み、すなわち生態系サービスをもたらす源泉と考えられている。持続可能な社会の発展を実現するには、生物多様性の保全と持続可能な利用を探る科学の発展が不可欠である。2010年に名古屋で開催された第10回生物多様性条約締約国会議（COP10）で決議された20の愛知目標は、その実現のために必要な2020年までの具体策を示している。現在、その達成のための科学的評価と政策の実現が求められている。

生物多様性の研究は多岐にわたり一般的な整理は難しいが、ここでは4つに類型化したい。まず、生物多様性と生態系機能ないしは生態系サービスとの因果関係に関する定量的研究である。この分野は、欧米を中心に1990年代から小規模の野外実験や室内実験で、主に一次生産量を目的変数とした研究が進められてきたが、その後はさまざまな機能についての研究も進んできた。しかし、実際の保全・管理の現場に比べて時空間スケールがあまりに小さいため、応用には程遠い状況にあった。こうした背景から、最近では景観スケールで複数の機能やサービスを評価する研究が進んでいる<sup>1)</sup>。その代表が作物への送粉サービスであり、ハナバチの種数や景観の異質性が作物の結実に重要であることが実証されている。ただ、その他の生態系サービスについて、生物多様性がどの程度重要であるかはよくわかっていない。日本ではプロットスケールでの研究は進みつつあるが、大スケールでの研究は大幅に立ち遅れている。生物多様性と生態系サービスの研究から得られる成果は、生物多様性がなぜ必要か、どのような多様性がどの程度必要か、という問いに答えるうえで重要であり、今後、さまざまな地域でさまざまな時空間スケールにおいて、多様性と複数のサービスの関係性を明らかにする必要がある。

2番目は、生物多様性を減少させている要因、すなわち駆動因の解析である。世界的には人為による土地改変、生物の過剰採取、外来種、気候変動が主要因とされており、国内外を問わず相当数の証拠が得られている。日本においては、気候変動の影響についての証拠や予測はまだ十分ではなく、今後の課題である。一方で、上記の要因は単独で働くことはむしろ少なく、複合的に働くことが多いと考えられている。それらの複合的影響や将来予測については、国内外を問わず、十分な評価は行われていない。また日本では、人為管理の減少（アンダー・ユース）も重要視され、草原や雑木林の管理放棄が最終氷期以降から生き残ってきた生物の脅威になっている。一方で、人為管理の減少は、

大型哺乳類や一部の外来種の増加をもたらしていることも指摘されているが、十分な証拠に乏しい。今後こうした問題は、人口減少社会を迎える他国でも顕在化するに違いなく、日本発の先駆的な研究として発展が期待される。

3番目は、生物多様性の減少を防ぐ具体的な手法開発である。これは、世界各地で事業ベースで行われている生態系の再生や復元に代表されるが、科学的モニタリングに基づいた順応管理が必ずしも十分に行き渡っているわけではない。特に日本の場合、モデリングによる定量予測や間接影響の評価は遅れている。個別の例でいうと、外来種の駆除に関する技術開発は進んでいるが<sup>2)</sup>、生態系レベルでの復元の数値目標や、生息地管理による外来種の低密度管理の研究は不十分である。また、絶滅種の再導入はイギリスやオセアニア諸国では盛んで成功例も多いが、日本ではトキやコウノトリなどが、ようやく端緒についたばかりであり、科学的評価や予測はほとんど行われていない。さらに、生息地の連結性の向上は、分断景観や温暖化に伴う生物の移動を可能にするうえで重要である。欧米では実際の生物の移動をモデリングし、景観デザインに応用した研究もあるが<sup>3)</sup>、我が国では、河川など一次元(線)的な生態系以外では大きく立ち遅れている。

4番目は、生物多様性の保全や持続的利用を実現する社会や制度についての研究である。まず国立公園などの保護地域の選定には、最近費用対効果が高い場所を空間明示的に推定するアルゴリズム(Marxanなど)が普及し、温暖化や土地改変による将来予測、土地のコストや開発リスクなどの社会要因も組み込んだ保護区の推定も進んでいる。この研究は、近年オセアニアを中心に研究が大きく発展しているが<sup>4)</sup>、我が国ではまだ端緒についたばかりである。さらに、保全の社会的インセンティブや規制の在り方に関する研究も進みつつある。認証制度や生物多様性オフセットは有効と思われるが、その科学的評価はまだ途上といえる。こうした評価を体系化する際には、社会の状態と生態系の状態の相互作用を明示的に組み込んだモデルが必要であるが、現在は理論が先行していて、実証に役立つ研究開発が急務である。

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック(科学技術的課題、政策的課題)

ここでは研究開発上の課題を3つあげる。

1. 生物情報や環境情報の不足：我が国ではイギリスなどに比べ、解像度の高い生物の広域分布データが圧倒的に不足している。環境省は、1970年代から断続的に行った自然環境保全基礎調査により、国土スケールでの生物の分布データ(3次メッシュ：約1 km四方)を収集してきたが、資金不足により植生図以外は継続の予定がないらしい。環境省主導で進めているモニタリングサイト1000がその代役を果たすとも言われているが、面的な情報ではなく、希少種が記録されにくいなど、代役を果たせるとは思えない。また、植生データの整備もデータ収集から10年以上のタイムラグがあり、リアルタイムの情報が使える状況にない。生物情報は、分布の要因推定や将来予測、その検証などに必須であることから、その不足は多様性評価のボトルネックとなっており、米国やイギリスのように<sup>5)</sup>国が主体となって継続的な資金提供の体制を作るべきである。
2. 社会シナリオと土地利用変化のリンクの立ち遅れ：生物多様性の状態を空間明示的に将来予測することは、保護区設定やインセンティブの設定など、さまざまな政

策の意思決定に不可欠である。気候シナリオについては、すでにさまざまな予測モデルから提供されており、日本でも1 kmの解像度でダウンスケーリングがされている。しかし、生物の分布推定に必要な将来の土地利用シナリオは未作成である。その最大の理由は、社会要因と環境変化をリンクさせるロジックが構築されていないことにある。すでに未曾有の人口減少社会に突入しつつある我が国では、社会学者と生物学者が連携し、将来の土地利用変化を推定する研究開発はまさに急務である。社会シナリオと環境のリンクについての研究は、国際的な政策とも深く関連している。経済のグローバル化は、貿易を通じた生物多様性への負荷を促進していることがわかりはじめている。日本の場合、TPPの推進により、農地面積が今後大きく変貌する可能性があるが、そうした国際的政策を国内の土地シナリオ分析に組み込む必要がある。産・学・官、そして海外の組織とも連携した学際的な研究開発が望まれる。

3. 生物多様性の文化的価値：人類にとっての文化的サービスは、生態系サービスの評価のうちでもっとも研究が遅れている。生物多様性は、人間が感じる生活の豊かさ、地域社会のきずな形成、子供の教育効果など、さまざまな文化的側面とリンクしているに違いない。単なる事例研究を超えた体系化と、それに基づいた適切な政策オプションの模索は、生物多様性の保全や持続的利用を実現するうえで非常に重要である。

#### （5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

生物多様性の保全や持続的利用についての大型プロジェクトは、海外で盛んになっている。英国自然環境研究会議（NERC）の援助で行われているBESS（Biodiversity and Ecosystem Service Sustainability）<sup>1)</sup>では、さまざまなシナリオごとに、生態系サービスを提供できる生物多様性の閾値を推定する研究が進んでいる。これは社会学者と連携した「学際的生物多様性科学」の樹立を目指したものであり、フューチャー・アース（FE：Future Earth）や生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム（IPBES：Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services）への貢献を念頭に置いている。また、EU主導のBiodivERsA<sup>5)</sup>は、欧州15カ国21の研究助成団体からなる組織で、ヨーロッパスケールでの生物多様性関連の学際研究を促進するための資金提供をしている。米国では資源開発庁（USAID）<sup>6)</sup>が大規模な資金を投入して、主に熱帯地域（アマゾン、東南アジア、東アフリカなど）の生物多様性の保全と社会の持続可能な発展に関する研究を支援している。日本では手薄な生物多様性と食の安全、健康との関係も対象研究としている点は注目すべきである。オーストラリアでは環境省や研究機構の支援で、環境政策の意思決定に資する研究開発（保全優先順位、生物多様性オフセット、戦略的アセスメントと持続性計画）が行われており<sup>7)</sup>、特にモデルや統計の新技術の開発が特徴的である。日本でも愛知目標やIPBESに対応した政策対応型の大型研究が立ち上がっており<sup>8)</sup>、今後社会学者と連携したシナリオ分析や政策支援型の研究が期待される。

生物多様性のモニタリングについては、全米生態観測ネットワーク（NEON：National Ecological Observatory Network）<sup>9)</sup>が立ち上がり、10年間で4.3億ドルの

巨額を投じて、気候変動や土地利用変化、外来種の侵入などのデータがリアルタイムで一般公開される予定である。イギリスでは複数の組織が自然環境研究会議(NERC)や環境・食料・農村地域省(DEFRA)らの支援で、さまざまな生物のモニタリングが実施されている( (7) 国際比較参照)。

(6) キーワード

生態系機能、生態系サービス、絶滅危惧種、外来生物、気候変動、レジリエンス

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>生物多様性の観測に関しては、特に沿岸生物のモニタリング技術の高度化が進んでいる。湖沼では環境DNAによる新たなモニタリング手法の開発が進み、土壌では微生物のメタゲノム解析が進んでいる。(科研費、JST-CRESTなど)</li> <li>生物多様性の減少要因の解明や外来種の影響評価が進んでいる。耕作放棄地の問題や大型哺乳類の増加要因の解析はまだ途上である。(科研費、環境省推進費S-9)</li> <li>温暖化による生物分布の変化は、基礎データの集積は進みつつあるが、将来予測はサンゴやブナなどに限られている(環境省推進費S-8、S-9)。</li> <li>生物多様性と生態系機能、生態系サービスの関係の研究は、欧米に比べて立ち遅れている。</li> <li>生物多様性の指標開発は各生態系で進められているが、数値目標や閾値の有無など評価は遅れている。(科研費、農林水産省研究費)</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>外来種の駆除や大型哺乳類による被害防除に関する技術の高度化は進んでいる。しかし、低密度管理の手法や数値目標の評価は遅れている。(環境省推進費、農林水産省研究費など)</li> <li>絶滅種の再導入は、トキやコウノトリなど一部の種で進められているが、それらを支える自然再生や環境保全型農業の効用評価や持続可能性の評価は遅れている。(環境省推進費)</li> <li>保護区の効率的な探索についての研究は進行中である。しかし、社会シナリオを考慮した解析は立ち遅れている。(環境省推進費S-9)</li> <li>貿易による生物多様性への負荷の研究が進められている。生物多様性オフセットの研究は立ち遅れている。(環境省推進費S-9)</li> </ul>
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究開発による産業化は特に進展していない。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>国立科学財団(NSF)は最近、遺伝的多様性、系統的多様性、機能的多様性の相互作用を解明する研究枠Dimension of Biodiversity<sup>10)</sup>を設け、この分野の基礎研究を推進している。</li> <li>生物多様性観測の大規模ネットワーク(NEON、米国生物季節ネットワーク(USA-NPN: USA National Phenology Network<sup>11)</sup>)に対する資金援助が充実しており、各組織が独自の分析を行うとともに、情報を広く社会に公開し、さまざまな評価や予測に資するシステムを構築している。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>地球規模で重要な生物多様性を有する熱帯地域で、持続可能な保全と社会の発展を保障する研究が展開している。密輸の取り締まり、食の安全、健康なども考慮している。(USAID、NSF)</li> </ul>
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究開発による産業化は特に進展していない。</li> </ul>

欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>イギリスでは生物多様性モニタリングとその評価が、国から豊富な資金援助を受けて英国自然保護委員会（JNCC）<sup>12)</sup> や Insect Pollinators Initiative<sup>13)</sup> により継続されている。新たなモニタリングツールの開発も進んでいる。（BESS）</li> <li>温暖化による分布予測変化についての研究が進んでいる<sup>14)</sup>。（NERC、European Commissionの支援による）</li> <li>景観スケールでの生物多様性と生態系サービスおよびそのトレードオフの研究が進んでいる。（BESS、BiodivERsA）</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>開発途上国における保護区のプランニングや住民による生物資源の持続利用の研究が進められている。（Darwin Initiative<sup>15)</sup>）</li> <li>社会シナリオごとに生物多様性の減少の閾値を特定する研究が進められている。（BESS）</li> </ul>
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究開発による産業化は特に進展していない。</li> </ul>
豪州	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>生物多様性の減少要因の解明、外来種の多種間相互作用、生息地連結性の評価、海洋生物のモニタリングなどが広く行われている。（NERP：National Environmental Research Programs<sup>4)</sup>）</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>優先的な保護区の抽出、管理上の海洋ゾーニング、低コストでの最適モニタリング手法、社会生態連結モデルによる政策の意思決定への支援、生物多様性オフセット、バイオバンキングなどが進められている。（NERP, CEED：Centre of Excellence for Environmental Decisions<sup>7)</sup>）</li> </ul>
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究開発による産業化は特に進展していない。</li> </ul>
中国	基礎研究	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>米国との共同プロジェクトによる生物多様性、生態系の評価が進んでいる。（NSF<sup>10)</sup>）</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>主に農業生態系を中心に、外来種の管理システムの構築が進められている。（Program 973<sup>16)</sup>）</li> </ul>
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究開発による産業化は特に進展していない。</li> </ul>
韓国	基礎研究	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>顕著な活動や成果は把握できていない。</li> </ul>
	応用研究・開発	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>顕著な活動や成果は把握できていない。</li> </ul>
	産業化	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>顕著な活動や成果は把握できていない。</li> </ul>

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## （8）引用資料

- 1) Biodiversity & Ecosystem Service Sustainability（BESS）. <http://www.nerc-bess.net/>
- 2) 環境省. 環境研究総合推進費. <http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/gaiyou/>
- 3) Brad H. McRae, Brett G. Dickson, Timothy H. Keitt, and Viral B. Shah 2008. USING CIRCUIT THEORY TO MODEL CONNECTIVITY IN ECOLOGY, EVOLUTION, AND CONSERVATION. Ecology 89:2712-2724.

- <http://www.esajournals.org/doi/abs/10.1890/07-1861.1>
- 4) National Environmental Research Program (NERP) . NERP Environmental Decisions Hub.  
<http://www.nerpdecisions.edu.au/>
  - 5) BiodivERsA. <http://www.biodiversa.org/>
  - 6) United States Agency for International Development (USAID) . USAID'S BIODIVERSITY POLICY.  
<http://www.usaid.gov/biodiversity/policy>
  - 7) Centre of Excellence for Environmental Decisions (CEED) . <http://ceed.edu.au/>
  - 8) アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合研究 [環境省 環境研究総合推進費 S9].  
<http://s9.conservationecology.asia/theme>
  - 9) National Ecological Observatory Network (NEON) . <http://www.neoninc.org/>
  - 10) National Science Foundation (NSF) . Dimensions of Biodiversity.  
[http://www.nsf.gov/funding/pgm\\_summ.jsp?pims\\_id=503446](http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503446)
  - 11) USA National Phenology Network (USA-NPN) . <https://www.usanpn.org/>
  - 12) Joint Nature Conservation Committee (JNCC) . <http://jncc.defra.gov.uk/>
  - 13) Biotechnology and Biological Sciences Research Council (BBSRC). Insect pollinators initiative.  
<http://www.bbsrc.ac.uk/pollinators>
  - 14) The University of York. The York Research Database. Prof. Chris D Thomas, FRS. Projects.  
<https://pure.york.ac.uk/portal/en/researchers/chris-d-thomas%2875de1a24-019b-4791-8397-c8632e27de07%29/projects.html>
  - 15) Darwin Initiative. <http://www.darwininitiative.org.uk/project/funding-scheme/>
  - 16) Institute of Plant Protection (IPP) , Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS) .  
[http://www.ippeaas.cn/Html/2009\\_03\\_26/2585\\_11735\\_2009\\_03\\_26\\_12269.html](http://www.ippeaas.cn/Html/2009_03_26/2585_11735_2009_03_26_12269.html)

### 3.4.2.2 陸域資源と生態系管理（含む陸水）

#### (1) 研究開発領域名

陸域資源と生態系管理（含む陸水）

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

地球温暖化や土地利用変化などさまざまな環境変動の中で、陸域資源およびそれが生み出す陸域生態系サービスを持続的に保全・利用することが今後の人類にとって最大の課題である。そのため、現時点における陸域生態系の資源およびサービスの評価ならびその変動をもたらす自然・社会要因を抽出し、将来予測に資する知識を創出するための研究開発を行う。ここでは、陸域資源の養分物質であると同時に汚染物質として知られ、日本における研究が十分ではない窒素の生物地球化学に関わる問題として、陸水を含む生態系管理と陸域資源に関する研究開発について述べる。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

世界規模での環境問題には、地球温暖化をはじめとしてさまざまな要因があげられている。それらに対して現在の地球システム全体が有する環境の許容限界圏を「Planetary boundary」と定義し、グローバルな評価が行われている<sup>1)</sup>。表1に示すように気候変動の問題と並んで、生物多様性損失と窒素循環過剰が地球環境の不可逆変化を回避する限界をすでに超えてしまった問題である<sup>1)</sup>。限界値の3倍以上である窒素過剰の問題は陸域資源の持続的利用と環境保全に深く関わっており、世界各地でのさまざまな研究が展開されている。

表1. 地球システムにおける各問題のPlanetary boundaries(地球システムの許容限界)の限界値、現状値、工業化以前の値(Rockström et al. 2009<sup>1)</sup>より抜粋)。現状値が限界値を超えている場合には、そのプロセスがすでに地球システムの不可逆変化を回避する許容境界値を超えている状況にあることを示す。

プロセス	パラメータ	限界値	現状値	工業化以前の値
気候変動	大気二酸化炭素濃度 (ppm <sub>v</sub> )	350	387	280
生物多様性損失	絶滅率 (種/100万年)	10	>100	0.1-1
窒素循環	人間活動のために固定された大気窒素 (10 <sup>6</sup> ×Mg/年)	35	121	0
オゾン層破壊	オゾン濃度 (Dobson unit)	276	283	290
淡水利用	淡水消費量 (km <sup>3</sup> /年)	4,000	2,600	415
土地利用変化	耕地利用率 (%)	15	11.7	極めて低い

窒素はあらゆる生物の必須養分であるため、森林や草地などの自然生態系の一次生産はもちろんのこと、食糧生産のために大量の窒素が必要となる。また、化石燃料の燃焼に伴って生じる窒素酸化物は大気中の酸性物質として挙動する。大気中の窒素ガスは不活性ガスであるため、そのままでは養分としての利用が限られていたが、20世紀初頭に工業的に窒素ガスからアンモニアを合成する技術(Haber-Bosch法)が開発されて以来、

大気から陸域に反応性窒素 (Reactive nitrogen : 窒素ガス以外の窒素化合物の総称) として固定される窒素量は自然界に生じる量と比べて、2倍以上に増大する結果となった<sup>2)</sup>。環境中に過剰に放出された反応性窒素は大気、土壌、水の富栄養化をもたらし、陸域生態系の構造や機能、そこからもたらされるさまざまな生態系サービスの劣化を生じさせる。

したがって、陸域資源の持続的利用と環境保全の両立を図るために、陸域における窒素汚染の問題と人間活動の関わりについて、国内外でさまざまな研究が行われてきた。欧州では全域における窒素汚染の問題について、200名を超える研究者からなる多角的な統合評価が実施された<sup>3)</sup>。そこでは、前世紀において人類が大気窒素ガスを反応性窒素に変換することで、全球の窒素循環をかつてないほど変化させてしまったこと、それによって窒素肥料の利用が増えることで世界の人口が増加した一方、環境や人間の健康について相当の悪影響をもたらしていることが示されている。特に、水質や大気の汚染、温室効果ガス、生態系、生物多様性、土壌劣化が深刻な課題としてあげられている。例えば、欧州における淡水のほとんどにおいて生物多様性劣化の基準値である窒素濃度を超えており、EU人口の3%が環境基準を大幅に上回る50 mgL<sup>-1</sup>以上の硝酸態窒素を含む飲料水を利用している。また、窒素酸化物やアンモニアなどの大気汚染物質は粒子状物質や亜硝酸、オゾンとの生成を伴い、人間の呼吸器や作物への悪影響を引き起こしている。そして、食糧やエネルギーの利用と環境・生態系保全の両立を図るための国際的で多面的な共同研究の必要性を提起している<sup>3)</sup>。米国では気候変動における窒素の役割を中心として、さまざまな生態系モニタリングや野外実験、包括的な評価が実施されている<sup>4)</sup>。統合報告書では、気候システムにおける大気窒素汚染の影響、陸域農業システムにおける窒素循環の問題、人間活動に由来する水圏への窒素流出の影響、窒素汚染と生物多様性の関係、窒素汚染が人間の健康に及ぼす影響について米国全体での現状と課題についてまとめられている<sup>4)</sup>。その結果、米国における人間活動の結果として増大した反応性窒素は気候変動、生物多様性劣化、大気・水域の深刻な汚染をもたらしており、窒素汚染削減に向けた取り組みが急務であることを指摘している。

国内においては日本全体の窒素循環やフロー解析について、主に統計資料やシミュレーションモデルを用いた研究事例が見受けられ、人間活動による窒素循環の増大によって地下水や河川水、沿岸域での水質悪化など、生態系・生物多様性や環境の汚染を引き起こしていることが示されてきた<sup>5,6)</sup>。しかしながら、それらの研究による現状認識をふまえて、今後の生態系管理のあり方や陸域資源の保全方策に向けての踏み込んだ議論や研究情報については依然として不十分である。

中国や韓国においては国家レベルのプロジェクトとして生態系変動や環境モニタリングに関するネットワーク研究が注目され、取り組みが進んでいる。しかしながら、人間活動の影響による窒素循環の変化やそれが生態系に及ぼす影響に関する研究は極めて限定的であり、その研究開発は依然として不十分である<sup>7-9)</sup>。また、今後において産業発展や人口増加が見込まれる東南アジア地域、南米・アフリカ地域における窒素資源の変容や生態系影響はとても重要であるのにも関わらず、その研究は極めて不十分であるのが現状である<sup>9)</sup>。

東南アジアなどの開発途上国においては国連気候変動枠組条約に関連して、森林減少・

劣化に伴う温室効果ガス削減の取り組みが進められ、削減活動に対して経済的インセンティブを与えるメカニズムの推進が議論されている（REDD+：Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries Plus）。また、生産から流通、加工に至るまでの環境保全に配慮し、持続的な木材生産を推奨するための森林認証制度が国際的な認証機関である森林管理協議会（FSC：Forest Stewardship Council）などを中心に進められている。窒素循環の過程で生成される亜酸化窒素（ $N_2O$ ）は二酸化炭素やメタンと同様に温室効果ガスであり、硝酸態窒素は水圏における汚染源となりうる。したがって、生物生産の養分そして環境中（大気、土壌、水など）での汚染物質としてふるまう窒素の問題は地球温暖化抑制に貢献が期待されている森林の炭素固定機能やその他の環境保全機能にも大きな影響を及ぼすため、グローバルおよび地域スケールの視点からの持続的な森林管理体制の構築を進める上でも、適正な窒素資源利用や管理を進めることが必要である<sup>9)</sup>。

#### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

人間活動の結果として増大した窒素循環は、養分としてのポジティブな影響を上回る速度で増加し、地域、国、全球レベルでのさまざまな生態系影響を引き起こしている。それらは今後の陸域資源の環境保全型持続的利用とそれに対応する生態系管理のあり方を検討する上で欠くことのできない視点である。大気窒素ガス（ $N_2$ ）が工業的あるいは生物的に陸域生態系に固定され、それがさまざまな経路を経て生態系への影響や環境汚染を引き起こす連鎖的影響は、ひとつの系から別の系へと影響が伝搬していくことから窒素カスケード（Nitrogen Cascade）と呼ばれている<sup>2)</sup>。窒素カスケードの解明と生態系管理に資する研究開発を進めていくためには、ひとつの学問領域を超えた学際的な視点や取り組みが必要である。また、人間活動によって増大した窒素循環が、どのように生態系の構造や機能（炭素固定を含むさまざまな環境保全機能を含む）にインパクトを与え、それを基にどのように将来の生態系管理法を構築するのかという問いに対応できる研究を展開するためには、生態系の変動に合わせた長期的かつ広域スケールでの研究開発が必要である。現状では、窒素に関連した大気汚染や水質汚染を防ぐためのトップダウンアプローチとしての法規制や環境基準の設定などは比較的進んでいる。しかしながら、生態系プロセスや生態系サービスに与える窒素循環の影響を長期的にモニタリングし、その評価や将来予測につなげるような研究を支援する長期的な研究予算の枠組みが極めて少ない。数年規模での成果を基本とした現行の研究予算システムは限定的な現象や特定の反応を明らかにするためには効果的であるが、窒素カスケードを含むダイナミックな生態系影響を考慮に入れた研究開発の取り組みには不十分であり、ひとつのボトルネックとしてあげられる。

また、政策や法規制によって自治体あるいは国レベルで実施可能なトップダウンアプローチとは別に、食糧やエネルギー消費に関わる個人消費者の視点から人為由来の窒素汚染問題をボトムアップアプローチで削減するための研究や評価技術の開発が必要である。それによって、陸域資源の有効活用と環境保全を視野に入れたトップダウン・ボトムアップ両面からのガバナンスを構築するための科学的知見の創出が期待される。さらに、食糧や飼料、エネルギーの国際貿易に付随する全球規模での窒素フローの変化と、

それが地域レベルでの環境汚染、資源管理、生態系管理に及ぼす影響と生態系サービスとの相互関係に関する科学的知見も不十分であり、国際共同での学際的な研究開発が必要とされる<sup>9-11)</sup>。

#### (5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

ランドスケープレベルでの環境・生態系情報を長期的にモニタリングし、その環境影響や生態系サービス評価を進めている取り組みとして、米国国立科学財団 (NSF) の長期的な財政支援を受けて設立された長期生態学研究ネットワーク (US-LTER: US Long-Term Ecological Research Network) が稼働している。US-LTERでは、窒素の生物地球化学研究に関連して陸域資源や生態系管理に関する多くの学術成果をあげ、その基礎データを広く公開している<sup>12)</sup>。NSFは近年、US-LTERおよび関連ネットワークを包含する形で、全米生態観測ネットワーク (NEON: National Ecological Observation Network) を開始し<sup>13)</sup>、地球温暖化や生物多様性損失、窒素汚染問題を含むさまざまな環境問題に対応した科学情報を包括的にモニタリングし情報公開するための取り組みを推進している。長期生態学研究 (LTER) の取り組みは欧州、北南米、東アジア・オセアニアなど世界各地に拡大し、国際LTERネットワークとして、さまざまな時空間スケールにおける生態系および人間-環境相互作用系をとりまく多様な研究課題に取り組んでいる<sup>9, 14, 15)</sup>。中でも、気候変動下における人為由来の窒素循環過剰がもたらす生態系機能の変化やサービスの劣化について、国際LTERネットワークレベルでの研究イニシアチブが開始されている<sup>9, 16)</sup>。日本のLTERネットワークもその加盟ネットワークとして数々の個別研究を進めており、国際LTERネットワークでの研究イニシアチブを牽引する役割を担っているものの<sup>9)</sup>、長期的・国際的ファンディングの不足もあり十分な機能を果たしてはいない。

また、国際的なスケールでの窒素汚染問題を取り扱う研究プラットフォームとして国際窒素イニシアチブ (INI: International Nitrogen Initiative) があげられる<sup>16)</sup>。INIは国際窒素会議を始めとした研究者間の情報共有・情報発信、国際共同研究推進の取り組みを進めるほか、窒素汚染に関する政策提言や各種レポートの出版を進めている。INIと連携して進められている「窒素フットプリント」評価の研究は、本領域に関連する最近の注目動向のひとつとしてあげられる。それは、消費者が食糧やエネルギーを最終消費することに対し、それらが生産され、流通、消費されるまでの過程で環境中 (大気、土壌、水域) に放出される窒素ロス量を「窒素フットプリント」として評価する取り組みである<sup>17)</sup>。消費者の最終消費量を基準として評価される窒素フットプリントとその変動要因の解析により、社会経済要因や個人要因などで変動する消費者行動の結果として環境中に放出される窒素ロス量の予測研究の開発に貢献でき、消費者レベルでの窒素削減行動を促すための科学的知見が創出されることが期待される<sup>17)</sup>。

#### (6) キーワード

窒素循環、生物地球化学、窒素カスケード、長期生態学研究、窒素フットプリント、国際共同研究

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	・生態系レベルでのさまざまな窒素の生物地球化学に関する研究蓄積があり、気候変動・大気汚染を含む研究開発が進捗しつつある <sup>16, 17)</sup> 。しかしながら、長期的な観測に基づいた研究については依然として不足している。
	応用研究・開発	○	→	・国家スケールでの窒素フロー・収支の解析が進み、日本全体での現状認識が進んできた <sup>5, 6)</sup> 。しかしながら、それを元にした政策提言やメカニズム解明につながる研究開発については十分ではない。
	産業化	△	↑	・エネルギー・食糧の低自給率、少子高齢化・地域過疎化による社会構造の変化、中国・ロシアなどからの長距離越境大気汚染（PM2.5含む）に対応した窒素フットプリント、それに伴う窒素汚染や生態系影響に関する研究が遅れている <sup>9-17)</sup> 。
米国	基礎研究	◎	↑	・米国生態学コミュニティやUS-LTERにおける窒素の生物地球化学、それに関連した生態系構造・機能に関する基礎研究に傑出した成果があり、進展を続けている <sup>12, 13)</sup> 。
	応用研究・開発	◎	↑	・気候変動に関連した窒素環境問題の統括的な報告書が出版されるなど <sup>4, 11)</sup> 、基礎研究をベースとした応用研究の進展が認められる。
	産業化	◎	↑	・NEONなどトップダウンによる統括的研究推進の体制が整備され、衛星リモートセンシングとの連携やビッグデータの取り扱い、生態系サービスの経済評価など、関連分野を先導する研究開発が進められている <sup>11, 13)</sup> 。 ・窒素フットプリントの評価手法が開発され <sup>17)</sup> 、それに基づく環境中への窒素ロス削減に関する科学提言への取り組みが進捗している。
欧州	基礎研究	◎	↑	・ICP-Forests（International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests） <sup>19)</sup> を始めとするサイトベースでのモニタリング研究により傑出した基礎研究が進んでいる。
	応用研究・開発	◎	↑	・欧州全域スケールでの窒素汚染に関する統合評価が進められ、窒素カスケードの定量的評価など活発な応用研究の進展が認められる <sup>4)</sup> 。
	産業化	◎	↑	・窒素の生物地球化学に関する経済評価なども進められており <sup>4)</sup> 、気候変動との関連でも国家ネットワークレベルでの研究が進められている。
中国	基礎研究	○	↑	・中国科学院（CAS）の主導によるトップダウンアプローチでの生態系監視網が整備され、いくつかの基礎研究における成果が認められるとともに、今後のますますの発展が期待される <sup>8, 20)</sup> 。
	応用研究・開発	△	→	・基礎研究およびその研究論文出版に対して、それを活かした応用研究が不足している。
	産業化	×	→	・都市部を中心とした大気汚染（PM2.5を含む）、地域における土壌・水汚染が深刻化しているものの対策や研究開発が遅れている <sup>21)</sup> 。
韓国	基礎研究	△	→	・森林研究所および環境部によるKLTERの取り組み <sup>22)</sup> によって、いくつかの基礎研究開発は進んでいるもの、窒素循環に着目した生態系研究について目立った成果は得られていない。
	応用研究・開発	△	↑	・2013年に国立生態学研究所が設立され、基礎研究のみならず応用研究の開発が期待される <sup>23)</sup> 。
	産業化	×	→	・目立った取り組みや進展は認められていない。

## (註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

## (註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、  
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

## (註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) Rockström et al. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature* 461: 472-475
- 2) Galloway et al. (2008) Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science* 320: 889-892.
- 3) Sutton et al. (2011) *The European Nitrogen Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press
- 4) Suddick et al. (2012) *The Role of Nitrogen in Climate Change and the Impacts of Nitrogen-Climate Interactions on Terrestrial and Aquatic Ecosystems, Agriculture, and Human Health in the United States: A Technical Report Submitted to the US National Climate Assessment*. North American Nitrogen Center of the International Nitrogen Initiative (NANC-INI), Woods Hole Research Center, 149 Woods Hole Road, Falmouth, MA.
- 5) Shindo et al. (2009) Nitrogen flow associated with food production and consumption and its effect on water quality in Japan from 1961 to 2005 *Soil Sci. Plant Nutr.* 55 532-45
- 6) 農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」(2006) バイオマス利活用システムの設計と評価, 農業工学研究所, つくば
- 7) Kang H (2001) Effect of nitrogen deposition on terrestrial ecosystems. *Korean J. Environ. Biol.* 19: 232-238 (in Korean with English abstract)
- 8) Fang et al. (2011) Atmospheric deposition and leaching of nitrogen in Chinese forest ecosystems. *Journal of Forest Research* 16: 341-350.
- 9) Shibata et al. (2014) Consequence of altered nitrogen cycles in the coupled human and ecological system under changing climate: The need for long-term and site-based research. *AMBIO* (Online)
- 10) Lassaletta et al. (2014) Food and feed trade as a driver in the global nitrogen cycle: 50-year trends. *Biogeochemistry* 118: 225-241.
- 11) Compton et al. (2011) Ecosystem services altered by human changes in the nitrogen cycle: a new perspective for US decision making. *Ecological Letters* 14: 804-815.
- 12) Driscoll et al. (2012) Science and society: The role of long-term studies in environmental stewardship. *BioScience* 62: 354-366.
- 13) National Ecological Observation Network, <http://www.neoninc.org/>
- 14) International Long-Term Ecological Research Network, <http://www.ilternet.edu/>
- 15) International Nitrogen Initiative, <http://www.initrogen.org/>

- 16) Vihervaara et al. (2013) Using long-term ecosystem service and biodiversity data to study the impacts and adaptation options in response to climate change: insights from the globalILTER sites network. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 5:53-66
- 17) Leach et al. (2012) A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment *Environ. Development* 1: 40-66
- 18) 佐竹研一(編)(2010) 特集「窒素汚染と大気・水環境」, 地球環境 15(2), (社) 国際環境研究協会
- 19) ICP-Forests (International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests), <http://icp-forests.net/>
- 20) Lu et al. (2013) Long-term nitrogen addition decreases carbon leaching in a nitrogen-rich forest ecosystem. *Biogeosciences* 10: 3931-3941
- 21) Liu et al. (2013) Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature* 494: 459-462
- 22) KLTER (Korea Long-Term Ecological Research Network), <http://www.klter.org/emain.htm>
- 23) National Institute of Ecology, [http://www.nie.re.kr/nie\\_eng/index.html](http://www.nie.re.kr/nie_eng/index.html)

### 3.4.2.3 沿岸域および海洋の資源と生態系管理

#### (1) 研究開発領域名

沿岸域および海洋の資源と生態系管理

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

乱獲、水質汚染、海岸改変、外来種問題、気候変動など、多様な人為的負荷が多重に作用して劣化が著しい沿岸域および海洋の生物多様性と生態系機能について、持続的に資源および生態系サービスを利用するための基礎的研究および応用的技術を体系的に構築する。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

##### 1. 基礎的研究の動向

陸域に比較して、生物多様性・生態系サービスの研究が十分に進展していない海域生態系では、全球的なモニタリングによる生物多様性の全容の把握、および、生物多様性・生態系サービスの関係性や変動機構の解明の継続が最重要課題である。海洋生物多様性については2000年代に行われたCensus of Marine Life (CoML) により全球的な知見が飛躍的に増加した<sup>1)</sup>。また、データベース構築や種検索にかかる多様な関連プロジェクト(例えば、OBIS (Ocean Biogeographic information System)<sup>2)</sup>、EOL (Encyclopedia of Life)<sup>3)</sup>、WoRMS (World Register of Marine Species)<sup>4)</sup>などが立ち上がり、海洋生物多様性・生態系の知見の向上に貢献している。一方、CoMLの成果を海洋生態系の保全や海洋生物資源の持続的利用に結びつける研究プログラムが立案されている(LiCO: Life in a Changing Ocean)<sup>5)</sup>が、2000年代終盤以降の世界的な経済成長の停滞の影響もあってその展開は不十分であり、各国・地域ないしは特定の生物群・生態系に焦点を絞って非組織的に進行しているのが現状である。

##### 2. 海洋生物資源の保全に向けた研究開発

海洋生物資源の保全、管理については、水産有用種に関する研究が進んでいる。科学的根拠に基づく資源管理の徹底が重視されるようになり、資源評価に関連する漁獲可能量制度(TAC: Total Allowable Catch)や個別漁獲割当(IQ: Individual Quota)、漁獲割当量に譲渡性を付与した方法(ITQ: Individual Transferrable Quota)による管理が米国、欧州を中心に展開されている。日本においてもTACとIQが導入されており、ITQの導入が現在検討されている。このほか、韓国においてはTACとIQが導入されている一方で、中国は、TACやITQの法律上規定はあるものの未実施とされている。

##### 3. 海洋保護区を含む海域の空間利用計画による保全・持続的利用に向けた研究開発

空間利用計画による保全・持続的利用に向けた研究開発については、オーストラリアのクイーンズランド大学において保護区の選定などを目的として開発されたMarxanにより<sup>6,7)</sup>、保全と利用の観点から効率的かつ科学的に保護区を選定する研究が、グレートバリアリーフなどを中心に展開されている<sup>8)</sup>。公海域の保全施策の推進を目的として、生物学的・生態学的に重要な海域(EBSA: Ecologically or Biologically Significant

marine Area) の候補地を選定する専門家ワークショップが、北太平洋および北西大西洋の公海域や地中海において開催されてきており、東南アジア海域においても同様の会議が2015年に予定されている。日本でも本分野における研究が急速に進展し、その成果は環境省によるEBSA候補地選定事業などに有効に生かされているが、米国および欧州に比較すると遅れをとっている。今後、保護区のネットワーク化、各保護区管理効果の評価などの研究を推進する必要がある。

#### 4. 移入種の生態系影響評価・管理に関する研究開発動向

日本および中国、韓国、ロシア、カナダ、米国が参加する北太平洋海洋科学機構（PICES : The North Pacific Marine Science Organization）において、海産外来種の情報収集システム開発が現在行われている<sup>9)</sup>。また、米国では、スミソニアン環境研究センターを中心に海産侵入種を対象とした多角的な生態学的アプローチによる研究を進展している。日本では、国立環境研究所や主要分類群学会を中心にデータベースの構築や、侵入経路の解明などの研究が進みつつあるが<sup>10)</sup>、海産種の生態系への影響評価をふまえたリスク分析、予防などなどは個別事例に留まっており、今後の研究課題である。

#### 5. 気候変動影響、適応策に関する研究開発

気候変動が海洋生物・生態系に与える影響の研究については、ここ数年間で各サブシステムにおける重要なプロセスの特定<sup>11)</sup> および全海洋系への影響評価<sup>12)</sup> が進展した。応用的な面においては、各種の現在の分布域と環境要因との関連性を元に、各種気候変動シナリオに基づいて、将来の分布変動を予測する手法が確立しつつある。例えば、日本ではサンゴ礁の将来の分布域が水温上昇と海洋酸性化の複合作用を受けて減少することなどが予測された<sup>13)</sup>。また、気候変動影響に関する基礎的研究においては、各種の分布や生物量の変動が、物理的環境要因（水温、pHなど）だけでなく、種間相互作用や進化的反応、幼生分散の制約などさまざまな影響を受けて複雑に変化することが明らかになってきた<sup>14)</sup>。さらに、気候変動予測の成果を将来の海洋資源・生態系の管理に反映させる試みについては、例えば、上記3で取り上げた海洋空間利用計画のような取り組みに対して、将来の分布変化をふまえた保護区の設定法の検討が行われている。しかし、現状では多くの研究は各種ごとの分布予測にとどまっている。生物多様性全体や生態系機能の将来予測やそれをふまえた保全管理策の研究の進展が望まれる。

#### 6. 社会科学との連携研究の進展

海洋における生態系サービスの経済学的評価についても、欧米で先端的な研究が進んでいる<sup>15,16)</sup>。また、生態系サービス診断評価ツールの開発（Marine InVEST）<sup>17)</sup> など、技術的進展も著しい。日本では最近になって、干潟の経済評価やBlue Carbon Sinkの定量的評価などが環境省や国土交通省、農林水産省主導で進んだ<sup>18-21)</sup>。これらの研究の進展は、今後、海洋を対象とした二酸化炭素排出権取引や、生物多様性オフセットの導入などと関連して、政策決定や産業振興に関連してくると思われる。海域の各種生態系サービスの現状については、Halpernらの一連の研究により全球レベルでの時空間変異が明らかになってきた<sup>22,23)</sup>。特に、沿岸生態系の脆弱性や回復可能性について、海洋資源・

生態系サービスの減少と、沿岸域のほかの負荷（人口増加、海面上昇、Food Security、貧困問題、統治機構など）を同時に検討する必要性が認識されるようになり、海洋工学や環境経済学、人類学などの分野を取り込んだ領域統合的なアプローチが進みつつある。この分野については、特に欧州で関心が高い。また、多様な人間活動による負荷が深刻な開発途上国の沿岸海域を対象として、国際的な協力研究が進みつつある。日本は東南アジアを中心にJST-JICAの地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）<sup>24)</sup> や、総合地球環境学研究所のプロジェクトなどによる多数の研究が進みつつあるが、その多くは二国間協力研究であり、異なる研究プロジェクト間の連携による統合的な理解が進んでいる状況とはいえないのが現状である。

#### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

前述の通り、沿岸域および海洋の資源と生態系の効率的な管理に向けては、海域生物多様性および各種生態系サービスの全球的な変異を明らかにする必要がある。現在入手可能な広域スケール情報は、地域ごとの主要海域生態系（例：サンゴ礁、藻場、干潟など）の分布・変動をとらえるには解像度が低すぎる一方、局所スケールでの高解像度の空間情報を全球レベルで入手するのは技術的・資金的に非常に厳しいのが現状である。したがって、地域レベルで得られる断片的な高解像度空間情報を、グローバルスケールに拡大する（外挿・内挿する）空間統計学的方法の技術開発が重要な課題と考えられる。

このような広域・高解像度の長期データ、空間データは、いわゆる「ビッグデータ」であり、その効率的・効果的な分析には、インフォマティクスの知識・技術をもつ人材の育成・登用が不可欠である。また、各国のさまざまな機関・組織で取られたビッグデータのアクセスと利用については、オープン化されていないものが多い（特に日中韓）。これを解決するため、共通プラットフォームの開発運用に向けた技術的検討、およびデータ利用に関する合意形成プロセスの構築が必要である。

海洋資源と生態系サービスの評価、およびその管理においては、その利用に関する社会学および経済学的な解析が不可欠である。しかし、これらの社会経済学的研究は、沿岸海域の資源、生態系サービスの変動に関する最新の科学的知見を十分に生かしていないのが現状である。また、グローバルな社会経済学的解析をする研究と、各沿岸海域の地域社会を対象とした研究は、それぞれ独立して進んでおり、統合的な視点が欠けている。この解決に向けて、グローバル・ローカルな社会科学と自然科学（海洋学、生態学）の有機的な連携による社会・生態学システム（Social-Ecological System）により統合的な研究を推進することが求められている。

沿岸海域における海洋生態系の研究は、世界でもっとも生物多様性が高い東南アジアなど熱帯海域での研究が不十分である。しかしながら、先進国への養殖魚介類の輸出拡大などに伴う海域利用の変化（例：マングローブにおける養殖池の開発）、リゾート開発などが無秩序に行われてきた結果、生物多様性喪失および生態系サービス劣化が著しい速度で進んでいる。このように開発途上国の海域利用の変化はグローバルな経済動向に著しく影響される。近年研究が進んできたFootprint研究<sup>25, 26)</sup>はこの評価に有用であるが、国レベルの経済統計を利用する 경우가多く、各地域の海域利用の実情を反映した

研究アプローチの開発が必要である。

最後に、ここにあげた基礎的・応用的研究が、沿岸生物多様性や生態系サービスへの持続的利用の実質的な改善に結びついているかどうかの検証は十分に行われていないのが現状である。効果的な検証方法の開発、長期的な検証をふまえた順応的管理法などについて、技術面および研究制度・環境面の整備が求められる。

#### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

我が国では、JST-CREST「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出」研究領域が2011年より開始されている。この研究領域は、海洋生物多様性の研究について、これまでの各種ボトルネックを克服するための新技術開発を目指しており、高解像度各種センサや海中ロボットの開発、海洋ゲノミクス、リモートセンシング、生態系モデリングなど多様な研究課題が進行中である<sup>27)</sup>。

米国では、2013年よりMarineGEO（The Marine Global Earth Observatory）がスミソニアン協会のTMON（Tennenbaum Marine Observatories Network）の主導のもと開始された<sup>28)</sup>。この事業は、米国スミソニアン協会に所属する研究機関が協同し、各地の調査フィールドや、膨大な学術情報・資料を基に、生物多様性の広域長期研究を推進しようとする事業であり、世界中の海洋研究者が注目している。本事業は、生物多様性と海域のレジリエンスの関係性を解明し、持続的利用に貢献することを目的としている。

欧州では、これまでの複数の研究コンソーシアム（EUR-OCEANS、MarBEF、Marine Genomics Europe）を統合する形で、EuroMarine projectが2011年より準備され、2014年よりEuroMarine+として本格的に始動した<sup>29)</sup>。海洋生物多様性、生態系の主に基礎的な研究分野において、遺伝子から生態系までの研究を統合的に推進することを目標としている。

沿岸生態系のさまざまな景観を対象に、研究者の国際的なネットワーク研究による広域比較研究が進展している。例えば、アマモ場ではZEN（Zostera Experimental Network）<sup>30)</sup>、コンブ林ではKEEN（Kelp Ecosystem Ecology Network）<sup>31)</sup>などのネットワークが形成され、統一した観測・実験による生態系の変動様式や生物多様性・生態系サービスの関連性の評価が行われている。中でも、熱帯から温帯の岩礁域・サンゴ礁域を対象としたReef Life Survey<sup>32)</sup>は研究者のみならず民間のSCUBA団体のボランティアなどの協力も含めて、世界各地の非常に多数の地点で生物多様性の情報を取得しており、その統合解析成果は、Nature誌に複数発表されている<sup>33, 34)</sup>。

生態系や生物多様性の保全を含む地球環境問題の解決につながる分野統合的研究を推進するため、ベルモント・フォーラム（BF：Belmont Forum）<sup>35)</sup>による国際共同研究事業が2012年より開始されている。沿岸海域では、Coastal Vulnerabilityをテーマとした7研究課題が進行中である。

#### （６）キーワード

長期モニタリング、生態系サービス評価、全球的解析、水産資源管理、海洋保護区、外来種、気候変動、社会・生態学システム

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>環境省が実施しているモニタリングサイト1000事業においてサンゴ礁調査が2003年から、沿岸域（磯、干潟、アマモ場、藻場）調査が2008年から開始され<sup>36)</sup>、気候変動や東日本大震災の影響評価などにも貢献している。</li> <li>その他にも各種機関、団体による海洋生物多様性・生態系の長期モニタリングが各種実施されているが、広域な日本の沿岸を十分に網羅しているとはいえない。また、多くの事業は単年度予算で実施されており、長期的な継続性の担保は必ずしも保障されていない。</li> <li>海洋生物多様性の全容把握、損失率、将来変動の予測研究に関する環境省環境研究総合推進費によるプロジェクト（S-9）が2011-2015年にかけて進行中であり、主要海洋生物・生態系の分布推定や将来予測、およびEBSAの選定方法など基礎的・応用的研究の両面において一定の成果をあげている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>EBSA候補地の科学的な選定方法や保全の優先順位付けに関する研究が急速に進展している<sup>37, 38)</sup>。</li> <li>外来種管理においては、国立環境研究所が海産種を含む侵入種データベースを作成しており<sup>10)</sup>、種ごとの生態情報や現在の分布状況、文献などを集積した網羅的なデータベースが構築されている。このほか、藻類ではDNAマーカーを用いた侵入経路の解明が進んでいる。</li> <li>最近になって、干潟の経済評価やBlue Carbon Sinkの定量的評価など、生態系サービスの評価に関する取り組みが、環境省や国土交通省、農林水産省主導で進展している<sup>18-21)</sup>。</li> <li>JST-CREST「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出」研究領域による新たな技術開発が進行中である<sup>27)</sup>。</li> </ul>
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎・応用研究の成果が、持続的漁業の確立に向けた国レベルの協議会での議論に生かされている。</li> <li>知床半島、石垣島などにおいて、地域住民、行政、研究者が一体となったGood practice、Co-production、Co-managementの実践が進みつつある。</li> <li>政策への反映：海洋生物多様性保全戦略や生物多様性国家戦略の策定、およびそれに基づく諸施策の立案や企画が進行している。例えば、生物多様性条約COP10で作成された愛知ターゲットの一つである海洋保護区の設定においては、科学的方法論を用いた重要海域の抽出により候補地の選定が行われた。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>スミソニアン協会のMarineGEO/TMONなどに代表される海洋生物多様性の大規模長期研究がますます振興されつつある。</li> <li>US-LTERの沿岸域サイトが長期生態系データを取得してさまざまな影響解析に利用しているのに加え<sup>39)</sup>、各州の大学の海洋研究所や海洋大気庁（NOAA）／海洋漁業局（NMFS）などの政府系研究機関、さらにはNGOなどが多様な先進的研究を続けており、その成果の集積および新たな知見の提供は世界的に群を抜いている<sup>40)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>海洋生物および物理環境データが充実しており、海洋保護区候補地の優先順位付けおよび海洋保護区のネットワーク化、保護区の有効性の評価の研究が進展している。</li> <li>外来種管理においては、スミソニアン環境研究センターを中心に研究が進展している。例えば、10年間のプラスチックの移動に関する全球データ集積と解析により、主要種の侵入経路や生態系への影響が明らかになった<sup>41)</sup>。また、米国内の侵入種のデータベース（NEMESIS）<sup>42)</sup>や商船から集約されたプラスチックの起源や量、またそれらの解析結果などの情報を集積したデータベース（NBIC）<sup>43)</sup>などを構築している。</li> <li>主要各大学に海洋生物多様性・生態系サービスの経済価値評価や社会学・生態学システムの研究を行うグループがあり、研究成果も多い。例えば、UCSB（University of California, Santa Barbara）のSustainable Fisheries Groupは<sup>15)</sup>、保全と持続的漁業の両立や海洋保護区（MPA：Marine Protected Area）の効率的な設計やその経済価値の評価について一定の成果を出している。</li> </ul>

	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究機関、NGO、企業などの連合体による研究・保全の実践活動が各地で盛んに行われており、沿岸海域の生物多様性・生態系機能の維持や保全に一定の役割を果たしている。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>経済危機による研究資金の全体的な縮小はあるものの、引き続き海洋生態系・生物多様性に関する多数の研究課題が実施されている。</li> <li>EuroMarine+の設立による分野横断的な基礎研究の進展が期待されている。</li> <li>経済危機以降も、欧州の企業が出資した海洋生態系の基礎研究が盛んであり、例えば深海生態系を対象としたINDEEP（深海生態系の科学調査に関する国際ネットワーク）などのプロジェクトが民間企業の出資のもと、展開されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>北東大西洋において15カ国の政府からなるOSPAR（北東大西洋の海洋環境を保護するためのオスロパリ条約）が科学的データを用いて公海域における海洋保護区の設定をしている<sup>44)</sup>。</li> <li>産学連携による大型研究：European CommissionのFP7において海洋生物多様性に関する課題は70件以上にわたる。次期大型研究計画であるEU Horizon 2020でもAquatic resourcesなどの分野で募集が予定されている<sup>45)</sup>。</li> </ul>
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>ノルウェーやアイスランドなどの北欧を中心に、科学的資源管理が順調に進み、水産資源の持続的利用が達成されている。その結果水産産業従事者の収入の増加などの経済学的効果も上がっている<sup>46)</sup>。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>海洋生態系のモニタリングプログラムが長期にわたり実施されている。</li> <li>海洋生物多様性・生態系の情報を取り扱う各種データベースが整備されつつある。例えば、Biodiversity Clearing-House Mechanism of China や China Oceanic Information Network、Asia Biodiversity Conservation and Database Networkなどの情報ノードが運用され、Catalogue of Life Chinaは2013年に最新版が更新された。</li> <li>中国長期生態学ネットワーク（CERN：Chinese Ecosystem Research Network）は従来陸域生態系を研究対象の中心としてきたが、近年、黄河河口域や山東半島などにおいて集水域の生態系変動や人間活動が沿岸域に与える影響の評価などの研究も進みつつある。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>中国科学院(CAS)ではYellow River Estuary(黄河入海口)とYantai(煙台)をコアサイトにした沿岸生態系動態の統合的研究をすすめており、一定の成果をあげている。</li> <li>海面変動予測と脆弱性のリスク評価技術の開発などの事業計画が進みつつある<sup>47)</sup>。</li> </ul>
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>多様な取り組みにより、一部には環境の改善（Swan estuaryのアマモ場再生による生態系の改善など）がみられたところもある。しかしながら、沿岸域の多くは水質汚染などの劣化が依然として深刻であり、保全管理研究や事業の効果の検証には時間がかかると考えられる。</li> </ul>
韓国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>Korean coastal wetland survey や Shallow-water biodiversity surveyなどの長期モニタリングが数年間にわたり展開されており、韓国沿岸海域の生物多様性・生態系の全容や変動様式が明らかになりつつある。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>National Fisheries Research &amp; Development InstituteやKorea Institute of Ocean Science &amp; Technologyなどを中心に、有用水産資源のモニタリングや資源管理策に関する研究が進む。一部は2020年代までの長期的な事業継続が予定されている。</li> </ul>
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>海洋水産資源についてTACとIQの導入による先進的な管理が進みつつあるが、資源の回復、持続的利用に関する成果に結びつかどうかについての評価にはまだ時間がかかると考えられる。</li> <li>研究機関と企業の連携による沿岸域の生物多様性・生態系モニタリング事業<sup>48)</sup>などがあるが、詳細情報が入手困難である。</li> </ul>

## (註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

## (註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

## (註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) Census of Marine Life (CoML) . <http://www.coml.org/>
- 2) Ocean Biogeographic Information System (OBIS) . <http://www.iobis.org/>
- 3) Encyclopedia of Life (EOL) . <http://eol.org/>
- 4) World Register of Marine Species (WoRMS) . <http://www.marinespecies.org/>
- 5) Life in a Changing Ocean (LiCO) . <http://lifeinachangingocean.org/>
- 6) Ball, I.R., H.P. Possingham, and M. Watts. Marxan and relatives: Software for spatial conservation prioritisation. 2009, Chapter14, 185-195. in Spatial conservation prioritisation: Quantitative methods and computational tools. Eds Moilanen, A., K.A. Wilson, and H.P. Possingham. Oxford University Press, Oxford, UK.
- 7) The University of Queensland. Marxan. <http://www.uq.edu.au/marxan/>
- 8) Fernandes, L., Day, J., Lewis, A., Slegers, S., Kerrigan, B., Breen, D., Cameron, D., Jago, B., Hall, J., Lowe, D., Innes, J., Tanzer, J., Chadwick, V., Thompson, L., Gorman, K., Simmons, M., Barnett, B., Sampson, K., De' ath, G., Mapstone, B., Marsh, H., Possingham, H., Ball, I., Ward, T., Dobbs, K., Aumend, J., Slater, D., and Stapleton, K. Establishing representative no - take areas in the Great Barrier Reef: large - scale implementation of theory on marine protected areas. Conservation Biology.2005,19 ,6.
- 9) 大谷道夫, 風呂田利夫, 横山寿, 加藤雅也. PICES における海産外来種データベースの開発計画. 日本プランクトン学会報. 2009, 56(2), 183-189.
- 10) 国立環境研究所. 進入生物データベース. <http://www.nies.go.jp/biodiversity/invasive/>
- 11) Harley CDG, Randall Hughes A, Hultgren KM, Miner BG and others. The impacts of climate change in coastal marine systems. Ecol Lett. 2006, 9,228-241.
- 12) Hoegh-Guldberg O, Bruno JF. The impact of climate change on the world's marine ecosystems. Science. 2010, 328, 1523-28. DOI: 10.1126/science.1189930
- 13) Yara Y, Vogt M, Fujii M et al. Ocean acidification limits temperature-induced poleward expansion of coral habitats around Japan. Biogeosciences. 2012, 9, 4955-4968.
- 14) 仲岡雅裕. 気候変動にともなう沿岸生態系の変化?生物群集から考える.(大串隆之・近藤倫生・仲岡雅裕編) シリーズ群集生態学4 生態系と群集をむすぶ. 京都大学学術出版会. 2008, 179-204.
- 15) University of California, Santa Barbara. Sustainable Fisheries Group. <http://sfg.msi.ucsb.edu/about-us/people/sfgteam/steve-gaines>
- 16) VALMER. <http://www.valmer.eu/>

- 17) The Natural Capital Project (NatCap) . <http://www.naturalcapitalproject.org/>
- 18) 環境省. 環境研究総合推進費「藻場の生態系サービスの経済的価値評価：魚類生産の「原単位」から「日本一」をさぐる」(H21～H22)  
[http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/backnumber/suishinhi/jpn/projects\\_underway/pdf/RF097.pdf](http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/backnumber/suishinhi/jpn/projects_underway/pdf/RF097.pdf)
- 19) 環境省. 湿地が有する経済的な価値の評価結果について. 2014.  
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=18162>
- 20) 所立樹, 細川真也, 三好英一, 門谷茂, 茅根創, 桑江朝比呂. 沿岸域のブルーカーボンと大気中CO<sub>2</sub>の吸収との関連性に関する現地調査と解析. 港湾空港技術研究所報告. 2013,52,1.
- 21) 渡辺謙太, 桑江朝比呂. 浅海域における炭素隔離機能の評価へ向けた元素比・安定同位体比による有機物動態の解析. 港湾空港技術研究所報告. 2013, 52, 3.
- 22) Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkow, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J. F., Casey, K. S., Ebert, C., Fox, H. E., Heinemann, D., Lenihan, H. A., Madin, E. M. P., Perry, M. T., Selig, E. R., Spalding, M., Steneck, R. and Watson, R. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*.2008, 319 (5865), 948–952.
- 23) Halpern, B. S., Longo, C., Hardy, D., McLeod, K. L., Samhouri, J. F., Katona, S. K., Kleisner, K., Lester, S. E., O'Leary, J., Ranelletti, M., Rosenberg, A. A., Scarborough, C., Selig, E. R., Best, B. D., Brumbaugh, D. R., Chapin, F. S., Crowder, L. B., Daly, K. L., Doney, S. C., Elfes, C., Fogarty, M. J., Gaines, S. D., Jacobsen, K. I., Karrer, L. B., Leslie, H. M., Neeley, E., Paly, D., Polasky, S., Ris, B., Martin, K. S., Stone, G. S., Sumaila, U. R. and Zeller, D. An index to assess the health and benefits of the global ocean. *Nature*.2012, 488, 615–620.
- 24) JST SATREPS. <http://www.jst.go.jp/global/>
- 25) Lenzen, M., D. Moran, K. Kanemoto, B. Foran, L. Lobefaro, and A. Geschke. International trade drives biodiversity threats in developing nations. *Nature*, 2012, 486, 109–112.  
<http://dx.doi.org/10.1038/nature11145>
- 26) Weinzettel J, Hertwich EG, Peters GP, Steen-Olsen K, Galli A .Affluence drives the global displacement of land use. *Glob Environ Change*. 2013, 23, 2, 433–438.
- 27) JST CREST「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出」研究領域.  
[http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research\\_area/ongoing/bunyah23-3.html](http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah23-3.html)
- 28) Marine Global Earth Observatories (MarineGEO) . <http://www.si.edu/MarineGeo>
- 29) EuroMarine+. <http://www.euromarineconsortium.eu/>
- 30) Zostera Experimental Network (ZEN) . <http://zenscience.org/>
- 31) Kelp Ecosystem Ecology Network (KEEN) . <http://www.kelpecosystems.org/>
- 32) Reef Life Survey (RLS) . <http://reeflifesurvey.com/>
- 33) Stuart-Smith RD, Bates AE, Lefcheck JS, Duffy JE, Baker SC, et al. Integrating abundance and functional traits reveals new global hotspots of fish diversity. *Nature*, 2013, 501, 539–542.doi: 10.1038/nature12529

- 34) Edgar, G.J., Stuart-Smith, R.D., Willis, T.J. et al. (2014) Global conservation outcomes depend on marine protected areas with five key features. *Nature*, 506, 216-220. doi:10.1038/nature13022
- 35) Belmont Forum (BF) . <http://igfagcr.org/>
- 36) 環境省生物多様性センター. モニタリングサイト1000. <http://www.biodic.go.jp/moni1000/index.html>
- 37) Nakajima, R., Yamakita, T., Watanabe, H., Fujikura, K., Tanaka, K., Yamamoto, H., Shirayama, Y. Species richness and community structure of benthic macrofauna and megafauna in the deep-sea chemosynthetic ecosystems around the Japanese archipelago: an attempt to identify priority areas for conservation. *Diversity and Distributions*. 2014,1-13.doi: 10.1111/ddi.12204
- 38) Yamakita T, et al. Identification of important marine areas around the Japanese Archipelago: Establishment of a protocol for evaluating a broad area using ecologically and biologically significant areas selection criteria, *Marine Policy*.2014, in press.
- 39) The Long Term Ecological Research Network (The LTER Network) . <http://www.lternet.edu/>
- 40) United Nations World Ocean Assessment. <http://www.worldoceanassessment.org/>
- 41) Miller, A. W., Minton, Mark S. and Ruiz, Gregory M. Geographic Limitations and Regional Differences in Ships' Ballast Water Management to Reduce Marine Invasions in the Contiguous United States. *Bioscience*. 2011, 61(11), 880-887. doi:10.1525/bio.2011.61.11.7
- 42) Smithsonian Environmental Research Center (SERC) . National Exotic Marine and Estuarine Species Information System (NEMESIS) . <http://invasions.si.edu/nemesis/index.jsp>
- 43) SERC. National Ballast Information Clearinghouse (NBIC) . <http://invasions.si.edu/nbic/>
- 44) OSPAR Commission, 2013, An assessment of the ecological coherence of the OSPAR Network of Marine Protected Areas in 2012.
- 45) European Commission. Horizon 2020. Aquatic Resources. <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/area/aquatic-resources>
- 46) The Common Fisheries Policy (CFP) . Success stories in sustainable fisheries management. 2012. <http://cfp-reformwatch.eu/2012/02/success-stories-in-sustainable-fisheries-management-%E2%80%93-28-february/>
- 47) China Ocean and Climate Change Information Network. [http://www.cocc.gov.cn/gzdt/201407/t20140707\\_31487.html](http://www.cocc.gov.cn/gzdt/201407/t20140707_31487.html)
- 48) Korea Marine Environment Management Corporation (KOEM) . <https://www.koem.or.kr>

### 3.4.2.4 流域レベルの生態系管理（森林から海まで）

#### （1）研究開発領域名

流域レベルの生態系管理（森林から海まで）

#### （2）研究開発領域の簡潔な説明

上流域の森林地帯、中流域の農業地帯、下流域の湿地帯、沿岸域の都市など、河川のネットワークを通じてさまざまな物質やエネルギーが上流から下流へ、もしくは下流から上流へ運ばれ（サケの遡上や羽化昆虫の飛翔など）、結果としてさまざまな生物が生息している。これら流域がもつ生態系サービスと生物多様性を高度に発揮するための管理・再生指針および技術に関する研究開発を行う。

#### （3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

生物多様性保全のための保護区の設定については、古くからユネスコの人間と生物圏計画（MAB：Man and Biosphere Programme）で言われてきた、核心保護地域と周辺の緩衝地域（コアとバッファー）の考え方が支持されてきたが、1990年辺りから、保護地としてのコアやそれをつなぐコリドー（回廊）だけでは、希少種などの保全はできないとの考え方が一般的になった。つまり、人間の生産活動が実施されているエリア（コアに対してマトリックスと呼ぶ）での管理を見直し、生態系プロセスに準拠した考え方を取り入れていくマトリックス管理が支持されるようになってきた。そこでは保護地域の重要性は認めつつも、生物多様性や生態系サービスの保全のためには、農業や林業、漁業など、人間の生産活動そのものに、生態系プロセスに配慮した技術の導入が必要になる。

