

## 3. 俯瞰区分と研究開発領域

### 3.1 気候変動区分

気候変動区分では、下記の2つの研究開発領域を設定した。なお、緩和策についてはエネルギー分野で取り扱う研究開発領域が該当すること、また、森林や農地土壌の温室効果ガス（GHG）吸収や農地土壌によるGHG排出抑制は、気候変動区分の「気候変動影響予測・評価」、および、循環型社会区分の「農林水産業の環境研究」で取り扱うことから、研究開発領域として設定していない。適応策については、気候変動影響予測・評価に基づいて行われるため「気候変動影響予測・評価」の一部として扱う。

#### 3.1.1 気候変動予測

#### 3.1.2 気候変動影響予測・評価

区分の概要を以下にまとめる。

気候変動予測について、観測では、衛星による観測性能が温室効果ガス全体の把握から二酸化炭素のみを精密に観測するまでに進んできた。陸域の炭素循環を解析するため、二酸化炭素等のフラックス観測を行うタワーが世界各地に建設され、データの共有が始まっている。温室効果ガス観測衛星では、GOSAT（日本、2009年）、OCO-2（米国、2014年）、TanSat（中国、2016年）、今後は、GOSAT-2（日本、2017年）、MicroCarb（フランス、2020年）の打ち上げが予定されている。日本はGOSATを持ち基礎研究で世界の中心にいる。米国は雲・エアロゾルの三次元情報が得られるレーザレーダ（LIDAR）を用いた大規模な基礎研究を行い、衛星開発で培った技術を地上展開する企業が現れてきている。欧州は、EUが推進するCopernicus計画で衛星データの実利用を推進する応用研究が急速に進む。地球システムモデル（ESM：Earth System Model）では、米国は航空宇宙局（NASA）や大気研究センター（NCAR）など多数の研究機関が基礎・応用研究に取り組み世界をリードしている。欧州は7つのESM開発チームがEUのプロジェクトCRESCENDOに参加し、基礎・応用研究ともに強い。日本はオリジナルのモデル開発を行い研究コミュニティの能力は高い。

気候変動影響予測・評価について、水循環では、米国は衛星情報を利用した全球スケールのデータ構築などで圧倒的な力を持ち基礎研究が強い。欧州は全球水文モデル開発で多数の有力なモデルを開発し世界をリードしている。自然災害では、米国は、米国版のIPCC報告書とも呼べるNational Climate Assessmentを出版しており基礎研究として高い水準を保っている。応用研究は各州の基金で進められている。欧州はEUのHorizon2020などの大型プログラムによりEU全体でのモデル開発が進み、基礎・応用研究ともに強い。自然生態系では、米国は、NEONやLTERなど、温暖化と生態系の応答を長期的にモニタリングするプログラムがあり財政基盤が確立している。データベースやモデリングでも世界をリードし基礎研究が強い。欧州は研究の歴史が長く、EUのLIFE気候行動プログラムの実施などで基礎・応用研究で世界をリードする。農林水産業では、日本では米や果樹などの多くの品目、米国では主要作物（トウモロコシ、大豆、コムギ）について、定量的な影響評価が行われ、基礎研究が進展している。欧州では緩和・適応技術が進む。健康・都市生活では、米国がこ

れまで考慮できなかった森林火災の影響定量化手法などの開発を進めるなど基礎研究が強い。欧州は、新たな統計モデルの開発で世界をリードし、基礎・応用研究ともに強い。日本は、基礎研究で熱関連死亡の全球定量化、ダウンスケーリング、シナリオ開発を進め、応用研究では全球気候モデル、都市への精緻化、新たな健康影響予測（例えば河川洪水）などを進め、欧米と肩を並べる。極地では、米国は、公開性の高い気象数値モデル（WRF：Weather Research & Forecasting Model）の国際共同開発・利用を推進し、基礎研究が強い。欧州は、北極で EU プロジェクトによる研究遂行・ネットワーク化を高めており、同プロジェクトでは、経済影響、経済の指導を含む活動も行い、基礎・応用研究ともに強い。日本は、多年の研究の蓄積があり、北・南極に対し、氷床コア解析と合わせた気候モデル研究も国際的評価が高く、AUV（Autonomous Underwater Vehicle、無人水中探査）の活用等新しい技術を検討するなど基礎・応用研究ともに強い。

### 3.1.1 気候変動予測

#### （1）研究開発領域の簡潔な説明

気候変動予測とは、今後、大気中の温室効果ガスや微粒子（エアロゾル）の濃度などがどのように変化するか仮説を立て、コンピュータを用いて気候モデルにより計算し、気候変動を予測することである。気候モデルは、基本的には物理法則によって構築され、観測データを用いて検証される。

ここでは、大気中の温室効果ガスや気候変動に関わる物質の観測データを得る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、衛星による温室効果ガス観測技術やその他のグローバルなリモートセンシング技術、および、大気や海洋の物理だけではなく、エアロゾル、植生、海洋生態系などの要素も取り入れた地球システムモデル（ESM：Earth System Model）を対象とする。また、ESMの構成要素としてエアロゾルの観測やモデルも取り上げる。

#### （2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

##### [意義]

地球温暖化、オゾン層破壊、砂漠化、海洋汚染、酸性雨など、地球規模もしくは広域規模での環境問題が深刻化する中で、地球規模の中長期的な状態を精度良く予測する必要性が高まっている。そして、将来の地球環境変化を考えると、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見込まれ、予測技術の高精度化が強く期待される。

気候モデルを用いた気候変動予測は、予測作業そのものおよび予測結果の評価・検証の両面において様々な観測データを必要とする。時空間的に均一かつ高品質な観測データは、より高精度なモデル計算の初期または境界条件等に必須である。また、予測結果の妥当性を裏付ける観測データの存在は、予測結果に基づく各種対策のコスト分担の社会的議論の前提ともなる。中でも衛星観測は全球規模で時空間的に均一／高密度なデータの取得を行える唯一の観測方法であるため、極めて重要である。

海陸の炭素循環や、大気微量組成間の化学反応など、生物、化学的過程を含んだ気候モデルが多数開発されてきており、それらの総称が地球システムモデル（ESM）である。地球温暖化がもたらす環境変化の包括的な予測を行う際、炭素循環と気候変化の相互作用など、従来の気候モデルには含まれていない過程を考慮することが要請される。

実効性のある気候変動政策を推進するためには、政策立案のための現状把握、および対策の効果の検証が不可欠である。さらに、気象災害低減の観点から、温室効果ガスや粒子状物質（エアロゾル粒子）による気候変動および炭素循環を短期・中期・長期的に高精度で予測するための技術の確立が求められている。

##### [動向（歴史）]

##### ■ 観測

世界初の人工衛星は1957年に旧ソ連が打ち上げたスプートニク1号であるが、その後間

もなく人工衛星の地球観測への利用が始まっている。世界初の気象衛星である米国 TIROS-1 (極軌道衛星) は 1960 年に打ち上げられた。また、米国の静止気象衛星シリーズである GOES の 1 号機は 1975 年に、日本の静止気象衛星シリーズであるひまわりの 1 号機は 1977 年に打ち上げられている。

気象衛星による観測データは、当初は雲の分布の把握等に用いられていたが、やがて熱赤外域のカメラによる海面温度/雲頂温度の観測が行われるようになった。さらに赤外域の高波長分解能分光計/サウンダにより、気温等の鉛直分布の観測も行われるようになった。現在では世界気象機関 (WMO) を中心に各国の気象衛星のデータ共有/観測の継続性/校正検証といった面での関係が測られている (1972 年設置の CGMS (Coordination Group for Meteorological Satellites) 等)。

災害予測等にも関係する降雨観測については、日米の共同ミッションである熱帯降雨観測衛星 (TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission、運用 : 1997~2015 年) によって先駆的な衛星観測が行われた。その後、全球降水観測計画 (GPM : Global Precipitation Measurement、日本が開発した GPM コア衛星は 2014 年に打ち上げ済み) が国際共同事業として実施されている。また、米国の GPS 衛星等からの電波の到達時間が大気中の水蒸気等によって変わることを利用して全球の水蒸気量分布を求めることも行われ、すでに気象庁による天気予報でも利用されている。

1988 年の気候変動に関する政府間パネル (IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change) の設置以降注目を集め続けている地球温暖化については、その要因となる温室効果ガスの濃度およびその時空間分布の把握が強く求められているが、十分な精度の観測を衛星より行うことは技術的に困難であり、全球に 100~200 カ所程度ある地上局による観測に強く依存していた。主要な温室効果ガスである二酸化炭素とメタンについて対流圏下部まで感度をもつ観測を行った世界初の衛星は、日本の環境省・宇宙航空研究開発機構・国立環境研究所の共同ミッションである温室効果ガス観測技術衛星 (いぶき、GOSAT : Greenhouse Gases Observing Satellite、2009 年打ち上げ) である。その後、2014 年には二酸化炭素のみを観測する衛星 OCO-2 (Orbital Carbon Observatory 2) を米国が打ち上げ、2016 年末には中国が TanSat を打ち上げた。2017 年度には日本が GOSAT-2 を、2020 年にはフランスが MicroCarb を打ち上げる予定である。

気象観測については世界気象機関 (WMO) や各国の気象機関による観測が定常的に行われている。特に大気観測については世界気象機関 (WMO) の GAW (Global Atmosphere Watch) において、温室効果ガスについては気象庁の WDCGG (World Data Centre for Greenhouse Gases) にて取りまとめられている。

大気中温室効果ガス濃度を大きく左右する陸域の炭素循環については、二酸化炭素等のフラックス観測を行うタワーが世界各地に建設され、そのデータについては各種地域ネットワーク (AsiaFlux 等) や全球ネットワーク (FLUXNET) での共有が始まっている。

温室効果ガスとともに大気の放射強制力を大きく左右するエアロゾルについては、米国航空宇宙局 (NASA) 主導の AERONET や日本が推進している SKYNET (千葉大学)、AD-NET (国立環境研究所) 等の地上観測ネットワークが活動している。

#### ■ 地球システムモデル (ESM)

地球表層環境をシステムとして見る考え方の提唱者としては、1970 年代に地球環境の維持

に生物圏が能動的役割を果たすとするガイア仮説を発表し論争を起こしたジェームズ・ラブロック（英）とリン・マーギュリス（米）などをあげることができる。これらの業績を礎としながら、地球システム科学という術語を明示的に用い、その今日的な意味の輪郭を初めて明確にしたのは、1988年に米国宇宙航空局（NASA）諮問会議から提出された報告書<sup>1)</sup>であろう。この報告書では地球システム科学の目標を「地球システムの構成要素および要素間の相互作用がどのように発展してきたか、どのように機能しているか、またあらゆる時間スケールについて将来どのように発展していくか、を記述して、地球システム全体についての科学的理解を得ること」と規定し、目標達成のための道具立てとして、全球規模観測や、観測データおよび研究成果を効率的に配布するための情報ネットワーク、モデリングの重要性を指摘している。

近年になってESMが盛んに開発されるようになったきっかけは、炭素循環フィードバックによる温暖化の加速の可能性が示されたことであろう<sup>2)</sup>。多くのESMが炭素循環フィードバックは正の符号をもつ（すなわち温暖化の加速）を示しているが、最近では陸域植生の活動が窒素量により制限されることを考慮すると、この符号が負にもなりうることが分かってきた<sup>3)</sup>。現在、多くの研究機関がESMへの窒素循環過程導入に取り組んでいる。

2021年の発行が想定されているIPCC第6次評価報告書（AR6）へ向け、地球温暖化予測に関する最新の知見を得るうえで重要な役割を果たす第6次結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP6：Coupled Model Intercomparison Project Phase 6）の実験仕様においても、ESMの使用が必須となる実験が設定されており<sup>4)</sup>、CMIP6参加機関の多くからESMを用いた実験結果が提出される見込みである。ESMを用いた実験では、森林伐採などの土地利用変化が地球環境に与える影響の評価も可能となる設定になっており<sup>5)</sup>、温室効果ガスの放出に限らず人間活動の影響を総合的に解析できるようになってきている。このことは、従来の大気海洋結合大循環モデル（AOGCM：Atmosphere-Ocean General Circulation Model）と大きく異なる点といえよう。

粒子状物質（エアロゾル粒子）は、大気汚染物質であるという認識が一般的である。第二次世界大戦直後から、ロンドン・スモッグやヨーロッパでの越境汚染など、先進国での大気汚染は健康被害や環境被害などをもたらす社会問題となった。日本においても、高度経済成長期に大規模な工業地域や都市部で大気汚染は深刻であり、四大公害病の一つである四日市ぜんそくは、二酸化硫黄や、それが酸化して生成される主要エアロゾルの一つである硫酸塩エアロゾルが引き起こす疾患であった。

エアロゾルが引き起こす気候変動については、研究者の間では昔から認識されていた。エアロゾルによって地上に届く太陽光が減衰することを最初に示唆した人物は、ベンジャミン・フランクリンであると言われている<sup>6)</sup>。フランクリンは、1783～1784年の厳冬の理由として、エアロゾルの効果を想定した。また、1980年代には、核兵器の使用による爆発や火災に伴ってエアロゾルが大量発生することにより、「核の冬（Nuclear winter）」と呼ばれる寒冷化が起これと考えられた。

エアロゾルの気候変動を定量的に評価するためには、まず大気中のエアロゾルの地球規模での分布を把握する必要がある。エアロゾルは発生源付近に偏在している傾向があり、かつ、発生源自体が時空間変動する場合もあるため、地上での限られた地点での観測だけでは、地球規模での把握は困難であった。1990年代に入り、人工衛星に搭載されている受動型センサ

で得られたデータを解析することにより、連続的な時空間分布の把握が可能となった。同じく 1990 年代には、組成ごとのエアロゾルの発生・輸送・沈着過程を地球規模で計算する数値モデルの開発が進められた<sup>7)9)</sup>。これら数値モデルは、エアロゾルの全球分布の把握には大きく貢献したものの、実際の大気中には様々な組成のエアロゾルが混在しているため、人工衛星のデータと直接比較したり、エアロゾルによる気候変動を定量的に評価したりする用途には利用できなかった。

その欠点を克服する形で、2000 年代になり、大気中の主要エアロゾルを同時に取り扱う数値モデルが開発された。その中でも、東京大学気候システム研究センター（CCSR、現在：東京大学大気海洋研究所）の研究グループが開発した数値モデル SPRINTARS は、世界に先駆けて開発された<sup>10)</sup>。こうした数値モデルが気候モデルの大気放射（エネルギー収支）過程や雲・降水過程と相互作用することにより、エアロゾルによる気候変動の定量的評価が可能となった。

### （3）注目動向

[新たな技術動向]

#### ■ 観測

##### ● 温室効果ガス観測

地球温暖化の主要原因物質である温室効果ガスについては、その濃度およびその時空間分布の把握が強く求められているが、十分な精度の観測を衛星より行うことは技術的に困難であった。しかし 2009 年打ち上げの GOSAT、2014 年打ち上げの OCO-2 により、二酸化炭素およびメタンのカラム平均濃度について衛星観測の有用性が初めて実証され、日米以外でも温室効果ガス観測衛星が提案されるようになった。

衛星からの温室効果ガスのカラム平均濃度観測手法は、地表面で反射された太陽光を観測する分光計測、または、対象ガスの吸収線近傍の波長のレーザを使う能動型計測に大別される。GOSAT、OCO-2 とともに前者に分類されるが、GOSAT はフーリエ変換分光計とポインティングミラーの組み合わせ、OCO-2 は回折格子を用いた画像分光計と衛星本体のポインティングの組み合わせとなっている。これに対し欧州のグループは回折格子を用いながら観測幅を広げた方式を提案している。後者については日米欧で活発に研究または航空機を用いた実証実験が進められているが、衛生計画として承認／予算措置されたものはない。

##### ● 雲・エアロゾル観測

温室効果ガスとともに大気の放射強制力を大きく左右する雲やエアロゾルの衛星観測については、広刈り幅光学イメージャが長く用いられてきたが、雲・エアロゾルの三次元情報や粒径情報をより直接的に得られるレーザレーダ（LIDAR）の利用の検討が進められてきた。2015 年には米国航空宇宙局（NASA）が開発した CATS（Cloud-Aerosol Transport System）が国際宇宙ステーション（ISS）に取付けられた。同機器は 3 波長（355 nm、532 nm、1064 nm）のライダを搭載している。さらに現在日本と欧州宇宙機関（ESA）で EarthCARE 衛星を、2018 年の打ち上げを目指して共同開発中である。同衛星には大気ライダ（ATLID：Atmospheric Lidar、レーザの波長は 355 nm）が搭載される。

- センサネットワーク

センサネットワークは、基本的に安価・小型・軽量の in-situ 型の各種環境／気象センサと無線通信機能から構成される。AMeDAS 等のすでに実用化されている類似のシステムもあるが、最近では民間を含めて多数の事例がある<sup>11)・14)</sup>。

- ドローン

ドローン（UAV：Unmanned aerial vehicle）は無人で飛行する機械の総称であるが、昨今のモータ等の部品技術、安定した飛行を行うための制御技術、位置と姿勢を把握する測位技術（衛星測位（GNSS：Global Navigation Satellite System）を含む）等の長足の進歩により、その利用範囲が急速に広がっている。特に気象・気候分野ではドローンを用いた高層・低層気象観測実験や気象観測に活用されている<sup>15)・18)</sup>。

### ■ ESM

従来別々の分野で開発されてきた陸域生態系モデル、大気化学モデルをサブモデルとして ESM で統合し、両サブモデル間での物質のやり取りを扱う必要がある。こうした多数のサブモデルの結合を促進するため、カプラーと呼ばれるソフトウェアの開発も盛んになってきている<sup>19)・21)</sup>。

エアロゾルに関連して、研究ツールとして最近実用的となってきたのが、地球規模の雲解像モデルである。これは、1つ1つの雲を陽に表現できる細かい時空間分解能によりシミュレートする数値モデルであり、その代表例として、国際的に評価されている日本のモデル NICAM（Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model）がある。NICAM には、前述のエアロゾルモデル SPRINTARS が組み込まれており、スーパーコンピュータ「京」を用いて、すでに地球全体を 3.5km 格子にしたエアロゾル分布のシミュレーションには成功している<sup>22)</sup>。

また、より日常生活に貢献可能な技術開発として、エアロゾルの濃度分布シミュレーションに適用するデータ同化システムの開発があげられる。データ同化とは、数値モデルによるシミュレーションにおいて観測データを直接利用することであり、気象庁において、日々の天気予報には以前から導入されている。その中で、2015年に運用を開始した気象衛星ひまわり 8号により、10分間隔でのエアロゾル分布の把握が可能となった。このことは、例えば、PM2.5 や黄砂の越境飛来の様子を詳細に把握できるようになったことを意味している。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

### ■ 観測

- 宇宙基本計画に関する国内関係者の活動

今後の宇宙開発体制のあり方に関するタスクフォース会合リモートセンシング分科会（23学会参加）の地球科学研究高度化ワーキンググループが 2016 年に取りまとめた報告書「地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析」<sup>23)</sup>は、地球科学に関する分野ごとに今後必要となる衛星観測についてまとめた包括的な報告書であり、今後の日本の地球観測衛星の長期計画を考える上で一つのベースラインとなる文書である。

- 欧州の Copernicus 計画（旧 GMES 計画）

欧州委員会が進捗している地球観測計画である Copernicus 計画は、衛星・航空機・船舶・地上局等の様々なソースからの地球観測データを収集し、環境および安全保障に関する各

種サービスを通してユーザに信頼出来る最新の情報を提供することを目的とする。特にその Space Component では欧州宇宙機関（ESA）と EUMETSAT（European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites）を通して様々な地球観測を行う Sentinel 1～6 という 6 種類の衛星またはセンサが運用される（1A、1B、2A、3A は打ち上げ済み）。加えて Contributing missions として ESA、EUMETSAT、これらの機関の加盟国、その他の欧州諸国の衛星や国際サードパーティミッション等とも連携し、それらのデータを Copernicus の枠組みで利用可能とする。

#### • IG3IS

世界気象機関（WMO）では IG3IS（Integrated Global Greenhouse Gas Information System）という温室効果ガス情報システムのプロジェクトを開始している。IG3IS は気候変動枠組条約 COP21 後の各国の行動を支援するもので、ローカル、リージョナル、国、全球レベルの空間スケールを対象とし、大気組成計測とインベントリ（排出目録）／社会経済活動データを統合する。IG3IS に関する今後の予定は以下の通りである。

- 2016 年秋 IG3IS の目的とスコープの確定
- 2017 年春 IG3IS プログラムロードマップの完成
- 2017 年夏 IG3IS ロードマップの関係者（Stakeholders と Sponsors）によるレビュー

#### ■ ESM

日本では、海洋研究開発機構等が参加する文部科学省の「気候変動リスク情報創生プログラム」（以下「創生プログラム」）や気象研究所で ESM が開発されており、ESM から得られる知見を、今後の温暖化抑制のための社会経済シナリオ立案に活用する研究などが進んでいる。欧米でも主要研究機関は ESM 開発に取り組んでいるが、EU のプロジェクト CRESCENDO は、英国気象庁ハドレーセンター、独マックスプランク研究所など7つの ESM 開発チームが参加する大規模なプロジェクトであり、ESM の開発・検証や温暖化緩和政策立案への有効活用を目指している。