これらの考え方を先導する基礎的研究は、欧米を中心に実施されてきており、日本を含めてアジア諸国からの貢献度は低い。その内容は、①生産行為や管理行為を攪乱としてとらえ、その頻度や規模を自然攪乱（例えば山火事や風倒など）のそれに模倣するように実施する方法、②自然攪乱後に残される生物学的遺産（biological legacy）が次世代の生態系回復に重要であるとの研究成果から、生産行為を行う時も、すべてを収穫せずに、一部重要な生物学的遺産を残す方法、③陸域と水域のエコトーンである水辺域の保全を図る考え方などが示されている。さらに、陸域と海域とのつながりについては、④サケ科魚類の遡上が陸域の生産性や生物多様性に与える影響を吟味し、管理目標に加えることなどが議論されている。これらの考え方や技術についての評価は、米国やカナダ、EU諸国を中心に、大規模フィールド実験を行いながら検証されつつある<sup>1)</sup>。残念ながら、③を除いて、このテーマにおける日本やアジアの研究は極めて少ない。③については、1990年～2000年代にかけて、陸域と水域の相互依存系に関する先進的な実験的研究が日本で実施され、水辺域管理についての多くの知見が集積されている。

流域を通じた生態系サービスについては、日本においては森林がもつ水源涵養機能が古くから注目され、多くの基礎的研究がなされ、国民的な支持を得て30を超える都道府県で水源環境税が導入されている。また、1897年の森林法によって定められた保安林制度により、森林のもつさまざまな生態系サービス（土砂流出・崩壊防止、飛砂、防風など）についての基礎的研究が実施され、世界的にも注目される成果が得られている。さ

らに、日本のグループがアムール川流域を対象として行った研究から、川に溶存した鉄分が基礎になって、海の一次生産に影響を与えているという新たな知見が発信され、鉄供給源としての湿地や河川周辺の河畔林の重要性が指摘されている<sup>2)</sup>。

一方で、基礎的研究から応用的技術に向けて、米国を中心に開発された生態系サービスの空間評価ツールInVEST (Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs) は、さまざまな国において使用され、シナリオ設定とその評価が試行されている。また、欧州を中心に生態系と生物多様性の経済学 (TEEB: The Economics of Ecosystems and Biodiversity) 報告書が作成され、対策を取らない場合の経済的損失、評価手法の標準化などが検討されている。欧州でも生態系サービスの地図化は盛んに行われており、ビオトープマップなど、すでに揃っている基礎データに、文化的景観要素を加えてさまざまな解析手法が提案されている。日本でも、湿地の生態系サービスについての経済評価や流域のもつ生態系サービスの地図化が、環境省による検討委員会で実施されている。さらに、国際的には生物多様性及び生態系サービスに関する政府間プラットフォーム (IPBES: Intergovernmental Science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services) が立ち上がっており、日本もこれまでの科学的知見の整理と評価手法の高度化を急ぐ必要がある。また、リオデジャネイロで開催されたリオ+20において、世界銀行が主導した自然資本宣言は注目に値する。59ヶ国および民間企業88社が、クリーンな空気、クリーンな水、森林をはじめとする生態系の自然資本の経済価値を、ビジネスの意思決定や各国の国民経済計算システムに組み込むことに合意しており、今後ますます生物多様性や生態系サービスの価値を測る科学的手法の開発が必要となる。

流域における生態系管理を進める上で、劣化した生態系を再生する技術は、注目を集めている。再生技術分野のなかの緑化分野では、市街地や公園・庭園、森林において日本には多くの実績があり、菌根菌を利用した緑化工法など、個別には優れた技術が発展しているが、生物多様性と生態系サービスを発揮するための包括的な景観レベルのデザイン論にはなっていない。この分野におけるEU諸国の科学的・技術的発展はめざましく、LIFEプログラム<sup>3)</sup>、Habitat Directive (Natura 2000) などを活用しながら<sup>4)</sup>、エコロジカルネットワーク整備や自然再生が着実に進められ、科学的に評価されている。

日本においては、過去に絶滅したコウノトリやトキを、地域の環境保全の象徴種として野生復帰させる試みを実施され、営巣や餌環境の解析が進み、環境保全型農業や河川改修事業が実現し、その効果が科学的に解析され論文として発表されている。さらに、自然再生地や世界自然遺産区域 (知床や屋久島など) における管理の考え方として順応的管理の考え方が定着し、モニタリングデータの解析に基づいた施策・技術の改良、見直しが行われるようになり、その成果は国際的に注目されている。さらに流域レベルの生態系管理・復元については、釧路湿原を含む釧路川流域、さらに米国フロリダ州キシミー川流域で、森林から河川、農地、湿地生態系のつながりが議論され、物質の移動と生態系の変化、復元に関する多くの研究成果が発表されている<sup>5)</sup>。また、人工洪水など、ダムを使って実験的に洪水を起こし、下流域の物理・化学・生物の変化を研究し、ダム管理に生かす試みが、米国のコロラド川や日本 (ダムの弾力的運用) でも実施され、その効果が期待されている。

さらに、地球温暖化による自然災害ポテンシャルが増大するなかで、EUを中心に発達

してきたグリーンインフラの考え方が注目されている。生態系がもつ防災や減災機能を流域管理や街づくりに生かしていく考え方で、急激な人口減少による放棄林地・農地の発生など、さまざまな生態系が劇的に変化する日本においては、早急に進めなければならない課題である。将来、洪水氾濫区域からのヒトの撤退が可能になれば、その場所は、現在急激に姿を消している攪乱依存種（攪乱がなくなると絶滅する種）を保全できる自然再生区域になる。そして同時に、地球温暖化に伴う洪水規模の増加に対応した緩衝空間として、防災的にも機能する。

リモートセンシングやGISによる空間情報の収集、解析に関する研究は、世界的に進んでいる。また、生物種の生息ポテンシャル評価（例えばMaxEnt）、空間明示型の多様性保全プログラム（例えばMaxranやZonation）、生態系サービス評価モデル（例えばInVEST）などがWEB上で公開され、妥当性が国際誌上でも議論され、有効性の検討やプログラムの改良が進んでいる。さらに、水理・水文・生態などの複合現象を解析するために、異なった機能をもつ要素モデルを一体的に協調・稼働させるためのプラットフォームCommonMP<sup>6)</sup>、さらに米国地質調査所（USGS）との共同で河床変動や洪水氾濫をシミュレートできるソフトiRICが日本で開発され<sup>7)</sup>、これらのソフトを使った研究成果が徐々に発表されている。

#### （4）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

流域における生態系管理の課題を科学的に解明するためには、流域スケールのフィールド実験が必要になるが、日本では小流域における水文観測に限られる。こうしたフィールド実験を実施するためには、行政の協力が不可欠であるし、行政の施策を正しく評価するためにも、研究機関との協力が必要となる。米国やカナダでは、生物学的遺産の効果検証のために、国有林や州政府が協力し、森林収穫方法を実験的に変える試みがなされている。その成果は数多くの国際誌に掲載され、科学的検証を経た技術となって、世界に発信されている。日本でも、少しずつ官学協働プロジェクトが実施され、自然再生事業の順応的管理の一環として、フィールド実験とモニタリング調査が行われるようになってきたが、欧米と比べるとまだ低いレベルに留まっている。

さらに、流域生態系評価で必要となる基礎情報について、日本では水文・気象学的情報は整備されているが、生物情報については極めて不十分であり、解析できない空白地域が多い。例えば、環境省による自然環境保全基礎調査の植生調査1/25000も、国土の半分程度に留まっており、なかなか進展しない。さらに、各省庁で実施されている情報が個別に管理されており、統合的に使用できる環境にはない。また、林野庁の森林調査簿データなど、公開されていないものも多い。さらに、都道府県レベルにおける基盤情報の整備状況は、都道府県によるばらつきが大きく、一般的にはデータベースとしては整備されていない。一方で、都道府県レベルで行われる事業に対して、多くの生物調査が実施されており、位置や種情報が自動的に大学や博物館に集められるシステムが必要である。

また、生態系管理や自然再生事業の評価、順応的管理を実施するためにも、事業に対するモニタリング調査は必須である。しかるに、多くの事業においてモニタリング経費が十分に確保されておらず、事業終了と同時に終了し、その後の評価が行われていない

ケースも多い。今後、データベースやモニタリングを効率よく実施するためにも、短時間で効率的に広域情報を得るための新たなツールの開発（リモートセンシング、無人飛行機（UAV：Unmanned Aerial Vehicle）、レーザプロファイラ、DNAバーコーディング、環境DNAなど）が必要である。

#### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

全米生態観測ネットワーク（NEON：National Ecological Observatory Network）が予算規模としても群を抜いている。米国全土を20の地域に区分し、コア観測拠点を建設し、ヒトの活動が生態に及ぼす影響を30年間にわたって観測する全米生態観測ネットワークプロジェクトである。予算規模も壮大で、総額4億3,400万ドルを交付することを発表している。また、水が浸透する地球表面に注目した米国CZO（Critical Zone Observatory）プログラムがスタートし、流域管理の大型プロジェクトとして注目を集めている。

生態系管理の分野では、実践が重要であり、そうした成果を積み上げているのはEUであろう。Birds Directive、Habitats Directive（Natura 2000）やLIFEプログラムの実施によって、保護区やそのネットワーク、自然再生事業が実施され、科学的に検証されている。また、流域管理の視点からWater Framework Directiveが知られており、EU水域（地下水を含む）の水質を持続可能に利用でき、生態学的に健全な状況にし、洪水および渇水の影響の緩和などを統一的な水管理によって実現することを目標にしている。

日本では環境省環境研究総合推進費戦略的研究開発領域（S-9）として「アジア規模での生物多様性観測・予測・評価に関する総合的研究」が開始され、さまざまな陸域生態系の生物多様性ならび生態系サービス評価が実施され、成果が出つつある。こうした成果は、日本の保護地区の拡大、保全政策、世界的な動きであるIPBESなどに反映されると考えられる。

流域における生態系管理を支えるための、国際研究プログラムとしては、フューチャー・アース（FE：Future Earth）が注目される。このプロジェクトは国際科学会議（ICSU）が推進する地球環境変動分野の4つの国際研究計画を統合するものであり、学術の専門家だけでなく、社会の多様なステークホルダーが協働して研究活動の設計を行うことに特徴がある。日本学術会議をはじめ、日本の研究者の積極的な参加が期待される。

技術的には、リモートセンシング、無人飛行機（UAV）、レーザプロファイラ、DNAバーコーディング、環境DNAなど、新たなモニタリング技術が開発されており、流域レベルの生態系管理を実施するために必要なツールになるだろう。

#### （６）キーワード

生物多様性、生態系サービス、自然資本、自然再生、順応的管理

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>小流域レベル（数km<sup>2</sup>）の水文・物質循環の現地観測については多くの研究成果があり、機能（サービス）評価も可能である。大流域では水文・水理モデルが多い。世界的に汎用性のあるモデルが公開されつつある。</li> <li><b>Biological legacy</b>が回復に与える影響については、倒木上更新に関する研究が多く、技術的発展は少ない。</li> <li>森林と河川の相互作用系、陸域と海域のつながり、生態系の連結性については、世界的にも先進的な研究がなされている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>自然再生や生態系管理計画の実施、モニタリングは、国内で数多く実施されており、一部国際的にも発信されている。</li> <li>埋土種子を使った湿地や湖沼の再生などの技術は、確実な発展を遂げている。</li> <li>ダムの弾力的運用に認められるように、生態系プロセスの模倣技術は、徐々に実践に移されている。</li> <li>流域・国土レベルの生物多様性評価については近年進み、一部国レベルの保全戦略に使われている。また生態系サービス評価も進みつつある。</li> </ul>
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>自然資本の経済評価など、徐々に生態系サービスの価値が国民経済に組み込まれつつある。三井住友信託銀行は、自然資本宣言に署名。</li> <li>グリーンインフラの整備が、国土強靱化計画で議論されている。</li> <li>自然再生技術の高度化が図られ、一部産業化されている。</li> <li>レーザプロファイラ、リモートセンシング、無人飛行機（UAV）による広域調査はすでに産業化されている。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Biological legacy</b>や攪乱の頻度・強度を考慮した生態系管理、水辺域の機能評価、広域な生物・環境データをもとにした生物多様性、生態系サービス評価など、大規模フィールド実験も実施しながら、多くの分野で先進的な成果を上げてきた。</li> <li>上記の解析に必要なモデルをWEBで公開することによって、世界の研究をリードしてきた。</li> <li>生態系管理についての大規模プロジェクトを次々に発案・実施し、さまざまな生物圏・地圏を網羅する形で、成果が着実に積みあがっている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>生態系管理の考え方を現地で実践し、モニタリングで検証し、課題がある場合は、管理方法を変更するなど、順応的管理の基礎を築いている。</li> <li>リモートセンシングや環境DNAなど、新たな技術開発においても、多くの予算がつかぎ込まれ、国際的にリードしている。</li> </ul>
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>多くの生態系管理技術は、大学や研究機関が行政もしくはNGOと協力しながら実施しており、ビジネスとしての広がりとは限定的であると思われる。</li> <li>モニタリングや基礎データ収集のための、レーザプロファイラ、リモートセンシング、無人飛行機（UAV）による広域調査はすでに産業化されている。</li> </ul>
欧州	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Biological legacy</b>の評価や生物多様性に配慮した生態系管理、ならびに湿地管理の考え方は進んでいる。</li> <li>生態系サービスの評価も、文化景観に力点を置いて数多く実施され、国際的に発信されている。米国よりも日本景観に適合する。</li> <li>EU内での産業の粗放化効果、放棄地の自然回復、自然再生事業の効果評価では、高い業績をあげている。</li> <li>エコトープ区分とその応用など、流域レベルの基礎研究も古くから実施され、成果を上げている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>さまざまなDirectiveを通じたEUによる着実な自然再生事業、生態系ネットワークの形成が行われている。</li> <li>EUとしてグリーンインフラ戦略を採択し、地球温暖化による気候変動をふまえたヨーロッパ各国におけるさまざまなグリーンインフラが研究され、国際的に発信されている。</li> </ul>

	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>流域レベルの地球温暖化に対する適応策の提言がなされ、CO<sub>2</sub>ガスの着実な低減など、産業を通じて具体化する力は世界でもっとも高いと思われる。</li> <li>自然再生事業の着実な実施は、森林、農地、河川、湿地など、あらゆる生態系に及んでおり、近自然工法に代表される技術で世界をリードしている。</li> <li>生物多様性オフセットやバンキングの運用、生態系サービスの経済評価などが積極的に行われている。</li> </ul>
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>開発圧力が強く、生態系管理についての基礎的研究もあまり発信されていない。</li> <li>水質や大気など、日本がかつて経験した数多くの公害問題を抱えており、まずはそうした環境を産業ベースでどうやって解決していくかが中心に据えられている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>国の緑化政策により、広範囲で造林が進められている。</li> <li>急激な産業発展に伴う生態系サービスの劣化に対応するため、InVESTによる評価を行ったり、水資源開発と利用ならびに水質維持の研究が必要となっている。</li> </ul>
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>流域レベルにおける産業化は、水資源の枯渇など、危機的な生態系サービスの劣化に対するものに限られ、全体的には高くない。</li> <li>資源の輸入国として、廃棄物、汚水処理などが課題になっている。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>朝鮮戦争直後の禿山の緑化をすることが、下流への土砂流出を抑えるために重要であり、過去40年間、緑化事業の基礎的研究が実施されてきた。</li> <li>花崗岩におけるマツ類の造林については、基礎的な研究が進んでいる。</li> <li>現在成立している森林の多様性は低く、病虫害の研究は進んでいるが、生物多様性、生態系サービス研究のレベルは低い。</li> <li>山林火災とその後の植生回復の研究はさかんだか、攪乱は負の効果という認識が強く、生態系管理の基礎的研究レベルは低い。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>湿地造成や、都市域でのビオトープ造成などについて、造園分野を中心に自然再生に関する研究がさかんになっている。</li> <li>陸域の再生のなかでも、川や湿地の再生事業が数多く実施されている。ソウルで実施されたチョンゲチョン川の再生事業は世界的に有名である。残念ながら、再生事業の科学的評価があまり行われておらず、現状の研究レベルも高くない。</li> </ul>
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>エコツーリズムを中心とした観光産業への寄与があると思われるが、総合力としては強くない。</li> <li>都市域では、チョンゲチョン川の再生にみられるように、ビオトープ造成で周辺地域の産業化、観光化が認められるが、限定的である。</li> </ul>

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) Kohm, K. A., Franklin, J.F. eds. (1997) Creating a Forestry for the 21st Century: The Science Of Ecosystem Management. Island Press.
- 2) 白岩孝行 (2011) 魚附林の地球環境学—親潮・オホーツク海を育むアムール川. 昭和堂.
- 3) European Commission. LIFE Programme. <http://ec.europa.eu/environment/life/>
- 4) European Commission. The Habitats Directive/Natura 2000 Network. [http://ec.europa.eu/environment/nature/legislation/habitatsdirective/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/nature/legislation/habitatsdirective/index_en.htm)
- 5) 中村太士編 (2011) 川の蛇行復元—水理・物質循環・生態系からの評価—. 技報堂出版.
- 6) CommonMPプロジェクト推進委員会監修／椎葉充晴・立川康人編 (2011) CommonMP入門 ～ 水・物質循環シミュレーションシステムの共通プラットフォーム ～ 技報堂出版.
- 7) iRIC (International River Interface Cooperative) ソフトウェア. <http://i-ric.org/ja/>

### 3.4.2.5 生物多様性及び生態系サービスの評価

#### (1) 研究開発領域名

生物多様性及び生態系サービスの評価

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

生物多様性及び生態系サービスは価値が少ない、または分からないものとして扱われる場合が多い。生物多様性及び生態系サービスは、人間を含めた多くの生命に多大な恩恵をもたらすものであるのにも関わらず、これらの財が市場を経由して取引が行われないうことによって、過剰に利用されることがある<sup>1)</sup>。この問題を解決する一つの手段として、環境経済評価手法がある。この手法によって価格がゼロとして扱われる生物多様性及び生態系サービスの価値を金銭的に評価し、最終的に消費者余剰の推定値を用いて環境政策に役立てることが可能となる<sup>2,3)</sup>。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

生態系と生物多様性の経済学 (TEEB: The Economics of Ecosystem and Biodiversity) が近年では注目を浴びた研究開発領域である。TEEB以外にもエコシステムパートナーシップ (ESP: The Ecosystem Services Partnership) が国際的に各地域においても成果をとりまとめており、東アジアチャプターも発足している<sup>4)</sup>。本領域の説明を行うために、生物多様性及び生態系サービスの経済評価を研究課題とし、事例として沖縄サンゴ礁の経済評価を行っている、吉田ら<sup>5)</sup>によるサンゴ礁保全政策による経済評価について概要を紹介する。その次に国内外の経済評価事例について、表にまとめる。

##### 1. サンゴ礁保全政策による経済評価の例<sup>5)</sup>

現在、気候変動により生物多様性の危機が生じている。一般的には危機に瀕している種を保護すべきであると考えられる。しかし、気候変動によって死滅の危機にさらされるような種を保護することが経済的に妥当かどうか、費用便益・対策の面からは不明である。そこで気候変動によって減少する種を保護する価値を、生物多様性の減少とともに定量的に評価し、また、保護する場合はどのような保護シナリオが妥当かについて、沖縄のサンゴ礁の死滅 (白化) を具体事例として検討した。

個人が沖縄のサンゴ礁に対し、どれ程の経済価値を感じているかを明らかにするために、サンゴ礁に対する効用関数を推定し、各属性に関するパラメータから各係数の限界支払意思額 (MWTP: Marginal Willingness To Pay、単位あたりの変化に対する支払意思額) を推定する。加えて、提供される情報の詳細さが人々の価値判断に与える効果を推定することで、どの程度の情報を出すことが市民の価値判断を上げることができるか特定可能となる。これを科学コミュニケーションの一環として考え、個人に提供される情報の価値 (限界支払意思額) やその他の回答に与える効果・影響) について検討する。そして、提供される情報によって個人がサンゴ礁に認める価値の違いについて検討する。

本調査ではコンジョイント分析 (表4参照) を用いて沖縄のサンゴ礁保全対策の経済評価を行った。なお、この調査の対象は実際の人口分布に合わせてランダムに男女に聞くことが望ましい。まず、表1のように回答者を4つのグループに分け、それぞれ異なっ

た事前情報を与えて比較することでその影響を見ることができる。事前情報は、アンケートに答える前に表1に記載の情報を各グループに与えた。

表1. 各グループへの情報提示方法

グループ1: 動画情報	グループ2: 詳細情報
グループ3: 簡略情報	グループ4: 情報なし

分析手法としては、通常コンジョイント分析の一種である選択型実験を行うことが多い。具体的には表2のような表を回答者に提示し、回答者には3つの対策の中からもっとも好ましいものを一つ選んでもらう。回答者に対し、表2のような設問を一人につき8回繰り返した。各回で対策の中身は変化するが、対策3は現状であるので毎回同じである。

表2. 選択型実験の例

2100年の状況/目標 各属性	対策1	対策2	対策3 (現状維持)
サンゴ礁の景観がどれくらい維持されるか (LAND)	70%維持	50%維持	10%維持
サンゴ礁の面積をどれくらい保全できるか (ARIA)	70%	40%	10%
沖縄に分布するサンゴ400種のうち何種を保全できるか (SPECIES)	300種	300種	50種
九州以北で増えるサンゴの割合 (KYUSHU)	5%	10%	30%
対策を実行するためにあなたが払う必要がある寄付金の額 (PRICE)	2000円	500円	0円
	↓	↓	↓
もっとも好ましいと思うものを一つ選んでください	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

以上の選択結果をもとにサンゴ礁の各属性に対する限界支払意志額の推計を、情報提示方法別に出すことが可能になる。

結果の例として以下のようなことがわかる。個人は「サンゴ礁の面積の保全対策」に対して、相対的にもっとも高い限界支払意志額をもっている。また、次に「サンゴ礁の景観の保存」への限界支払意志額が高い。一方で、「サンゴ礁の種の保全」に対しては、限界支払意志額は低い。加えて、温暖化の影響によってサンゴ礁の分布域が北上することによって「九州以北でのサンゴ礁の割合」が増えることに対しては、不効用を感じるようになった。

情報提示の違いによる限界支払意志額への効果については、サンゴ礁のそれぞれの属性に対する限界支払意志額は、情報の与え方によって異なる結果が得られた。サンゴ礁の面積に関しては動画情報、種の保全に関しては詳細情報、九州以北で増えるサンゴ礁の割合に関しては簡略情報、サンゴ礁の景観に関しては動画情報によって、限界支払意志額が高くなることが明らかになった。サンゴ礁に関しては、どの情報の与え方が、限界支払意志額を高めることに対して一意に有効ということではなく、情報の与え方それぞれ

れに有効な側面があることがわかった。

2. 国内外の経済評価事例

表3に国内、表4に国外の経済評価の事例を示す。

表3. 国内の経済評価事例

No.	事例	評価対象生態系	場所	評価手法
1	全国的なシカの食害対策の実施により保全される生物多様性の価値	森林	全国	CVM
2	奄美群島を国立公園に指定することで保全される生物多様性の価値	森林	鹿児島県	CVM
3	沖縄県やんばる地域における絶滅危惧種の経済価値評価	森林	沖縄県	CVM コンジョイント分析
4	宮城県大崎市蕪栗沼を対象にした生態系サービスの価値評価	農耕地	宮城県	CVM コンジョイント分析
5	釧路湿原における自然再生事業の評価	湿地	北海道	コンジョイント分析
6	函館市松倉川の生態系の評価	河川	北海道	CVM
7	奄美大島に生息するリュウキュウアユを保全する価値	河川	鹿児島県	CVM
8	熊本市における地下水涵養機能保全政策の評価	森林	熊本県	CVM
9	横浜市における郷土種に配慮した森林公園整備の評価	都市部	神奈川県	コンジョイント分析
10	六甲山系における森林の公益的機能の評価	森林	兵庫県	コンジョイント分析
11	森林の公益的機能の評価	森林	全国	代替法
12	屋久島の生態系保全の価値	森林	鹿児島県	トラベロコスト法 CVM

表 4. 国外の経済評価事例

No.	事例	地域区分	評価対象生態系	場所	評価手法
1	鉱床開発により損害を受けるカカドゥ国立公園の環境の価値	オセアニア州	森林	オーストラリア	CVM
2	ダムの撤去により回復する河川生態系の価値	北アメリカ州	河川	アメリカ	CVM
3	バルディーズ号事故の生態系被害額の算定	北アメリカ州	海洋	アメリカ	CVM
4	サンゴ礁のレクリエーション価値	オセアニア州	海洋	アメリカ ハワイ	TCM CVM
5	スリランカにおけるアジア象の保全価値	アジア州	草地	スリランカ	CVM
6	重要な生物群系を擁する湿地の保全価値	アフリカ州	湿地	南アフリカ	代替法
7	ルセル国立公園の価値（保全管理の効果）	アジア州	森林	インドネシア	市場価格法 CVM
8	工業地帯における湿地の生態系サービスの価値	アフリカ州	湿地	ウガンダ	代替法
9	海洋生態系の価値	オセアニア州	海洋	モルディブ	市場価格法 代替法
10	水質浄化サービスへの対価	北アメリカ州	その他	アメリカ	代替法

※表3・表4：文献6)を参考に作成。評価手法については表5参照。

#### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

環境評価手法には問題点が多く指摘されているが、これまでにないシナリオをどう評価するかについて、いまだもっとも望ましい評価手法であるといえる。しばしば指摘されてきた注意しなければならない課題や欠点をここでまとめる。

トラベルコスト法などの顕示選好法には、実際の評価額を少なくとも考慮できるという利点があるが、評価額に含まれる価値の対象範囲が狭い、つまり「非利用価値」を評価額に含めることができないという問題がある。また、コンジョイント分析などの表明選好法には、「非利用価値」を評価額に含めることができるという利点はあるが、財の価格の推定の基になる支払い意志額などについて、回答者に直接尋ねるという方法をとることから、評価額にバイアスが生じるという問題が指摘されている（過大もしくは過少に推定される）。

さらに、（代替法を除く）環境評価手法もまた社会調査の一種であるが故の課題がある。それは各手法がアンケート調査に依存していることにより、回答者が真の値を回答しないインセンティブが存在する場合、評価額にバイアスが生じるということである。このように環境評価手法には欠点や課題があるが、米国海洋大気庁（NOAA）ガイドラインに近い適正な調査を実施することにより、バイアスをできるだけ少なくし、評価額がバイアスをもつという欠点を克服することが可能である。どのような手法・分析法も短所と長所をもっているが、それらをふまえたうえで、環境評価手法を用いた適切な金

銭評価により環境政策や公共政策に対し貢献することが重要である。各手法の欠点と利点などについて、表5にまとめる。

表5. 環境評価手法の利点と欠点

評価手法	顕示選好法			表明選好法	
	代替法	トラベルコスト法	ヘドニック法	CVM	コンジョイント分析
内容	環境財を市場財で置換するときの費用をもとに評価	対象地までの旅行費用をもとに評価	環境資源の存在が地代や賃金に与える影響をもとに評価	環境変化に対する支払意思額や受入補償額を尋ねることで評価	複数の代替案を回答者に示して、その好ましさを尋ねることで評価
適用範囲	利用価値 水源保全、国土保全、水質などに限定	利用価値 レクリエーション、景観などに限定	利用価値 地域アメニティ、大気汚染、騒音などに限定	利用価値および非利用価値 レクリエーション、景観、野生生物、生物多様性、生態系など幅広く適用可能	利用価値および非利用価値 レクリエーション、景観、野生生物、生物多様性、生態系など幅広く適用可能
利点	必要な情報が少ない 置換する市場財の価格のみ	必要な情報が少ない 旅行費用と訪問率などのみ	情報の入手コストが小さい 地代、賃金などの市場データから得られる	適用範囲が広い 存在価値やオプション価値などの非利用価値も評価可能	適用範囲が広い 存在価値やオプション価値などの非利用価値も評価可能 特定の環境対策以外に複数の代替案を比較して評価可能
欠点	環境財に相当する市場財が存在しないと評価できない	適用範囲がレクリエーションに限られる	適用範囲が地域的なものに限定	アンケート調査の必要があり、情報入手コストが大きい バイアスの影響を受けやすい	アンケート調査の必要があり、情報入手コストが大きい バイアスの影響を受けやすい 研究蓄積が少なく、信頼性が不明

出典) 文献 7-10) を引用し作成。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

本領域の注目動向として、TEEB(生態系と生物多様性の経済学)があげられる。TEEBは生物多様性と生態系サービスの価値を認識し意思決定や行動に反映させるために価値を可視化することを目的に研究が進められ、生物多様性版スターン・レビューといわれる報告書を作成している。

TEEBは2007年にドイツ・ポツダムで開催されたG8+5環境大臣会議で欧州委員会とドイツにより提唱されたプロジェクトであり、2008年5月にドイツ・ボンで開催された生物多様性条約第9回締約国会議(CBD-COP9)の閣僚級会合で、第1フェーズの成果として中間報告が発表された。第2フェーズではさらなる研究と各ステークホルダーに向けた報告書の作成が進められ、2010年のCBD-COP10までに一連の報告書がとりまとめられた。現在は第3フェーズとして各国におけるTEEBの取り組みを支援することなどにより、政策決定などにおける生物多様性の価値の主流化の実践を進めている。また、水と湿地、海洋と海岸、自然資本といった特定のテーマに関するより詳細な報告書も発表し

ている<sup>11)</sup>。

(6) キーワード

生物多様性及び生態系サービス、環境評価、顕示選好法、表明選好法、費用便益分析、WTP、MWTP、利用価値、非利用価値、TEEB

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	・上記の表3に示す通りとおり、生物多様性及び生態系サービスについて経済評価研究が多く行われている。
	応用研究・開発	○	↑	・経済評価研究の結果が実際の政策の根拠として用いられている。公共事業を行うかどうかの指針として、費用便益分析が用いられている。しかし、実施遂行のために不適切な方法を用いて恣意的に利用されている問題点がある。 ・環境省の「環境経済の政策研究」で生物多様性及び生態系サービスについて経済評価研究が実施されている。
	産業化	△	→	・近年、環境政策として、環境税やCO <sub>2</sub> ・水質の排出量取引の導入が検討されているが、施行には至っていない。
米国	基礎研究	◎	↑	・上記の表4に示す通り、生物多様性及び生態系サービスについて経済評価研究が多く行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	・「エクソン・バルディーズ原油流出事故」発生によって、世界でもっとも早くから、バルディーズCVM調査など、政策決定などにおける生物多様性の価値の実践を進めている <sup>12)</sup> 。 ・カリフォルニアでは、 <i>Caulerpa taxifolia</i> (イチイヅタ、キラ海藻とも呼ばれる) が2000年に発見された。地中海での影響を考慮した事前の偶発事故対策に基づき、根絶作業が17日後に開始された。海洋漁業局、地域の水質管理局、電気供給会社、州の漁業狩猟局と農業局の代表からなる協力グループ (南カリフォルニア <i>Caulerpa</i> アクションチーム) が作られた。結果として、完全な根絶に成功した。 ・エルワ川ダム撤去についても、CVM研究の結果が政策の根拠として用いられている。1992年にダム撤去が決定し、2011年に撤去が実施された <sup>12)</sup> 。
	産業化	◎	↑	・従来からオハイオ州・カリフォルニア州など多数の州において水質排出量取引が政策導入されている。
欧州	基礎研究	◎	↑	・生物多様性及び生態系サービスについて経済評価研究が多く行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	・これまでに、イギリス、ドイツ、オランダでは、包括的な生態系の価値評価が進められてきている。 ・地中海に面した国々における次の事例がある。地中海では、1984年に <i>Caulerpa taxifolia</i> の発見 (1 m <sup>2</sup> の面積) に対して素早い対応を取ることに失敗したことで、在来の光合成ペントスの種や観光、商業漁業と遊漁、ダイビングのようなレクリエーション活動への悪影響を伴って、この海洋藻類の大量増加を可能にさせてしまった (1991年までに31 ha、2001年までに12,140 ha、スペイン、フランス、イタリア、クロアチア、チュニジアにまたがる)。地中海のネットワークは、範囲の拡大を制限するための協力を作り上げてきた。
	産業化	○	↑	・EUレベルで、「砂漠化と (遺伝的資源の多様性も含めた) 生物多様性の損失を食い止めることを目的とし、自然体系、自然生息地、野生動植物の機能を、保護、保全、回復、開発する」という目標を掲げ、政策として施行しようとしている <sup>13)</sup> 。

中国	基礎研究	△	↑	・特に2000年以降において、Wang et. al. (2007) <sup>14)</sup> などのような経済評価研究は存在するが、米国、欧州、日本のように多数の基礎研究はされていない。
	応用研究・開発	△	↑	・2013年には、中国が国ごとの生態系サービスの経済的価値評価に関心があることを正式に表明している。このような中国政府の動向が示すように、今後、経済評価研究の結果が政策に応用されると考えられる。
	産業化	△	↑	・政府は環境と経済双方の調和がとれた発展への転換に向けて環境への認識を高め、「第11次5ヵ年計画」期間中には中国の環境保護事業は顕著な進展を見せた <sup>15,16)</sup> 。関連法の整備、関連施設の建設など各種プロジェクトの推進、関連規制の運用強化、環境への負荷が高い立ち遅れた生産設備の排除など、さまざまな取り組みが進められ、対応が求められている各業界や地方政府、そしてそれらに対して環境サービスを提供する企業における先進技術導入ニーズも高まりを見せた <sup>15)</sup> 。 ・「国民経済・社会発展第12次5ヵ年規画綱要」では、「経済発展方式の転換」を加速し、同時に「グリーン発展」をキーワードとして、「循環経済」、「低炭素技術」、「環境・生態保護の持続可能性」を今後の新たな発展の指針とすることが明記された <sup>16)</sup> 。
韓国	基礎研究	○	↑	・Kwak et. al. (2003) <sup>17)</sup> のような生態系サービスの経済評価研究はあるが、他国とくらべて多くはない。
	応用研究・開発	△	↑	・経済発展に伴い、1960年代から韓国政府は環境政策の強化を進めている。 ・環境影響評価研究の結果を環境政策の根拠にすることは、以前から行われているが、環境経済評価研究は政策に応用されてはいない。
	産業化	△	↑	・政府は、CO <sub>2</sub> 削減対策を行おうとしていることから、今後、経済評価研究の結果が政策の根拠となることは十分ありえる。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) Managi, S. (Eds.) (2012). "The Economics of Biodiversity and Ecosystem Services." Routledge, New York, USA.
- 2) Managi, S. and Kaneko, S. (2010). "Chinese Economic Development and Environment." Edward Elgar Publishing Ltd, Cheltenham, UK.
- 3) Managi, S. (Eds.) (2014). "Handbook of Environmental Economics in Asia." Routledge, New York, USA.
- 4) The Ecosystem Services Partnership (ESP) .  
<http://www.es-partnership.org/esp> (2014年8月17日閲覧)
- 5) 吉田友美・高野宏平・藤井賢彦・山野博哉・熊谷直喜・中静透・馬奈木俊介 (2014) 『サング礁保全政策に関する経済評価』、環境経済・政策学会2014年度要旨集。
- 6) 環境省生物多様性センター. 経済的価値の評価事例。  
<http://www.biodic.go.jp/biodiversity/activity/policy/valuation/jirei.html>

- 7) 栗山浩一・馬奈木俊介 (2012) 「環境経済学をつかむ 第2版」、有斐閣。
- 8) 栗山浩一 (1997) 『公共事業と環境の価値 - CVMガイドブック』、築地書館。
- 9) 栗山浩一 (1998) 『環境の価値と評価手法 - CVMによる経済評価』、勁草書房。
- 10) 馬奈木俊介 (編集), 地球環境戦略研究機関 (編集) (2011) 『生物多様性の経済学—経済評価と制度分析』、昭和堂。
- 11) 環境省生物多様性センター. 生態系と生物多様性の経済学 (TEEB) .  
<http://www.biodic.go.jp/biodiversity/activity/policy/valuation/teeb.html> (2014年8月17日閲覧)
- 12) 環境省生物多様性センター. 第1回生物多様性の経済的価値の評価に関する検討会資料.  
[http://www.biodic.go.jp/biodiversity/activity/policy/valuation/pdf/k1\\_2\\_20120927.pdf](http://www.biodic.go.jp/biodiversity/activity/policy/valuation/pdf/k1_2_20120927.pdf)  
(2014年8月17日閲覧)
- 13) 日本貿易振興機構 (JETRO) ブリュッセル・センター. 2006. EUの環境政策と産業.  
[https://www.jetro.go.jp/jfile/report/07000517/eurotrend\\_kankyoseisaku.pdf](https://www.jetro.go.jp/jfile/report/07000517/eurotrend_kankyoseisaku.pdf) (2014年8月17日閲覧)
- 14) C. Wang, H. Ouyanga, V. Maclaren, Y. Yin, B. Shaoa, A. Boland, Y. Tian (2007), "Evaluation of the economic and environmental impact of converting cropland to forest: A case study in Dunhua county, China", *Journal of Environmental Management*, Volume 85, Issue 3, November, pp.746–756
- 15) 日本貿易振興機構 (JETRO) 北京センター. 2009. 中国の環境産業に関する調査報告書.  
[http://www.jetro.go.jp/jfile/report/07000126/china\\_kankyo.pdf](http://www.jetro.go.jp/jfile/report/07000126/china_kankyo.pdf) (2014年8月17日閲覧)
- 16) JST中国総合研究センター. 2011. 中国の第十二次五カ年規画における緑色発展の実態と動向.  
[http://www.spc.jst.go.jp/investigation/downloads/r\\_201109\\_01.pdf](http://www.spc.jst.go.jp/investigation/downloads/r_201109_01.pdf)
- 17) Seung-Jun Kwak, Seung-Hoon Yoo and Sang-Yong Han (2003), "Estimating the Public's Value for Urban Forest in the Seoul Metropolitan Area of Korea: A Contingent Valuation Study", *Urban Stud*, Volume 40, Issue 2207.

### 3.4.2.6 生態系サービスの管理システム・制度のための技術管理

#### (1) 研究開発領域名

生態系サービスの管理システム・制度のための技術管理

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

2000年代に入り、サブグローバルからローカルまでの複数の空間スケールでの生態系サービスの科学的評価が世界各地で実施されてきた。この科学的評価では、生態系サービスの過去からの変化傾向や変化要因の評価だけでなく、これまでの対応策の有効性評価、そして中長期的な未来の生態系変化に関する将来シナリオ分析が含まれる。生態系サービス管理には、行政による規制的手法から経済的手法、情報的手法などの対応だけでなく、多様な主体連携による生態系の長期的・広域的なモニタリング技術、そして将来シナリオから生態系変化を予測するモデリング技術、生態系サービスのサプライチェーンを通じた管理とそのための基準づくりが重要となる。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

2012年4月、生物多様性分野におけるIPCC(気候変動に関する政府間パネル)として、生物多様性及び生態系サービスに関する政府間プラットフォーム(IPBES: Intergovernmental Science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services)が設立され、世界規模で生態系サービスの科学的評価が定期的実施されることになった。IPBESは、科学的評価、能力開発、知識生成、政策立案支援の4つの機能を柱とする。IPBESは、意思決定機関として全加盟国が参加する総会と、IPBESの管理運営機能を担うビューロー、IPBESの活動を科学・技術的な側面から支える学際的専門家パネルで構成される。さらに、2013年12月の第2回総会では、2014年から5か年の作業計画についても議論され、4つの目的別の作業計画の詳細が承認された。

目的1は、IPBESの主要機能を実施するための科学と政策のインタフェースの能力と知識基盤の強化を目的として、能力養成ニーズの優先順位づけや先住民および地域住民の知識体系(ILK: Indigenous and Local Knowledge)との協働のためのガイドライン作成が行われることになっている。これら目的1の能力養成とILKに関しては、期限付・タスク特定のタスクフォースが立ち上げられることになった。目的2は、主に準地域、地域、地球規模での生物多様性と生態系サービスに関するアセスメントに関する作業計画であり、目的3は、テーマ別、方法論的課題に関する生物多様性及び生態系サービスのアセスメントに関する作業計画である。IPBESでは、テーマ別アセスメントや迅速アセスメントなど、ミレニアム生態系評価(MA: Millennium Ecosystem Assessment)にはなかったアセスメントが作業項目として組み込まれ、それぞれのテーマ別に専門家グループが形成されることになった。目的4では、各種アセスメントに要する情報とデータの管理をいかにするか、アセスメントの成果や結果をいかに伝達し政策支援や能力養成につなげるか、IPBES全体のプロセスの有効性をいかに評価するか、について作業計画が定められている。情報・データ管理については、目的1と同様に、タスクフォースが設定されることになった。

IPBESの概念枠組みは、人間と自然の間の複雑な相互作業を高度に簡略化したモデル

であり、当該モデルには、その主要な構成要素と要素間の関係、IPBESの目標との関係が記述されている。多様な学問領域の研究者、政策立案者、地域社会の関係者など、多様なステークホルダーが、共通理解のもとで協働してIPBESの作業計画を実施していくためには、この概念枠組みが共通の知的基盤になる。MAでは、1. 人間と生態系の要素との間には動的な相互作用があり、人間の状態を変えることが直接的・間接的に生態系に変化をもたらし、その生態系の変化がひるがえって人間の福利に変化を引き起こしていること、また、2. そのような生態系サービスと人間の福利との間の相互作用は単一スケールで生じるだけでなく、複数の時空間スケールにまたがって生じうる、という仮説のもとで概念枠組みが構成されていた。IPBESで新たに作成された概念枠組みでは、MAと異なり、①自然（生物多様性と生態系）が独立した構成要素として明示的に組み込まれ、②人間の福利に直接的に影響を与える因子として、生態系サービスだけでなく、人為的資産（Anthropogenic assets）が明示的に追加されたほか、③直接・間接的な変化要因、生態系サービス、人為的資産のそれぞれの要素に働きかける因子として制度とガバナンスが明確に位置づけられた。

特に、日本などの先進国では、人間の福利は生態系サービスだけに依存しているだけでなく、社会インフラや生産基盤、生産技術、金融、輸入品を含めて人為的資産が果たしている役割が無視できない。この点は、日本の里山・里海評価（JSSA: Japan Satoyama Satoumi Assessment）<sup>1)</sup>でもしばしば指摘されてきた課題であり、②の要素の追加はこうした議論が反映された成果である。また、生物多様性と生態系サービスの評価では、これまで生態学者など自然科学者が中心的な役割を果たしてきた。だがMA以降、アセスメントの実施やその成果の社会実装における、社会科学分野の知見が果たす役割に対する認識は大きく変化している<sup>2, 3)</sup>。IPBESでも同様の認識が持たれており、③のとおり概念枠組みの中心的な要素として制度やガバナンスが配置されている。

一方、日本国内では、里山・里海がもたらす生態系サービスの重要性やその経済および人間開発への寄与について、科学的な信頼性を持ち、かつ政策的な意義のある情報を提供することを目的として、JSSAが2006年後半から計画され、その成果は2010年10月の愛知県名古屋市での生物多様性条約第10回締約国会議（COP10）にて報告された。JSSAでは、過去50年間に里山・里海のランドスケープは大きく変化し、生物多様性を失い、システムとしての回復力が低下したこと、里山の変化は、近年では経済のグローバル化、人口減少、都市化といった要素の複合による里山の利用低減によるところが大きいこと、里海については、乱開発、汚染、気候変動による変化があげられることが指摘された。また、これまでに行われてきた対応策は個別的なものが多く効果が限定的だったが、市民参加に基づく統合的なアプローチが増加しつつあり、効果的な生物多様性の保全と生態系サービスの利用に向けた更なる進展が期待されることが指摘された。さらに、多様な主体との協働によって、生態系サービスという公益を提供する里山・里海の生態系を持続的に維持する社会制度として「新たなコモンズ」の創造が必要であるとの提案がなされた<sup>1)</sup>。

IPBESと並んでこの分野における国際的な動きとして重要なのが、「統合的地球環境研究プログラム」であるフューチャー・アース（FE: Future Earth）である。地球環境変化研究は、これまで4つの国際プログラム（WCRP、IGBP、DIVERSITAS、IHDP）

が進められてきたが、人類活動による地球システム変化の理解に基づく人類・生命圏の持続的な生存基盤の追及には、自然科学と人文・社会科学との文理融合の学際的研究が必要であり、さらに持続型社会への転換には科学者と社会のさまざまなステークホルダーとの超学際的連携・協働が必要である。FEはこのような学際的研究と、超学際的な連携・協働のための国際的な枠組みとして設計され、国際科学会議 (ICSU)、国際社会科学協議会 (ISSC)、国連環境計画 (UNEP)、国連大学 (UNU)、国連教育科学文化機関 (UNESCO)、国際研究資金配分機関 (IGFA)、ベルモント・フォーラム (BF: Belmont Forum) の7つのアライアンスの連携で進められている。2014年7月には、FEの恒久国際事務局を担う組織として、日本も加わった5ヶ国による分散型連携事務局連合が選定された。

グローバル規模での生物多様性に関する総合的な評価としては、「地球規模生物多様性概況 (GMO: Global Biodiversity Outlook)」が4次にわたって公表されてきた。2014年10月の生物多様性条約COP12にて公開されたGBO-4では、リオ+20に合わせて作成された「リオ+20のための持続可能な発展シナリオ」<sup>4)</sup>に基づいて、生物多様性条約戦略計画2011-2020で示された2050年ビジョン (2050年までに、生態系サービスを維持し、健全な地球を維持しすべての人に必要な利益を提供しつつ、生物多様性が評価され、保全され、回復され、賢明に利用される) と2020年までの20の個別目標を定めた愛知目標の達成可能性についての検討結果が含まれている。なお、GBOの日本版として実施されたのが、日本の生物多様性の総合評価 (JBO: Japan Biodiversity Outlook) である。JBOでは、環境省が日本の森林、農地などの生態系の区分ごとに、評価のための指標を設け、各指標の推移を説明するデータを基に、過去50年の生物多様性の損失の大きさと現在の傾向の評価が行われ、2010年5月に評価書が公表された。

また国際的には、研究プロジェクト「生態系と生物多様性のための経済学 (TEEB: The Economics of Ecosystems and Biodiversity)」が欧州委員会とドイツにより提唱され、2008年5月に第1フェーズの成果として中間報告が発表され、現在はプロジェクトの第3フェーズとして、各国におけるTEEBの取り組みを支援することなどにより、政策決定などにおける生物多様性の価値の主流化の実践が進められている。

EUでは、欧州科学技術研究協力機構 (EU-COST) が地球システム科学と環境マネジメント (ESSEM) という領域において、「グローバル生物多様性モデリングの調和 (HarmBio: Harmonizing Global Biodiversity Modelling)」を研究活動 (Action) のひとつとして実施している。この活動では、生物多様性の変化の将来予測の信頼性を高めるため、陸域、淡水域、海域生物多様性のモデルとデータセットの調和を支援する。そうすることでより透明性が高く、科学的にも頑健な生物多様性モデルの開発を加速させ、究極的にはさまざまな政策オプションの中から、最先端の生物多様性変化予測に基づいた環境意思決定を可能にする。

このほか、生物多様性や生態系サービスとした調和を含めた伝統的な農業文化を地域認定する仕組みとして、国連食糧農業機関 (FAO) が2002年から開始した世界農業遺産 (GIAHS: Globally Important Agricultural Heritage Systems) がある。GIAHSは、社会や環境に適応しながら何世代にもわたり発達し、形づくられてきた農業上の土地利用、伝統的な農業とそれに関わって育まれた文化、景観、生物多様性に富んだ、世界的

に重要な地域を次世代へ継承することを目的としたプログラムである。

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

2012年4月の正式設立から約2年を経て、複数のテーマごとにタスクフォースや専門家グループが形成され、IPBESによるさまざまな科学的評価に向けた活動が本格化することになった。2012年にはエルゼビアからEcosystem Servicesという名称の学術誌が創刊されるなど、今後さらにこの分野での学術的な蓄積が進むと思われる。

IPBESの新たな概念枠組みでは、人間の福利の構成要素として、IPBESや生物多様性条約の基本的な理念ともいえる自然共生 (Living in harmony with nature) の概念が明記された。「自然共生」は、我が国の「21世紀環境立国戦略」(2007年6月閣議決定)や生物多様性基本法(2008年制定・施行)にも示されている概念である。この自然共生の概念は、日本をはじめとするアジア地域に広く散見されるほか、ラテンアメリカ地域にも「母なる地球との共生」という類似の概念がある。これはまた、MAの概念枠組みが欧米的・功利主義的であるという批判があったのに対し、IPBESではさまざまな世界観や自然観が反映できるような新たな概念枠組みづくりが進められた結果でもある。ただし、このような多様な価値観や自然観の尊重をいかに科学的な評価に組み込んでいくのか、そしてそれをどのようにガバナンスにつなげていくのか、先行モデルであるIPCCではほとんど扱われてこなかった課題群にIPBESは取り組んでいくことが求められている。

一方、生物多様性と生態系サービスの低下に対して、組織的でなく、個別アプローチで場当たり的に対応するのではなく、熟慮した適応と緩和の戦略を通して、変化を予測し、その結果として悪影響を最小限にして、重要な好機としてとらえ、先見的な対応が必要となる。生態系のように不確実性と複雑性の高い課題に関して、将来シナリオ分析が求められるのは、生態系管理に対して事後的 (reactive) に対応するのではなく、事前対応 (proactive) の具体的な選択肢 (オプション) を明らかにすることができるからである。近年、生物多様性と生態系サービス分野では、社会経済シナリオとそれと連動したモデル開発が活発に進められている。

生物多様性・生態系サービスの管理・ガバナンスに関しては、以下のような課題をあげることができる。

- ・ 先住民および地域住民の知識体系の科学的評価およびガバナンスの組み込み
- ・ 生態系サービスの経済評価に基づく管理・政策介入支援
- ・ 生態系サービスをめぐるシナジーとトレードオフの評価とそれに基づく管理の方法の確立 (生態系サービスの受益負担構造の科学的評価とそれに基づく管理の仕組みの提示)
- ・ 生物多様性に関する将来シナリオとモデリングによる中長期変化の予測
- ・ 異なる生態系タイプ地域での長期的・広域的なモニタリングの継続
- ・ 国境を超えたサプライチェーンでビジネス展開している企業による取り組み強化とパートナーシップ強化 (サプライチェーンなどを通じた生態系や生物多様性に対する基準づくりと、基準づくりのための技術開発を含む)
- ・ 研究成果による政策立案支援と多様なステークホルダーとの協調・協働

#### (5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

IPBESでは、2014年に「生物多様性と生態系サービスのシナリオ分析とモデリングのための政策立案支援ツールと方法論に関する評価」に関する専門家グループを立ち上げ、シナリオ分析とモデリング、政策支援ツールと方法論についてのスコーピングに着手している。

また、ベルモント・フォーラム (BF : Belmont Forum) (地球の環境変動研究を行う世界の主要先進国・新興国の研究支援機関及び国際的な科学評議会の集まり) は、2014年の活動の一つとして「生物多様性と生態系サービスのシナリオ」分野の共同国際公募を実施した(6・7月)。本公募では、社会経済的なシナリオと地球規模の生物多様性の変化による影響モデルとの統合により、生物多様性に関する新たな将来シナリオの導出と本分野における国際的なネットワーク形成が図られる。これにより、土地利用変化、外来生物の侵入、過剰な開発、気候変動と汚染のような地球規模の変化の将来の影響についての情報提供、順応的な管理戦略に向けた政策支援、社会経済の発展する経路と政策オプションの選択肢の評価が可能となる。さらに、ベルモント・フォーラムでは、2017年に同テーマで国際共同研究プロジェクトに向けて他のファンディング主体と共同で第二回目の公募を行う予定である。

## (6) キーワード

生態系サービスへの支払制度 (PES : Payment for Ecosystem Services)、直接支払、生態系サービスのシナジーとトレードオフ、生物多様性オフセット、自然再生、環境配慮型事業、土地利用規制、森林環境税、認証制度、将来シナリオ、モデリング、モニタリング、IPBES、フューチャー・アース (Future Earth)、TEEB

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>生態系管理のための国内外のさまざまな既存の制度、ツール、取り組み（土地利用規制、生物多様性オフセット、環境税、生態系サービス評価ツールなど）に関するレビューが実施され、現状の整理と課題の把握が行われている<sup>5)</sup>。</li> <li>日本の里山・里海評価（JSSA）では、グローバル化／ローカル化、自然志向・適応重視／技術志向・改変重視という2軸を設定し4つの里山・里海の将来シナリオが作成された<sup>7)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>具体的なツールの開発では、大阪大学グループにより、産業セクターの生態系サービス依存性を、各セクターの直接依存だけでなく産業間取引を介した間接依存、輸入による域外依存も含めた定量評価のための枠組みが開発されている<sup>6)</sup>。</li> <li>国土交通省は、①国民生活への影響が深刻化するシカ、タケの増加による生態系サービスへの影響評価、および②人工林、農地、草地などの放棄による生態系サービスの変化予測を実施した<sup>7)</sup>。また同省は、2030年の日本社会が持続可能であることを大前提に、日本社会の未来像についてさまざまな外部要因をもとに四つの異なるシナリオを提示している<sup>8)</sup>。</li> <li>生物多様性オフセットは日本ではまだ制度化されていないが、愛知県で試行中。これは開発による生態系への影響を、生態系ポテンシャルマップ（指標種17種の生息適地のマップを作成）に基づく生態系ネットワークの形成に役立つ場所や内容で代償する制度（「あいち方式」）<sup>9)</sup>。</li> <li>企業と生物多様性イニシアティブ（JBIB：Japan Business Initiative for Biodiversity）により、企業の製品・サービスを対象に生物多様性への依存と影響の内容を図式化、可視化する、「企業と生物多様性関係性マップ<sup>®</sup>」が開発されている<sup>10)</sup>。</li> </ul>
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>農村あるいは里山・里海において、生態系サービスを明示的に扱わないまでも、土地利用規制や景観形成、多面的機能、資源管理、環境配慮、生物多様性保全などの名目で多様な手段が生態系サービスの管理に関して存在している。一方で、制度間の連携や調整が不足しており、また関係主体間の調整のための効果的枠組みも不在である<sup>5)</sup>。</li> <li>生態系サービス支払い（PES）類似制度として、中山間地域直接支払交付金、農地・水保全管理支払、環境保全型農業直接支援対策、森林環境税などがあるが、まだ事例が少ない傾向にあることが指摘されている<sup>5)</sup>。森林環境税は2003年に高知県で初導入後増加傾向にあり、現在30以上の自治体で導入済み。また、企業によるPESの取り組みは、熊本県白川流域における半導体工場の農家の地下水涵養の取り組みに対する支払など、実施例がみられる。</li> <li>「エコロジカルネットワーク評価技術」（鹿島建設(株)、都市再生機構、(財)都市緑化技術開発機構と共同開発）など、生態系に配慮した都市開発を支援する評価ツールが複数開発されている<sup>11)</sup>。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>国立社会・環境統合センター（SESYNC）が、国立科学財団（NSF）からの助成のもとメリー大学に2011年に設立された。SESYNCは、米国における数少ない超学的研究センターのひとつで、異なる学術分野とステークホルダーをつなぐことで人間と生態系の複雑な相互作用についての知識増進に貢献する。</li> <li>生態系サービスに関わる評価ツールとして Social Values for Ecosystem Services (SolVES) や、生態系サービスの社会的価値を定量化しマッピングできるツールや生態系サービスの空間フローを定量化することで、発生地と受益地について把握できるツールである生態系サービスのための人工知能（ARIES：Artificial Intelligence for Ecosystem Services）など、多数のツールが開発されている<sup>12)</sup>。</li> <li>Final Ecosystems Goods and Services Classification System (FECS-CS) では、生態系サービスの計測、マッピング、モデリング、評価の基礎を提供する。</li> </ul>

	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>生態系に関する意思決定支援ツール（環境保護庁（EPA））<sup>13)</sup>、地域、州の科学者や技術者による水域システムの因果関係評価に使うための情報システム（CADDIS：The Causal Analysis/Diagnosis Decision Information System）、米国の主要な生態系、生態系サービスおよびその現状（劣化）による影響についての情報提供ツール（Eco-Health Relationship Browser）など、意思決定・情報支援ツールが数多く開発されている。</li> <li>生態系や生態系要素のアセスメント、モニタリングを行うための空間的フレームワーク、人々が自然から得られる便益を地図ベースのインタフェースで可視化して理解を促すためのツール（EnviroAtlas）が開発されている。</li> </ul>
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>森林所有者に対して生態系サービスの向上を促す政府主導の支払プログラムは現在少なくとも14ある<sup>14)</sup>。また、政府以外から提供される自主的・民間ベースのPESプログラムも多数存在する。</li> <li>政府の規制をもとに発展した生態系サービスの市場としては、排水権取引、ウェットランド・バンク、コンサベーションバンクやキャップ・アンド・トレードプログラムによる排出権取引などがある<sup>15、16)</sup>。</li> </ul>
	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>生態系サービスの地図化に関しては、ローカルスケールや地域スケールにおける生態系サービスの分布、生態系サービスの供給と需要の比較、特定の生態系サービスの経済価値評価などを目的として、さまざまな試みが行われている。方法も多様であり、土地利用・被覆データに代替させる比較的シンプルなものから、植物の機能特性など生態系のメカニズムや、生態系モデルを組み込んだもの、気候変動や土地利用変化予測などのプロセスも組み込んだ生態系サービスの変化予測など多様なものがある<sup>17)</sup>。</li> </ul>
欧州	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>EU生物多様性戦略2020では、各国に生態系と生態系サービスの状態を地図化および評価することを求めている。Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services in the European Union (MAES) は、EUおよびそのメンバー国で統一的な手法を適用するためのイニシアチブで、詳細な全体的フレームワークや評価のためのインディケータに関する技術報告書が2冊出版され、いくつかの地域でテスト適用されている<sup>18)</sup>。</li> <li>生物多様性オフセットに関連して、EUメンバー8カ国を含む15のパートナーが参加するThe REMEDE Projectにより、野生生物ハビタットなどに対する損害の評価のための技術的手法を開発中<sup>19)</sup>。</li> </ul>

	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>EU加盟国はノーネットロス政策を有し、1992年のEUハビタット指令により、野生生物ハビタットを「適切な保全状態」に物理空間として維持または復元することを義務付けている。2004年EU環境責任指令により、PPP原則（汚染者負担の原則）により野生生物ハビタットに損害を与えたものはそれを復元するか、復元費用を支払うことが義務付けられており、開発事業者に対し生物多様性オフセットを義務付けているといえる<sup>16, 20, 21</sup>。</li> <li>PESに関しては、EUは共通農業政策（CAP: Common Agricultural Policy）により、山岳地帯などの条件不利地域における農業の存続の確保（人口水準の維持と景観の保全）や、環境負荷の軽減、景観の保護などに資する農法の推進に対し、直接支払が受けられる制度がすでに実施されている。</li> <li>EUにおいて、農産物・食品を対象にした地理的表示の保護制度が活用されている。これは、品質などの特徴と地域環境とのつながりを重視するとともに、基準（明細書）を定め、その基準に適合していることを公的な担保措置により確保することを通じた、一種の品質保証の仕組みであり、保護原産地呼称（PDO: Protected Designation of Origin）および保護地理的表示（PGI: Protected Geographical Indication）の2種類がある<sup>22</sup>。</li> <li>2010年に国際自然保護連合（IUCN）などと協力して、事業者における生物多様性の取り組みを進めるため欧州委員会環境総局に生物多様性とビジネスプラットフォーム（The EU Business and Biodiversity Platform）を設置<sup>23</sup>。</li> <li>ILTER（International Long Term Ecological Research）の欧州版 LTER-europe<sup>24</sup>。2010年にはGEO BON（The Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network）（GEOSS（Global Earth Observation System of Systems）の中で生物多様性に特化したもの）の設立にともない、欧州委員会によってDOPA（the Digital Observatory for Protected Area）が設立される。その後、EBONE（European Biodiversity Observation Network）（2008-2012年）を経てEU BON（European Biodiversity Observation Network）（2012-2017年）が設立された<sup>25-27</sup>。</li> <li>オランダ政府は、Innovative Fundを設置し、企業の生物多様性と生態系サービスに関わる認証制度など革新的な取り組みを支援。2011年には持続可能な貿易に関する認証制度に関わるSustainable Trade Initiativeを設立<sup>23</sup>。</li> <li>英国では、2012年に環境・食糧・地域省（DEFRA）が自然資本の保全と行動計画の優先順位の明確化のために自然資本委員会を設置<sup>28</sup>。2013年には、DEFRAによる生態系市場タスクフォースの最終レポート公表<sup>23</sup>。PESに関しては、英国政府およびEUが資金提供し、農業経営者に支払い、レクリエーションなどの自然資源の利用者の生態系サービスの受益が守られる制度が導入されている<sup>29, 30</sup>。</li> <li>フランスでは、PESとして1993年からVittel社が酪農業者に資金提供している。適正な管理をすることで地下水自然が守られ、Vittel社を含む河川流域機関の生態系サービスの受益が可能になる<sup>29, 30</sup>。</li> </ul>
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>中国生態系研究ネットワーク（CERN: China Ecosystem Research Network）が1988年に設立され、生態系と気候変動により受ける影響などのモニタリングが行われている。ただし、生物多様性モニタリングは、現状ではまださまざまな課題があるとされている（乏しいサンプリングデザイン、基準の欠如、使えるデータの未利用など）<sup>31</sup>。</li> <li>中国政府、中国科学院（CAS）、日本の国立環境研究所は、共同で西部中国における統合的な生態系評価を実施し、国土の7割の生態系サービスをマッピングし、サービスに影響を与えるドライバを特定した。水と食料供給サービスのトレンドと将来シナリオ、炭素貯蔵と生物多様性、生態系サービスと人間の福利の関係についてモデル分析がなされた<sup>32</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>生物種のモニタリング技術基準を向上させることを目的として Demonstration of Technology for Monitoring Major Species Resources プロジェクトを2007年から開始<sup>31</sup>。</li> <li>生態系サービスのマッピングとモデリングツールであるInVESTをBaoting Countyに適用、成果は同郡の土地利用次期マスタープランに反映されることとなった。開発を行う際に生態系サービスの主要な供給源を避けるように開発地域を設定するためInVESTが使用された<sup>33</sup>。</li> </ul>

	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・PES類似制度として、企業や地元のコミュニティにインセンティブを与えることで、森林伐採を禁止し植林を促進するNatural Forest Conservation Program (NFCP) が1998年から行われているほか、農家に穀物や現金で補助金を給付することで、急斜面地での農地を森林や草地に転換するGrain to Green Program (GTGP) も1999年から導入されている<sup>34)</sup>。</li> <li>・中国森林認証スキーム (CFCS)<sup>35, 36)</sup> ではこれまで200万haの森林が認証を受けている。このスキームには森林管理 (FM)、加工・流通 (CoC)、竹林、炭素吸収林、非木材林産物、森林生態系サービス、絶滅危惧種の商業育種の計7タイプあり、FMとCoCは発布されたが他の制度はまだ制定中である。</li> <li>・生物多様性オフセットは、森林法および環境影響法のもとで導入が進みつつある。例えば国内林の伐採事業による、回避し最小化できない悪影響を補償するために、ノーネットロス/ネットゲインを目指して植林活動を実施など。</li> </ul>
韓国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・生物多様性に関わる地理情報と現状におけるモニタリング技術については、アジア太平洋地域 (AP-BON)<sup>37)</sup> では日本 (J-BON) と並び基礎研究を牽引している (K-BON)。長期的に生態系を観測する国際ネットワーク (ILTER) に関しては、国内に拠点 (KLTER) をもつが、生態学的長期観測の歴史は浅い。近年サイト数を増やしており、今後の成果が期待される<sup>24)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・環境影響評価については、手法・制度が整備されている<sup>38)</sup> 一方で、生態系サービス評価に関わる応用研究は進んでいない。</li> </ul>
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・生物多様性オフセットについては1998年にノーネットロスに関する法制度が導入されている<sup>16, 20, 21)</sup>。生物多様性に関する法律は、2013年に生物多様性の保全および利用に関する法律として施行されており、名古屋議定書の採択後、韓国においても基本法が整備されたことになる<sup>39)</sup>。</li> <li>・水資源に関わる税金や、環境保護税・大気汚染税の制度があり<sup>40)</sup>、税収を環境関連特別会計に入れて、大気・水環境保全に使用するほか、自然環境保全を目的とするプロジェクトにも使用している<sup>41)</sup>。韓国独自の企業の意識啓発を促す仕組みは確認できない。</li> </ul>

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル (環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況 (大幅に改善された/悪化しているなど)、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。)

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) 国際連合大学高等研究所・日本の里山・里海評価委員会 (編) (2012) 里山・里海 自然の恵みと人々の暮らし。朝倉書店
- 2) Larigauderie A and Mooney HA (2010) The Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services: moving a step closer to an IPCC like mechanism for biodiversity, Current Opinion in Environmental Sustainability, 2: 9-14.
- 3) Perrings C, Duraiappah A, Larigauderie A, Mooney HA (2011) The Biodiversity and Ecosystem Services Science-Policy Interface, Science, 331(6021): 1139-1140.
- 4) Roehrl RA (2012) Sustainable development scenarios for Rio+20. A Component of the Sustainable Development in the 21st Century (SD21) project. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs, Division for Sustainable Development.