世界気候研究計画（WCRP）が推進する「第 6 次結合モデル相互比較プロジェクト」（CMIP6）<sup>24)</sup>は、国際的な研究協力を促す重要な枠組みとなっている。

世界の各研究機関でエアロゾルモデルを開発している研究者有志により、エアロゾルモデル相互比較プロジェクト AeroCom が 2002 年に設立された。このプロジェクトは、IPCC 第 4 次および第 5 次評価報告書におけるエアロゾル関連の評価で主要な役割を果たしており、現在も高い活動度を維持している。その他、エアロゾルや大気微量気体の気候影響をより統合的に評価することを目的とした AerChemMIP、エアロゾルなどが降水量にもたらす影響を評価する PDRMIP といったモデル相互比較プロジェクトも近年立ち上げられ、活動を開始している。

環境研究総合推進費戦略的研究開発領域 S-12（2014～2018 年度）では、エアロゾルや大気微量気体である短寿命気候汚染物質（SLCP：Short-Lived Climate Pollutants）に関する研究が進められている。これは、大気化学輸送モデルと逆推計手法を用いた SLCP 排出インベントリの高度化、統合評価モデル（AIM：Asian-Pacific Integrated Model）における SLCP 過程の高度化、気候モデルによる影響評価を行い、最適な SLCP 削減パスの探査を行うものである。

#### (4) 科学技術的課題

[課題 (ボトルネック)]

##### ■ 観測

- 衛星からの温室効果ガス濃度観測

GOSAT で用いられているフーリエ変換分光計は、瞬時視野が大きく雲の混入率が高いため、OCO-2 等の回折格子型機器と比べ最終的な気体濃度データ数が大幅に少なくなる。その一方で回折格子型機器では観測波長範囲が狭いため、複数の温室効果ガス等の濃度を同時に計測することは難しい。

また、GOSAT、OCO-2 のような太陽光を使う観測の場合、太陽高度が低くなる冬期や夜間の観測が出来ないが、レーザを使った計測 (差分吸収ライダー等) ではこれらの問題点を回避出来る可能性がある。その一方でライダーでは長期間に渡る運用可能性にまだ課題がある (レーザ光源の寿命の問題等)。

- 衛星ライダーによるエアロゾル観測

衛星ライダーによるエアロゾル観測については、すでに CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)、CATS が運用され、ATLID の開発が進められている。しかし CALIOP はすでに寿命を越えており、CATS は ISS 搭載のため観測緯度範囲が限定されている一方、ATLID は運用期間が3年と短い。このため ATLID 以降の衛星ライダー計画に着手することが求められているが、高コストのライダー開発、長期間に渡るライダー運用可能性の問題がある。

##### ■ ESM

観測データの不足のため、ESM の開発過程において十分な検証ができず、結果として異なる ESM 間でのシミュレーション結果の差が大きくなってしまふ。こうした ESM 間の相違が、シミュレーション結果を比較して議論する際の障壁になっている。

しかし、仮に十分な観測データがそろったとしても、生物活動に関する数式を多数含む ESM では、含まれるパラメータの値の不確実性が大きく、その調整には膨大な手間と時間がかかることになる。パラメータ調整の際には、パラメータの値を少しずつ変えて多数の数値実験を行ったり、あるいはデータ同化などの応用数学的手法を用いたりして観測データと矛盾しない結果をもたらすパラメータセットを探索することになるが、いずれの場合も膨大な計算機資源が必要となり、例えば、前述の地球全体を 3.5km 格子にしたエアロゾル分布のシミュレーションは、「京」を用いても約1年分の計算をするだけでも困難な状況であり、今日のスーパーコンピュータでも十分とはいえない。

また技術的には、多数の変数からなる膨大な ESM 出力データを保管・配信し解析したり、多くのサブモデルを結合して ESM を開発する際の作業を支援したりするシステムが研究効率の向上のため必須であり、欧米では OASIS<sup>19)20)</sup>、ESMF<sup>21)</sup> などといったプロジェクトで、情報技術者と気候学者との連携によりそうしたシステムの開発が進展している。

[今後取り組むべき研究テーマ]

##### ■ 観測

- 衛星関係

- 温室効果ガス観測用フーリエ変換分光計の感度向上 (露光時間短縮)、複数素子の利

- 用、広範囲（数百 km 四方）を対象とした雲回避観測技術等によるデータ数増加
- 温室効果ガス観測用回折格子分光計の小型化、広刈り幅化、複数気体種対応
- 温室効果ガス観測またはエアロゾルレーザ計測に用いるレーザや光学部品等の長寿命化
- 宇宙用ライダの低コスト化
- ドローン関係

ドローンについては活発な技術開発／実証実験が進められているが、安全上の不安から各種規制も進みつつある。今後ドローン利用を推進するためには、前提となる安全確保技術の確立が求められる。特に気象分野では大気鉛直プロファイル観測のために必要な安全確保技術に関する研究が望まれる。

#### ■ ESM

2013年に発行された IPCC WG1 の第5次評価報告書（AR5）<sup>25)</sup>は、人為起源二酸化炭素排出の累積量と温暖化による気温上昇がよい比例関係にあることを示した。この比例関係の傾きは「炭素排出に対する気候過渡応答」（TCRE : Transient Climate Response to cumulative carbon Emission）とよばれ、人間が二酸化炭素を排出した時の地球の温まりやすさを示している。TCREの平均的な値は、約400PgC（1PgC=炭素10億t）の炭素を排出すると1℃の昇温がもたらされることを示しているが、不確実性も大きく、温暖化抑制策立案に資するためにはTCREの評価精度を高めていく必要がある。その際には、前述した窒素循環と炭素循環の相互作用のESMへの導入も重要なステップとなろう。国際的な研究協力体制を構築し、non-CO<sub>2</sub> GHGs やエアロゾルの効果も考慮したうえで、TCREの最尤値の同定や不確実性の逡減を図ることが急務である。

ESMを通じた温暖化抑制策立案への貢献という観点では、土地利用変化もESMで取り扱うべき重要なテーマとなろう。バイオエネルギー生産のための農地拡大の気候影響や、森林伐採による二酸化炭素放出への炭素税課税の効果など、温暖化抑制策の導入に際する社会経済と地球環境の相互作用の評価を進める必要がある。また海洋についても、酸性化や貧酸素化の水産業への影響など、従来の気候モデルでは取り扱いが困難な問題も顕在化してきているため、高度な海洋生態系モデルを組み込んだESMを開発しこれらの予測を行うことが重要な課題となっている。

環境研究総合推進費戦略的研究開発領域S-12で実施しているような、SLCPが引き起こす気温変化や降水量変化などの具体的な気候変化の定量的評価を気候モデルを用いて行うことが必要である。国際的なモデル相互比較プロジェクトにおいて、他機関の同様な気候モデルによるシミュレーション結果を比較することにより、SLCPの気候影響のbest estimateおよび不確実性の幅の把握を進めなければならない。

### （5）政策的課題

#### ■ 観測

- 衛星開発・運用経費の省庁間分担

地球観測衛星については技術開発を完全に民間／商用ベースにすることは難しく、技術開発に関する国の長期計画およびコスト負担の検討が必要である。一方、民間が地球観測衛星

を長期的に運用するためには、他国の例でも明らかなように、国としての「長期契約によって作り出された安定需要（アンカーテナンシー）」が望まれる。今後は技術開発省庁による長期的な技術開発計画／予算および利用省庁によるアンカーテナンシーにかかる計画／予算を、宇宙関連計画／予算として有機的に取りまとめることが期待される。さらにアンカーテナンシーについては単一省庁では規模／期間的に不十分であると考えられるため、各省庁の案件を国として集約し、民間に示すことが要請される。

● ドローン利用に対する法規制等の緩和

ドローンの利用を進めるためには、安全を確保した上で、飛行場所や飛行高度、飛行時間、目視外飛行等の規制<sup>26)</sup>を緩和することが要請される。

■ ESM

ESM を用いた地球環境変化予測研究は、温暖化問題に関する国際交渉の場で日本が存在感を示し公正な判断を下すための情報基盤となるため、政策課題として戦略的に推進することが重要である。その際には、海外に比べ立ち遅れの目立つ、モデル開発やデータ配信・処理のためのシステム開発<sup>19)・21)・27)</sup>も含めた振興が肝要である。

(6) キーワード

温室効果ガス観測、エアロゾル観測、ライダ、センサネットワーク、ドローン、地球温暖化、スーパーコンピュータ、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）、気候変動枠組条約（UNFCCC）、パリ協定、古気候、生態系、緩和抑制策、大気汚染、エアロゾル、微量気体、短寿命気候汚染物質（SLCP）、気候モデル、地球システムモデル、雲解像モデル、データ同化、Climate and Clean Air Coalition（CCAC）

(7) 国際比較

■ 観測

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	◎	↗	● 温室効果ガス観測衛星についてはそのシリーズ化を受けて世界の中心となっている。エアロゾル観測については独自衛星（GCOM-C1）のほかに欧州との共同プロジェクト（EarthCARE）が進行中である。ただし衛星用観測機器の国内開発に十分なリソースをさけていない面がある（GOSAT-2の分光計は海外製品）。
	応用研究・開発	○	→	● ひまわり8号や世界の雨分布速報（GSMaP）の利用拡大に向けた活動が行われている。
米国	基礎研究	◎	↗	● 国として、戦略的／長期的な視点に基づいて、競争的環境の中で様々な基礎研究を進めている。特にライダを用いた温室効果ガス観測の基礎研究を大規模かつ継続的に続けている。さらに今後の衛星開発の長期計画策定作業も開始されている。 <sup>28)</sup>
	応用研究・開発	◎	→	● 基盤的な広域衛星観測を行ってきたAVHRRやMODISの運用を継続しつつ、その後継センサ（VIIRS）への移行も国として着実に進めており（Suomi NPP, JPSS-1, JPSS-2）、データ利用の基盤が十分に整備されている。また衛星向け開発で培った技術の地上利用展開を行う企業もある <sup>29)</sup> 。

欧州	基礎研究	○	→	● Copernicus 計画への重点化のせいもあり、基礎研究の比重がやや低下／小規模化しているように見受けられる。
	応用研究・開発	◎	↑	● Copernicus 計画を中心として衛星およびその他の地球観測データの定常的な供給を担保し、衛星データの応用、実利用を推進する体制が急速に整備されている。他機関、海外の衛星データを Copernicus に取り込むスキームも構築されつつある。
中国	基礎研究	○	↑	● 温室効果ガス観測を含む数多くの地球観測衛星が打ち上げられ／計画されている <sup>30)</sup> 。ただし、成果は外部からは非常に見えにくい。また地上観測データの中には国外持ち出しが困難なものもある。
	応用研究・開発	△	→	● 衛星そのものは外交ツールの的に利用されているが、取得された衛星データの公開は遅く、その活用状況も現状目立たない。
韓国	基礎研究	○	→	● 海色に重点を置いた静止衛星 COMS は独創的であったが、ひまわり 8 号の運用開始により、その優位性はやや落ちている。また COMS は欧州の企業が開発したものである。
	応用研究・開発	△	↑	● 静止衛星 COMS については後継機 (GEO-KOMPSAT-2A, B) の開発も進んでいることもあり、今後データ利用を強く推進することが予想される。

■ ESM (エアロゾルのモデルを含む)

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	○	→	● 気象庁気象研究所、海洋研究開発機構などで ESM 開発が取り組まれている。いずれの機関でもオリジナルのモデルを開発しており研究コミュニティの潜在能力は高い。創生プログラムなどで資金が拠出されている。 ● 【エアロゾル】 先人による数多くの顕著な業績のために質が維持されているが、当該分野の研究者の減少や地球科学研究専用の航空機がない <sup>31)</sup> ことなどから、今後は下降する懸念がある。
	応用研究・開発	○	→	● 社会経済分野で温暖化緩和抑制シナリオの開発に取り組む研究者と、気候科学者との連携が盛んになってきており、ESM の成果を緩和抑制策立案に活用する素地ができつつある。基礎研究と同様、創生プログラムなどで資金が拠出されている。 ● 【エアロゾル】 気象・気候モデルの開発や改良、およびそれらを使用するための実用的なスーパーコンピュータの導入は着実に進歩している。IPCC 評価報告書に引用される論文は着実に増加している <sup>32)</sup> 。
米国	基礎研究	◎	→	● 地球流体力学研究所、大気研究センター (NCAR)、オークリッジ国立研究所、航空宇宙極 (NASA) など多数の研究機関が ESM 開発に取り組んでいる。 ● 【エアロゾル】 海洋大気局 (NOAA)・NASA・大学などによる研究体制が確立されている。人工衛星・航空機・地上からの観測が充実しているため、基盤的な研究成果が得られやすい環境にある。
	応用研究・開発	◎	↑	● NCAR には社会経済シナリオ開発部門が設置され、気候科学の成果を取り入れた温暖化抑制シナリオ開発に取り組むなど、ESM による成果の政策立案への応用が進展している。モデル開発やデータ配信・処理のためのシステム開発も盛んである <sup>21)27)</sup> 。 ● 【エアロゾル】 気候モデルの質は高いレベルにあるものの、近年は大きな進展が見られない。IPCC 評価報告書における気候変動予測の材料となる主要成果を拠出する地位は維持している。
欧州	基礎研究	◎	→	● 英国気象庁ハドレーセンターなどが早くから ESM 開発を手掛けており <sup>2)</sup> 、国際的な研究コミュニティにおいても牽引役となっている。EU プロジェクト CRESCENDO には 7 つの ESM 開発チームが参加しており、欧州全体での層は厚い。 ● 【エアロゾル】 非常にレベルの高い基礎研究が維持されている。特に大気汚染物質と気候変動の関係性については、英国・ドイツ・ノルウェー・スイス・フランスの研究機関や大学で顕著な業績があげられている。

	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 上記 CRESCENDO では社会経済シナリオ開発と ESM との連携も重要な課題となっている。次期 IPCC 報告書で社会経済シナリオに関する部分を担う国際プロジェクト ScenarioMIP<sup>33)</sup>においても、米国と並び欧州出身の研究者が多数主導的立場で活動している。モデル開発やデータ配信・処理のためのシステム開発も盛んである<sup>19)20)27)</sup>。</li> <li>● 【エアロゾル】 基礎研究の成果を活用した気候モデルの改良を着実に進めている。英国気象庁ハドレーセンターや独マックスプランク気象研究所など、気候変動予測の中心となる研究機関が複数存在し、それぞれが質の高い研究を実施している。</li> </ul>
中国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 現在、大気物理研究所、第一海洋研究所など中国内で7つの研究グループが ESM 開発に取り組んでいる<sup>34)</sup>。海外で開発されたモデルをベースに開発を行っているケースも多いが、オリジナルに開発を進めているグループもある。国家的に気候科学分野のテコ入れを図っており、今後顕著な発展を見せる可能性がある。</li> <li>● 【エアロゾル】 自ら測器や数値モデルを開発して研究を行うレベルに達していない。基本的に米国・欧州・日本のこれまでの研究成果を活用した研究が実施されている段階である。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 次期 IPCC 報告書での温暖化予測プロジェクト（CMIP6）には多数の ESM が参加することが予想される。一方で、ESM による成果を緩和抑制策立案に活用するという動きには乏しい。</li> <li>● 【エアロゾル】 後発ながら気候モデルを開発し、その研究成果が IPCC 評価報告書へ引用されるまでに成長してきた。自国の問題である大気環境の改善と関係する分野であるため、今後の進展が見込まれる。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 韓国気象庁（KMA）では、英国気象庁ハドレーセンターが開発した気候モデルをベースに ESM 開発を進める方針になっており、自国で ESM 開発に取り組むには国内基盤をいっそう強化する必要がある。</li> <li>● 【エアロゾル】 国際的に顕著な研究成果をあまりあげていない。日本と比較して博士課程に進学する学生の比率が高いため、今後レベルが底上げされるポテンシャルはある。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 次期 IPCC 報告書での温暖化予測についても、英国気象庁ハドレーセンターとの協力のもと推進する方針である。韓国独自の観点で ESM の成果を政策立案に活用するのは困難な状況であろう。</li> <li>● 【エアロゾル】 気候変動予測に参画しているグループがない。独自の全球気象モデルを構築するための研究所を2011年に設立したり、静止気象衛星による大気汚染物質の観測計画を米国とともに進めていたりするなど、今後の進展は期待される。</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

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 参考文献

- 1) NASA Advisory Council, 1988: Earth System Science: A Closer View, Report of the Earth System Sciences Committee, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 208pp.
- 2) Cox, P., R. Betts, C. Jones, S. Spall, and I. Totterdell, 2000: Acceleration of global warming due to carbon-cycle feed-backs in a coupled climate model, Nature, 408, 184–187.
- 3) Thornton, P. E., S. C. Doney, K. Lindsay, J. K. Moore, N. Mahowald, J. T. Randerson, I. Fung, J.-F. Lamarque, J. J. Feddema, and Y.-H. Lee, 2009: Carbon-nitrogen interactions regulate

- climate-carbon cycle feedbacks: results from an atmosphere-ocean general circulation model. *Biogeosciences*, 6, 2099–2120.
- 4) C. D. Jones, V. Arora, P. Friedlingstein, L. Bopp, V. Brovkin, J. Dunne, H. Graven, F. Hoffman, T. Ilyina, J. G. John, M. Jung, M. Kawamiya, C. Koven, J. Pongratz, T. Raddatz, J. Randerson, and S. Zaehle, The C4MIP experimental protocol for CMIP6, *Geoscientific Model Development*, in press, 2016, doi:10.5194/gmd-2016-36
  - 5) Hurtt, G.C., L. P. Chini, S. Frolking, R. A. Betts, J. Feddema, G. Fischer, J. P. Fisk, K. Hibbard, R. A. Houghton, A. Janetos, C. D. Jones, G. Kindermann, T. Kinoshita, Kees Klein Goldewijk, K. Riahi, E. Shevliakova, S. Smith, E. Stehfest, A. Thomson, P. Thornton, D. P. van Vuuren, and Y. P. Wang, 2011: Harmonization of land-use scenarios for the period 1500-2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. *Climatic Change*, DOI:10.1007/s10584-011-0153-2.
  - 6) Ackerman, T. P. (1988) Aerosol in climate modeling. *Aerosols and Climate*, edited by P. V. Hobbs, and M. P. McCormick. A. Deepak Publishing, 335–348.
  - 7) Langner J., and H. Rodhe (1991) A global three-dimensional model of the tropospheric sulfur cycle. *J. Atmos. Chem.*, 13, 225–263.
  - 8) Tegen, I., and I. Fung (1994) Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport, and optical thickness. *J. Geophys. Res.*, 99, 22897–22914
  - 9) Liousse, C., J. E. Penner, C. Chuang, J. J. Walton, H. Eddleman, and H. Cachier (1996) Global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols. *J. Geophys. Res.*, 101, 19411-19432.
  - 10) Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima (2000) Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. *J. Geophys. Res.*, 105, 17853–17873.
  - 11) 総務省 「センサーネットワークの現状について」  
[http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000405376.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000405376.pdf)
  - 12) 株式会社 NTT ドコモ ドコモ通信 Vol. 58 「ニュービジネス紹介」  
<https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/ir/library/docotsu/58/technology.html>
  - 13) 株式会社 ウェザーニュース ニュース 「WxBeacon」  
<https://jp.weathernews.com/news/5827/>
  - 14) 株式会社 フィールドプロ 「気象データ提供サービス」 ホームページ  
<http://weather-data.jp/company.html>
  - 15) 日本リモートセンシング学会誌ダウンロードサイト  
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/rssj>
  - 16) 日本気象協会 ニュースリリース 「ドローンによる高層気象観測技術」  
<https://www.jwa.or.jp/news/2016/05/post-000667.html>
  - 17) 株式会社 ウェザーニュース ニュース 「ドローンによる気象観測ネットワーク」  
<https://jp.weathernews.com/news/7164/>
  - 18) 有限会社 タイプエス 「上空気象観測用ドローン」  
[http://www.type-s.co.jp/leaflet\\_2.pdf](http://www.type-s.co.jp/leaflet_2.pdf)

- 19) Valcke, S., 2013: The OASIS3 coupler: a European climate modelling community software, *Geosci. Model Dev.*, 6, 373–388, doi:10.5194/gmd-6-373-2013
- 20) OASIS ホームページ <https://verc.enes.org/oasis>
- 21) Earth System Modeling Framework <https://earthsystemcog.org/projects/esmf/>
- 22) Sato, Y., H. Miura, H. Yashiro, D. Goto, T. Takemura, H. Tomita, and T. Nakajima (2016) Unrealistically pristine air in the Arctic produced by current global scale models. *Sci. Rep.*, 6, 26561, doi:10.1038/srep26561.
- 23) 今後の宇宙開発体制のあり方に関するタスクフォース会合リモートセンシング分科会／地球科学研究高度化 WG 報告書「地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析」  
<http://www.jsprs.jp/pdf/TF20160531.pdf>
- 24) Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., and Taylor, K.E. 2016: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937-1958, doi:10.5194/gmd-9-1937-2016
- 25) IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- 26) 国土交通省 「無人航空機（ドローン・ラジコン機等）の飛行ルール」  
[http://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_tk10\\_000003.html](http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html)
- 27) Earth System Grid Federation ホームページ <http://esgf.llnl.gov/>
- 28) 米国宇宙航空局 (NASA) , Earth, Decadal Survey,  
<http://science.nasa.gov/earth-science/decadal-surveys/>
- 29) HARRIS 社ホームページ  
<https://www.harris.com/solution/greenlite-ground-remote-sensing>
- 30) 中国気象局 (CMA) ホームページ <http://www.cma.gov.cn/en2014/satellites>
- 31) 航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進研究計画書。  
<http://www.metsoc.jp/2015/10/23/5189>
- 32) 環境エネルギー分野における主な取組の状況 (2 ページ)  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/067/shiryo/\\_icsFiles/afieldfile/2015/02/23/1353188\\_2.pdf](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/067/shiryo/_icsFiles/afieldfile/2015/02/23/1353188_2.pdf)
- 33) O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, J., Moss, R., Riahi, K., and Sanderson, B. M. 2016: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, doi:10.5194/gmd-2016-84, in review.
- 34) Zhou, T., L. Zou, B. Wu, C. Jin, F. Song, X. Chen and L. Zhang, 2014: Development of Earth/Climate System Models in China: A Review from the Coupled Model Intercomparison Project Perspective, *Journal of Meteorological Research*, 5, 762-779.

### 3.1.2 気候変動影響予測・評価

#### （1）研究開発領域の簡潔な説明

気候変動影響予測・評価とは、気候変動予測モデルで得た情報に基づき気候変動による影響を予測し、その結果に基づいてリスク評価する手法である。影響予測はモデルを用いて行い、リスク評価は、モデルによる計算結果を比較解析にて行う。

ここでは、水循環、自然災害、自然生態系、農林業、健康・都市生活、極地（北極、南極）を対象とする。

#### （2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

気候変動の影響は、日本でもすでに現れ始めており、今後、様々な分野で拡大するとみられている。気候変動の影響評価では、地域ごとの影響の違いを考慮できる詳細な気候変動予測や、複数のモデルに基づき、不確実性を確率的に評価する予測が求められる。

しかし、影響予測には様々な不確実性があり、気候変動のもたらすリスクを把握するためには、これらの不確実性を含めて、起こりうる影響を予測することが不可欠である。また、現在起こりつつある影響や将来の影響に対しては、予防的な対応という考え方が重要であり、そうした予防策の立案のためには、リスクの高い事柄について、あらかじめ把握し、考慮しておくことが不可欠である。

##### ■ 水循環

地上に降った雨や雪が土壌など地表に浸透・滞留し、蒸発散や流出を経て、再び大気に戻っていくまでのプロセスを水文過程と呼ぶ。温暖化の進行による降水パターンの変化が顕在化する中、人口の増加や経済の発展により世界的に水利用は依然として増加しており、人間にとって不可欠な水資源が将来持続的に得られるか総合的なシナリオ分析を実施することが要請されている。こうした背景から、人間活動を含む全球水文モデル、およびそれを用いたシミュレーションの重要性が地球科学および地球環境学の両面から強く認識されるようになった。

##### ■ 自然災害

2013年から2014年にかけて発表されたIPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第5次評価報告書（AR5）では、熱波、干ばつ、洪水、（熱帯および温帯）低気圧、高潮など人間社会に大きく影響する極端現象（10年に一度発生する現象）の頻度が、人間活動の寄与によっていずれも増大していること、またそれらの極端現象の変化に対して現在の一部の生態系、及び多くの人間社会のシステムは深刻な脆弱性も持つこと、曝露していることを指摘している。そのような極端現象の変化を伴う気候の変動に対して適応（adaptation）した社会を構築するため、正確かつ迅速にそれらの影響を推計評価することが求められている。

##### ■ 自然生態系

生物種の絶滅や分布域の縮小、生態系の変貌には、これまでの土地利用の影響など、他の要因も強く作用してきたことを考慮する必要がある、気候変動の寄与がどの程度であるかを

特定することは難しい。また、生物種は温暖化に対する適応能力、移動分散能力に差があるため、植物と花粉を運ぶ昆虫など、生態系の中でこれまで成り立っていた共生関係が崩れたりする可能性がある。さらに、害虫や疫病を媒介する動物なども、これまで問題がなかった地域まで分布域を拡大させる可能性があり、注意を要する。

#### ■ 農林業

気候変動による影響のなかでも、生態系を基盤とする農林業には極めて大きな影響が予測され、世界的な食料安全保障の低下が危惧されている。IPCC AR5では、特に、気温上昇、干ばつ、洪水、降水量の変動や極端な降水により、特に貧しい人々の食料安全保障が脅かされるとともに、食料システムが崩壊するリスクが指摘されている。また、農業と森林を含む土地利用分野からの温室効果ガス排出に対しても、化石燃料使用にともなう二酸化炭素排出とともに、その削減が求められている。

#### ■ 健康・都市生活

健康分野では、熱ストレスによる死亡者数、下痢性疾患、洪水による死亡者数の増加や、感染症を媒介する生物の生息可能域の拡大などによる死亡の増加が予測されている<sup>1)</sup>。健康影響（例えば熱ストレスによる死亡やマラリアやデング熱）のリスク予測モデルの不確実性や限界も明示した上で、起こりうる影響を予測することが不可欠である。

都市生活分野では、特にヒートアイランド現象による熱ストレス影響の悪化が懸念されるほか、短時間強雨や渇水の頻度の増加、強い台風の増加などがあり、インフラ・ライフラインへ被害を及ぼす可能性がある。特に、途上国の貧困な都市は、脆弱で、人口も大きく、大きなリスクを負っていると考えられる（IPCC AR5）。ヒートアイランドの評価のために地域ごとの影響の違いを考慮できる詳細な気候変動予測が必要である。

#### ■ 極地

北極では急速な温暖化と海氷減少が進行しており、海岸浸食や海洋生態系の変化が危惧されるほか、日本を含む中緯度の気象へも影響を与えていることが判明しつつある。一方南極では温暖化の影響は地域によって差があるが、氷床の変動は海水準や海洋深層循環へのインパクトが大きく、全地球的な影響をもつ。

### [動向（歴史）]

#### ■ 水循環

人間活動を含む全球水文モデルが最初に報告されたのは約20年前である<sup>2)</sup>。以降、農業用水および工業・生活用水の推定<sup>3)4)</sup>、ダムの貯水と放流<sup>5)6)</sup>、表層水および地下水からの取水<sup>7)8)</sup>と、人間活動のモデルは追加されていった。世界の先進国では、人間活動を含む全球水文モデルが現在も精力的に開発・改良されている。現時点で約15の有力なモデルがあるが、主要な人間要素がすべて含まれ、かつ当該分野をリードしているモデルはWaterGAP（フランクフルト大学・カッセル大学・ボン大学、以上すべてドイツ）、PCR-GLOBWB（ユトレヒト大学、オランダ）、LPJmL（ポツダム気候影響研究所、ドイツ）、H08（国立環境研究所・東京工業大学・東京大学、日本）の4つである。

#### ■ 自然災害

IPCCでは1990年に発刊した第1次報告書より一貫して気候変動の影響評価を主題のひとつとしている。日本では、文部科学省主導の21世紀気候変動予測革新プログラム（2007～

2011年度；以降革新プロ）・気候変動適応研究推進プログラム（2012～2014年度）・気候変動リスク情報創生プログラム（2012～2016年度；以降創生プロ）、および環境省主導の気候シナリオ「実感」プロジェクト（2007～2011年度；以降 S5）、温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究（2010～2014年度；以降 S8）、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（2012～2016年度；以降 S10）において、IPCC 第5次評価報告書のうちの気候変動影響評価の内容に大いに貢献する研究およびモデル開発が行われた。

ISI-MIP（The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project；セクター別の気候変動影響評価プロジェクト）は、2012年より本格始動した国際プロジェクトであり、水（水資源・水災害）、陸域生態系、植物生理、農業経済、健康（マラリア）という5つのセクターにおいて、異なる手法（モデル）による気候変動影響評価を相互比較する。その中の「水」において、上記の水循環や干ばつ、洪水の将来推計に関する解析がなされている。

CORDEX（Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment；統合地域ダウンスケーリング計画）とは、世界気候研究計画（WCRP）が主導する、全球気候モデルの将来推計結果を時空間的により詳細な情報にダウンスケールする研究計画であり、幾つかの地域に分かれてそれぞれ領域版気候モデル（RCM）を使ったダウンスケーリングを行っている（日本域は東アジア版 CORDEX-EA に含まれる）。

#### ■ 自然生態系

1990年代頃まで、生物学者は地球温暖化が生物に与える影響について懐疑的であった。温暖化が生物に与える影響が顕在化するのはまだ先のことであり、現状は人間による流域土地開発や富栄養化の影響の方が強く、二酸化炭素増加については植物生理に及ぼす直接的影響に注目してきた。2000年に入り、1700種に及ぶ地球規模のメタ解析を実施した研究が発表され、平均して10年間に6.1km 極地方向に分布域が変化し、開花や繁殖などの春季イベントが10年間で2.3日早くなっていることが明らかになった<sup>10)</sup>。これ以降21世紀に入り、長期的な観測データをもとに多くの研究が実施され、温暖化の影響はすでに生物種や生態系に影響を与えていることが明らかになった。現在では、分布域、フェノロジー、そして体サイズの変化の3点が地球温暖化への生物の主要な応答として考えられている。

これまでの研究の多くは、長期間の生態観測から得られた長期データを解析し、温暖化が生物種や生態系にどのような影響を及ぼしてきたかを明らかにしてきた。一方で、国際社会は温暖化の適応策を検討しなければならない段階に入り、将来予測に関心が向けられてきた。将来予測は当初、気温や標高などの環境変量を用いた種分布モデル（SDM：Species Distribution Model）を用いて実施されてきた。例えばGCM（Global Climate Model）やRCM（Regional Climate Model）によって得られた温暖化予測値を利用し、それをSDMに当てはめて温暖化に伴う種の分布域を推定した。しかし、こうしたSDMを使ったモデルは、その環境条件において個体群が平衡状態にあることが仮定され、さらに生物の移動や分散のプロセスが明確にされていないなどの問題を含んでおり、近年のモニタリングデータと対象種の予測分布が合わないケースが報告されている。そうした問題を背景に、SDMではなく生活史や個体群変動、移動分散を考えたプロセスモデルが検討されるようになってきた<sup>11)</sup>。

それらのモデルを動かすためには多くの生物、生態系パラメータ、分散障壁等の入力が必要とする。残念ながら現状の蓄積データからはこれらのパラメータを正確に推定することができないことが多く、仮の値を当てはめている場合が多い。したがって、SDMとプロセス

モデル両方を使いながら足りない部分を補完するのが現実的な対応と考えられている。

#### ■ 農林業

日本のコメ生産は、現在より 3℃を越える高温になった場合、北日本を除き、減収すると予測されている<sup>12)13)</sup>。コメの品質について、一等米の比率は、登熟期間の気温が上昇することにより全国的に減少することが予測されている<sup>14)</sup>。また、CO<sub>2</sub>濃度の上昇は、施肥効果によりコメの収量を増加させることが FACE (Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment、開放系大気 CO<sub>2</sub> 増加) 実験により実証されている<sup>15)16)</sup>。果樹について、温暖化にともない、ウンシュウミカンおよびリンゴの主力産地の移動<sup>17)</sup>や、リンゴの甘みが増すという食味の変化が起きていることも明らかにされている<sup>18)19)</sup>。また、家畜の成長への影響<sup>20)21)</sup>、病害虫の発生危険性増加も予測されている<sup>22)</sup>。

林業について、蒸散量の増加によるスギ人工林の脆弱性増加<sup>23)</sup>、分布樹種の変化<sup>24)</sup>、加害昆虫の分布拡大<sup>25)</sup>等が予測されている。森林の CO<sub>2</sub> 吸収機能については、これまでの日本における温暖化緩和への大きな貢献とともに、間伐、優良品種の利用、木材利用の促進等の技術による将来の緩和効果について、モデルを用いた評価結果が示されている<sup>26)</sup>。水産業についても述べると、適水温海域の変化にともなう回遊性魚介類の分布範囲の移動<sup>27)・35)</sup>、サンマの成長鈍化と産卵量増加<sup>34)</sup>、養殖産地の不適化<sup>33)・35)</sup>が予測されている。

#### ■ 健康・都市生活

個別の健康影響について、気象・気候と関係しているという研究は古くからなされてきた。日本でも、靄山<sup>36)</sup>を筆頭に、詳細な研究が行われてきた。しかし、気候変動による影響に焦点を当てた研究は、IPCC 第 4 次評価報告書に引用された McMichael らの研究<sup>37)</sup>が、少なくとも包括的な研究は始めてであろう。ここで扱われた影響としては、暑熱と寒冷の直接影響(循環器疾患として)、下痢性疾患、マラリア、自然災害、低栄養であった。

世界保健機関 (WHO) のプロジェクトとして、上記の研究をアップデートする作業が始まった。その結果は 2014 年に報告書として発表された<sup>38)</sup>。扱われた影響は熱関連死亡、沿岸洪水死亡、下痢性疾患、マラリア、デング熱、低栄養である。注目すべきは、熱関連死亡のみが先進諸国でも大きな影響を及ぼし、高齢者への影響が大きいのに対し、その他の影響はほとんどが途上国の小児に大きな影響を及ぼすことである。

#### ■ 極地

北極における科学的研究の国際的取り組みは、第一回国際極年 (IPY : International Polar Year、1882~1883 年) を契機に始まった。特に 1987 年のムルマンスクにおけるゴルバチョフ書記長の演説の中で北極における科学協力が提案されたことを受けて、1990 年に北極圏の 8 カ国により国際北極科学委員会 (IASC) が設置され、翌年には日本を含む非北極圏の 6 カ国が加盟、以後各国が研究を活発化させた。日本は 1991 年にスバルバル諸島ニーオルスンに観測基地を設置し、大気、雪氷、海洋、陸域生態、超高層物理の観測を開始した。

南極では、1957-58 年の国際地球観測年 (IGY : International Geophysical Year) 以降、日本を含む多くの国々が南極観測を開始し、大気・海洋・雪氷等に関する多くの観測が現在も継続的に実施されている。これらの長期的な観測は、南極オゾンホール<sup>38)39)</sup>につながったほか、氷床コアによる過去約 80 万年の気候変動復元など、地球気候の全容を知るための多くの情報を与えている。雪氷、大気、気象、生態など多分野にわたる両極域での国際的な集中観測が 2007-2008 年の第 3 回 IPY に行われ、両極の観測・研究が集中して行われ

ている。

氷床研究は 1957 年に人工雪の研究で知られる中谷宇吉郎が、グリーンランド氷床調査に参加し、その後もグリーンランド氷床、南極大陸での氷床研究の国内外のプロジェクトに日本の研究者が参加している。南極大陸では日本のドームふじ深層掘削プロジェクトが 1990 年代より活動し、3000m に及ぶほぼ全層の氷床氷の採取と、過去 72 万年前までの温室効果気体と気候変動の記録の解析を行なっているほか、2007-2011 年のグリーンランドでの North Greenland Eemian Ice Drilling (NEEM) プロジェクト、2015 年から開始した East Greenland Ice-core Project (EGRIP) プロジェクトへも参加し、国際的な氷床研究活動の主要国となっている。

最近の研究から、南極域の気温変動が他の地域と大きく異なる原因の一つとして、南半球固有の気候変動パターンである南半球環状モード (SAM: Southern Annular Mode) の影響が指摘されている。SAM は、南半球高緯度域と中緯度域の間の気圧のシーソーを表し、SAM が正の位相になると、高緯度域では気圧・気温が低下する。1980 年代以降、この SAM が正位相に偏る傾向が見られ、南極域での温暖化を抑える役割を果たしている。2016 年に発表された研究成果では、南極オゾンホールが発達と地球温暖化の進行が南半球成層圏の極夜ジェットを強化し、その結果 SAM が正位相に偏るようになったのではないかと考えに至っている<sup>40)</sup>。

ニーオルスンにおける北極の継続的な観測は、貴重な北極の長期変化記録を提供してきている。また、1998 年からは海洋地球研究船「みらい」による北極海海洋観測や気象観測が実施されてきた。さらに 1990 年代よりアラスカやシベリアなど北極各地での多分野にわたる北極気候観測・研究活動が実施されてきた。

### (3) 注目動向

[新たな技術動向]

#### ■ 水循環

先進国が全球水文モデルの開発に継続的・精力的に取り組み、分野的な進展が急速に進んでいる。特に上述した WaterGAP (ドイツ)、LPJmL (ドイツ)、PCR-GLOBWB (オランダ) の開発チームには多くの人材が集まっている。また、米国では 2012 年の干ばつを受け、エネルギー省 (DOE)<sup>41)</sup> が水とエネルギーの問題の連鎖について組織的な取り組みを始めた。これを受けて、パシフィックノースウェスト国立研究所 (PNNL) などの有力な研究機関が人間活動を含む全球水文モデルの開発を急ピッチで進めている。

全球水文モデルコミュニティの組織化が進みつつある。従来は個々のモデル開発チームが問題を設定し、データを集め、モデルを開発し、論文を執筆していたが、昨今は世界の主要な全球水文モデルが参加する国際プロジェクトが少数立ち上げられ、問題設定とデータ収集、シミュレーション設定を共通化し、参加モデルを横断的に分析して論文を執筆するスタイルに変化しつつある。

水文モデルと社会経済モデルの連携が実施・強化されている。自然の水循環は基本的に気象・気候によって駆動されるが、人間による水利用は人口、経済活動、技術などによって主に駆動されるため、特に人間活動を含む全球水文モデルにおいて、連携の重要性が増している。

全球水文モデルの超高解像度化、具体的には 1km 解像度で全球をカバーするシミュレーションの実施が今後の全球水文モデルの共通目標であることが世界的に広く受け入れられつつある。

#### ■ 自然災害

日本の創生プログラムにおいて将来予測の不確実性の定量化および統計解析の精度向上のため、現在および将来全球平均気温が 4 度上昇した時点それぞれについて約 100 個のアンサンブルメンバーを用い、それぞれ数十年間のモデルシミュレーションデータを行い、2015 年 d4PDS と名付けて公表した<sup>42)</sup>。結果の一例として、台風に伴う高潮について 100 年に一度程度であったものが、温暖化 30 年～50 年に一度発生することが示された<sup>43)</sup>。同様な大量のアンサンブルシミュレーションは、米国でも CESM-LE という名称で米国大気研究センター（NCAR）が実行している<sup>44)</sup>。このような大量のアンサンブルメンバーを用いることで、地球システムそのものの振る舞いに起因する気候変動（いわゆる内部変動）と人間による寄与に起因する気候変動（外部変動）とを統計的に区別することにより、特定の自然災害をもたらした極端現象への人間起因の温暖化の寄与を統計的に見積もるイベントアトリビューション（EA : Event Attribution）手法が確立され、例えば 2013 年の日本の猛暑での温暖化の影響が定量化されている<sup>45)</sup>。また国土交通省では、2015 年 7 月に水防法が一部改正され、激甚な浸水被害への予防的対応として「想定最大規模降雨」を用いた河川計画を行うことが決定しており、その作成手法を公開している<sup>46)</sup>。それによると、これまでの観測データに基づいて算定された 100 年に一度の降雨量では、想定最大規模の降雨量に遠く及ばない地域が多く出現することがわかっている。d4PDF のような大量のアンサンブルデータは将来気候に関する「想定最大」を推定することにも有用となる見込みである。

また、温暖化に伴い、日本の短時間での降雨（1 日未満）の確率的極大値が増加していることが観測されている<sup>47)</sup>。

日本では、データ統合・解析システム（DIAS）と民間企業との共同研究において、洪水時の河川管理に汎用的な陸面水文モデルと大量の観測データ、そしてアンサンブルシミュレーションによる確率的な概念を組み込んだ手法を用いる研究が進められている<sup>48)</sup>。こういったアンサンブル数値予測シミュレーションを用いた洪水予測・警報システムの枠組みは、EU<sup>49)</sup>や米国<sup>50)</sup>でも行われて始めている。

その他、前述の ISI-MIP と創生プロで連動した研究として、気候変動予測では考慮されていない人間が行う農業活動の影響、特に灌漑による水の移動についての影響を加味し、干ばつ日数が今後どのように変化していくかを推計した研究がある<sup>51)</sup>。

#### ■ 自然生態系

温暖化に伴う分布域の変化を検討する際に考慮しなければならない重要な課題として、生物間相互作用、例えば植物と昆虫の共生関係、食う-食われる関係などへの影響があげられる。近年の研究で、相互作用を形成する生物種間で温暖化に対する反応が異なることが報告されており、生物季節のミスマッチによって個体群の絶滅が予測されている。さらに害虫や病原菌、寄生虫の分布域変化（もしくは拡大）やそれに伴う病気の蔓延に注意しなければならない。例えば牡蠣の寄生虫が分布拡大することで、宿主である貝類の大量斃死を招くことが知られている。また感染症を媒介するマダニの分布域拡大や死亡率の低下、成長期の拡大なども報告されている。