- 5) 橋本禪・齊藤修 (2014) 農村計画と生態系サービス (農村計画学フロンティア4), 農林統計出版.
- 6) 町村尚・松井孝典・Robert. N. Shaw・盛岡通 (2010) 「生態系サービス利用」を尺度とする新たな社会システムの構築. 環境情報科学, 39 (3), 76-81
- 7) 国土交通省 (2013) 「平成24年度生態系サービスと国土管理に関する調査」(報告書概要版)  
<http://www.mlit.go.jp/common/001020440.pdf>
- 8) 国土交通省 (2005) 「2030年の日本のあり方を検討するシナリオ作成に関する調査概要」  
<http://www.mlit.go.jp/kokudokeikaku/futurevision/>
- 9) 愛知県 「自然環境の保全と再生のガイドライン 平成 25・26 年度 試行版」  
<http://www.pref.aichi.jp/0000059680.html>
- 10) 企業と生物多様性イニシアティブ (JBIB) 「企業と生物多様性の関係性マップ」  
<http://jbib.org/activity-jbib/relation-map/>
- 11) 鹿島建設(株) (2008) 「エコロジカルネットワーク評価技術を開発」  
<http://www.kajima.co.jp/news/press/200809/17c1-j.htm>
- 12) US Geological Survey (USGS) . <http://www.usgs.gov/>
- 13) United States Environmental Protection Agency (EPA) (2014) Ecosystem Research - Ecosystems Services, EPA, <http://www2.epa.gov/eco-research/ecosystems-services>
- 14) Mercer DE, Cooley D, and Hamilton K (2011) Taking Stock: Payments for Forest Ecosystem Services in the United States, Forest Trends,  
[http://www.forest-trends.org/documents/files/doc\\_2673.pdf](http://www.forest-trends.org/documents/files/doc_2673.pdf)
- 15) Forest Trends (2011) Ecosystem Market place: State of Biodiversity Markets- offset and compensation programs worldwide- 2011 update, Forest Trends,  
[http://www.forest-trends.org/documents/files/doc\\_2848.pdf](http://www.forest-trends.org/documents/files/doc_2848.pdf)
- 16) 田中章 (2011) 生物多様性オフセット制度化の国際的広がりとは今後の課題: CBD COP10での動向を含めて, 東京都市大学環境情報学部紀要, 第十二号. p. 27-32.
- 17) Maes J, Egoh B, Willemsen L, Liquete C, Vihervaara P, Schägner JP, Grizzetti B, Drakou EG, LaNotte A, Zulian G, Bouraoui F, Paracchini ML, Braat L and Bidoglio G (2012) Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. Ecosystem Services, 1, pp. 31-39
- 18) European Commission. Ecosystem Assessment.  
[http://ec.europa.eu/environment/nature/knowledge/ecosystem\\_assessment/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/nature/knowledge/ecosystem_assessment/index_en.htm)
- 19) The REMEDE Project.  
[http://www.envliability.eu/docs/ProjectBrochure\\_D14\\_eftec\\_311006\\_FINAL.pdf](http://www.envliability.eu/docs/ProjectBrochure_D14_eftec_311006_FINAL.pdf)
- 20) 田中章 (2009) 生物多様性オフセット制度の諸外国における現状と地球生態系銀行”アースバンク”の提言、環境アセスメント学会誌7(2):1-7
- 21) いであ株式会社 (2012) 平成23年度生物多様性分野の代償措置に関する評価手法等調査業務報告書
- 22) 内藤恵久(2013) 地理的表示の保護について－EUの地理的表示の保護制度と我が国への制度の導入－. 農林水産政策研究. 20. 37-73.

- 23) 環境省生物多様性センター. 欧州委員会及び欧州各国の動向.  
[http://www.biodic.go.jp/biodiversity/private\\_participation/int/02.pdf](http://www.biodic.go.jp/biodiversity/private_participation/int/02.pdf)
- 24) ILTER. <http://www.ilternet.edu>
- 25) GEO BON. <https://www.earthobservations.org/geobon.shtml>
- 26) EBONE.  
<http://www.wageningenur.nl/en/Expertise-Services/Research-Institutes/alterra/Projects/EBONE-2.htm>
- 27) EU-BON. <http://www.eubon.eu>
- 28) Natural Capital Committee. <https://www.naturalcapitalcommittee.org>
- 29) IGES (2012) 経済価値の内部化による生態系サービスの持続的利用を目指した政策オプションの研究 最終研究報告書
- 30) De Groot RBA and Hermans LM (2009) Broadening the picture: negotiating payment schemes for water-related environmental services in the Netherlands, *Ecological Economics*, 68: 2760 - 2767
- 31) Nakano S, Yahara T and Nakashizuka T (2012) The Biodiversity Observation Network in the Asia-Pacific Region: Toward Further Development of Monitoring, Springer Science & Business Media, ebook,  
<http://books.google.co.jp/books?id=iI7BbU9kivQC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- 32) Millennium ecosystem assessment (MEA) (2005) ‘China Integrated Ecosystem Assessment of Western China’, MEA,  
<http://www.unep.org/maweb/en/SGA.WesternChina.aspx>
- 33) Natural Capital Project, n.d., ‘Applying InVEST to Spatial Planning: China, Colombia, Hawaii and Indonesia’, Natural Capital Project,  
[http://www.naturalcapitalproject.org/pubs/NatCap\\_InVEST\\_and\\_Case\\_Study\\_Summary\\_TEEB\\_2010.pdf](http://www.naturalcapitalproject.org/pubs/NatCap_InVEST_and_Case_Study_Summary_TEEB_2010.pdf)
- 34) Liu J, Shuxin Li ZO, Tam C and Chen X (2008) ‘Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services’, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, no. 28, pp.9477-9482.
- 35) PEFC (2014) China’s National Forest Certification System Achieves PEFC Endorsement, PEFC,  
<http://pefc.org/news-a-media/general-sfm-news/1459-china-s-national-forest-certification-system-achieves-pefc-endorsement>
- 36) China forest certification scheme (2014) China forest certification scheme,  
<http://www.cfcs.org.cn/english/zh/index.action>
- 37) AP-BON. <http://www.esabii.biodic.go.jp/ap-bon/index.html>
- 38) 環境省 (2004) 諸外国の環境影響評価制度調査報告書  
<http://www.env.go.jp/policy/assess/4-1report/file/12.pdf>
- 39) 国立国会図書館. 立法情報【韓国】生物多様性の保全及び利用に関する法律の制定  
[http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo\\_3491896\\_po\\_02510208.pdf?contentNo=1](http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_3491896_po_02510208.pdf?contentNo=1)

- 40) 環境省（2012）税制全体のグリーン化推進検討会 第5回 資料  
<https://www.env.go.jp/policy/tax/conf/conf01-05.html>
- 41) NPO法人野生生物保全論研究会（2012）愛知ターゲット目標3の達成とグリーン経済への  
転換に向けて②.  
[http://www.jwcs.org/data/Aichi%20Biodiversity%20Tar-  
get%203%20No2%20for%20web.pdf](http://www.jwcs.org/data/Aichi%20Biodiversity%20Target%203%20No2%20for%20web.pdf)

### 3.4.3 持続可能な生産と消費

#### 3.4.3.1 製造業におけるグリーン技術（ゼロエミッション、環境配慮設計、クリーナープロダクション）

##### (1) 研究開発領域名

製造業におけるグリーン技術（ゼロエミッション、環境配慮設計、クリーナープロダクション）

##### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

製造業における環境負荷削減を図るためのゼロエミッション、環境配慮設計（DfE：Design for Environment）、クリーナープロダクション（CP：Cleaner Production）などを支援する技術開発、データベースの構築およびLCA（Life Cycle Assessment）などの評価手法の開発やその応用に関する検討を行う。

##### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

製造業などの生産者が自ら生産する製品などについて使用され、廃棄物となった後まで一定の責任を有する拡大生産者責任（EPR：Extended Producer Responsibility）の一般原則に基づき、生産者などにおける環境配慮に関する取り組みが求められている。

現在、有害化学物質の規制や省エネルギー化への対応、さらにはライフサイクルにおける温室効果ガス排出量の削減などの観点から製品・サービス・企業活動などにおける取り組みを要求するさまざまな動きがでてきている。これらの動向から読み取れるのは、議論の入口（有害化学物質、省エネルギー化、温室効果ガスの削減など）は異なっているが、出口、すなわち、ライフサイクル全般にわたっての環境配慮の推進は共通の要求事項であるという点である。

一般的に、生産者が求められる取り組みは、環境問題などに対する社会的な要請に応じて、大気や排水などの汚染物質などを処理するEP（End of Pipe）型の対応から、より低環境負荷な生産プロセスなどの導入を図るCP（Cleaner Production）型の対応へと変遷してきた<sup>1)</sup>。近年では、欧州における廃電気電子機器の回収・リサイクルなどを対象とした枠組みであるWEEE（Waste Electrical and Electronic Equipment）指令<sup>2)</sup>や鉛、水銀などの6種類の物質の含有の制限を規定したRoHS（Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment）指令<sup>3)</sup>をはじめとして、有害化学物質に対する規制が強化される傾向がある。また、もっとも上流サイドでの予防措置といわれる環境配慮設計や、生産現場のみならず、企業全体として環境配慮に対する環境マネジメントシステムの導入や製品などの製造・使用・廃棄・リサイクルまでの環境負荷を分析・評価するLCAの導入に関しても注目が集まっている。

製品単体での環境配慮設計に関する特筆すべき動向としては、欧州におけるEuP（Energy-using Products）指令／ErP（Energy-related Products）指令<sup>4)</sup>があげられる。EuP指令は、エネルギー使用製品のライフサイクル全般にわたっての環境配慮を要求している指令である。原材料の選択、製造、包装・輸送および流通、設置および保守、使用、エンド・オブ・ライフといったライフサイクル全般にわたって環境配慮設計のパラメータを明記している。さらに、消費者が製品に関わる環境側面を比較できるように、

当該製品の環境特性やパフォーマンスに関する情報を付属させることや、エンド・オブ・ライフの段階において、解体、リサイクルあるいは処理・処分にに関する情報を提供することを求めている点に特徴がある。ErP指令は、EuP指令の対象製品を拡張したものであり、環境配慮設計を義務づけていることからEcodesign指令とも呼ばれている。大きな変更点としては、EuP指令では、電気や石油などのエネルギーを直接消費する製品が対象であったのに対し、窓や断熱材、シャワーヘッドなどの間接的にエネルギー消費に影響する製品（エネルギー関連製品）にも拡張している点があげられる。

従来、これらの取り組みは、企業内部での取り組みが中心であったが、最近では、企業の社会的責任（CSR：Corporate Social Responsibility）の観点から、消費者や投資家に対して、その環境パフォーマンスの開示を要求される動きも顕著となっている。製品のライフサイクルにおける環境負荷をCO<sub>2</sub>に代表される温室効果ガス排出量で表示するカーボンフットプリント（CFP：Carbon Footprint of Products）、企業活動やサプライチェーンにおける間接的な温室効果ガス排出量の情報開示を行うGHG Protocol<sup>5)</sup>に関する議論などがその代表例といえる。企業活動における間接的な温室効果ガスの排出量を意味するSCOPE3を中心に、企業自らが算定・公表し、他社との差別化を図る動きが活発化している<sup>6)</sup>。このように、製品や企業単体で行われていた取り組みを組織やサプライチェーン全体に拡張する動きがみられる。

#### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

本領域における課題としては、規制などの実効性の担保と標準化の困難性があげられる。例えば、WEEE指令は、電気製品などが10製品群に大別されているが、対象製品となるか否かの判断については、事業者が自主的に行う必要がある。また、同指令は、最低限のルール化を前提とした指令（Minimum Requirements）であることから、EU加盟各国が独自の厳しい国内法（上乘せ）を制定することも可能となっていることから、その動向も含めて注視することが要求される。また、RoHS指令では、EUのみならず、日本、中国、韓国、タイ、アルゼンチン、トルコ、米国（カリフォルニア州）、ノルウェー、インドなどの各国でルール化される動きがあり、国際的な製品などを提供する生産者はこれらの動きを把握する必要がある<sup>7)</sup>。

近年、CFPやSCOPE3などのように温室効果ガスのみに着目したアプローチが中心となっているが、複数の環境負荷に注目するマルチクライテリア手法にも注目が集まっている。さまざまな環境問題を考慮することは重要であるが、その算定を行う事業者の負荷の増大、評価そのものが複雑になること、一般消費者に理解しにくいことなどの課題が指摘されている<sup>8)</sup>。

また、日本や欧州の研究機関などを中心に環境配慮設計の定量化やLCA手法の高度化に関する研究は継続的に実施されているが、独自手法の開発・改良にとどまっており、標準性の高い手法開発には至っていないのが現状である。

#### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

米国のEPEAT（Electronic Products Environmental Assessment Tools）<sup>9)</sup>が注目すべき動向といえる。EPEATは、米国における電子製品の環境影響の総合評価システムで

あり、米国・連邦政府の調達条件として位置づけられている制度である。IEEE (米国電気電子技術者協会) 1680で定められた基準にしたがって、その達成度合いを3段階 (ゴールド、シルバー、ブロンズ) で評価するものである。具体的には、環境配慮という観点から取り扱いに注意を要する素材の選定、使用済み製品の管理、省エネルギー、製品寿命と製品ライフサイクルの拡張、パッケージング、企業の業績などが主たる評価項目となっている。EPEATは、とりわけ北米市場への展開を考慮する際には必須条件となりつつある<sup>10)</sup>。

また、EUで2011年より取り組まれている製品・組織の環境フットプリントも注目すべき動向である。これは、欧州共通の環境負荷の評価指標の構築を目指したものであり、欧州長期成長戦略のひとつに位置づけられている資源効率化政策に基づくアプローチである。2013年～2016年にパイロット事業が行われており、①算定基準の開発プロセス、②検証方法、③コミュニケーション方法の試行を目的としている<sup>8)</sup>。

我が国においては、環境省・経済産業省などが取り組んでいるサプライチェーンにおける温室効果ガスの排出量の算定に向けた取り組みが注目される。サプライチェーンにおける温室効果ガスの排出量の算定に取り組む企業の情報開示や国内外の動向などを発信するプラットフォームとして、グリーン・バリューチェーンプラットフォーム<sup>11)</sup>を開設している。現段階では、情報開示を行っている企業などの情報レベルが必ずしも統一されていないが、国際的にも注目されている分野であるため、その動向や成果を注視したい。

また、最近では、太陽光発電や電気自動車などやICTなどの使用・運用段階における温室効果ガスの削減の貢献度を定量化しようという試みがみられる<sup>12)</sup>。SCOPE3では、あくまでも「排出量の算定」を目的とした取り組みであるが、その貢献度評価を行うことへの企業などのニーズは高く、今後、注目すべき分野である。

## (6) キーワード

拡大生産者責任 (EPR)、環境配慮設計 (DfE)、LCA、EP (End of Pipe)、CP (Cleaner Production)、有害化学物質、温室効果ガス (GHG)、カーボンフットプリント (CFP)、SCOPE3

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・環境配慮設計の定量評価手法やLCA手法の開発が複数の企業、研究機関などで継続的に行われている。
	応用研究・開発	○	↑	・(一社)産業環境管理協会 <sup>13)</sup> において、LCAに関するデータベースの構築などが継続的に行われている。 ・環境省・経済産業省主導により、サプライチェーンにおける温室効果ガス排出量の算定に向けた取り組みが支援されている <sup>6)</sup> 。 ・アジア各国への環境配慮設計などの普及啓発に向けた取り組みもみられる <sup>14)</sup> 。
	産業化	◎	→	・家電リサイクル法、自動車リサイクル法、資源有効利用促進法などの枠組みに基づき、電気・電子製品、自動車などを中心に環境配慮設計事例などに対する取り組みはなされている。今後は、これらの蓄積された知見を国内外に積極的に発信していくことが求められる。
米国	基礎研究	○	→	・LCAに関するデータベースの構築などに関する継続的な研究開発が行われている <sup>15)</sup> 。
	応用研究・開発	◎	↑	・IEEEによって定められた評価基準に基づき開発されたEPEAT <sup>9)</sup> が特筆すべき動向といえる。
	産業化	◎	↑	・EPEATが米国・連邦政府の調達条件として位置づけられており、国際的にも波及効果が大きい取り組みとして認知され始めている。製品によっては、EPEATの準拠が北米への事業展開には必須となりつつある <sup>10)</sup> 。
欧州	基礎研究	◎	→	・LCA手法や環境負荷評価の指標開発において、複数の企業、研究機関などで継続的に行われている <sup>15)</sup> 。
	応用研究・開発	◎	→	・製品・組織のLCAに関するパイロット事業が2013～2016年で行われている。欧州統一の評価指標の構築に向けた動きであり、その成果と政策などへの反映が注目される <sup>8)</sup> 。
	産業化	◎	↑	・WEEE指令、RoHS指令、EuP/ErP指令などを主導しており、本領域において、世界的な影響力を持ち続けている。
中国	基礎研究	△	↑	・LCAなどに関する研究事例が報告され始めている。廃棄物問題、資源問題は重要な政策的課題であることから、今後、活発化することが予想される。
	応用研究・開発	○	↑	・廃棄物、リサイクルに関連する事業者の誘致を目的とした「静脈産業園」を全国各地で整備する計画である <sup>16)</sup> 。このなかで、産学官連携による新しい研究テーマの一環として、本領域に関する取り組みが加速化する可能性がある。
	産業化	○	↑	・冷蔵庫、エアコン、洗濯機、テレビなどのリサイクルを規定した「廃棄物電気電子製品回収処理管理条例」や有害化学物質を規制する「電子情報製品汚染予防管理弁法」が施行した <sup>17)</sup> 。
韓国	基礎研究	○	↑	・環境配慮設計に関する国際会議であるEcoDesign2013を主催するなど、本領域への関心の高まりが伺える <sup>18)</sup> 。
	応用研究・開発	○	→	・韓国環境産業技術院(KEITI) <sup>19)</sup> を中心に、LCAや環境配慮製品に関する研究が継続的に行われている。
	産業化	○	↑	・電気・電子製品および自動車の資源循環を規定した「電気・電子製品及び自動車の資源循環に関する法律」や有害化学物質の管理を要求する「有害化学物質管理法」が施行した <sup>20)</sup> 。

## (註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

## (註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

## (註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) 市川芳明. 環境適合設計の実際. 2001.
- 2) European Commission. Waste Electrical & Electronic Equipment (WEEE).  
[http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/legis\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/legis_en.htm)
- 3) European Commission. Recast of the RoHS Directive.  
[http://ec.europa.eu/environment/waste/rohs\\_eee/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/waste/rohs_eee/index_en.htm)
- 4) European Commission. Ecodesign.  
[http://ec.europa.eu/enterprise/policies/sustainable-business/ecodesign/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/sustainable-business/ecodesign/index_en.htm)
- 5) GREENHOUSE GAS PROTOCOL. <http://www.ghgprotocol.org/>
- 6) 環境省. サプライチェーンにおける温室効果ガス排出量に関するページ.  
[http://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply\\_chain/comm.html](http://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/comm.html)
- 7) 小野田弘士. 環境配慮設計とLCAの基礎理解. World Eco Scope. 2013.
- 8) みずほ情報総研(株). — 環境フットプリント — 欧州における環境負荷見える化の政策. 2013.  
<http://www.mizuho-ir.co.jp/publication/column/2013/0611.html>
- 9) EPEAT. <http://www.epeat.net/>
- 10) LCA日本フォーラム (JLCA). 環境効率セミナー (総会記念セミナー) 資料. アメリカ EPEAT (電気製品環境評価ツール) の最新動向について. 2010.  
[http://lca-forum.org/environment/forum/seminar/pdf/2010/0823\\_3.pdf](http://lca-forum.org/environment/forum/seminar/pdf/2010/0823_3.pdf)
- 11) グリーン・バリューチェーンプラットフォーム. <http://www.gvc.go.jp/>
- 12) 【例】 JEITAグリーンIT委員会. <http://home.jeita.or.jp/greenit-pc/>
- 13) (一社) 産業環境管理協会. <http://www.jemai.or.jp/>
- 14) 経済産業省. 環境に配慮した生産に関連するアジアのネットワークの概要.  
<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g11026g28j.pdf>
- 15) 【例】 EcoBalance. EcoBalance2012 Oral program.  
<http://ilcaj.sntt.or.jp/EcoBalance2012/program/index.html>
- 16) 経済産業省. 平成23年度インフラ・システム輸出促進調査等委託費「中国大連市における高付加価値カーボン原料等供給型タイヤリサイクルに関する事業化可能性調査報告書」2012.  
[http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/h24fy/h2412-chinaitre/h2412-chinaitre-07\\_01.pdf](http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/h24fy/h2412-chinaitre/h2412-chinaitre-07_01.pdf)

- 17) 日本機械輸出組合（JMC）．中国における最近の製品環境規制動向．2012.  
[https://jmcti.org/jigyuu/pdf/H23kankyo\\_20120328\\_china.pdf](https://jmcti.org/jigyuu/pdf/H23kankyo_20120328_china.pdf)
- 18) EcoDesign2013. <http://ecodesign.or.kr/ecodesign2013/>
- 19) Korea Environmental Industry & Technology Institute（KEITI）．  
<http://www.keiti.re.kr/eng/action.do>
- 20) 環境省．中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会 小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済製品中の有用金属の再生利用に関する小委員会（第2回）資料．2011.  
<http://www.env.go.jp/council/former2013/03haiki/y0324-02/mat02.pdf>

### 3.4.3.2 サプライチェーンの環境マネジメント

#### (1) 研究開発領域名

サプライチェーンの環境マネジメント

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

企業のサプライチェーンに起因する環境負荷、環境影響および資源消費を追跡・計測・モデル化・評価し、環境面でのホットスポットを特定することで、製品設計や原材料調達に関する意思決定の改善を通して、サプライチェーンの持続可能性を高める。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

製品の原料採掘から製造、流通、消費者への販売に至るまでの企業のサプライチェーン（またはバリューチェーン）は、近年のグローバル化に伴って、ますます複雑化している。そのため、自社が直接的に管理するプロセスに加え、原材料の調達先や廃棄物処理の委託先など自社の製品のサプライチェーン全体を把握して、物流の最適化によるコスト削減や、そこに潜在するリスク要因の管理を図るサプライチェーンマネジメント（SCM：Supply Chain Management）が、企業の事業継続計画（BCP：Business Continuity Plan）や企業の社会的責任（CSR：Corporate Social Responsibility）の観点からも重要性を増している。特に、このような地球規模のサプライチェーンは、生活水準の向上や労働環境の改善、貧困の緩和を可能にする一方で、抑制できないエネルギーや水、その他の資源への渴望が地球に負担を与えるという負の側面が懸念されている<sup>1)</sup>。Science誌（2014年6月）において「Rethinking the Global Supply Chain」と題した特集が組まれていることは、こうしたサプライチェーンの環境マネジメントへの科学の貢献が求められていることを示す、ひとつの証左であるといえる。特に、持続可能なサプライチェーンの包括的管理の鍵として、ライフサイクル評価（LCA：Life Cycle Assessment）などの科学的手法が、どこに改善のための労力を集中させるべきか研究するために利用されうると指摘されている<sup>2)</sup>。こうしたホットスポットの特定・評価は、製品の改善、サプライヤーの選定を含む企業の持続可能性の戦略、消費者のライフスタイル、調達のオプション、持続可能な消費と生産の国家政策などの意思決定を指南しうる<sup>3)</sup>。以下では、従来の製品のLCAの範疇を超えた、企業のサプライチェーンの環境マネジメントの手法としてのLCAやフットプリント分析の活用と、関連する規格や基準の動向について述べる。さらに、注目動向として、近年の社会LCA（SLCA：Social LCA）の発展とサプライチェーンの社会面でのホットスポット評価、サプライチェーンリスク管理（SCRM：Supply Chain Risk Management）との関連性にも言及する。

近年、LCAの適用対象は、従来の A. 製品レベルから、B. 組織（企業）、C. 消費者・ライフスタイル、D. 国家レベルへと拡張している<sup>3)</sup>。これらのうち、特にサプライチェーンの環境マネジメントと関連性が強い適用対象は、B. 組織のLCA（OLCA：Organizational LCA）である。温室効果ガス（GHG：Greenhouse Gas）排出に関しては、製品のカーボンフットプリント（CFP：Carbon Footprint of Products）<sup>4,5)</sup>に加えて、GHGプロトコルの「スコープ3算定報告基準」<sup>6-8)</sup>や国際標準化機構（ISO）における「組織のGHG排出量の定量化および報告」<sup>9)</sup>、CDP（Carbon Disclosure Project）<sup>10)</sup>

などに代表されるように、企業などの組織に対して、自社の直接的な排出（いわゆるスコープ1）や電力や熱など調達するエネルギー起源の排出（いわゆるスコープ2）だけでなく、原材料調達など自社のサプライチェーンに起因する負荷の算定および報告を求め動きが活発になっている。こうした負荷の算定においては、ライフサイクルインベントリ（LCI：Life Cycle Inventory）の方法が適用される。システム境界の設定やカットオフの問題がないという利点から、特にデータ収集（追跡・計測）を優先すべき排出源のスクリーニングのための二次データとして、環境産業連関分析（EIOA：Environmental Input-Output Analysis または EEIO：Environmentally Extended Input-Output）による環境負荷原単位の有用性も期待されている<sup>6,7)</sup>。

当然、サプライチェーンの環境マネジメントが対象とするべき問題はGHG排出のみではなく、カーボンフットプリント以外にも、各種の環境フットプリントが分析されている<sup>11)</sup>。欧州委員会（EC）は、2013年に「製品の環境フットプリント（PEF：Product Environmental Footprint）」および「組織の環境フットプリント（OEF：Organisation Environmental Footprint）」についての勧告を公表している<sup>12)</sup>。OEFを実施する目的として、ホットスポットに着目した環境影響の削減や、サプライチェーンのリスク管理などの戦略的な意思決定、組織の環境パフォーマンスの投資家や他の利害関係者への開示が明記され、結論にはサプライチェーンのホットスポットの特定や改善可能性を含むことが必須とされるなど、サプライチェーンの環境マネジメントへの適用を前提としていることが分かる。また、対象とする製品のサプライチェーンや組織の活動に関連する、あらゆる環境問題を含んだ影響評価（インベントリの影響領域への集約）が求められており、気候変動、オゾン枯渇、生態毒性、人間毒性、酸性化、富栄養化、水資源枯渇、鉱物・化石資源枯渇、土地利用といったさまざまな影響領域と、それぞれの影響評価モデルが提示されている。

#### （4）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

サプライチェーン管理者（企業）の意思決定は、サプライチェーンに関わる地域の持続可能性に影響を与える<sup>2)</sup>。そのため、地域依存性のある環境影響や地域偏在性のある資源消費の計測・評価には地域レベルの解像度が求められるが、サプライチェーンの地域的なホットスポットを特定するための方法は、世界的にも未成熟である。その背景には、これまでのLCAやフットプリント分析の主眼がライフサイクル“全体”での環境影響を計測・評価することであり、インベントリのデータベースや影響評価の手法開発の方向性も、集約・合計された環境影響を簡便に導出することに向いていたという状況がある。技術的には、地域的な環境負荷や資源消費のフロー（インベントリ）の多くは国レベルの解像度で整備されている一方で、影響評価の手法の地域的な解像度は環境影響の性質に依存するため、それらのマッチングが困難な課題となっている<sup>3)</sup>。また、インベントリと影響評価の両面において、データベースやモデルのグローバル化が課題として残されている。EIOAによる輸出入を考慮した環境負荷原単位の算定<sup>13,14)</sup>、地球規模での地域的な影響評価への展開<sup>15-17)</sup>が進められているが、地球規模のサプライチェーンのホットスポットを特定するという目的に対しては、地域的な解像度や網羅性の点では発展途上である。

また、一般化されたインベントリ（二次データ）のデータベースの充実によって、LCAを実施する企業が自らインベントリ（一次データ）を収集し、モデル化する機会や必要性が少なくなったことが、意図しない結果として、LCAの実践と自社固有のサプライチェーンのホットスポットの特定との間に乖離を生んでいることも考えられる。LCAという手法の範疇では、「ホットスポットの特定のためであれば、粗い推計でも十分」という割り切りもありえる<sup>3)</sup>。しかし、特に水資源消費や土地利用といった地域依存性・偏在性の無視できない影響領域については、企業が自社のサプライチェーンを追跡し、それに起因する負荷や影響の計測・モデル化・評価を通して、精確にホットスポットを特定するという一連の手順について、より具体的な方法の提示が求められる。

#### (5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

SCMは元来、環境面だけでなく経済面、社会面を含む概念であるが、SCMと密接に関わるLCAの将来的な発展性としても、前述の地域的な詳細性・精確性に加え、経済面や社会面の評価への拡張が期待されている<sup>3)</sup>。環境面、経済面および社会面のパフォーマンス指標によって構成される枠組みは「ライフサイクル持続可能性分析（LCSA：Life Cycle Sustainability Assessment）」と呼ばれ、製品を対象とした従来の（環境）LCAに対して、評価指標の範囲の拡張と、メソレベル（企業の製品ポートフォリオなど）や経済圏全体への分析対象の拡張が想定されている<sup>18)</sup>。経済面の分析にはライフサイクルコストリング（LCC：Life Cycle Costing）、社会面にはSLCAが適用される。

SLCAについては、2009年に公表された指針において、環境LCA（ELCA）と対比させつつ、SLCAの技術的な枠組みが提示されている<sup>19)</sup>。具体的な評価指標としては、人権、労働条件、文化遺産、貧困、疾病、政治紛争、先住権などがある。SLCAの適用対象としては、社会面でのホットスポットを特定して潜在的な負の影響とリスクを減少させることが例示されており、サプライチェーンの環境マネジメントの目的とも整合的である。

社会面でのホットスポットのスクリーニングや評価に利用可能なSLCAのデータベースの整備は、ELCAと比べて不十分であるものの、いくつかの事例が公表されつつある<sup>20)</sup>。ただし、一般化されたデータでは、地域的に精確なホットスポット評価ができないという問題は、環境マネジメントとも共通する課題である。社会面での評価は、環境面と比べても地域依存性が重要であり、地域的なホットスポット評価の具体的な事例の蓄積が求められる。また、ELCAのインベントリ（環境負荷や資源消費のフロー）と異なり、SLCAが対象とする不適正行為は、統計データとして捕捉されないことも多く、実態の把握が困難であることが、精確な計測・評価やデータベースの整備を妨げる可能性にも注意しなければならない。

#### (6) キーワード

サプライチェーン、バリューチェーン、ライフサイクル評価（LCA）、環境フットプリント、ホットスポット、社会LCA（SLCA）、サプライチェーンリスク管理（SCRM）

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・データベース：インベントリ（プロセスデータ）のデータベースが整備されている（IDEAJLCA LCAデータベース）。EIOAによる環境負荷原単位が公表されている（3EID）。輸出入を考慮した環境負荷原単位が算定されている <sup>14)</sup> 。CFPのデータベースが公表されている <sup>5)</sup> 。
	応用研究・開発	○	→	・規格・基準など：CFPについて独自の基準を公表している <sup>5)</sup> 。スコープ3について指針を公表している <sup>8)</sup> 。GHGプロトコルによるスコープ3の基準化に関与している <sup>6)</sup> 。
	産業化	○	→	・経営の効率化のためのSCMに関するコンサルティングに加え、環境分野では、産業界の環境管理を支援する法人がLCAソフトウェア（MiLCA）やCFPプログラムを提供している。コンサルティング会社によるスコープ3やCDPに関するコンサルティング、建設分野を中心としたLCAのコンサルティングなどが提供されている。
米国	基礎研究	◎	→	・データベース：インベントリ（プロセスデータ）のデータベースが整備されている（U.S. LCI Database）。EIOAによる環境負荷原単位が公表されている（CEDA, EIO-LCA, OPEN IO）。
	応用研究・開発	○	→	・規格・基準など：GHGプロトコルによるスコープ3の基準化に関与している <sup>6)</sup> 。環境保護庁（EPA）がLCAの原則と実施についての報告を公表している。
	産業化	○	→	・コンサルティングなど：ライフサイクル情報管理システム、持続可能性計測のサービス、LCA実施のサービスなどが提供されている。
欧州	基礎研究	◎	→	・データベース：インベントリ（プロセスデータ）のデータベースが整備・更新されている（ELCD, Ecoinvent, Gabi Databases, CPM LCA Database）。英国ではEIOAによるスコープ3の環境負荷原単位が公表されている（Supply Chain GHG Emission Factors）。
	応用研究・開発	◎	↑	・規格・基準など：GHGプロトコルによるスコープ3の基準化に深く関与している <sup>6)</sup> 。ISOによるOLCAの規格化に深く関与している <sup>9)</sup> 。ECによる環境フットプリントの勧告が公表されている <sup>12)</sup> 。
	産業化	◎	↑	・コンサルティングなど：企業のサプライチェーンの持続可能性のためのソフトウェアやコンサルティングの提供、LCAソフトウェア（SimaPro）やLCAのコンサルティングの提供、バリューチェーンのホットスポットやフットプリント分析のためのソフトウェアの提供などがみられる。
中国	基礎研究	○	↑	・データベース：インベントリ（プロセスデータ）のデータベースが整備されている（CLCD）。EIOAによる環境負荷原単位が算定されている <sup>21, 22)</sup> 。
	応用研究・開発	△	→	・規格・基準など：GHGプロトコルによるスコープ3の基準化に関与している <sup>6)</sup> 。
	産業化	△	↑	・コンサルティングなど：LCAソフトウェアの提供が行われはじめている。
韓国	基礎研究	○	↓	・データベース：インベントリ（プロセスデータ）のデータベースが整備されていたが（Korea LCI Database）、現在の動向は不明。
	応用研究・開発	×	↓	・規格・基準など：CFPについて独自の認証を実施予定とされていたが、現在の動向は不明。
	産業化	×	→	・コンサルティングなど：該当するビジネスは確認されていない。

## (註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

## (註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、  
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

## (註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) Wible, B., Mervis, J., and Wigginton, N.S.: "Rethinking the Global Supply Chain," *Science* 344 (6188), pp. 1100-1103 (2014)
- 2) Dooley, K.J.: "The Whole Chain," *Science* 344 (6188), p. 1104 (2014)
- 3) Hellweg, S. and Milà i Canals, L.: "Emerging Approaches, Challenges and Opportunities in Life Cycle Assessment," *Science* 344 (6188), pp. 1109-1113 (2014)
- 4) International Organization for Standardization (ISO): *ISO/TS 14067: Greenhouse Gases – Carbon Footprint of Products – Requirements and Guidelines for Quantification and Communication*, [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail?csnumber=59521](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=59521) (2013)
- 5) 産業環境管理協会：「CFPプログラム：カーボンフットプリントコミュニケーションプログラム」, <https://www.cfp-japan.jp/> (2014年8月12日 閲覧)
- 6) Greenhouse Gas (GHG) Protocol: *Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard*, <http://www.ghgprotocol.org/standards/scope-3-standard> (2011)
- 7) Greenhouse Gas (GHG) Protocol: *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions*, version 1.0, <http://www.ghgprotocol.org/feature/scope-3-calculation-guidance> (2013)
- 8) 環境省・経済産業省：「サプライチェーンを通じた温室効果ガス排出量算定に関する基本ガイドライン」, Ver. 2.1, [http://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply\\_chain/comm.html](http://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/comm.html) (2014)
- 9) International Organization for Standardization (ISO): *ISO/TR 14069: Greenhouse Gases – Quantification and Reporting of Greenhouse Gas Emissions for Organizations – Guidance for the Application of ISO 14064-1*, [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=43280](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=43280) (2013)
- 10) Carbon Disclosure Project (CDP): *Supply Chain Report 2013-14: Collaborative Action on Climate Risk*, <https://www.cdp.net/en-US/Results/Pages/Supply-Chain-Reports.aspx> (2014)
- 11) Hoekstra, A.Y. and Wiedmann, T.O.: "Humanity's Unsustainable Environmental Footprint," *Science* 344 (6188), pp. 1114-1117 (2014)

- 12) European Commission (EC): “Commission Recommendation of 9 April 2013 on the Use of Common Methods to Measure and Communicate the Life Cycle Environmental Performance of Products and Organisations,” *Official Journal of the European Union*, L 124, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32013H0179> (2013)
- 13) 南斉規介 編: 「特集 世界経済を対象とした多地域間産業連関表の開発と応用」『日本LCA学会誌』9 (2), pp. 67-107 (2013)
- 14) Nansai, K., Kondo, Y., Kagawa, S., Suh, S., Nakajima, K., Inaba, R., and Tohno, S.: “Estimates of Embodied Global Energy and Air-Emission Intensities of Japanese Products for Building a Japanese Input-Output Life Cycle Assessment Database with a Global System Boundary,” *Environmental Science & Technology* 46 (16), pp. 9146-9154 (2012)
- 15) Itsubo, N.: “Development of LIME 3 –Globalization of LCIA Methodology based on Endpoint Modeling–,” International Symposium on Life Cycle Impact Assessment –Towards Development of Global Scale LCIA Method–, Yokohama (2012)
- 16) 伊坪徳宏・湯龍龍・村上佳世・本下晶晴・栗山浩一・吉田謙太郎・時松宏治: 「地球規模に拡張したライフサイクル影響評価手法 (LIME 3) の開発」, 第8回 日本LCA学会研究発表会, 草津 (2013)
- 17) Jolliet, O.: IMPACT World+: “A Regionalized LCIA Method at Global Level,” International Symposium on Life Cycle Impact Assessment –Towards Development of Global Scale LCIA Method–, Yokohama (2012)
- 18) Guinée, J.B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., and Rydberg, T.: “Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future,” *Environmental Science & Technology* 45 (1), pp. 90-96 (2011)
- 19) United Nations Environment Programme (UNEP): *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*, [http://www.unep.org/publications/search/pub\\_details\\_s.asp?ID=4102](http://www.unep.org/publications/search/pub_details_s.asp?ID=4102) (2009)
- 20) Benoît Norris, C.: “Data for Social LCA,” *International Journal of Life Cycle Assessment* 19 (2), pp. 261-265 (2014)
- 21) Peters, G.P., Weber, C.L., Guan, D., and Hubacek, K.: “China’s Growing CO<sub>2</sub> Emissions – A Race between Increasing Consumption and Efficiency Gains,” *Environmental Science & Technology* 41 (17), pp. 5939-5944 (2007)
- 22) Guo, J., Zou, L.L., and Wei, Y.M.: “Impact of Inter-Sectoral Trade on National and Global CO<sub>2</sub> Emissions: “An Empirical Analysis of China and US,” *Energy Policy* 38 (3), pp. 1389-1397 (2010)

### 3.4.3.3 LCAに基づく生産と消費管理

#### (1) 研究開発領域名

LCAに基づく生産と消費管理

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

グローバル化した現代経済の複雑なサプライチェーンのもと、生産・消費活動は、直接・間接に数多くの環境影響を引き起こしている。環境影響軽減を実現する有効な戦略の同定が求められている。そこでは、ある環境影響から別の環境影響への単なる負担変位 (burden shifting) を回避しなくてはならない。そのためには、資源採掘から廃棄に至る製品ライフサイクル全般にわたって生じるすべての環境影響を定量的に考慮することが必要である。この目的に資するのが製品の全ライフサイクルに関わる環境影響を定量的に評価するLCA (Life Cycle Assessment) である。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

LCAは国際標準化 (ISO 14000シリーズ) された唯一の環境影響評価手法であり、全世界において共通の環境影響評価手法として公部門・民間部門における意思決定において広く採用されている<sup>1,2)</sup>。LCAは製品 (サービスを含む) がその全ライフサイクル (資源採掘、生産、流通、使用、廃棄・リサイクル) を通じて発生する環境負荷因子と資源消費、およびその環境・健康・資源枯渇への影響を定量的に評価する<sup>3)</sup>。現在のLCAの基礎を築いたのは1969年の米国における清涼飲料に関わる研究にある。その後の普及を経て1991年に不適切なLCAの乱用に対する批判に対応する形でISO国際標準化が行われた<sup>4)</sup>。LCAの枠組みに関わるISO 14040では、LCAを①目的設定、②調査範囲 (負荷因子・資源・システム境界・機能単位) 設定、③インベントリ分析 (Life cycle inventory analysis)、④影響評価 (Life cycle impact assessment)、⑤解釈、の段階からなる規定している。評価する製品システムの機能を定量化したものが機能単位である (例えば、排気量2,000 ccの自動車がある走行条件の下、10年で10万km走行)。機能単位がシステム境界内で発生させる環境負荷因子・資源消費量 (例えば、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、銅鉱石) を同定するのがインベントリ分析である。これに必要なデータ整備と計算手法もインベントリ分析に含まれる。影響評価は、インベントリ分析結果を科学的知見から得られた特性化係数 (characterization factor) を用いて地球温暖化、オゾン層破壊、酸性化、光化学オキシダント、生体毒性などの「インパクトカテゴリ (midpointとも呼ばれる、これに対して因果関係の最終段階、例えば皮膚がんはendpointである)」に変換し、影響を評価する。LCAを実施する際に中心をなすのがインベントリ分析と影響評価である。インベントリ分析では、従来から用いられている積み上げ法 (process-based LCA) と並んで、産業連関分析を併用した方法 (hybrid-LCA) が用いられている。

LCAの典型的な用途は特定の製品システムについての環境負荷評価と負荷低減方法の同定であったが、近年、応用範囲は多様化し広範になっている<sup>2,5)</sup>。まずあげられるのが、単一因子に限定したLCAである。CO<sub>2</sub>に限定したカーボンフットプリント (ISO 14067)、水消費に限定したウォーターフットプリント (ISO 14046) が具体例である。従来の製品LCAを拡張したものとして、企業など組織のLCAに関わるScope 3-type LCA (ISO

TS14072) があげられる。Scope 3基準は、米国の環境シンクタンクである世界資源研究所 (WRI : World Resources Institute) と、持続可能な発展を目指す企業連合体である持続可能な開発のための世界経済人会議 (WBCSD : World Business Council for Sustainable Development) が共催するマルチステークホルダー方式のパートナーシップである「GHGプロトコル」が、開発および発行主体となっている。調査対象を環境負荷以外にまで拡張したものとして、製品ライフサイクルに関わる全費用を推計するライフサイクル費用分析<sup>6)</sup>、社会的影響 (労働条件など) を評価対象とした社会LCA (SLCA : Social LCA)<sup>7,8)</sup>、および、製品システムの環境影響を製品システムがもつ価値との比較で評価するEco-efficiency (ISO 14045) があげられる。また、LCAによる定量的製品環境負荷データを宣言・公開するものとしてタイプIII環境ラベル (ISO 14025) がある。

LCAの政策への応用は、特に欧州で進んでいる。EU委員会電気製品指令はLCAで得られた知見に依拠しているが、使用段階が最大の環境影響をもつと同定されたことから、電気製品はエネルギーラベルをもつことが義務付けられている (European Parliament and Council, “Directive 2005/32/EC Energy-using Products” (2005))。廃棄物管理における意思決定へのLCAの応用としては、古典的な廃棄物序列 (削減>再使用>リサイクル>エネルギー回収>埋め立て) からの逸脱が妥当とされる場合を同定するためにLCAが必要とされている (“Directive 2005/32/EC Energy-using Products” (2005))。LCAがエネルギー部門における政策決定に大きく貢献した例としてバイオ燃料をあげることができる。バイオ燃料は、一時、化石燃料よりも無条件に環境負荷が低いと認識されていたが、LCA研究<sup>9)</sup> が逆の場合があることを示した。これを契機に、スイス政府は、廃棄物由来でないすべてのバイオ燃料について、税制優遇措置を得るためにその化石燃料に対する環境的優位性をLCAで示す必要がある、との法制化を行った (Federal Department of the Environment Transport Energy and Communications, regulation 641.611.21 (2009))。

米国においても、LCAが環境保護庁 (EPA) の政策・規制決定において使用されている。例として、Energy Independence and Security Act of 2007 (EISA) が、再生可能燃料としての適合性審査においてライフサイクル温室効果ガス排出削減量評価を求めていることがあげられる<sup>10)</sup>。

こうした背景の下、欧州ではLCA研究・応用に携わる人材の層が厚く、雇用の機会に恵まれていることから関連大学院も充実している。ベルリン工科大学 (TU Berlin)、スイス連邦工科大学 (ETH)、ノルウェー工科大学 (NTNU)、ライデン大学環境科学センター (CML)、スウェーデン王立工科大学 (KTH)、デンマーク工科大学 (DTU)、リーズ大学などが例である。LCAの今日の国際的普及に貢献したISO化においてはSETAC-Europe (Society of Environmental Toxicology and Chemistry-Europe) が中心的な役割を果たしてきた。さらに、欧州委員会がもつ研究機関であるEU Joint Research Center (JRC) がEuropean Platform on Life Cycle Assessment (EPLCA) を創設し、データベース整備、マニュアル作成などを行っている。層の厚い人材を生み出し、SETAC・JRC主催会議で発表される研究成果がやがてISO規格となり、それがまたLCAに関わる人材の層を厚くするという好循環を実現している。

日本は、LCAにおける国際会議Ecobalanceを20年前から隔年で主催し、国主導でデー

データベースを整備するという他に例を見ない取り組みも行った。民間企業でのLCA応用は盛んである。しかし、欧州と大きく異なり、公部門の各種政策にLCAを反映することは廃棄物政策を含んで行われてこなかった。物質的な対象物の開発を目的としないLCAでは、国際的に影響のある論文作成が極めて重要である。Scopusを用いた分析(※1)によるとトップ100論文に日本から入るのは、東京大学平尾雅彦教授(44位)、工学院大学稲葉敦教授(65位)、東京都市大学(産総研)伊坪徳宏教授(78位)であった。国別論文数では、米国が圧倒し、日本はスペイン、イタリア、英国、スウェーデン、ドイツ、オランダ、スイス、フランス、中国、デンマークに続く12位であった。フランス・中国とは僅差であるが、近年における中国の躍進は著しい。

一方、全体的な論文数でははるかに小規模であるものの、産業連関分析を用いたインベントリ分析(hybrid-LCA)においては、日本は米国、中国、ノルウェー、英国に次ぐ5位であり、中国以下とは僅差である(※2)。日本から10位以内に入っているのは、早稲田大学中村慎一郎教授(8位)と早稲田大学近藤康之教授(10位)である。日本がこの分野において強みをもつのは、米国と並んで世界最高水準の産業連関データが整備されていることが大きくかかわっている。関連する動向として環境省が環境分野分析用産業連関表の作成に着手したことは、注目に値する<sup>11)</sup>。

欧州のような公的部門での応用がないことから、LCA専門家の雇用機会は限られ、人材育成について欧州のような好循環を実現することができていない。LCAの国内専門学会として2004年に創設された日本LCA学会は、数年来、会員400名前後で推移している。学生会員の大半は卒業と同時に退会しているのが実情である。上記の主要大学でも特に博士課程においてLCA関連分野を専攻する学生は減少傾向にある。

LCAは評価技術であり、新素材・新製品などの物質的な対象物を開発するものではない。一方、進行する温暖化や人口増加の下、企業・組織に、今後、ますます厳格な環境対応が求められていく事は確実である。環境対応の評価に関わるのがLCAであるので、その国際規格の動向は、企業・組織活動の方向性を大きく左右する可能性をもつ。したがって、国際規格を単に受け入れていくのではなく、その決定プロセスにも能動的に関与していくことが、日本企業の「規格リスク」を回避するために必要である。そのためには、学理的なLCA研究において世界をリードする先端的研究を推進することが求められる。公的部門の政策決定におけるLCAの採用は大きな契機となるだろう。

(※1) 検索式: TITLE-ABS-KEY("LCA") AND (LIMIT-TO(DOCTYPE,"ar") AND (LIMIT-TO(LANGUAGE,"English")) [2014年8月検索時(以下同様)]

(※2) 検索式: TITLE-ABS-KEY("LCA" and "hybrid") AND LANGUAGE(english) AND (LIMIT-TO(SRCTYPE,"j"))

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック(科学技術的課題、政策的課題)

- ・データ整備: LCAの普及および上で述べたその対象領域の拡張に伴い、より高い精度をもったデータベースの整備と公開が求められている。精度の向上(不確実性の低減)には地域性の反映が必要である(例えば電力構成)<sup>12)</sup>。その一方で国際貿易を通じた全球的な相互依存性の考慮も求められている<sup>13)</sup>。この相反する要請(精度の向上と対象の拡大)を両立しつつ、ますます多様化する要請に応じたデータベースの整備・維

持は大きな課題である。

- ・反発効果 (Rebound effects) : 家電製品の省エネ化は他の条件を一定とすれば家計のエネルギー関連支出を軽減する。この軽減分がどのように支出されるかによって、当初の省エネ効果は打ち消されてしまう可能性がある。例えば、電気代が低下したので、その分、空調の使用時間を長くする場合である。これを反発効果という<sup>14)</sup>。換言すれば、反発効果とは「他の条件にして一定」が成り立たない場合でもある。これは下記のConsequential LCAとも関連することであるが、機能単位に関するより現実的なシナリオを作成することが求められよう。
- ・Consequential LCA (CLCA) : 省エネ機器が普及すると経済全体でエネルギー需要が減るから、供給条件が変わらないとすればエネルギー価格が低下し、それは経済全体で市場メカニズムを通じて広範な効果、例えば技術・製品代替、をもつ可能性がある。この市場メカニズムを通じた広範な効果をも考慮しようとするのがCLCAであり、これを考慮しない従来のLCA (Attributional LCA) と区別される。”市場メカニズムを通じた広範な効果を考慮する”ことは概念上は理解できることである。しかし、それを透明性をもって定量モデル化することは最大の課題である<sup>15)</sup>。
- ・社会LCA (SLCA) : 必要性は広く共有されているが、データベース・方法論の双方において未解決の課題が多い<sup>8)</sup>。
- ・関連科学コミュニティとの連携 : インパクト評価は最新の科学的知見を反映することが求められるが、LCAコミュニティの中のみでこれを行うには限界があるし、非効率的である。より専門化し規模も大きな研究コミュニティ (例えば、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) や世界保健機関 (WHO)) との連携を進めるべきである<sup>12)</sup>。
- ・日本における政策的課題 : 環境政策において欧州のようにLCAが活用されていない。欧州のような研究と応用の好循環を実現するには、手始めに公部門の関与が大きい廃棄物政策からLCAを活用することが望まれる。

#### (5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・マテリアルフロー分析 (MFA : Material Flow Analysis) との連携 : 一国の消費者全体や都市全体など巨大な規模をもつ対象を機能単位として設定する場合が増えている<sup>13, 16)</sup>。この場合、その規模ゆえに、従来の製品LCAのような「他の条件にして一定」を仮定することは妥当でなく、システム全体のマスバランスとの整合性を考慮する必要性が生じる<sup>17, 18)</sup>。例えば、ある副産物・廃棄物について大規模なリサイクルを想定したとして、実際にそれだけの量が調達できるかということである。システム全体のマスバランスを考慮するのがMFAである。MFA分野の研究では、日本はLCAをはるかに上回る国際競争力をもっている。Scopusによれば (※3)、日本の論文数は米国に次ぐ2位、10位以内の研究機関に3機関 (東京大学、国立環境研究所、東北大学) が入り、10位以内の著者に4名の日本人が入っている (醍醐市朗准教授・松野泰也准教授 (東京大学)、中島謙一主任研究員 (国立環境研究所)、長坂徹也教授 (東北大学))。LCAとMFAを融合した新領域における日本の貢献が大いに期待される。
- ・国際貿易に体化された全球的環境フットプリント研究 : 国際貿易を通じた全球的投入・産出相互依存関係を高い解像度の下で定量化した大規模な産業関連データ (多地域間

産業関連モデル、MRIO : Multi-regional Input-Output Model) がEU (EXIOPOL, CREEA, WIOD) と豪州 (Eora) を中心とした大規模プロジェクトで開発されている 19-22)。特に、Eoraグループは国際貿易と生物多様性の関連を初めて定量化した 23)。

(※3) 検索式 : TITLE-ABS-KEY("material flow analysis") AND ( LIMIT-TO(DOC-TYPE,"ar") ) AND ( LIMIT-TO(LANGUAGE,"English") )

(6) キーワード

ISO 14000シリーズ、インベントリ分析、インパクト評価、インパクトカテゴリ、ライフサイクル費用、eco-efficiency、積み上げ法LCA、ハイブリッドLCA、産業関連分析、カーボンフットプリント、ウォーターフットプリント、Scope 3-type LCA、規格リスク、マテリアルフロー分析 (MFA)

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>水消費に関わるインパクト影響研究では国際的に注目される成果を生んでいる 24)。それ以外のインパクトカテゴリについては近年特に見当たらない。大学院水準の若手の育成に先細り感がある。</li> <li>Hybird-LCAの方法論研究とそれをさらに空間的に拡張した多地域分析 (MRIO) では世界水準にある (国別論文数5位、Scopusによる)。インパクト同様に大学院水準の若手の育成に先細り感がある。研究者層が薄いため、論文生産数が限定される。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hybird-LCAとそれをさらに空間的に拡張した他地域分析 (MRIO) の応用では世界水準にある (Scopusによる)。大学院水準の若手の育成に先細り感がある。</li> <li>国立環境研究所によってHybird-LCAに準じた産業関連表による環境負荷原単位データベース (3EID : Embodied Energy and Emission Intensity Data for Japan Using Input-Output Tables) が整備・維持され、公開されている。</li> <li>民間企業での応用は盛んであるが、インパクトカテゴリの範囲が狭く、多くの場合に地球温暖化効果に限定されている。英語を母国語としない欧州諸国と比べ、英語での発信が少ない。</li> <li>公共部門での応用は参考にとどまり、政策に反映されることがない。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>LCA関連国際規格の動向には注目しているが、自ら発信・提案することが少ない。規格が議論されるSETAC-WGなどへの参画が低水準にある。</li> <li>国内向け応用ソフトは各種開発されているが、国際的な展開には至っていない。</li> <li>民間企業が国立環境研究所の開発した3EIDデータベースをその製品群に特化して解像度を上げ、国内向けに日本語のみで公開している。</li> <li>インベントリデータベース開発は、一時、官主導のもと、民間の協力で行われたが、その後の維持・更新が課題となっている。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>国別論文数でその他を圧倒している (Scopus)。特にインパクト評価に強みをもつ 25, 26)。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>民間企業のみでなく、環境保護庁 (EPA) の政策決定にもLCAが活用されている 10, 27)。</li> </ul>

	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>各種企業団体がインベントリデータベースを作成している。</li> <li>連邦政府機関がインベントリデータベースを作成している<sup>28)</sup>。</li> <li>EPAがソフトウェアを作成している。</li> <li>国立標準技術研究所（NIST）が建築系LCAソフトを公開<sup>29)</sup>。</li> <li>Scope IIIを提唱。</li> <li>カーネギーメロン大学がHybrid LCAに基づくweb上でのLCA計算サービスを無料で提供している<sup>30)</sup>。日本の国立環境研究所が提供している3EIDが大気汚染物質と温室効果ガスに重きを置いているのに比べ、水消費、土地利用、毒性物質放出（TRI：Toxics Release Inventory）まで網羅している。</li> <li>EPEAT（Electronic Products Environmental Assessment Tools）global rating system for greener electronicsの省エネ評価（EEBC：The Electronics Environmental Benefits Calculator）でLCAを使用。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>地域別論文数では米国を圧倒している。</li> <li>EU委員会の研究機関JRCやSETACを中心にインパクト・インベントリ両分野で層の厚い研究が行われている。その中で、ISO規格につながる多くの規格を提唱している。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>民間企業のみでなくEU・国レベルにおいて公部門での政策決定にLCAが多く活用されている<sup>5)</sup>。</li> </ul>
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>国際的に広く使われているデータベース（ECOINVENT）・ソフトウェア（SimaPro、Gabiなど）を開発・販売している。</li> </ul>
中国	基礎研究	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>論文数を急速に増やしている（国別10位、Scopusによる）。それを担っているのは主に欧米に留学して大学院教育を受けた人々である。</li> <li>国際的に注目される研究を生み出すには至っていないが、米欧日の成果を吸収して急速に発展しつつある<sup>31)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>論文数を急速に増やしている。それを担っているのは主に欧米に留学して大学院教育を受けた人々である。</li> <li>中国の環境影響に対する国際的関心が高まっていることを反映した事例研究が多い。</li> </ul>
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>いまだ途上にある。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>国際的に注目される研究を生み出すには至っていない。国別論文数で23位、量的に日本より一桁小さい（Scopus）。</li> <li>社会LCAに関する検討が公的機関で開始されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>国別論文数で23位、量的に日本より一桁小さい（Scopus）。</li> <li>国際的に注目される研究を生み出すには至っていない<sup>32)</sup>。</li> </ul>
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>国主導（KNPCP：Korea National Cleaner Production Center）でLCAインベントリデータベースを整備<sup>33)</sup>。</li> <li>各種ソフトウェアが開発されている。</li> <li>カーボンフットプリント実施で日本より先行（2009-）<sup>34)</sup>。</li> </ul>

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) Finkbeiner, M.; Inaba, A.; Tan, R.; Christiansen, K. & Klüppel, H.-Jü. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044 The international journal of life cycle assessment, 2006, 11, 80-85
- 2) Finkbeiner, M. From the 40s to the 70s—the future of LCA in the ISO 14000 family The International Journal of Life Cycle Assessment, 2013, 1-4
- 3) Joint Research Center, European Platform on Life Cycle Assessment, <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/>
- 4) EPA: Life Cycle Assessment: Principles and Practice, EPA/600/R-06/060, [http://www.epa.gov/nrmrl/std/lca/pdfs/chapter1\\_frontmatter\\_lca101.pdf](http://www.epa.gov/nrmrl/std/lca/pdfs/chapter1_frontmatter_lca101.pdf)
- 5) Hellweg, S. and Canals, L. M. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment, Science, 2014, 344, 1109-1113
- 6) Hunkeler, D. and Lichtenvort, K. and Rebitzer, G. (Eds.) Environmental Life Cycle Costing CRC Press, 2006
- 7) Benoît C, M. B. (Ed.) Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products UNEP, 2009
- 8) Jørgensen, A. Social LCA—a way ahead? The International Journal of Life Cycle Assessment, 2013, 18, 296-299
- 9) Scharlemann J. P. W. and Laurance, W. F., How Green Are Biofuels, Science 319, 43-44 (2008)
- 10) EPA Lifecycle Analysis of Greenhouse Gas Emissions from Renewable Fuels, <http://www.epa.gov/otaq/renewablefuels/420f10006.pdf>
- 11) 環境省. 環境分野分析用産業連関表の作成に向けて. 2013. <http://www.env.go.jp/doc/toukei/contents/pdfdata/201312.pdf>
- 12) Huijbregts, M.: A critical view on scientific consensus building in life cycle impact assessment The International Journal of Life Cycle Assessment, Springer, 2014, 19, 477-479
- 13) Hertwich E & Peters G, Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-Linked Analysis, Environ. Sci. Technol., 2009, 43, 6414-6420
- 14) Hertwich, E. G. Consumption and the rebound effect: an industrial ecology perspective J. Ind. Ecol., Wiley Online Library, 2005, 9, 85-98
- 15) Zamagni, A.; Guinée, J.; Heijungs, R.; Masoni, P. & Raggi, A. Lights and shadows in consequential LCA The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 17, 904-918
- 16) 加藤 博和 柴原 尚希: 都市・社会資本・交通を対象としたライフサイクルアセスメント研究の現状と課題, 第33回土木計画学研究・講演集, 2006
- 17) Nakamura, S.; Kondo, Y.; Kagawa, S.; Matsubae, K.; Nakajima, K. & Nagaska, T. MaTrace: Tracing the fate of materials over time and across products in open-loop recycling Environmental Science & Technology, ACS Publications, 2014

- 18) Seigné-Itoiz, E.; Gasol, C. M.; Rieradevall, J. & Gabarrell, X. Environmental consequences of recycling aluminum old scrap in a global market Resources, Conservation and Recycling, Elsevier, 2014
- 19) The Eora MRIO Database. <http://worldmrio.com>.
- 20) CREEA. <http://creea.eu/> EXIOBASE. <http://www.exiobase.eu/>
- 21) World Input-Output Database. <http://www.wiod.org>
- 22) EXIOPOL. <http://www.feem-project.net/exiopol/>
- 23) Lenzen, M.; Moran, D.; Kanemoto, K.; Foran, B.; Lobefaro, L. & Geschke, A. International trade drives biodiversity threats in developing nations, Nature, 2012, 486, 109-112
- 24) Motoshita, M.; Itsubo, N. & Inaba, A. Development of impact factors on damage to health by infectious diseases caused by domestic water scarcity The International Journal of Life Cycle Assessment, 2011, 16, 65-73
- 25) Bare, J.; Gloria, T. & Norris, G. Development of the method and US normalization database for life cycle impact assessment and sustainability metrics Environmental Science & Technology, 2006, 40, 5108-5115
- 26) Lautier, A.; Rosenbaum, R. K.; Margni, M.; Bare, J.; Roy, P.-O. & Deschênes, L. Development of normalization factors for Canada and the United States and comparison with European factors, Science of the Total Environment, 2010, 409, 33-42
- 27) EPA. Life-Cycle Assessment. <http://www.epa.gov/sustainability/analytics/life-cycle.htm>
- 28) National Renewable Energy Laboratory (NREL) . U.S. Life Cycle Inventory Database. <http://www.nrel.gov/lci/>
- 29) NIST. BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability) . <http://www.nist.gov/el/economics/BEESSoftware.cfm>
- 30) Carnegie Mellon University. EIO-LCA. <http://www.eiolca.net/>
- 31) Nie, Z.-r.; Gao, F.; Gong, X.-z.; Wang, Z.-h. & Zuo, T.-y. Recent progress and application of materials life cycle assessment in China Progress in Natural Science: Materials International, 2011, 21, 1-11
- 32) KITECH: Korean social LCA method as a tool for evaluating product sustainability, 2013  
[http://www.ciraig.org/pdf/event/ACVs2013/session%203/May6\\_16h55\\_Dong-hoo\\_Kim.pdf](http://www.ciraig.org/pdf/event/ACVs2013/session%203/May6_16h55_Dong-hoo_Kim.pdf)
- 33) KNCPC. LCI DATABASE. <http://www.kncpc.re.kr/eng/topics/Lci.asp>
- 34) Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) . Carbon Footprint Labeling Activities in KOREA. [http://www.ftis.org.tw/active/download/1\\_6.pdf](http://www.ftis.org.tw/active/download/1_6.pdf)
- 35) EPA. LCA resources. <http://www.epa.gov/nrmrl/std/lca/resources.html#Software>

### 3.4.3.4 廃棄物の発生抑制

#### (1) 研究開発領域名

廃棄物の発生抑制

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

廃棄物の発生抑制を推進するための研究であり、開発領域は、1. 発生抑制対象の設定・効果推定、2. 促進メカニズムの設計、3. 発生抑制に資する要素技術・システムの開発、4. モニタリングと評価改善など、広範囲にわたる。特に食品廃棄物の削減が注目されている。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

廃棄物の発生抑制は、廃棄物対策においてリサイクル（再生利用）や熱回収などよりも優先すべきとされているが、その実施状況は遅れている。日本の第三次循環型社会形成推進基本計画（2013年閣議決定）において2R（Reduce=発生抑制、Reuse=再使用）重視が打ち出されたことや、EUでの2008年改正廃棄物枠組み指令2008/98/ECにおいて加盟各国に対し2013年までに廃棄物発生抑制プログラムの策定を義務づけたことなど<sup>2)</sup>、発生抑制の取り組みを加速する動きがみられる。

発生抑制は、廃棄物になってからの対策ではなく、廃棄物になる前にとる対策である。このため、廃棄物となる前の製品やサービスの企画・設計・製造・流通・使用・消費段階にまで、その対策は及ぶ。電子書籍サービスによる紙の代替、製品の長寿命化設計、製造工程での収率の向上、容器包装の薄肉化・軽量化、発注精度の向上（売れ残り廃棄品の削減）、適切な修理・メンテナンスによる長期使用、食べきり・使い切りなどは、いずれも廃棄物の発生抑制対策である。廃棄物の発生抑制が指し示す範囲は、日本と欧州・OECDとで多少異なる。日本では発生抑制は、再使用（リユース）を含まない概念とされているが、EUの廃棄物枠組み指令や、OECDの定義では、発生抑制（Waste prevention）に、リユースも含む<sup>3)</sup>。（ただし、EUにおいては、廃棄物ではないものをリユースする行為と、いったん廃棄物となったものに手を加えてリユースする行為は区別され、後者はPreparing for re-useとして、発生抑制には含まない。）また、EU、OECDの定義では、量的な抑制だけでなく、質的な抑制（有害性の抑制）も発生抑制概念に含む<sup>3)</sup>。