## ■ 農林業

温暖化を背景とした気象条件を考慮して作物を管理する必要性の増加に対し、1 km メッシュの農業気象データを全国について作成・配信するシステムが開発された<sup>52)53)</sup>。また、農業水利用に対する影響評価法を日本全域に適用し、気候変動が農業水利用や水資源に与える影響を評価した全国マップが提示された<sup>54)</sup>。

水稻について、大気 CO<sub>2</sub> 濃度が高い条件では、白未熟粒が多発し、品質の指標である整粒率が大幅に低下するが、その程度は高温年で大きく、将来の高 CO<sub>2</sub>・高温環境では品質の低下が懸念されるとともに、高温耐性品種では品質の低下が小さいことが示された<sup>55)</sup>。また、多収品種タカナリが高い CO<sub>2</sub> 濃度下でも高い収量性を示すメカニズムが解明され、将来の高 CO<sub>2</sub> 濃度環境下での水稻品種開発に役立つ知見が得られた<sup>56)</sup>。

エルニーニョ／ラニーニャと世界の主要穀物の生産変動との関連を解析することから、これらの予測に基づく穀物豊凶の早期予測の活用可能性が示された<sup>57)</sup>。また、過去 30 年間の世界各地の穀物収量データを解析し、主として気候要因の変化により、一部の地域・穀物で収量が不安定化したことを明らかにされ、収量を安定化するために高温耐性品種の開発・導入、播種日の見直し、灌漑の導入が重要と考えられた<sup>58)</sup>。

農地における土壌炭素の増減と温室効果ガス（CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、化石燃料消費由来 CO<sub>2</sub>）の発生量を同時に計算して温室効果ガス発生量の総合評価を簡単に行えるウェブサイトが公開され、農家や行政、生産者団体などが、農地管理による温室効果ガス削減の効果を評価するために活用されることが期待される<sup>59)</sup>。

森林については、将来の日本森林による吸収量と木材利用による排出削減量が予測され、地球温暖化対策として木材利用が重要であることが示された<sup>60)</sup>。

## ■ 健康・都市生活

従来は、複数の要因による影響を、すべて直線的な関係の集まりとして計算していたが、一般化線型モデルとその拡張による非線形モデルによって直線でない関連も扱えるようになった。例えば、気温と死亡との関連は、ある気温で死亡リスクが最低となり、その気温よりも高くなっても低くなってもリスクが上昇するという V 字型の関連を示すので、直線回帰では不都合であった。それを V 字型として扱えるようになった。

また、人間活動を含むビッグデータや、地球観測・衛星観測データが利用できるようになり、暑熱曝露による影響の評価等が行われている（研究開発領域 3.2.5(3)参照）。

## ■ 極地

北半球氷床研究に関しては、過去数十万年間にわたる氷期-間氷期変動を、本格的な気候モデルと氷床モデルを組み合わせて再現することに初めて成功している<sup>61)</sup>。この中での入力データとして高精度の CO<sub>2</sub> 変動の年代<sup>62)</sup>を使用しているなど、当分野において日本のモデル・データ連携研究が世界をリードしている。

IPCC 第 5 次評価報告書（AR5）でも引用されている日本の気候モデル MIROC4h の大気に関するモデル部分を用いて、バレンツ・カラ海で海水の量を変化させたシミュレーションを大量のアンサンブルメンバーで実施し、海水の減少がユーラシア大陸の中緯度域に寒冬をもたらす得ることを明らかにしている<sup>63)</sup>。

北極への物質輸送の観測手法についても、ブラックカーボン（BC）などの高精度観測が可能になっている。BC 粒子測定装置（SP2 : Single particle soot photometer）により高精度

に BC 粒子の計測を行うことが出来る。温室効果ガスの発生は、凍土域の変動と関連しており、海洋、陸上を含めた炭素循環の変動把握、それらが更なる温暖化傾向の増加にどれだけ影響するかの評価も求められる<sup>64)</sup>。

センサの改良や解析アルゴリズムの向上により、衛星による観測の高度化が図られている。海洋基礎生産の観測精度向上などのほか、例えば永久凍土に関連して地表面温度を衛星データから取得し、積雪データと組み合わせるなど、複数の変数を組み合わせたより複雑な解析が試みられている(欧州宇宙機関(ESA)のGlobPermafrost)。陸域の観測においては、地球物理的な探手法(弾性波探査・電気探査など)の普及により、多くの地点で海洋観測においては、自動測器の開発が進み、データ取得可能範囲が増えつつある。今後、ROV(Remotely Operated Vehicle)やAUV(Autonomous Underwater Vehicle)を用いて海水下や海水縁辺部での生態系観測が可能になることが期待される。生態系モデルにおいても複雑化・高解像度化が進み、新しい方向性としては同位体データの同化の試みが行われている。

[注目すべきプロジェクト]

#### ■ 水循環

ISI-MIPは全球規模の温暖化影響に関するモデル開発とシミュレーションを行うプロジェクトとしてドイツのポツダム気候影響研究所(PIK)が主導して2012年に立ち上げられた。フェーズ1には11の全球水文モデルが参加し、IPCC第5次評価報告書に大きな貢献をした。現在はフェーズ2が実施されており、第6次評価報告書などへの貢献を目指した活動が行われている。また、Water Future and Solutions(WFAS)は人間活動を含む全球水文モデルの機能のうち特に21世紀中の世界の水利用の予測に重点を置いたマルチモデルプロジェクトとして国際応用システム研究所によって2013年に立ち上げられた。

#### ■ 自然災害

- ・ 文部科学省「地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラム」(2016~2020年度): DIAS
- ・ 文部科学省「気候変動適応技術社会実装プログラム」(2015~2019年度): RECCAの後継
- ・ 文部科学省「気候変動リスク情報創生プログラム」(2012~2016年度): 人・自然・地球共生プロジェクト(共生プログラム)・21世紀気候変動予測革新プログラムからの後継
- ・ 環境省環境研究総合推進費S-14「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究」(2015~2019年度)
- ・ 環境省環境研究総合推進費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」(2012~2016年度)
- ・ FP7 Enhance (Enhancing Risk Management Partnerships for Catastrophic Natural Disasters in Europe)

#### ■ 自然生態系

米国のNEON(National Ecological Observatory Network)は予算規模としても非常に大きい。土壌、水、生物、大気に関して、米国全土を20の地域に区分し、コア観測拠点を建設し、人間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。当然のことながら温暖化についても調査研究も進んでいる<sup>65)</sup>。

欧州委員会は、新規に設置された「LIFE 気候行動プログラム」において、EU 全域で気候変動を克服するための革新的な手法を開発し実施するために、2014 年一年間で 4426 万ユーロを拠出した。EU が進める「2014 年-2020 年 LIFE プログラム」の一部として運営されるもので、6 年間で 8 億 6400 万ユーロが拠出され、気候変動対策や気候変動適応対策に関するコミュニケーションの改善や協働、普及への取り組みが進められる。

#### ■ 農林業

国際的な研究プロジェクトとして、影響評価については、気候変動による農業影響とその対策の評価を目的としたモデルや評価手法を検討するための「農業モデル相互比較・改善プロジェクト (AgMIP : Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project)」が組織され、作物別および地域別の研究チームの活動が推進されている。

日本では、農林水産分野における温室効果ガスの排出削減技術・吸収源機能向上技術、および温暖化の進行に適応した農林水産物の生産安定技術の開発を目指した農林水産省委託研究プロジェクトが進められている。2016 年度は「農林水産分野における気候変動の影響評価及び適応技術の開発」として、中長期的な気候変動予測に基づき、温暖化による収量や品質の低下、病害虫の侵入リスクの回避・軽減、豪雨による農地等の被害の軽減のための技術開発が推進されている。2017 年度からは、これに加えて、「農林水産分野における気候変動緩和技術の開発」が新たに開始される予定である。

#### ■ 健康・都市生活

ヨーロッパにおいては、IMPRESSIONS という EU による気候変動研究プロジェクトが実施されており、健康に限らず多様なセクターにわたって影響研究が行われている。米国では USGCRP (U.S. Global Change Research Program) という省庁横断的な研究計画が進行中である。

健康に特化したものとしては、世界保健機関 (WHO) も、COP などへの貢献のため、できるだけ多くの健康影響予測を行って結果を示す活動を続けている。2015 年には国別の影響予測を発表した。

#### ■ 極地

##### ・ SCAR/PAIS

南極科学委員会 (SCAR) は、南極氷床の過去の変動を調査する PAIS (Past Antarctic Ice Sheet dynamics) を提唱している。ここでは巨大な氷体である東南極と、近年不安定化が話題になっている西南極および南極半島の気候変動および周辺を取り囲む海洋の変動に対する感度を調べる。

##### ・ IPICS

最終間氷期の気候と海面変動に注目した国際氷床研究プログラム。今後は、東南極域で 150 万年前まで遡る事のできる氷床コアを掘削することを目指す国際プロジェクト Oldest Ice Core が予定されている。

##### ・ 南極地域観測第IX期 6 年計画

「南極域から探る地球温暖化」をメインテーマとして 2016~2021 年度に実施される。「南極大気精密観測から探る全球大気システム」、「氷床・海氷縁辺域の総合観測から迫る大気-氷床-海洋の相互作用」、「地球システム変動の解明を目指す南極古環境復元」

という3つのサブテーマから構成される。

- ・ WMO/PPP/YOPP<sup>66)</sup>

WMO-WWRP (World Weather Research Programme) のもとに PPP (Polar Prediction Project) が設置されており、数時間から季節スケールの予測可能性研究の推進を極域大気研究のコミュニティに働きかけている。特に2017-2019年に設定されている YOPP (Year Of Polar Prediction) は核となる活動で、2018-2019年にはドイツ砕氷船 Polarstern 号を1年間北極海で漂流させる野外観測が予定されている (MOSAic: Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate)。領域モデルによる海氷上の境界層や雲の再現性、すなわちパラメタリゼーションに関する素過程、北極低気圧に代表されるような総観規模擾乱の解明、北極温暖化と大陸寒冷化に代表される高緯度-中緯度の相互作用など、マルチスケールの研究課題が設定されている。

- ・ 北極気象観測・同化影響評価研究 (ARCROSE : Arctic Research Collaboration for Radiosonde Observing System Experiment)

日本が推進する、観測とデータ同化を統合した予測可能性研究。日本の北極観測は、地理的制約を受けるものの、アンサンブルデータ同化やそれを用いた予測可能性研究で着実に成果をあげてきている。例えば、ドイツ砕氷船のラジオゾンデデータで北極低気圧の予測精度が向上し<sup>67)</sup>、それに伴って海氷予測も向上すること<sup>68)</sup>、「みらい」北極航海のラジオゾンデデータから観測コストを考慮した最適観測頻度 (1日4回) を提唱したことなど<sup>69)</sup>、YOPPを意識した先行研究を行っている。

- ・ 北極研究推進プロジェクト (ArCS : Arctic Challenge for Sustainability)

急変する北極の気候変動の解明と環境変化、社会への影響を明らかにし、内外のステークホルダーが持続可能な北極の利用等諸課題について適切な判断を可能とする精度の高い将来予測や環境影響評価等を行うことを目的として実施されている。2015年9月から2020年3月までの約4年半にわたって文部科学省の補助事業として実施される。

#### (4) 科学技術的課題

[課題 (ボトルネック)]

##### ■ 水循環

人間活動を含む全球水文モデルの開発において最大のボトルネックとなっているのが集約されたグローバルな水利用関連データの不足である。水利用に関するデータはいずれの国においても地方自治体レベルで収集・管理されることが多いが、それらが国レベルに定期的に集約されるケースは少なく、ゆえに国を横断して世界を俯瞰するようなデータも存在しない。水利用に関するモデルを高度化するには、各国の統計データを収集・集約するところから開始せねばならず、効率的な研究展開を妨げている。水利用データを効率的に集め、広く社会に提供する仕組みづくりが求められている。またモデルの開発と解析を行うにあたっては、水文学や農業土木工学などに加え、気候学や計算機科学にもある程度精通する必要があるなど、極めて学際的な知識や能力が要求される。モデルの開発と応用を担える人材を確保するのが、世界のどの開発チームにおいても、大きな課題となっている。

### ■ 自然災害

- ・ 観測データが欠如している。自然災害の被害金額の精度は低い。金額以外の情報はなかなか観測されない。
- ・ 被害金額推定モデルの開発が困難である。モデルで自然災害の被害金額を算出するためには、資産の詳細な時空間分布データが必要だが、そのようなデータは入手が困難である。
- ・ 洪水・氾濫のシミュレーションの精度は、境界条件（特に標高）および外力（降水量）の精度・解像度に大きく依存する。数 m 解像度の領域データが一部の地域には存在し、全球でも 30m 解像度のデータが存在するが、エラーが多いなどの問題がある。また、河川形状のデータなどはほとんど存在していない。そういった数 m～数十 m 解像度のデータを影響評価モデルの開発者やユーザが簡単に使えるように、高解像度の境界条件データを整備することが強く求められる。

### ■ 自然生態系

今後の生態系変化を予測するためには、気候変動モデルならびにその計算結果のダウンスケーリングが必要になる。現状の気候変動モデルの出力は、生態系への影響やレフュージア（温暖化の影響を避けて生物が生存できる避難場所）を検討するためには粗すぎて平均的な傾向を得ることしかできない。10～100m 単位の気象パラメータの予測が必要になるが、現状では難しい。また、ダウンスケーリングに関連して、気象学や工学など物理系研究者と生物学、生態学研究者との共同観測、モデリングを含む共同研究が必要になるが、どんな観測値の予測が生物・生態系にとって重要なのかはまだ手探り状態である。同じステーションにおける学際的な研究が必要である。

これまでの研究の多くは、種レベルの分布域変化について解析したものが多く、気候変動が群集レベルや生態系の栄養段階のつながりに与える影響、さらに個体レベルにおける順化や表現型の変化、遺伝子の変異などの適応進化に与える影響については、未だよくわかっていない。

### ■ 農林業

気候変動が農林業に及ぼす影響評価においては、その不確実性の改善が最大の研究課題である。そのためには、将来気候の予測と農林業の応答予測の双方について、さらなる精緻化が必要である。将来気候の予測には、空間解像度が数 100 km 程度の全球気候モデルをダウンスケーリングし、予測の時空間スケールを影響研究者や行政が要求する程度に細かくする研究技術が用いられているが、その手法を改良し、より細かな時間および空間解像度のデータ提供が求められる。一方、個々の農作物、樹林、水産物の品目について応答予測モデルが開発され、影響評価に用いられているが、影響予測実験結果との検証を積み重ね、さらに精度の高いものに改善する必要がある。また、予測の対象品目もさらに拡大すべきである。例えば農作物については、水稻や果樹などは豊富な知見から比較的精度の高いモデルが開発されているが、他の農作物における研究の進展は不十分である。

### ■ 健康・都市生活

途上国における健康情報の収集の困難さが大きな問題である。公衆衛生インフラの整備が進んでいないことから、疾病・死亡の報告漏れも多く、また疾病の診断技術も普及が遅れていて不確実である。

## ■ 極地

極域観測の困難さから、氷床減少のメカニズムを理解するための基礎データが圧倒的に不足している。現在の氷床変動を推定するためには、氷床荷重に応答して変形する固体地球の動きを正確に押さえる必要がある。GIA (Glacial Isostatic Adjustment) を扱うモデルの開発と予測での利用が必要とされる。また、現在の氷床モデルには、氷床-海洋-海水の相互作用が精緻に取り込まれていない。しかし極域の海洋は海水や棚氷に覆われているため、これらの相互作用の観測が技術的に極めて難しいという側面もある。氷床変動の海洋への影響を観測するために、水中無人探査ロボットなどの技術開発が期待される。

南極大陸内陸部の表面付近では顕著な温暖化が見られない一方で<sup>70)</sup>、衛星観測の結果から内陸部上空の対流圏では顕著な温暖化が進行していると考えられている<sup>71)</sup>。しかし、南極大陸内陸部では長期的、かつ信頼性の高い気象観測はほとんど行われておらず、上述の傾向が正しいのかもはっきりしていない。特に、上空の気温を高精度で測定することができ、なおかつ前述の重力波についても調べることができる高層気象観測は、南極大陸内陸部ではほとんど行われていない。

北極の多点観測網の構築と観測データの統合、予測モデルの開発・運用が望まれている。北極海の海水減少が引き起こす冬季中緯度の異常寒波などは、メカニズム自体は多数提唱されているものの<sup>72)</sup>、海水面積の予測、さらにはその影響を加味した気象・気候予測に関しては、依然として発展途上である。

北極海航路上の海水予測には数値モデルそのものの精緻化とともに、観測データの充実化による初期場の改良が必須とされる。そのためには海上風予測に大きな影響を及ぼす海上/氷上ブイの展開、高層気象観測の強化などの推進が効果的である。

さらに、温暖化の影響が明瞭に出現する現在気候の下では、大気と海洋/海水を一つの系として捉えるアプローチが有効で、そのためには、諸外国の現業機関が行っているような大気-海洋-海水結合モデルによる予測が重要である。現業予報モデルをベースに作成する再解析データに関しても同様である。

[今後取り組むべき研究テーマ]

## ■ 水循環

2011年米国の高名な水文学者であるプリンストン大学 Eric Wood 教授らによって、Hyper Resolution Hydrology が提唱された。これは全球水文モデルの空間解像度を 30 秒 (赤道付近で約 1km、現在の標準的な解像度の 60 倍) まで高めることを提唱したものである。この解像度は、現在の個別流域を対象としたモデルの空間解像度に匹敵するため、全球モデルと地域モデルの区別がほぼなくなることを意味する。実現した際には温暖化などの地球環境研究と水質悪化などの地域環境研究、洪水氾濫などの防災研究などで共通のシミュレーションプラットフォームが利用できることになり、モデルやデータの統合が飛躍的に進むと考えられる。

## ■ 自然災害

自然災害の研究開発は、精緻な過去再現が可能なモデル構築が必須である。丁寧なモデル検証と、正確なメカニズム・プロセス理解に必要な継続的なモニタリングや集中的な観測がこれまでも増して求められてくる。さらに、長期間 (数世紀以上) の検証には、文献や堆

積物・生物に記録された同位体比のような代替情報が必要である。

#### ■ 自然生態系

気候変動と生態系の応答については、平均的な温暖化傾向と生態系の変化が調査研究されてきており、いわゆる極端現象に対する検討は浅い。こうした極端現象の多くは生態系プロセス維持に影響を与える「攪乱（ディスタージ）」ととらえることができ、気候変動下における生態系の回復力（レジリエンス）や閾値を超えた変化（レジームシフト）を検討するため、気象学、工学等の物理系研究者と生物系研究者の学際的研究が必要になる。

古環境と生物の分布域の研究から予測されている局地的な冷涼環境（避難場所：レフュージア）の存在についても、細かな解像度における研究が必要である。

気候変動に対する種の応答は「個体群間で変異がない」と仮定されることが多いが、局所適応により個体群間でニッチ（適応した気候条件）が異なる場合も考えられる。進化的なプロセスを明示的に扱わない限り、気候変動に伴う生物多様性の低下リスクを過小評価する可能性が少なからずある。

温暖化による生態系の変化は、人間生活や健康に大きな影響を与える可能性もある。日本でもデング熱などの伝染病を媒介するヒトスジシマカが近年注目を集めた。こうした生態系サービスを引き起こす生物の拡大には監視を強化する必要がある。

これまで、気候変動と土地利用変化が生物相に与える影響については、別々に研究されてきたが、将来シナリオを考える上では同時に検討する必要がある。

また、自然生態系がもつ減災・防災機能を分析し、気候変動下における適応策に結び付けていくことも重要な研究開発分野といえる。

さらに、温暖化の進行や速度は生態系によって異なり、氾濫原やマングローブ林、砂漠などで速くなることが予測されている。生育・生息する生物相の移動分散能力、適応能力を評価し、必要に応じて保護区の設定（保護区の拡張・位置の見直し、保護区間の回廊の設置など）を再検討する必要がある。

#### ■ 農林業

将来気候ダウンスケール手法の開発、将来の農業環境変動とその不確実性を評価できる気候シナリオ作成、気候変動の影響評価に必要な基盤情報の整備、現場における影響予測実験結果との検証を基盤とする、農作物、樹林、水産物の品目に対する応答予測モデルの開発と高度化などがあげられる。

#### ■ 健康・都市生活

気候の将来予測を小さな地域でも行うために、すでにダウンスケーリング技法は開発されているものの、都市の土地利用、例えば高層ビルなどの三次元的な情報まで含めた予測技法は、まだ健康影響評価に取り入れられていない。今後進んでいくと考えられている少子高齢化など、すでにある問題も包括的に考慮して、居住形態などを含めた都市の将来像を模索するためにも、微小気候の将来予測とその影響評価への組み込みが必要と考えられる。

例えば、個人情報端末の普及により、個人の健康関連情報（心拍数など）が得られ、それを用いた遠隔からの診断も可能とする公衆衛生サービス向上のプロジェクトが、また、疾病・死亡の把握も容易にし、途上国での情報収集の漏れを減らすことになる。

#### ■ 極地

グローバルな気候変動影響のうち最も大きな影響の一つである、海水準変動予測の不確実

性低減を目指した、モデルの改良・検証、データの蓄積が求められる。高精度の数値氷床モデルをより信頼できる条件設定で計算するために、より詳細なプロセスを考慮したモデルの高度化、地質学的手法を含めた過去の氷床変動の復元、境界条件となる気候モデルの改良が必要である。

不足している極域気候監視データの整備が必要である。自動化された無人気象観測機を南極・北極へ広域展開することにより、気候監視を行うことが可能となる。また、氷床流動に関しては、衛星観測が成果をあげつつあるが、南北両極域の観測を行う衛星観測データ検証のため、氷床流動の現場観測も求められる（GPS 測量、重力衛星、GIA モデルも必要）。

海洋では、海水や棚氷の下の海洋の情報取得が必要である。これには、近年開発が進む無人ロボット観測（温度、塩分、海底地形）の利用が有効である。さらに、精緻な気象・海水予測のため、持続可能な極域観測網の構築が必要とされる。データ同化システムや予報実験を組み合わせた数値的解析から検証する必要がある。

大気・海洋・海水結合過程を含む予報モデル・再解析データの整備が必要である。天気予報・季節予報の精度向上は、極端気象現象のリスク回避にとって極めて有効である。例えば、北極海の海水減少が引き起こす冬季中緯度の異常寒波などは、メカニズム自体は多数提唱されているものの、海水面積の予測、さらにはその影響を加味した気象・気候予測に関しては、依然として発展途上である。再解析データは、その現業予報モデルをベースに改良することが出来る。そのためには、海水生成過程や海水・波相互作用など結合系に重要な基礎研究、海峡を通過する流れを精緻化するためのモデルの高分解能化、様々な観測データによるモデルの検証作業など、継続的な研究・開発が有効である。

北極の気象観測と予測による研究から中緯度への影響予測と評価を進展させることも求められる。特に、高緯度海洋が及ぼす北極変動、さらに中緯度の気候との関連を明らかにする必要がある。海水面積の予測という観点でも、中緯度海洋前線起源の北向き熱輸送が重要な要因の一つであり、それに伴う大気応答も含めるとより広域の視点で北極圏を俯瞰する必要性がでてきている。

その他、温暖化により変化しつつある永久凍土分布と地温の変化傾向を知ることが必要となる。陸域生態系の変化も継続的な取り組みを要する。北極域は現在、正味の二酸化炭素吸収源になっており、世界の陸域吸収量の約 10%を占めている。しかし温暖化が北方林（タイガ）の生育に与える影響は地域によるばらつきがあり、特に降水量の増減により森林の生産量が低下する可能性がある。

## （5）政策的課題

### ■ 水循環

研究評価におけるモデルやデータベースは世界的なデフォクトスタンダードになれば論文とは比べ物にならないほど強力な国際的な影響量をもつようになる。モデルやデータベースのプロダクトの開発を後押しする仕組みがあれば、長期的な国際的な研究競争力が生まれてくるだろう。

### ■ 自然災害

- ・ DIAS で行おうとしているような解析システム・データベースのプラットフォーム構築

およびその高度化は大いに求められている。

- ・ 産学官連携を推進するために、ビジネスチャンスと捉えられるような政策化が求められる。
- ・ 継続したモニタリングがモデル検証の意味から最重要である。そのような基礎的な研究の価値を高め、推奨するようなファンディングの仕組みの検討が必要である。
- ・ モデル開発者の養成が求められる。モデル構築には、現象の本質を数理的に見抜く力とそれをプログラミング言語に書き起こす才能が必要とされる。そういった適正がある若手が継続的に現れてくるような、長期的な視野を持った教育政策が求められる。

#### ■ 自然生態系

長期の生態系変化を追うためには、固定プロットにおける長期的なモニタリング観測と、広域を網羅する調査結果の集積が要請される。前者は大学や研究機関の試験地が中心になると思われるが、後者については各省庁や都道府県が行う生物調査を利用できるようにデータベース化することが求められる。

#### ■ 農林業

国際的にはパリ協定が、日本では「気候変動の影響への適応計画」および「地球温暖化対策計画」に基づく各省庁の対策が図られることとなっている。しかし、成果の社会への発信について、各省庁で独自の取り組みが進められており、ユーザの利便性の観点から、効果的な連携を図ることが求められる。

#### ■ 健康・都市生活

日本に大きな影響を及ぼすであろう熱関連死亡に関しては、緊急避難的対応とはいえ、対策のために空調を用いる必要があり、これは温室効果ガス排出を増加させる。一方、停電などによって、暑さがそれほど極端でなくとも死亡数が増加することも報告されており、台風や地震での停電なども容易に想定される日本においては特に、小地域レベルでの再生可能エネルギーによる空調を備えたシェルターなどを整備することが求められる。

熱関連死亡以外の影響は、主に途上国の小児に大きな影響を及ぼすものであるが、2014年の代々木公園でのデング熱流行に示されるように、社会・経済的な影響は先進国でも大きい。

気候変動による健康影響は、新たに生じたものではなく、もともと存在した問題の重要性が変化したものととらえるべきである。よって、国際協力・援助に関しても、そのような動向の変化を踏まえた上で優先順位を決定する必要性が生じている。

#### ■ 極地

アジア諸国の極域研究の協力を探る AFoPS (Asian Forum of Polar Science) の活動が行われているが、その中での主導的な役割を担い、日本の国際的な位置を高めていくことが望まれる。

北極からの気象影響による日本を含む中緯度域の近年の寒冬の頻度の増加は、温暖化の過程で起きる現象だと示唆されている。この結果は、政策決定に資する情報を与える。これは世界気象機関 (WMO) などの国際機関からの要請もあり、研究者だけでなく、いずれは国際的な現業機関の活動構築にもつながる動きの中で日本の参加が望まれている。

北極の大気中への物質輸送の影響とリスク評価は、アジアなどの国の対応が求められている。日本としても北極に輸送されるブラックカーボン (BC) の排出・輸送量を見積もること

でこれに貢献することが期待されている。これら北極の気候変化の研究とその影響評価は、2015年10月に発表された「我が国の北極政策」で掲げている、科学技術をもって北極の継続的な発展に寄与すること、それを通して日本の貢献を高め国際的な役割を担うという目標を実現するものである。

### （6）キーワード

リスク情報、領域地球システムモデル、社会シナリオ、不確実性、農林業、食料、影響評価、熱関連死亡、下痢性疾患、マラリア、デング熱、洪水、IPCC、WHO、地球温暖化、南極オゾンホール、南半球環状モード、氷床、棚氷、低層水、海氷、北極航路、観測網、自動観測、結合モデル、人間活動を含む全球水文モデル、国際モデル相互比較プロジェクト、超高解像度モデル、生物多様性、生態系サービス、生物間相互作用、物質循環、海洋の酸性化、温暖化適応策

### （7）国際比較表

#### ■ 水循環（水文モデル）

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	△	↘	● 現象・過程の理解や水循環・水資源の基本概念の提唱、全球スケールの基礎データの構築という点において、日本の貢献はゼロではないが、大きいとはいえない。純粋な基礎研究も盛んとは言い難い。
	応用研究・開発	○	→	● モデル開発やシミュレーション分析において、少数の優れた研究者が世界的にも光る研究を展開している。
米国	基礎研究	◎	→	● 衛星情報を利用した全球スケールの基本データの構築などで圧倒的な力を持ち続けている（航空宇宙局（NASA）の衛星重力ミッションGRACE、打ち上げ予定の表層水・海洋ミッションSWAT <sup>73</sup> など）。
	応用研究・開発	○	↑	● 全球水文モデルは観測による検証が難しいため、検証を重んじる米国では長らく敬遠されてきたが、ここ最近 Energy Water Nexus への関心の高まりにより、パシフィックノースウェスト国立研究所（PNNL）などが急ピッチでモデル開発などを進めている。
欧州	基礎研究	◎	→	● ウォーターフットプリントなどの新しい基本概念の提唱と普及には圧倒的な伝統と力がある。また灌漑農地分布地図など、独創性と重要性の高いデータを収集・公開するなど分野全体をリードしている。
	応用研究・開発	◎	↑	● 人間活動を含む全球水文モデルが複数、精力的に開発されている。若く才能のある人材も引き続きこの分野に流入している。
中国	基礎研究	△	→	● 少なくともこれまでは全球スケールの水文研究に大きな関心を持っていないようである。
	応用研究・開発	○	→	● 同上。ただし、モデル分野には優れた研究者が多く、予算が付けば大きく飛躍するポテンシャルは秘めている。
韓国	基礎研究	△	→	● 全球スケールのモデルにほとんど関心を持っていないように見受けられる。
	応用研究・開発	△	→	● 同上。

■ 自然災害

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	○	↓	● EU、米国と肩を並べ、世界レベルの研究を行っている。しかし、気候モデル開発や影響評価モデル開発（特により基礎となるモデルの各素過程；降水過程や地表面過程等）への支援が課題とされ、若手がモデル開発者になりにくい。
	応用研究・開発	○	→	● 基礎研究（素過程研究）と比して、より応用と考えられる影響評価研究（例：気候変動によって洪水被害は増加するの）には着目されやすい状況となっている。ただし各国に比べると人的・財政的な制約は大きく、限られた計算機資源を集中投下した大量のアンサンブル実験など、効率的な投資が機能することで、なんとか EU・米国と比較可能となっている。水災害・水資源の分野では日本が世界をリードする状況にある。工学系分野の寄与が比較的大きい。
米国	基礎研究	◎	→	● IPCC と同様の間隔で、米国版の IPCC 報告書とも呼べる National Climate Assessment を出版している。特に上向きではないが、高い水準のレベルを保っている。
	応用研究・開発	◎	→	● 気候変動に関する影響評価は、各州レベルでの研究推進が多い。例えばカリフォルニアだと California Energy Committee がファンディングを行っている。
欧州	基礎研究	◎	→	● FP7、JPI Climate, Horizon2020 の取り組みにより、EU 全体でのモデル開発（一部統合）が進んでいる。
	応用研究・開発	◎	↑	● 特に Belmont Forum による CRA（共同研究活動）に顕著に表れているが、影響評価研究においては、非研究者のステークホルダーも巻き込んだ形で行うことが開始されてきている。
中国	基礎研究	○	↑	● 第 13 次 5 ヶ年計画において高解像度地球観測計画が採択されるなど、年を追うごとに重点化が進んでいる。
	応用研究・開発	○	↑	● 同様に、影響評価などの応用研究にも引き続き FYP13（第 13 次 5 ヶ年計画；2016-2020）で取り上げられている。国家的な気候変動問題への取り組み状況が上向きであることは間違いない。
韓国	基礎研究	△	→	● 国家レベルでの取り組みはあまり行われていない。KIAPS（韓国大気予報システム研究所）や KMA（韓国気象庁）において、部門ごとに独自の取り組みがある程度。
	応用研究・開発	△	→	● 国家レベルでの取り組みはあまり行われていない。KIAPS（韓国大気予報システム研究所）や KMA（韓国気象庁）において、部門ごとに独自の取り組みがある程度。

■ 自然生態系

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	△	↑	● 大学や研究機関が抱える試験地において、長期的に生態系をモニタリングする基盤が、人的にも財政的に脆弱である。 ● 各地で実施された調査結果がデータベースとして蓄積されておらず、広域の解析を難しくしている。 ● JaLTER などを中心に競争的資金を繋げながら、生態系モニタリングを実施している。
	応用研究・開発	○	↑	● 2015 年温暖化適応策を閣議決定するなど、土地利用も含めた具体的検討がなされた。 ● 気候変動リスク情報創生プログラム（文部科学省）や環境省環境研究総合推進費など、大型予算を使ったプロジェクトが開始されている。
米国	基礎研究	◎	↑	● NEON や LTER など、温暖化と生態系の応答を長期的にモニタリングする財政基盤が確立しており、様々な生態系を代表する試験地の設定がなされている。 ● データベースやモデリングでも世界をリードし、その内容はインターネットを通じて公開されている。

	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 国家気候変動適応戦略支援行動提言（2010）がなされているが、省庁によって具体性には差がある。</li> <li>● 温暖化に伴う沿岸域の海面上昇による高潮災害や洪水災害の防止について、生態系を活用した適応策が検討されている。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 歴史の長い欧州、特に英国では、長期モニタリング結果が蓄積されており、様々な分類群に対して解析が実施され、温暖化による生態系の変化を明らかにしている。</li> <li>● Birds Directive、Habitats Directive（Natura 2000）や LIFE プログラムの実施など、生物多様性とそのネットワークが形成されており、データベース化されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● LIFE 気候行動プログラムなど、財政基盤のしっかりした大型のプロジェクトが EU 全体で実施され、気候変動対策が具体的に議論されている。</li> <li>● 温暖化対策としての生態系を活用した防災・減災機能（Eco-DRR）の活用は早くから検討されており、デンマークでは、すべての自治体においてグリーンインフラをツールとした気候変動適応計画を策定することを義務付けている。</li> <li>● 温暖化を見据えた自然再生事業や保護区の見直しなどが行われている。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 経済発展に投資が集中しており、気候変動に伴う生態系への評価についての研究事例は欧米に比べ少ない。</li> <li>● 一方で、経済発展とともに観測基盤は徐々に整備されつつある。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 自国の経済発展が第一であり、地球規模での気候変動への緩和策とともに適応策についても対応が遅れている。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 国際誌に発表された研究事例も少なく、日本同様、その観測基盤も弱い。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 国レベルでは気候変動に対する適応マスタープランが制定されているが、研究レベルのアクティビティは低い。</li> </ul>

■ 農林業

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>● 影響評価について、コメや果樹をはじめ、多くの品目で定量的な評価が行われている。</li> <li>● 温室効果ガス排出／吸収量評価について、主要排出源で Tier 2 または 3 の評価が行われている（Tier：排出量（吸収量）算定方法の複雑さ）。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2015 年に「農林水産省気候変動適応計画」が策定され、農林水の各分野で適応技術の開発が進められている。</li> <li>● 水田、農地土壌炭素、畜産廃棄物管理、森林について緩和技術が開発され、政府の削減目標に盛り込まれている。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 主要作物（トウモロコシ、ダイズ、コムギ）について、定量的な影響評価が行われている<sup>74)</sup>。</li> <li>● 温室効果ガス排出／吸収量評価について、主要排出源で Tier 2 または 3 の評価が行われている<sup>75)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2014 年に農務省より「気候変動適応計画」が策定されている。しかし、技術的な内容に乏しい<sup>76)</sup>。</li> <li>● 農業分野の排出源について幅広く緩和技術が開発され、コスト評価も行われている<sup>77)</sup>。</li> </ul>
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● コムギについて、定量的な影響評価が行われている<sup>78)</sup>。</li> <li>● 温室効果ガス排出／吸収量評価について、主要排出源で Tier 2 または 3 の評価が行われている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 適応策に関する EU プラットフォームが整備され、各国の施策と技術に関する情報を集積・発信している<sup>79)</sup>。また、英国で 2010 年に「気候変動適応計画」が策定されたのをはじめ、各国で施策と技術の展開が進められている。</li> <li>● 農業分野の排出源について幅広く緩和技術が開発され、コスト評価も行われている<sup>80)</sup>。</li> </ul>

中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 主要作物（トウモロコシ、ダイズ、コムギ）について、定量的な影響評価が行われている（日本との共同研究成果<sup>81)</sup>。</li> <li>● 温室効果ガス排出／吸収量評価について、基礎研究は見られるが、国全体での評価は比較的単純である。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 農林業を対象とした適応技術に関する成果の発信に乏しい。</li> <li>● 緩和技術に関する基礎研究は見られるが、実用に近いものは見当たらない。</li> </ul>
韓国	基礎研究	×	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 影響評価や温室効果ガス排出に関する研究成果に乏しい。</li> <li>● 温室効果ガス排出／吸収量評価について、基礎研究は見られるが、国全体での評価は比較的単純である。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2009年に政府の「気候変動適応計画」が策定されているが、技術的な情報発信に乏しい。</li> <li>● 緩和技術に関する基礎研究は見られるが、実用に近いものは見当たらない。</li> </ul>

■ 健康・都市生活

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	◎	↑	● 熱関連死亡の全球定量化、ダウンスケーリング、シナリオ開発が行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 全球気候モデル、都市への精緻化、新たな健康影響予測（例えば河川洪水）が行われている。</li> <li>● 広い影響の全球予測や欧州の予測を援助している。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↑	● これまで考慮できなかった森林火災などの影響定量化手法などを開発している（University of Washington, Columbia University, University of California at San Diego, University of Michigan）。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Our Changing Planet 2016<sup>82)</sup> を発表している。</li> <li>● 全球包括的なWHO報告では貢献が大きくない。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↑	● 新たな統計モデルの開発で世界をリードしている。（Gasparrini A, Rocklov Jなど、Umea University, University of Heidelberg）
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● IMPRESSIONSプロジェクトが実施されている。</li> <li>● 横ばいというよりは高いレベルで安定している。</li> <li>● 英国はUK Living with Environmental Change<sup>83)</sup> を発表している。</li> </ul>
中国	基礎研究	△	→	● 欧米などからの知見を利用し、感染症では独自の研究を行っている。（Center on Climate Change and Health at Shandong University）
	応用研究・開発	○	↑	● 既存の手法を用いた活発な将来予測の論文発表を行っている。
韓国	基礎研究	○	↑	● 世界的なネットワークの中で一定の役割を担っている。
	応用研究・開発	○	↑	● 将来予測がやや遅れていたが急速に発展している。

■ 極地

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>● 南極：(1)東南極氷床頂上部のドームふじ基地でアイスコア掘削を実施。解析されたデータは100万年スケールの気候変動の議論に不可欠なデータの一つ。(2)南極内陸の観測データが限られる中で、ドームふじ基地の大気・降雪の越冬観測データは国際的に提供されている。今後の越冬観測再開に対して国際的に支持されている。(3)大型大気レーダPANSYによって、南極ではじめて高度100kmまでの風の観測に成功<sup>84)</sup>。(4)世界に先駆けて南極で無人飛行機(UAV)の利用を開始。</li> </ul>

				<p>2014年には高度23kmからの大気採取・帰還に成功。高度の世界記録。気象、生物調査等、無人飛行機(UAV)の利用は強く期待されている<sup>85)86)</sup>。(5)温室効果気体の高精度観測を実施。昭和基地はIPCCなどで必ず参照されるデータ<sup>87)</sup>。(6)ペンギンなどに取り付けてデータを採取するバイオロギングデータロガーを開発。動物の生態解明に不可欠な機器として世界中で利用。(7)東南極の広域無人気象観測の実施。南極氷床の気候動態をモニターする観測網。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●北極：(7)日本が維持するスバルバル・ニーオルスン基地における長期の温室効果ガスモニタリング、雲および放射観測の実績。(8)北極の影響を考慮した中緯度の気象予測システムの向上<sup>88)89)</sup>。(9)北極海における海洋物理観測と海洋生態系変化、特に海洋酸性化に関する成果が認められている。(10)氷河観測、陸上生態に対する調査研究活動でも機動力を生かした調査が展開されている。</li> <li>●(11)両極においてオープンデータなどデータの流れを生み出す活動を増加。(12)両極に対し、氷床コア解析と合わせた気候モデル研究も国際的評価が高い。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>●(1)AUV(無人水中探査)の活用など新しい技術を検討。(2)アイスコア掘削技術は欧米をはじめ世界に参照されている。(3)PANSYではエネルギー効率のよいアンテナシステムを開発。(4)極地研が共同開発した無人飛行機(UAV)は、原発事故や災害地など、危険地帯での空撮などに活用されている。南極観測を含めて更なる発展に期待<sup>90)91)</sup>。(4)バイオロギングシステムは、様々なデータ収集に応用可能<sup>92)95)</sup>。(5)極域観測を行う地球観測衛星開発および打ち上げ技術。衛星センサの小型化による地上観測、移動観測、寒冷地防災への利用、(6)船舶に搭載できる小型サーバーシステム(VENUS)は、データ流通を送信し、多方面のデータ配信の応用性をもつ<sup>96)</sup>。(7)北極気象データ同化、中緯度の気象予測の改良、安全船舶航行のための航路・気象情報提供。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>●気候変動研究への成果とプロジェクト推進を行う。(1)グリーンランド氷床、南極氷床は衛星や航空機を使った観測を展開している。(2)南極点基地で50年以上に亘る気象データを観測。人工衛星による30年以上の大気・地表面のデータベースを公開。無人気象観測装置を氷床上に広域に配置<sup>97)</sup>。(3)南極域の気温変化・南極氷床の氷の量の増減・海水量変化のモニター、天気予報、気候再解析データのために不可欠な基盤を形成。(4)北極沿岸域での観測網を整備。(5)公開性の高い気象数値モデル(WRF)の国際共同開発・利用を推進。これにより、高緯度域の天気予報。南極氷床の氷の増減を評価するための新しいデータベースを構築。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●北極評議会の影響を越えた、国際活動における主導的立場を目指す。北極に関しては、自然科学から安全・安心、先住民、コミュニティー支援を強化中。カナダとともに先住民との関わりを重点に入れる。(1)アラスカ沿岸の海水レーダネットワーク(機器は日本製)。(2)氷海・気象予測、航海支援情報の提供システム構築。(3)人工衛星センサ技術の軍から民用移転(DMSP衛星など)。(4)C130など航空輸送の軍の強力な活動。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>●北極では、EUプロジェクトによる研究遂行・ネットワーク化を高めている(DAMOCLES, ACCESS, ICEARC, HORIZON2020, EU PolarNet)。(2)ノルウェーは国際活動の調整・総合化を目指す。複数の拠点があり、それぞれ特色のある研究を進めている。(3)ドイツはアルフレッドウェーゲーナー極地海洋研究所(AWI)を中心に進んだ科学力、航空機船舶の機動力の背景がある、また国際的に主導的な活動を行う人材、ネットワークをもつ。(4)デンマークはグリーンランド氷床掘削研究を主導。(5)フィンランド、英国などの活動。(6)スイスは南極研究を開始。グリーンランド氷床でも長期の活動を維持。</li> <li>●南極：(7)東南極内陸の観測点として、ロシアのポストーク基地、イタリア・フランスのドームC基地、ドイツのコーネン基地(および中国のドームA基地)がある。特にドームCでは2005年から高層気象ゾンデ観測を開始し、米国の南極点とともに氷床上の対流圏・成層圏の大気構造を直接観測する唯2つの観測点。(8)ドイツは観測用航空機を所有し、2006/07には日独共同航空機観測を実施。(9)英国はオゾンホール命名など突出した成果を出してきた国。最近、ハレー基地・ウェッデル海域において大気物質の輸送を無人飛行機観測で研究。</li> <li>●(10)ロシアでは北極沿岸部の気象観測と海水観測、内陸域での凍土観測が行われている。米国、スウェーデンと共同観測を行っている北極海沿岸での海底永久凍土からのメタン放出の観測は貴重な成果をあげている<sup>98)</sup>。航空機による大気観測も積極的。南極に関しては内陸観測点での気象観測維持の活動がある。</li> </ul>