発生抑制の対象となる廃棄物としては、食品廃棄物（流通ロス、食べ残し）や容器包装、使い捨て商品（紙おむつ、ホテルの歯ブラシ）、紙ごみ（ジャンクメール）など削減可能と判断しやすいものが、しばしばあげられる。また、家電製品、電池など有害性が懸念されるものもしばしば対象となる。特に食品廃棄物に関しては、国際連合食糧農業機関（FAO）が世界生産の1/3にあたる約13億tの食料が毎年廃棄されていることや食品廃棄物にかかる経済的コストが7,500億ドルにのぼると指摘したこと<sup>4,5)</sup>、EUの欧州議会が2025年までに食品廃棄物を半減する目標を設定したこと、日本の食品リサイクル法において業種別の発生抑制目標が設定されたこと<sup>6)</sup>など、各国で注目され、取り組みが進められている。

#### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

2R研究に求められる役割としては、以下がある<sup>7, 8)</sup>。

1. 2R促進対象候補の設定と効果推定・優先順位付け
  - ・ 発生抑制可能量の見積もり
  - ・ 2R行動の受容可能性の調査
  - ・ 2Rに関するLCA研究
2. 促進メカニズムの設計
  - ・ 促進施策の設計
  - ・ 促進施策事例のデータベース化
  - ・ 消費者の2R行動要因の分析
  - ・ サプライチェーンにおける関係者の利害得失分析
  - ・ 事業者に対する経済的インセンティブ付与の制度設計
  - ・ 社会実験による仮説検証、知見獲得
3. 発生抑制に資する要素技術、製品、システムの開発
  - ・ 食品のロングライフ化
  - ・ 容器包装の薄肉化、軽量化
  - ・ 製造プロセスにおける収率の向上
  - ・ 製品の小型化・長寿命化
  - ・ 販売量予測の高精度化（過大発注による売れ残り削減）
  - ・ インフラの集約・コンパクトシティ化
4. モニタリングと評価・改善
  - ・ モニタリング指標の設定
  - ・ 計測手法の開発
  - ・ 指標の計測・施策効果の事後検証

1. について、発生抑制可能量の網羅的な推定が欧州や日本ですでになされており<sup>9)</sup>、2Rに関するLCA研究<sup>10, 11)</sup>も近年増えつつある。今後は、推定の精度を高めることや内訳を明らかにすることが必要である。例えば、日本における食品ロス（本来食べられるにもかかわらず廃棄されている食品）の発生量推定値は、食品事業者300～400万t/年、家庭200～300万t/年の合計500～800万t/年と、不確実性が高い<sup>6)</sup>。

2. の促進メカニズムの設計については、消費者・事業者の双方を対象として、今後の研究の充実が期待される。

消費者行動の心理学モデル研究によると、リサイクル行動においては社会規範評価（周囲からのプレッシャー、同調圧力）の影響が強いのに対し、発生抑制行動においては廃棄物の発生を抑制するべきであるとの個人的規範や利他的価値観の影響が強いことが指摘されている<sup>12, 13)</sup>。社会実験などにより、これらの知見をさらに発展させ、多岐にわたる発生抑制行動のそれぞれに適した介入方策を解明していくことが期待される。

事業者の発生抑制の促進方策としては、拡大生産者責任の適用による発生抑制への経済的インセンティブの付与や、サプライチェーンの関係者間の協議による商慣習の見直

し<sup>14)</sup>などがある。拡大生産者責任とは、製品が廃棄物となった際に、その処理・リサイクルの責任を製造者が負う制度である。

3. の要素技術開発は関連する各分野において研究開発を進めることが期待される。

4. について、発生抑制量は直接には測定できず、何らかのベースラインを設定し、そこからの変化を測定することとなり、種々の方法が提案されている<sup>15-17)</sup>。施策効果を把握可能な精度をもった計測手法の開発が望まれる。

#### (5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

##### <食品廃棄物>

- ・ 英国Love Food Hate Wasteキャンペーン: 非営利組織WRAP (Waste and Resources Action Programme) が2007年より開始した食品廃棄物削減に関する消費者対象の啓発キャンペーン<sup>18)</sup>。可食部の廃棄を21%削減するなど、大きな効果を上げている<sup>19)</sup>。
- ・ 食品関係事業者による商慣習の見直し: 日本国内における食品流通業界では、食品の製造日から賞味期限までを3分割し、納品期限を1/3まで、販売期限は2/3までとする1/3ルールが慣行となっている。これを緩和する協議が関係者で進められ、社会実験の結果廃棄量削減効果が確認されている<sup>14)</sup>。

##### <容器包装>

- ・ 減装 (へらそう) ショッピング: 容器包装の少ない商品をNPOごみじゃぱん (神戸大学石川雅紀教授代表) が選定し、店頭でのPOPなどにより推奨する取り組み<sup>20)</sup>。推奨商品の売り上げ増、メーカーによる減装商品の開発などの成果を上げている。

#### (6) キーワード

Waste prevention、2R、食品ロス、フードバンク、商慣習、サプライチェーン、拡大生産者責任、有料化、社会実験、発生抑制の計測・モニタリング手法、取組事例集

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	・[Δ] 特に目立つ研究はない。
	応用研究・開発	○	↑	・[↑] 環境省環境研究総合推進費にて「食品ロス削減に向けた社会経済システムの分析に関する研究」を研究開発テーマに設定。
	産業化	○	↑	・[○] 容器包装の薄肉化・軽量化の進展（ただし限界に近づきつつある）。 ・[○] レジ袋辞退率の向上。 ・[↑] 第三次循環型社会形成推進基本計画での2R重視の明示。 ・[↑] フードバンク団体の増加。 ・[∨] リユース瓶の衰退。
米国	基礎研究	△	→	・[Δ] 特に目立つ研究はない。
	応用研究・開発	○	→	・[○] 発生抑制のLCAへの組み込みについて先導的な研究がなされている（カナダ） <sup>10)</sup> 。
	産業化	×	→	・[×] 廃棄物の発生抑制について政府目標の設定などが無い。 ・[○] フードバンク団体の活発な活動。食中毒などに対する事業者の責任免除の体制の整備 <sup>21)</sup> 。
欧州	基礎研究	○	→	・[○] 発生抑制の計測手法 <sup>15-17)</sup> や消費者の行動要因モデル <sup>12)</sup> について先導的な研究がある。
	応用研究・開発	○	↑	・[↑] 2012年から2016年にかけてFUSIONS（Food Use for Social Innovation by Optimising Waste Prevention Strategies）プロジェクトによる研究推進がされている。
	産業化	○	↑	・[○] 2014年を「ヨーロッパ反食品廃棄物年」と位置づけ、期限表示と包装の適正化、フードバンク活動の優遇の啓発を行っている。 ・[↑] 改正廃棄物枠組指令での各国の発生抑制プログラム策定により、今後進展が期待される。
中国	基礎研究	—	—	・特筆する動きはみられない。
	応用研究・開発	—	—	・特筆する動きはみられない。
	産業化	—	—	・特筆する動きはみられない。
韓国	基礎研究	—	—	・特筆する動きはみられない。
	応用研究・開発	—	—	・特筆する動きはみられない。
	産業化	○	∨	・早くから使い捨て商品の禁止法を制定し、先行していたが、その後の進展はあまりない。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、∨：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) 環境省. (2013). 第三次循環型社会形成推進基本計画.  
[http://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku/keikaku\\_3.pdf](http://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku/keikaku_3.pdf)
- 2) European Commission DG Environment (2008). Analysis of the evolution of waste reduction and the scope of waste prevention. Framework contract ENV . G . 4 / FRA / 2008 / 0112.
- 3) 田崎智宏, 渡辺浩平. (2011). 海外における廃棄物発生抑制・リユースの取り組み. 廃棄物資源循環学会誌, 22(4), 272-278.
- 4) FAO. (2011). Global food losses and food waste - Extent, causes and prevention-
- 5) FAO. (2014). Food Wastage Footprint: Full cost accounting.
- 6) 長野麻子. (2014). 食品リサイクルをめぐる現状と課題-食品ロス削減を通じた経済成長への貢献-. 廃棄物資源循環学会誌, 25(1), 5-12.
- 7) 山川肇, 橋本征二, 田崎智宏, 藤井実. (2011). 2R研究の現状と課題 -2R効果指標の可能性-. 廃棄物資源循環学会誌, 22(4), 300-307.
- 8) European Commission (2012). Preparing a Waste Prevention Programme Guidance document.
- 9) 大森恵子. (2011). リデュース・リユース (2R) の推進に向けた政策の動向について. 廃棄物資源循環学会誌, 22(4), 263-271.
- 10) Cleary, J. (2014). A life cycle assessment of residential waste management and prevention. The International Journal of Life Cycle Assessment, 19(9), 1607-1622.
- 11) 新保雄太, 中谷隼, 栗栖聖, 花木啓祐. (2012). 家庭における廃棄物発生抑制行動のライフサイクル評価. 環境科学会誌, 25(2), 95-105.
- 12) Cecere, G., Mancinelli, S., and Mazzanti, M. (2014). Waste prevention and social preferences: the role of intrinsic and extrinsic motivations. Ecological Economics, 107, 163-176.
- 13) 前田洋枝, 広瀬幸雄, 河合智也. (2012). 廃棄物発生抑制行動の心理学的規定因. 環境科学会誌, 25(2), 87-94.
- 14) バイオマス資源総合利用推進協議会. (2014). 平成25年度食品廃棄物対策環境整備 商慣習等の改善による食品廃棄物等の発生抑制の推進 報告書 (p. 68).
- 15) Sharp, V., Giorgi, S., and Wilson, D. C. (2010). Methods to monitor and evaluate household waste prevention. Waste Management & Research, 28(3), 269-80.
- 16) Zorpas, A. and Lasaridi, K. (2013). Measuring waste prevention. Waste Management, 33(5), 1047-56.
- 17) Bräutigam, K.-R., Jörissen, J., and Priefer, C. (2014). The extent of food waste generation across EU-27: Different calculation methods and the reliability of their results. Waste Management & Research, 32(8), 683-694.
- 18) Love Food Hate Waste. <http://www.lovefoodhatewaste.com>
- 19) WRAP. (2013). Final Report on Household Food and Drink Waste in the United Kingdom 2012.
- 20) NPO法人ごみじゃぱん. <http://gomi-jp.jimdo.com/活動紹介/減装商品/>
- 21) Schneider, F. (2013). Review of food waste prevention on an international level. Waste and Resource Management, 166(4), 187-203.

### 3.4.3.5 リサイクル技術（都市鉱山含む）

#### （1）研究開発領域名

リサイクル技術（都市鉱山含む）

#### （2）研究開発領域の簡潔な説明

レアメタルや貴金属などのリサイクル技術の研究であり、研究例は極めて多い。多くの場合には、金属製錬の分野で用いられてきた湿式処理技術が適用されるが、高温処理（塩化揮発法、熔融塩電解）やバイオ技術が用いられる例も増えている。日本は資源のリサイクルやレアメタルのリサイクルの研究と実操業の分野で世界の最先端の技術をもっている。世界のリサイクル技術をリードし、世界のリサイクル産業に貢献している。

#### （3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

都市に大量に廃棄される使用済み家電製品や電子機器などには、貴金属やレアメタルなどの金属資源が多く含まれており、これらは都市生活の中に埋もれた鉱山に例えて「都市鉱山」と呼ばれる。日本には金属の高度な選鉱・製錬技術があり、これを用いて使用済み製品から金属を回収リサイクルすれば、都市は金属を産み出す鉱山となる。鉱物資源に乏しい日本にあって、都市鉱山が注目され、物質・材料研究機構の試算によると我が国の都市鉱山は世界有数の資源国に匹敵する。しかし、これらの都市鉱山では、一製品当たりの含有量が微量であったり、素材と混合されていたりするため、技術的およびコスト的に鉱物資源の抽出が容易ではない。また、数多くの製品が市中に散在しているため、製品回収コストが高くつくことも、資源回収が進まない理由の一つとなっている<sup>1)</sup>。その結果、有用金属を含んだ製品が廃棄されたり、海外に流出していたりするのが現状である。これらの問題解決には、有用金属を効率的に抽出・分離する技術の開発や使用済み製品または有用金属を含む部品の効率的な回収網の整備が不可欠である。技術のブレークスルーや考え方のブレークスルーが必要となるであろう。

リサイクルの対象となる二次資源は、リチウムイオン電池、ネオジム磁石、自動車排ガス浄化触媒、石油脱硫触媒、無電解ニッケルめっき廃液、超硬工具廃棄物、携帯電話、プリント基板、熱電対などに含まれる貴金属類などである。これらの二次資源は、人工的に作られた廃棄物資源であり、総称して都市鉱山と呼ぶことがある<sup>2)</sup>。

日本は世界需要の約2割を占めるレアメタルの消費大国である。レアメタルを備蓄し集中的に管理する国家備蓄倉庫が茨城県の工業団地に3万7,000 m<sup>2</sup>の敷地面積で存在し、7種の鉱種が保管されている。国家備蓄対象鉱種と定められているのは、Ni、Cr、W、Co、Mo、Mn、Vの7種類のレアメタルである。国家備蓄制度は石油危機に刺激されて1983年に創設されたもので、国内消費量の60日分を目途に国が7割、民間が3割の割合で備蓄している。上にリサイクル対象の例をあげた二次資源は国家備蓄対象となるものである<sup>3)</sup>。

リサイクルに使われる処理技術、すなわち分離・回収技術には、これまでに選鉱製錬の分野で用いられてきた技術が応用できる。これらの技術に加えてバイオリーチングや磁気アルキメデスの原理の適用などの新しい技術が使われる。

研究例が多く、必要性の高いものは、自動車産業と関連するリチウムイオン電池やネオジム磁石（Fe70%、Nd、Pr、Dy、Tbなどの希土類元素30%、B 1%の組成）や自動車

排ガス浄化触媒 (Pt、Pd、Rhの三元触媒) である。ネオジム磁石のリサイクルはすでに大手企業3社でリサイクルが実施されている。処理法は主に湿式処理であり、高温で消磁後に粉碎・酸溶解・水産物沈殿による除鉄・溶媒抽出法による希土類分離である。酸溶解の工程でバイオリーチングを適用する試みがある。ネオジム磁石は、①組成が変わらない、②多量に発生する、③将来にわたって発生する、というリサイクルに適した条件を満たしている点で処理しやすい二次資源である<sup>2)</sup>。

リチウムイオン電池は、携帯電話やパソコンの電源として利用され、現在は電気自動車やハイブリッド自動車の動力源として利用されている。処理技術には焼成・粉碎・ふるい上産物とふるい下産物に分粒・ふるい下産物の湿式処理が適用される。正極剤に用いられるLiCoO<sub>2</sub>が回収対象であったが、正極剤はLi(Co<sub>1/3</sub>Ni<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>)O<sub>2</sub>やLiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>やLiFePO<sub>4</sub>のような安価な材料に変化している。上記のリサイクルの条件を満たさない二次資源であり、今後どのような処理技術を適用するのかは大きな問題である。技術のブレークスルーが必要とされる。電池関連で、ハイブリッド自動車の動力源として用いられている電池にニッケル水素電池がある。ある自動車会社は使用済みニッケル水素電池を分離・回収して元のニッケル水素電池に戻そうとする試みをもっている。一方で、これまで通りステンレス原料に回す考え方もある。

Pt、Pd、Rhの貴金属は、そのほとんどが自動車排ガス浄化触媒として利用される。貴金属は溶銅中に分配 (溶解) しやすい性質があるので、ハニカム状のコーゼライト (2MgO・2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・5SiO<sub>2</sub>) にコートされた3元素は高温下で銅中に溶解回収される。銅を酸化して貴金属と分離した後に貴金属は溶媒抽出法、分別沈殿法などを利用して分離・回収される<sup>2)</sup>。

石油脱硫触媒は、アルミナ担体に二硫化モリブデンとコバルトを担持させた触媒で、これによって石油中のイオウ成分を水素化脱硫するものである。脱硫過程で石油中のイオウが硫化水素として除去されるとともに、石油中のバナジウムやニッケルが触媒に吸着して触媒はその効果を失う。これが廃触媒で、モリブデンやバナジウムは酸化焙焼後に水酸化ナトリウム溶液で溶解された後に、モリブデン酸アンモニウム、バナジン酸として回収される。希薄な液では陰イオン交換樹脂による吸着・溶離を経て回収される。問題点はニッケルやコバルトが未溶解残渣として残り、回収対象になっていないことである<sup>4, 5)</sup>。

無電解ニッケルめっき廃液は、ハードディスク製造でアルミ円板に無電解でニッケルめっきを行った後に記憶媒体をのせてハードディスクを製造する工程で生じる。伝導性のない物質にめっきすることができるという特徴をもつ。ニッケルイオンは液中で次亜リン酸によって還元されてメッキ被膜となる。ハードディスク使用量はパソコンの生産量の増加に伴って、増加の一途をたどっている。ニッケルは高価なレアメタルの一つで国家備蓄対象成分である。分離技術には、溶媒抽出法が用いられる。ニッケルの分離・回収だけでなく、次亜リン酸の有効利用 (肥料または農薬) も図るべきである。環境調和型リサイクル技術からゼロエミッション型のリサイクル技術への転換も大事なブレークスルーである。協同効果という現象を利用した溶媒抽出法で1回の抽出操作でめっき廃液からそのままニッケルを98%の割合で抽出可能である。抽残液には次亜リン酸が酸化されて亜リン酸として残っている。ここからナトリウムを除去すると、肥料または農

業への利用が可能になる。

都市鉱山ビジネスは日本が資源を一方的に「使う」だけの国ではなく、資源を「つくる」面でも強みを発揮できる国であることを私たちに教えてくれる。天然資源は資源国で「採れる」ものであり、「つくる」より「使う」ものというイメージが強い。しかし、科学技術の発展に伴い、地下にあった金属資源が地上に所在を変えて、日本は巨大な都市鉱山を抱える「地上の資源国」となっている。さらに、レアメタルの消費大国であると同時に、実は世界に冠たるレアメタルの生産大国でもある。鉱石を製錬して純度の高いレアメタルを取り出す技術で日本は世界最高水準であり、この技術力があるからこそ、都市鉱山から資源を創り出すことができるのである。

金属資源はエネルギー資源と違って、消費するものではなく使用するものであり、かなりのものはどこかに形を変えて残っている。この意味では、日本は資源国である<sup>3-5)</sup>。

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

超硬工具や蛍光灯やリチウムイオン電池のような難処理廃棄物が増加している。これらの二次資源をリサイクルして再利用できるようにするには、何らかのブレイクスルーが必要である。例えば、蛍光灯の蛍光体であれば $Y^{3+}$ と $Eu^{3+}$ の酸化物および $La^{3+}$ 、 $Ce^{3+}$ と $Tb^{3+}$ のリン酸塩で構成される。希土類の分離には蛍光体を溶解する必要がある。 $Y^{3+}$ と $Eu^{3+}$ の酸化物は硫酸で溶解できるが、 $La^{3+}$ 、 $Ce^{3+}$ と $Tb^{3+}$ のリン酸塩は簡単には溶解しない。遊星ボールミルによるメカノケミカル処理によって水溶性の希土類水酸化物に変換するなどの必要がある。この例のように、何らかの工夫によって技術的に処理できるものであると考えられる。国の研究予算ではリサイクルという分野が減りつつあるが、都市鉱山開発のために今後もリサイクル研究・実用化試験を継続する必要がある。

#### (5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

リサイクルに適用できそうな新しい分離技術として、次のような研究がある。

- ・レアメタルを選別・回収できるバイオ技術—ア—ミング微生物— (京都大学)
- ・金属回収素材としてのコケ植物原糸体 (理化学研究所)
- ・金属イオン還元細菌による貴金属・レアメタルの分離 (大坂府立大学)
- ・磁気アルキメデス法による希土類の分離 (大阪大学)
- ・連続向流泡沫分離法によるGaの分離濃縮 (名古屋大学)

これらは新技術と考えてよいものであろう。バイオ関連技術が多いが、この分野に研究費が多く投資されていることと関係していると思われる。資源を持たない我が国にあってリサイクルの重要性は極めて高いので、バイオ技術にかたよらない国の予算上の配慮が重要である。

#### (6) キーワード

レアメタル、国家備蓄元素、分離技術、リチウムイオン電池、ネオジム磁石、廃触媒、都市鉱山

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・リサイクル関係の基礎研究は極めて多く行われており、世界の最先端にある。
	応用研究・開発	◎	↑	・家電リサイクルにより解体業者にてエアコン・冷蔵庫・洗濯機などのモーターから、また自動車リサイクルによりハイブリッド自動車駆動モーターのネオジウム磁石を回収し、磁石から希土類を分離している。リチウムイオン電池などの他の二次資源については処理技術が確立されつつある。
	産業化	◎	↑	・ネオジウム磁石やリチウムイオン電池などの二次資源について多くの実施例がみられる。
米国	基礎研究	○	→	・リサイクル関係の基礎研究は行われており、米国鉱物金属材料学会（TMS）には廃棄物減容化（リサイクル）の委員会がある。
	応用研究・開発	△	→	・リサイクルの応用研究はあまり進んでいない。回収業者が各社に競合させ、回収・販売している。最終的に日本・中国・ベトナムでリサイクル処理される。
	産業化	×	→	・廃棄物は最終的に日本・中国・ベトナムへ輸出されるので、産業化は十分に進展していない。
欧州	基礎研究	○	→	・リサイクル関係の基礎研究は行われているが、活発ではない。
	応用研究・開発	△	→	・磁石メーカーにて発生した研磨粉・固形屑や電池などの二次資源は中国・ベトナムへ販売され、中国やベトナムで処理される。
	産業化	×	→	・廃棄物は日本・中国・ベトナムなどへ輸出されるので、リサイクルの産業化は十分でない。
中国	基礎研究	◎	↑	・リサイクル関係の基礎研究は極めて多く行われており、日本の技術と競合するほどに活発である。
	応用研究・開発	◎	↑	・中国国内および海外からの輸入回収品は分別され、質のよい磁石や二次資源は加工して一部リユースされる。残りは中国の精錬メーカーへ販売され、中国でリサイクルされる。
	産業化	◎	↑	・種々の二次資源について多くの実施例がみられるが、環境対策が十分ではない。
韓国	基礎研究	○	→	・リサイクル関係の基礎研究はよく行われている。
	応用研究・開発	△	→	・回収業者が各社に競合させ、リサイクル原料を回収している。最終的に日本・中国・ベトナムへ輸出して、処理される。
	産業化	×	↓	・二次資源は日本・中国・ベトナムなどへ輸出されるので、リサイクルの産業化は十分ではない。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) 南條道夫：都市鉱山開発—包括的資源観によるリサイクルシステムの位置付け、東北大学選鉱製錬研究所彙報、第43巻、第2号、239-251頁 (1988年)
- 2) 田中幹也：レアメタルのリサイクル、化学と教育、59巻、10号、520-523頁 (2011年)
- 3) 西村山治ら：レアメタルと再資源化の可能性、環境資源工学、第61巻、第2号、83-89頁 (2014年)
- 4) 経済産業省：レアメタルのリサイクルに係る現状 (産業構造審議会 第15回廃棄物・リサイクル小委員会資料) (2011年)  
[http://www.meti.go.jp/committee/summary/0003198/015\\_04\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/summary/0003198/015_04_00.pdf)
- 5) 経済産業省：レアメタルリサイクルについて (産業構造審議会・中央環境審議会合同会合 中間とりまとめの概要) (2012年)  
[http://www.meti.go.jp/committee/summary/0003198/pdf/report01\\_01\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/summary/0003198/pdf/report01_01_00.pdf)

### 3.4.3.6 水の循環利用技術

#### (1) 研究開発領域名

水の循環利用技術

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

水のリサイクルは、さまざまに使われた水に何らかの処理を行い、再び同じあるいは別の用途に利用する行為である。再生水を製造する原水、利用用途とも極めて多様である。ここでは、都市で発生する廃水に焦点を当て、特に下水処理水を原水として、処理を行うことで製造される再生水にスコープを当てる。本領域は、再生水の製造に限らず、リスクマネジメント、水の輸送を含む再生水のエネルギーなど広範囲な研究開発項目が含まれる。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

再生水は、トイレや散水などの非飲用の都市利用、農業利用、工業利用、レクリエーションや環境維持用水、さらに飲料用水に至るまでの多様な用途に世界で使われている<sup>1,2,3)</sup>。この用途ごとにどのような水質を確保すればよいのかが研究開発の一つの焦点である。これに併せて、下水の処理方法による原水の水質も多様であり、再利用用途も広範囲であることから、再生水製造も下水処理そのものから工学的再生水処理、さらに自然による浄化までを含め、さまざまな処理技術がある。再生水に関する研究開発は以下のように分類できる。

1. 水の再利用の計画論
2. 再生水の用途開発と実践
3. 再生水製造技術
4. リスク管理と消費エネルギー論

##### 1. 水の再利用の計画論（再生水利用の必要性和安全性の確保の技術）

水資源の枯渇、水質汚濁、洪水、地下水の汚染や低下など、多くの水をめぐる問題から、世界人口が90億人を超える21世紀半ばには、水は石油に代わる最重要問題になると予測されている。世界的には都市の人口増加、産業開発、灌漑農業の拡大により水需要が増大し続け、水資源不足がより深刻化している。さらに淡水資源は、不適切な排水管理によっても脅かされており、水資源の枯渇に拍車をかけている。これらの課題に対処するためには、新たに水資源を開発し、適正な水使用を図る必要がある。水利用の改善、水資源の拡大には、多くの方法があるが、循環型社会を目指した方法に再構築されなければならない。中でも下水処理水の再利用技術は、環境、経済面からますます重要となっている。

下水処理水の再利用には多くの利点がある<sup>1)</sup>。都市活動がある限り、都市はさまざまな水源から水供給がなされるため、都市から出される排水量は干ばつの影響をあまり受けない。再生水は量的質的に安定した水資源である。適切に処理された再生水は、水質に応じた水の使用、いわゆるカスケード利用を行うため、淡水水資源の節約、環境への放流を行うための下水処理の負担の軽減を図ることが可能である。また、再生水には窒

素やリンなどの栄養素が含まれており、特に農業資源としての利用が可能である。下水処理水の再利用により、環境への水の排出量を減らし、汚染物質の環境への負荷を軽減できる。大規模な水資源開発による環境破壊、河川流量減少による希釈容量の低下、大量水使用により発生する排水からの汚染負荷は大きなものとなるので、下水処理水の再利用は、水資源の保全と同時に環境破壊や環境汚染という環境管理面から非常に重要な意味をもつ。さらに、利用目的に応じた水質レベルで処理して再利用することは、環境規制が厳しい地域では環境へ放流するための下水処理エネルギーを節約し、コストを抑制できることにもなる。水資源が不十分な地域では、遠隔地から水を輸送するためのエネルギーは膨大なものになるので、これまでの水システムに比べて、近くの水資源を用いることによって輸送のエネルギーを小さくできる。

しかし、下水にはさまざまな化学物質や病原性微生物が含まれているため、適切な水質管理がなされていない下水処理水の再利用は、人の健康にリスクをもたらす。微生物による感染リスクは、適切な再利用の処理と消毒、利用用途の選択や維持管理によって、健康へのリスクを許容可能なレベルにマネジメントできる。また、下水処理水に含まれる重金属などの規制項目以外に、内分泌かく乱化学物質や医薬品など毒性情報が十分明らかでない化学物質が存在することが報告されている。このような化学物質による人への直接的あるいは食物を介した間接的な影響、さらに灌漑利用や環境用水など開放型利用では、地下水、土壌や水生生物への環境影響なども考慮した適切な処理と利用方法が必要である。

## 2. 再生水の用途開発と実践 (広がる再生水の利用範囲)

再生水の適用用途は広範囲に及ぶ。我が国では、1984年非飲用の都市用水としてトイレ用水利用が新宿副都心で始まり、このほか非飲用の都市用水である洗浄用水、散水用水、修景用水、環境用水、農業用水、工業用水、融雪用水の範囲に広がっている<sup>4)</sup>。中国、韓国でも同様に、非飲用を目的とした再利用が行われている。一方、米国では、カリフォルニア州を中心に一般市民が接触するレクリエーション利用、農作物灌漑、非飲用の都市用水利用が行われてきたが、このほか間接的飲用 (IPR: Indirect Potable Reuse) を目的として再生水の地下水涵養がカリフォルニア州で1960年代から始まり、アリゾナ州、フロリダ州、テキサス州へと広がってきた<sup>1, 2)</sup>。2013年からは、テキサス州で水道への直接供給を行う再生水事業が始まり、ロサンゼルスなどでも大規模な直接的飲用利用 (DPR: Direct Potable Reuse) が検討されている。直接的飲用利用は1968年から始まった南アフリカのナミビアに次ぐ事業であるが、改めて世界的な関心を集めている。欧州では、農業利用を目的としたスペインなど南欧が中心であったが、欧州委員会は2012年公開した「Water Blueprint」<sup>5)</sup>の中で、欧州の環境保全に再生水は重要で、経済成長の基礎になるとする水の基本政策を出している。英国、ベルギーでも水資源の逼迫から河川水や地下水を介した間接的再利用が2000年代から行われ始め、さらに広がりがみられる。このほか、マレーシアから水を輸入しているシンガポールでも、間接的飲用を目的とした再利用が2002年から始まった。水の不足に悩まされているオーストラリアでは、1999年にアデレードで大規模な農業利用が始まり、2012年からはパースで地下水を経由した間接再利用の実証実験が始まり、2015年に実施段階に移行する予定である<sup>2)</sup>。

中東では、イスラエルが20世紀初めから下水の農業利用を行ってきており<sup>6)</sup>、近年点滴灌漑装置に代表される再生水の輸送、利用段階の技術に長けている。

このように、多様な用途ごとに必要となる再生水の水質レベルは異なり、また再生処理し、輸送するのに許容されるエネルギーやコストも、既存水資源との競争性は地域によって異なる。したがって再生水に関する技術体系も歴史的、地域的に多様である。

### 3. 再生水製造技術

再生水製造技術は極めて多様な組み合わせがあるが、一般には下水の一次処理である沈殿処理、二次処理である生物処理、それに続く高度処理、さらには工学的な自然浄化に分けられる。

再利用用途によってどの汚染物質をどの程度除去する必要があるかは異なる。病原微生物は、原虫、細菌、ウイルスによってサイズ、消毒耐性、感染性が異なる。また化学物質も硝酸性窒素、総溶解性蒸発残留物 (TDS: Total Dissolved Solids)、ホウ素、臭素酸や過塩素酸、重金属、消毒副生物、微量化学物質などで再生水製造の単位操作の機能が異なる。

再生水製造の単位操作の選択に当たっては、原水がどのようなレベルであるのか、つまり二次処理が標準活性汚泥法レベルか、ラグーンや酸化池などそれよりも低い処理レベルか、あるいは窒素・リン除去が行われるような高度な生物処理か、あるいはさらに膜分離活性汚泥法 (MBR: Membrane BioReactor) のような高い処理水質なのかという点がまず重要となる。我が国でMBRが開発されたが、国内での適用は浄化槽を中心とした範囲に限られてきた。ようやく2000年代に入って下水道での利用が始まり、近年、国でも積極的にMBRの研究開発が推進されている<sup>7)</sup>。特にエネルギー削減とファウリング防止を中心に研究が進められている。また、後述するようにMBRの国際規格を我が国が先導して作成する動きが出ていることは望ましい傾向である。再生水利用の視点からは、MBRによって細菌や原虫の高い除去率が期待でき、ウイルス類も高い除去が期待できるが、ウイルスを含めて内分泌かく乱物質や医薬品類などのリスク要因の除去可能レベルは十分明らかではない。このため、再利用用途での従来下水道処理法と比べた場合の優位性、後段での処理の改善性をさらに研究する必要がある。

また、二次処理水に続く高度処理についても、凝集、ろ過、活性炭吸着、精密ろ過膜 (MF: Microfiltration) / 限外ろ過膜 (UF: Ultrafiltration) やナノろ過膜 (NF: Nanofiltration) / 逆浸透膜 (RO: Reverse Osmosis) といった膜ろ過などの物理処理、クロラミン、塩素、オゾン、UV、促進酸化処理 (AOP: Advanced Oxidation Process) といった化学処理、生物活性炭などの生物処理などさまざまな選択肢がある。特に飲用利用を目的とした再利用では、ROなどの膜技術がその中心となってきているが、それでも除去ができない化学物質の削減にAOPを追加する例が多い。さらに、土壌帯水層処理 (SAT: Soil Aquifer Treatment)、Riverbank filtration、直接地下水注入、帯水層貯留・回収 (ASR: Aquifer Storage and Recovery)、湿地浄化、貯留池などの自然浄化システムを単独、あるいはさまざまに組み合わせた再生水製造システムも選択できる。これらの組み合わせはどのようなものがよいのかは、必要となるエネルギー、コスト、土地利用状況、地下水管理などの視点からも異なり、技術的なシステム最適化はまだ十分

ではない。

#### 4. リスク管理と消費エネルギー論

再生水をどの水質レベルにするためにどのような単位操作を組み合わせるべきかが課題になるが、基本的に水質改善とそれに要するエネルギー、コストはトレードオフの関係にある。再生水の水質基準は、1978年に定められたカリフォルニア州コードTitle22<sup>8, 9, 10)</sup>が有名であり、この規格では必要とする水質レベルを非飲用用途によって分類しただけでなく、再生水製造に必要な処理プロセスをも定めたものである。病原微生物は、大腸菌群数での基準が定められているが、不特定の市民が接触する用途については、ウイルスの再生水過程での除去率として5.2-Logを満足できる処理プロセスが定められており、代替方法についてもこの規格を満たすことを求めている。米国の連邦政府は、環境保護庁(EPA)が再生水のガイドライン<sup>2)</sup>を作成しているが、実際の規制は各州が定めた再生水の基準に基づいており、多くは大腸菌、大腸菌群を指標として使われている。日本では、国土交通省が、トイレ用水、散水用水、親水用水、修景用水に用途を定めており、快適性、大腸菌あるいは大腸菌群を指標とした再生水基準値、それを達成するための処理要件を一部定めている。中国、韓国についても、同様に都市や農業の用途ごとに再生水の水質が定められている。欧州では、EUとして定められた水質規格はなく、各国で基準値は異なっており、統一した再生水の規格はまだ作られていない。欧州委員会は、このことが再生水を農業利用して生産した農作物の流通の障害になりうるとして、EUでの再生水基準の必要性を述べている<sup>5)</sup>。注目されるのがオーストラリアであり、連邦政府の飲料水、レクリエーション、再生水についてガイドラインがリスク評価をもとに定められている<sup>11)</sup>。

国際規格としては、農業灌漑用に2006年に世界保健機構(WHO)が再利用基準の改定時にリスクアセスメントを一部入れて基準化した<sup>12)</sup>が、処理だけでなく、灌漑段階、収穫・流通段階、調理・利用段階での利用法を考慮したマルチプルバリアの考え方が導入されている。国際規格ISOは2011年、TC253として農業利用分野がイスラエル主導でスタートしたが、2013年改めて水の再利用全体をカバーする規格としてTC282が設置され、農業利用をイスラエル、都市利用を中国、そして日本がリスクと機能評価を幹事国として担当するスキームで進んでいる。特に、日本は、ISOの水分野では初めての幹事国となっており、MBRの規格とともに、HACCP(Hazard Analysis Critical Control Point)に基づいたリスク評価による再生水の水質基準の考え方を提案する予定である。この考え方に基づいて、必要な再生水の製造段階で削減すべき、病原微生物や化学物質のレベルを求めることができる。また再生水プロセスで注目すべき概念は、除去機能の信頼性であり、必要となる除去レベルをどの程度の確率で担保することができるのかという概念である。除去効果が平均的には高くても、除去率の変動が起こる信頼性が低いプロセスは、安全性の視点から問題となるため、処理過程の評価方法として重要な概念となる。

再生水を利用するためにエネルギーがどのくらい必要なのか、他の水源と比べてどの程度なのかが大きな課題である。世界各地でどのような原水からどのような再生水用途の水質レベルをどの程度のエネルギー消費で生み出せるのかは、ケースバイケースの現地実験などで行われている。日本においても再生水の製造のためにどの程度必要なのか

が研究されるようになり、処理システム開発の目標ともなってきた。

しかしながら、再生水に必要なエネルギーは、再生水製造段階だけではなく、どの規模でどの範囲に再生水を送るのか、ネットワークも含めて検討を行う必要がある。近年、オーストラリアや米国カリフォルニア州では、新たな水の再利用計画が、これまでの水資源の消費エネルギーと比べどの程度有利なのか検討が行われている。日本ではこれまで再生水での消費エネルギーについての検討はほとんど行われて来なかったが、最近、国土交通省は、再生水施設での単位水量当たりの消費エネルギーは、プロジェクトごとに大きな相違があり、再生水の単位水量当たりの平均エネルギー消費量は全国の水道水の単位水量当たりのエネルギーよりも数倍大きいことを明らかにしている。再生水の製造とともに輸送に関わる再生水エネルギーを含めた評価を行い、再生水の利用計画に反映させることが必要である。

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

世界的には、水資源が不足している地域を中心に、再生水の利用は急速に拡大し、非飲用利用のみならず、飲用利用にまで進み始めている。これらのプロジェクトでは、水資源、水環境、さらにエネルギー管理、低炭素化への政策との連携がみられる。我が国では、再生水の製造を担う、膜、酸化処理、吸着などの単位操作の基礎技術を有しているが、再生水をシステムとして計画、実施、運営する体制は、極めて貧弱である。この理由として、再生水のプロジェクトが、これまで限られた都市でしか行われておらず、再生水を水資源の安定供給や水環境管理、さらにエネルギー節減や低炭素化に役立てるといふ政策立案が遅れてきたことが理由の一つと考えられる。しかし、2014年に入って水循環基本法の成立や水資源政策、下水道政策の転換<sup>13, 14, 15)</sup>などが国レベルでみられ、今後の政策運営の進展を期待したい。

また再生水の水質基準は各国ごとに大きく異なり、その根拠は、経験的あるいは測定可能性の視点からであったが、1990年代に特に病原微生物リスクを定量的に評価する定量的微生物リスク評価 (QMRA: Quantitative Microbial Risk Assessment) が定着してから、用途ごとにどの程度削減すべきか、その水準を満たすためにどのような処理レベルが必要であるかが、まとまり始めている。しかしながら、一般市民へのリスクをどのように説明し、合意を得るのかりスクコミュニケーションが極めて重要となり始めている。

2012年、全米研究評議会 (NRC)<sup>16)</sup> は、水の再利用の推進についての連邦議会からの諮問に対して、人の健康、社会、環境問題に関する面と、再生水の処理機能と品質確保の面から研究開発すべき課題を提案している。まず人の健康、社会、環境問題に関する面からは、次の7つをあげている。

1. 下水処理水が混入する水源で、事実上 (de facto) 飲用利用されているレベルを定量化し、計画的な再生水の利用との相違がどの程度であるかを認識すること
2. 再生水に残留する成分に人が曝露される場合の健康影響に関する知見の不足点を明確にすること
3. 再生水に複合して存在する化学物質や現在未知の物質 (unknown unknowns) による人の健康影響を評価する方法の開発を進めること

4. 水系感染症サーベイ、調査方法、行政機構、疫学的研究方法や機能を強化すること
5. 再生水を環境用水として使う場合に鋭敏な生態系への影響を評価すること
6. 水管理の意思決定を行うために、再生水以外の水資源と比べた場合の再生水の費用や利便性を定量化すること
7. 再生水の飲用利用において、環境による緩衝作用と工学的なマルチプルバリアに対する市民の受容性を研究すること

一方、再生水の処理機構と品質確認については次の7つの点をあげている。

1. 環境での緩衝作用としての汚染物質の減衰についての理解を深めること
2. 残留している物質が再生水の処理過程で有害物質に変化する可能性をさらに理解し、その変化を抑制し、除去する方法を開発すること
3. さまざまな単位操作やマルチプルバリアでの病原微生物の除去率の変動性やその機構の理解を進め、これらのプロセスを最適化すること
4. 再生水の病原微生物をPCRにより検出する方法とその生残性との関係を定量化すること
5. 水の再利用をリスク評価し、危機やシステムの障害の発生を検出するための技術やデータを改良すること
6. 再利用シナリオごとにプロセスの機能をモニタリングに利用できるインディケータやサロゲートを見出し、測定するためのオンラインでリアルタイムに近い分析監視技術を開発すること
7. 将来の水管理に備え、新たな再利用のアプローチや技術のニーズを解析すること

#### （5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

まず注視される動向は、これまで各国によって考え方が不統一で、また経験やモニタリングの容易性から定められていた再生水の水質レベルを、リスク評価法を適用し、再生水製造段階として必要となる汚染物質の除去レベルを決定するための国際規格ISO/TC282を我が国が幹事国として主導することが2013年に決まったことである。同時に、再生水での汚染物質の除去レベルを確保するために必要な水再生機能の評価方法も我が国が主導することとなった。特に、我が国ではMBRの開発と国内外への展開を進めることに産業界は大きな期待を抱いているため、国際規格を主導できることは、我が国の水関連の産業界に大きなビジネスチャンスを与える可能性がある。

再利用におけるエネルギー評価は、これまで単位プロセスを中心として行われてきたが、輸送から再生水製造、配水までを含め、どの程度必要で、他の代替水資源と比べてどのような利点、欠点を有しているのか、さらに環境影響、温暖化対策の視点からもどのように評価されるのかといった総合化が進んできている。この分野は我が国では極めて遅れているため、海外での再生水をビジネス展開するためには、この分野の研究開発を強化する必要がある。

日本、中国、韓国の東アジア諸国は、非飲用の再利用用途を中心に展開してきたのに対して、米国や欧州、オーストラリアやシンガポールなどでは、非飲用利用に加えて、計画的な飲用利用の再生水事業も展開してきた。特に、2013年から米国テキサス州ビッ

グスプリングで始まった直接的飲用利用 (DPR) の事業は大いに注目される。地下水や土壌、さらに表流水の貯留や希釈といった環境バッファと比べ、RO膜とAOPなどの工学的バリアを多重化することで信頼性の向上が期待できること、エネルギーやコスト評価においても、間接的飲用利用 (IPR) よりも優れる場合があることなどが、このような DPR展開に大きく寄与していると思われる。我が国ではこれまで飲用利用を意図した研究開発はほとんど行われてこなかったが、今後、海外展開や我が国でも離島などの水資源開発を考えるとこの分野の研究開発を推進する必要がある。

(6) キーワード

直接的飲用利用 (DPR)、間接的飲用利用 (IPR)、非飲用利用、リスク評価、エネルギー評価、国際標準規格、膜処理技術、膜分離活性汚泥法、オゾン処理、紫外線消毒、促進酸化処理 (AOP)、病原微生物、化学物質、マルチプルバリア

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>膜技術、MBR用のMFのほか、分離膜としてのUF、さらに海水淡水化から始まったRO、NFの技術開発を、メーカー、大学が独自にあるいは連携して進めている。日本が有利である膜技術はRO、セラミック膜であるが、新たな膜材料の開発とともに、ファウリングの原因物質追求が大学を中心に進められている。またオゾン酸化処理の研究も多い。</li> <li>JST-CREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究領域<sup>17)</sup>で、水の再利用の推進を目的に、膜技術の開発、酸化処理と膜の組み合わせ技術、再生水安全評価、再生水システム開発が複数の研究チームで実施中。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>2009年国土交通省の日本版次世代MBR技術展開プロジェクト (A-JUMP)<sup>7)</sup>により下水道へのMBRの適用の実証実験が行われた。</li> <li>2009～2013年度まで新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 省水型・環境調和型水循環プロジェクト<sup>18)</sup>で海水淡水化と下水再利用を統合した省エネルギー型造水プラントの実証試験を実施した。</li> <li>2009～2013年まで最先端研究開発支援プログラム (FIRST)<sup>19)</sup>で膜技術による海水淡水化とともにMBRとFOの組み合わせ技術開発を推進した。</li> <li>経済産業省予算による造水促進センターなどを通じたISO/TC282の標準化に対応したMBRなどの実証調査が2014年からスタートした。</li> </ul>
	産業化	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>工場での回収率は80%を超え、下水処理場外での再利用も311施設に及ぶが、水量的には全国の下水処理水量の1.3%にとどまっている。</li> <li>国土交通省は2005年「下水処理水の再利用水質基準等マニュアル」の改訂、2010年北東アジア標準協力フォーラム「都市における再生水利用に関する北東アジア協力会議 (通称RWUUA会議)」による日中韓3国の主導での下水再生水質管理の国際規格作りを推進している。また2013年、日本、中国、イスラエルが幹事国となる水の再利用の国際標準ISO/TC282がスタートし、日本は、水の安全性と処理機能の評価について世界を先導することとなった。</li> </ul>
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>1970年代からカリフォルニア州、環境保護庁 (EPA)、内務省開墾局 (USBR) などが大学、コンサルタントと連携し、RO膜による再生水処理技術、病原体や微量化学物質のモニタリング技術が研究されてきた。1990年代からリスク評価技術が研究され、再利用の処理レベル評価にもカリフォルニア州などで実施された。しかし、近年、大学などでの基礎研究は減少しているとの情報がある。</li> </ul>

	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1960年代からカリフォルニア州を中心に非飲用の再生水の実証規模の研究が行われた。</li> <li>・カリフォルニア州など西部の公共団体が再利用プロジェクトを行うため、コンサルタントを中心に実証実験が行われている。</li> <li>・またカリフォルニア州など西部の州では、州、公共団体など、大学、コンサルタントやメーカーと連携してDPRの研究が積極的に行われている。</li> </ul>
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水資源が不足し、排出基準の厳しいカリフォルニア州、アリゾナ州、フロリダ州などを中心に、畑地灌漑用、環境水利用、工業用水、都市用水を中心に事業が進められてきた。</li> <li>・カリフォルニア州オレンジ郡、ロサンゼルス、南カリフォルニア、サンディエゴ、マイアミ、アリゾナ州スコッツデール、フロリダ州オーランド、マイアミ、テキサス州サンアントニオ、イーストフォークロー、バージニア州で、地下水、表流水、貯水池を介したIPRが進んでいる。</li> <li>・2013年からテキサス州ビッグスプリングでDPRが始まった。</li> <li>・農業利用は数多く行われているが、カリフォルニア州では再生水の60%が農業利用されており、モンレー郡での生食野菜などを対象とした例が有名である。</li> <li>・工業用にはミネソタ州マンケートで発電冷却用水、フロリダ州パーク郡マルベリーで冷却用水に使われている。</li> <li>・カリフォルニア州コードTitle22再生水規格がこれまで先導している。</li> </ul>
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ドイツ、英国、フランス、オランダなど多くのEUの国々でMBRの研究が行われている。</li> <li>・ドイツの大学を中心にし尿分離、雑用水利用の研究が行われている。地下水での微量化学物質への影響評価を目的に地下水での下水由来の微量化学物質の動態の研究が行われている。</li> <li>・フランスなどでは膜のほかオゾンによる再利用の研究が進められている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・英国テムズ・ウォーター社は、ロンドンでの将来の水資源確保のため、IPRのための実証規模の実験を行っている。</li> <li>・フランスでは、中東、アジア、アフリカでの再利用プロジェクトを意識した応用研究が水メジャーを中心に進められている。</li> </ul>
	産業化	○ 場所によっては△ ×	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・IPRは英国Langford、ベルギーWulpenで表流水、地下水を介して行われている。</li> <li>・農業利用は、フランスのClermont-Ferrand、ギリシャCreta、Thetealonik、Chalkidaなどの地域、イタリアEmila Romagnaで行われ、スペインでは下水処理水の22%が農業利用され、Canary諸島では、電気透析プロセスによる再生水を果樹に灌漑利用する試験が行われている。キプロスでは下水処理水が農業水需要の11%を満たす予定。</li> <li>・英国東アングリア Flag Fen で工業用水利用されている。</li> <li>・英国水道産業研究所 (UKWIR) から再生水の都市での利用について積極的な提案が出ている。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大学、国の研究機関で、再生水の評価、MBR、膜、酸化技術の開発が進んでいる。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・第12次五カ年計画での再生水利用の目標を達成するため、事業の実施主体である公共団体が、水務集団、大学、メーカーなどと連携してMBR、膜処理、酸化技術などを組み合わせた実証規模での研究を行っていると思われる。</li> </ul>
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2009年現在、再生水生産量は1,238万m<sup>3</sup>/日で水利用の8%は再生水が利用されており、第12次五カ年計画では、水資源賦存量が600 m<sup>3</sup>/人/年の地域では再利用率を30%以上、1,500 m<sup>3</sup>/人/年の地域でも20%を目標とするため、304億元の投資を行い、新たに2,589万m<sup>3</sup>/日の再生水供給能力とし、水利用の15%を再生水利用する予定である。</li> <li>・北京市Beixiaheo処理場ではMBR+ROで処理された再生水がオリンピック公園で修景利用されている。北京市高碑店下水処理場では50万m<sup>3</sup>/日以上が工業用水と農業用水に供給されている。</li> <li>・中央政府は再利用水の都市雑用水、修景用水、地下水涵養、工業用水、農地への基準値を定めている。</li> </ul>

韓国	基礎研究	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>科学技術研究所 (KIST) でナノテクノロジーを利用した再生水技術の基礎研究が行われている。また、大学レベルではMBRや膜処理による水処理技術の開発、ファウリング防止の研究が行われてきた。微量化学物質の挙動調査が最近始まった。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>国立環境研究院 (NIER) で雑排水の再利用の研究が進められている。</li> <li>2013~2022年までの環境技術開発のロードマップ (Eco-TRM2022) を定め、エネルギー効率の高い下水高度処理開発に18,740億ウォンを10年間で投資する計画を立てている。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>全国で2000年に下水処理水再生水は下水処理水量の2.9%の再利用率にとどまっていたが2008年には10.8%に増加した。利用用途は56%が場内利用、30%が河川水量、8.5%が農業利用、2.1%が工業利用である。</li> <li>雑用水利用は全国で271施設、発生する雑用水の26%が使われていて、トイレ用水が42.4%、工業用が24.1%、散水用に14.4%が使われている。</li> <li>雑用水や下水処理水を含めて全国の8.8億m<sup>3</sup>/年 (2008) の利用を25.4億m<sup>3</sup>/年 (2020) に引き上げる計画を立てている。</li> </ul>
オーストラリア	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>大学、連邦科学産業研究機構 (CSIRO) などで、膜処理技術、地下水涵養、微量化学物質など再生水技術やリスク評価などが行われている。また、水の再利用のエネルギー面からの評価研究が盛んである。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>上下水道を管理運営している公共団体を中心に、コンサルタント、メーカー、大学などと連携して再利用計画、実験を行っている。</li> <li>クイーンズランド州ブリスベンでは、再生水の飲料利用を目指して膜処理の研究が進められていたが、濁水状況が緩和したことや市民の合意の問題から、プロジェクトの実施が止まっている。</li> <li>パースでは2012年から地下水を介したIPRが実証実験されている。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>上下水道を管理運営している公共団体が、都市、農業での非飲用利用を中心に行ってきた。南オーストラリアのバージニアなど再生水の30%が農業利用に使われている。</li> <li>水資源の需給がひっ迫している西オーストラリアでは地下水涵養によるIPRが行われる予定である。</li> <li>シドニーでは、下水道からの下水を自ら直接取水してMBRで建物内の雑用水やゴルフ場の散水を民間レベルで行う Sewer Mining が実施されている。</li> <li>連邦環境・水・遺産・文化省が、飲用水利用、地下水涵養など再利用のガイドラインを、リスク評価に基づいて病原微生物、化学物質のガイドライン値とマネジメント法を定めている。</li> </ul>
シンガポール	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>大学を中心に膜処理、酸化処理、病原微生物、化学物質のモニタリングと影響評価が行われている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>国の上下水道の実施機関である公共事業局 (PUB) が国内外の大学や企業と連携して、MBR、膜処理、酸化技術、モニタリング、影響評価に関する研究を活発に行い、エネルギー削減に関する研究を進めている。</li> </ul>
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>NEWater (下水再生水、414千m<sup>3</sup>/日) として貯水池を介したIPRが行われているほか、工業利用も行われている。</li> </ul>

## (註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

## (註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

## (註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) T. Asano, F.L. Burton, H.Leverenz, R. Tsuchihashi, G. Tchobanoglous, Water Reuse, Issues, Technologies, and Applications, McGrawHill, 2007.
- 2) USEPA, Guideline for Water Reuse, Office of Water & Office of Wastewater Management, USEPA, 2012.
- 3) UK Water Industry Research, Establishing a Robust Case for Final Effluent Reuse -An Evidence Base, UKWIR Report ref. No.14/WR/29/3, 2014.
- 4) 国土交通省、新たな社会的意義を踏まえた再生水利用の促進に向けて、下水処理水の再利用のあり方を考える懇談会報告書、2009、  
<http://www.mlit.go.jp/common/000037487.pdf>
- 5) European Commission, A blueprint to safeguard to Europe's water resources, 2012,  
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012DC0673&from=EN>
- 6) 田中宏明、岡本誠一郎、世界で進展する農業灌漑用下水再生水プロジェクト、水土の知、Vol. 79、No. 11, pp. 809-812、2011
- 7) 国土交通省、日本版次世代MBR技術展開プロジェクト【通称：A-JUMP】、  
[http://www.mlit.go.jp/report/press/city13\\_hh\\_000069.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/city13_hh_000069.html)
- 8) CDPH (California Department of Public Health). 2008. Groundwater Recharge Regulation Draft. Sacramento, CA: CDPH.
- 9) CDPH. 2009. Regulations Related to Recycled Water: January 2009. California Code of Regulations, Title 22, Division 4, Chapter 3, Water Recycling Criteria. Sacramento, CA: CDPH.  
<http://www.cdph.ca.gov/certlic/drinkingwater/Documents/Lawbook/RWregulations-01-2009.pdf>
- 10) CDPH. 2011. Groundwater Replenishment Reuse Draft Regulation.  
<http://www.cdph.ca.gov/certlic/drinkingwater/Documents/Recharge/DraftRechargeReg-2011-11-21.pdf>

- 11) Environment Protection and Heritage Council, the Natural Resource Management Ministerial Council and the Australian Health Ministers' Conference, Australian Guidelines for Water Recycling  
: Managing Health and Environmental Risks 2006  
: Managing Health and Environmental Risks (Phase 1)  
: Managing Health and Environmental Risks (Phase 2) Augmentation of Drinking Water Supplies  
: Managing Health and Environmental Risks (Phase 2) Stormwater Harvesting and Reuse  
: Managing Health and Environmental Risks (Phase 2) Managed Aquifer Recharge  
<http://www.recycledwater.com.au/index.php?id=16>
- 12) WHO. Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater, Volume 2, Wastewater Use in Agriculture. Geneva, Switzerland: WHO Press, 2006a..
- 13) 国土交通省、下水処理水の再利用水質基準等マニュアル、2005、  
<http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/04/040422/05.pdf>
- 14) 国土交通省、今後の水資源政策のあり方について～「幅を持った社会システム」の構築（次世代水政策元年）～中間とりまとめ、2014、  
<http://www.mlit.go.jp/common/001035683.pdf>
- 15) 国土交通省・日本下水道協会、新下水道ビジョン、2014、  
[http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo\\_sewerage\\_tk\\_000307.html](http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000307.html)
- 16) Committee on the Assessment of Water Reuse as an Approach to Meeting Future Water Supply Needs; Water Science and Technology Board (WSTB); Division on Earth and Life Studies (DELS); National Research Council、2012
- 17) JST、戦略的創造研究推進事業 CREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究領域、  
<http://water.jst.go.jp/project/index.html>
- 18) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)、海水淡水化と下水処理を統合した新規水処理システムを開発—従来比30%以上の大幅な省エネ・低コスト化を実証—、2014、  
[http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_100254.html](http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100254.html)
- 19) 最先端研究開発支援プログラム (FIRST)、Mega-ton Eater System、  
<http://www.jst.go.jp/first/about-us/kurihara-masaru.html>

### 3.4.3.7 有害物質のマネジメント（PRTR、RoHS 含む）

#### （1）研究開発領域名

有害物質のマネジメント（PRTR、RoHS含む）

#### （2）研究開発領域の簡潔な説明

特定の化学物質について順次、規制を設けていく後追い型の対策から、人の健康および環境に潜在的リスクがある化学物質を網羅的に把握、評価、認可ないし規制していく事前型の対策へシフトしつつある。効率的な化学物質管理は環境保全のみならず、我が国の生産性向上に不可避となるため、個別技術とシステムの開発を総合的に行う必要がある。具体的には、化学物質のリスク評価、リスク評価方法の改善、リスク評価結果やサプライチェーンにおける化学物質フローの効率的なシェアリングシステム、そして簡易スクリーニング技術の開発が求められる。

#### （3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

<個別規制からPRTRへ>

1970年代までは環境媒体や化学物質ごとに個別に規制が設けられてきたが、1970年代～2000年代はそれを網羅的に管理、規制していく方向にシフトしている。米国では有害化学物質管理法（Toxic Substances Control Act、1976年）により、環境保護庁（EPA）が米国内で生産、流通している化学物質の排出目録（インベントリ）調査を実施している。これを補完しているのが有害化学物質放出目録（TRI：Toxics Release Inventory）であり、民間企業に有害化学物質の使用および環境排出量の報告を義務付けている。ただし、TRIは化学物質の管理を主眼に始まったものではなく、地域住民が身近に使用、排出されている化学物質を知る権利をもとにしたものである（Emergency Planning and Community Right-To-Know Act、1986年）<sup>2)</sup>。

欧州での化学物質管理の起源はオランダであり、1974年に排出登録制度（Emission Registration）を始めている<sup>3)</sup>。ここでまとめられたデータベースを用いて、国家環境政策計画（National Environmental Policy Plan）の効果を評価している。英国では環境保護法（Environmental Protection Act、1990年）により、総合的汚染規制（Integrated Pollution Control）を導入している。欧州では米国よりもより総合的リスク管理に重点をおいたものであった<sup>3)</sup>。

1990年代にはOECDを中心に化学物質管理の必要性や手法が共有化され始め、地球サミット（1992年）のアジェンダ21第19章に環境汚染物質排出移動登録制度（PRTR：Pollutants Release and Transfer Register）の基本的な考え方が明示されている<sup>4)</sup>。そして1995年にOECD/PRTRマニュアルがとりまとめられた<sup>5)</sup>。PRTRでは、有害化学物質の種類、排出量、移動量、媒体、発生源の地理的分布を把握するものであり、地域レベルでのリスク管理を目指したものと見える。我が国では1999年に化学物質排出把握管理促進法（化管法）として法制化された。

<RoHS、そしてREACH規制へ>

2000年代から、潜在的リスクがある化学物質について、より事前に対策、管理する流

れとなっている。2002年のEU指令 (DIRECTIVE 2002/95/EC) において急増する電子・電気機器を対象に6種の化学物質 (鉛、水銀、カドミウムなど) の含有量を規制したのがRoHS (Restriction of Hazardous Substances、特定有害物質使用制限) である。なお、対象となる電子・電気機器はWEEE指令 (Directive on Waste Electrical and Electronic Equipment) (DIRECTIVE 2002/96/EC) で規定されている。これまでも化学物質が基準値以下となっているか簡易的にスクリーニングできる技術は求められていたものの、RoHS規制によって技術開発が本格化している。特に持ち運び型のX線蛍光分析装置が開発され、商品化されている。RoHS規制の考え方をさらに拡大させたものがREACH規制 (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) である (2006年、Regulation (EC) No.1907/2006)。EU内での物質の自由な流通と効果的な化学物質管理を両立させるため、登録 (Registration)、評価 (Evaluation)、認可 (Authorisation)、規制 (Restriction) をあらゆる化学物質 (Chemicals) に適用するものである。よって、産業プロセスで使用、取扱される物だけでなくあらゆる製品に規制が適用される。製造・輸入を取り扱う企業はその量に応じて、使用・取扱される化学物質を2010年～2018年までに欧州化学物質庁 (ECHA) へ登録しなければならない。我が国の化学物質審査規制法 (化審法、1973年) や米国の有害化学物質管理法 (Toxic Substances Control Act、1976年) が新しく製造・輸入される化学物質を規制するのに対し、REACH規制では既存の化学物質についても新たな化学物質と同じように安全性評価などのデータ登録を求めている。

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

REACH規制と同様の規制を我が国でも導入する必要性が生じた場合、輸入や国内市場を主とする企業に与える負担が無視できない。既存の化学物質においてREACH規制対策としてすでに安全性評価がされたデータや、今後評価されるデータを公平かつ効率的にシェアリングし、新規制の導入における企業負担を軽減できるかは今後の政策的課題である。(一社)産業環境管理協会や製品評価技術基盤機構の有効な活用が望まれる。

製品評価技術基盤機構が、改正化審法における優先評価化学物質の選定手法 (スクリーニング評価手法) やリスク評価手法を提案している。同様の手法を化学物質全般に適用、評価するには、マンパワーの面において産学官の連携が必須となると考えられる。

#### (5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

化学物質管理やその基準作成のためのリスク評価は従来、欧米主導であったが、ナノ材料のリスク評価においては産業技術総合研究所 (安全科学研究部門) が新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成 (ナノ粒子の特性評価手法の研究開発) を受けた研究を初めとして世界的にリードしている<sup>6)</sup>。ナノ材料の開発は世界的に進んでいるが、そのリスクや有害性評価は相対的に遅延している。有望なナノ材料については開発研究とそのリスク評価を組み合わせることで、迅速な実用化を図ることが望まれる。

製品中の化学物質が適正レベルか調査するあたり、二つの手法がある。一つはサプライチェーンでの化学物質フローから推定するものであり、広範な製品を一括して調査で

きる利点がある。詳細分析のためのスクリーニングとして活用することが望まれる。もう一つは持ち運び型の簡易分析装置であり、RoHS規制を契機としてカドミウムや水銀分析用の蛍光X線分析装置が開発、商品化されている ((株)リガクなど)。規制強化に伴って市場規模も拡大することが予想され、特に中国において産学官連携で研究開発が進んでいる。

(6) キーワード

化学物質、管理、規制、PRTR、RoHS、REACH

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ナノ材料の環境リスク評価においては世界的にリードしている。</li> <li>・ 製品評価技術基盤機構や産業技術総合研究所、国立環境研究所にリスク評価の専門家を多く配置しており、研究力は高い。しかし、欧州と比較すると予算規模が桁オーダーで小さい状況にある。</li> <li>・ 化学物質のインベントリ研究については製品評価技術基盤機構や産業技術総合研究所、大学の限られた専門家がリードしているが、米国と比較して弱い。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 産業技術総合研究所や国立環境研究所において、環境多媒体、暴露評価のためのシミュレーションモデルが公開されている。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ スクリーニングのための持ち運び型分析装置がすでに国内メーカーから商品化されており、新たな規制による需要にも対応できる開発力を有している。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 環境保護庁 (EPA) によって多くの化学物質の排出目録が整備されており、インベントリ研究を進める人材も多く配置されている。インベントリ研究を世界的にリードしている。</li> <li>・ 化学物質のリスク評価研究については、欧州との共同研究よりも米国内で独自に進めている傾向にある。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ EPAなどで、環境多媒体、暴露評価のためのシミュレーションモデルが公開されている。特に民間企業が化学物質排出量を推定するためのサポートツールの開発が充実しつつある。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ スクリーニングのための持ち運び型分析装置がすでに国内メーカーから商品化されており、新たな規制による需要にも対応できる開発力を有している。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ リスク評価研究全般において、世界的にリードしている。</li> <li>・ 化学物質のインベントリ研究については、大学を中心にした専門家グループがリードしている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ REACH規制と並行して、各国で独自となっている溶出試験などの分析試験方法を共通化させるプロジェクト (Harmonization) を推進中であり、規制と共通化を戦略的に実行中である。</li> </ul>
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ RoHS規制やREACH規制に対応した持ち運び型分析装置の開発、商品化がなされており、他国の輸出業者向けのコンサルティングサービスも豊富である。REACH規制の経験蓄積によって、他地域での規制開始時ではこの経験が有利に働くことが予想される。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 中国科学院 (CAS) を中心に、リスク評価や排出インベントリの論文発表が増加している。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 目立った動きはない。</li> </ul>

	産業化	○	↗	・スクリーニングのための持ち運び型分析装置の開発を産学官連携で急速な勢いで実施中である。
韓国	基礎研究	△	→	・インベントリ研究では、限られた大学の専門家がリードしている。
	応用研究・開発	△	→	・目立った動きはない。
	産業化	△	→	・目立った動きはない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) US EPA: U.S. Environmental Protection Agency, Toxic Substances Control Act. Inventory Reporting Requirements. (42 FR 64572). 1977
- 2) US EPA: U.S. Environmental Protection Agency, The Emergency Planning and Community Right-to-Know Act, EPA 550-F-12-002, 2012
- 3) 大島輝夫, 浦野紘平, 内藤克彦, 織朱實, David M. Ogden, Thomas W. Zosel, Frances Irwin. 化学物質管理の新しい手法「PRTR」とは何か, 化学工業日報社, 1997
- 4) United Nations Sustainable Developments. Chapter 19 of AGENDA 21, United Nations Conference on Environment & Development, Rio de Janerio, Brazil, 3 to 14 June 1992
- 5) OECD. Pollutant Release and Transfer Registers (PRTRs): A Tool for Environmental Policy and Sustainable Development - Guidance Manual for Governments, OECD/GD(96)32, 1996
- 6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). ナノ材料リスク評価書 (研究プロジェクト (P06041)「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」最終研究報告書) 2012