欧州	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>●(1)EU プロジェクトには社会経済的要素が盛り込まれており、経済影響、経済の指導を含む活動がある。北極変動の影響評価を行い、活動モデルの検討も行う。(2)アイスランドは経済活動を通じた北極圏でのインフラ整備支援を行っている。(3)ノルウェー・スウェーデンでは高層大気観測レーダを整備。(4)英国は自動海中探査 (AUV) の開発を行う。(5)フィンランドは、砕氷船建造技術および航行支援、遠隔地域情報ネットワーク技術の構築、小型衛星開発、衛星検証サイトを提供。(6)南極では、2001年より東南極航空網 (DROMLAN) を開設 (ロシア、ドイツ、ノルウェー、スウェーデン、フィンランド、インド、ベルギーなどが利用)。日本もメンバー。南極への人・物資の輸送に不可欠のインフラとなっている。(6)ロシアの沿岸気象観測点設置、また海氷域の砕氷船の実績、漂流観測ステーションの建造計画は注目される。</li> </ul>
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●(1)観測活動は北極においては拡大、南極では維持されている。(2)アイスランドにも超高層観測施設整備。(3)南極では、東南極内陸にドーム A 基地を開設。観測成果はいまだ少ないが、フランス・イタリアとの共同研究によって、少しずつ現れている。日本との研究者の交流は友好的。(4)両極域の研究とチベット高原やヒマラヤなどの高山域を組み合わせた研究の提案に意欲をもつ。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>●(1)北極においては、航路、漁場開発、産業政治への関連を強める活動がある。国家としての方向性、資金力をもとに活動を強化、外交や産業へも波及している。(2)砕氷船の整備も実施 (砕氷船建造は海外発注)。(3)小型衛星を開発。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●(1)北極では、国家方針として研究と経済、政策への関わりをもつ。(2)北極では陸上生態、海洋調査、メタンハイドレート、中緯度への気象影響、(3)南極では、新基地建設、アジア多国間の連携強化に力を入れる。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●(1)海上交通、造船など産業化へ注力により、国際的に有利な立場を築く活動がある。(2)砕氷船造船の実績をあげつつある。(3)南極では、米国との共同に力を入れており、数値モデリング、無人気象観測装置 (AWS) の展開をしつつある。(4)北極の影響を考慮した、中緯度の気象予測を改良。</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

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

#### (8) 参考文献 (●は全体的に参考とした文献)

- 研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野 (2015年)

<http://www.jst.go.jp/crds/report/report02/CRDS-FY2015-FR-02.html>

- 日本における気候変動による影響に関する評価報告書。中央環境審議会 地球環境部会 気候変動影響評価等小委員会, 2015.

- 1) Hales S et al. Eds, 2014: Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s. World Health Organization, Geneva,
- 2) Alcamo, J., P. Döll, F. Kaspar, and S. Siebert (1997), Global change and global scenarios of water use and availability: An Application of WaterGAP1.0 *Rep.*, 47 pp, Center for Environmental Systems Research (CESR), University of Kassel, Germany, Kassel, Germany.
- 3) Döll, P., and S. Siebert (2002), Global modeling of irrigation water requirements, *Water Resour. Res.*, 38(4), 1037, doi: 10.1029/2001WR000355.

- 4) Alcamo, J., P. Döll, T. Henrichs, F. Kaspar, B. Lehner, T. Rösch, and S. Siebert (2003), Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability, *Hydrolog. Sci. J.*, 48(3), 317-337, doi: 10.1623/hysj.48.3.317.45290.
- 5) Hanasaki, N., S. Kanae, and T. Oki (2006), A reservoir operation scheme for global river routing models, *J. Hydrol.*, 327(1-2), 22-41, doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.11.011.
- 6) Haddeland, I., T. Skaugen, and D. P. Lettenmaier (2006), Anthropogenic impacts on continental surface water fluxes, *Geophys. Res. Lett.*, 33(8), doi: L08406, doi:10.1029/2006GL026047.
- 7) Hanasaki, N., S. Kanae, T. Oki, K. Masuda, K. Motoya, N. Shirakawa, Y. Shen, and K. Tanaka (2008), An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12(4), 1007-1025, doi: doi:10.5194/hess-12-1007-2008.
- 8) Rost, S., D. Gerten, A. Bondeau, W. Lucht, J. Rohwer, and S. Schaphoff (2008), Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system, *Water Resour. Res.*, 44, W09405, doi: doi:10.1029/2007WR006331.
- 9) Wada, Y., L. P. H. van Beek, C. M. van Kempen, J. W. T. M. Reckman, S. Vasak, and M. F. P. Bierkens (2010), Global depletion of groundwater resources, *Geophys. Res. Lett.*, 37(20), L20402, doi: 10.1029/2010GL044571
- 10) Parmesan, C., Yohe, G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421, 37-42, 2003.
- 11) Buckley, L.B., Urban, M.C., Angilletta, M.J., Crozier, L.G., Rissler, L.J. & Sears, M.W. Can mechanism inform species' distribution models? *Ecol. Lett.*, 13, 1041-1054, 2010.
- 12) 横沢正幸、飯島仁之直、岡田将誌, 気候変化が日本におけるコメ収量変動に及ぼす影響の広域評価, *地球環境*, 14, 199-206 (2009)
- 13) 農業環境技術研究所, 2016: 主要研究成果, 気候変動が日本のコメ生産に及ぼす影響の予測, [http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result32/result32\\_09.pdf](http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result32/result32_09.pdf)
- 14) Okada M., Iizumi T., Hayashi Y., and Yokozawa M, Projecting climate change impacts both on rice quality and yield in Japan, *Journal of Agricultural Meteorology*, 67, 285-295 (2011)
- 15) 農業環境技術研究所, 2013: プレスリリース, 高 CO<sub>2</sub> 濃度によるコメの増収効果は高温条件下で低下—気候の違う 2 地点の FACE (開放系大気二酸化炭素増加) 実験により確認—, <http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/press/130307/press130307.html>
- 16) Hasegawa T, Sakai H, Tokida T, Nakamura H, Zhu C, Usui Y, Yoshimoto M, Fukuoka M, Wakatsuki H, Katayanagi N, Matsunami T, Kaneta Y, Sato T, Takakai F, Sameshima R, Okada M, Mae T, Makino A (2013) Rice cultivar responses to elevated CO<sub>2</sub> at two free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) sites in Japan. *Functional Plant Biology* 148, 148-159.
- 17) 杉浦俊彦・杉浦裕義・阪本大輔・朝倉利員: 果樹の生育変化と異常: *地球環境*, 17, 75-81 (2012).
- 18) 農研機構果樹研究所, 2013: プレスリリース, 地球温暖化でリンゴの味が変化している, [http://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/fruit/048269.html](http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/fruit/048269.html)
- 19) Sugiura T, Ogawa H, Fukuda N, Moriguchi T: Changes in the taste and textural attributes of apples in response to climate change: *Scientific Reports* 3, 2418 (2013).
- 20) 高田良三, 山崎信, 杉浦俊彦, 横沢正幸, 大塚誠, 村上斉, 2008: 地球温暖化が肥育豚の飼養

- 成績に及ぼす影響—「気候温暖化メッシュデータ (日本)」によるその将来予測. 日本畜産学会報, 79, 59-65.
- 21) 山崎信, 村上斉, 中島一喜, 阿部啓之, 杉浦俊彦, 横沢正幸, 栗原光規, 2006: 平均気温の変動から推定した日本の鶏肉生産に対する地球温暖化の影響. 日本畜産学会報, 77, 231-235.
  - 22) Yamamura K, Yokozawa M, Nishimori M, Ueda Y, Yokosuka T, 2006: How to analyze long-term insect population dynamics under climate change: 50-year data of three insect pests in paddy fields. *Popul Ecol* 48:31-48
  - 23) Shigenaga H, Matsumoto Y, Taoda H, Takahashi M., 2005: The Potential Effect of Climate Change on the Transpiration of Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) Plantations in Japan. *農業気象* 60 (5): 451-456.
  - 24) Nakao K., Matsui T, Horikawa M, Tsuyama I, Tanaka N, 2011: Assessing the impact of land use and climate change on the evergreen broad-leaved species of *Quercus acuta* in Japan. *Plant Ecology*, Vol.212, Issue 2, 229-243.
  - 25) 尾崎研一・上田明良・澤野真治, 2014: 北海道における地球温暖化によるヤツバキクイムシの世代数変化予測, *森林防疫*, 63:142-150.
  - 26) 松本光朗, 2015: 森林分野の CO<sub>2</sub> 吸排出量の将来予測と緩和策, 研究成果発表会講演集「地球温暖化の中で森林を活かす」, 3-6  
[http://ccaff.dc.affrc.go.jp/conference2014/images/seika20141111\\_forest.pdf](http://ccaff.dc.affrc.go.jp/conference2014/images/seika20141111_forest.pdf)
  - 27) Kishi MJ, Kaeriyama M, Ueno H, Kamezawa Y, 2010: The effect of climate change on the growth of Japanese chum salmon (*Oncorhynchus keta*) using a bioenergetics model coupled with a three-dimensional lower trophic ecosystem model (NEMURO). *Deep-Sea Research II*, 57: 1257-1265.
  - 28) Kaeriyama M, Seo H, Qin Y.: 2014: Effect of global warming on the life history and population dynamics of Japanese chum salmon. *Fish Sci* 80: 251-260.
  - 29) Tian Y, Kidokoro H, Watanabe T, Igeta Y, Sakaji H, Ino S., 2012: Response of yellowtail, *Seriola quinqueradiata*, a key large predatory fish in the Japan Sea, to sea water temperature over the last century and potential effects of global warming. *Journal of Marine Systems* 91: 1-10.
  - 30) Kishi MJ, Nakajima K, Fujii M, Hashioka T., 2009: Environmental factors which affect growth of Japanese common squid, *Todarodes pacificus*, analyzed by a bioenergetics model coupled with a lower trophic ecosystem model. *Journal of Marine Systems* 78: 278-287.
  - 31) Ito S, Rose KA, Miller AJ, Drinkwater K, Brander K, Overland JE, Sundby S, Curchitser E, Hurrell JW, Yamanaka Y., *Ocean ecosystem responses to future global change scenarios: a way forward. MARINE ECOSYSTEMS AND GLOBAL CHANGE*, Oxford University Press.
  - 32) Okunishi T, Ito S, Hashioka T, Sakamoto T, Yoshie N, Sumata H, Yara Y, Okada N, Yamanaka Y, 2012: Impacts of climate change on growth, migration and recruitment success of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the Western North Pacific. *Climatic Change* 115: 485-503.
  - 33) 桑原久実・明田定満・小林 聡・竹下 彰・山下 洋・城戸勝利, 2006: 温暖化による日本水産生物の分布域の変化予測. *地球環境*, 1, 49-57.
  - 34) 水産総合研究センター, 2009: 地球温暖化とさかな, 成山堂書店, 216 pp.

- 35) 水産総合研究センター, 2014: 水産資源ならびに生息環境における地球温暖化の影響とその予測, <https://www.fra.affrc.go.jp/kseika/ondanka/siryoy1.pdf>
- 36) Momiyama M, Kagami M, Sato T. A medico-geographical analysis of cerebrovascular disease in Tohoku district, Japan. *Geogr Med.* 1988;18:9-26
- 37) McMichael A et al., 2004: Climate change. Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease due to Selected Major Risk Factors, Vol. 2, M. Ezzati, A. Lopez, A. Rodgers and C. Murray, Eds., World Health Organization, Geneva, 1543-1649.
- 38) Chubachi, S., Preliminary result of ozone observations at Syowa Station from February, 1982 to January, 1983, *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Jpn. Spec. Issue*, 34, 13-20, 1984.
- 39) Farman, J. C., B. G. Gardiner, and J. D. Shanklin, Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction, *Nature*, 315, 207-210, 1985.
- 40) Stocker, T. F., et al., IPCC 2013: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2013.
- 41) US Department of Energy, (USDOE) The Water Energy Tech Team:  
<http://energy.gov/under-secretary-science-and-energy/water-energy-tech-team>
- 42) d4PDF <http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/index.html>
- 43) 創生プログラムテーマD平成27年度研究成果報告書
- 44) CESM1(CAM5) LARGE ENSEMBLE COMMUNITY PROJECT DIAGNOSTICS  
<http://www.cesm.ucar.edu/experiments/cesm1.1/LE/>
- 45) 創生プログラムテーマA平成27年度研究成果報告書
- 46) 国土交通省 水管理・国土保全局、浸水想定(洪水、内水)の作成等のための想定最大外力の設定手法  
[http://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/pdf/shinsuisoutei\\_honnun\\_1507.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/pdf/shinsuisoutei_honnun_1507.pdf)
- 47) Fujibe, F., N. Yamazaki and K. Kobayashi: Long-term changes of heavy precipitation and dry weather in Japan (1901-2004), *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, Vol.84, No.6, pp.1033-1046, 2006.
- 48) 平成28年度「地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラム」新規公募の審査結果について  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/boshu/detail/1369487.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/1369487.htm)
- 49) European Flood Awareness System (EFAS) <https://www.efas.eu/>
- 50) NOAA / NWS Hydrologic Ensemble Forecasting  
<http://www.nws.noaa.gov/oh/XEFS/index.html>
- 51) 佐藤 雄亮・芳村 圭・金 炯俊・沖 大幹、早魃の将来変化に対する水資源管理の効果に関する研究、土木学会論文集B1(水工学), 71(4), I\_391-I\_396, 2015.
- 52) 農業環境技術研究所, 2014: 主要成果, 作物気象データベース『MeteoCrop DB』改訂版-最新データの提供でイネの生育診断や高温対策への利用が可能に-,  
[http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result30/result30\\_24.html](http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result30/result30_24.html)
- 53) 農研機構中央農業総合研究センター, 2015: 成果情報, 1km メッシュの農業気象データを全国について作成・配信するシステム,  
[http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/narc/2015/15\\_066.html](http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/narc/2015/15_066.html)
- 54) 農研機構農村工字研究所, 2015: 成果情報, 気候変動が農業水利用や水資源に与える影響の全国評価マップ, [http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nkk/2015/15\\_069.html](http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nkk/2015/15_069.html)

- 55) 農業環境技術研究所, 2016: 主要成果, 大気 CO<sub>2</sub>濃度の上昇はコメの品質を低下させるが高温耐性品種ではその影響が小さい,  
[http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result32/result32\\_28.pdf](http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result32/result32_28.pdf)
- 56) 農業環境技術研究所, 2016: 主要成果, 多収品種タカナリの高 CO<sub>2</sub>濃度環境における子実の成長特性 ~高 CO<sub>2</sub>濃度で増収に寄与する一要因~,  
[http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result32/result32\\_30.pdf](http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result32/result32_30.pdf)
- 57) 農業環境技術研究所・海洋研究開発機構, 2014: プレスリリース, エルニーニョ/ラニーニャと世界の主要穀物の生産変動との関係性を解明,  
<http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/press/140515/>
- 58) 農業環境技術研究所, 2016: プレスリリース, 過去 30 年間に穀物収量が不安定化した地域と気候要因の寄与を明らかに, <http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/press/160328/>
- 59) 農業環境技術研究所, 2015: プレスリリース, 農地からの温室効果ガス削減効果を計算するウェブサイトー土壤炭素量の増減と温室効果ガス発生量を総合評価ー,  
<http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/press/150220/>
- 60) 森林総合研究所, 2015: 研究成果選集, 将来予測からみた森林分野の地球温暖化緩和策ー木材利用が重要ー, <http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/seikasenshu/2015/documents/p38-39.pdf>
- 61) Abe-Ouchi, A., F. Saito, K. Kawamura, M. E. Raymo, J. Okuno, K. Takahashi and H. Blatter, Insolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume, *Nature* 500, 190–193, doi:10.1038/nature12374, 2013.
- 62) Kawamura, K. F. Parrenin, L. Lisiecki, R. Uemura, F. Vimeux, J. P. Severinghaus, M. A. Hutterli, T. Nakazawa, S. Aoki, J. Jouzel, M. E. Raymo, K. Matsumoto, H. Nakata, H. Motoyama, S. Fujita, K. Goto-Azuma, Y. Fujii and O. Watanabe., Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360,000 years. *Nature* 448, 912–916, 2007.
- 63) [プレスリリース] ユーラシア大陸中緯度域で頻発している寒冬の要因分析 ~北極海の海氷の減少により寒冬になる確率は2倍~ : <http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20141027.html>, 2014.
- 64) [プレスリリース] 船舶を利用した北極海上でのブラックカーボン粒子の高精度測定に世界で初めて成功ー北極から全球へ、気候変動予測の精緻化に貢献ー :  
<http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20160220.html>, 2016.
- 65) Anderegg, W. R.L. and Diffenbaugh, N.S. Observed and projected climate trends and hotspots across the National Ecological Observatory Network regions. *Front. Ecol. Environ.* 13, 547–552, 2015
- 66) WMO, 2016, WWRP Polar Prediction Project, Implementation Plan for the Year of Polar Prediction (YOPP), WWRP/PPP No. 4 – 2016,  
[https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/FINAL\\_WWRP\\_PPP\\_YOPP\\_Plan\\_28\\_July\\_web.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/FINAL_WWRP_PPP_YOPP_Plan_28_July_web.pdf), 2016.
- 67) Yamazaki, A., J. Inoue, K. Dethloff, M. Maturilli, and G. König-Langlo, Impact of radiosonde observations on forecasting summertime Arctic cyclone formation. *J. Geophys. Res.* 120, 3249–3273, 2015.
- 68) Inoue, J., A. Yamazaki, J. Ono, K. Dethloff, M. Maturilli, R. Neuber, P. Edwards and H. Yamaguchi, Additional Arctic observations improve weather and sea-ice forecasts for the Northern Sea Route, *Scientific Reports*, DOI: 10.1038/srep16868, 2015.

- 69) Ono, J., J. Inoue, A. Yamazaki, K. Dethloff and H. Yamaguchi, The impact of radiosonde data on forecasting sea-ice distribution along the Northern Sea Route during an extremely developed cyclone, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8(1), 292-303, 2016.
- 70) Steig, E. J., et al., Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year, *Nature*, 457, 459-463, 2009.
- 71) Turner, J., T. A. Lachlan-Cope, S. R. Colwell, G. J. Marshall, and W. M. Connolley, Significant warming of the Antarctic winter troposphere, *Science*, 311, 1914– 1917, doi:10.1126/science.1121652, 2006.
- 72) [プレスリリース] 北アメリカの厳冬を引き起こす新たな要因の解明 ～夏季北太平洋亜熱帯からの大気のテレコネクションの影響～ : <http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20150922.html>, 2015.
- 73) Soil Water Assessment Tool (SWAT) <http://swat.tamu.edu/>
- 74) Hatfield, J.L., K.J. Boote, B.A. Kimball, L.H. Ziska, R.C. Izaurralde, D. Ort, A.M. Thomson, and D. Wolfe, 2011: Climate impacts on agriculture: implications for crop production. *Agronomy Journal*, 103(2), 351-370.
- 75) US EPS, 2016: Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2014, [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/9492.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php)
- 76) USDA, 2014: 2014 USDA Climate Change Adaptation Plan, [http://www.usda.gov/oce/climate\\_change/adaptation/adaptation\\_plan.htm](http://www.usda.gov/oce/climate_change/adaptation/adaptation_plan.htm)
- 77) ICF International and USDA, 2013: Greenhouse Gas Mitigation Options and Costs for Agricultural Land and Animal Production within the United States, [http://www.usda.gov/oce/climate\\_change/mitigation\\_technologies/GHG\\_Mitigation\\_Options.pdf](http://www.usda.gov/oce/climate_change/mitigation_technologies/GHG_Mitigation_Options.pdf)
- 78) Iglesias, A., L. Garrote, S. Quiroga, and M. Moneo, 2012: A regional comparison of the effects of climate change on agricultural crops in Europe. *Climatic Change*, 112(1), 29-46.
- 79) European Commission and European Environment Agency: The European Climate Adaptation Platform (CLIMATE-ADAPT), <http://climate-adapt.eea.europa.eu/about>
- 80) Pérez Domínguez, I., T. Fellmann, F. Weiss, P. Witzke, J. Barreiro-Hurlé, M. Himics, T. Jansson, G. Salputra, A. Leip (2016): An economic assessment of GHG mitigation policy options for EU agriculture (EcAMPA 2). JRC Science for Policy Report, EUR 27973 EN, 10.2791/843461
- 81) Tao, F., Z. Zhang, and M. Yokozawa, 2011: Dangerous levels of climate change for agricultural production in China. *Regional Environmental Change*, 11(Suppl. 1), S41–S48, doi:10.1007/s10113-010-0159-8.
- 82) Our Changing Planet 2016, USGCRP Climate & Health Assessment <http://www.globalchange.gov/health-assessment>
- 83) UK Living with Environmental Change <http://www.nerc.ac.uk/research/partnerships/lwec/>
- 84) [プレスリリース] 南極最大の気象レーダー「PANSY レーダー」が可能にする南極気象の精密

- 研究 : <http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20150410.html>, 2015.
- 85) Funaki M., S. Higashino, S. Sakanaka, N. Iwata, N. Nakamura, N. Hirasawa, N. Obara and M. Kuwabara, Small unmanned aerial vehicles for Antarctic research: Results of aeromagnetic surveys in the South Shetland Islands, Antarctica, *Polar Science*, 8, 324-356, 2014. doi:10.1016/j.polar.2014.07.001
- 86) Higashino, S., M. Funaki, N. Hirasawa, M. Hayashi, and S. Nagasaki, Development and Operational Experiences of UAVs for Scientific Research in Antarctica, “Autonomous Control Systems and Vehicles” (Nonami, K.; Kartidjo, M.; Yoon, K.-J.; Budiyo, A. (Eds.), 315 p.), *Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering Volume 65*, 159-173(Chapter 11), Springer, 2013.
- 87) [国立極地研究所プレスリリース] 昭和基地の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度が 400ppm を突破 : <http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20160712.html>, 2016.
- 88) [プレスリリース] 観測コストを考慮した北極海上の最適観測頻度を実証—北極海航路の気象・海氷予測の高精度化に貢献— : <http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20151120.html>, 2015.
- 89) [プレスリリース] 北極の観測で猛烈な北極低気圧を予測—北極海航路上の安全航行に向けた予報精度の向上 : <http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20150428.html>, 2016
- 90) Higashino, S., M. Hayashi, S. Nagasaki, S. Umemoto, and M. Nishimura, A Balloon-Assisted Gliding UAV for Aerosol Observation in Antarctica, *Transactions of JSASS Aerospace Technology Japan*, Vol.12, No.APISAT-2013, pp.35-41, 2014.
- 91) [国立極地研究所プレスリリース] 無人観測航空機、高度 22km の南極成層圏エアロゾルのサンプルリターンに成功！ (2015年3月13日)
- 92) [国立極地研究所プレスリリース] 横に傾いて泳ぐ奇妙なサメを発見し、理由を解明, (2016年7月29日)
- 93) Payne, N. L., G. Iosilevskii, A. Barnett, C.s Fischer, R. T. Graham, A. C. Gleiss and Y. Y. Watanabe, Great hammerhead sharks swim on their side to reduce transport costs, *Nature Communications* 7, doi:10.1038/ncomms12289, 2016
- 94) Watanabe, Y. Y. , Flight mode affects allometry of migration range in birds, *Ecology Letters*, 19(8), DOI: 10.1111/ele.12627, 907-914, 2016
- 95) [国立極地研究所プレスリリース] 渡り鳥の移動距離は体重と飛行様式で決まる, ~渡り鳥 196種のバイオロギングデータの比較で判明~, (2016年7月11日)
- 96) [国立極地研究所プレスリリース] 南極観測船「しらせ」の航行支援として海氷密接度および海面水温の自動配信を実施, (2014年12月19日)
- 97) Automatic Weather Stations, <http://amrc.ssec.wisc.edu/aws/>
- 98) Shakhova, N., I., Semiletov, I. Leifer, V. Sergienko, A. Salyuk, D. Kosmach, D. Chernykh, C. Stubbs, D. Nicolsky, V. Tumskoy and Ö. Gustafsson, Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf, *nature Geoscience*, vol.7, 64-70, DOI: 10.1038/NGEO2007, 2014

## 3.2 環境汚染・健康区分

環境汚染・健康区分では、下記の6つの研究開発領域を設定した。

- 3.2.1 大気汚染
- 3.2.2 水質汚染
- 3.2.3 土壌・地下水汚染
- 3.2.4 物質循環・環境動態
- 3.2.5 健康・環境影響
- 3.2.6 化学物質リスク管理

区分の概要を以下にまとめる。

大気汚染の研究開発は欧米、特に米国が進んでいる。日欧米の大気汚染課題は、PM2.5と光化学オキシダント（オゾン）であり、生成機構が複雑なため、対策には大気モデルを用いた研究が重要である。日本では分析や機構に関する基礎研究は行われているが、固定発生源の測定に関する研究者が少なく排出インベントリの整備に課題がある。短寿命気候汚染物質（SLCPs：Short-Lived Climate Pollutants、メタン・対流圏オゾン・ブラックカーボン）のようなローカルな大気汚染と地球環境の両方に関わる物質の排出が開発途上国での課題として注目されはじめている。

水質汚染は、広域的かつ新たな汚染物質（医薬品および日用品等由来化学物質（PPCPs：Pharmaceuticals and Personal Care Products）やマイクロプラスチックなど）の出現により複合的な汚染現象へと変化している。欧州は問題自体の発掘に積極的に関与し、全体的に研究が盛んである。新たな問題の発見と規制の先導によるアドバンテージは大きく、日本は欧米の後追いとなっている点是否めない。日本はマイクロプラスチック中の化学物質測定など世界をリードする領域もあるが、全体的に縮小傾向にある。米国では、病原性微生物や微量物質の分析法などで優位に研究が進められている。先端的な課題だけでなく、気候変動や資源採掘、地域環境の保全に関連する研究も行われている。

土壌・地下水汚染に関して、サステイナブルレメディエーション（SR：Sustainable Remediation、環境面・経済面・社会面を考慮した対策）やリスク評価のように複数指標からの目標設定が検討されている。米国では生物を利用した浄化技術やリスク管理に基づく融合研究が進められ、また、ポリマーやゼオライト等を添加した高機能型遮水材の基礎研究が盛んである。実汚染サイトでの検証や実証が可能であり、応用研究の環境として非常に優れている。欧州では特に英国でSRの研究開発が加速されておりISO規格の提案が進められている。日本も多くの研究開発の推進やその成果があり、今後はリスク評価の導入とそれに基づく対策が求められる。

大気、水、土壌や地下水を横断する炭素や窒素、汚染物質の物質循環・環境動態の分野では、試料精製と測定技術が向上し、循環・動態の統合的モデルが開発され、原子・分子レベルからの現象理解が進んでいる。日本は温室効果ガス濃度や同位体比測定は最高水準を維持している。米国は観測ネットワーク構築と統合化を積極的に推し進め、特に衛星観測では世界をリードしている。物質循環モデル研究でも長い歴史をもつ。欧州も炭素および関連する物質循環研究を積極的に推進している。中国はモデル分野では独自開発はまだ少ないが、温室効果ガスなどの物質循環の観測研究を進め、論文数の伸びが非常に大きい。

健康・環境影響に関する研究開発は、代謝過程の知識の蓄積と分析技術の進展により、曝露から影響までの経路を把握する AOP（Adverse Outcome Pathway）が注目されている。地球環境問題による健康影響も重要性を増している。米国で基礎研究が多岐にわたり且つレベルが高い。新しいアプローチが絶え間なく提案され、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。中国では多くの資源が割かれ着実に実力をつけている。日本も基礎研究のレベルは高く、化学物質影響、気候変動影響などで報告数も増えている。

化学物質リスク管理に関しては、管理が必要な化学物質数が増大し、網羅的一斉分析や高分解能な分析が進展している。AOP による毒性試験の省力化や迅速化も期待される。日欧米のレベルが高く、特に欧州では分析から毒性までをカバーする国際プロジェクト Solutions などが進められている。北米（特にカナダ）では、超高分離技術と超高分解能質量分析計を合わせた装置開発が進むなど基礎レベルは高い。ToxCast、Tox21、FutureTox II など毒性予測に関する大規模プロジェクトが進められ基礎から応用への展開が進む。日本はノンターゲット分析の普及、薬物の体内動態予測、子供と環境に関する全国調査の実施、大規模モデル開発など基礎研究の水準は高い。

### 3.2.1 大気汚染

#### （1）研究開発領域の簡潔な説明

大気汚染は、工場等の固定発生源および自動車等の移動発生源からのガス、エアロゾル粒子（気体中に浮遊している固体・液体の微粒子状物質）などの汚染物質が健康被害や環境被害などをもたらす事象である。火山や森林火災などの自然発生源からの上記汚染物質も大気汚染物質に含めることがある。ここでは大気環境における汚染物質の観測・計測と予測・評価、ならびに排出源特定と排出源対策を対象とする。

#### （2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

##### [意義]

日本では、大気汚染防止法による固定発生源（工場や事業場）からの排出規制、および移動発生源である自動車の排出ガス規制の段階的強化や自動車 NO<sub>x</sub>・PM 法などの都市部を対象とした対策により、これまでに大気汚染物質の環境濃度は大幅に改善してきており、大気環境の残された課題は光化学オキシダントと PM<sub>2.5</sub> とされている。いずれの大気汚染物質も大気中の反応が主要因と考えられているが、その生成メカニズムは多岐にわたり、いまだ十分解明されていない<sup>1)</sup>。この大気環境対策を行うための生成メカニズムの解明、大気質予測シミュレーション（大気モデル）の高精度化、その入力データであるエミッションインベントリの整備・改善が喫緊の課題であり、これらの研究を進めることが必要となる。またこれらの対策については、東アジアからの越境大気汚染の影響も大きい<sup>2)</sup>ため、国際的な取り組みも必要とされている。加えて最近では、石綿（アスベスト）やナノ粒子のように形状やサイズに起因する有害性が問題となる物質、水銀や鉛等の重金属や残留性有機汚染物質（POPs：Persistent Organic Pollutants）による地球規模の汚染、さらにはブラックカーボンやフロンのように大気環境が気候変動に及ぼす影響という観点からの研究も必要とされている。

##### [動向（歴史）]

##### ■ 大気汚染に係る物質

環境基準は、人の健康を保護し、生活環境を保全する上で「維持されることが望ましい基準」（環境基本法）であり、行政上の政策目標である。大気汚染に係る環境基準は、公害対策基本法（昭和42年法律第132号）第9条の規定に基づいて、二酸化硫黄（SO<sub>2</sub>）、一酸化炭素（CO）、浮遊粒子状物質（SPM）、二酸化窒素（NO<sub>2</sub>）、光化学オキシダントに対して基準値が定められている。1996年の大気汚染防止法の改正で、長期的暴露による発がん性等の観点から、有害大気汚染物質として、248物質（そのうち優先取り組み物質23物質、指定物質3物質）が指定された。現在、有害大気汚染物質の基準値はベンゼンなど4物質に関して定められており、その他8種類については指針値として定められている。また2009年には微小粒子状物質（PM<sub>2.5</sub>）に係る環境基準が追加されている。2015年には水銀に関する水俣条約を踏まえて大気汚染防止法が改正され、水銀の大気排出規制が新たに設けられた。全国に約2,000の大気測定局があり、汚染物質のすべてあるいは一部について、連続的にモニター評価されている状況である。

なお大気汚染物質の環境基準はヒトの健康影響より導き出されるものであるが、今後は環

境汚染物質に過敏な人（子供、高齢者、心疾患等の患者）を対象とした研究が今まで以上に必要とされる。

#### ■ 大気汚染の歴史<sup>2)</sup>

世界で最初の大気汚染による健康被害は、1930年ベルギー・ミューズ渓谷における呼吸器疾患での地域住民60人死亡の事件である。また都市部での大気汚染による最初の健康被害は、1952年のロンドン・スモッグ事件である。12月中の約1週間、先のミューズ渓谷と同様に冬場における大気の気温逆転（高度上昇にしたがって気温が通常とは逆に上昇する現象）で、大気汚染物質が滞留する状態となり、通常より約4千人も死亡者が増加した。この事件の原因は石炭燃焼による煤煙・煤塵、硫酸化物（SO<sub>x</sub>）などによるものであった。当時ロンドン市役所の屋上で、浮遊粉塵やSO<sub>2</sub>が測定されており、これらの大気汚染物質の曝露濃度と死亡率や罹患率などの健康影響との関係を評価することで大気汚染の医学研究を飛躍的に推進させることにもなった。

日本における大気汚染の歴史としては、1960年頃からのいわゆる四日市喘息問題があげられる。この原因は疫学調査よりSO<sub>x</sub>を含む汚染物質の排出によるものであり、石炭使用に伴う煤煙・煤塵を規制するために1962年に煤煙規制法（煤煙の排出の規制等に関する法律）が制定された。総合的な汚染防止対策を進めるために1967年に公害対策基本法を制定し、翌年、大気汚染防止法が成立した。これにより、工場・事業所からの排出基準の強化、総量規制などの規制強化、それに対応して工場・事業所側の集塵装置、排煙脱硫・脱硝設備の導入や重油の低硫黄化対策などの産業型公害規制が行われ、環境基準達成が向上した。

一方、都市部における新たな問題として光化学スモッグが浮上してきた。1970年7月に東京・杉並の高校で運動中の高校生が目や咽喉の刺激症状、咳、呼吸困難、頭痛、しびれ感を訴え、一部の者は高度の呼吸困難、痙攣発作や意識障害などで病院に搬送される事件があった。後の研究で、これは光化学オキシダント（オゾン（O<sub>3</sub>）や peroxyacetyl nitrate（PAN）など）が原因であることが分かった。国は、光化学オキシダント発生の一因となる窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）に対して、固定発生源には1973年の排出基準設定を順次強化した。さらに自動車排出ガスからのNO<sub>x</sub>に対しても1978年から本格的な規制が開始された。炭化水素に対しても大気汚染防止法に基づいて規制された。一方、自動車台数の急増によりNO<sub>x</sub>やSPMなどの沿道等の局地的汚染の問題も、大都市地域を中心として浮上してきた。自動車排出ガス規制は1966年以降順次排出ガス低減技術、特にガソリン車における電子制御式燃料噴射と三元触媒の組み合わせ、さらには燃料の無鉛化（ガソリン性能向上のための鉛系添加剤の廃止）などの燃料性状の進展を見極めながら強化されてきたが、首都圏などの大都市部については新車対策のみではNO<sub>x</sub>やSPMなどで大気改善が進まない状況が続いた。さらにディーゼル車から排出されるPMの発がん性を指摘する研究例も出てきたため、1992年には東京都がいわゆる「ディーゼル車NO作戦」を独自に展開し、新車のみならず使用過程車も含めたディーゼル車への対策強化を行った<sup>3)</sup>。これを契機に自動車PM排出の対策技術であるフィルター装置（DPF: Diesel particulate filter）を装着したディーゼル車の市場導入の前倒し、既販車へのDPF装置の装着対応、およびDPF装着時に必要となる低硫黄軽油の早期導入などの対策が進んだ。2009年にはディーゼル車の新車すべてにDPF装着を前提とした排出ガス規制強化が行われ、それ以前のディーゼル車への早期対策も含めて、SPMは大きく改善している。なお現在では大型ディーゼル車へのNO<sub>x</sub>排出規制強化の検討ならびに国際基準調和として自動車排出ガスの試験法統一の検討も行われている<sup>4)</sup>。

2012年度環境基本計画によると、大都市のNO<sub>2</sub>、SPMは自動車単体規制、自動車NO<sub>x</sub>・PM法、低公害車の普及により、一部の測定局を残し、環境基準をおおむね達成している。

日本の大気質の残された課題は光化学オキシダントと PM2.5 とされている。光化学オキシダントについては、原因物質である NO<sub>x</sub> や揮発性有機化合物 (VOC : Volatile Organic Compounds) の排出抑制対策を進めてきているが、環境基準が諸外国と比較して厳しいこともあり、達成率は 1%未満と低い状況にある。ただし光化学オキシダント濃度の長期的な傾向を評価するための指標 (光化学オキシダント濃度 8 時間値の日最高値の年間 99 パーセントイル値の 3 年平均値) を用いて、関東地域や阪神地域などの域内最高値の経年変化をみると、近年は域内最高値が低下しており、高濃度域の光化学オキシダントの改善が示唆されている。2009 年に新たに環境基準が定められた PM2.5 は、粒子状物質の中で粒径 2.5μm 以下の粒子状物質である。SPM (10μm 以下) などと比較して粒子径の小さい PM2.5 は肺の奥にまで到達するため、疫学データでの健康被害との相関が高いとされ、1997 年に米国で初めて環境基準が設定されたものである<sup>4)</sup>。現在は常時監視体制が構築されつつあるが、測定データから全国的に環境基準を超える可能性が示唆されている。

なお欧米での大気環境の課題としても、米国ではオゾン (日本の光化学オキシダントに相当) と PM2.5 が問題、EU ではオゾン、窒素酸化物、一部の有機化合物についていまだに課題と認識されている。また特に都市部での PM、オゾン高濃度地域は 90%を越え、大きな懸念とされ、WHO のガイドライン指針値の達成を目標に対策が進められている<sup>5)</sup>。このように日欧米とも PM2.5 および光化学オキシダント/オゾンなど、複雑な生成機構をもつ大気汚染物質に対しての観測、予測、対策の課題がある。

光化学オキシダントは、前駆物質の VOC や NO<sub>x</sub> が大気中の光化学反応により生成される物質である。しかし NO<sub>x</sub> と VOC の排出量を減らした分だけ改善されるわけではなく、減らす比率によっては、光化学オキシダント濃度が増加してしまう場合もある。また、VOC は 1 つの物質ではなく様々な物質の総称であり、その中にはオキシダント生成に大きく寄与する物質もあればあまり寄与しない物質もある。一方、PM2.5 には、発生源から直接大気中に粒子として排出されるもの (一次生成粒子) と、ガス状の前駆物質 (VOC/NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub>) が大気中の化学反応を経て粒子化するもの (二次生成粒子) がある。これらのように前駆物質が大気中で光化学反応して出来る PM2.5 二次粒子やオキシダントについては、生成機構が複雑で未解明であり、原因物質と発生源が多岐にわたることから解明すべき課題が多く残されている。

図 3-1 は大気中の光化学反応などの二次生成反応メカニズムの概略を示したものである<sup>1)</sup>。また、図 3-2 は PM2.5 の発生源・成分の内訳例であり、二次生成粒子が多いことが分かる。

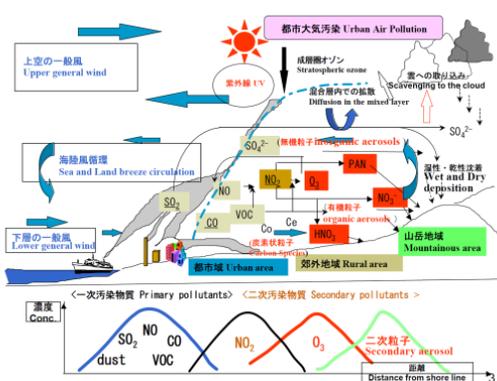


図 3-1 大気中の二次生成反応メカニズム

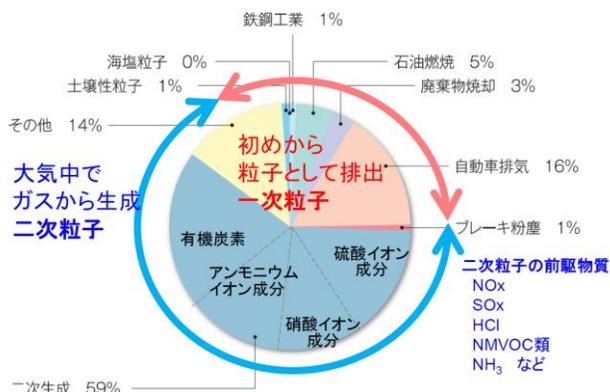


図 3-2 PM2.5 の発生源・成分の内訳例

(出典：JATOPI II 成果報告会資料)