### 3.4.3.8 元素の循環と利用 (リン・窒素)

#### (1) 研究開発領域名

元素の循環と利用 (リン・窒素)

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

植物は土壌よりさまざまな元素を吸収することで成長する。その中で、植物の生長に必須な元素を農業用栄養塩類と呼び、窒素、リン、カリウムなどの元素が該当する。これらの元素は肥料の三元素と呼ばれ、土壌の生産力を高め、高い収穫効率を維持するために必須である。一方でこれらの元素が環境負荷物質として排出されると、水圏、土壌圏に対して富栄養化、酸性化などを引き起こし、大きな環境問題を引き起こす<sup>1,2)</sup>。一次資源の供給側に目を向けると、窒素は高エネルギー消費プロセスであるハーバー・ボッシュ法を介した大気中窒素のアンモニア固定ならびに天然ガス改質によって社会に供給され、リンはリン鉱石を精錬・精製することで主に供給されている。原料供給に関わる枯渇懸念、地政学的リスク、環境影響などにより、昨今は未利用資源の有効活用に向けた技術開発ならびに、資源利用効率向上に向けた社会システム構築のために、国内外でさまざまな取り組みがなされている。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

##### 1. リンの循環と利用について

社会に流入するリンのフローはリン鉱石を出発点として、大別して湿式リン酸と乾式リン酸の二つの形態で流入する。前者は農業における肥料、後者は高純度リン酸が必要とされるめっきや表面処理、食品添加物などが主な用途である。それ以外にも鉱物資源などに微量に含有されるリンの流入フローがあるが、その多くは一方通行の流れの中で拡散・散逸している。唯一の例外である濃縮プロセスは鉄鋼生産における脱リンプロセスであり、鉄鋼資源に含有されるリンの総量は我が国のリン鉱石輸入量に匹敵する<sup>3)</sup>。現状では、スラグ中のリン分は一部、土壌改良材として用いられている以外は拡散・散逸している。

ただし、もっとも大きな拡散は肥料利用の後の土壌圏に向かうフローであり、リン資源の利用効率向上の鍵は、土壌科学の知見蓄積と利用技術の向上にある。下水汚泥や畜産糞などは一部肥料原料として循環しており、MAP (Magnesium Ammonium Phosphate) 法やHAP (Hydroxylapatite) 法が主に適用されている。

人口増大、肥料需要増大を背景に、将来にわたった高品質・安価なリン資源の安定的供給の懸念から、欧州、米国でさまざまな産学官共同によるリン資源ガバナンスを議論する場がつくられてきた。欧州は圏内にリン資源の供給源を持たないことから、この問題に対してここ数年で積極的に議論を進めている。2014年7月にEUは20の供給懸念資源 (Critical Raw Materials) の一つにリン鉱石を加えた<sup>4)</sup>。

##### 2. 窒素の循環と利用について

社会に流入する窒素は大きく化石燃料、アンモニアの2つに由来が分かれる。農業・工業的な窒素源として流入する形態の多くは後者であり、前者はエネルギー供給などの用途で用いられた後、内包する窒素のほとんどは窒素酸化物として排出拡散する。窒素酸

化物の排出は酸性化、温室効果などの環境影響をもたらすことから、排出総量は各種の環境規制のもと排出抑制が義務づけられている。そのため、排ガス処理工程で窒素酸化物の一部は副生アンモニアとして回収しており、副生硫酸などの形で肥料として循環利用されている<sup>5)</sup>。

環境負荷物質としての窒素はそのフローが複雑であり、かつ工業製品、輸送サービスなど需要によって引き起こされる化石燃料燃焼に伴う窒素酸化物排出と、食糧消費によって引き起こされる肥料利用に伴う水圏、大気圏への排出は温暖化(N<sub>2</sub>O)、酸性化などの環境影響を引き起こす。

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

##### 1. 資源利用効率向上に関わる共通の課題

窒素、リンともに肥料を介した利用が大きな需要を占めているが、その利用効率向上に向けた土壌診断、適正な農業用栄養塩類の利用管理が求められる<sup>6)</sup>。土壌科学の発展を実現するためのデータ蓄積、農業従事者への情報周知、適正管理に向けたインセンティブ付与などが求められる。これらを実現するための現状の課題として以下があげられる。

- ① 適正な管理と規制に基づく循環資源マーケットの整備不足
- ② 循環資源利用に関わるインセンティブの欠落
- ③ 経済的に受容される技術導入のコストと価格のミスマッチ

##### 2. リンについて

拡散しているリンのうち、回収ターゲットになりうる濃縮プロセスを有する工程は少ない。そのうちの一つであり、量的にも大きな回収ポテンシャルを有する鉄鋼スラグの組織は大別するとリン濃縮相とマトリックス相とに分類される。鉄鋼スラグ中のリンを分離回収する方法として、固体として濃縮相を単体分離する機械的分離と化学的分離とが考えられる。化学的分離は原理的には文献<sup>7)</sup>で示されるように還元回収であるが、現状、経済合理的な手法は確立していない。そのため、効率的な資源回収・再資源化技術開発と、産業化のための経済的・効率的な条件確立が期待される。

##### 3. 窒素について

窒素循環に関わるプロセスの解明は重要であり、植物の窒素代謝、土壌圏・推計における窒素動態解析に基づく農業生産での効率的な窒素利用技術の開発が求められる。富栄養化、酸性化抑止の観点からは大気による反応性窒素の輸送・沈着についても、併せてプロセスの解明が課題である。

また、アンモニア供給のためのハーバー・ボッシュ法は、高温高压の反応条件下、鉄系触媒を用いて窒素ガスと水素ガスからアンモニアを合成するエネルギー多消費型プロセスであり、これに代わる低エネルギー消費型の窒素固定技術開発が望まれる<sup>8)</sup>。循環利用に関しては、すでに人や家畜の排泄物などの廃棄物中に固定されている窒素を活用、資源化するための技術開発(コンポスト、液肥などの高効率化、有効利用技術)は積極的に開発、実装が取り組まれており、更なる適用が望まれる。前述したように窒素は環境負荷物質として排出されると、大気圏においては酸性化、温暖化などの影響を及ぼし、水圏においては酸性化、富栄養化の原因物質となる。そのため、これらに対応した除去

技術、中和技術の発達はあるものの、副生アンモニアの利用以外の回収・循環技術の積極的な導入はあまりない。

#### (5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

##### 1. 高効率リン・窒素利用に向けた農業技術開発

水圏、土壌圏における過剰な窒素は酸性化、富栄養化を引き起こすことから、健全な窒素循環の実現、もしくは肥料生産から農作物生産プロセスに至るまでにリン・窒素ロスを最小にする技術が必要とされる (例えば、農業生物資源研究所の林らによって行われている根粒共生系の総合的理解による、低窒素肥料農業を目指した基礎的研究など)。

##### 2. リン資源利用効率向上に向けた技術

鉄鋼スラグからのリン回収について、磁気分離法<sup>9,10)</sup>、マイクロ波法<sup>11,12)</sup>、CaF<sub>2</sub>添加によるリン濃縮相の肥大化<sup>13)</sup>、還元雰囲気制御によるリン鉄生産<sup>14)</sup>、アルカリ金属炭酸塩法<sup>15)</sup>など、いくつかの新技術の創出が行われている。

その他の未利用資源の活用技術として、無電解ニッケルメッキ廃液のリン酸の資源化、表面処理汚泥のリン含有汚泥資源化、鶏糞発電の残渣を肥料として再資源化、下水汚泥焼却灰からのリン回収<sup>16)</sup>などがそれぞれ取り組まれている。

##### 3. 窒素資源利用効率向上に向けた技術開発

ハーバー・ボッシュ法は高温高圧下で窒素をアンモニアとして固定化する技術であるが、エネルギー消費の大きなプロセスであることから、これに代わる穏和な反応条件下で進行する簡便で経済的な次世代型窒素固定法の開発<sup>8)</sup>が求められる。

硫酸アンモニウムはナイロン原料のカプロラクタム製造の際の廃液からの回収、コークス炉からの副生アンモニアなどから生産される。これらの副生物の利用効率を向上することで、国内窒素資源生産性の向上が見込める。

##### 4. リンに関する国内外の産学連携拠点

国内外における産学官共同でリン資源ガバナンスを議論する場としてはリン資源リサイクル推進協議会 (大竹久夫教授、大阪大学)<sup>17)</sup>があり、定期的にシンポジウム・ワークショップを開催している。欧州における拠点としてはGlobal TraPs (Prof. Emir. R. Scholtz, ETH, スイス)<sup>18)</sup>、European Sustainable Phosphorus Platform (EU)<sup>4)</sup>があげられる。また米国では国立科学財団 (NSF) のResearch Coordination NetworkによるSustainable Phosphorus Initiative (Prof. J. Elser, ASU, 米国)<sup>19)</sup>があり、アリゾナ州立大が中心となって研究シーズと産業ニーズのマッチングが行われている。また、Peak Phosphorusの提言を行ったDr. D. CordellがGlobal Phosphorus Research Initiative (Dr. D. Cordell, UTS, 豪州)<sup>20)</sup>を運営しており、積極的な情報発信を行っている。これらのコミュニティからの参加者が集う会合として2014年9月に4th Sustainable Phosphorus Summit (Montpellier, 仏)<sup>21)</sup>が開催された。

##### 5. 窒素に関する国内外の産学連携拠点

窒素・リンの循環はPlanetary boundaryを大きく越えていることが指摘されていることように、国際的にその持続可能な利用と循環システムの構築が求められている<sup>22)</sup>。食糧・エネルギー供給に関わる窒素フロー・循環について産学官連携で議論をする場とし

てInternational Nitrogen Initiative<sup>23)</sup>では、窒素利用に関するデータ、N footprint calculatorなどの可視化ツールの提供を行い、国際的な研究ネットワークを形成している。N footprintは主にProf. J.Gallowayらがその研究をリードしており<sup>2, 24, 25)</sup>、我が国においては2015年3月にN-Footprint workshopが当該グループと共同で開催を予定している（主催：柴田英明教授、北海道大学）。3年に一度International Nitrogen Conferenceが開催されている（2013年ウガンダ、2016年オーストラリア）。

#### （6）キーワード

Planetary boundary、黄リン、製鋼スラグ、副生アンモニア、ハーバー・ボッシュ法、

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>鉄鋼スラグからのリン回収に関する基礎研究は古くからあり、これまで多くの研究蓄積がある。鉄鋼業は近年、資源価格の高騰、CSRの観点から資源循環技術の導入に関心をもっており、新日鐵住金、JFEなどはリン資源リサイクル推進協議会の会員となっている。</li> <li>水環境の規制が十分に機能しており、排水からのリン・窒素除去技術は十分に研究が進められおり、産業においても十分に適用されている。しかしながら回収・再資源化の観点では十分とは言えない。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>リンの国内マテリアルフロー分析（MFA: Material Flow Analysis）、経済活動の背後で直接・間接に需要されるバーチャルリンなどのフローを可視化する研究は進められている<sup>26)</sup>。</li> <li>リン資源リサイクル推進協議会（会長：大阪大学大竹久夫教授）ならびに総合地球環境学研究所FSプロジェクト（生物多様性が駆動する栄養循環と流域圏社会－生態システムの健全性、代表：京都大学奥田昇教授）など、産学官連携のリン・窒素マネジメントのコミュニティがある。</li> <li>文献<sup>27)</sup>で持続的窒素循環に向けた重要性を指摘しており、農地における窒素固定に関わる土壌科学の進展、高効率アンモニア合成に関わる研究ともに進められており、基礎研究の発展はある。</li> <li>Prof. Gallowayが提唱するN footprint initiativeの日本版データベースは北海道大学柴田英明教授らにより整備が進められている。進藤らによる窒素フロー解析など、フローの可視化については、非常に重要な知見が得られている。</li> </ul>
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>汚泥からの回収リンの肥料利用や、鶏糞発電の焼却残渣の資源化など積極的に取り組み事例がある。</li> <li>ただし、東日本大震災による放射性核種残存の影響により東日本の汚泥利用については停滞している。</li> <li>プラスチック資源化の際に副産物として生産されるアンモニアの排煙脱硝剤としての利用などが行われている。</li> </ul>
米国	基礎研究	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>回収分離・精製に関する技術開発状況はほとんど見えてこないが、低品位リン鉱石の直接利用などに関わる研究、産業化は進められている。</li> <li>窒素循環に関する研究は土壌栄養管理ならびに大気圏・水圏の環境保全の観点からさまざまある<sup>28, 29)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>NSF-RCNプロジェクトによりArizona State U. Prof. Elserがリードしてリンの循環、持続的な管理に関わる研究マッチングが行われている。これにより循環技術開発、産業化が後押しされる可能性がある。</li> <li>Prof. Gallowayが提唱するN footprint calculatorにより、経済活動の裏側で直接間接で発生する窒素排出に関わるデータが整備されている。可視化については、非常に重要な知見が出ているが、循環利用に関わる新規技術の開発が積極的に行われているという印象はない。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>回収分離・精製に関する技術開発状況はほとんど見えてこないが、低品位リン鉱石の直接利用などに関わる研究、産業化は進められている。</li> <li>排水処理に関する研究の進展と、実際のプロセスへの適用の間に隔たりあり。行政府における排水管理、資源循環推進力はそう大きな圧力ではないように見受けられる。</li> </ul>
欧州	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>リン回収は下水汚泥からのMAP法による回収を中心に進められている。あるいは汚泥の直接農地還元（BioSolid）も積極的に行われている。</li> <li>畜産糞の資源化ならびに都市排水汚泥のリン循環が積極的に取り組まれている。</li> </ul>

	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・欧州における国際的リン資源管理プロジェクトが実施されている。</li> <li>・リン資源を持たない欧州は、資源確保に対して危機感をもっており、技術動向に関するレポート発行、産学官連携の活動を活発に行っている。</li> <li>・欧州各国（ドイツ、スウェーデンなど）でリン回収に関わる数値目標を設定して、積極的な産業育成につとめていることから、リン回収技術向上ならびに、循環資源からの黄リン生産技術開発の取り組みがなされていた。</li> </ul>
	産業化	◎	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>・欧州における唯一の黄リン供給を担っていたThermphos社が2012年に経営破綻したことにより、これまで進められてきた循環資源を用いたリン酸・黄リン製造に陰りが懸念される。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・特に水圏汚染懸念からリン・窒素のマテリアルフロー解析が行われつつある。</li> <li>・鉄鋼スラグからのリン回収に関しては文献10)のように、鉄鋼業と連携した研究が行われている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中国農業科学院、精華大学などで窒素、リンのフロー研究が積極的に行われている。</li> <li>・Sustainable Phosphorus SummitやGlobal TraPs, International Nitrogen Initiativeへの参加あり。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・リン資源供給国であるが、今後の人口増大・肥料需要増大を予想して、リン資源循環、資源効率性向上技術の導入に関心が高い。また水処理技術が不全であることによる環境悪化も大きな懸念であり、今後、産業化に向けた駆動力はおおいにある。</li> <li>・大気圏に排出される排ガス規制の観点から、除去技術の導入も積極的に進められるものと思われる。現状では途上。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鉄鋼スラグに関してマイクロ波を用いたリン分離回収技術の論文あり<sup>11, 12)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	×	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Sustainable Phosphorus SummitやGlobal TraPs, International Nitrogen Initiativeへの参加はみられない</li> <li>・前大統領がソウルにおける水環境改善を指示し、4大河川（漢江・洛東江・錦江・榮山江）再生事業に取り組むことから、排水に対する環境保全意識が高まってきている。ただし除去技術の実装であり、再資源化技術の実装に関する意識は伴っていない。</li> </ul>
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・主に中国からリン鉱石を輸入し、肥料をアジア諸国に輸出しているが、リン・窒素循環に関する目立った事例はない。</li> </ul>

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) Elser, J. and E. Bennett, *A broken biogeochemical cycle*. Nature, 2011. **478**(7367): p. 29-31.
- 2) Galloway, J.N., et al., *Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions*. Science, 2008. **320**(5878): p. 889-892.
- 3) Matsubae-Yokoyama, K., et al., *A Material Flow Analysis of Phosphorus in Japan*. Journal of Industrial Ecology, 2009. **13**(5): p. 687-705.

- 4) ESPP. *European Sustainable Phosphorus Platform*.  
<http://www.phosphorusplatform.eu/>.
- 5) 鈴木, 仁., *窒素酸化物の事典*. 2008: 丸善株式会社.
- 6) Socolow, R.H., *Nitrogen management and the future of food: Lessons from the management of energy and carbon*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1999. **96**(11): p. 8.
- 7) 塩見, 純., 佐野 信雄, 松下幸雄, *転炉スラッグの脱燐*. 鉄と鋼, 1977. **63**(9): p. 9.
- 8) 西林, 仁., . *鉄触媒は「窒素固定能」を秘めていた! 常温常圧の窒素ガスからのアンモニア変換に光明*. 化学, 2013. **68**(6): p. 5.
- 9) Yokoyama, K., et al., *Separation and recovery of phosphorus from steelmaking slags with the aid of a strong magnetic field*. Isij International, 2007. **47**(10): p. 1541-1548.
- 10) Diao, J., et al., *Recovery of Phosphorus from Dephosphorization Slag Produced by Duplex High Phosphorus Hot Metal Refining*. Isij International, 2012. **52**(6): p. 955-959.
- 11) Kim, T. and J. Lee, *Recovery of Fe and P from CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Slag by Microwave Treatment*. Materials Transactions, 2011. **52**(12): p. 2233-2238.
- 12) Kang, Y.B., T. Kim, and J. Lee, *Valorisation of steelmaking slag by microwave treatment*. Ironmaking & Steelmaking, 2012. **39**(7): p. 498-503.
- 13) Zhou, H.M., Y.P. Bao, and L. Lin, *Distribution of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> between Phosphorus-Enrichment Phase and Matrix Phase in Phosphorus-Containing Slag*. Steel Research International, 2013. **84**(9): p. 863-869.
- 14) Yamamoto, T. and K. Urata, *Method for manufacturing synthetic rock phosphate [WO 2014017499]*. 2014.
- 15) Kajiwara, T., E. Yamasue, H. Okumura and K.N. Ishihara, *The dissolution of phosphorus from β-calcium phosphate milled with alkali metal carbonate*. CAMP-ISIJ, 2013. **26**(1).
- 16) 菅原, 龍., . *平成24年度 環境研究総合推進費補助金 研究事業総合研究報告書「いわて発戦略的地産地消型リン資源循環システムの研究」*. 2013.
- 17) リン資源リサイクル推進協議会. *リン資源リサイクル推進協議会*.  
<http://jora.jp/rinji/rinsigen/>
- 18) GT. *Global TraPs* Available from: <http://www.globaltraps.ch/>.
- 19) PRCN. *The Phosphorus Sustainability Research Coordination Network*.  
<http://sustainablep.asu.edu/>.
- 20) GPRI, *Global Phosphorus Research Initiative*.  
<http://phosphorusfutures.net/>
- 21) SPS2014, *Sustainable Phosphorus Summit 2014*.  
<http://sps2014.cirad.fr/>
- 22) Rockstrom, J., et al., *A safe operating space for humanity*. Nature, 2009. **461**(7263): p. 472-475.
- 23) INI. *International Nitrogen Initiative*. Available from: <http://www.initrogen.org/>.
- 24) Galloway, J.N., et al., *Nitrogen cycles: past, present, and future*. Biogeochemistry, 2004.

- 70(2): p. 153-226.
- 25) Gruber, N. and J.N. Galloway, *An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle*. Nature, 2008. **451**(7176): p. 293-296.
- 26) Matsubae, K., et al., *Virtual phosphorus ore requirement of Japanese economy*. Chemosphere, 2011. **84**(6): p. 767-772.
- 27) JST-CRDS, 戦略プロポーザル「持続的窒素循環に向けた統合的研究推進」. 2012.  
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2012/SP/CRDS-FY2012-SP-01.pdf>
- 28) Pinder, R.W., Neil D. Bettez, Gordon B. Bonan, Tara L. Greaver, William R. Wieder, William H. Schlesinger, Eric A. Davidson, *Impacts of human alteration of the nitrogen cycle in the US on radiative forcing*. Biogeochemistry, 2013. **114**  
**Open Access**(1-3): p. 15.
- 29) Baker, L.A., *Can urban P conservation help to prevent the brown devolution?* Chemosphere, 2011. **84**(6): p. 779-784.

### 3.4.3.9 開発途上国による循環型技術（農村型小規模バイオガス化装置）

#### (1) 研究開発領域名

開発途上国による循環型技術（農村型小規模バイオガス化装置）

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

開発途上国の貧困農家の有機性廃棄物処理およびエネルギー自給を目的とした分散式循環型技術を扱う。個別家庭あるいは公共施設の敷地内に設置された装置により、家畜排泄物、し尿、生ごみなどの有機性廃棄物を原料として嫌気性微生物発酵を行い、メタンガスを主成分とするバイオガスを得る。先進国で普及している工業化バイオガス技術と異なり、無加温・無動力・安価な素材・簡素な構造で処理する技術開発、処理に供する原料探索、家庭でのバイオガスエネルギー利用設備開発などを研究開発課題とする。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

中国、インドなどアジア地域を中心として、貧困農家を対象とした有機性廃棄物からのガス燃料生産を目的とした循環型技術（農村型小規模バイオガス化装置）が広く普及している。本技術は、主に家庭で調理に使用する石炭や薪の代替燃料としてメタンを6～7割含むバイオガスを生産することを目的とする。

先進国で広く利用されている大規模バイオガス化装置と異なる点は次の通りである：

- (i) 小規模でオンサイト処理
- (ii) 安価・簡素な構造
- (iii) 基本的に運転のために電気・燃料などを必要としない
- (iv) 回収ガスは家庭内で都市ガスの代替として使用する

世界各国でさまざまな構造のバイオガス化装置が開発されてきたが、主要な方式は以下の3つである<sup>1)</sup>：

- (ア) 地中設置式固定ドーム型
- (イ) 地中設置式浮遊ドラム型
- (ウ) 地上設置可動式プラグフロー型

バイオガス化装置の発酵部の容積は、(ア)と(イ)のタイプでは数 $m^3$ ～百数十 $m^3$ 、(ウ)のタイプは十 $m^3$ 以下である。数十 $m^3$ 以上の規模のバイオガス化装置は、個別家庭ではなく密集した集落などで共同の処理を行う場合に使用される。攪拌・温度は効率的な発酵にとって不可欠であるが、恒常的な攪拌の設備や温度を制御する仕組みを有していない。原料投入槽、発酵槽、発酵液貯留槽は連結されている。発酵原料の投入は投入槽からの自然流下で、貯留槽から取り出された発酵液は液肥などに利用される。典型的なバイオガス化装置の耐用年数は25～35年で、設置費用は200～400 USDである<sup>1)</sup>。生産されるガスは、家庭用のバイオガス化装置の場合は1日あたり平均1  $m^3$ ほどで、一家庭で調理に使用するガスをまかなう程度である。

これまでに海外の複数の研究グループによって、本技術の導入による環境的・経済的効用の評価がなされており、またそれらは数式でモデル化されている。例えばGroenendaalらによると、農家の女性が家事に要する時間は家庭用バイオガス化装置導入によって十～十数%減少するとしている<sup>2)</sup>。Fengらは、家庭用バイオガス化装置導入

により、家庭あたりの年間の薪使用量は1.44 t、CO<sub>2</sub>排出量は1.73 t減少すると推定した<sup>3)</sup>。

本技術は、一部の国（特に中国とインド）ではすでに産業として成立している。ポテンシャルとして中国には約1億4千万基、インドには約2千万基の小規模バイオガス化装置が導入可能と見積もられている。普及の点で、中国ではポテンシャルの約3分の1、インドではポテンシャルの約5分の1まで普及が進んでいる。両国では、小規模バイオガス化装置の政策的な推進には約50年の歴史がある。従来は農村振興策と見なされていたが、2000年代からは再生可能エネルギーとして位置づけられるようになった。中国の再生可能エネルギー中長期発展計画によれば、2020年までにポテンシャルの70%まで普及を進める計画である。その結果生産されるバイオガスは180億m<sup>3</sup> (=3億9千万GJ) と見積もられており、主要な再生可能エネルギーのひとつである<sup>4)</sup>。

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

利用者である貧困農家にとって政府助成金は重要である。アジア地域での小規模バイオガス化装置の政策的な導入推進の下で、建設費の数十%に相当する政府助成金が農家による導入を後押ししている。しかしながら、その導入後の維持管理に対する補助がないことが、特に低所得者にとって技術の利用を継続する事を困難にしている。威らが調査を行った地域では導入した農家のうち3割は使用を停止していたという<sup>5)</sup>。

小規模バイオガス化装置は各家庭に導入されるという特性上、維持管理は利用者である農家の責任となる。それゆえ、維持管理をサポートする体制が必要とされている。そのような現状に鑑み、中国では近年になってバイオガス技術者の育成が政策的に行われている。それに係るアジアにおける国際拠点としてAsia-Pacific Biogas Research and Training Center (BRTC) が中国成都にある。

一方で技術的な側面では、これまでに明らかとなっている課題として、(a)不安定なメタン生成；(b)農家が調達する原材料の不足；(c)15℃以下の低温条件での効率性低下；(d)農業残渣など難分解性の原料の処理の困難さ；(e)厨芥など油脂を含んだ原料の処理；(f)無攪拌のために堆積物蓄積や死水域生成による有効槽容積減少などがある<sup>1, 4, 5)</sup>。

#### (5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

中国四川省では100万家庭への小規模バイオガス化装置導入を目指した大規模なクリーン開発メカニズム (CDM : Clean Development Mechanism) プロジェクトが進められている。我が国では、2008年よりベトナムカントー市<sup>6)</sup>、2009年より中国重慶市<sup>7)</sup>、2010年よりバングラデシュ<sup>8)</sup>において、貧困農家を対象とした農村小規模バイオガス化装置CDMプロジェクトを実施している。また、トヨタ環境活動助成プログラム「ベトナム農村におけるバイオガス発電技術の市場開発促進」などのプロジェクトも実施されている。導入されている技術は基本的には上述のアジアの伝統的な方式であり、我が国の技術を活用した技術改善などが期待される。

#### (6) キーワード

バイオガス、再生可能エネルギー、分散型施設、液肥、低コスト、無動力

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	×	→	・日本の研究者による開発途上国の小規模バイオガス化に係る技術的研究および社会経済的研究はほとんどない <sup>9)</sup> 。
	応用研究・開発	×	→	・学界、産業界ともに、開発途上国小規模バイオガス化に係る応用研究や開発は極めて低調である。
	産業化	△	↑	・アジア各国で小規模バイオガス化技術普及のCDMプロジェクトを実施してきた。
米国	基礎研究	△	→	・中米諸国などを対象とした小規模バイオガス化装置の処理特性やエネルギー利用などの調査研究が報告されている <sup>10, 11)</sup> 。
	応用研究・開発	×	→	・目立った動きは見受けられない。
	産業化	×	→	・目立った動きは見受けられない。
欧州	基礎研究	○	↑	・技術開発研究はこれまでにいくつか報告されている <sup>12-14)</sup> 。アジア、アフリカ、中南米諸国を対象とした小規模バイオガス技術の社会経済的研究も報告されている <sup>15, 16)</sup> 。学術的な研究は近年増加傾向である。
	応用研究・開発	△	→	・開発途上国の小規模バイオガス化装置の環境・経済的影響の評価、あるいは現地への技術導入などの報告が多い。
	産業化	△	→	・日本と同様CDMなどのプロジェクトを通して開発途上国の小規模バイオガス化技術普及に関わっている。
中国	基礎研究	○	→	・中国農業部の研究機関において小規模バイオガス化技術の建設・運転管理について、詳細かつ多数の国家標準が作成、体系化されている <sup>17-19)</sup> 。
	応用研究・開発	◎	↑	・これまでに数多くの農村小規模バイオガスプロジェクトが実施されており、そうしたプロジェクトを通して果樹栽培、畑作、養豚、養魚、バイオガスを組み合わせた資源循環型農業システムの開発・普及が進められてきた。三位一体システム、四位一体システム、五配套システムなど、地域特性に合わせた農業システムが構築されてきた <sup>4)</sup> 。
	産業化	◎	↑	・中国国内ではすでに大規模に展開されており、産・官共同で関与するビジネスモデルが成立している。すでに4,000万基以上の装置が導入されている。
韓国	基礎研究	×	→	・開発途上国向けの小規模バイオガス化技術に関する研究事例はほとんど確認されていない。
	応用研究・開発	×	→	・目立った動きは見受けられない。
	産業化	×	→	・目立った動きは見受けられない。
その他アジア諸国	基礎研究	○	→	・特にインドの研究者を中心として、発酵槽・ガス利用機器の新技術開発や上述の伝統的な装置の特性評価、モデル化などの研究が数多く行われている <sup>20-22)</sup> 。
	応用研究・開発	○	↑	・インド、東南アジアなどで数多くの小規模バイオガスプロジェクトが実施されている（例えばNational Project on Biogas Development (India)、Biogas Programme for the Animal Husbandry sector of Viet Nam)。中国と同様に果樹栽培、養豚、養魚、バイオガスなどを組み合わせた資源循環型農業システムの普及が試みられている。
	産業化	○	↑	・中国ほどではないが、アジア地域（特にインド・ベトナム）での普及拡大が顕著である。中国と同様に、小規模バイオガス化技術の国家標準策定、バイオガス技術者の訓練などが行われている <sup>23-25)</sup> 。

## (註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

## (註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

## (註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) Rajendran, K. et al. Household biogas digesters—A review. *Energies*. 2012, Vol.5, p.2911-2942.
- 2) van Groenendaal W. and Gehua, W. Microanalysis of the benefits of China's family-size bio-digesters. *Energy*. 2010. Vol.35, Issue 11, p.4457-4466.
- 3) Tingting, F. et al. Productive use of bioenergy for rural household in ecological fragile area, Panam County, Tibet in China: The case of the residential biogas model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. Vol.13, Issue 8, p.2070-2078.
- 4) 小林他 中国農村地域における家庭用バイオガス施設の現況. 用水と廃水. 2011. Vol.53, no.9, p.707-717.
- 5) 戚他. メタンガスの活用による農山村振興の実態と課題—中国湖北省恩施市を事例として—農村計画学会誌. 2008. Vol.27, p.203-208
- 6) 国際農林水産業研究センター (JIRCAS). 豚の排せつ物のバイオ燃料化で地球温暖化防止に貢献 - ベトナムの低所得農家を対象としたバイオガス事業が国連CDM理事会に登録 - . 2012.  
<https://www.jircas.affrc.go.jp/press/2012/press04.html>
- 7) (株)PEAR カーボンオフセット・イニシアティブ. 重慶のバイオガス.  
[http://pear-platform.org/project\\_china\\_b](http://pear-platform.org/project_china_b)
- 8) (株)PEAR カーボンオフセット・イニシアティブ. バングラデシュのバイオガス.  
[http://pear-platform.org/project\\_bang](http://pear-platform.org/project_bang)
- 9) Kobayashi T. and Li Y.Y. Performance and characterization of a newly developed self-agitated anaerobic reactor with biological desulfurization. *Bioresour. Technol.* 2011. Vol.102, p.5580-5588.
- 10) Heltberg, R. Household Fuel and Energy Use in Developing Countries—A Multicountry Study; Oil and Gas Policy Division. The World Bank: Washington, DC, USA, 2003.
- 11) Lansing, S. et al. Quantifying electricity generation and waste transformations in a low-cost, plug-flow anaerobic digestion system. *Ecol. Eng.* 2008. Vol.34. p.332-348.
- 12) Martí-Herrero, J. Reduced hydraulic retention times in low-cost tubular digesters: Two issues. *Biomass Bioenergy*. 2011. Vol.35, p.4481-4484.
- 13) Axaopoulos, P. et al. Simulation and experimental performance of a solar-heated anaerobic digester. *Solar Energy*. 2001. Vol.70, Issue 2, p.155-164.
- 14) Axaopoulos, P. et al. Energy and economic analysis of biogas heated livestock buildings.

- Bio-mass and Bioenergy. 2003. Vol.24, No.3, p.239-248.
- 15) Day, D.L. et al. Biogas plants for small farms in Kenya. *Biomass*. 1990. Vol.21, p.83-99.
  - 16) Smith, J.U. The Potential of Small-Scale Biogas Digesters to Alleviate Poverty and Improve Long Term Sustainability of Ecosystem Services in Sub-Saharan Africa; University of Aberdeen. Institute of Biological and Environmental Science: Aberdeen, UK, 2012.
  - 17) 中国国家質量監督檢驗檢疫局 戸用沼気池標準図集. GB/T4750. 2002.
  - 18) 中国農業部 農村家用沼気発酵工艺規程. GB9958. 1988.
  - 19) 四川省质量技术监督局 农村戸用沼気池使用管理規程. DB51. 2008.
  - 20) Khoiyangbam, R.S. et al. Methane emission from fixed dome biogas plants in hilly and plain regions of northern India. *Bioresour. Technol.* 2004, Vol.95, p.35-39.
  - 21) Limmeechokchai, B.; Chawana, S. Sustainable energy development strategies in the rural thailand: The case of the improved cooking stove and the small biogas digester. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2007. Vol.11, p.818-837.
  - 22) Raheman, H. A mathematical model for fixed dome type biogas plant. *Energy*. 2002. Vol.27, no.1, p.25-34.
  - 23) Nguyen, V. and Chau, N. Small-scale anaerobic digesters in Vietnam - development and challenges. *J. Viet. Env.* 2011. Vol.1, no.1, p.12-18.
  - 24) Bala, B.K. and Hossain, M.M. Economics of biogas digesters in bangladesh. *Energy*. 1992. Vol.17, p.939-944.
  - 25) Hiremath, R.B. et al. Sustainable bioenergy production strategies for rural India. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2010. Vol.15, Issue 6, p.571-590.

### 3.4.4 災害による環境への影響低減と環境の再創造

#### 3.4.4.1 自然災害（地震、津波、台風、干ばつ、豪雨、豪雪、火山等）が地域環境へ及ぼすリスク

##### (1) 研究開発領域名

自然災害（地震、津波、台風、干ばつ、豪雨、豪雪、火山等）が地域環境へ及ぼすリスク

##### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

地震、火山噴火、津波、台風、暴風、豪雨、豪雪、洪水、渇水などの自然現象により引き起こされる災害のリスクを管理するために必要となる、自然現象把握のための観測技術、発生機構を考慮したモデリング技術、さらにそれによって引き起こされる環境への影響を定量的に評価する手法の研究開発領域である。なお、大規模災害の原因になりうる極端現象に対しては、適応策の検討も重要な課題であり、影響を軽減するためのリスクマネジメント研究に役立つ形での研究開発の成果取りまとめが求められる。

##### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

###### 1. 災害につながる自然現象の分類

自然災害は、自然現象が被害を引き起こして発生することから、被害対象とその脆弱性から災害の程度やその環境への影響は異なる。被害・影響として、人命、財産、社会基盤、産業基盤（固定資本）、都市機能、不動産価値、経済活動・ビジネス、社会コミュニティなどさまざまな対象に対して多面的に認識することが必要である。その際、災害を発生させる自然現象の対象としては、① 地震、火山噴火や津波、② 台風、暴風、豪雨、洪水や干ばつなどの二つに大きく分けることができると考えられる。前者は、地殻活動に深く関与している一方で、後者は地球温暖化に伴う気候変動や気象変化に深く関わっている。

###### 2. 国内での動向

###### ① 地震、火山噴火や津波などに関する研究開発

地震や火山活動に関しては、2008年から文部科学省による「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」において、1) 地震・火山現象予測のための観測研究、2) 地震・火山現象解明のための観測研究、3) 海底における観測技術の開発や宇宙技術などの利用の研究が推進された<sup>1)</sup>。2013年からは「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」<sup>2)</sup>において、1) 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究、2) 地震・火山噴火の予測のための研究、3) 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究が文部科学省主導で進められている。産業技術総合研究所地質調査総合センター<sup>3)</sup>でも、地震・火山災害の将来予測と評価技術の開発の研究が進められおり、「巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究」<sup>4)</sup>が実施された（2013年度終了）。さらに、防災科学技術研究所<sup>5)</sup>にて、地震・火山・風水害・雪氷災害の観測・予測技術に加えて、耐震技術開発、災害情報活用手法に関して研究開発が実施されている。地震・津波観測監視や地震予測モデルの研究に関しては、海洋研究開発機構地震津波海域観測

研究開発センター<sup>6)</sup>において、東海、東南海、南海地方の地震・津波観測監視システムの構築と地震予測モデルの研究を実施している。

## ② 台風、暴風、豪雨、洪水や渇水などに関する研究開発

### 1) 気候変動予測に関する研究開発

文部科学省「21世紀気候変動予測革新プログラム」<sup>7)</sup>において、温暖化予測モデルの高度化および予測、不確実性の定量化・低減、自然災害に関する影響評価の研究が展開された（2011年度終了）。これらの成果を継承する形で、2014年6月には環境省から気候変動による影響評価のための気候変動予測結果も公表されている<sup>8)</sup>。

### 2) 気候変動適応に関する研究開発

台風や豪雨などは気候変動に大きく影響を受けることから、気候変動適応戦略イニシアチブのもと、「気候変動適応研究推進プログラム」<sup>9)</sup>、「地球環境情報統融合プログラム」<sup>10)</sup>が文部科学省主導で推進されている。

気候変動適応研究推進プログラムでは、研究テーマとしては、i) 先進的なダウンスケーリング手法の開発、ii) データ同化技術の開発、iii) 気候変動適応シミュレーション技術の開発が設定されている。

地球環境情報統融合プログラム<sup>10)</sup>は、2011年3月に終了した「データ統合解析システム（DIAS）」を継承するもので、地球規模課題、特に気候、水循環、生物多様性・農業・水産業に関する科学知の深化と公共的利益創出のための情報基盤のパイロットシステムが構築されたことを受けて、DIASを高度化・拡張し、さまざまな分野の利用者が、超大容量で多様なデータ・情報を協働して統融合し、新たな価値を創出できる情報基盤（ワークベンチ）のプロトタイプを構築し、地球規模課題解決に向けて、科学的先端性を持続的に発揮し、実利用によって公共的利益を実現できる運用体制を設計・提案するための研究を展開している。

2009年には、環境省地球環境研究総合推進費戦略的研究（S-4）「温暖化影響総合予測プロジェクト」<sup>11)</sup>により、長期的な気候安定化レベルと影響リスク評価の成果が公表されている。温暖化影響に関する包括的な研究であり、8つの指標について温暖化影響を定量的に評価したものである。それに基づく温暖化影響の危険な水準を検討し、さらに安定化排出経路に関する科学的な知見を提示している。

また、環境省環境研究総合推進費による「温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究」（S-8）<sup>12)</sup>、「アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合的研究」（S-9）<sup>12)</sup>、「地球規模の気候変動リスク管理戦略の構築に関する総合的研究」（S-10）<sup>12)</sup>が実施されており、温暖化や気候変動に伴う影響評価や予測、さらにはリスク管理に関する研究が展開されている。

これらの成果を受けて、2013年には、気候変動の観測・予測・影響評価に関するレポート「日本の気候変動とその影響（2012年度版）」<sup>13)</sup>が環境省から公表されている。

### 3) 自然災害のリスク管理に関する研究開発

代表的な研究成果としては、2011年11月に公表された、「気候変動への適応推進に向けた極端現象及び災害のリスク管理に関する特別報告書」<sup>14)</sup>（SREX：Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance

Climate Change Adaptation) があげられる。この報告書では、災害リスクと影響の主要な決定要因は、曝露と脆弱性であることから、i) 曝露と脆弱性、極端現象とその影響及び災害損失の観測・所見の整理、ii) 災害リスク管理と気候変動に対する適応、iii) 過去の極端現象における経験、iv) 極端現象の将来予測とその影響及び災害損失の評価、v) 変化する極端現象及び災害のリスクに対する準備と対応について整理されている。

また、京都大学防災研究所の総合防災研究部門が中心となり、災害リスクマネジメント研究に関して、国際応用システム分析研究所 (IIASA) と2000年から2009年まで合同会議を開催してきた<sup>15)</sup>。

#### 4) 行政における応用的な研究開発

気候変動への適応の観点から、2008年6月に環境省地球温暖化影響・適応研究委員会により「気候変動への賢い適応」<sup>16)</sup> が取りまとめられている。また、水災害分野においては、国土交通省で検討が進められてきている。まず、2008年6月に「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方」<sup>17)</sup> が国土交通省社会資本整備審議会から答申されている。また、国土交通省国土技術政策総合研究所において、政策反映のためのプロジェクト研究「気候変動下での大規模水害に対する施策群の選定・選択を支援する基盤技術の開発」(2010～2013年度) が実施された<sup>18)</sup>。さらに、土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM)<sup>19)</sup> では、中期プログラムとして、水関連ハザードに係わる観測・予測・分析を行うための手法を開発し、水関連災害リスクを評価する研究が推進されている。

また、内閣府中央防災会議の「大規模水害対策に関する専門調査会」は、2010年に大規模水害発生後の被害を最小限にとどめるための対策について検討を進め、「大規模水害対策に関する専門調査会報告 首都圏水没 ～被害軽減のために取るべき対策とは～」<sup>20)</sup> を公表している。地震分野においては、2013年3月に中央防災会議防災対策推進検討会議のもとで、東日本大震災をふまえた南海トラフ地震の想定規模と予想経済被害額の見直しも行われている。

### 3. 海外における動向<sup>21), 22)</sup>

自然災害としては、地震、火山噴火、台風、暴風、暴雨、猛暑、寒波、洪水、砂漠化、竜巻、山火事など、非常に多様であり、世界各国はそれぞれの自然・社会状況に応じて対応策を講ずるために、基礎研究、応用研究がさまざまな機関において推進しているが、先端的で高度な研究開発は、我が国以外では米国と欧州に限られていると判断される。

米国における自然災害としては、ハリケーン、竜巻、津波、地震、火山噴火、地すべり、干ばつ、洪水、寒波などがあげられる。また、欧州諸国では、イタリアを除いて火山噴火や地震の発生は少なく、河川の氾濫や洪水の発生に伴う大きな被害が出ている。

#### ① 地震、火山噴火などの関連<sup>23)</sup>

米国では、火山災害に対する研究についても地質調査所 (USGS)<sup>24)</sup> が主体で実施しているが、日本のように必ずしも地震予知と火山噴火予知の観測研究が連携して行われてはいない。一方で、イタリアなどのヨーロッパ諸国の一部やニュージーランドのように地震や火山噴火活動が活発な地域では、日本と同様に地震と火山の研究の連

携が盛んである。

例えば、米国における代表的な研究プログラムとしては、下記のものあげられる。

1) 国家地震災害軽減計画（NEHRP：National Earthquake Hazards Reduction Program）<sup>23)</sup>

本計画には、連邦緊急事態管理庁（FEMA）、国立標準技術研究所（NIST）、国立科学財団（NSF）、地質調査所（USGS）の4つの政府機関が参画している。

このうち、USGSは全世界で大きな地震が起きるとリアルタイムで情報をホームページで公開しており<sup>25)</sup>、著名な地震研究者も多く所属するなど、地震学の世界の研究者にはよく知られている組織である。

2) 地震予知可能性についての国際共同実験（CSEP：Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability）<sup>23)</sup>

地震予知に関する研究としてその活動を高く評価されている。

② 台風、暴風、豪雨、洪水や渇水などの分野

1) 米国<sup>26)</sup>

2011年には、10億ドル以上の被害額のあった大規模な自然災害が14件発生し、ハリケーン・カトリーナの発生した2005年に次ぐ被害総額を記録した。続く2012年にもハリケーン・サンディが東海岸を直撃し、近年、ハリケーンによる災害が相次いでいる米国では被害を縮小するための対応策が求められた。これらの状況を受けて、政府機関、および民間企業によって災害に対するさまざまな取り組みが実施されている。例えば、下記のようなプログラムがあげられる。これらのプログラムを支える科学的な知見を生み出すべく、気候変動、その影響評価や適応策に関する研究開発が、大学や国の研究機関により実施されてきている。

i) ハリケーン予測向上プロジェクト（HFIP：Hurricane Forecast Improvement Project）

海洋大気庁（NOAA）では、2007年よりハリケーンの進路および強度をより正確に予測するための研究プロジェクトが進められた。本プロジェクトでは、ハリケーンモデルを活用することで、国立ハリケーンセンター（NHC）によるハリケーンの進路予測の正確度が近年目覚ましく向上してきている。本プロジェクトにおいて、海軍省（DON）や航空宇宙局（NASA）、国立科学財団（NSF）、内務省（DOI）をはじめとする6つの政府機関、およびコロラド州立大学やペンシルバニア州立大学を含む8つの学術機関と共同で、ハリケーン予測モデルの開発に係る研究に注力している。

ii) 気候変化対応プログラム（Responses to Climate Change Program）

気候変化・変動により生じる国の水インフラに対する潜在的な脆弱性を削減するために、実用的で、全国的に一貫性を持ち、費用対効果があるアプローチおよび政策を策定、実施した。陸軍工兵隊水資源研究所（IWR）、他の連邦科学・水管理機関、その他の利害関係者と連携した取り組みである。また、2008年に設立された「連邦気候変化および水に関する作業部会（CCAWWG：The Federal Climate Change and Water Working Group）」は、内務省開拓局（USBR）、陸軍工兵隊（USACE）、海洋大気庁（NOAA）、地質調査所（USGS）によるものである。

## iii) 陸軍工兵隊 (USACE) による気候変化適応プログラム

2010年から2014年までに、下記の項目を実施することが予定されている。

- ・ 影響に対する脆弱性のテストの実施
- ・ 気候変化への対処として許認可を決定する規制当局への支援
- ・ 下記の内容に関する検討方針の作成および実証
- ・ 水規制および貯水システムの運営
- ・ 変動する条件のもとでの水文頻度解析
- ・ 降雪条件および氷の影響、沿岸侵食および氷河ダムの決壊による予期せぬ洪水事象
- ・ 気候変化が生態系に与える影響

## iv) 連邦緊急事態管理庁 (FEMA) による次世代公衆警報システム (IPAWS : Integrated Public Alert Warning System) 開発プロジェクト

国家的非常時に国民への直接的な警報伝達手段を確立することを目的に、2009年にブッシュ前大統領の大統領命令により開発が進められ、2012年に導入が完了した次世代公衆警報システムである。

2) 欧州<sup>27)</sup>

欧州全体としての動向として、2000年12月に施行されたEU水枠組み指令 (WFD : Water Framework Directive) のもと、河川流域計画 (River Basin Management Plan) を策定するよう要求しており、最初の計画は2009年12月22日までに提出され、6年おきに更新しなければならないとされている。そして、2007年11月に発効したEU洪水指令 (Flood Directive) により、WFDで設定した流域単位を用いて洪水リスクの評価と管理の枠組みを構築することになっている。

上記のような指令のもとで、下記のような気候変化への適応の検討、洪水リスクの評価と管理の枠組みの構築を支える科学的な知見を生み出すべく、気候変動、その影響評価や適応策に関する研究開発が、大学や国の研究機関により実施されてきている。

## i) 気候変化への適応に関する白書

EUが気候変化の影響に適応するための二段階の戦略的アプローチを構築するもので、戦略の第1段階 (フェーズ1) は2012年まで実施され、2013年以降のフェーズ2で実施するEUの包括的な適応戦略の基礎を準備する。気候変化への理解を深め、採りうる適応措置を増やすこと、また、どのようにEUの重要な政策に適応措置を組み込むかという点に重点が置かれている。フェーズ1アプローチは、以下の4項目が基軸とされた。

- ・ EUへの気候変化の影響および結果に関する明確な知識ベースの構築
- ・ 適応策のEUの主要政策分野への取り込み
- ・ 適応策を効率的に実施するための政策手法の一体化 (市場を基盤とした手法、ガイドライン提示、官民協働 (PPP : Public Private Partnership) )
- ・ 適応策に関する国際協力

## ii) 水枠組み指令指針文書24 : 変化する気候条件における流域管理

2009年11月に、気候変化への適応に関する指針文書が公表され、洪水リスクの評

価と管理の枠組みの構築のために、以下の項目について指針が示されている。なお、洪水リスク予備評価は2011年12月22日までに、洪水ハザードマップおよび洪水リスクマップの整備は2013年12月22日までに、そして、洪水リスク管理計画の策定は2015年12月22日までに完了することが求められている。

- ・ 気候モデル、予測、シナリオ、影響の可能性と不確実性
- ・ 管理のための適応能力の開発
- ・ 水枠組み指令と適応
- ・ 洪水リスク管理と適応
- ・ 渇水管理・水不足と適応

#### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

自然災害によって引き起こされる環境影響あるいはそのリスクに関する研究開発は、地震発生、火山活動、さらには台風や干ばつなど気候変動に大きく左右されることから、その影響評価は自然災害の特殊性に留意すべきである。すなわち、非常に低い発生確率、非常に大きな被害規模、発生確率や被害規模の不確実性が高いことである。そして、災害に伴う直接的な被害だけでなく、外部や他者への負の影響も含めて広範な影響を考慮することが必要となる。

これらの特殊性を考慮すると、自然現象の予知や将来予測の精度向上のために調査研究、そのモデリング技術、それを裏付ける観測手法の高度化がバランスよく推進されることが必要である。すなわち、現象の把握のための調査や観測、そのデータのアーカイブ化、観測結果を再現できるモデル化やシミュレーション技術、そしてリアルタイム計算のための高速化、モデル予測精度の検討を支えるモニタリングやモデル検証データの取得など、学際的な枠組みで研究プログラム、プロジェクトを継続的に実施することが求められる。同時に、短期的な成果主義とならないように、若手研究者の育成も含めて長期的な視点での研究成果の蓄積、継承を目指したプログラム、プロジェクトとすべきである。

特に、気候変動に関わる研究開発は、国際的な枠組みのなかで先端的な研究成果を生み出し、DIASで実施されているように、最新の気象観測結果やモデルシミュレーション結果をアーカイブ化してデータ共有できることが研究開発推進には必須である。また、対象とすべき現象が大規模でありその災害も広域化していることから、国際的な協力関係のなかで、気象観測や災害状況把握のためのネットワーク構築、広域での観測に有効な衛星センサや衛星画像の活用研究も重要性が高いと考えられる。

政策的な課題としては、さまざまな主体がこの研究開発領域を推進させるためにも、火山活動や地殻変動に関わる地震や火山噴火が問題となる地域、沿岸域が問題となる津波や高潮、温暖化に伴う気象変化に伴う発生する地球規模での自然災害など、自然災害のタイプ別に、その災害に影響を受けて先端的な研究を実施している海外諸国の研究機関と連携する国際共同研究の推進が求められる。その際、我が国がリードしている地震や津波研究、気候モデルや気象モデルの研究では、米国や欧州とともに中核拠点として国際的な研究開発を推進することが必須である。

また、気象予報ビジネスは、気象業務法の制約のなかで実施されていると思われる。

今後の社会的な便益を考えると、気象庁と国土交通省の公的機関と民間機関がいかに補完的に機能するかを考えたい。研究開発を進めることが期待される。

さらに、自然災害リスク評価やリスクマネジメントの研究開発に関しては、保険会社など民間企業のビジネスとの関係性も深いことから、民間企業のCSRとしてだけでなく、企業と社会がWin-Win関係となる連携研究プロジェクトを支援する仕組みが求められる。その際、研究成果の公表や社会での共有のあり方に留意が必要である。

#### (5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

##### 1. 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第5次評価報告書 (AR5) <sup>28-30)</sup>

2014年3月31日に、第2作業部会報告書 (影響・適応・脆弱性) が公表された。本報告書では、新たな知見をもとに、観測された影響と将来の影響および、脆弱性について地域・分野別に、より具体的に評価するとともに、適応策についても実際の適用を念頭に整理されている。また、世界全体の気候変動による主要リスクの抽出とその評価を行ったことに加えて、地域別の主要リスクとそれに対応した適応の有無によるリスクの変化について評価している。

したがって、今後は自然現象の予知、それに伴う災害発生や被害予測、さらにその対策や適応策を含めた形で、災害の影響評価やリスク評価、さらにはリスク管理に向けた知見を生み出すことが期待される。そのためにも、外力である自然現象の将来予測精度を向上させること、影響要因とその影響度の定量化を充実することが求められる。

##### 2. 日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測

環境省から2015年度夏頃に予定している「適応計画」策定に向けた取り組みとして、日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測を行った結果が2014年6月6日に公表されている。この種の予測結果の活用が期待される。

##### 3. 大学などの研究機関の活動支援

東北大学災害科学国際研究所 <sup>31)</sup> における寄付研究部門のように、保険会社が大学や研究機関と連携した講座や実証実験を進めているように、研究開発の成果が実社会やビジネスとつながる環境を支援すること、また、東北大学とNECと国際航業により大規模地震発生時の津波浸水被害をリアルタイムに予測する実証事業 <sup>32)</sup> のように、大学と企業の連携が推進されることが期待される。

#### (6) キーワード

気候変動、適応策、極端現象、観測監視システム、リアルタイム観測、活断層、長周期地震動、局地的大雨、XバンドMPレーダ、影響評価指標、リスク評価指標、適応策評価指標、ハザードマップ、リスクマップ、リスクマネジメント、リスクコミュニケーション

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震や火山活動に関しては、2008年から「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」、2013年からは「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」が文部科学省主導で進められている<sup>1)</sup>。</li> <li>地震・火山・風水害・雪氷災害の観測・予測技術に加えて、耐震技術開発、災害情報活用手法に関して、防災科学技術研究所にて研究開発が進められている<sup>5)</sup>。</li> <li>海域断層、活断層調査、地震の長期予測に必要となる調査観測データ収集の基礎研究が展開されている。また、海域において地震・水圧計を設置してリアルタイム観測網を整備して、緊急地震速報や津波警報の高度化即時予測技術開発、地震発生メカニズムの解明のための研究が進められている<sup>6)</sup>。</li> <li>自治体の防災計画策定の支援や被害軽減のため、地震被害予測、長周期地震動ハザードマップづくりなどの地震防災研究も進められている。</li> <li>「21世紀気候変動予測革新プログラム」<sup>7)</sup>において、温暖化予測モデルの高度化および予測、不確実性の定量化・低減、自然災害に関する影響評価の研究が展開された(2007～2011年度)。</li> <li>台風や豪雨などは、気候変動に大きく影響を受けることから、気候変動適応戦略イニシアチブのもと、「気候変動適応研究推進プログラム」<sup>9)</sup>、「地球環境情報統合プログラム」<sup>10)</sup>が文部科学省主導で推進されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>2009年に、地球環境研究総合推進費戦略的研究プロジェクト<sup>11)</sup>による長期的な気候安定化レベルと影響リスク評価の成果が公表された。</li> <li>2013年に、気候変動の観測・予測・影響評価に関するレポート「日本の気候変動とその影響(2012年度版)」<sup>13)</sup>が環境省から公表された。</li> <li>2010年に、内閣府中央防災会議「大規模水害対策に関する専門調査会」<sup>20)</sup>が、大規模水害発生後の被害を最小限にとどめるための対策について検討を進めた。</li> <li>2013年に、中央防災会議防災対策推進検討会議の下で、東日本大震災を踏まえた南海トラフ地震の想定規模と予想経済被害額の見直しが行われた。</li> <li>2008年に「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方」<sup>17)</sup>が国土交通省社会資本整備審議会から答申された。</li> <li>国土交通省国土技術政策総合研究所において、政策反映のためのプロジェクト研究「気候変動下での大規模水害に対する施策群の選定・選択を支援する基盤技術の開発」(2010～2013年度)<sup>33)</sup>が実施された。</li> <li>土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター(ICHARM)<sup>19)</sup>では、中期プログラムとして、水関連ハザードに係わる観測・予測・分析を行うための手法を開発し、水関連災害リスクの評価する研究が推進されている。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>XRAIN情報<sup>34)</sup>が企業にも提供される予定であることから、これらの情報を活用した企業活動が活性化すると推察される。</li> <li>(株)ウェザーニューズなどのようにモニタからの情報提供を受けて気象予報に活用している企業が活躍しており、現在気象庁や国土交通省、さらには気象協会のような公的な機関が提供している気象情報の提供に関して、公的な役割の一部を民間企業が行うことも検討すべきである<sup>35)</sup>。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>政府機関などが中心となり長期に渡って取り組んでいる自然災害予測の研究や緊急時の警告システムの開発プロジェクトの成果がある。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震予知研究の体制も構築されている<sup>23)</sup>。</li> <li>全球モデルの運用による数値予報センターがあり、現業での高解像度モデル(格子間隔 5 km以下)もカナダとともに二つが運用されている<sup>35)</sup>。</li> </ul>

	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・災害リスクマネジメント研究<sup>36)</sup>では、地震やハリケーンのような大災害リスクへの対処としてリスクを移転・分担することで災害発生の前後における資産や環境の平滑化を可能とするリスクファイナンス研究が展開されている。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震や火山関連の研究は、イタリアなどの当該災害のある諸国で実施されているが、大半の国では洪水や干ばつなどの水災害を対象とした基礎研究が実施されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・気象予測では、重要な全球モデルの運用において、ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) による予報精度が世界一と言われている。また、英国、フランス、ドイツも同時の数値予報センターを有している<sup>35)</sup>。</li> <li>・国際応用システム分析研究所 (IIASA) が政策科学やシステム科学という学際的・国際的研究者コミュニティのネットワークの中核として影響力を有している<sup>36)</sup>。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現業での高解像度モデル (格子間隔5 km以下) は、欧州内9か国で運用されていることから、気象予測など応用研究は進展していると判断される<sup>35)</sup>。</li> </ul>
中国	基礎研究	×	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・災害状況観測、情報収集、評価システムの開発の遅れが認識されているが、目立った研究開発成果は公表されていない。また、自然災害情報の蓄積なども体系立てて行われていないものと思われる<sup>37, 38)</sup>。</li> <li>・気候変動影響評価の報告書ははまだ発表されておらず、将来の自然災害に深く関わる、観測された気候変動や将来気候予測に関する整理はなされていないものと思われる。</li> </ul>
	応用研究・開発	×	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・自然災害の頻発を受けて、2010年10月の第12次5ヵ年計画建議<sup>37, 39)</sup>においても、洪水防止・地質災害防止対策を重点とする防災減災システムの建設の重要性は謳われているが、応用的な研究開発の成果は国際的には公表されていない。</li> </ul>
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・気象予測に関連した全球モデルでの数値予報センターはあるものの、現業での高解像度モデル (格子間隔5 km以下) の運用はない<sup>35)</sup>。</li> <li>・自然災害への保険などの制度も不明であり、産業化に関する顕著な活動や成果は把握できていない。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2013年に、High Impact Weather Research Centre (Gangneung-Wonju National University) により、GIS技術とモデルによる12時間気象予測を組み合わせて、自然災害を予測するツール開発をしている例がある<sup>40)</sup>。</li> <li>・気候変動影響評価の報告書 (Korean Climate Change Assessment Report 2010: Technical Summary)<sup>41)</sup>を環境部、国立環境科学院 (NIER) が公表しており、観測された気候変動と気候予測がまとめられている。しかし、将来影響に関する研究・調査の不足と、対象分野における適切な適応戦略構築のための脆弱性に関する調査・研究の不足をあげている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・消防防災庁 (NEMA)<sup>42-44)</sup>が、自然災害に対応するための総合的な政策を統括しており、国立防災研究所 (NIDP) が研究や技術開発を担っている。目立った成果は国際的に公表されていない。</li> <li>・土木関連では建設技術研究院 (KICT) において、降雨予測や治水対策関連の研究開発が実施されていると判断される。KICTは日本の国土技術研究センター (JICE) と合同技術セミナー<sup>45)</sup>を継続的に実施してきている。</li> <li>・韓国中央政府による雨水収集管理の推進を受けて、一部大都市 (ソウル、スウォンなど) ではICT活用の雨水利用と豪雨対策とを統合した管理の動きがある<sup>46)</sup>。</li> </ul>
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・気象予測に関連した全球モデルでの数値予報センター、現業での高解像度モデル (格子間隔5 km以下) の運用が日本と同様に行われている<sup>35)</sup>。</li> <li>・土砂災害などの早期警戒技術のアジア共同開発に、日本とともに参加しており、一部、産業化に関する活動が実施されている<sup>47)</sup>。</li> </ul>

## (註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

## (註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

## (註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) 文部科学省. 平成26年版科学技術白書 第2部 第3章 我が国が直面する重要課題への対応.  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/hakusho/html/hpaa201401/detail/1349647.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa201401/detail/1349647.htm)
- 2) 文部科学省. 「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」実施計画（平成23年度修正版）. 2011.  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/sonota/1288570.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/sonota/1288570.htm)  
文部科学省. 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について（建議）. 2013.  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/toushin/1341559.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/toushin/1341559.htm)
- 3) 産業技術総合研究所. 地質調査総合センター.  
<https://www.gsi.jp/HomePageJP.html>
- 4) 産業技術総合研究所. 地質調査総合センター. 巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究.  
<https://www.gsi.jp/researches/project/multiple-geohazards/index.html>
- 5) 首相官邸. 行政改革推進会議. 独立行政法人改革等に関する分科会第1ワーキンググループ（第6回）配布資料. 防災科学技術研究所における研究開発の概要.  
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/gskaigi/kaikaku/wg1/dai6/siryou2-2.pdf>
- 6) 海洋研究開発機構（JAMSTEC）. 地震津波海域観測研究開発センター.  
<https://www.jamstec.go.jp/donet/j/>
- 7) 文部科学省・JAMSTEC 21世紀気候変動予測革新プログラム  
<http://www.jamstec.go.jp/kakushin21/jp/>  
<http://www.jamstec.go.jp/kakushin21/jp/reports.html>
- 8) 環境省. 日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測について（お知らせ）. 2014.  
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=18230>
- 9) 気候変動適応研究推進プログラム.  
<http://www.mext-isacc.jp/>
- 10) 地球環境情報統融合プログラム.  
<http://www.editoria.u-tokyo.ac.jp/projects/dias/>
- 11) 環境省. 地球環境研究総合推進費戦略的研究プロジェクト「温暖化影響総合予測プロジェクト」成果発表について～地球温暖化「日本への影響」-長期的な気候安定化レベルと影響

- リスク評価- ～. 2009.  
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=11176>
- 12) 環境省環境研究総合推進費  
S-8 温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究  
[http://www.nies.go.jp/s8\\_project/](http://www.nies.go.jp/s8_project/)  
S-9 アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合研究  
<http://s9.conservationecology.asia/>  
S-10 地球規模の気候変動リスク管理戦略の構築に関する総合的研究  
<http://www.nies.go.jp/ica-rus/index.html>
- 13) 環境省. 気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート『日本の気候変動とその影響』  
(2012年度版). 2013.  
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=16548>  
[http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rep130412/report\\_full.pdf](http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rep130412/report_full.pdf)
- 14) 環境省. 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 「気候変動への適応推進に向けた極端現象及び災害のリスク管理に関する特別報告書」の公表について (お知らせ). 2011.  
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=14453>  
IPCC. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX).  
<http://ipcc-wg2.gov/SREX/report/>
- 15) 京都大学 防災研究所 沿岸災害研究分野  
<http://www.coast.dpri.kyoto-u.ac.jp/ja/index.php?Research%2FProject#w4109020>  
[http://www.coast.dpri.kyoto-u.ac.jp/japanese/?page\\_id=322](http://www.coast.dpri.kyoto-u.ac.jp/japanese/?page_id=322)
- 16) 環境省, 地球温暖化影響・適応研究委員会報告書「気候変動への賢い適応」。2008.  
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=9853>  
<http://www.env.go.jp/press/files/jp/11627.pdf>
- 17) 国土交通省. 社会資本整備審議会. 水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について (答申). 2008.  
[http://www.mlit.go.jp/river/basic\\_info/jigyo\\_keikaku/gaiyou/kikouhendou/pdf/toshin.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/kikouhendou/pdf/toshin.pdf)
- 18) 国土交通省. 第11回気候変動に適応した治水対策検討小委員会 資料3. 水災害分野に係る最近の主な動向等.  
[http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shou-inkai/kikouhendou/11/pdf/s3-1.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shou-inkai/kikouhendou/11/pdf/s3-1.pdf)
- 19) ICHARM中期プログラム (およそ 5 年).  
[http://www.icharm.pwri.go.jp/about/pdf/m\\_programme\\_J.pdf](http://www.icharm.pwri.go.jp/about/pdf/m_programme_J.pdf)
- 20) 内閣府. 中央防災会議「大規模水害対策に関する専門調査会」. 大規模水害対策に関する専門調査会報告 首都圏水没～被害軽減のために取るべき対策とは～. 2010.  
[http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/daikibusu-igai/pdf/100402\\_shiryo\\_2.pdf](http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/daikibusu-igai/pdf/100402_shiryo_2.pdf)

- 21) 岩城成幸、「VI 自然災害と緊急時対応」、『総合調査報告書 主要国における緊急事態への対処』、国立国会図書館調査及び立法考査局、2003。  
<http://www.ndl.go.jp/jp/diet/publication/document/2003/1/20030109.pdf>
- 22) NICT欧州連携センター、調査報告書「欧州における耐災害ICTの研究支援政策及び研究開発の動向調査」 - . 2012。  
[http://www.nict.go.jp/int\\_affairs/int/4otfsk000000osbq-att/re121130.pdf](http://www.nict.go.jp/int_affairs/int/4otfsk000000osbq-att/re121130.pdf)
- 23) 文部科学省. 科学技術・学術審議会 測地学分科会 (第26回)・地震火山部会 (第9回) 合同会議 資料3. 最近の海外における地震予知研究の動向 (報告) . 2012。  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/siryo/\\_icsFiles/afield-file/2012/07/18/1323577\\_05.pdf](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/siryo/_icsFiles/afield-file/2012/07/18/1323577_05.pdf)
- 24) 米国地質調査所 (USGS) . Natural Hazards.  
[http://www.usgs.gov/natural\\_hazards/](http://www.usgs.gov/natural_hazards/)
- 25) 村川恭介、米国の地震観測体制、スペースレフ。  
[http://www.spaceref.co.jp/homepage/colum/images/US\\_earthquake\\_observation.pdf](http://www.spaceref.co.jp/homepage/colum/images/US_earthquake_observation.pdf)
- 26) (株)NTTデータ、米国における災害への取組みの最新動向、2013。
- 27) (一財)国土技術研究センター. 欧米諸国における治水事業実施システムー気候変化を前提とした治水事業計画ー . 2011。  
<http://www.jice.or.jp/jishu/t1/201107070.html>
- 28) AR5 第1作業部会の報告『気候変動2013・自然科学的根拠』  
環境省. 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 (自然科学的根拠) の公表について (お知らせ) . 2013。  
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=17176>  
IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. 2013.  
<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- 29) AR5 第2作業部会の報告『気候変動2014・影響・適応・脆弱性』  
環境省. 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第5次評価報告書 第2作業部会報告書 (影響・適応・脆弱性) の公表について (お知らせ) . 2014。  
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=17966>  
IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. 2014.  
<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- 30) AR5 第3作業部会の報告『気候変動2014・気候変動の緩和』  
環境省. 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第5次評価報告書 第3作業部会報告書 (気候変動の緩和) の公表について (お知らせ) . 2014。  
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=18040>  
IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. 2014.  
<http://ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
- 31) 東北大学. 災害科学国際研究所. 地震津波リスク研究部門 (東京海上日動) .  
<http://irides.tohoku.ac.jp/organization/donation/01.html>

- 32) 日本電気(株). 東北大・NEC・国際航業、大規模地震発生時の津波浸水被害をリアルタイムに予測する実証事業を推進. 2014.  
[http://jpn.nec.com/press/201408/20140801\\_01.html](http://jpn.nec.com/press/201408/20140801_01.html)
- 33) 国土交通省国土技術政策総合研究所. 国総研資料第749号 気候変動適応策に関する研究 (中間報告) .  
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0749.htm>
- 34) 国土交通省. XRAIN (XバンドMPレーダネットワーク) 配信エリア新設. 2014.  
[http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03\\_hh\\_000786.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000786.html)
- 35) 東京大学 エネルギー工学連携研究センター (CEE) ワークショップ「再生可能エネルギー発電導入のための気象データ活用」講演資料. 気象庁数値予報の現状と展望. 2014.  
[http://www.ogimotolab.iis.u-tokyo.ac.jp/html/workshop/20140325/20140325\\_12.pdf](http://www.ogimotolab.iis.u-tokyo.ac.jp/html/workshop/20140325/20140325_12.pdf)
- 36) 損害保険料率算出機構. 地震保険研究. 「第1章 米国における災害リスクマネジメント研究の最近の動向」『巨大災害リスクに関する研究』. 2003.  
[http://www.giroj.or.jp/disclosure/q\\_kenkyu/No04\\_B.pdf](http://www.giroj.or.jp/disclosure/q_kenkyu/No04_B.pdf)
- 37) 宮尾恵美. 「中国の気象災害への取組み —気象災害防衛条例の制定—」. 外国の立法. No.245. 国立国会図書館調査及び立法考査局. 2010.  
<http://www.ndl.go.jp/jp/diet/publication/legis/pdf/024507.pdf>
- 38) JST. SciencePortal China. 中国の地震防災の現状と展望. 2008.  
[http://www.spc.jst.go.jp/hottopics/0901earthquake/r0901\\_he.html](http://www.spc.jst.go.jp/hottopics/0901earthquake/r0901_he.html)
- 39) 財務省財務総合政策研究所. 平成22年度第1回中国研究会. 中国共産党第12次5ヵ年計画建議のポイント. 2011.  
[http://www.mof.go.jp/pri/research/conference/china\\_research\\_conference/2010/22\\_01a.pdf](http://www.mof.go.jp/pri/research/conference/china_research_conference/2010/22_01a.pdf)
- 40) United Nations Office for Outer Space Affairs (UN-SPIDER) . South Korea develops new GIS-based weather model to forecast disasters. 2013.  
<http://www.un-spider.org/about-us/news/south-korea-develops-new-gis-based-weather-model-forecast-disasters>
- 41) 韓国政府環境部 韓国国立環境研究院 (NIER) . Korean Climate Change Assessment Report 2010: Technical Summary  
<http://webbook.me.go.kr/DLi-File/NIER/09/5254103.pdf>
- 42) 平成18年度大学教育の国際化推進プログラム『リスク管理共通教育中核教員団の養成』講演会「韓国の災害リスクとリスク管理教育」.金賢珠「韓国の災害管理システムと国立防災研究所の役割」. 2007.  
[http://www.soft.risk.tsukuba.ac.jp/miyamoto/FD\\_reports2006/shiryo/kouennkai\\_0703021.pdf](http://www.soft.risk.tsukuba.ac.jp/miyamoto/FD_reports2006/shiryo/kouennkai_0703021.pdf)
- 43) 藤原夏人. 「韓国の災害法制」. 外国の立法. No.251.国立国会図書館調査及び立法考査局. 2012.  
[http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo\\_3487063\\_po\\_02510008.pdf?contentNo=1](http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_3487063_po_02510008.pdf?contentNo=1)
- 44) National Disaster Management Institute, Korea  
<http://eng.ndmi.go.kr/>

- 45) (一財)国土技術研究センター. 第23回/第24回 日・韓建設技術セミナー  
<http://www.jice.or.jp/international/nikkan/201310010.html>  
<http://www.jice.or.jp/international/nikkan/201210010.html>
- 46) 韓国における雨水集水管理の現状  
水循環 貯留と浸透Vo. 78, 78-43, 2010 雨水貯留浸透技術協会
- 47) JST.旧科学技術振興調整費平成19年度採択課題「土砂災害等の早期警戒技術のアジア共同開発」.  
<http://scfdb.tokyo.jst.go.jp/pdf/20071450/2009/200714502009rr.pdf>

### 3.4.4.2 人為的災害（工場等での事故、危険物質運搬時の事故等）が環境へ及ぼすリスク

#### （1）研究開発領域名

人為的災害（工場等での事故、危険物質運搬時の事故等）が環境へ及ぼすリスク

#### （2）研究開発領域の簡潔な説明

産業活動に伴い環境に排出される有害物質による汚染（公害）に加えて、工場などの設備・施設の故障や操作ミスなどによって起こる火災・爆発、有害化学物質の漏洩や危険物質などの運搬時に起きる人為的災害が、人間の生命・健康、生活環境、生態系などに及ぼすリスクへの対応と対策、さらにリスクの予測と予防に関する技術的および政策・制度的な研究が今後とも重要である。

#### （3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

工場などの製造設備・施設の定常的な運用時に排出される有害物質による大気、水質、土壌などの汚染、いわゆる産業公害のほかに、工場などの設備・施設の故障や人為的な操作ミスなどによって突発的に起こる火災・爆発、有害物質の漏洩、放出などの事故、自動車、列車などによる危険物質などの運搬時に起きる事故による災害がある。これらの人為的災害による環境へのリスクを把握、評価し、リスクを適切に管理していくことは、「化学物質が人の健康と環境にもたらす著しい悪影響を最小化する方法で使用、生産されることを2020年までに達成する」というヨハネスブルグ宣言の目標に沿っており、安全と安心の確保された社会の確立に資する重要な研究開発領域である。

化学工場などで起こる事故、危険物質などの輸送時に起こる事故には、可燃性、引火性、爆発性などをもつ危険物質の燃焼や爆発、有害化学物質の漏洩、放出、流出などがある。1976年、イタリアのセブソでは、テトラクロロベンゼンから2,4,5-トリクロロフェノールを製造する工程で異常な温度上昇が起これ、非意図的に生成したダイオキシンなどが大気中に放出されて多数の人、家畜が暴露され、1,800 haもの土地が汚染された<sup>1)</sup>。1984年にはインド、ボパール<sup>2)</sup>の農薬製造工場でタンクの安全弁が破裂し、毒性の高いイソシアン酸メチルが約40 t流出、拡散して数千人が死亡し<sup>2)</sup>、土壌、地下水の汚染が長期間続いた（BBC2004年放送）。日本ではこれほど大規模な災害は発生していないが、過酸化ベンゾイル（1990年、8名の死亡）、ヒドロキシルアミン（2000年、4名死亡、近隣住民など約60名が負傷）など危険物の爆発や硫化水素、ホスゲン、一酸化炭素など毒性の強い物質の漏洩、放出が起きている<sup>3)</sup>。

これらの人為的災害を契機として安全に対する要求が高まり、化学工業界による安全ガイドラインの作成、国や自治体などによる法規制などが進められてきたが、災害の発生は依然として続いている。日本原子力研究開発機構の化学工場などでの事故に関するデータベース<sup>4)</sup>には、2000年から2010年の10年間に国内外で起こった約350件（国内：約240件）が記載されている。事故の原因となった物質あるいは漏洩、放出、流出した物質は100種類近くもある（LNG、LPG、ガソリンなどの炭化水素類、有機溶剤や酸素、窒素、硫黄、塩素、フッ素などを含むさまざまな有機化合物に加えて、アンモニア、窒素酸化物、シアン化水素、塩酸、硫酸、塩素、ホスゲン、フッ化水素やフルオロスルホ

ン酸、硫黄、硫化水素、リン酸、三塩化リンなどの無機化合物)。なお、2001年のフランス南部の肥料製造工場における硝酸アンモニウム300tの爆発(周辺住民を含む31名の死亡と約2,500人の負傷者)<sup>3)</sup>など、大規模な粉じん爆発が世界的に繰り返し発生している。

輸送中の災害件数は工場などのそれよりも少ないが、2004年にイランで起こった貨物列車で輸送中の硫黄、ガソリン、化学肥料、原綿などの爆発(死者300名以上、多くが消防隊員)<sup>3)</sup>、2005年に米国サウスカロライナ州で起こった2台の貨物列車の衝突による積荷の塩素ガス流出(9名の死亡、500名以上の被災)<sup>3)</sup>などの大規模な災害がある。日本では危険物を搭載したトラック・タンクローリーの事故が多く<sup>5)</sup>、5t積みタンクローリーの横転事故によるLPガスの噴出と炎上(1965年、5名の死亡、負傷者26人、家屋焼失31棟)を筆頭に、首都高速道路側壁への衝突で満載していたガソリンと軽油の炎上(2008年)などがあり、化学物質関連では、積載したタンク中の過酸化水素の爆発(1990年)、交通事故で出火してクロルピクリンが漏洩(1993年、1名の死亡)、横転でステアリン酸クロライド1.6tが流出し、雨水との反応で塩化水素が発生(1997年、菊川事故)などがある。

産業公害は1950年代後半から1970年代の高度経済成長期に発生し、発生源周辺の住民などに多大な健康被害をもたらした。「四大公害病」(イタイイタイ病、水俣病、第二(新潟)水俣病と四日市ぜんそく)の公害、その後の大気汚染問題(窒素酸化物、浮遊粒子状物質、有害大気汚染物質など)、水質汚濁問題(有機汚濁物質、窒素とリン、有害物質など)について、大気汚染防止法、水質汚濁防止法などによる規制をベースとして、総合的な防止対策(排出抑制基準などの制定、排ガス・排水など処理技術の開発、公害防止設備などの導入推進などへの投資と支援、公害防止を担う人材の育成と活用)の実施によって汚染物質の排出量が抑制され、環境リスクが低減されてきた。一方、光化学オキシダントや微小粒子状物質(PM<sub>2.5</sub>)のように、環境基準達成率が依然として低く、原因の解明、対策が進められている課題もある。

産業公害と工場などの事故との際立った違いは、前者が施設・設備の定常的な運用時に排出される有害物質によるものであるのに対し、後者では事故がどこで、いつ発生するかほぼ予測できないこと、短い時間内に現場の作業員、輸送担当者、近傍の住民が被災すること、さらに、漏洩、流出した有害物質が周辺地域の空気、水、土壌などを汚染し、人、動植物などが暴露されて健康被害などが生じることである。前述したように、化学工場などにおける災害の事象、原因は一様ではなく、漏洩、流出、拡散される有害物質も多種多様である。

これらの人為的災害によるリスクへの対応には、災害の状況と原因の把握およびリスクの評価が必要であり、その結果に基づいてリスクを適正に管理する技術、方法などを検討、実施していくことになる<sup>6)</sup>。具体的には次に示すような項目と研究開発課題があげられる。

## 1. 災害の状況と原因の把握

### ① 原因物質などの同定(分析測定)

- ・原因物質、反応生成物を分析測定する技術、機器の開発と整備(迅速・簡易分析が可能な検知管、センサなど、原因物質、反応生成物の同定、定量用の分析機器、分析シ

システムの開発)

- ・原因物質などに関する情報の迅速な入手 (有害物質の物理的・化学的性状、暴露で生じる症状などに関するデータ、事業者などの持つ情報、積荷書類や危険有害性を周知する標札、標識など)

## ② 漏洩、流出した有害化学物質などの挙動と汚染状況の推定

- ・火災・爆発による物質、エネルギーなどの拡散・移動を計算/推測するモデルの選択/開発 (災害発生後短時間内で挙動の推定)
- ・漏洩、流出した有害物質などの環境動態モデルの選択/開発 (有害物質の反応、変質も考慮して有害物質などの濃度の空間的、時間的変化などをシミュレーション)

## 2. リスクの評価

人為的災害では、化学工場などでの火災・爆発などの物理的現象による危険性および、漏洩、流出した物質の有害性による健康、生態系への影響の、二つの潜在的なリスク (ハザード) がある。これらのハザードに暴露される量 (確率) をかけることでリスクが評価される<sup>7)</sup>。

### ① 火災・爆発などによるリスク (フィジカルリスク) の評価

- ・人や構造物などに対する被害の大きさ (影響度) の評価: プロセスの種類・条件 (温度、圧力など) および化学物質の物理的・化学的な特性 (可燃性、燃焼性、引火性、発火点、蒸発性など) などに関するデータ<sup>8)</sup> の収集とモデル計算による影響度の推定・評価
- ・発生する確率の評価: プロセスのハザード解析とヒューマンエラーなどの考察

### ② 有害性による健康、生態系へのリスク評価

- ・原因物質、反応生成物などの有害性評価: 刺激性、窒息性、麻酔性、毒性、発がん性などのデータ<sup>8)</sup> の収集、毒性試験の実施など
- ・有害物質の暴露量評価: 災害発生場所、環境媒体中の有害物質濃度の実測あるいはモデルによる計算、暴露の経路、有害物質取込み量の計算・推定、毒性・リスク評価の指標<sup>8)</sup>
- ・疫学調査: 被災地域における人の集団を対象とした疾病と原因物質などへの暴露の因果関係調査

## 3. 対策と予防 (リスク削減、リスク管理)

公害対策では主として後処理技術 (排煙脱硫法、活性汚泥法など) の開発と導入によって汚染物質の排出量が削減されてきたが、化学工場などや輸送中の事故の処理としては、放水、薬剤散布などに留まることが多い。人為的災害のリスクを減らす対策としては、事故発生の予防、事故による被災・被害の最小化が主に検討されてきており、次のような項目がある。

### ① 技術的対策<sup>9)</sup>

- ・設備の設置場所 (隔離など)、機器の構造・操作の単純化、受動的・能動的な安全装置、換気、漏洩防止、警報など
- ・穏和なプロセスへの転換、危険・有害物質の使用削減・代替など

### ② 管理的対策 (マニュアルの整備と徹底)<sup>9)</sup>

- ・事故発生確率の高い設備の稼働開始・終了時あるいは異常時での対応手順、プラント

- の保守プログラム、プロセスの危険性分析、人への暴露の削減、避難手順など
  - ・ヒューマンエラーの最小化
  - ・プロセス安全マネジメントシステムの構築と運用、ハザードアセスメントなどの実施
- ③ 人為的災害に関するデータベースの構築と活用<sup>10)</sup>
- ・過去に発生した人為的災害に関して、事故の原因、状況などを解析し、再発防止の方針、方法などが記載されている資料（報告、論文など）の収集とデータベース化

#### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

公害防止に関しては、防止技術・装置などのコスト、エネルギー消費量などを低減する技術開発が民間主体で継続されている。一方、環境装置などのビジネスは縮小傾向が続いており、東南アジアなどへの輸出競争力の強化が技術面だけではなく政策的課題にもなっている。大気中で生成する光化学オキシダントや微小粒子状物質（PM2.5）の環境基準達成率は依然として低く、前駆物質（窒素酸化物、揮発性有機化合物など）の発生源インベントリ（排出箇所、排出量など）、大気中での生成機構とシミュレーションモデル、国境を越えた移流などを明らかにする総合的な研究の推進や中国、韓国などとの協力が求められている。なお、2013年10月に熊本市および水俣市で、「水銀に関する水俣条約」が全会一致で採択されており、今後、水銀の地球規模でのリスク管理のために発生源対策を含むさまざまな取り組みが求められている。

化学工場などでの災害に関しては、火災、爆発など高速の現象による物質、エネルギーの拡散移動、環境中における有害化学物質などの変換・反応、沈着などをシミュレーションするモデルについて基礎研究の充実と実用化の推進が重要である。化学工場などで火災、爆発、漏洩、流出などの事故が起こった場合、消防法、高圧ガス保安法、毒物・劇物取締法、労働安全衛生法、大気汚染防止法、水質汚濁防止法などの法律にかかわる措置が必要であり、届出先は多くの行政機関にまたがっている。このため、個々の省庁に人為的災害のデータ、データベースが分散しており、これらを統合して、災害発生時に容易にアクセスして必要な情報を取得・利用できるデータシステムの構築が求められている。化学物質の有害性などについても同様であり、省庁横断的な情報基盤の整備と運用が重要である。

#### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

米国では、化学工場などの災害による人的損失は減少しているが物的損害は拡大する傾向が指摘されている。その理由として、プラントなどの運転・制御の自動化が進み、作業員の安全・健康上のリスクが減る一方で、危険性を感知して問題に対処する能力のある熟練作業員の減少があげられている<sup>9)</sup>。日本では2011年からの4年間に火災・爆発と死亡を伴う大きな事故が5件（シリコン、アクリル酸、塩化ビニルモノマー、レゾルシンの製造施設、マグネシウムなど金属加工施設）も発生しており、「人材不足と急激な増産が事故増加の背景にある。生産工程の自動化が進んでも、機材の調整などはまだ人手によるところが多い」との指摘がある<sup>11)</sup>。長距離輸送の高速バス、トラックでも事故が増加しており、人為的災害のリスク増加の対応には人文・社会科学の観点からの考察も求められている。

先進的材料として期待されているカーボンナノチューブ、フラーレン、酸化チタンなどのナノマテリアルの研究開発が進み、量産化の段階に入ってきた材料が出てくるに伴って、製造・取扱い作業現場でのリスク評価（ナノマテリアルの濃度計測、暴露量、有害性など）から製品の利用、廃棄の過程も含めたライフサイクルにおける安全性（リスク）が活発に検討されている。今後、ナノマテリアルの製造、輸送時に起こりうる事故によって発生が予想される事象、リスク評価、さらに災害の予防、リスク管理に関する基盤的研究の展開が重要である。

#### (6) キーワード

人為的災害、安全、環境リスク、分析測定技術、環境動態モデル、データベース（有害性、災害事例）、リスク評価、リスク管理

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・リスク評価に必要な有害物質の分析測定技術、環境動態モデルなどの研究は欧米と同等のレベルになってきている。</li> <li>・有害性のリスク研究は欧米とほぼ同水準になっているが、フィジカルリスクについてはやや劣っている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・有害物質などの分析測定技術は高いレベルを維持しており、国際標準化活動も活発になってきている。</li> <li>・有害性、毒性のデータ取得、予測については国際機関などのプロジェクトへの参加などによってレベルが上がっている。</li> <li>・有害性、人為的災害の事象、原因などの情報、データベースを統合化し、アクセスしやすいシステムの構築・運用が求められている。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・有害物質の処理装置などの省エネ・省コスト化が進められているが、環境装置関連のビジネスは順調とはいえない状況にある。</li> <li>・工場などでの災害が減少していない状況であり、人材の確保、育成が求められている。</li> <li>・災害のリスク評価、リスク管理関連のビジネス化の兆しはみられている。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・分析測定技術は日本と同等レベルであるが、リスクの評価、対策についてはシミュレーションモデル、有害性のデータベースをはじめとして、ほぼすべての項目で高い研究水準を保っている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現実のニーズを把握し、それに対応した技術、手法、データベースの開発が継続している。</li> </ul>
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・プロセスの安全性を包括的に評価し、管理する手法を開発し、実際の事業所などに適用していくビジネスモデルができていますが、市場規模は大きくはない。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・分析測定技術は各国のポテンシャルで、モデル、データベースなどについてはEUとして開発を推進して、高い水準を維持している。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・分析計測技術では国際標準化、認証制度などによって市場における優位性を保っている。</li> <li>・環境マネジメント、リスクマネジメントなどについても国際標準化を主導している。</li> </ul>
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・有害性に関するデータベース、システムを構築し、REACH（Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals）などを実施して新たなビジネスとしている。</li> </ul>
中国	基礎研究	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・環境研究への投資が増加しており、分析測定技術では一部の大学、研究機関の研究水準は欧米、日本並みになっている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・PM2.5などによる大気汚染、産業排水による深刻な水質汚濁などを背景に、有害物質の処理技術、クリーナープロセスの開発、導入が活発になっている。リスク評価関連の国際学会開催などに熱心であり、国内での研究者数も増加しており、国際標準化にも積極的である。</li> </ul>
	産業化	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・環境装置関連では東南アジアなどで強い競争力をもっている。</li> <li>・中国版REACHを開始しているが、人為的災害に関するリスク評価、管理については特筆すべきものは見当たらない。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・欧米、日本と比較するとややレベルは劣るが、技術の実用化、制度・システムなどに関する国際標準の導入に積極的である。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大規模な人為的災害が頻発しており、今後、安全の確保に向けた制度設計、研究開発が活発になると予想される。</li> </ul>
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・東南アジア地域での環境装置などのビジネスが伸びている。</li> </ul>

## (註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

## (註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

## (註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) 畑村創造工学研究所. 失敗知識データベース.  
小林光夫、田村昌三、イタリア・セベソの化学工場での爆発  
<http://www.sozogaku.com/fkd/hf/HC0300002.pdf>  
<http://www.sozogaku.com/fkd/cf/CC0300002.html>
- 2) 郡山一明、化学災害の健康危機管理、J.Natl.Inst.Public Health, 52 (2), 123、2003.
- 3) 国立医薬品食品衛生研究所. 安全情報部. 化学物質が関係する主な事故事例について：国内外の主な事故事例  
<http://www.nihs.go.jp/hse/c-hazard/jirei/jirei.pdf>
- 4) 日本原子力研究開発機構  
<http://eventinfo.jaea.go.jp/chem/search.php>
- 5) 長岡技術科学大学. 安全安心社会研究センター.  
三上喜貴. 道路を走る危険物～タンクローリー事故. 「安全と健康」誌、(2009).  
[http://safety.nagaokaut.ac.jp/~safety/?page\\_id=405](http://safety.nagaokaut.ac.jp/~safety/?page_id=405)
- 6) 日本学術会議. 日本の展望委員会. 安全とリスク分科会. 提言 リスクに対応できる社会を目指して、2010.  
<http://www.sci.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-tsoukai-10.pdf>
- 7) (一社)日本化学工業会. ケミカルリスクフォーラム  
<http://chemrisk.org/>
- 8) 製品評価技術基盤機構. 化学物質総合情報提供システム (CHRIP).  
<http://www.safe.nite.go.jp/japan/db.html>  
国立環境研究所. 化学物質データベース (WebKis-Plus).  
<http://w-chemdb.nies.go.jp/>
- 9) カーク・オスマー. 化学技術・環境ハンドブックII、第60章、安全、日本化学会監訳、丸善 (2009).
- 10) 厚生労働省. 化学物質による災害発生事例について.  
<http://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzeneisei10/>  
労務安全情報センター. 安全衛生と災害事例.  
[http://labor.tank.jp/r\\_saigai/](http://labor.tank.jp/r_saigai/)  
(公財)日本中毒情報センター.  
<http://www.j-poison-ic.or.jp/homepage.nsf>
- 11) (株)東洋経済新聞社. 東洋経済オンライン. 工場異変～日本の製造業は大丈夫か～安全・品質・モラルが問われる. 2014.  
<http://toyokeizai.net/articles/print/32488>

### 3.4.4.3 災害のリスク（人間への被害、環境への被害）の予防対策

#### （1）研究開発領域名

災害のリスク（人間への被害、環境への被害）の予防対策

#### （2）研究開発領域の簡潔な説明

自然災害や人為的災害で失われるものは、生命や財産といった直接的なもののほか、家族・知人との縁絆や精神衛生、培われた風土、土地・景観、食糧生産基盤、築き上げた社会インフラ、清浄な空気や水、固有の生物・生態系など幅広い。災害が発生する場所や時期は、その対策準備に要する時間と労力の規模に比べると不特定で非定常である。災害リスクの予防対策は、①災害予測とリスク評価、②被害の未然防止技術、③リスク情報の共有、④各国における災害管理制度の整備と推進、⑤保険などを利用したリスク移転などであり、国際的な協力のもと、災害対策と環境保全が経済の健全な発展との調和に不可欠であることの科学的根拠を具体的に示していく必要がある。

#### （3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

環境基本法のもととなる公害対策基本法や自然環境保全法では、産業構造の変化と大規模化に伴う公害問題の発生や国土の開発に伴う自然環境の消失を防ぎ、さらなる被害の未然防止や保護を目的にしてきた。これらの点は環境基本法でも継承されており、環境基本計画においてさまざまな対策が行われている。しかし、災害により発生する突発的な環境汚染や環境破壊に対しては、経済の健全な発展との調和どころか、人の生命や健康、自然環境そのものまでもが大きく損なわれてしまうという脆弱性が存在している。

災害には、地震・津波、台風・豪雨、干ばつ・寒波などの自然災害と、産業事故や輸送事故などの人為的災害がある。これらの災害によって失われるものは、生命や財産といった直接的なもののほか、家族・知人との縁絆や精神衛生、培われた風土、土地・景観、食糧生産基盤、築き上げた社会インフラ、清浄な空気や水、固有の生物・生態系など幅広い。また、災害が発生する場所や時期は、直前にある程度の予想ができるものもあるが、その対策準備に要する時間と労力の規模に比べると不特定で非定常なものである。英国のリスク評価会社Maplecroft社が発表したNatural Hazards Risk Atlas 2014<sup>1)</sup>によれば、地震や台風などの自然災害による経済リスクは、世界197か国の中で日本がもっとも高く、次いで米国、台湾、中国、インドまでが「extreme」に、メキシコ、フィリピン、イタリア、オーストラリアが「high」にランクされていて、自然災害の発生が比較的少ない英国は16位にランクされている。また、産業災害については、イタリア・セベソの農薬工場におけるダイオキシン類の飛散事故やインド・ボパールの化学工場における有害ガスの漏出事故があまりに有名である。

災害リスクの予防対策は、①災害予測とリスク評価、②被害の未然防止技術、③リスク情報の共有、④各国における災害管理制度の整備と推進、⑤保険などを利用したリスク移転などに分類できる。過去における災害の発生状況が異なるため、対策の進捗具合は地域によっても大きく異なる。日本は、干ばつや寒波による災害は他の国に比べて比較的少ないものの、その他の自然災害や人為的災害については甚大な被害の経験を有する。

災害予測とリスク評価については、数ある災害に対して予測シミュレーションの高精度化やそのためのモニタリング体制の整備が求められている。特に、それぞれの場所や時期、規模などで過去に例のない「想定外」の甚大災害をいかに精度よく予測できるかが災害予防における最大の関心事になっている。災害別には、台風や豪雨については、地球観測や地球シミュレーションの技術が発達してきており、数日前にはある程度の予測が可能になってきており、警報発令などの措置がきめ細かく行われるようになってきている。地震や津波に関しては、数十年内規模での予測精度に留まっており、社会経済的な時間の長さとは比べて、効果的な対応がまだまだ難しい状況にある。化学工場での人為的災害についても、リスクアセスメントツールが開発されている。しかし、これらはいずれもハザードの予測であり、人や環境への被害の予測には至っていない。

被害の未然防止技術については、これまで築いてきたインフラを災害から守るための技術が各分野で発達してきており、水道施設や下水道施設をはじめとする環境保全インフラについても、当該インフラの機能停止やそれによる二次的環境災害の発生について調査研究が行われている<sup>2)</sup>。

リスク情報の共有については、災害予防のもっとも基本的な対策として、さまざまな取り組みがある。過去に起こった自然災害や人為的災害を収集・整理し、その原因を分析して教訓事例としたデータベースや、台風や竜巻などの発生状況をリアルタイムで情報発信するシステムが運用されており、津波などでは観測情報を瞬時に通達する国際協力体制も整備されている。リスク情報を共有することにより、災害発生時の心構えや緊急避難が可能になり、人への影響を軽減できる可能性がある。

災害管理制度の整備と推進については、国連を中心とした動きとともに、各国が法整備や基本計画を策定して取り組んでいる。1994年の国連防災世界会議では「より安全な世界に向けての横浜戦略：防災のためのガイドライン—自然災害への予防、備え、軽減—とその行動計画」(「横浜戦略」)が採択され、災害リスクや災害による被害の軽減に関する画期的な手引きとなったが、直後の1995年に阪神淡路大震災を経験し、災害に対するガバナンスやリスクの特定、知識管理と教育、潜在的なリスク要因の軽減、効果的な応急・復興のための備えなどがさらなる課題として浮かび上がった。このため、2005年の同会議では「行動枠組2005-2015(兵庫行動枠組)」が採択され、災害によるコミュニティ・国の人命および社会的・経済的・環境的資産の損失を大幅に軽減することが期待されている。そして、2011年の東日本大震災を経て、2015年には仙台にて同会議が開催され、「仙台防災枠組2015-2030」が採択された。同会議の開催国である日本でも、2011年の東日本大震災の経験も含め、国土強靱化基本法(2013年)および同計画(2014年)を策定し、回避すべき起きてはならない最悪の事態のうち重点化すべき15のプログラムを選定して重点的な取り組みを始めている。環境分野では、自然生態系を積極的に活用した防災・減災対策や、災害廃棄物の迅速かつ適正な処理システムや汚水の適正な処理体制の構築、災害発生時における環境汚染および国民の健康被害を防止するための有害物質の貯蔵状況などに関する情報共有や有害物質排出・流出時における監視・拡散防止などがあげられている。また、内閣府では「災害対策標準化検討会議」が2014年3月に報告書をまとめている。海外においても、米国では、あらゆる災害・危機に対する国家レベルでの一元的な災害・危機対応システムであるIncident Command System(ICS)や

米国危機管理体制 National Incident Management System (NIMS) が確立されており、巨大災害発生時には大統領が災害宣言 (Declaration of Disaster) を発令し、連邦緊急事態管理庁 (FEMA) が災害・危機対応業務を直接統制する仕組みもある。欧州では、甚大な健康影響と環境被害をもたらしたセベソ事故の教訓に基づき、セベソ指令I, II, IIIにより、危険物質を伴う大規模災害を予防し、災害が発生した際の人間や環境への危害を最小限にすることを目的とした予防的管理が行われている。

保険などを利用したリスク移転については、災害発生時の復旧資金を確保したり、資金調達の流動性を高めるためのものである。干ばつや洪水などの気候変動により農業や観光業が被害を受けた際に保険金が支払われ、従事者の生活や活動の支援に充てられる。また、環境汚染リスクの高い産業に対し、突発事故により発生する人身被害や財産損失の生命救急や財産保護、汚染の処理や拡散防止に必要な費用として保険加入を義務付けるものもある。

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

災害リスクに関する研究開発推進上のもっとも大きな課題は、技術的にはリスク評価の精緻化とインフラの老朽化の問題であり、政策的には被害対象者と為政者とのリスクコミュニケーションの問題である。突発的に発生する災害について、被害の発生場所と発生時間を予測することは極めて難しい。このため、遍くリスク概念の導入が必要と考えられるが、経済成長を伴わない形でのインフラの再整備や災害予防対策については社会的な合意形成が難しく、まして、災害対策と環境保全を秤にかけることにもなりかねない。東日本大震災の教訓を風化させないうちに、かつて開発と環境がそうであったように、災害対策と環境保全が経済の健全な発展との調和に不可欠であることの科学的根拠を具体的に示していく必要がある。

#### (5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

経済発展を続けるアジア諸国や経済再生を目指す日本で災害が頻発していることから、当該国にとっても、それを支援する欧米諸国にとっても、災害予防を組み込んだ新しい経済モデルの実現がひとつの鍵になる。高度化するICTの支援に基づく数値シミュレーションやリアルタイム観測技術は有効な武器になる。

#### (6) キーワード

東日本大震災、経済発展との調和、インフラ、過去の教訓、リスク評価、リスク情報、災害管理制度、災害保険

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>2013年12月11日施行の「国土強靱化基本法」では、「災害に対する脆弱性を評価し、優先順位を定め、事前に的確な施策を実施して大規模自然災害などに強い国土および地域を作り、自らの生命と生活を守るべく地域住民の力を向上させることが必要である。」として、「国土強靱化基本計画」を2014年6月3日閣議決定し、環境分野を含む8つの「事前に備えるべき目標」と45の「起きてはならない最悪の事態」を設定して計画を推進している<sup>3)</sup>。</li> <li>環境省は2011年度に、災害事前・事後の迅速な資金確保を可能とする対策として、気候変動への適応策としての保険などリスクファイナンス手法の調査を行い、国際環境協力の可能性を検討した<sup>4)</sup>。</li> <li>国連防災世界会議を開催し、「横浜戦略(1994)」や「兵庫行動枠組(2005-2015)」「仙台防災枠組(2015-2030)」を採択して、国際協調の下での災害リスクの軽減を目指した戦略的・体系的アプローチを推進している<sup>5)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>2014年6月24日閣議決定の「科学技術イノベーション総合戦略2014」では、復興再生を加速化するため、①住民の健康を災害から守り、子どもや高齢者が元気な社会の実現、②災害にも強いエネルギーシステムの構築、③地域産業における新ビジネスモデルの展開、④災害にも強い次世代インフラの構築、⑤放射性物質による影響の軽減・解消をあげて取り組んでいる<sup>6)</sup>。</li> <li>2014年6月24日閣議決定の「日本再興戦略 改訂2014」では、災害対応ロボットをはじめとしたさまざまな分野のロボットなど最先端技術の発信や、自社系列全体の事業継続計画(系列BCP(Business Continuity Plan))に基づく製油所からSSまでの一貫した耐震・液状化対策や物流円滑化などの災害対応能力の強化、電気・ガスの自然災害に対応した復旧迅速化対策を推進することとしている<sup>7)</sup>。</li> <li>JSTでは、災害や事故などの失敗を分析した「失敗知識データベース」と「失敗まんだら」を作成し、その原因と影響を整理して公表した。2011年4月より畑村創造工学研究所HPから公開されている<sup>8)</sup>。</li> </ul>
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>2014年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画(第四次計画)」では、安全性、安定供給、経済効率性、環境への適合がエネルギー政策の重要な視点であり、バランスのとれた低廉で安定的な電源構成や、省エネルギー性や再生可能エネルギーとの親和性、電力需給ピークの緩和、災害に対する強靱性などを有するコージェネレーションの家庭用途を含めた導入促進を図ることとしている<sup>9)</sup>。</li> <li>経済産業省は2010年度に「効果的な公害防止への取り組み事例集」をまとめ、「平常時」と「異常発生時」における環境管理への取り組みを区別して整理・公表した<sup>10)</sup>。</li> <li>「台風リアルタイム・ウォッチャー」や「世界の大气汚染：リアルタイム気質指数ビジュアルマップ」、「高解像度降水ナウキャスト」、「雷ナウキャスト」および「竜巻発生確度ナウキャスト」などリアルタイムの災害情報が官民から発信されている<sup>11)</sup>。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>あらゆる災害・危機に対する国家レベルでの一元的な災害・危機対応システム(ICS)や危機管理体制(NIMS)が確立されている。巨大災害発生時には大統領が災害宣言を発令し、連邦緊急事態管理庁(FEMA)が災害・危機対応業務を直接統制する仕組みもある。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>2014年7月に米国商務省の国立標準技術研究所(NIST)は、災害の影響を軽減し被災後の早期回復を可能にするため、地域のCommunity Resilience Center of Excellenceを設置し、建物や通信や電力などのインフラシステムのツール開発を発表した<sup>12)</sup>。</li> </ul>

	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2008年6月に米国保健福祉省 (UNHHS) の災害情報管理研究センター (DIMRC) は、Enviro-Health LinksのWebサイトを開設し、自然災害や人災からの復旧情報、州・市当局への手引きや州の防災対策室へのリンク、緊急時対応要員への情報、環境浄化作業員や有害化学物質取扱作業員への指針などの情報を提供している<sup>13)</sup>。</li> <li>・環境保護庁 (EPA) および海洋大気庁 (NOAA) では、化学物質の放出や火災・爆発が周辺地域に与える潜在的な危険性を予測し、化学災害特有の災害時における危機管理のためのコンピュータ支援情報を提供する CAMEO (Computer-Aided Management of Emergency Operations) システムを開発し公開している<sup>14)</sup>。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・甚大な健康影響と環境被害をもたらしたセブソ事故の教訓に基づき、セブソ指令I, II, IIIにより、危険物質を伴う大規模災害を予防し、災害が発生した際の人間や環境への危害を最小限にすることを目的とした予防的管理が行われている<sup>15)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ECの共同研究所 (JRC) では、「セブソII指令」で規定された事故報告をECへ提出するための公式リポトリ EMARS (Major Accident Reporting System) を運営し1982年から収集した700以上の災害や事故の事例の原因や環境影響などを整理している<sup>16)</sup>。</li> </ul>
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・欧州安全衛生庁 (EU-OSHA) では、オンライン対話方式の簡潔なリスクアセスメントツール OiRA (Online interactive Risk Assessment) を開発・公表し、小零細企業における安全衛生管理の支援を行っている<sup>17)</sup>。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中国の国家災害防止・軽減科学技術発展『12・5』特定計画では、重大自然災害に関する基礎研究や予測・予報およびモニタリングと早期警報技術、被災状況と総合リスク評価技術システム、緊急救助と意思決定・指揮のコア技術、災害後の回復再建技術、予防と生態系修復技術、災害防止・軽減の新素材、新技術、新装置の研究、総合災害防止・軽減科学技術基盤の建設、重点地域における総合災害防止・軽減技術の統合・実証などを位置付けている<sup>18)</sup>。</li> <li>・2014年6月9日に北京で開催された「第2回災害リスク総合研究国際会議」では、「中国政府は災害防止・軽減に向けた取り組みや科学技術の応用による防災を重要視する。中国科学技術協会は災害リスク総合研究計画 (IRDR) を後押し、災害発生メカニズムを探索し、災害救助システムを構築する」ことが表明された<sup>19)</sup>。</li> <li>・中国民政部は2014年1月4日に有害物質を含む濃霧などの深刻な大気汚染を「自然災害」と認定した<sup>20)</sup>。</li> <li>・中国気象局の研究者は、大気汚染防止行動計画の実行に向けて人工的な雨や風などはまだ研究・試験の初期段階と発表している<sup>21)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中国環境保護部は、第12次5カ年計画 (12・5計画) において「2015年までに化学品の環境リスク管理制度体系をほぼ確立し、重点予防抑制する産業や企業や化学品を指定して、化学品による環境汚染と突発的環境汚染事故が頻発する状態を有効に抑制する。」とし、累積的な環境リスク系25種類と突発的環境汚染事故頻発系15種類に区別した重点予防対策を行っている<sup>22)</sup>。</li> </ul>
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中国各地において、緊急地震速報システムや津波予警報システム、台風早期警報システムが整備・導入されている<sup>23)</sup>。</li> <li>・2013年1月に中国環境保護部と保健監督委員会は「環境汚染強制責任保険モデル事業の展開に関する指導意見」を公表し、特定の業種に対して「環境汚染強制責任保険」の加入を義務付けた<sup>24)</sup>。</li> </ul>
韓国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・韓国第3次科学技術基本計画では、5大推進分野/20推進課題/30重点国家戦略技術の中で、自然災害や社会的災害への予防・対応を重要課題に位置付けて推進している。韓国の産学官の専門家による自己評価では、韓国は世界トップの技術をほとんど保有できておらず、災害・安全分野でも対象技術がないと評価している<sup>25)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・韓国の大学教授によれば、日本のJST-RISTEXなどに比べ、韓国では、災難・災害・事故に備えた科学技術研究がほとんどない状況と評価している<sup>26)</sup>。</li> </ul>

	産業化	△	→	・国家戦略技術分野において科学技術とICTを接続して既存産業に活力を呼び入れるため全省庁が協力して行う研究開発プロジェクトの主要課題として、センサネットワークによるインフラの事故・災害警報および社会的弱者の保護 (GPS、センサ、アプリ) の推進があげられている <sup>25)</sup> 。
--	-----	---	---	--

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル (環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況 (大幅に改善された/悪化しているなど)、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。)

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↘ : 下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) Maplecroft. Natural Hazards Risk Atlas 2014.  
<http://maplecroft.com/portfolio/new-analysis/2014/02/19/natural-hazards-risk-atlas-2014/>
- 2) 土木学会. 平成17年度土木学会重要課題研究報告書 環境と防災連携型の技術と制度. 2006.  
[http://committees.jsce.or.jp/s\\_research/system/files/H17j\\_06.pdf](http://committees.jsce.or.jp/s_research/system/files/H17j_06.pdf)
- 3) 内閣官房. 国土強靱化. [http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo\\_kyoujinka/](http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/)
- 4) 環境省. 報告書「環境リスクを移転する仕組みに関する基礎的情報調査」. 2012.  
[http://pub.iges.or.jp/modules/envirolib/upload/3825/attach/CAI\\_QS\\_climate\\_adaptation\\_and\\_risk\\_finance.pdf](http://pub.iges.or.jp/modules/envirolib/upload/3825/attach/CAI_QS_climate_adaptation_and_risk_finance.pdf)
- 5) 国連災害リスク軽減事務局 (UNISDR) 兵庫事務所  
<http://www.unisdr.org/kobe>
- 6) 内閣府. 科学技術イノベーション総合戦略2014.  
<http://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/>
- 7) 首相官邸. 成長戦略で、明るい日本に！.  
[http://www.kantei.go.jp/jp/headline/seicho\\_senryaku2013.html](http://www.kantei.go.jp/jp/headline/seicho_senryaku2013.html)
- 8) 畑村創造工学研究所. 失敗知識データベース.  
<http://www.sozogaku.com/hatamura/index.php>
- 9) 経済産業省. エネルギー基本計画について.  
[http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/](http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/)
- 10) 経済産業省. 効果的な公害防止への取り組み事例集. 2010.  
<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g100630d04j.pdf>
- 11) 国立情報学研究所. 台風リアルタイム・ウォッチャー.  
<http://typhoon.mapping.jp/>  
Air Quality Index China (AQICN). 世界の大気汚染：リアルタイム気質指数ビジュアルマップ.  
<http://aqicn.org/map/world/jp/>  
気象庁. 高解像度降水ナウキャスト.

- <http://www.jma.go.jp/jp/highresorad/?areaCode=205>  
気象庁. レーダー・ナウキャスト.
- <http://www.jma.go.jp/jp/radnowc/>
- 12) 米国商務省国立標準技術研究所 (NIST) . NIST Tech Beat. NIST Announces Competition for Community Resilience Center of Excellence. 2014.  
<http://www.nist.gov/el/coe-070914.cfm>
- 13) USHHS Disaster Information Management Research Center (DIMRC). Disaster Recovery and Environmental Health.  
<http://sis.nlm.nih.gov/enviro/disasterrecovery.html>
- 14) USEPA. CAMEO. <http://www2.epa.gov/cameo>
- 15) EC Chemical Accidents (Seveso I, II and III) - Prevention, Preparedness and Response  
<http://ec.europa.eu/environment/seveso/index.htm>
- 16) EC-JRC. EMARS. <https://emars.jrc.ec.europa.eu/?id=4>
- 17) EU-OSHA. OiRA. [https://osha.europa.eu/en/topics/oira/index\\_html](https://osha.europa.eu/en/topics/oira/index_html)
- 18) JST SciencePortal China. 国家災害防止・軽減科学技術発展『12・5』特定計画. 2012.  
[http://www.spc.jst.go.jp/policy/science\\_policy/125plans/125field\\_09.html](http://www.spc.jst.go.jp/policy/science_policy/125plans/125field_09.html)
- 19) JST CRDSダイリーウォッチャー. 第2回災害リスク総合研究国際会議が北京で開催. 2014.  
<http://crds.jst.go.jp/dw/20140714/201407142414/>
- 20) J-CASTニュース. 深刻大気汚染を「自然災害」と認定. 2014.  
<http://www.j-cast.com/2014/01/08193693.html?p=all>
- 21) JST SciencePortal China. 人工的な煙霧除去、現在はまだ研究段階. 2014.  
[http://www.spc.jst.go.jp/news/140102/topic\\_1\\_04.html](http://www.spc.jst.go.jp/news/140102/topic_1_04.html)
- 22) 日中韓の化学物質管理政策に関するセミナー. 講演2「中国における化学物質管理政策の最新動向」. 2013.  
<http://chemical-net.info/pdf/D3-2-China-JingYE-JP.pdf>
- 23) JST SciencePortal China. 雲南盈江地震、揺れ到達の12秒前に速報に成功. 2014.  
[http://www.spc.jst.go.jp/news/140601/topic\\_1\\_02.html](http://www.spc.jst.go.jp/news/140601/topic_1_02.html)  
JST SciencePortal China. 中国津波予警報システム 地震発生15分以内に自動警報. 2013.  
[http://www.spc.jst.go.jp/news/130102/topic\\_3\\_04.html](http://www.spc.jst.go.jp/news/130102/topic_3_04.html)  
JST SciencePortal China. 台風の進路予報が世界最先端のレベルに. 2013.  
[http://www.spc.jst.go.jp/news/131201/topic\\_5\\_03.html](http://www.spc.jst.go.jp/news/131201/topic_5_03.html)
- 24) 王長君. 多発する環境汚染事故 特定業種に保険加入義務. NIKKEI ECOLOGY 2013.7 p94  
[http://www.keieiken.co.jp/pub/articles/2013/pdf/2013-07nk\\_eco.pdf](http://www.keieiken.co.jp/pub/articles/2013/pdf/2013-07nk_eco.pdf)
- 25) JST CRDS. 科学技術・イノベーション動向報告 韓国編 ～2013 年度版～. 2014 (Rev.3) .  
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/OR/CRDS-FY2013-OR-03.pdf>
- 26) 中央日報. 【中央時評】日本は災難・災害に備えて研究しているが、韓国は……。2014.  
<http://japanese.joins.com/article/645/185645.html>

### 3.4.4.4 災害発生直後の環境情報観測・把握手法とリスク軽減手法

#### (1) 研究開発領域名

災害発生直後の環境情報観測・把握手法とリスク軽減手法

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

災害発生直後の環境情報観測という一つの研究開発領域ははっきりとは形成されていないように思われるが、さまざまな関連する研究開発は行われている。災害には多様な規模や態様がある。東日本大震災のような大規模な自然災害から、工場事故や漏出事故など規模、原因、観測や発生するリスクとその対策はさまざまに異なる。それぞれの事例に対応する災害発生直後の対応のなかには、国土防災に近い視点が求められるものから、事故現場での緊急対応の視点までさまざまな対応が含まれることになる。

本稿では、災害発生に伴う、主に有害物質や化学物質の観測・把握手法とリスク軽減に関連する課題について述べる。環境情報観測については、土砂災害、洪水災害あるいは地震、津波あるいは事故など災害の物理現象的側面に対する観測や把握も重要であるが、これらは、より防災の視点で整理されると考え、ここでは有害化学物質などによるリスク要因の環境情報観測について記述する。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

有害物質や化学物質に関する環境情報観測とリスク軽減という課題を考えると、観測や把握を求められる目的は、それぞれの地点に所在する住民あるいは当事者の安全を担保するための観測、把握とリスク軽減策ということになるだろう。現実には、巨大災害であるほど、このような観測、把握やリスク軽減をはかるための資源が損傷され、観測にも軽減策にも制約が発生して異なる手法が必要になるかもしれない。しかし、個々の地点と時点で求められる安全確保の課題自体が大きく異なることはないのではないかと思われる。すなわち、ある地点と時点においてリスク軽減の基礎となる環境情報観測、把握に関する研究開発領域が本領域と考えると、およそ以下の3つの研究開発が関連すると思われる。

1. 化学テロ対策としての環境情報観測、把握技術。いわゆる法科学の一分野といえる。
2. 地震などの自然災害から大小さまざまな工場や現場での事故、漏えいなどへの対処として実施された環境調査などの検討。環境部局による調査研究から産業における安全管理の一環、あるいはその事故対策の取り組みといえる。
3. モバイル型分析機器開発など、技術的な観点からの取り組み。分析化学的あるいは技術開発的な分野。

このうち、1. は多くは治安関連部局が中心となって、化学テロ対策などとして組み込まれてきたものである<sup>1)</sup>。対象となる化学テロ剤などに対して先端的、精力的な開発が行われている。一方、本領域のより一般的な環境情報という視点からは、この種の研究が扱う物質は通常の産業や一般環境で広く扱われているとは限らない。また、技術的には致命的な被害を避けるために十分な程度の感度をごく短期間に達成することが主課題であり、この点に特化した迅速あるいは高感度の技術が研究されている。このことは、おそらく技術および目的において災害時の環境情報観測一般に共通の一面と、民生用の

より広範な化学物質のリスク軽減にかかわる2. とはいくらかずれがある側面とが、ともにあると考えられる。

2. はより民生的な事故の観測や対策であり、産業界自身の安全管理部局とともに、消防部局や環境部局が中心となって実施してきており、さまざまな災害や事故対応の調査や対策に関する報告例がある<sup>2-5)</sup>。対象となる化学物質は1. より広範となるため、物質や毒性のスペクトルが大きくなり、それに対応する観測とリスク軽減策が求められることがこの開発の一つの課題となる。一方、安全を担保すべきリスクレベルは1. と比較して相対的に低く指向されることが多いと考えられ、例えば一般環境の規制基準のような低い濃度まで観測可能な高感度技術が求められる場合があり得る。ただし、化学テロ剤のような極端な強毒性物質でなければ、現実要求される感度は必ずしも1. の課題ほど高くないかもしれない。また1. の課題では、例えば数分というような時間内での検知がしばしば求められるが、2. ではもう少し長い、例えば数時間という程度でも十分な場合もある。このような違いはあるが、両者にはある程度類似の技術的課題もあるように思われる。

3. は一例としてモバイル型あるいは可搬型、簡易型などさまざまなタイプの分析機器、調査機材の技術開発が進められている<sup>6-9)</sup>。これらの一部は1. 2. のような課題から通常の作業場の安全管理まで、共通の技術として応用されている。実験室における高速分析や、野外での試料サンプリング機器などの開発もある。これらの技術開発が指向する感度や試料適応の範囲はさまざまである。

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

上記(3)で述べた研究開発は、いずれも広くは災害発生直後の環境情報観測・把握とリスク軽減手法にかかわると考えられる。技術的には一定の蓄積があり、現在も研究が進められている。ここで研究開発推進上の課題、ボトルネックはむしろその体系化と制度的課題にあるように思われる。

1. の課題は、各国とも治安関連当局やおそらく軍事関連活動の中で進められていると思われ、最新の技術と実績が豊富である。一方で、テロや軍事作戦に付随した場合以外には一般市民や民生的課題との接点は少ないとも思われる。ここでは、この種の法科学的、治安・軍事に係る知見と民生領域の技術の共有が主要な課題となろう。

2. の課題は、何らかの災害発生直後の環境情報把握として多くの実例がある。化学分析による観測から、大規模な事例ならば航空機などによる遠隔モニタリング、あるいはシミュレーションによる予測技術<sup>10)</sup>などさまざまな検討が行われているが、多くは事例調査であり、将来の災害への対処としての体系化の視点が乏しいように感じられる。

3. の課題はより技術的なものであるが、モバイル型分析機器などには多くの製品がすでに市販されており<sup>9, 11)</sup>、技術的には電源、可搬性、感度、試料への適用性など多くの課題が当然存在するが、この技術の応用、目標が必ずしも定まっていない印象がある。

このように、さまざまな研究開発が進められているが、上述のようにおそらくもっとも大きなボトルネックは、1., 2., 3. の各分野が横断的に連携して、あるいはシステムとして体系的に研究されていないことにあるように思われる。1. の課題は他の領域とやや孤立しており、3. では、新旧さまざまな分析法や調査手法が必ずしも整理されていない。

2. の課題の対処では、個々の場面で現れる多種多様な物質やリスク要因に対して、どのようなレベルまで観測を行い、どこまでのリスク軽減を図るべきか、社会的に十分合意のとれた情報取得の方法や管理水準がまとめられていない。今後の研究開発では、技術的な過去の蓄積を足場として、あるいは従来はやや分野の異なった研究開発をより体系的に、研究開発領域として発展的に進める先導が求められる。

#### (5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

制度面の取り組みとして注目される動向として、米国における緊急時対応の体系がある。米国は、9.11テロまた炭疽菌テロなどへの対応に端を発して、災害時を含み広く緊急時に事態に関連する行政当局が連携して対応にあたる体制を構築してきた<sup>13)</sup>。この中には、災害発生直後の行政部門の迅速な連携が目標とされ、例えば環境情報の観測とリスク低減の課題はこのような緊急時対応の中で位置づけられるよう設計されている。米国環境保護庁 (EPA) では、例えば緊急時に対応するモバイルラボを複数所有し、それらが常時出動可能となる体制を整備している。これは、例えば近年のハリケーン・カトリーナへの対応などでも活用された<sup>14)</sup>。

米国の取り組みは注目されるが、各国とも何らかの緊急時対応の体制を有していると思われる。しかし、軍事作戦は別として、自然災害や民生的な事故に対して米国ほどに多部局が連携する体制があるようには思われない。日本国内でも例えば環境省の事例<sup>15)</sup>などがあるが、1., 2., 3. の各分野とも個々の部門がともすればやや独立して開発を進めているように思われ、米国の取り組みとは対照的なように思われる。米国のような制度的な構築は、可搬型装置などの産業化へは重要なインセンティブにもなっていると思われる。

#### (6) キーワード

災害時、緊急時、観測、リスク管理、モバイル分析技術、迅速分析技術

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・各分野における個別の基礎研究が実施されている。
	応用研究・開発	○	→	・各分野における個別の技術開発が実施されている。法科学的研究とともに化学工場事故や流出事故などの際の監視研究などが報告され、シミュレーションモデル導入や情報整備 <sup>10)</sup> も行われている。
	産業化	○	→	・機器や方法の製品開発が行われている <sup>8)</sup> 。
米国	基礎研究	◎	→	・分析技術の開発、毒性情報の収集などとともに、それらを体系化する努力が進められている。
	応用研究・開発	◎	→	・機器開発などの努力は継続して複数のメーカーや研究組織で継続されている。シミュレーションモデルなども開発。
	産業化	◎	↗	・可搬型分析装置、モバイルラボなど実用的な環境情報の観測、把握の産業化が行われている。
欧州	基礎研究	○	→	・各分野における個別の基礎研究が実施されている。
	応用研究・開発	○	→	・化学工場事故時の調査などや管理施策の検討が行われている。
	産業化	○	→	・機器や方法の製品開発が行われている。
中国	基礎研究	○	↗	・化学工場事故などにおいて実施された監視研究などの成果は多数報告されている。
	応用研究・開発	△	→	・化学物質管理の施策が全般に開始された段階で、その中で災害時としての化学工場事故などに伴う管理も検討され始めている。
	産業化	×	→	・分析機器などの開発はあまり見受けられないように思われる。
韓国	基礎研究	○	→	・化学工場事故や流出事故などにおいて実施された監視研究などの成果は多数報告されている。
	応用研究・開発	△	→	・家庭用品の重大事故事例があり、これを受けて事故時対応が化学物質管理施策の中で位置づけられつつある。しかし、中毒情報などの集積が不十分とも指摘されている <sup>12)</sup> 。
	産業化	×	→	・分析機器などの開発はあまり見受けられないように思われる。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) 瀬戸康雄、他「生物化学テロ事件に対処する質量分析技術」J. Mass Spectrom. Soc. Japan (2008) 56, 91-115
- 2) 森田昌敏、陶野郁雄（編）「兵庫県南部地震と環境」環境庁国立環境研究所、平成7年7月

- 3) 平成8年度科学技術振興調整費「ナホトカ号油流出事故による環境影響に関する緊急研究」成果報告書、科学技術庁研究開発局、平成9年10月
- 4) Hou, Y., Environ. Monit. Assess. (2012) 184, 4855-4859
- 5) Lee, M. and Jung, J.Y., Marine Poll. Bul. (2013) 339-344
- 6) 財団法人機械システム振興協会 委託先 日本分析機器工業会「モバイル型分析装置の現状と将来展望に関する調査研究報告書 要旨」平成15年3月。  
<http://www.jaima.or.jp/jp/publication/pdf/01.pdf>
- 7) 平成9年度環境庁公害調査委託費による報告書「緊急時における化学物質分析調査マニュアル」財団法人日本食品分析センター、平成10年3月
- 8) 豊田岐聡、他「マルチターン飛行時間型質量分析計」J. Mass Spectrom. Soc. Japan (2012) 60, 87-102
- 9) インフィコン(株). ガスクロマトグラフ. ハブサイト (HAPSITE) ER.  
<http://www.inficon.jp/gc/hapsite.php>
- 10) 経済産業省「CAMEO・MARPROT・ALOHA 日本語版」  
[http://www.meti.go.jp/policy/chemical\\_management/cwc/link.html](http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/cwc/link.html)
- 11) FEMA. FEMA 549, Hurricane Katrina in the Gulf Coast: Mitigation Assessment Team Report, Building Performance Observations, Recommendations, and Technical Guidance.  
<http://www.fema.gov/media-library/assets/documents/4069>
- 12) Kim, K.H., et al. Journal of the Korean Medical Association (2013) 56, 724-735
- 13) FEMA. National Response Framework (Second Edition), Department of Homeland Security, May 2013,  
<http://www.fema.gov/media-library/assets/documents/32230?id=7371>
- 14) FEMA. Hurricane Katrina in the Gulf Coast. 2006.  
[http://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1520-20490-4067/549\\_cvr\\_toc.pdf](http://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1520-20490-4067/549_cvr_toc.pdf)
- 15) 環境省、自治体環境部局における化学物質に係る事故対応マニュアル策定の手引き、平成21年3月

### 3.4.4.5 災害廃棄物処理と利活用

#### （1）研究開発領域名

災害廃棄物処理と利活用

#### （2）研究開発領域の簡潔な説明

災害廃棄物処理と利活用に関する研究開発は、不定期ではあるが、必ず発生する地震や台風などの災害発生に伴う課題として、都市機能や社会機能の進展、複雑化とともに社会要請的課題として始まってきた研究開発領域である。日本では、1995年の阪神淡路大震災における災害廃棄物問題が大きな社会問題になったのをきっかけに、書誌学的要素を含めた取り組みがはじまり、2011年の東日本大震災で本格的な取り組みになりつつある。世界をみれば、21世紀に入ってからの災害頻発を受けて、この分野への取り組みが本格化しつつある。本領域の研究開発課題には、災害廃棄物発生の量的・質的把握とその予測、処理処分や再利用のための対策技術、災害廃棄物管理に関する政策学的、行動論的検討などがある。

#### （3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

国立環境研究所が2012年4月に発出した「災害環境研究の俯瞰」<sup>1)</sup>のなかで、震災廃棄物の処理に関する研究課題として、震災対応ネットワークの活用による各種技術情報の作成・提供や災害廃棄物の発生原単位および量の推算を含めた各論的課題を掲げている。これらの各論的課題を含めて、災害廃棄物管理における研究開発領域は、より一般的には次のように整理できる。

##### 1. 災害廃棄物発生と性状、その予測<sup>2)</sup>

災害の種類と災害廃棄物特性、災害廃棄物の発生原単位および量の推算が、継続的な課題である。災害は、地震や津波、台風、洪水、火山噴火、火災などのさまざまな原因で生じ、過去10年間の世界をみても、多くの大災害により世界の社会インフラが破壊されてきた。2011年の東日本大震災以外にも、2004年のスマトラ島沖地震、2005年のハリケーン・カトリーナ、2008年の四川大地震、2011年のニュージーランドやトルコでの地震などである。災害の原因やその大きさ、地域社会の産業形態、建築物密度などにより、発生する災害廃棄物の種類や量は大きく変わるため、この災害廃棄物発生情報をより一般化することが求められている。

##### 2. 災害廃棄物対応の技術とシステム<sup>3-4)</sup>

処理技術や利活用技術の開発から、その社会実現に向けた政策論的、計画論的研究が進められている。具体的には、災害廃棄物の現場分別や仮置き場における破碎選別技術の開発と評価、仮置き場での堆積廃棄物の火災予防・安全性評価に関する技術やシステムは、現場的な要請の多い課題である。有害物質関連の課題として、石綿含有廃棄物の適正管理、PCB含有災害廃棄物への対応、海水被り廃木材の塩素分の分析および燃焼試験などは、災害時に特に心配される課題である。水産廃棄物の処理方法や津波堆積物の性状調査と処理指針策定も、災害時には緊急性をもって対応が求められる。

##### 3. 地域協力や国際協力<sup>5-8)</sup>

日本の東日本大震災においても、災害廃棄物に重点をおいた国連環境計画（UNEP）

の調査団を受け入れたが、こうした国際協力は欠かせない。とりわけ、開発途上国や島嶼国においては、復旧や復興における地域協力や国際協力は、必要欠くべからざる要素でもある。災害廃棄物への対処も、地域協力や国際協力と切り離せない対応となる。そのため、国際機関におけるこの分野の基礎情報蓄積とともにガイダンス的取り組みも期待されているところである。

なお、放射能汚染廃棄物の管理問題については、環境区分においても汚染廃棄物対応に取り組まざるを得ない研究開発課題となっており、独立して把握していくことが適切であろう。

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

国立環境研究所が、2013年3月にまとめた「東日本大震災後の災害環境研究の成果」<sup>9)</sup>においても、上述の「災害環境研究の俯瞰」での内容の先進性と合理性を失っていないとして、災害廃棄物関係研究開発は、1. 処理処分・再生利用技術の開発・高度化・評価、2. 関連施設の長期的管理・解体など技術の確立、3. 測定分析・モニタリング技術の確立、4. フローストックの把握・管理システムの高度化、に一般化されている。こうした課題の検討に向けて、国立研究機関を中心とした政策研究的取り組みとともに、幅広い研究者の継続的取り組みが求められている。ただ、緊急対応的研究に重点が置かれがちであり、社会構造的な研究や書誌学的研究などを、より基礎的な研究として継続的に推進する支援が求められている。

現時点においては、放射能汚染廃棄物の発生問題がより深刻であるといえ、放射性物質の物性や挙動、処理処分技術の開発、管理モニタリング手法の確立といった課題が目白押しである。加えて、こうした工学的課題とともに、放射性物質の環境挙動メカニズムの解明やリスクコミュニケーション・マネジメント手法の確立も重要な課題となっている。

#### (5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

2014年3月には、環境省において「巨大災害発生時における災害廃棄物対策のグランドデザイン」<sup>10)</sup>が取りまとめられたところである。その中では災害廃棄物処理システムや技術に関する課題として、次の課題があげられている。

1. 災害廃棄物の資源循環を促進し、焼却における残渣率を適正に管理するための分別・選別技術の開発
2. 海面最終処分場の活用促進に向けた課題の検討
3. 発災後、速やかに災害廃棄物の発生量を算定し、また処理の進捗に応じて要処理量を把握する一連の手法の開発
4. 災害廃棄物に対するトリアージ的対応手法の開発
5. 仮置場などの評価・選定手法、一次・二次仮置場の全体フロー設計基準の開発

このうち、トリアージ的対応とは、発災直後に生活環境などに著しい悪影響を与える可能性のある災害廃棄物や関連する課題を、事前に想定すると同時に、発災後速やかに優先順位をつけて取り組むための手法を開発することをいう。東日本大震災においても、

水産廃棄物や腐敗性廃棄物や堆肥などからの悪臭発生や衛生状態悪化、津波堆積物（ヘドロ状）や油汚染物による衛生問題などが発生し、その都度対応が行われてきた。それらの課題および対応を整理・検証し、リスク評価などを行い、対応すべき製品群と優先順位、対応・処理方法、必要な事前の備えなどを明らかにし、マニュアル化することが求められている。

### （6）キーワード

災害廃棄物、がれき、地震、津波、水害、事前計画、トリアージ的対応

### （7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・国立環境研究所「災害環境研究の俯瞰」（2012年4月）、「東日本大震災後の災害環境研究の成果」（2013年3月）。
	応用研究・政策開発	◎	↑	・内閣府の巨大災害時の災害廃棄物予測、環境省「巨大災害発生時における災害廃棄物対策のグランドデザイン」（2014年3月）。
国際機関	基礎研究	○	→	・国連環境計画（UNEP）の東日本大震災報告。
	応用研究・開発	◎	↑	・国連機関（国連環境計画（UNEP）や国連人道問題調整事務所（OCHA））での取り組みや蓄積に力が注がれている。 ・アジア地域での展開。
米国	基礎研究	△	→	・顕著な活動や成果は把握できていない。
	応用研究・開発	◎	→	・連邦緊急事態管理庁（FEMA）と環境保護庁（EPA）の取り組みが代表的。FEMAは、資格と効果的ながれき処理計画、緊急時の連邦政府管理を骨格としたガイドを準備。EPAは、事前計画と補助的活動、実行方法の3要素に分けた指針を策定。
中国	基礎研究	○	→	・四川大地震の記録に関する学術成果の発信がみられる。
	応用研究・開発	△	→	・顕著な活動や成果は把握できていない。
韓国	基礎研究	△	→	・政策研究への取り組みには資源投入されているが、基礎研究への展開には力点は置かれていない、もしくは不明。
	応用研究・開発	◎	↑	・水害関連の政策研究への取り組みは進んでいる。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

### （8）引用資料

1) 国立環境研究所：災害環境研究の俯瞰（2012年4月）

- <http://www.nies.go.jp/shinsai/overview.html>
- 2) 平山修久、大迫政浩：東日本大震災での災害廃棄物対応と今後の備え、環境技術、43[5]、258-263 (2014)
  - 3) Asari, M., Sakai, S., Yoshioka, T., Tojo, Y., Tasaki, T., Takigami, H., Watanabe, K.: Strategy for separation and treatment of disaster waste: a manual for earthquake and tsunami disaster waste management in Japan, Mater Cycles Waste Manag 15: 290-299 (2013)
  - 4) 廃棄物資源循環学会：災害廃棄物分別・処理実務マニュアル、ぎょうせい (2012)
  - 5) United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs(OCHA) Environmental Emergencies Section: Disaster Waste Management Guidelines. 2011.  
(<https://docs.unocha.org/sites/dms/Documents/DWMTG.pdf>)
  - 6) UNEP: Managing post-disaster debris: the Japan experience (2012)  
([http://www.unep.org/pdf/UNEP\\_Japan\\_post-tsunami\\_debris.pdf](http://www.unep.org/pdf/UNEP_Japan_post-tsunami_debris.pdf))
  - 7) US FEMA: Public Assistance-Debris management guide (2007)  
(<https://www.fema.gov/public-assistance-local-state-tribal-and-non-profit/debris-management-guide>)
  - 8) US EPA: Planning for Natural Disaster Debris (2008)  
(<http://www2.epa.gov/large-scale-residential-demolition/disaster-debris-planning>)
  - 9) 国立環境研究所：東日本大震災後の災害環境研究の成果 (2013年3月)  
<http://www.nies.go.jp/shinsai/outcome.html>
  - 10) 環境省巨大地震発生時における災害廃棄物対策検討委員会：巨大災害発生時における災害廃棄物対策のランドデザインについて－中間とりまとめ、2014年3月  
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=17995>

### 3.4.4.6 自然環境の回復過程の促進

#### (1) 研究開発領域名

自然環境の回復過程の促進

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

放射能汚染からの自然環境の回復過程は長期にわたり複雑である。大雨時の山林からは膨大な量の放射能が濁りとともに海へ運ばれ<sup>1)</sup>、食物連鎖による沿岸生物への濃縮が今後も長期間続く。沿岸への放射能拡散抑止対策は重要で、効果の伴った安全宣言は地域経済の命綱である。既往技術と実施実績報告<sup>2)</sup>のある自然由来ナノサイズマテリアル利用も併せた技術開発は、それを可能にする。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

2011年3月の東日本大震災とともに生じた放射能汚染は自然環境に大きな影響を与えた。自然環境への影響は長期にわたるとともに複雑であり、その回復過程には未知の要素が大きく、自然が有する回復力をいかに人工的に支援するかが大きな課題である。その意味で、放射能汚染は災害からの自然環境回復の促進と評価に関するもっとも挑戦的な課題であるので、本課題に絞って記述する。

自然環境回復過程を福島第一原子力発電所事故からの回復の立場で評価すると「かなり厳しい」と評価できる。放射能汚染源で圧倒的な第一要因である広域な山林・田畑から沿岸までにおいて自然環境保全への回復努力は認めづらく、将来展望は極めて不透明である。

人と自然環境共存の立ち位置から眺めれば、放射能汚染の深刻な南東北から北関東は地域経済が自然環境に大きく影響される地区となる。健全な自然環境や生態系が人々の暮らしに及ぼす影響は、川を経て海へ運ばれる放射能の影響を受ける漁業と水産関連産業を大きく直撃している。放射能被害の健康面を含む実態解明（その有無に関わらず）が、風評被害沈静化を促す効果の大きさは見通しづらい。風評被害は経済活動や震災復興後の地域産業活性化ですでに実害となっている。大雨時に山林から河川経由で沿岸に運ばれる放射能は、80 mmから100 mmの降雨時の現地調査に基づく予測では、一度の降雨で10兆ベクレル（Bq）を超えるが、降下放射能全体からしてわずかな輸送量にすぎない。一度の大雨で陸から海へ運ばれる放射能輸送量は、福島第一原子力発電所の冷却水由来放射能と桁違いの大きさである。放射能沿岸拡散問題の放置は、自然環境と人々の暮らし双方に、福島第一原子力発電所事故からの復興を今に増して困難にするだろう。対策を技術面から推せば、日本が得意として来た幾分野かにまたがる技術の協調／協同が基礎になる。新たな技術には、米国が積極的に力を注いでいる環境修復へのナノサイズマテリアルの（現地適応型）実用化技術<sup>2)</sup>も含まれる。当該技術は資源循環型社会へと発展していく可能性もあり、国際的な技術開発の流れを「セシウム（Cs）」吸脱着からスタートできる。自然環境・生態系を、人との関わりや人との共存の立場に意義を見いだす世界的な考え方に照らしても、今回の放射能海洋拡散問題の帰着ポイントへ向けた日本の姿勢や対策への取り組み手法は極めて重い責務を持ち、世界中の科学者や海外政府からの評価を受けるだろう。実現可能な放射能対策技術に基づく放射能海洋拡散抑

止対策は早急に望まれる。

放射性セシウムの海洋拡散抑止は河口沖に設営する微細濁質抑留システムで大幅な減少が見込める。住宅地、里山地区における除染後の放射能リバウンド抑止へは、要所要所への微細濁質抑留濾過槽設置が有効で<sup>3)</sup>、有力な放射能再汚染対策となるだろう。それらに関わる各領域研究の連結が必要になる。その中で、日本の得意とする研究開発領域・日本生まれの技術シーズには、

- ・微細粒子沈殿効率を著しく改善する沈殿効率上昇技術（傾斜板）、海草類表面の特異的な微細濁質付着現象（広く確認されている）の技術化
- ・高浸透性水による微細粒子界面脱吸着現象の加速（セシウム脱吸着など）技術<sup>4)</sup>
- ・森林、里山源流への間伐材チップ利用濁質抑留濾過槽のリン濃縮と濁質除去効果<sup>5, 6)</sup>とセシウム削減効果<sup>2)</sup>
- ・高浸透性水利用海砂除塩による植生可能砂転換技術<sup>7)</sup>
- ・好気性微生物と嫌気性微生物利用の生化学反応の沿岸生態系への応用技術<sup>8)</sup>
- ・貝殻や魚介類中への重金属、希少金属の高濃度集積<sup>9)</sup>

の実績が報告されている。ヨーロッパ系研究からは、自然環境下の観測に基づく実フィールド中の濁質と水質間の相互作用、自然の位置づけを核とした環境修復対策例が報じられている。河川から海洋へと流出する濁質含有物質の沿岸域拡散に伴う環境負荷増大と地域沿岸生物生存リスクの関わり<sup>10)</sup>が、沿岸生態系と人間生活に及ぼすリスク増大要因となる<sup>11, 12)</sup>。

一方で、淡水流入の閉鎖性海域の濁質流入負荷増大と流入淡水量増加が長期間減衰傾向だったマングローブ域を回復させた要因<sup>13)</sup>であるという、河川の濁質由来物質輸送が場所によっては沿岸生態系に逆方向の働きをする内容の報告がある。両者は河口沖沿岸生態系の衰退と回復に河川由来濁質輸送量の関わりが大きい事を説明している。さらに、重金属含有量の大きな底質の浚渫（しゅんせつ：水底の土砂を掘削すること）が、沿岸で汚染物質の生物濃縮を加速させる報告<sup>14)</sup>もある。沿岸河口近傍が沿岸生態系にとって重要な箇所であり、陸起原濁質の影響の強い区域であることを述べている。これらは、川と海の繋がりが沿岸生態系や人の生活に大きな影響を及ぼすことを繰り返し述べている。この報告では、自然環境と河川由来濁質の関係は重くとらえられており、福島第一原子力発電所事故後の川から海への濁質移動と放射能拡散対応の遅れが懸念される。底質間隙水中のイオン状態や物理化学的変化は、溶存酸素や酸化還元電位の変化に依存し、これらは底質表層底生生物の働きや有機物の関わりで決められることも示されているが<sup>15)</sup>、陸域由来濁質の沿岸底質堆積後、溶存酸素供給や底質攪拌コントロールが、底質間隙中のイオン存在状態と溶出抑止策へ繋がる可能性を示唆している。これは、同時に天然存在ナノサイズマテリアル利用環境修復<sup>16, 17)</sup>への布石でもある。砂粒子の物理的破壊による安価なナノサイズマテリアル作成技術（Water hammer、Water jet利用）は、セシウム・金属イオン脱吸着特性評価と環境修復や資源利用への展開と素材生産に直結する。海草類のもつ代謝産物による生物凝集機能や、貝殻中の高濃度金属イオン集積は、河口域から沿岸の物理条件下で利用可能な環境修復技術と資源回収技術への展開可能性を示している。

#### （４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

##### 【放射性セシウム含有微細粒子の「沈殿抑留（河口沖に大きな掘り込みを造る）」手法】

- ・森林や田畑表面と河川浮遊物中に含まれ、陸域降下放射能の多くを含む、微細～極微細粒子の「沿岸域沈殿抑留」手法への課題に対し、日本で発達し沈殿効率の画期的上昇をもたらした古典的手法（傾斜板など）の沿岸利用における効果の検証ともなる。
- ・大雨時増水河川の濁質沿岸拡散は、容易に沈降する粒径粒子と、沈降せず遠方まで運ばれる微細濁質を分画して評価可能な、流れモデルおよび粒子移動モデル開発が必要になる。この開発のベースには日本で活発だった漂砂、浮遊砂研究や、世界中に存在する数多くの拡散モデルの寄与が大きいだろう。
- ・「沈殿抑留」区域の波浪や波による沈殿効率低下／流出抑止策への検討には、間伐材魚礁などの投入効果検証なども必要となり、同時にこれはセシウムの魚介類への生体濃縮回避システムと、自立型沿岸漁業活性化技術に繋がっていく。
- ・傾斜板付着海藻への微細濁質付着抑留効果の影響評価およびその回収方法も、セシウムなど濁質由来物質の沿岸物質収支・食物連鎖を介した放射能拡散評価に大切となる。傾斜板表面付着貝類の「貝殻」への金属イオン濃縮効果や、セシウム濃縮効果の検証も同様である。
- ・「沈殿抑留」区域周辺には鉄鋼スラグなどを利用した盛土で漂砂堆積を抑止する必要がある。
- ・河口域で抑留沈殿する微細濁質の底質環境中、好気から嫌気条件へ移行した後の底質間隙中に起こる放射性セシウムなどの脱吸着反応のメカニズム解明と支配要因の解明からコントロール手法の検討も忘れてならない。
- ・沈降微細濁質の「浮泥」状態、「ヘドロ存在」状況などの確認、当該条件下での回収システム（ロボットなど）開発も重要になる。
- ・山間や森林溪流などをポイントとして大雨時に発生する放射性セシウム含有微細濁質の抑留と流出抑止に効果の見い出せたチップ濾過槽による濁質（セシウム）削減効果<sup>4, 5, 6)</sup>の検証と実務に向けた維持管理手引き作成も課題になる。

##### 【放射性セシウム含有微細粒子抑留後の「生態系の変化と放射能移動」への課題】

- ・微細濁質や海藻類有機物による底質無酸素化の進行と食物連鎖による抑留放射能の系外移動の評価；系外移動抑止対策へ向けた検討。
- ・海藻付着濁質由来放射性セシウムの去就と食物連鎖による系外移動の評価。
- ・「沈殿抑留」区域全体の物質フローに関与する生物と、物理力の影響評価など。

##### 【回収後の微細濁質処理の課題】

- ・沈殿微細濁質や海藻類と一緒に回収される底質＝海砂の洗浄と海砂中からのセシウム分画濃縮手法が有効かを検討する。
- ・セシウム含有底質回収後の海砂の物理的破壊（Water hammer、Water jetなど）によるナノサイズマテリアル化への検討は、洗浄時脱着セシウムなどの再吸着能へ及ぼす影響と濃縮に及ぼす影響の評価と一体で行う事で、ナノサイズマテリアルの環境修復などへの技術展開の見通しが可能になる。
- ・貝類回収手法と貝殻処理の最適手法の検討は、「沈殿抑留」海域で可能な処理手法と、陸上移送後処理手法の総合的な効果の比較検討となる。

- ・セシウム分画濃縮後残留海砂処理は、海砂洗浄処理の一端である。これは植生利用を可能とする海砂改良（植生可能除塩）が従来不可能だったが、海岸林の消失に伴い要望の高いテーマで、沿岸開発に伴う技術移転の可能性に繋がるテーマとなる。
- ・いずれにしても、濃縮後放射性セシウム廃棄物の最終処理に向けた検討は必須である。

#### 【政策的課題】

- ・森林や源流域溪流由来放射性セシウム局所的抑留捕捉システムに関しては、管轄する担当行政の調整が必要になるだろう。
- ・河口沖に設ける「沈殿抑留」区域設置への課題は大きい。現行法で河口付近を管轄する行政や漁業権設定は不明といった情報もある。台風などの波浪から底質の再懸濁／浮遊を抑止するため、水深10 m以上の深さの掘り込みが必要であるが、河口から沖1 km程度の範囲に、放射能拡散抑止「沈殿抑留」区域の設営や実務的研究には、各行政間の調整が必須である。

#### (5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

魚介類流通は、基準値（放射能100 Bq/kg）に満たない魚介類で可能である。しかし、放射能汚染の現実、放射能レベルの正しい健康リスク影響が分からない事もあり、リスク根拠の正当性以前の議論で、これが魚介類や生鮮食品流通の実態を支配しているように思える。消費者の見えない不安が消費地で当該地域からの生鮮食品購入意欲を後退させ、当該地域経済の回復を遅らせている。目に見える対策と、サイエンスとして成立する客観的評価の公表を伴った対策技術、「安全宣言」の国内と世界へ向けた積極的な発信効果への期待はあるが、そのための具体的な動きや効果が明快な対策は行われていない。

ここまでに記す事項は、河口から海へと運ばれた放射能を河口近くの大形凹みで抑留し、放射能の海洋拡散や、魚介類への移動を抑止する周辺情報である。

放射性セシウム海洋拡散抑止策実施に先立ち、実用化を目指した実証実験は重要である。具体的には河口沖に大きな掘り込みを造ることになる。これには、さまざまな分野の研究者・専門家の知恵の集積、日本発の幾つかの技術の重ね合わせが必要となる。一連の技術確立と実用化へ向けた進捗が、今後の生態修復技術を基盤として発展する可能性もあるだろう。

#### (6) キーワード

広域拡散放射能、森林、河川、濁質、セシウム、河口沖、沿岸拡散、抑止対策、沈殿抑留

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>自然環境の回復過程評価は①ダメージ②メリット③難問の3方向に分かれる。①は多数の報告例がある。②は魚介類の水揚げ量・サイズだが報告例はみられない。回復過程評価の困難な③には復興の妨げとなっている③-1 原子力発電所事故関連評価、③-2 沿岸域と海砂の除塩があげられる。②と③とが関わるヘドロ関連課題は、嫌気条件下から好気条件下への変化における分解特性の基礎研究をあげる事ができる。一方、欧米と同じ「人へ関わる生態系」の観点からの自然環境や生態系に関わる研究は放射能関連の報告が多い。放射能リスクの明確な根拠や、環境負荷低減研究の進捗は報告されていない。7, 8, 10, 18)</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>自然環境の回復過程の方向性を示す応用研究へのシーズは、除染関連研究例と沿岸域植生回復や除塩などの基礎研究に幾つか見いだせる。基礎研究で明らかにされている、山間地から流域と沿岸への放射能拡散の抑止対策や、除染地区空中線量リバウンド対策は、基礎研究をベースにフィージビリティステージへの格上げで解決できると考えられる。基礎研究として安価かつ入手容易な天然ナノ素材利用例に源流でのリン高濃度集積他が、海洋貝殻ではアルカリと土類金属 (ストロンチウム) 集積効果が確認されている。自然環境中でのほぼ無限のナノ素材と有機物の組み合わせによるナノサイブマテリアル利用技術の成熟は今後自然環境修復と密接に関わる中で産業化への可能性が示される。1, 3-6, 9)</li> </ul>
	産業化	×	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>循環型社会の創出を目指す大きな方向性は見いだせず、個々の目指す方向へ産業化が展開している (弱点&amp;強み)。古典的な自然環境の回復技術に関連する新技術の産業化は見いだせず。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>ハリケーンなど自然災害後に特化した自然環境の回復過程評価に関する基礎研究は見いだせなかったが、湿地環境保護と復元や、絶滅危惧種の保全に多くの経験則をもっている。さらに地球環境全体を見据えた環境修復や生態系保全を念頭においた基礎研究を、自然界にも存在するナノマテリアルを利用して本格的に始めている例を幾つか見いだせた。災害復旧や自然環境の修復のテーマでは括れない、次のステージを狙った基礎研究の活発な動きは、大学や研究所を巻き込み、効率的に進めている。環境や生態系保全は、人との関わり方を基準とし考えるスタイルが明確。19, 20)</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎研究と歩調を合わせたフィールドテストへ実験段階は進んでいる。ナノサイエンスの商業的応用はまだフィージビリティスタディ段階だが、干潟環境中へ持ち出した検証など実験フェーズへ進んでいる。ナノサイエンス研究と他の産業との連携分野での進捗状況詳細は不明。湿地、沿岸、森林など古典的テーマの中に進歩的な応用研究例を見いだすことができず。放射能関連の事故後の評価は人や家畜に関する確率論的報告は見いだせるが、それ以外は困難。16, 17, 20)</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>ナノマテリアルの産業化を目指した動きは、幾つもの報告で明らかだが、特記できる報告例を見いだす事は困難だった。実務を進める環境保護庁 (EPA)、陸軍工兵隊 (USACE) などの環境保全への関わりは、災害時/定期的な変化を問わずモデル事業となり得るが例を見いだせず。古典的課題への予算措置などを参考にしても、災害時に特化した自然環境の復元/修復の動きや生態系回復への新たな産業化進展例を認める事はできない。16, 17, 19, 20)</li> </ul>
欧州:全体	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>自然災害のみを対象とする回復過程評価に関わる基礎研究はほとんど見当たらない。欧州における自然環境への取り組みの基本姿勢は「人への関わり」と「回復力」がベースとなっている。米国での研究とは異なり、古典的な研究から生態系や環境保全へ向けた将来展望を進める傾向が強い。東南アジアや南米との共同研究も散見できる。新たな環境保全技術への方向性より、生態系の基本的な理解や陸域の影響が海洋に及ぼす影響評価など地球環境全体への関心を大きな方向性とした研究スタイルで、新産業の創出へ繋がる情報を見いだせず。10-18, 20-24)</li> </ul>

	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>サイエンスとしては優れた基礎研究例が多い事から、新たな応用研究の生まれる余地は大きいと予想できる。しかし現段階で次世代を見据えた応用研究への進捗報告は見いだせず。新たな政策の示す循環型経済では、今までの「採取-利用-廃棄」スタイルから“a circular economy”への変換が明記され、その影響が資源や一次生産と密接に関わる自然環境の回復過程評価にどう影響するか今後目を離せない。<sup>25)</sup></li> </ul>
	産業化	×	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>大雨や地震・津波など非定常時を想定した自然環境の回復過程評価に繋がる産業化に関する情報は、欧州以外の国でも見いだせるGIS、リモートセンシングによる観測・評価などの予防関連技術を見る事ができる。それ以外に、新しい自然環境の回復過程に資する技術開発の産業化は見いだせず。</li> </ul>
欧州 :英独 仏	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>【英】 東南アジアや南米の国との共同研究をベースとした基礎研究は調査観測を重視。災害の引き起こす自然環境への影響を、大きな自然環境の変化の一部ととらえた視点からの研究例では、災害だけでなく定常時に連続する変異の観測も併せ検討。自然の変化を大きく受け入れながら陸から海への物質輸送と生物への影響を考慮。自然活動が引き起こす陸域由来の物質輸送が沿岸生態系や生物群落へ及ぼす影響を検討している。サイエンスの中でも現地調査に主軸をおいた研究スタイルとなっている。新産業の創出へ繋がる情報を見いだせず。<sup>20, 24)</sup></li> <li>【独】 イギリス同様東南アジア共同研究をベースとした基礎研究は調査観測を重視した内容。インドネシアの火山噴火で流出する火山泥濁質の輸送研究例では、生態環境から社会生活への影響を考察。<sup>11, 12, 20)</sup></li> <li>【仏】 海洋の珊瑚礁などを扱った研究は見いだせるが、突発的な災害時の環境変化の回復過程を扱った研究例は見いだせない。<sup>13, 20)</sup></li> </ul>
	応用研究・開発	×	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>【英】 サイエンスとしては優れた基礎研究例が多いが、現地調査観測をベースとするものが中心で、直接応用研究へ繋がるようなフェーズとは異なる。ただし現地調査の解析例では陸起源資源や汚染源の沿岸底質中の存在を明らかにしており、応用研究の生まれる方向に展開していく可能性を予測できる。現段階では、まだ応用研究への展開例は見いだせない。<sup>20)</sup></li> <li>【独】 火山由来泥の輸送、濁質の及ぼす自然環境のダメージ予想は、サイエンス、ナノマテリアル分野への展開の可能性を否定できない。ただし現段階では自然環境の回復過程に繋がる応用研究への展開例は見いだせなかった。<sup>20)</sup></li> <li>【仏】 珊瑚礁回復や、修復技術は古典的なものであって、現在から将来へ繋がるような目新しい技術への応用研究は見当たらず。<sup>20)</sup></li> </ul>
	産業化	×	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>【英】 自然環境の回復過程に大きく関連する新技術開発の産業化は見いだせず。<sup>20)</sup></li> <li>【独】 自然環境の回復過程に大きく関連する新技術開発の産業化は見いだせず。<sup>20)</sup></li> <li>【仏】 自然環境の回復過程に大きく関連する新技術開発の産業化は見いだせず。<sup>20)</sup></li> </ul>
中国	基礎研究	×	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震や大雨災害時の災害後の評価や環境保全の回復過程に特化した、または、準じた基礎研究は見いだせない。</li> </ul>
	応用研究・開発	×	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>関連情報見いだせず。</li> </ul>
	産業化	×	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>関連情報見いだせず。</li> </ul>
台湾	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>災害被災地の植生回復をベースとした生態系保全に向けた研究取り組みは、フィールド直結型となっていて優れている。さらに、リモートセンシングや災害発生を予想できる箇所の遠隔モニタリングシステム導入など、防災を目指す動きは明確に住民と技術を近づけている。地震や大雨による12億m<sup>3</sup>を超える土石流で大被害を多くの犠牲者を出した経緯が、大掛かりな復興対策に盛り込まれ、災害対策研究予算も大型となっている。</li> </ul>

	応用研究・開発	△	→	・土石流からの復旧事業の特徴は、上流域でのコンクリート使用を極力控えた斜面安定化工法や、緑化・植生回復となっている。ダムに流入した2,000万m <sup>3</sup> の堆積土砂の搬出への取り組みは、大雨（台風時）で増水した河川流に堆積土砂を載せ中流から下流へと移動する手法を用いている。この手法は、台湾の急峻な地勢を利用した地域特性上手に取り入れたもので、年間50万m <sup>3</sup> もの堆積土砂処理が可能となった。 <sup>26, 27)</sup>
	産業化	△	→	・急勾配（高さ対斜面奥行きが1:0.3の勾配）斜面、高さ30m、幅45m区間を対象とした工事例に併せた植栽・緑化工法に伴う斜面安定化工法では、植栽成長後二酸化炭素排出量削減効果が82,500t（50年生育を仮定）と見込まれる。温暖化ガス削減効果も当初から考慮し、コンクリート未使用による温暖化ガス削減効果と併せた環境保全効果が工事例とし提示されている。 <sup>26, 27)</sup>
韓国	基礎研究	×	-	・本テーマに関連する災害時の環境保全の回復過程に特化するまたは準じた基礎研究は見いだせなかった。
	応用研究・開発	×	-	・韓国中央を流下する洛東江に連続して建設されたダム群、干拓地の人口港湾都市づくりなど、前政権時代の名残の環境関連の古典的研究は見いだせるが、本テーマに関連する応用研究例は見いだせない。
	産業化	×	-	・関連情報見いだせず。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) 東京大学生産技術研究所, 担体固定化吸着剤を用いた環境中からの小規模分散型セシウム回収プロセスの実用化 「枝葉・樹皮等からのセシウムの脱離・脱着」環境省委託業務報告書, H26年, 3月.
- 2) 国立大学法人名古屋大学, 放射能汚染土壌の飛散防止・洗浄・固化を行う生物処理実用システムの開発 土壌洗浄抽出工法の設計と最適化 環境省委託業務報告書, H26年, 3月 26-30.
- 3) 小林達明 山本理恵, 里山ランドスケープの放射性物質汚染に関する問題と今後の展望日緑工誌, 2012, 38(2)265-273.
- 4) 国立大学法人名古屋大学, 放射能汚染土壌の飛散防止・洗浄・固化を行う生物処理実用システムの開発 木質チップ濾過 環境省委託業務報告書, H26年, 3月 76-104.
- 5) 鳴子ダム管理所, 平成23年度鳴子ダム貯水濁水対策検討業務国土交通省東北地方整備局鳴子ダム管理所, H24年, 3月.
- 6) (株) ニュージェック, ダム湖等の生態系修復による環境保全技術の開発研究 関西電力受託業務報告書, H21年&H22年, 3月.
- 7) 杜の海砂研究会, 海砂（浚渫土砂）の有効利用のための除塩技術の開発 財）東北地域づくり協会報告書, H26年, .

- 8) Tomoyuki HORI et.al, Biodegradation Potential of Organically Enriched Sediments under Sulfate- and Iron-Reducing Conditions as Revealed by the 16S rRNA Deep Sequencing *Journal of Water and Environment Technology*, , 2014, 12, 4 357-366.
- 9) 大越健嗣 編著, 海のミネラル学成山堂書店, H19年, 4月 63-65, 78-79.
- 10) A. Serafim, et.al, Evaluation of sediment toxicity in different Portuguese estuaries: Ecological impact of metal and polycyclic aromatic hydrocarbons *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 130, 30-41.
- 11) Tim C.Jennerjahn, et.al, Environmental impact of mud volcano inputs on the anthropogenically altered Porong River and Mudura Strait coastal water, Java, Indonesia *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 130, 152-160.
- 12) Tim C.Jennerjahn, Steve B Mitchell, Pressures, stress, shocks and trends in estuarine ecosystems- An introduction and synthesis *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 130, 30-41.
- 13) Marie Garrido, et.al, Resilience and stability of *Cymodocea nodosa* seagrass meadows over the last four decades in a Mediterranean lagoon *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, France.
- 14) E.M. Fonseca, et.al, Stormwater impact in Guanabara Bay (Rio de Janeiro): Evidence of seasonal variability in the sediment heavy metals *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, Brazil & U.K.
- 15) Alexandra M.F. Rao, et.al, Alkalinity production in intertidal sands intensified by lugworm bioirrigation *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, Belgium & .
- 16) Greg Gervais, P.E., Sustainable Nano-based Remediation: Current Issues and Concerns - USEPA Perspectives *Technology Innovation and Field Services Division US* , 2013, 41796.
- 17) CoT/NSET/NEHI, Progress Review on the Coordinated Implementation of the National Nanotechnology Initiative 2011 Environmental, Health, and Safety Research Strategy *National Science and Technology Council Committee*, 2014, June 25 14-16.
- 18) Nakanishi・Tanoi Eds., Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident *Springer Open* , 2013, .
- 19) 桜井善雄 訳・編, エバーグレースよ永遠に-広域水環境回復をめざす南フロリダの挑戦-信山社サイテック, 1999, 1 - 91.
- 20) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング(株), 欧米主要国における環境保全政策に対する会計検査の手法と事例平成 21 年度会計検査院委託業務報告書, 平成22年, 2月.
- 21) Elliott, M., Whitfield, A.K, Challenging paradigms in estuarine ecology and management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 94, 306-314.
- 22) S.B.Mitchell, R.J.Uncles, Estuarine sediments in macrotidal estuaries: Future research requirements and management challenges *Ocean & Coastal Management*, 2013, 79, 97-100.
- 23) 環境展望台 , 国連環境計画、多国間環境協定の適切な実施を確保するため最高会計検査機関国際組織 (INTOSI) と覚書締結ニュース, 2013, 41891.

- 24) F.X. Roig-Munar, et.al, Risk Assessment of Beach-Dune System Erosion: Beach Management Impacts on the Balearic Islands Journal of Coastal Research, 2012, Spain.
- 25) European Commission, 『循環型経済:思い切った革新が課題』”Circular economy: the great innovation challenge” Community Research and Development, 2014, 7月.
- 26) Chia-Chun HO, et.al, Ecological countermeasure guidelines and case histories in Taiwan 5-th Asia Regional Conference on Geosynthetics, 2012, January 1-10.
- 27) Ching-chiang Kuo, Using ecotechnology to redirect Taiwan's construction works away from conventional method Ecological Engineering, 2006, 28, 325-332.

### 3.4.4.7 社会環境の再創造手法

#### (1) 研究開発領域名

社会環境の再創造手法

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

災害や危機のない社会を作ることには理想であるが、私たちが投入できる資源には限界がある。限られた資源を使って少しでも「強くしなやかな社会」の実現を図るためには、脅威となるリスクを同定し、それに対してどう備えるべきかを明確化していかななくてはならない。そのためには、ハザード・曝露量・脆弱性から成る関数系として被害をとらえ、被害の予防策を講じる旧来のエンジニアリングアプローチだけでは限界がある。むしろ、たとえ被害が発生したとしても、災害発生後の人間の活動や時間の推移によって災害を乗り越える力を向上させる「レジリエンス」のアプローチが必要となる。その際、万が一被害が発生してもそこから回復できる力をどう備えるかは重要な研究対象となり、社会環境の再創造過程の究明は、レジリエンスアプローチにおける重要な研究開発課題である。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

20世紀が科学技術の発展によって経済活動の拡大と人口爆発を招いた結果、21世紀は「リスク社会」であるという指摘があり、さまざまな種類のリスクから社会の安全・安心を守り、持続的な発展を続けていくことが人類全体に求められている。その中でも、我が国が立ち向かうべきリスクの第一は自然災害である。自然災害に対する研究や対策は随分進んだ印象があるが、結果から見ると、世界では自然災害の件数も被害額も増加している。また、20世紀にさまざまな恩恵をもたらした科学技術の発展そのものがもつ陰の部分として、環境汚染や食の安全問題、情報通信による社会の混乱など、新たにさまざまな種類のリスクが生み出され、配分されていることにも直面しなければならない。

リスクが重大になればなるほど、そうした事態の発生は避けなければならない。しかし、投入できる資源に制約がある中で、十分な予防策を講ずることは困難である。むしろ、万が一被害が発生しても、そこから立ち直ることができる力、言い換えれば社会環境の再創造力を備えておくことも忘れてはならない。このような概念はレジリエンスと言われ、2005年の第2回国連防災世界会議の中で採択をされ、以来防災研究の中心テーマとして議論がされてきた。

社会環境の再創造に関連する概念として、復旧・復興がある。広辞苑によれば、「復旧」とは「もと通りになること」と定義され、「復興」とは「ふたたび盛んになること」とされている。まさに、復旧は被災の影響を「ゼロ」に戻していく過程であり、復興は被災前の状態より「プラス」の状態をつくり出していくものだといえる。水害対応を中心として整備されてきた我が国の災害対策の基本的な考え方は「復旧」であり、災害対策基本法にも「復興」という概念は存在していなかった<sup>1)</sup>。関東大震災からの帝都復興、戦災復興という言葉があるように「復興」とは面的な破壊を受けた市街地を都市計画に則って再生する【都市再建】が「復興」そのものだと考えられていた。いわば、道路や

港湾などの社会基盤の復旧および公園などの都市計画を含めた「目に見える風景の変化」のみが重要視されてきた。1995年に発生した阪神淡路大震災は、我が国でも重要な経済活動を担う大都市圏を襲い、社会基盤を復旧する都市再建だけではまちの活気が戻らないことが明白となり、復興のプロセスとして【経済再建】の重要性が認識された。また、350万人に及ぶ膨大な被災数が生まれたことから新たに被災者の暮らしを立て直す【生活再建】が第3の復興目標に掲げられた。すなわちハード面だけではなく、初めて「被災者視点」というソフト面からの復興が考慮された。

阪神淡路大震災は災害からの復興という新しい研究関心を生み、復興過程に関する実証的な研究群を生み出した。完成までに10年間を要した阪神淡路大震災からの復興過程の研究から、都市再建、経済再建、生活再建という3つの復興目標の達成は、3層構造を持ちつつすべて同時並行で進んでいき、そこには「目的と手段の関係」が存在していることが明らかになった。すべての復興の基層にあたる「社会基盤の復旧」には発災から2年を要した。第2層目は都市再建と経済再建で構成される。都市再建のうち「住宅再建」は5年で完了したが、「都市計画」の実現には10年の歳月を要した。経済再建については、新しい産業構造への転換を目指した「経済の活性化」や「中小企業対策」がなされたが、当時の日本の経済的な停滞も影響して10年では完了しなかった。そのため、第3層目に位置する生活再建も発災から10年の時点では「8割復興」に留まった。下の2層が実現されない限り、3層目の生活再建が達成されることは難しい。目的と手段の関係を構造化したこの復興モデルは、基本的には東日本大震災における復興過程についても妥当性を持ち、今後復興政策を実行していく上で非常に重要なものである。

特に、失ったまち並みを修復する都市再建や、停滞した経済活動の活性化とは異なり、多様な被災者ニーズが基礎となる生活再建においては、震災発生当時「何をもち生活再建とするか」という共通理解は存在していなかった。震災から5年目に神戸市が実施した震災検証の一環として行われたワークショップを通じて、生活再建に必要な要素が7つに集約されることが明らかになった<sup>2)</sup>。7要素の中でも「すまい」「くらしむき」「ここからだ」の3つの要素が安定することは震災の直接的な影響を緩和し、「人と人とのつながり」が「まち」の地域活動への住民参加を促し、その結果被災者自らが震災体験を肯定的に評価するといった相関関係の存在も検証されている<sup>3)</sup>。被災者にとっての復興とは、「人生の再構築」という意味合いをもっているのである。

「人と人とのつながり」は社会関係資本として多くの復興研究で注目される変数となった。社会関係資本を考える際には、個人をベースとしたつながりを超えた主体間のつながりも検討に含める必要がある。社会の再構成を担う自助・互助・共助・公助をつなぐためには、地域の文化・歴史をふまえた上で、いわゆる産・学・公・市民などのさまざまな社会主体が関わる必要がある。既存のコミュニティを超えて、それらの多様な社会主体をどのようにつなぎ、よりいっそう大きな力を引き出す場をどう作り出すか、といった視点からの検討が今後必要である。また、社会制度は当面の必要に応じて時点時点で個別に作られるのが常であり、災害対応や危機対応という場面でそうした社会制度が複雑に重なり合い、時に矛盾する。それらをつないで統合的な社会制度とすることも大切なチャレンジである。

視野を米国に向けると、米国における国土安全保障に関する科学技術研究開発の中で「重要な社会基盤防御 CIP (Critical Infrastructure Protection)」に関する研究では前述のように社会環境を階層的にとらえている<sup>4)</sup>。それはテロの脅威に対して国の安全にとって不可欠な11の社会基盤を定義し、3層で整理している。上水、エネルギー、通信をもっとも基礎となる社会基盤とし、それを利用して第2層の社会基盤システム(金融システム、交通システム、化学工業)が機能し、それら2層を前提として第3層の社会サービス(物流、食料確保、防災、医療、教育)を提供するというモデルである。これらの社会基盤は各種の民間活動を支えるとともに、環境の影響を安定化させる役割をもつ。環境の影響にも階層性を見いだすことができる。もっとも基底となる自然環境の層があり、その上に構築される「モノ」の世界である人工構造物の層、それらをもとに営まれる「コト」の世界である社会・文化の層が存在する<sup>5)</sup>。これら環境層間の安定がゆらぐことが社会環境の再構築を促す契機となるといえる。こうした階層モデルは社会が多くの構成要素からなる自由度の大きなシステムであり、予測できないことが起こるという前提で、被害抑止と緩和に加えて、被害の復元も含めた『レジリエンス』を考える必要がある。

従来の防災モデルは被害予防を目的としており、 $D=f(H,E,V)$ という関数で表される。被害(Damage)を規定する要因として、脅威となるハザード(Hazard)の性質、その影響に曝露(Exposure)される人間社会の規模と、社会がもつ脆弱性(Vulnerability)を想定し、自然現象として災害を見なし、理学・工学の分野を中心にHとVに関して重点的に研究されてきた。しかし、近年続発する大規模災害は災害による被害を完全に予防することができないことを示唆し、モデルの限界を示している。それに代わるモデルとして、たとえ災害が発生しても、それを乗り越える力をもつことに着目するレジリエンスモデルに関心が集まっている。そこでは、被害発生に関わる前記の3要因に加えて、そこからの立ち直りに関わる人間の活動(human Action)と時間間隔(Time adaptation)も加えて、より総合的に防災をとらえる枠組みとして、 $R=f(H,E,V,A,T)$ と定義されている。すなわち、レジリエンスを高めることは、土木や建築という個別の学問分野の問題ではなく、学際的(研究が複数の学問分野にかかわること)な課題という認識を持たなければならない。ひとつの学問分野から見て「それは常識であり、基礎的な知識だ」と言われるようなことでも、すべての知識を統合化した全体像の中ではその意味づけが変化しうることを理解し、防災の全体像を社会に還元していくことが求められている。

そこでは、予防力と回復力の全体最適を考えることができる専門家、マルチハザードの評価ができる専門家の育成も必要である。そして、リスク評価の結果、重大なリスクと評価された場合に適切な予防策を講ずる能力をもっている人も、万が一災害が発生する場合を想定してそれに対応する危機対応従事者の育成も必要である。この3つのバランスがなければ、レジリエンスは向上しない。具体的には、予防力と回復力のベストミックス、リスクマネジメントとクライシスマネジメントのパッケージ化、中長期的・戦略的な事業継続マネジメントとして多重防御や自立・分散・協調に関する科学的根拠に基づいた手法が求められている。

<具体的な近年の動向>

- ・日本では、JST RISTEXにおいて、2012年より「コミュニティ」と「つなぐ」という2つの言葉を大切なキーワードとし、「コミュニティがつなぐ安全・安心な都市・地域の創造」研究開発領域が開始されている<sup>6)</sup>。1. コミュニティの特性をふまえた危機対応力向上に関する研究開発、2. 自助・共助・公助の再設計と効果的な連携のための研究開発、3. 安全・安心に関わる課題への対応のために個別技術・知識をつなぐしくみを構築する研究開発、4. コミュニティをつなぐしくみの社会実装を促進するための研究開発（法規制や制度などの整理分析、新たな取り組みへの仕掛けづくり）などの研究開発などが実施されている。
- ・中国では、2011年より中国科学技術部（MOST）とJSTとが「地震防災」、「気候変動」の2分野に関する研究交流の支援を実施している<sup>7)</sup>。特に「巨大地震災害時における効果的災害対応を実現するための日中比較研究交流」では、近年に発生した地震災害での対応事例を日中間で比較研究することにより、災害時における効果的な危機管理・災害情報システムおよび災害対応計画のあり方を解明することを目的としている。具体的には、日本側は阪神・淡路大震災、東日本大震災などの分析を担当し、中国側は四川大地震などの分析を担当する。本研究交流により、両国の研究チームが相互補完的に取り組むことで、地震災害による人的・物的被害および経済的・社会的影響が軽減されることが期待されている。
- ・米国では、国際災害研究委員会（IRCD）がAnnual Natural Hazards Research and Applications Workshopを1975年から毎年開催している。本年度も学際的な視点から、官民連携・災害研究結果の社会実装・持続可能性とレジリエンスの相乗効果/トレードオフ・高齢化と脆弱性、などに関する発表が行われた。日本からも東日本大震災について発災後の3年間を振り返り、大規模災害時の復興計画について議論された<sup>8)</sup>。
- ・欧州では、国際科学会議（ICSU）が自然災害の影響軽減という喫緊の必要性を認識し、国際社会科学会議（ISSC）と国連国際防災戦略（UNISDR）の共催で、2008年10月に自然災害に関する国際研究プログラムが開始された。このプログラムは「災害リスク統合研究計画」と呼ばれ、研究が進んでも災害が減らないのはなぜかという疑問に正面から取り組んでいる。特に、このプログラムでは、理学、工学のほか、社会、経済、保健衛生など諸科学分野の研究者から共同して、災害リスクの原因を解明し、その上で行政組織とも共同して、科学的知見に基づくリスク削減の意思決定を実践に移すことが目指されている<sup>9)</sup>。
- ・また欧州は、ニーズ主導によるコミュニティ/クラスター形成に取り組んでいる<sup>10)</sup>。
- ・韓国では、2013年2月の新政権発足後に省庁やセクター間の壁をダイナミックに乗り越える試みが行われ、未来創造科学省の機能強化が図られた<sup>11)</sup>。

#### （4）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

- ・社会学ではコミュニティの成立要件として地域性・共同性・つながり性について議論してきた。しかし、農業革命や産業革命を経て、人間社会はコミュニティの成立要件を崩しながらも人が暮らしていけるような社会を作り出してきている。情報革命が進行しインターネットが当たり前となった中で、地域性というものを解除したコミュニティも存在するといえる。空間的に分散していても志を同じくする人々の集まりもコ

コミュニティととらえて新たな現実在即した研究開発を行う必要がある。

- ・東日本大震災以降、レジリエンスの考え方が広がっているものの、それを「国土強靱化」と名付けることで、公共事業の復活と強化がなされている。レジリエンスを強靱化と読み替えることで、構造物による被害抑止というかつての目標を掲げたロバスト（頑強性）の意味で利用される概念になっている可能性や、『粘り強さ』も、構造物が一瞬で崩壊しないようにという構造物による機能低下抑止の部分だけの考え方である可能性がある。基幹的な施設の強度を高めて壊れないように『予防力』を上げることは、レジリエンスを高める一つの構成要素だが、それだけではではない。想定を超える外力が来てしまった時にどう対応するかまで含めて総合的に考える必要がある。
- ・災害時におけるビッグデータやマイナンバーの活用へ対する関心が高まっているが、ELSI (Ethical, Legal and Social Issues) の面からの議論は継続されるであろう。情報保護・共有に関する一人一人のリテラシーを高めるとともに、広域連携を前提とした災害対応業務の効率化を可能にするために、独立したセキュリティポリシーに基づくプロジェクト型クラウドシステムを開発する必要がある。
- ・防災科学技術分野における社会科学系の研究は、災害発生から復興の完成までの一連のイベントを対象とした、信頼性の高い調査に基づく継続的な科学的記述を基礎とする実証型のサイエンスであることへの認識が不足している。

#### (5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・「被災者生活再建支援システム」は、災害の発生後、「建物被害調査員を確保できない」「調査票をデータ化するのが大変」「り災証明発行に膨大な手間がかかる」「支援対象者の特定や公正公平な支援が困難」といったボトルネックを解消し、被災者の生活再建がスムーズに進むよう支援するシステムである。本システムは、京都大学をはじめとする産学共同研究チームが2004年の新潟県中越地震後の小千谷市役所、2007年の能登半島地震後の輪島市役所、同年の新潟県中越沖地震後の柏崎市役所、2011年の東日本大震災後の岩手県など、数々の被災地における被災者生活再建支援業務を支援する中で蓄積された多くの研究ノウハウを統合し、システム化されたものである。2013年台風18号の際の京都府での災害、台風26号による伊豆大島土砂災害などでも活用された。2014年6月20日よりNTT東日本がクラウド型の被災者生活再建支援サービス「Bizひかりクラウド 被災者生活再建支援システム」の提供を開始している<sup>12)</sup>。
- ・内閣府総合科学技術・イノベーション会議 (CSTI) が自らの司令塔機能を発揮して、府省の枠や旧来の分野の枠を超えたマネジメントに主導的な役割を果たすことを通じて、科学技術イノベーションを実現するために2014年度に新たに「SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)」が創設された<sup>13)</sup>。CSTIが重点課題として10課題を選定している。社会環境の再創造に関連が深い課題としては、「レジリエントな防災・減災機能の強化」と「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」がある。
  - ▶ 「レジリエントな防災・減災機能の強化」では、府省連携により災害情報をリアルタイムで共有・利活用する仕組みを構築するとともに、地域における防災リテラシーを向上させることで、国民一人ひとりの防災力の向上を目指し、これらの目標達成のために、①予測：最新観測予測分析技術による災害の把握

と被害推定；②予防：大規模実証試験などに基づく耐震性の強化；③対応：災害関連情報の共有と利活用による災害対応力の向上、の三項目について研究開発が始まる<sup>14)</sup>。

- 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」では、世界最先端のICRT (ICT: Information and Communication Technology + IRT: Information and Robot Technology) など、システム化されたインフラマネジメントを活用し、国内重要インフラの高い水準での維持管理、魅力ある継続的な維持管理市場の創造、海外展開の礎を築くことを目指し、この目標達成のために、①点検・モニタリング・診断技術の研究開発、②構造材料・劣化機構・補修・補強技術の研究開発、③情報・通信技術の研究開発、④ロボット技術の研究開発、⑤アセットマネジメント技術の研究開発を研究開発項目に掲げ、維持管理に関わるニーズと技術開発のシーズとのマッチングを重視し、新しい技術を現場で使える形で展開し、予防保全による維持管理水準の向上を低コストで実現させることの研究開発が始まる<sup>15)</sup>。

#### (6) キーワード

都市再建、経済再建、生活再建、コミュニティ（地縁型・テーマ型）、自助・互助・共助・公助、ソーシャル・キャピタル（社会関係資本）、レジリエンス、人間活動、時間（アダプテーション）、多重防御、自立・分散・協調、リスク評価、リスクコミュニケーション、事業継続マネジメント（BCM: Business continuity management）、プロジェクト型クラウド

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	・内閣府「SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)」が創設され、予測・予防技術の向上が目指されている <sup>13)</sup> 。
	応用研究・開発	○	↑	・内閣府「SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)」が創設され、対応技術の向上が目指されている <sup>13)</sup> 。
	産業化	○	→	・ビッグデータの活用について、ICTの進展に伴い多種多量なデータの生成・収集・蓄積などがリアルタイムで行うことが可能となり、そのようなデータを分析することで未来の予測や異変の察知などを行い、利用者個々のニーズに即したサービスの提供、業務運営の効率化や新産業の創出が期待されている <sup>16)</sup> 。
米国	基礎研究	◎	→	・コロラド大学ボルダー校 (UCB) にある自然災害センターがNatural Hazards Research and Applications Workshopを実施 <sup>8)</sup> 。 ・米国国防高等研究計画局 (DARPA) が防衛科学研究室 (主に数学、物理、化学、生物、材料工学、医学など)、情報処理技術研究室 (主にネットワーク、通信、情報収集など)、マイクロシステム技術研究室 (主に半導体やマイクロマシンなど) の基礎研究を行っている <sup>17)</sup> 。 ・JST国際科学技術共同研究推進事業 (戦略的国際共同研究プログラム) で日米共同研究課題「ビッグデータと災害」領域を実施 <sup>18)</sup> 。
	応用研究・開発	◎	→	・コロラド大学ボルダー校 (UCB) にある自然災害センターがNatural Hazards Research and Applications Workshopを実施 <sup>8)</sup> 。 ・米国国防高等研究計画局 (DARPA) が先進技術研究室、情報活用研究室、特別技術研究室、戦術研究室を設け、応用研究を行っている <sup>17)</sup> 。 ・国立科学財団工学局 (NSF ENG) では関連する研究への助成が行われている <sup>19)</sup> 。
	産業化	◎	→	・知識生産＝基礎研究の重要性から連邦政府による基礎研究への継続的支援をイノベーション政策の基本に据えており、その姿勢はパルミサーノレポートからオバマ政権のイノベーション戦略に至るまで共通している。また、近年では知識生産の担い手としての自国人材の育成にも力が入れている <sup>10)</sup> 。 ・ホワイトハウスの国家準備体制、国家保護、緊急対応を担当する部局が2009年に国家安全保障スタッフ「レジリエンス部門」に統合されるなど、公共政策の分野でもレジリエンス概念を採り入れる動きがある <sup>20)</sup> 。
欧州	基礎研究	◎	→	・市民・社会・経済、さらにはインフラ・サービス・政治的な安定性や繁栄を守るための研究とイノベーションが推進されており、危機・災害への抵抗力の強化については、危機・災害時におけるさまざまなタイプの非常事態管理を支援する技術・能力の開発や、非軍事力と軍事力の相互運用性の促進、情報の信頼性・一貫性とすべての取引・プロセスの追跡可能性の保護などのテーマに取り組んでいる <sup>20)</sup> 。
	応用研究・開発	○	→	・同上
	産業化	△	→	・欧州においては、EUの成長戦略「欧州2020」の一環として実施されている「イノベーション・ユニオン」政策のもと、高齢化や環境問題、社会の安全などの社会的課題への取り組みを強化している。具体例として、産学連携プログラム「欧州イノベーション・技術機構 (EIT)」では、気候変動、ICT、持続可能なエネルギーなどの経済・社会的課題に基づいたバーチャルな連携コミュニティを形成しながら、これら課題を解決する研究・人材育成に力を入れている <sup>10)</sup> 。
中国	基礎研究	△	↑	・地震の予知・予報と構造物、建築物の耐震対策にはいまだ大きな困難があり、中国の地震防災の方針では「予防を中心とし、防災と救助を結び付けて総合的に被害軽減を図る」と強調されている <sup>22)</sup> 。

韓国	応用研究・開発	△	↗	・中国地震局内には地球物理学、地質学、地殻変動学、土木工学、地震予知学などの研究所と地球物理探査、地殻変動測量などのセンターが設けられ、地球科学、数学力学、通信技術、コンピュータ科学など専門分野の確かな基礎を備えた多くの科学技術人材が、地震被害の予防と軽減についての科学的な研究を進めている <sup>22)</sup> 。
	産業化	△	↗	・中国の大学・研究機関の多くは、研究開発の主体であるだけでなく、自らがビジネスを展開して収益を得ることが求められており、短期的には国際科学技術協力を通じて得られたグローバルな知を消化・吸収し、再度イノベーション(Re-Innovation)を創出する主体として、長期的には中国のオリジナルな研究開発成果に基づくイノベーションを創出することが期待されている <sup>11)</sup> 。
	基礎研究	○	↗	・2013年2月の新政権発足後の省庁再編により、科学技術政策の司令塔機能である国家科学技術委員会(NSTC)が、幅広い所管および科学技術予算配分権を有する実施官庁である未来創造科学省に吸収され一体化した。これにより、韓国の科学技術行政はかつてないほど強力な司令塔をもつことになった。特に、科学技術とICTを接続して既存産業に活力を呼び入れ、国民の利便性を向上させるための全政府プロジェクト「創造経済ビタミンプロジェクト」(外部から吸収しなければならないビタミンの特性を科学技術とICT接続の象徴として命名された)が推進され、農業(A)、文化(C)、環境(E)、食品(F)、政府(G)、インフラ(I)、安全(S)など各分野別に①該当産業の活力および競争力の向上、②国民の利便性向上および社会問題の解決が可能な課題を発掘して推進されている <sup>11)</sup> 。
	応用研究・開発	○	↗	・同上
	産業化	○	↗	・未来創造科学省による2013年度政策方針の主な政策として、2017年までに科学技術とICT融合(衛星映像ビッグデータ処理など)の10プロジェクト推進による新産業創出、クラウド法制定、ビッグデータ分析・活用センター構築、M2M試験事業推進を通じたインターネット新産業育成などがある。また、国家情報化のため、文化・医療など民間の活用度が高いDB構築、社会各分野でのICT実装などの推進もあげられている <sup>23)</sup> 。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発(プロトタイプの開発含む)のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル(環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況(大幅に改善された/悪化しているなど)、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。)

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) 林春男：阪神淡路大震災から15年を経て～わかったこと、変わったこと～阪神淡路大震災からの復興，自然災害科学 J. JSNDS 29-3 pp.303-317, 2010
- 2) 田村圭子，林春男，立木茂雄，木村玲欧：阪神・淡路大震災からの生活再建7要素モデルの検証－2001年京大防災研復興調査報告－，地域安全学会論文集，No. 3, pp. 33-40, 2001
- 3) 立木茂雄，林春男，矢守克也，野田隆，田村圭子，木村玲欧：阪神・淡路大震災の長期的な生活復興過程のモデル化とその検証：2003年兵庫県復興調査データへの構造方程式モデリング(SEM)の適用，地域安全学会論文集，No. 6, pp. 251-260, 2004
- 4) Ted G. Lewis, Critical Infrastructure Protection in Homeland Security: Defending a Networked Nation, Wiley-Interscience, 2006

- 5) 程潔, 重川希志依, 目黒公郎, 山崎文雄, 中林一樹, 林春男, 田村圭子: 首都直下地震における問題構造解明のためのTOC論理思考プロセスの適用, 地域安全学会論文集, No. 11, pp. 225-234, 2009
- 6) JST RISTEX 「コミュニティがつなぐ安全・安心な都市・地域の創造」 研究開発領域.  
<http://www.ristex.jp/examin/enzenanshin/>
- 7) JST. 戦略的国際科学技術協力推進事業「日本-中国研究交流」平成23年度新規課題の採択に関して. 2012. <http://www.jst.go.jp/pr/info/info859/sankou.html>
- 8) 39th Annual Natural Hazards Research and Applications Workshop.  
<http://www.colorado.edu/hazards/workshop/current.html>
- 9) 水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) .  
[http://www.icharm.pwri.go.jp/about/commitment\\_j.html](http://www.icharm.pwri.go.jp/about/commitment_j.html)
- 10) 経済産業省. 平成25年度 産業技術調査事業 (持続可能な発展のためのイノベーション政策に関する調査) .2014. [http://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2014fy/E004005.pdf](http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2014fy/E004005.pdf)
- 11) JST CRDS. 科学技術・イノベーション動向報告 韓国編～2013年度版～. 2014.  
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/OR/CRDS-FY2013-OR-03.pdf>
- 12) 東日本電信電話(株), News Release 「Bizひかりクラウド 被災者生活再建支援システム」の提供開始について. 2014. [http://www.ntt-east.co.jp/release/detail/20140520\\_01.html](http://www.ntt-east.co.jp/release/detail/20140520_01.html)
- 13) 内閣府. 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) .  
<http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/index.html>
- 14) SIP 「レジリエントな防災・減災機能の強化」 . <http://www.jst.go.jp/sip/k08.html>
- 15) SIP 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」 . <http://www.jst.go.jp/sip/k07.html>
- 16) 総務省. 平成25年度版情報通信白書. 第1部 第3節 1(1) ビッグデータ の概念.  
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/html/nc113110.html>
- 17) DARPA. <http://www.darpa.mil/default.aspx>
- 18) JST. 国際科学技術共同研究推進事業 (戦略的国際共同研究プログラム) . 日米共同研究課題 (「ビッグデータと災害」領域) の募集のお知らせ. 2014.  
[http://www.jst.go.jp/sicp/announce\\_usjoint\\_2.html](http://www.jst.go.jp/sicp/announce_usjoint_2.html)
- 19) JST/CRDS 2012年度システム科学技術 俯瞰ワークショップ報告書.  
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2012/WR/CRDS-FY2012-WR-08.pdf>
- 20) 岡野内俊子. 地域レジリエンスと事前復興. かながわ政策研究・大学連携ジャーナル. No.4 ②. 2013.  
<http://www.pref.kanagawa.jp/uploaded/attachment/573599.pdf>
- 21) JST CRDS. 科学技術・イノベーション動向報告 ～EU編～ (2013年度版) . 2014.  
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/OR/CRDS-FY2013-OR-04.pdf>
- 22) JST Science Portal China. 中国の地震防災の現状と展望. 2008.  
[http://www.spc.jst.go.jp/hottopics/0901earthquake/r0901\\_he.html](http://www.spc.jst.go.jp/hottopics/0901earthquake/r0901_he.html)
- 23) 総務省. 平成25年版情報通信白書. 第2部 第11節 (4)韓国の情報通信政策の動向.  
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/html/nc24b140.html>

### 3.4.5 観測・計測とその情報に基づく環境管理

#### 3.4.5.1 地球規模の環境モニタリング（リモートセンシングと実測）

##### （1）研究開発領域名

地球規模の環境モニタリング（リモートセンシングと実測）

##### （2）研究開発領域の簡潔な説明

地球規模の環境問題として取り扱う必要がある緊急の課題は温室効果ガスの増加による気候変動ならびにオゾン層減少の問題であり、同時に地球規模に変化する地球表面（例えば植生や氷床の変化など）の監視も重要な領域である。ここでは近年始まった衛星による温室効果ガス観測やその他のグローバルなリモートセンシング技術開発に加え、現場での大気中温室効果ガスやオゾン層破壊関連物質の観測を行うための各種プラットフォーム（地上、船舶、航空機など）での実測技術に関する開発状況を取り扱う。衛星を含めた温室効果ガスの観測ネットワークは全球規模の大気輸送モデルなどを統合利用した最適な観測・評価システムとの連携が今後重要となる。

##### （3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

将来の地球環境変化は気候変動に関わるものが大きく、ここ数十年から100年以内にはグローバルな影響が顕著になると予測されている。こういった予測の確からしさが増すにつれ、気候変動予測に不可欠な全球の温室効果ガスや粒子状物質の動態把握や炭素循環観測の不確実性低減、海洋や地球表層に現れる自然の変化の早期検出、および炭素管理の意思決定が与える効果の評価が求められている。また、そのために地球表層・海洋・大気についての必要十分な観測・評価システムの確立が喫緊の課題とされている<sup>1)</sup>。

例えば、地球温暖化に関連して大気環境のうちの温室効果ガス観測については、我が国は2009年1月に温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT：Greenhouse gases Observing SATellite）「いぶき」を打ち上げ、地球を周回しながら二酸化炭素およびメタンのグローバルな観測を行う技術を確立したほか、その後継機（GOSAT-2、2017年度打ち上げ予定）の開発もすでに開始している。また、衛星リモートセンシングに加えて後述する民間航空機や船を使った半球規模の実測もすでに長期間行っていることと合わせて、地球規模の温室効果ガスモニタリングについては我が国は世界をリードしているといえる。

以下に各種のリモートセンシング（遠隔計測）を使った地球規模の環境モニタリングの現状について、1. 静止衛星によるもの、2. 大型～中型衛星によるもの、3. 国際宇宙ステーションによるもの、4. 小型によるものに大別して説明する。

##### 1. 静止衛星によるもの

定常的な気象観測を目的とする静止気象衛星については、日米欧が中心となって構築した5機程度の衛星からなる体制がすでに構築・定常運用されている<sup>2)</sup>。さらに近年では静止気象衛星に搭載するセンサを高度化し、定常的な気象観測以外の分野での利用拡大を目指す衛星や、定常的な気象観測を主目的としない衛星が計画／運用され始めている。前者としては、我が国のひまわり8/9号（2014年打ち上げ／2016年打ち上げ予定）<sup>3)</sup>や

韓国のCOMS-1 (2010年打ち上げ) <sup>4, 5)</sup>がある。ひまわり8/9号では防災や地球環境監視における利用が検討されている。COMS-1は海色観測をその主目的の1つとしている。後者としては、欧州宇宙機関 (ESA) のSentinel-4 (2018年打ち上げ予定)がある。Sentinel-4では大気組成/大気汚染監視をその主目的としている。

## 2. 大型～中型衛星によるもの

大型～中型衛星による地球規模の環境モニタリングは、衛星リモートセンシングの代表格として日米欧によって幅広く行われている。また、中国やインドなどによる衛星も運用されているが、そのデータ利用は当該国以外ではあまり進んでいない。

大型～中型衛星は太陽同期と呼ばれる軌道に投入されることが多い。太陽同期軌道の衛星による観測は、常に一定の地方時 (例えば午前11時など) に数日～数週間間隔で行われるため、比較的長い時間スケール (週～月単位など) の環境モニタリングに適している。さらに大きい衛星であるため、重量や電力などの負荷の大きい高性能センサの利用が可能である。

中でも1 km程度の空間分解能、数千kmの刈り幅を有する受動型光学センサ (カメラ) による全球観測については、陸域植生や海洋植物プランクトン、南極氷床の長期変動の監視などに使用可能な数十年に及ぶ観測データがすでに蓄積されている。さらに米国ではそのようなセンサに関する研究開発は基本的に終了したとして、2011年に打ち上げられたSuomi NPP衛星より、研究開発機関である米国航空宇宙局 (NASA) <sup>6)</sup> から現業機関である米国海洋大気庁 (NOAA) への移行が進められている。

数十mの分解能、数十km～数百kmの刈り幅の受動型光学センサ (カメラ) についても、米国のLandsat衛星シリーズなどにより1970年代から観測が行われている <sup>7)</sup>。このような観測は刈り幅が狭く数週間に1回程度の頻度になるため、月より短いスケールの環境モニタリングには向かないが、その高い分解能を生かした地域スケールの土地被覆監視などに活用されている。特に米国により1970年、1990年、2000年、2005年、2010年時点の全球データセットがすでに構築されている。

また、マイクロ波 (電波) を使った観測は、雲などの影響を受ける光学観測を補間するものとして活用されている。マイクロ波を使った能動型センサとしては、地表観測に適した合成開口レーダ、降雨レーダ、海上の風向・風速を測定する海面散乱計などがある。合成開口レーダは被雲率の高い熱帯雨林地域の森林伐採などの監視に活用されているが、Lバンド (波長24cm) やXバンド (波長3cm) などの種類があり、その用途や搭載する衛星側の電力や大きさなどの制約により使い分けられている。我が国では1990年代よりLバンドの衛星搭載合成開口レーダを開発・運用しているが、近年ではXバンドを用いる民間衛星が増えている <sup>8-10)</sup>。マイクロ波を用いた受動型センサとしては、海面温度や広域海氷分布の監視に利用されるマイクロ波放射計が日米により開発・運用されている <sup>11)</sup>。

さらにオゾンホールや越境大気汚染、地球温暖化に関係して、大気中の各種微量ガスを観測する衛星も運用/計画されている。成層圏オゾン/オゾンホールの観測については、日米により1979年からの衛星データが蓄積され <sup>12-13)</sup>、オゾンホールの消長が定常的に監視されている。また、主要な大気汚染物質であるNO<sub>2</sub>についても衛星による観測体

制が整い、中国などにおける排出インベントリと衛星観測値の比較などが行われている。近年では主要な温室効果ガスである二酸化炭素とメタンの衛星観測も我が国のGOSATなどにより行われるようになった<sup>14)</sup>。また、レーザレーダによる雲・エアロゾル観測も開始されている<sup>15)</sup>。ただし大気汚染などの時間スケールは一般に週より短いため、1機の極軌道衛星ではその時間変動を的確に把握できない場合がある。このため複数の衛星の組み合わせ利用や次に述べる国際宇宙ステーションの利用なども検討されている。

### 3. 国際宇宙ステーションによるもの

国際宇宙ステーションには我が国が提供した日本実験棟「きぼう」(JEM)があり、その曝露部に設置したセンサによる地球環境観測が可能である。すでに我が国がSMILES(超伝導サブミリ波リム放射サウンダ、2009～2010年)による大気微量成分(成層圏オゾンなど)の観測を行ったほか、米国による可視近赤外域ハイパースペクトルカメラの観測も行われている<sup>16)</sup>。

国際宇宙ステーションには、軌道傾斜角の小さい太陽非同期の軌道のため中低緯度地域の高頻度観測が可能であること、他の地球観測衛星より高度が低いため能動型センサに有利であること、などの特徴がある。これらの特徴を生かした地球環境モニタリングとして、我が国において受動型光学センサによる大気汚染監視や能動型光学センサ(レーザレーダ)による森林樹高観測などの検討が進められている<sup>17)</sup>。

### 4. 小型衛星によるもの<sup>18-23)</sup>

大型～中型衛星では開発・打ち上げコストや開発期間の問題があるため、より低コスト/短期間で打ち上げが可能な小型衛星の利用が近年進んでいる。ただし小型であるため、搭載できる機器の重量や電力に制約があり、地球観測分野では小型のカメラ(可視域および熱赤外域)を搭載する例が大半である。その一方で、同種の衛星を多数打ち上げることが可能になるため、複数衛星を利用した高頻度撮影(1日に1～数回の撮影)を特徴とする民間サービスも開始されている。

以下では、特に温室効果ガス観測に関してまとめる。

温室効果ガス観測に特化した衛星として初めてGOSATが打ち上げられてから5年以上データが蓄積されてきた。アメリカでの観測衛星OCOは2009年の打ち上げに失敗したため、これまではGOSATが世界で唯一の温室効果ガス観測専用の衛星であった(OCO-2は2014年に打ち上げに成功している<sup>24)</sup>)。GOSATは極軌道を回りながら太陽光を光源として地表で散乱して戻ってくる赤外線と地表面や大気から放射される赤外線をフーリエ変換赤外分光法(FT-IR)法で分光して、二酸化炭素とメタンの濃度を観測する衛星である。地表面で散乱される赤外線から解析される濃度としては、大気を鉛直方向に積算した「カラム平均濃度」が得られる。GOSATの観測点は100～300 km四方程度に1点程度であり、各点について1ヶ月間に10回程度観測が行われるため、晴れていれば多数のデータが得られる。しかし実際には、雲に覆われた地域や太陽高度が低い地域、海洋などの反射光が弱い地域の濃度は推定することができない。このため現在は、雲やエアロゾルなどに関する各種のスクリーニング条件を通過した二酸化炭素、メタン濃度デー

タを配信している。また、GOSATの1点1点の観測精度は、実測データの精度よりも一桁落ちるが、多数のデータを採ることができるとともに地域ごとの特徴を捉えることが可能になっている。これによって、アマゾンや中近東、シベリア、アフリカなどこれまでデータの存在しなかった領域での二酸化炭素やメタンの濃度データが得られるようになってきた。

一方で、地上観測などの現場での温室効果ガスの実測技術として、二酸化炭素の観測には歴史的に分光しない非分散赤外線吸収法 (NDIR) が用いられてきた。これは連続的に二酸化炭素濃度を観測できる精度の高い分析法で、精度は0.1 ppm以下と考えられる。濃度レベルの低いメタンや $\text{N}_2\text{O}$ 、フロン類はガスクロマトグラフ法を基本として、GC-FID (Flame Ionization Detector) 検出 (メタン) やGC-ECD (Electron Capture Detector) 検出 ( $\text{N}_2\text{O}$ や $\text{SF}_6$ )、GC-MS (Mass Spectrometer) (フロン類) などが観測に用いられてきた。これらは、サンプリングされた空気を検出器に適当量打ち込み、そのシグナルを得るために、間欠的なデータが得られることになる。また、FID検出には水素が必要であるために、またECDは $^{63}\text{Ni}$ など放射性物質を検出器に用いるために、地上観測所には配置できるが、安全性の面などから船舶や航空機などの搭載が困難な技術である。

数年前から赤外吸収法の1種であるキャビティリングダウン法 (CRD法) が実用化されてきた。これは、半導体赤外線レーザ技術の進歩とともに出現した技術であるが、対象物質の単一の赤外線吸収ラインに合わせて波長掃引を行いつつ、その吸収波長での吸収量を時間測定するものである。キャビティは3面 (もしくは2面) の鏡で多重反射するようになっており、長光路のセルになっている。赤外線はパルスで放出されそのキャビティ中で対象ガスにより吸収され、減衰していく速度が時間分析されることで、濃度に換算するものである。この方法は、赤外線の強さに依存しないため、感度に変化が起こらない精度のよい分析法であり、また単一の分子種を計測するため、炭素同位体比や窒素、水素同位体比測定にも用いられる。さらに、この方法はメタンなど濃度の低い物質にも感度が出せるためにGC-FIDに代わる安全かつ連続的な測定ができる技術として、地上ステーションでの観測に加え、船舶、航空機、車など移動体でも使われるようになってきた。

このようなin situの観測所は国際的には100箇所程度ある (すべての観測所から連続データが採取されているわけではない) が、歴史的にはハワイや南極の観測から始まったアメリカのスクリプス海洋研究所のキーリング博士の業績やそれを引き継ぎ拡大した米国海洋大気庁 (NOAA)、また豪州連邦科学技術研究機関 (CSIRO) などの機関が行って来た経緯がある。アジア太平洋地域では日本の国立環境研究所 (NIES) の地上、船舶、航空機を用いた広域立体観測が進行している。船舶としては、アジア路線や、太平洋路線、オセアニア路線など定期的な商業路線での観測が長年行われており、また、航空機観測としては、シベリアの吸収量変化を調べるためのロシアでの航空機観測とJALを用いた商業路線での広域観測 (CONTRAILプロジェクト) が進行している。気象庁でも、3箇所の定点での観測、また、ヨーロッパでは、欧州委員会 (EC) による観測計画が整備され、地域的な観測網がある。ルフトハンザによる航空機観測も行われている。

このように、温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT) をはじめとする地球環境観測衛星、

航空機、船舶、地上観測ネットワークなどを利用した温室効果ガスの観測が行われ、多様なデータが蓄積されてきたことにより、大気中温室効果ガス濃度と輸送モデルを用いて、大気の側から地表の温室効果ガス収支を推定する手法（トップダウンアプローチ）が発展してきた。これは、インバース解析と一般に言われる手法であり、これまでのシミュレーションモデル（通常はフォワードモデル）を逆に解いていくものであり、発生吸収量を大気濃度変化から求めるものである。

地球表面、特に陸域における植物などによる温室効果ガス吸収量は、通常現場の観測から求めることが行われている。これは、微気象学的方法によるが、測定技術として時間的に高分解能で（つまり高速で、例えば10 Hzで）二酸化炭素濃度やメタンを測定するという技術が必要である。地域的なフラックスを測定するためには、各生態系で多点での観測が必要であり、観測のネットワークが必要であるが、現在では国際的なネットワークとしてのFLUXNETが観測手法の標準化やデータ流通促進を推進しており、2014時点で600地点を超える観測点が活動に参加している。アジア地域では、国立環境研究所が主要な事務局機能を担うAsiaFluxが地域ネットワークとしての役割を果たし、空白域を縮小するための観測点の拡大や人材育成に取り組んでいる。

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

まず一般的にリモートセンシングにおいてネックになっていることなどを下記にまとめた。

1. 衛星から直接計測／推定できる物理量／情報と、現業としての環境モニタリングで必要とされる物理量／情報の間にギャップが一部あることが、衛星データ利用の障壁になっている面がある。  
例1：衛星観測では土地被覆（例：草地）が分かるが、環境モニタリングとしては土地利用（例：畑地）の情報も必要である。  
例2：大気汚染について衛星では鉛直方向の積算値の監視になるが、健康被害などの面では地表付近の情報が必要である。
2. 衛星観測はその計画立案から打ち上げ、データ取得／解析までに要する時間が10年近くになることもあり、環境モニタリングの最新のニーズに必ずしも追随できていない。また一般にデータの継続性が保証されないため、現業としての環境モニタリングに組み込むことは容易ではない。
3. 我が国としての宇宙開発／宇宙利用についてはユーザ省庁の費用分担が強く求められているところであるが、1衛星プロジェクトに数百億円かかる現状では、費用対効果の面で宇宙利用を積極的に進めることは難しい。この問題を回避する方策としては以下が考えられる。
  - 1) 衛星／センサ開発および打ち上げの費用の少なくとも現状の数分の1以下への削減。
  - 2) 安価な小型衛星の更なる活用とそのために必要な衛星自体の性能向上および各種地球環境モニタリングセンサの大幅な小型化／低消費電力化。
  - 3) 複数のユーザ省庁が一つの地球観測衛星に共同出資するスキームの確立。
4. 欧米の公共衛星（国が予算の大半を負担するもの）については無償ですべてのデー

タを、用途を問わずに提供する方針がほぼ共通に採用されているが、我が国では有償データ配布の方針が一部にあるため、欧米の衛星データにユーザが流れる傾向がみられる。

次に、温室効果ガス実測観測での課題などを以下に整理する。

ここでの大気温室効果ガス観測技術開発の特徴として重要なものは、①観測の精度と②観測の代表性である。①観測精度という面から述べると、温室効果ガスの多くは比較的長寿命でありその間に地球上で混合が起こり比較的均一に分布するため、濃度の平均的な年変化率は1%以下でしかないことが多い。例えば、二酸化炭素濃度の年上昇量は0～3 ppm程度である。二酸化炭素濃度は現在ほぼ400 ppmに達しており、年変化率は1%以下であることがわかる。メタンの変化率も同様で、1,800 ppbに対して、濃度の年上昇量は0～13 ppb程度である。さらに加えるならば、大気の移動拡散の性質から、経度方向の濃度分布は比較的少ないため、吸収や排出などの濃度分布を観測するためにも観測精度が必要になる。これらのことから、計測側からの問題には、観測に必要な精度が高いことから計測機器（方法）のバイアスの除去や標準ガスの精度管理の技術的問題を検討する必要性が存在する。

計測方法のバイアスに関しては、それぞれの計測法に依存しているが、赤外吸収を用いる場合は、赤外吸収ラインの形が周りに存在する主要ガス（大気では窒素、酸素、アルゴン）の存在率に影響される場合と同位体存在比に関して吸収量の差が影響する場合がある。NDIR（非分散赤外吸収）法やCRD法では、例えば極端なケースとして、標準ガスを空気ではなく窒素ベースで作ってしまうと、%オーダーの見かけの変化として観測されてしまう。また、 $^{12}\text{C}$ と $^{13}\text{C}$ の存在比が天然の二酸化炭素と異なる標準ガスを用いると、それがバイアスになる可能性もある。

温室効果ガスフラックスの観測には、10分の1秒という高速度で濃度の変動を測定できる応答の速い測器が必要で、これを気象観測用のタワーの上などの外気にさらされる場所に年間を通して設置しなければならない。このため、高時間分解で高い精度が要求されると同時に、熱帯の高温多湿、寒帯の低温、暴風雪などの気象条件にも耐える安定な測器の開発が課題である。このような測器として、二酸化炭素フラックスを測定するための赤外分析計は2000年を過ぎる頃から精度と安定性が増したため、現在では世界規模で普及しているが、メタンフラックス計は現在開発が進んできている。今後、メタンをはじめとする二酸化炭素以外の温室効果ガスについても、野外での長期観測に耐える機器開発と改良が進めば、世界規模での各種温室効果ガスのフラックス長期観測が可能となる。

温室効果ガス測定の世界적인比較実験は、世界気象機関（WMO）の下に組織的に行われつつあるが、WMOの設定する精度範囲にすべての機関がそろえることはまだ難しい。特にメタンや $\text{N}_2\text{O}$ に関しては、機関ごとにある程度のギャップが存在する。しかしながら、二酸化炭素に関しては、ほぼ0.1 ppmの範囲の誤差に多くの機関がそろっている。これらは、測定の問題と標準ガスの製作上の違いなどによるものが混在しており、今後さらなる検討がされていくと考えられる。

衛星観測（リモートセンシング）においては常に感度校正というものができるわけで

はないので、精度や感度変化については常に別の方法との比較をしながらそれを担保しなければならない。そのため太陽光を地上からFT-IRで分光してカラム濃度を求める観測網と協力しながら精度管理を行っている。しかしながら、絶対精度の向上はそれだけでは望めないで、今後の課題となっている。

もう一つの課題である、②温室効果ガス観測値の代表性の問題は、グローバルにどれだけ多くの地域をカバーしたデータを収集できるかということに関係する。現在の観測点の配置は北半球の中緯度に多いが、熱帯地域や北極域、大陸内陸部に少ない。アジア地域には観測点は非常に少なく、観測点がない国がむしろ多い。これらの観測点の不均一性は、地球表面での代表的なデータがある地域は取得できていないことにつながり、地球上のフラックス（単位時間・単位面積当たりの輸送量）の推定について、重要なホットスポットなどの見逃しや、フラックス精度不十分につながる。現在、これについては、すべてではないが衛星による観測が補ってあげられている地域が存在し、その観測の空白域が少しずつ狭くはなっているが、衛星と実際の現場データとは精度や質が異なるために、すべてが解決されているわけではない。今後、衛星データの精度や質の改善が望まれている。例えば衛星観測では、GOSAT-2が今後打ち上げられることになっているが、GOSATでは雲によるデータ採取不可能というケースが多く、熱帯域などのデータが大きく失われているがこれを改善するための方策なども検討されている。

現在、大気濃度データを使ったトップダウンアプローチによる吸収排出量推定という技術が進んでいるが、一方で地表で観測された温室効果ガス収支を衛星データやモデルで積み上げ広域化する手法（ボトムアップアプローチ）の研究も発展している。しかし、トップダウン・ボトムアップ手法を統合し、多様な観測データを融合し、全球の温室効果ガス収支をオペレーショナルに評価する実用的な手法は確立していない。

緊急に取り組むことが必要とされる課題は、全球規模で衛星・航空機・船舶・地上観測によるデータを解析システムに融合し、観測値と計算値がもっとも整合するよう解析システムのパラメータを自動的に調整する手法を開発することである。これにより、国別・地域別の炭素収支の精緻な評価を行い、炭素循環のいわゆるホットスポット（気候変化が炭素循環を変化させ、それが気候変化を加速させる地域）の変化を早期検出する。炭素循環の変化を早期発見してその影響を発信することは、国際社会に対し温暖化対策の緊急性を強く訴えることとなり、持続可能な地球環境と社会の実現に向けた貢献となる。

#### (5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

地球観測に関する政府間会合（GEO：Group on Earth Observations）における観測計画としての全球地球観測システム（GEOS：Global Earth Observation System of Systems）の構築のためにCarbon Strategyを作成し、その実行計画として統合的地球規模炭素観測（IGCO：Integrated Global Carbon Observation）システムにより、統合的な観測やデータの流れの改善などを含む、科学者から、政策担当者までの情報の通り道を作るということが目指されている。

地域的な観測計画として、米国のCarbon Cycle Science PlanやEC諸国でのGHG-Europe、統合炭素簡素システム（ICOS：Integrated Global Observing Strategy）

といった計画が進行中である。中でもICOSは2014～2031年のヨーロッパにおいて長期にわたり温室効果ガスを地上や航空機、タワー、地上FTS、生態系観測ステーションなども含めて観測する計画であり、地域的な高密度のフラックス情報の提供を目指している。

国際連携に基づく衛星による二酸化炭素観測としては、欧州のEnvisat (2002～2012年)、我が国のGOSAT (2009年～)、米国のOCO-2 (2014年～) がすでに打ち上げられたほか<sup>24)</sup>、計画としては中国のTansat (2016年打ち上げ予定)<sup>25)</sup>、我が国のGOSAT-2 (2018年打ち上げ予定) の打ち上げが予定されている。GOSAT-2では、雲回避のシステムなどより多くのデータがとられる工夫が追加される予定である。また、エアロゾルについてのセンサを強化する予定になっている。このように二酸化炭素については結果として国際連携による長期的な衛星観測体制が整いつつある。

中分解能 (数十m程度) 衛星画像に関する欧米の連携としては、米国のLandsat-8 (2013年～、30 m分解能) と欧州宇宙機関のSentinel-2 (2機体制、1号機は2014年、2号機は2016年打ち上げ予定、10～60 m) については、相互に校正された互換性のあるプロダクト (画像) を無償で一般公開する取極が2013年2月に交わされた<sup>26)</sup>。3機の衛星の連携により全球の中分解能衛星画像 (雲を含む) が3日ごとに得られることになり、従来1 km程度のスケールであった数日程度の間隔の全球環境監視が今後は数十mのスケールで実施可能になる。一方で、米国を中心とする午後衛星コンステレーション計画があり、米国では午後1時半頃に赤道を通過する太陽同期軌道に複数の異なる地球観測衛星を投入し、ほぼ同時に取得されたさまざまな衛星観測データを複合利用する取り組み (Afternoon Constellation, A-Train) が進められている<sup>27)</sup>。2014年7月現在、A-Trainには米国衛星が5機、日本およびフランスの衛星が1機ずつ含まれている。従来、複合利用をするためには1機の大型衛星に複数のセンサを搭載する必要があったが、その場合打ち上げ失敗時の影響が大きいほか、開発コスト/期間の面でも問題があった。このような問題はコンステレーション方式では軽減される。

アジア太平洋地域においては残念ながら国際的な観測計画が共有化されてはいない。しかし、この地域は気候変動に係わるホットスポットとして、永久凍土地域、熱帯林、北方・熱帯の泥炭地などが含まれ、気候変化への応答において大きな関心がはらわれている。また、中国やインドなどの人口増大国、急速な経済発展を遂げつつある東南アジア諸国を抱えており、人為起源排出量の予測という面からも重要である。以上のことから、インド、中国、マレーシア、インドネシアでの観測協力が進みつつある。こういったアジア・太平洋域に重点をおいた観測体制の強化を図り、高い時間空間分解能でこの地域の温室効果ガス収支の変化を早期に検出できる手段をもつことは、国際環境問題に係る交渉上、極めて重要である。

東南アジアにおいては、途上国の森林減少・劣化に由来する温室効果ガス排出量の削減活動 (例えば、REDD+ : Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries Plus) が重要であり、その対策が各途上国において実施される際の測定・報告・検証 (MRV : Measure, Report, Verify) システムの構築が重要視されている。REDD+をはじめとする緩和策の議論をより有効なものにするため、衛星を含めた複数の手法による温室効果ガス観測を統合的に利用して削減効果を実測す

るための試みも行われつつある。

(6) キーワード

地球規模、環境モニタリング、温室効果ガス、GHG、炭素循環、CRD、CONTRAIL、GOSAT、OCO、リモートセンシング、衛星、静止衛星、小型衛星、光学、レーザレーダ、マイクロ波、GEO、GEOSS、MRV、REDD+

(7) 国際比較

■地球規模の衛星に関するリモートセンシング技術の国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・大学や研究機関によって研究開発が進められているが、その規模は近年必ずしも拡大していない。
	応用研究・開発	○	→	・大学や研究機関によって研究開発が進められているが、その規模は近年必ずしも拡大していない。
	産業化	○	↓	・我が国の衛星であってもその主要部材を海外調達するケースが近年少なくなっている。
米国	基礎研究	◎	→	・その時の政権の方針にある程度左右されるが、一定規模の投資が常に行われ、アクティビティも高い。
	応用研究・開発	◎	→	・環境分野の衛星については、老朽機の代替／更新計画などがあまり進んでいない。
	産業化	◎	↑	・今までに国のプロジェクトなどで開発された技術を積極的に活用している。
欧州	基礎研究	○	→	・欧州全体として一定規模の投資が継続的に行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	・欧州全体として一定規模の投資が継続的に行われている。また Copernicusなどの将来計画も着実に推進されている。
	産業化	◎	↑	・さまざまな産官の連携が行われている。
中国 <sup>28)</sup>	基礎研究	○	↑	・非常に多くの投資が行われ、多数のプロジェクトが推進されている模様だが、その成果はあまり外部からは見えていない。
	応用研究・開発	○	↑	・気象衛星に関する衛星「風雲」は各種のセンサを搭載している。非常に多くの投資が行われ、多数のプロジェクトが推進されている模様だが（その運用数は現在38基程度）、その成果はあまり外部からは見えていない。
	産業化	△	↑	・アクティビティは高いが、環境分野における技術は高くはない。
韓国	基礎研究	△	→	・大学や研究機関によって研究開発が進められているが、特筆すべき成果はあまり出ていない。
	応用研究・開発	○	↑	・2010年に打ち上げられた静止衛星（COMS-1）関係の研究開発が精力的に進められている。
	産業化	△	→	・欧州からの技術吸収フェーズからまだ脱却できていない。
インド <sup>29)</sup>	基礎研究	○	↑	・非常に多くの投資が行われ、多数のプロジェクトが推進されている。
	応用研究・開発	○	↑	・地球科学、気象、森林、農業、水資源、海洋変化、水産業へのプロジェクトが推進されている。
	産業化	○	↑	・継続的に開発が行われており、産業利用やデータ販売などが進んでいる。

■ 温室効果ガス実測技術の国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・ 大学および研究機関において研究開発が進められている。温室効果ガス観測衛星および各種プラットフォーム（船舶、航空機、衛星）を利用した温室効果ガス関連観測の分野、ならびに大気輸送モデルを用いた地表の温室効果ガス収支の逆解析手法において、世界的に見ても優位またはほぼ同等のレベルにある。ただし、今後当該分野を担う研究者の育成には大きな懸念がある。
	応用研究・開発	○	→	・ 大学および研究機関において研究開発が進められているが、全球規模あるいは国レベルでの地球規模温室効果ガス収支の評価を長期的に可能にする、組織的かつオペレーショナルな観測・解析システムの構築においては、欧米にやや遅れをとっている。
	産業化	△	→	・ 産業化・量産に向けた活動には結びついていない。CO <sub>2</sub> ゾンデ技術開発をしている会社がある。
米国	基礎研究	◎	→	・ 大学および研究機関において研究開発が進められている。温室効果ガス関連の各種観測分野、全球規模での大気輸送モデル開発、ならびに大気輸送モデルを用いた温室効果ガス収支の逆解析による全球および国レベルでの温室効果ガス収支評価の分野において、世界的に優位なレベルにある。
	応用研究・開発	◎	→	・ 大学および研究機関において研究開発が進められている。全球および国レベルでの温室効果ガス収支の評価を組織的に実施可能である。Aircoreという大気鉛直サンプリング技術を開発。
	産業化	○	↑	・ CRDの技術では世界をリードしており産業化・量産に向けた顕著な活動がある。
欧州	基礎研究	◎	→	・ 大学および研究機関において研究開発が進められている。温室効果ガス関連の各種観測分野、全球規模での大気輸送モデル開発、ならびに大気輸送モデルを用いた温室効果ガス収支の逆解析による全球および欧州規模での温室効果ガス収支評価の分野において、世界的に優位なレベルにある。
	応用研究・開発	◎	↑	・ 大学および研究機関において研究開発が進められている。全球および欧州規模での温室効果ガス収支の評価を組織的かつオペレーショナルに実施している。
	産業化	△	→	・ 産業化・量産に向けた活動には結びついていない。
中国	基礎研究	○	↑	・ 中国科学院（CAS）や大学を中心として、海外機関との共同研究などに基づき研究開発が急速に進展している。
	応用研究・開発	△	↑	・ 国レベルでの温室効果ガス収支の評価が実行可能になりつつある。
	産業化	×	→	・ 産業化・量産に向けた活動には結びついていない。
韓国	基礎研究	○	↑	・ 大学を中心として、海外機関との共同研究などに基づき研究開発が進展している。
	応用研究・開発	○	↑	・ 国レベルでの温室効果ガス収支の評価が実行可能になりつつある。
	産業化	×	→	・ 産業化・量産に向けた活動には結びついていない。
インド	基礎研究	△	↑	・ 大学を中心として、海外機関との共同研究などに基づき研究開発が進展している。
	応用研究・開発	△	↑	・ 大学を中心として、海外機関との共同研究などに基づき研究開発が進展している。
	産業化	×	→	・ 産業化・量産に向けた活動には結びついていない。

## (註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

## (註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、  
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

## (註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、  
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

## (註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) 地球環境研究センター「地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動は悪のための研究ロードマップ」CGER-REPORT-I112-2013、117p
- 2) 気象庁気象衛星センター. <http://www.jma-net.go.jp/msc/ja/>
- 3) European Space Agency(ESA). SENTINELS -4/-5 AND -5P.  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinels -4 -5 and -5P](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinels_-4_-5_and_-5P)
- 4) [http://web.kma.go.kr/eng/biz/observation\\_04.jsp](http://web.kma.go.kr/eng/biz/observation_04.jsp)
- 5) <http://kosc.kordi.re.kr/oceansatellite/coms-goci/introduction.kosc/>
- 6) <http://npp.gsfc.nasa.gov/>
- 7) [http://landsat.usgs.gov/science\\_GLS.php](http://landsat.usgs.gov/science_GLS.php)
- 8) [http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos2/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos2/index_j.html)
- 9) <http://www.pasco.co.jp/products/terrasarx/?gclid=CKn5ys-D278CFVGVvQodSU0A7Q>
- 10) [http://www.spaceimaging.co.jp/product/cosmo\\_skymed.html](http://www.spaceimaging.co.jp/product/cosmo_skymed.html)
- 11) [http://www.jaxa.jp/projects/sat/gcom\\_w/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/projects/sat/gcom_w/index_j.html)
- 12) <http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/>
- 13) <http://db.cger.nies.go.jp/ilas2/en>
- 14) <http://www.gosat.nies.go.jp/>
- 15) [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/calipso/main/](http://www.nasa.gov/mission_pages/calipso/main/)
- 16) <http://smiles.tksc.jaxa.jp/indexj.shtml>
- 17) <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/iss-jem-hrep>
- 18) <http://www.sstl.co.uk/>
- 19) <http://www.dmcii.com/>
- 20) <http://www.pasco.co.jp/products/rapideye/?gclid=CIi7zeOI278CFVWSvQodXbIARg>
- 21) <http://www.wakayama-u.ac.jp/ifes/uniform/index.html>
- 22) <http://www.astro.mech.tohoku.ac.jp/~rising2/jp/>
- 23) <http://www.esa-ghg-cci.org/?q=overview>
- 24) <http://oco.jpl.nasa.gov/>
- 25) <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/tansat/>

- 26) [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/ESA NASA collaboration fosters comparable land imagery/](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/ESA_NASA_collaboration_fosters_comparable_land_imagery/)
- 27) <http://atrain.nasa.gov/>
- 28) 辻野照久、各国の地球観測動向シリーズ (第3回) 中国の地球観測活動の方向性—欧州から学ぶ地球観測応用範囲を拡大—、科学技術動向、138号、No.9,33-40(2013)
- 29) 辻野照久、各国の地球観測動向シリーズ (第5回) インドの地球観測活動の方向性—持続可能な資源利用に貢献する世界有数の地球観測衛星群—、科学技術動向、140号、No.11、29-34(2013)

### 3.4.5.2 地域の環境と人間活動の把握（地域の環境計測、人間活動とその影響の把握）

#### （1）研究開発領域名

地域の環境と人間活動の把握（地域の環境計測、人間活動とその影響の把握）

#### （2）研究開発領域の簡潔な説明

環境への人間活動の影響を定量的に把握するための指標として、近年、化学マーカーが用いられている。雨天時越流下水のマーカーとしての糞便指標や、老朽化した下水管路網からの漏水による地下水汚染マーカーなどである。これらの化学マーカーは生物化学的酸素要求量（BOD：Biochemical Oxygen Demand）や大腸菌などの従来の指標を補完・代替する潜在性がある。化学マーカーの標準化、基準化を進めるとともに、これらを用いた体系的な人間活動の影響把握の調査が必要である。

#### （3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

水環境汚染の実態把握にはBOD、化学的酸素要求量（COD：Chemical Oxygen Demand）、栄養塩類、大腸菌などの指標が用いられてきた。これらの従来型の指標は汚染の実態を総体として評価するのに優れているが、さまざまな発生源から水域へ供給されるため、汚染源の特定やそれに基づく発生源対策には不十分である。化学マーカーがこれらを補完するための指標として有効であり、本領域では化学マーカーに焦点をあて記述する。

化学マーカーとは、ある特定の発生源から環境へ負荷される、環境中で安定な化学物質である<sup>1)</sup>。これまで数十種の化学物質が化学マーカーとして提案され、実用化されてきた。この中で21世紀の水環境汚染の低減につながるマーカーとその応用動向や開発動向を以下に例示する。

21世紀の先進国の大都市では下水道が100%普及しており、都市河川においては下水処理水の占める割合が大きくなっている。通常の下水处理では除去しきれない医薬品や抗生物質が下水処理水として都市水域へ供給される。医薬品や抗生物質の中でも、難分解性の成分は下水処理水のマーカーとして、下水処理水の水域への負荷を調べるための化学マーカーとして用いられている<sup>2-4)</sup>。鎮痒剤のクロタミトン<sup>4)</sup>や抗てんかん剤のカルバマゼピン<sup>2,4)</sup>などが下水処理水の化学マーカーとして、欧米、日本、並びに東アジア諸国で用いられている。

東京や大阪のように古くから下水道が普及してきた大都市では、合流式の下水道を採用しているため、一定以上の強度の降雨があると、未処理の下水が雨水とともに都市水域へ放流される雨天時越流下水が発生する。雨天時越流下水による水質悪化は糞便性大腸菌などの微生物指標で調査されているが、微生物の増殖・死滅などの問題があり、信頼性に欠ける。それを補完・代替する意味で、糞便指標のコプロスタノール<sup>1)</sup>や下水のマーカーの直鎖アルキルベンゼン<sup>1,5)</sup>などが提案され、実地で応用され、有用性は十分に確認されてきた<sup>6)</sup>。しかし、これらの化学マーカーと公衆衛生の間の定量的な関係は確立されていない。今後、公衆衛生的な観点から、これらの化学マーカーを定量的に扱い、基準化（公衆衛生上問題となる化学マーカー濃度を設定）していくことが必要であ

る。このような基準化は、先進国だけでなく、下水道普及が遅れており、未処理の下水による汚染が問題になっている開発途上国において人間活動の影響を評価し、対策を立案していく上でも有用である。

地下水は大都市の自己水源として重要であり、防災的にも量・質を保全することが必要である。先進国で、老朽化した下水管路網が破損して、下水が地下水を汚染していることが問題化している<sup>7)</sup>。地下水への下水の混入箇所を特定して、対策を講じることが必要である。地下水への下水混入を特定するためのマーカーとして、難分解性の医薬品・抗生物質<sup>4)</sup>や合成甘味料<sup>8,9)</sup>などが水溶性の下水マーカーとして応用されている。これらの下水マーカーの中でも合成甘味料が、その分析操作が簡便であることからマーカーとして用いる調査が欧米を中心に活発に行われてきている<sup>8-11)</sup>。

都市表面流出水、特に道路排水も、21世紀の都市が抱える大きな水質汚濁源である。表面流出が時空的に大きく変動することから、従来型の指標を用いて定量的に把握することは困難であり、化学マーカーの開発が求められてきた。これまでに、タイヤ摩耗粒子に由来するベンゾチアゾール類<sup>12)</sup>やレジン酸<sup>13)</sup>が道路排水のマーカーとして提案され、応用的な研究が行われてきた。しかし、これらのマーカーは物性が水溶性と粒子吸着性の中間的なものであることもあり、定量的な取り扱いが難しく、欧米でも応用例は少ない。水溶性の強いマーカーと粒子吸着性の強いマーカーの開発が必要である。

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

それぞれの汚染源についてのマーカーごとに研究開発状況は異なり、課題・ボトルネックも異なるので、汚染源ごとに記載する。

糞便汚染のマーカーとしてのコプロスタノールと直鎖アルキルベンゼンについては、マーカーとしての有用性はこれまでの基礎研究<sup>1, 14, 15)</sup>や応用的な調査<sup>6, 16, 17)</sup>から十分に明らかにされてきた。公衆衛生学的な視点からの基準化が必要である。これまでこれらのマーカーと糞便性大腸菌の関連を調べる研究が行われてきたが<sup>18, 37)</sup>、それらでは旧来の微生物指標を補完することはできても代替することができない。環境微生物や公衆衛生学の研究者とマーカーを扱う化学者が共同して、公衆衛生的な視点から微生物指標と化学マーカーの徹底した比較を行い、化学マーカーの基準化を行うことが求められる。

化学マーカーの分析はガスクロマトグラフ-質量分析計 (GC-MS : Gas Chromatography Mass Spectrometry) や高速液体クロマトグラフ-タンデム質量分析計 (LC-MS/MS : Liquid Chromatography Tandem Mass Spectrometry) を使って最終的な測定が行われる。さらに、それらの機器に注入する以前に煩雑な前処理が必要な場合が多い。機器が高価であることと前処理が煩雑であることが、化学マーカーをルーチンな指標として利用する際のボトルネックである。前処理の簡便化、分析機器のコストダウンが必要である。特に、環境の質の把握のためのモニタリングに対する位置付けを高め、公的機関が継続的に実施することが必要である。

地下水の下水マーカーの合成甘味料に関しては、他のマーカーに比べて格段に前処理が軽減され、多数の試料をルーチン分析できる環境が整ってきた。しかし、化学マーカーに環境基準がないため環境基準を見直すとともに、公的機関による化学マーカーの活用も検討していく必要がある。また、大学、研究所側には化学マーカーの現場への応用

の基盤があるので、官学の連携促進が望まれる。

道路排水のマーカ－については、水溶性および粒子吸着性のマーカ－について、それぞれ決定的なマーカ－が開発されていない。全く新しいマーカ－検索への挑戦をはじめ、最新の機器を活用して、水溶性および粒子吸着性のマーカ－の検出・開発を目的とした基礎的な研究が必要であろう。

#### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

粒子吸着性の化学マーカ－（下水関係）は1998年頃までに基礎的な研究が出そろっていた<sup>1)</sup>。それに加えて、ここ10年間で医薬品・抗生物質を水溶性のマーカ－にする研究が進んできた<sup>3,4)</sup>。その延長線上で合成甘味料を水溶性の下水マーカ－として開発し、応用する調査が進んできた<sup>8,9)</sup>。粒子吸着性と水溶性が出そろったこともあり、各種化学マーカ－を総括し、世界的な標準化や基準化を提案するレビューペーパーもでてきた<sup>19)</sup>。標準化や基準化のための国際学会における化学マーカ－の特別セッションも検討されており、それを契機に国際標準化や基準化が進む可能性もある。

2020年東京オリンピックでは、東京湾内のいくつかの海域が会場として利用される計画である。一方、それらの会場が雨天時越流下水の影響を受ける可能性も懸念されている。雨天時越流下水による東京湾岸部の尿尿汚染を検討する専門家の会合も持たれている。会合では、雨天時越流下水の影響を測るための指標が旧来の微生物指標であり、信頼性に欠けており、コプロスタノールなどの化学マーカ－の導入も必要ではないかと議論されている。国際的な視点からの水質指標という点からも化学マーカ－の基準化を検討する時期であると考えられる。

#### （６）キーワード

指標化合物、分子指標、雨天時越流下水、地下水汚染、尿尿汚染、道路排水、合成甘味料、医薬品・抗生物質、コプロスタノール、直鎖アルキルベンゼン、タイヤ摩耗物

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・糞便指標 <sup>1)</sup> 、下水マーカー <sup>1, 4, 20, 21)</sup> 、道路排水マーカー <sup>12)</sup> について、基礎研究は多数行われてきており、中には世界初のもの <sup>12, 22)</sup> もあり、世界的に進んだ水準にあると評価される。
	応用研究・開発	○	→	・大学や研究所の研究者によるマーカーの応用研究 <sup>6, 17, 21, 23)</sup> は進んでいる。 ・行政機関によるマーカーの応用例は、環境省のモニタリングに一部マーカーが応用されているのみで、全体的に進んでいない。環境省の海洋環境モニタリング調査でも2009年度まではマーカーを測定していたが <sup>36)</sup> 、2010年度以降の調査では測定が打ち切れ、欧米に遅れをとっている。官学連携の応用研究も極めて少ない。
	産業化	×	→	・民間の分析会社がマーカーを独自に分析したり、分析可能項目として商業化しているところは見あたらない。
米国	基礎研究	◎	↑	・糞便指標 <sup>14, 15)</sup> 、下水マーカー <sup>1, 3, 5)</sup> について、基礎研究は多数行われてきており、世界的に進んだ水準にあると評価される。
	応用研究・開発	◎	↑	・大学や研究所の研究者によるマーカーの応用研究 <sup>16, 24)</sup> は進んでいる。 ・行政機関によるマーカーの応用も進められている。
	産業化	◎	↑	・民間の分析会社がマーカーを独自に分析したり <sup>25)</sup> 、それを使って調査提案を行政に対して行った例もある。産業化は進んでいると評価される。
欧州	基礎研究	◎	↑	・下水マーカー、特に水溶性の下水マーカー <sup>2, 8, 26)</sup> に関する研究は世界をリードしている。
	応用研究・開発	◎	↑	・大学や研究所の研究者によるマーカーの応用研究 <sup>9)</sup> は進んでいる。
	産業化	△	→	・目立った動きはない。
中国	基礎研究	△	→	・マーカー開発の基礎研究はほとんど行われていない。
	応用研究・開発	◎	↑	・他国で開発されたマーカーの中国の環境への応用 <sup>27-33)</sup> は極めて活発に行われている。
	産業化	△	→	・目立った動きはない。
韓国	基礎研究	△	→	・マーカー開発の基礎研究はほとんど行われていない。
	応用研究・開発	△	→	・海域での応用例 <sup>34)</sup> と陸水での応用例 <sup>35)</sup> はあるが全体に数は少ない。
	産業化	△	→	・目立った動きはない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) Takada, H., Eganhouse, R., *Molecular markers of anthropogenic waste: Their use in determining sources, transport pathways and fate of wastes in the environment*, in *The Encyclopedia of Environmental Analysis and Remediation*, R. Mayers, Editor. 1998, Wiley and Sons: p. 2883-2940.
- 2) Clara, M., Strenn, B., Kreuzinger, N. (2004) Carbamazepine as a possible anthropogenic marker in the aquatic environment: investigations on the behavior of Carbamazepine in wastewater treatment and during groundwater infiltration., *Water Research*, **38**, 947-954.
- 3) Glassmeyer, S.T., Furlong, E.T., Kolpin, D.W., Cahill, J.D., Zaugg, S.D., Werner, S.L., Meyer, M.T., Kryak, D.D., pp (2005) Transport of Chemical and Microbial Compounds from Known Wastewater Discharges: Potential for Use as Indicators of Human Fecal Contamination, *Environmental Science & Technology*, **39**, 5157 - 5169.
- 4) Nakada, N., Kiri, K., Shinohara, H., Harada, A., Kuroda, K., Takizawa, S., Takada, H. (2008) Evaluation of Pharmaceuticals and Personal Care Products as Water-soluble Molecular Markers of Sewage, *Environmental Science & Technology*, **42**, 6347-6353.
- 5) Eganhouse, R.P., Olaguer, D.P., Gould, B.R., Phinney, C.P. (1988) Use of molecular markers for the detection of municipal sewage sludge at sea, *Marine Environmental Research*, **25**, 1-22.
- 6) 平成14年度建設技術研究開発助成制度事業「環境中における雨天時下水道由来のリスク因子の変容と動態」代表：古米弘明。  
<http://www.mlit.go.jp/chosahokoku/h15giken/h14/pdf/03.pdf>
- 7) Wakida, F.T., Lerner, D.N. (2005) Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study, *Water Research*, **39**, 3-16.
- 8) Buerge, I.J., Buser, H.-R., Kahle, M., Müller, M.D., Poiger, T. (2009) Ubiquitous Occurrence of the Artificial Sweetener Acesulfame in the Aquatic Environment: An Ideal Chemical Marker of Domestic Wastewater in Groundwater, *Environmental Science & Technology*, **43**, 4381-4385.
- 9) Wolf, L., Zwiener, C., Zemann, M. (2012) Tracking artificial sweeteners and pharmaceuticals introduced into urban groundwater by leaking sewer networks, *Science of The Total Environment*, **430**, 8-19.
- 10) Van Stempvoort, D.R., Roy, J.W., Brown, S.J., Bickerton, G. (2011) Artificial sweeteners as potential tracers in groundwater in urban environments, *Journal of Hydrology*, **401**, 126-133.
- 11) Sidhu, J.P.S., Ahmed, W., Gernjak, W., Aryal, R., McCarthy, D., Palmer, A., Kolotelo, P., Toze, S. (2013) Sewage pollution in urban stormwater runoff as evident from the widespread presence of multiple microbial and chemical source tracking markers, *Science of The Total Environment*, **463-464**, 488-496.
- 12) Kumata, H., Yamada, J., Masuda, K., Takada, H., Sato, Y., Sakurai, T., Fujiwara, K. (2002) Benzothiazolamines as Tire-Derived Molecular Markers: Sorptive Behavior in

- Street Runoff and Application to Source Apportioning, *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 702-708.
- 13) Kumata, H., Mori, M., Takahashi, S., Takamiya, S., Tsuzuki, M., Uchida, T., Fujiwara, K. (2011) Evaluation of Hydrogenated Resin Acids as Molecular Markers for Tire-wear Debris in Urban Environments, *Environmental Science & Technology*, **45**, 9990-9997.
  - 14) Murtaugh, J.J., Bunch, R.L. (1967) Sterol as a Measure of Fecal Pollution, *JWPCF*, **39**, 404-409.
  - 15) Walker, R.W., Wun, C.K., Litsky, W. (1982) Coprostanol as an indicator of fecal pollution., *CRC Critical Reviews in Environmental Control*, **12**, 91-112.
  - 16) Writer, J.H., Leenheer, J.A., Barber, L.B., Amy, G.L., Chapra, S.C. (1995) Sewage contamination in the upper Mississippi River as measured by the fecal sterol, coprostanol, *Water Research*, **29**, 1427-1436.
  - 17) Isobe, K.O., Tarao, M., Zakaria, M.P., Chiem, N.H., Minh le, Y., Takada, H. (2002) Quantitative application of fecal sterols using gas chromatography-mass spectrometry to investigate fecal pollution in tropical waters: western Malaysia and Mekong Delta, Vietnam, *Environ Sci Technol*, **36**, 4497-507.
  - 18) Leeming, R., Nichols, P.D. (1996) Concentrations of coprostanol that correspond to existing bacterial indicator guideline, *Water Research*, **30**, 2997-3006.
  - 19) Harwood, J.J. (2014) Molecular markers for identifying municipal, domestic and agricultural sources of organic matter in natural waters, *Chemosphere*, **95**, 3-8.
  - 20) Hayashi, Y., Managaki, S., Takada, H. (2002) Fluorescent Whitening Agents in Tokyo Bay and Adjacent Rivers: Their Application as Anthropogenic Molecular Markers in Coastal Environments, *Environmental Science & Technology*, **36**, 3556-3563.
  - 21) 高田秀重 (2013) 水溶性有機汚染物質による環境問題, *水環境学会誌*, **36**, 308-313.
  - 22) Ishiwatari, R., Takada, H., Yun, S.-J., Matsumoto, E. (1983) Alkylbenzene pollution of Tokyo Bay sediments., *Nature*, **301**, 599-600.
  - 23) Isobe, K.O., Zakaria, M.P., Chiem, N.H., Minh, L.Y., Prudente, M., Boonyatumanond, R., Takada, H. (2004) Distribution of linear alkylbenzenes (LABs) in riverine and coastal environments in South and Southeast Asia., *Water Research*, **38**, 2449-2459.
  - 24) Eganhouse, R.P., Sherblom, P.M., *Assessment of the chemical compositions of the Fox Point CSO effluent and associated subtidal and intertidal environment: Organic chemistry of CSO effluent, surficial sediments and receiving waters*. 1991, Commonwealth of Massachusetts: Boston, MA.
  - 25) Hunt, C.D., Dragos, P., King, K., Albro, C., West, D., Uhler, A., Ginsburg, L., Pabst, D., Redford, D. (1996) The fate of sewage sludge dumped at the 106-mile site - sediment trap study results, *Journal of Environmental Engineering*, **2**, 285-323.
  - 26) Stoll, J.-M.A., Poiger, T.F., Lotter, A.F., Sturm, M., Giger, W.
  - 27) Peng, X., Zhang, G., Mai, B., Min, Y., Wang, Z. (2002) Spatial and temporal trend of sewage pollution indicated by coprostanol in Macao Estuary, southern China, *Marine Pollution Bulletin*, **45**, 295-299.

- 28) Peng, X., Zhang, G., Mai, B., Hu, J., Li, K., Wang, Z. (2005) Tracing anthropogenic contamination in the Pearl River estuarine and marine environment of South China Sea using sterols and other organic molecular markers, *Marine Pollution Bulletin*, **50**, 856-865.
- 19) Ni, H.-G., Lu, F.-H., Wang, J.-Z., Guan, Y.-F., Luo, X.-L., Zeng, E.Y. (2008) Linear alkylbenzenes in riverine runoff of the Pearl River Delta (China) and their application as anthropogenic molecular markers in coastal environments, *Environmental Pollution*, **154**, 348-355.
- 30) Ni, H.-G., Shen, R.-L., Zeng, H., Zeng, E.Y. (2009) Fate of linear alkylbenzenes and benzothiazoles of anthropogenic origin and their potential as environmental molecular markers in the Pearl River Delta, South China, *Environmental Pollution*, **157**, 3502-3507.
- 31) Wang, J.-Z., Guan, Y.-F., Ni, H.-G., Liu, G.-J., Zeng, E.Y. (2010) Fecal steroids in riverine runoff of the Pearl River Delta, South China: Levels, potential sources and inputs to the coastal ocean, *Journal of Environmental Monitoring*, **12**, 280-286.
- 32) Kannan, N., Kim, M., Hong, S.H., Jin, Y., Yim, U.H., Ha, S.Y., Son, Y.B., Choi, D.-L., Shim, W.J. (2011) Chemical tracers, sterol biomarkers and satellite imagery in the study of a river plume ecosystem in the Yellow Sea, *Continental Shelf Research*, **33**, 29-36.
- 33) Wang, J.-Z., Zhang, K., Liang, B. (2012) Tracing urban sewage pollution in Chaohu Lake (China) using linear alkylbenzenes (LABs) as a molecular marker, *Science of The Total Environment*, **414**, 356-363.
- 34) Lee, H., Hong, S., Kim, M., Ha, S., An, S., Shim, W. (2011) Tracing origins of sewage and organic matter using dissolved sterols in Masan and Haengam Bay, Korea, *Ocean Science Journal*, **46**, 95-103.
- 35) Joo, Y.H., Kawano, M., Jung, K.Y., Tatsukawa, R. (1994) Determination of fecal pollution for well and surface waters from livestock raising areas in Korea using coprostanol as an indicator, *Toxicological & Environmental Chemistry*, **45**, 57-67.
- 36) 環境省海洋環境モニタリング調査結果について。  
[http://www.env.go.jp/press/file\\_view.php?serial=24256&hou\\_id=17983](http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=24256&hou_id=17983)
- 37) Isobe, K.O., Tarao, M., Chiem, N.H., Minh, L.Y., Takada, H. (2004) Effect of Environmental Factors on the Relationship between Concentrations of Coprostanol and Fecal Indicator Bacteria in Tropical (Mekong Delta) and Temperate (Tokyo) Freshwaters, *Applied and Environmental Microbiology*, **70**, 814-821.

### 3.4.5.3 環境情報基盤の整備と活用（ユビキタス情報、環境ビッグデータ、GIS）

#### （1）研究開発領域名

環境情報基盤の整備と活用（ユビキタス情報、環境ビッグデータ、GIS）

#### （2）研究開発領域の簡潔な説明

環境・エネルギー問題について、これまでにさまざまな情報が蓄積されてきており、それらの有効活用が社会的な課題となっている。その活用のためのツールとなるべき情報基盤技術は、近年急速に進歩・発展してきているが、それをさらに有効に活用するために、より環境の分野に適合した形での活用技術の開発およびそれらを組み合わせたシステムの構築、さらには有効活用のための政策的課題の克服を目指す。

#### （3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

地球温暖化、生物多様性減少などに代表される地球規模の環境問題が注目されるようになって久しい。それらの問題に対して、1992年の地球サミット以来、さまざまな国際的な取り組みが進められてきており、それに関連する技術面や政策面での研究開発も多方面で進められてきている。

それらの取り組みや研究開発に伴い、環境に関わる多くの情報が蓄積されるようになってきた。代表的なものが環境モニタリングデータであるが、それだけにとどまらず、人間社会に関わるさまざまな情報は、環境問題への対策や未然防止策を考える上で、必要かつ有効なものといえる。地球規模の問題に対するためには、地球全体をカバーするような情報が必要であり、それらの集積が進んできたことによって、いわゆるビッグデータと呼ばれるような大規模なデータ集合体が存在するような状況となってきている。

一方、情報を扱うための技術やシステムについても、ここ数十年の間に極めて急速に進歩してきた。その代表的な要素としては、コンピュータ性能の目覚ましい向上、インターネットに代表される情報通信機能の向上があげられ、それらは情報基盤と呼ばれて、社会基盤の一つとしてとらえられるようになってきた。日本では1960年代から情報社会あるいは情報化社会という用語がみられるようになり、1980年代からのパソコンの普及、1990年代からのインターネットの普及を経て、情報通信機器やシステムが社会を支えることが常識化し、その流れは第二次産業から第三次産業へのシフトという形で、日本の産業構造さえも変化させてきたといえる。そのような動きは、日本を上回る情報大国である米国はいうまでもなく、全世界的に広がっていると言っても過言ではない。

それらの中で、「ユビキタスネット社会」というキーワードがあげられる。ユビキタスネットとは、「『いつでも』（昼でも夜でも24時間）、『どこでも』（職場でも家でも、都会でも地方でも、移動中でも）、『何でも』（家電も身の回りの品も、車も食品も）、『誰でも』（大人も子供も、高齢者も障害者も）、ネットワークに簡単につながる社会の実現」と定義される<sup>1)</sup>。総務省は、平成24年版情報通信白書において、すでに「ユビキタスネットワーク環境の完成」という表現を使っており、すでに実用段階に入っているといえる<sup>2)</sup>。海外でも、国ごとのばらつきはあるものの、世界各国で同様な状況が進んでいることは確実である。

環境情報についても、このユビキタスネットの機能を十分に活用することによって、

有効な環境の管理が行われることが大いに期待され、そのための技術的、政策的な取り組みが課題となっている。技術面では、総務省は完成という言葉を使っているが、一通りの基礎的な要素技術が開発され、基本的な機能が実現した段階という意味であって、具体的な利用技術や、利用のための制度などについては、今後もさまざまな研究開発が求められることは間違いない。

これらの観点から、すでいくつかの研究開発が進められており、高岡ら<sup>3)</sup>による研究や藤井ら<sup>4)</sup>による研究は、その代表例といえる。また総務省では、「ユビキタスネットワーク社会の進展と環境に関する調査研究会<sup>5)</sup>」の設置、「ユビキタス特区における環境立国プロジェクト<sup>6)</sup>」の推進などの施策を進め、平成22年版情報通信白書<sup>7)</sup>において、サステイナブル社会実現のためにテレワークを推進することが必要と指摘しているなど、環境情報に関する多くの方面で、ユビキタスネットワーク社会の活用に向けた動きが進んでいる状況にある。

2番目のキーワードとして、「ビッグデータ」があげられる。ビッグデータという用語は近年多くの分野で盛んに使われるようになったが、その定義は必ずしも明確になっていない。総務省は平成24年版情報通信白書<sup>8)</sup>において、要約すると以下のように説明している。

- ・量的側面：典型的なデータベースソフトウェアが把握し、蓄積し、運用し、分析できる能力を超えたサイズのデータ。
- ・質的側面：構成するデータの出所が多用であり、利用目的からその対象が画定できるようなデータ。

さらにビッグデータの特徴は、データの利用者やそれを支援する者それぞれの観点によって異なるが、共通する特徴として、多量性、多種性、リアルタイム性などがあげられるとしている。ICTの進展によって、このような特徴をもった形でデータが生成・収集・蓄積されることが可能かつ容易になってきており、異変の察知や近未来の予測などを通じ、利用者個々のニーズに即したサービスの提供、業務運営の効率化や新産業の創出などが可能となる点に、ビッグデータ活用の意義があるとしている。

これらの定義には、なお曖昧な点が含まれるが、環境情報においてもビッグデータと呼ぶことが可能なものが出現しつつあり、今後それらが増えていくことは確実である。具体的には、オンライン化された環境モニタリングデータや気象観測データは、現在すでに上記のビッグデータの定義に合致しているとみることができる。そのような状況から、その活用のための研究開発が重要な課題となることは確実といえる。

ビッグデータについては、国際的な動きも急速に進んでおり、日本よりも欧米が先行する状況にある。具体的な動きの例としては、世界最大規模の電気通信系国際学会であるIEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) が2012年からビッグデータに特化した国際学会を毎年開催しており、第3回は2014年10月に開催された<sup>9)</sup>。そのセッション構成は、ビッグデータの構築技術、解析技術、活用技術など多方面にわたっており、多数の研究者の参加があった模様である。ただし、プログラムを見る限り、環境情報に直接関わる講演は少ない。なお、IEEEは研究者と産業界を交えたビッグデータに関する国際会議 (Congress) も毎年開催している。米国の国レベルでは、大統領府科学技術政策局 (OSTP) が「ビッグデータ研究発展イニシアティブ」を発表して、政府の

戦略として取り組む姿勢を明確にしており、研究開発予算が2億ドルに上っている。

国内では、総務省が情報通信審議会ICT基本戦略ボードに「ビッグデータの活用に関するアドホックグループ」を設けて、活用に向けた国レベルの取り組みの検討を開始し、平成25年版情報通信白書<sup>9)</sup>では国としての活用推進の方針を示すとともに、産業界における活用状況や事例の紹介を行っている。その中で、直接環境情報に該当するものはみられないが、エネルギーや農業気象分野の事例があげられており、環境情報に関連する例として注目される。

3番目のキーワードとして、地理情報システム(GIS:Geographic Information System)を取り上げる。GISは、位置や空間に関するさまざまな情報をコンピュータ上で重ね合わせて分析を行ったり、情報を可視化したりするツールのことである<sup>10)</sup>。このGISは、ユビキタスネットやビッグデータと比べると歴史が長く、1960年代にはすでに実用レベルのシステムが実現していた記録があるとされている。1980年代にはGISソフトウェアが商品化されるようになり、地図情報を必要とする多くの分野で利用されるようになった。環境情報も、空間的な位置情報の重要性が高い分野であることから、GISが活躍する余地が非常に広いといえることができる。システム自体の歴史が長いことから、環境情報への活用を目的とした研究例や書物は多数あり、例えば小山ら<sup>11)</sup>、山本<sup>12)</sup>、大西<sup>13)</sup>などがあげられる。

国際的にみると、日本で市販されているGISソフトの多くが海外で開発されたものであることから、欧米、特に米国が要素技術面ではもっとも研究開発が進んでいるとみることができる。ただし、環境情報に関するGISの活用については、日本もすでに高いレベルに達しているといえる。GIS単体としての機能は、すでに完成の域に近いレベルに達していることとみられることから、今後はユビキタスネットやビッグデータのような新しい流れとGISをどのようにして結びつけるかが重要となるものと思われる。

#### (4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

まず前項で取り上げた3つのキーワードのそれぞれに対して、環境情報への活用の面からみた課題やボトルネックとなり得る点を指摘する。

最初に、ユビキタスネットについては、現状ですでに一般市民の多くがタブレット端末やスマートフォンを使って、多くの環境情報を得ることが可能となっていることを前提に考える必要がある。これらの機能がすでに実現し、誰もが端末機器を所持できるようになっていることから、技術面での課題はすでに解消されてきているといえる。逆に、ユビキタスネットの弱点ともいえるべき問題点を、どのように克服するかという点が、最重要課題といえる。その問題点の第一は、情報の一人歩きである。市民が情報を正しく理解し、正しく利用することが必須であるが、現在でもインターネット経由の情報はいまや誤解を招き、誤った利用をされている実態があることから、今後その対策の必要性はさらに高まると予想される。対策として、例えば情報活用に関する教育を充実させることや、流通する情報の理解の助けとなるような情報を付加することなどがあげられる。問題点の第二は、情報弱者の存在である。ユビキタスネット社会から取り残される市民は、今後減少することは確実ではあるものの、ゼロになることはないといえる必要がある。これは環境情報に限ったことではないが、情報を受け取れる人と受け取れ

ない人の格差をどのようにして解消するかは、大変重要な政策課題といえる。総務省でもすでに取り組みが始まっているが<sup>7)</sup>、短期的に解消する見通しは立っていない。

次にビッグデータについては、現在のハードウェア・ソフトウェアで処理しきれないデータ量という定義からみて、それだけの大量のデータを処理するための技術が最優先課題といえる。宇宙開発や気象予測などでは、分散処理の技術が多く適用されていることから、ビッグデータの分析も、それらと同様の技術の利用が当面の方策と考えられる。一方で、環境情報のビッグデータが今後増えてくる際に、情報の信頼性や統一性が大きな問題となる可能性が高い。前述のように、ビッグデータは情報の出所も多様である点に特徴がある。出所が多様であるということは、情報の獲得方法（一般には計測方法）が多様である可能性を否定できないことになる。環境情報の多くは、機器を用いた計測データであることから、計測方法が異なれば、比較や分析には適さないことになる。ビッグデータが有効に活用されるためには、情報獲得方法の統一をどのように実現するかが、技術面でも政策面でも大きな課題といえる。また、ビッグデータに対する技術的な取り組みは、現時点では主に情報機器メーカーあるいは情報通信企業が中心になって進められている傾向が強いことから、国レベルでの政策面での施策の必要性も指摘しておきたい。

3番目のGISについては、前述のようにすでにシステム開発技術面では完成の域に近づいていることから、単独の要素技術としての技術的な課題はほとんどないとみてよい。ただし、情報の可視化機能によって情報流通が盛んになることが、ユビキタスネットについて述べたのと同様の問題、すなわち情報の一人歩きを引き起こす可能性は否定できない。また、地図情報の誤りは重大な影響をもたらす可能性があるため、誤り対策が最大の課題ともいえる。

最後に、3つのキーワードを総合した課題にふれる。すでにビッグデータとGISを組み合わせたデータ処理が、マーケティングなどに活用されるような動きがある。また、ユビキタスネットを通じたビッグデータの利用や、ユビキタスネットにGIS機能を加えるような動きも、今後増えてくるのが確実視される。そのような動きに対しては、個別課題でもふれた情報の信頼性確保や誤り対策、さらには情報セキュリティ対策が、より重要性を増してくることが考えられる。

#### （5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

環境情報に限ったことではないが、情報通信分野で近年ユビキタスネットとともに注目されているシステム技術に、クラウド・コンピューティングがある。これは、離れた場所にあるハードウェア、ソフトウェア、データを含めたコンピュータ資源を、ネットワークを通じて利用するシステム方式または機能を指す用語である。用語自体は2006年に出現したとされているが、システムの的には従来からあったTSS（Time Sharing System）、VAN（Value-Added Network）、ASP（Application Service Provider）などのサービス形態の発展形とみることができる。このクラウド・コンピューティングの普及は、これまでの情報通信機器の高速化・大容量化による情報通信コスト削減をさらに上積みする形となり、ビジネスモデルの変化にも貢献していると考えられる。このような動きは、環境情報の分野でも、本領域で取り上げたユビキタスネット、ビッグデー

タ、GISの活用を促進するものと期待される。

（6）キーワード

環境情報、情報基盤、ユビキタスネット、ビッグデータ、GIS、クラウド・コンピューティング、有効活用、情報獲得、情報信頼性

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・大学などの研究機関を中心に組み込まれているが、欧米、特に米国が先行しており、必ずしも優位とはいえない。
	応用研究・開発	○	↑	・要素技術面では欧米に立ち遅れた面もあるが、応用技術としては、すでに高いレベルにある。 ・総務省が各種の推進プロジェクトを設けており、産業界もそれに呼応していることから、今後さらなる向上が期待される。
	産業化	◎	→	・クラウド・コンピューティングに代表される新しいビジネスモデルがいち早く取り入れられ、世界的にみても優位にある。 ・ビッグデータの活用について、産業界が積極的に取り組む姿勢が顕著である。
米国	基礎研究	◎	→	・情報基盤技術に関する基礎研究は、従来から米国が牽引してきた経緯があり、現在もそれは変わっていない。 ・大学と研究機関と企業が競い合いつつ連携する形ができていることから、今後も優位を持続すると予想される。
	応用研究・開発	◎	→	・現在ももっとも情報基盤整備が進んだ国であり、世界的な優位は揺るがない。 ・ビッグデータ研究開発イニシアティブに多額の予算が投入されるなど、今後も優位を保つ要因が多い。
	産業化	◎	→	・多くの情報通信産業があり、新しいビジネスモデルへの対応力も高いので、引き続き優位にある。 ・独占化、寡占化が進み、今後の発展性にはやや疑問がある。
欧州	基礎研究	○	→	・従来から情報通信分野の基礎研究では米国の先行を許しており、現在もその状況は変わっていない。
	応用研究・開発	○	→	・ドイツではある程度の独自性、優位性をもった研究開発がみられる。 ・他国では顕著な成果をもたらすような活動が見えていない。
	産業化	○	→	・ドイツは相変わらず情報通信機器の大量輸出国であるが、他国には勢いがみられない。 ・EUはクラウドコンピューティングを推進して雇用創出と経済成長を図る方針を打ち出したが、米国と比較すると遅れは否めない。
中国	基礎研究	△	→	・もともと研究よりも他国の技術の移入に力を入れており、研究面での独自性や優位性はない。
	応用研究・開発	△	→	・もともと研究よりも他国の技術の移入に力を入れており、研究面での独自性や優位性はない。 ・ICT政策に力を入れる姿勢がみられるようになってきているが、予算などの具体性が見えていない。
	産業化	△	↑	・独自の産業化の規模が小さく、現時点では優位性は高いとはいえない。 ・移入した技術を活用した産業化の能力が高く、情報基盤技術においても今後活性化が見込まれる。
韓国	基礎研究	△	↑	・大学や研究機関における研究の活発化の傾向がみられる。
	応用研究・開発	○	→	・従来から応用研究に優位性があったが、近年も堅調に推移しているとみられる。 ・ビッグデータ活用に力を入れており、「スマート国家具現のためのビッグデータ・マスタープラン」を2012年に発表している。
	産業化	○	↓	・一時期は大きな成長がみられたが、経済低迷の影響を受け、停滞あるいは低下傾向にある。

## (註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル（環境区分では、競争力のある民間企業の活動のほか、各国・地域での特徴的な環境問題の状況（大幅に改善された／悪化しているなど）、各種取り組み、制度・事業の実施なども含めている。）

## (註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、  
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

## (註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) 総務省、よくわかるu-Japan政策、ぎょうせい、2005.
- 2) 総務省、平成24年版情報通信白書、2012.
- 3) 高岡美佳（研究代表者）、「サステイナブル・ユビキタス社会実現のための要素技術に関する研究」終了報告書、科学技術推進機構社会技術開発センター、2007.
- 4) 藤井進（研究代表者）、「ユビキタス環境下におけるサステイナブル生産システムの構成と運用に関する研究」研究成果報告書、科学研究費成果報告、2012.
- 5) 総務省、ユビキタスネット社会の進展と環境に関する調査研究会報告書、2005.
- 6) 総務省、ユビキタス特区事業の推進、  
[http://www.soumu.go.jp/menu\\_seisaku/ictseisaku/ictriyou/yubikitasu.html](http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictriyou/yubikitasu.html)
- 7) 総務省、平成22年版情報通信白書、2010.
- 8) IEEE、2014 IEEE International Conference on Big Data、  
<http://cci.drexel.edu/bigdata/bigdata2014/>
- 9) 総務省、平成25年版情報通信白書、2013.
- 10) 村山祐司、柴崎亮介、GISの理論、朝倉書店、2008.
- 11) 小山修平、橘淳治、GISの応用--地域系・生物系環境科学へのアプローチ、森北出版、2003.
- 12) 山本佳世子、GISによる環境保全のための土地利用解析、古今書院、2006.
- 13) 大西文秀、環境容量からみた日本の未来可能性-低炭素・低リスク社会への47都道府県3D-GIS-MAP、大阪公立大学共同出版会、2011.