また地球規模の問題として、汚染物質が国境を越えて長距離輸送されることによる広域大気汚染、地球規模大気汚染の問題もある。この問題は日本ではPM2.5が中国から飛来するなど最近になって特に注目されているが、この広域大気汚染の問題自体の歴史は古く、欧州や北米では1960年代から70年代にかけて顕在化した。当時は粒子状物質ではなく、SOxとNOxとその分解物である硫酸、硝酸エアロゾルといったような酸性物質の越境汚染による、湖沼の酸性化や森林の立ち枯れが問題であった。その後、1990年代に日本と中国を含む東アジアにおいても同様な越境汚染問題が取りざたされた。酸性物質の越境汚染については、欧州を中心とした数十ヶ国により長距離越境大気汚染条約（CLRTAP）が1979年に採択され、汚染状況の監視・評価、原因物質の排出削減対策などが進められている。東アジア地域では、日本のイニシアチブにより中国をはじめとする東アジアの13ヶ国が参加して「東アジア酸性雨モニタリングネットワーク（EANET）」が2001年から本格稼働している。

水銀や鉛等の重金属や、PCBのような残留性有機汚染物質（POPs）は、大気中寿命が非常に長いため、酸性物質の越境汚染よりもさらに広範囲に移動し、地球規模の汚染が懸念されている。そのため、「残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約」（POPs条約）が2004年5月に発効し、シミュレーション等による監視、評価、排出削減対策が進められている。

大気汚染、大気環境に係わる研究開発としては、対策手段を特定するために観測に加え、大気中の汚染物質の挙動を予測・解析するための大気モデルが重要な役割を担っている。特に光化学オキシダントとPM2.5のように複雑な大気中の化学反応メカニズムで発生する物質や、越境汚染など広域の大気汚染の影響を評価し解明するためには、大気濃度場の時空間構造とその変動、複雑な物理・化学過程を取り入れた大気モデルが重要であり、その果たすべき役割は増大している。以下には大気モデル研究について記す。

■ 大気モデル研究

大気モデル研究は、排出インベントリの整備、大気モデル開発、将来予測などの対策検討の3つの領域に分けられる。図3-3に大気モデルの概念図を示す<sup>1)</sup>。

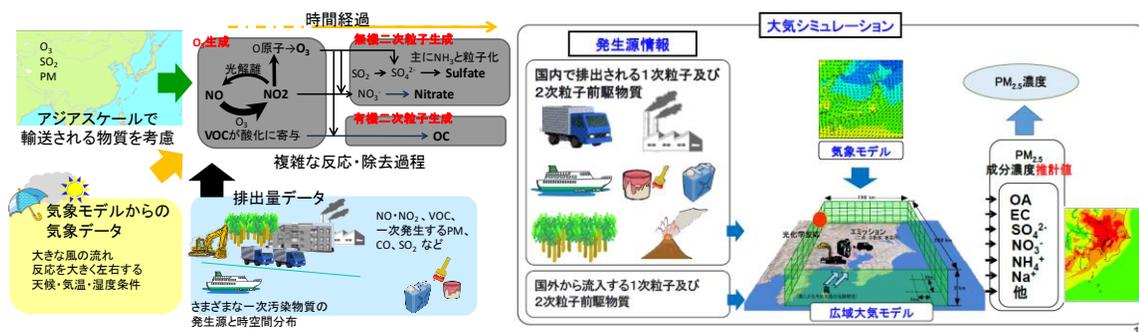


図 3-3 大気モデルの概念図（出典：JATOP II 成果報告会資料）

- 排出インベントリの整備

排出インベントリとは、大気汚染物質がどこからどれだけ排出されているかを示す目録（インベントリ）であり、通常は年間の排出量として示される。大気モデルへは入力データとして用いられ、排出量のリストにとどまらず、空間的、時間的な排出量が必要となる。日本では国としての排出インベントリ（ナショナルインベントリ）はいまだ整備されていない<sup>6)</sup>。排出インベントリはすべての発生源からの排出量を推計する必要があるが、ほとんどは燃料消費量や工業生産量、自動車走行量、人口、就業者人口などの活動量に排出係数（排出原単位、発生源種類毎の単位活動量あたりの汚染物質の平均排出量）を乗じることにより算出される。現在日本で唯一大気モデルの入力用として整備されたものに、JATOP インベントリ（JEI-DB）がある。排出インベントリには、発生源カテゴリで 110 程度、対象物質は PM、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、CO、NMVOC、NH<sub>3</sub> などがあり、個別成分の排出量だけでなく、VOC 組成や PM 組成・粒径区分も発生源別にデータ整備が必要となる<sup>6)</sup>。排出インベントリに関する研究の課題としては、排出量を求めるための測定法の整備、発生源から排出される過程、排出インベントリのための統計値の確保、オフィスビルのような業務部門や家庭などの民生部門からの排出量の把握、船舶や農業（主に NH<sub>3</sub>、暖房用ボイラ）など推計方法のモデル化、農作物や草類などからの VOC 排出量などの課題がある。

- 大気モデル開発

大気汚染分野で主に利用されている大気モデルはレセプターモデル（観測地点モデル）とシミュレーションモデル（化学輸送モデル）である。

レセプターモデルは観測された濃度をもとに、その観測地点における発生源別の寄与濃度を統計的に推計するもので、統計モデルの一種と考えることができる。粒子状物質や VOC などの発生源解析に使用されており、代表例として CMB (Chemical Mass Balance) や PMF (Positive Matrix Factorization) があげられる。CMB モデルは観測された成分濃度から、想定される発生源の成分濃度パターン（発生源プロファイル）を用いた重回帰式より、それぞれの発生源の寄与濃度を計算するものである。現在、日本で使われている発生源プロファイルは、土壌性粒子、海塩粒子、鉄鋼工業、石油燃焼、廃棄物焼却、自動車排気、ブレーキ粉塵などがあるが、測定されたのが 2000 年以前のもので多く、排気対策が進んできた状況を踏まえた新しいプロファイルへの更新が課題である。石油燃焼など大気汚染対策を想定すると発生源が特定できないプロファイルもあり、プロファイルそのものの整備も課題である。PMF モデルは多数の成分測定データをいくつかの因子を想定して多重回帰式より因子毎の成分プロファイルを求め、各因子プロファイルに近い発生源の寄与度を見積もるものである。観測結果の精度などにより計算上求められる因子数が限定されることや得られた因子と発生源を想定することが解析者の判断に依存するところが PMF モデルの課題である。解析手法の確立が求められている。

シミュレーションモデルには、一般に、解析解モデルと数値解モデルの 2 つのタイプがある。解析解モデルは、風向・風速は一定とするなどの仮定により解析解が得られるところまで簡略化した定常モデルであり、プルームモデルとパフモデルが代表的である。数値解モデルは、汚染物質の輸送過程を記述する基礎方程式（物質輸送方程式や拡散方程式、物質収支式などと呼ばれる）を解いて大気汚染濃度を計算する物質輸送モデルの基礎方程式に化学反応項を付加することにより、化学反応過程も考慮できるようにした非定常モデ

ルである。大気環境行政や発電所や工場の新設などの際の環境アセスメント等の実務で用いられるのは、ほとんどの場合がプルーム・パフ式を基本とした解析解モデルであり、数値解モデルが用いられることは稀である。解析解モデルは構造が簡単で分かりやすく計算時間や計算容量が少ないこと、長年にわたる運用実績があり一定の信頼性が担保されていること、現在の環境アセスメントに必要な項目は解析解モデルで得られる結果で間に合うことが多いこと、解析解モデルをベースとした評価ツール(日本の METI-LIS、ADMER、米国の AERMOD 等)が供給されていること等が理由である。ただし、解析解モデルは、現象を簡略化する様々な仮定のもとで成立するモデルであるため、複雑な気流場での現象、非定常現象、複雑な化学反応・沈着過程を伴う現象等に対しては基本的に適用できない。

一方、数値解モデルは、構造が複雑であり多くの計算時間と計算容量が必要であるが、上記で示したような解析解モデルでは考慮できない複雑な現象に対応することができる。米国の CMAQ (Community Multiscale Air Quality) と全球スケールの GEOS-Chem がよく使われている。数値解モデルでは、気象データと排出量データを入力として、移流、拡散、沈着、光化学反応、粒子化などの各過程の各格子における汚染物質濃度の時系列変化を計算するものである。光化学反応については大気中に存在するあらゆる物質と反応をモデルで明示的に表現するのは困難なため、物質と反応を集約的に表現する化学反応メカニズムが組み込まれている。これらの数値解モデルの多くは研究用であり、複雑な構造のモデルのため、運用にあたってはどうしても専門的な知識を要する。また各モデルはそれぞれ独自に信頼性の検証が行われているが、各モデル間の推定結果にはバラツキが見られる。このような理由から、行政目的などでの実務利用はあまり進んでいないが、現在の大気汚染問題では、光化学オキシダントや PM2.5 など数値解モデルが必要とされる場面が多いため、信頼性の向上と利便性の向上を行うことにより、実務での利用を促進する必要がある。

- 大気モデルによる将来予測・感度解析

大気汚染対策の効果等を予測するために大気モデルを用いた将来予測・感度解析が重要になる。将来予測の推計手法としては、基準年の気象場を気象モデルで計算し、基準年の排出量データを将来シナリオにしたがって変化させることで大気汚染物質の濃度を推計する。また感度解析では発生源の寄与度をモデルにより解析する方法であり、各種の原因物質の寄与度がモデル上で推定できる。なお大気モデルを使った大気汚染対策を進めるためには、将来推計の手法を統一化することが課題である<sup>1)</sup>。

### (3) 注目動向

#### [新たな技術動向]

- 衛星観測データを使った排出インベントリの整備が世界的に進んできているが、データの解像度が粗く日本ではそうした取り組みはいまだない。衛星観測データの地表面の大気汚染物質濃度の精度など解決すべき課題はあるが、観測点を多く設定できない地域の排出量の把握には有望である。
- 米国環境保護庁 (EPA) では環境問題・対策がより複雑化してきたことを受けて、2011年に分野構成の見直しを行い、大気研究については、大気・気候変動・エネルギーを統合さ

せた分野として取り扱っている。また共同研究として気候変動、土地利用、大気質、水質、経済の総合作用を考慮した“**One environment**”モデルの開発にも取り組んでいる<sup>7)</sup>。

- 中国からの黄砂中には微生物あるいは生物に由来する有機物でできた粒子、バイオエアロゾルが存在しており注目されている。これらが暴露されると、より炎症が進みやすく細胞へのダメージが大きいとされている<sup>8)</sup>。
- 石綿（アスベスト）やナノ粒子のように形状やサイズに起因した人への有害性が問題となる物質による大気汚染も注目されている。これらは当初は室内環境での暴露が問題であったが、大気汚染においても社会的な問題になっている。2005年に石綿含有製品を過去に生産していた工場近辺における住民の健康被害が明らかになった。ナノ粒子は細気管支を通り抜け肺胞に達し血液に移行するため、呼吸器系のほか、循環器系への影響も懸念されている。もっとも、カーボンナノチューブ（CNT）のような新素材のナノ物質のリスクが注目されているが、ナノ粒子自体は、自然界にも多く存在しており、燃焼等による人為起源も含め、昔から環境中に存在しているものである。

[注目すべきプロジェクト]

- タイヤ・ブレーキの摩耗粉塵の研究

排出ガスからのPM2.5が低減されるに伴い、相対的に排出ガス以外のPM2.5が欧州を中心に着目されて始めた。欧州のPMP (Particle Measurement Programme) ではタイヤ・ブレーキの摩耗粉塵の計測法の検討も始まった<sup>9)10)</sup>。並行して日本でも計測法や排出係数の研究が始まった<sup>11)13)</sup>。

- 粒子数濃度の研究

欧州の粒子数規制の導入に伴い、大気汚染物質としての粒子数濃度の将来予測<sup>14)</sup>や粒子数濃度の健康影響評価のための疫学研究が注目される。またガソリン直噴エンジンの排気粒子数濃度も注目されている。23nm以下の超微小粒子を含めた粒子数濃度の計測法の研究も盛んになっていきている。

計測法では、半揮発性粒子をどう計測していくか等が注目される課題である

- 短寿命気候汚染物質 (SLCPs : Short-Lived Climate Pollutants)<sup>14)</sup>

SLCPsとは、大気中での化学的な寿命が数日から数十年程度と比較的短く、気候を温暖化する作用をもつ物質である。具体的にはメタン、対流圏のオゾン、ブラックカーボン (BC : 化石燃料やバイオマスを燃焼させた時に発生する黒色炭素粒子) の3物質である。

SLCPsについては、環境省環境研究総合推進費 S-12「SLCPの環境影響評価と削減パスの探索による気候変動対策の推進」でも研究開発が実施されている。

SLCPsの概念そのものは日が浅いため確固たるものではないが、開発途上国におけるブラックカーボン排出抑止策などで今後注目される可能性がある。ローカルな大気汚染と地球環境の両面に関わる物質であるため、その削減には身近な健康影響の低減にも結びつくという点で、省エネルギーなど生活レベルの低下につながる可能性のあるCO<sub>2</sub>対策に比較して、一般市民からの協力が得られやすいのではないかという観点から注目されている。

#### （４）科学技術的課題

##### [課題（ボトルネック）]

- 大気観測による汚染物質の動態研究
  - PM2.5の動態を把握する研究の課題
    - CMB（Chemical Mass Balance）法に使う発生源プロファイルデータが限られ古い。発生源の種類も限定的。
    - 近年の大気中PM2.5濃度が小さいため、高分解能の計測器の開発が求められる。
    - 二次粒子の発生源を特定するためには、時間分解能の高い計測器も求められる。
  - 光化学オキシダントの動態を把握する研究の課題
    - VOC排出量の実態把握が困難であるため、測定法の確立が求められる。
- 大気モデル研究
  - 排出インベントリに関する研究の課題
    - 国としての排出インベントリ（ナショナルインベントリ）の整備。すべての発生源で排出量を求めるための測定法の整備。発生源から排出される過程の解明。
    - 煙突から大気に放出される際のVOC凝縮過程の解明。日本ではその研究がほとんど実施されていない。大規模煙源を模擬した実験炉がなく、発生源の企業協力体制がない。
    - 道路交通センサス一般交通量調査と自動車燃料消費統計の走行量の統計調査において、年度により調査項目やデータが変更される。排出インベントリのための統計値の確保や、大規模なプローブデータ等のビッグデータ活用。
    - オフィスビルのような業務部門や家庭など民生部門からの排出量の正確な把握。
    - 船舶や農業（主にNH<sub>3</sub>、暖房用ボイラー）などの推計方法のモデル化の研究が進んでいない。
    - 日本独自の植生を考慮する植物起源VOCの推計モデルがいまだ研究開発されていない。
  - 地域スケールの大気モデル（CMAQ）の研究の課題
    - PM2.5に関してはサルフェート成分の過少、ナイトレート成分の過大、有機二次粒子（SOA：Secondary Organic Aerosol）の過少等の再現性。
    - O<sub>x</sub>に関しては、経年変動を含む長期的変動や日内変動、長期間の低～高パーセントイル値の再現性。
    - VOCの成分濃度や全NMHC（非メタン炭化水素）濃度の再現は極めて不十分である。
    - 二次生成機構解明に関する実験・観測・モデル研究の統合的推進と二次有機粒子モデルの開発を同時に進めることが求められる。
    - O<sub>x</sub>については、排出インベントリの改良、未把握VOCの把握、NMHC測定濃度の解析、VOC成分の多地点連続測定が求められる。
    - 大気モデルの再現性検証に使える大気汚染物質の時系列の観測データが少ない。
- 大気汚染分野の研究における体制面での課題
  - インベントリ・シミュレーション精度向上を継続的に研究する仕組み構築。
  - 大気汚染分野の研究者の慢性的な不足。

[今後取り組むべき研究テーマ]

- 大気モデル
  - インベントリ整備
    - 固定発生源からの PM2.5 などの大気汚染物質の測定法の研究；最優先の研究課題としては煙源の凝縮性粒子評価法の研究
    - 大気放出を想定した固定発生源・移動発生源の排出インベントリの整備・更新体制の構築
    - 蒸発起源 VOC の測定法の研究
    - 排出インベントリのための活動量の抽出手法と統計データの収集に関する研究統計法との関連や GHG インベントリなどと連携を含めた枠組み構築
  - 大気モデル開発
    - 粒子成分の再現性向上のための研究；VBS 法、チャンバー実験による粒子収率の整備、NH<sub>3</sub> の発生動態の解明など
    - VOC 再現性向上のための研究；植物起源 VOC の排出予測法、VOC 成分の蒸発性の解明など
    - レセプターモデルのための発生源プロファイルの研究：粒子成分や VOC 成分プロファイルの最新データの収集・整備
    - 大陸～地域～都市～街区～沿道～室内環境など異なる空間スケールの現象を統一的に把握評価出来るモデルシステムの構築
    - 粒径別の粒子個数や化学組成の予測モデルの構築
    - 不断のモニタリングデータおよび集中観測データによるモデルの検証と改善
- SLCPs に関する知見の集積・整備
- ナノ粒子のような形状やサイズが問題となる物質の環境中動態、人や生態系への暴露とリスクの評価手法開発
- 水銀、POPs など環境中に長期間存在する物質の環境中動態、人や生態系への暴露とリスクの評価手法開発

(5) 政策的課題

- モデルとデータベースの継続的な運用・サポート体制が不十分である。
- PM2.5 については越境汚染の課題もあり、中国等の東アジア地域における大気汚染対策を推進するための技術協力に、さらに取り組むことが求められる。
- ナノ粒子については、新規に開発が進められている高機能材料の普及の阻害要因とならないため、大気環境を経由した人への暴露についても、政策的な取り組みが要請される。
- 水銀、POPs については、条約への対応として取り組むことが求められる。

(6) キーワード

SO<sub>2</sub>、CO、SPM、NO<sub>2</sub>、光化学オキシダント、PM2.5、粒子数、タイヤ・ブレーキ、疫学知見充実、リアル・リアルワールドエミッション、ビックデータ活用、アジア諸国での大気改善、SLCPs、ナノ粒子、重金属、水銀、POPs

（7）国際比較表

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>● インベントリ整備に使う固定発生源の測定法の研究者がほとんどいない。研究のための実験設備や協力体制がほとんどない。行政を含めた体制作りから始める必要がある。</li> <li>● 科研費、環境省推進費などの公的資金を原資として、大気汚染に関連する多様な研究が行われており、研究レベルは高い。ただし、同分野の論文数、大気モデル開発の独自性などの点からみると、欧米の大学や研究機関と比較して層が薄いことは否めない。</li> <li>● 日本の大気汚染状況は従来と比べてかなり改善してきていることもあり、研究費や研究者の数は減少傾向にある。研究者はリスク評価や放射性物質など他の分野の研究にシフトしている。</li> <li>● 大気汚染の分析や発生の機構に関する基礎的な研究は十分発展している。エアロゾルの物理や工学については十分といえるが化学についてはまだ不十分<sup>15)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 米国大気モデルを使い、日本にない排出係数を文献データから作成した排出インベントリを使い、日本用に構築した研究が進んできた。</li> <li>● ADMER や METI-LIS のような実務で使えるツールが開発、公開され、行政機関や企業などで広く活用されている。ただし、ツールについては米国と比べると少ない。</li> <li>● オリジナルなモデル開発は少なく、米国を中心とした海外製モデルを用いた適用研究が中心である。</li> <li>● モニタリング技術、分析技術、排出削減技術などは、企業が積極的に開発を行っている。</li> <li>● モニタリングや対策技術は、国内より途上国が大きな市場となるだろう。</li> <li>● 大気汚染対策技術などは十分に発展している。しかし測定技術などは新たなものを開発する力が十分とはいえず、外国のものに頼っている面がある。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 環境保護庁（EPA）は反応モデルの基礎研究からインベントリ測定法の改良研究まで独自の研究者を擁して研究を進めている。</li> <li>● 研究者の層、研究費の額、研究レベルともに、圧倒的に優位である。</li> <li>● EPA、海洋大気局（NOAA）、エネルギー省（DOE）などの政府系研究機関、大学、州政府など様々なところで大気汚染の研究が進められている。EPA とカリフォルニア州が伝統的に強い。</li> <li>● 米国においても国内の大気汚染状況はよくなってきていることもあり、他の分野や途上国の研究にシフトしている。</li> <li>● あらゆる面で先進的に研究が進められている。エアロゾルの物理化学が応用研究だけではなく基礎研究として進められている点に注目すべきである<sup>16)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 行政的に SIP（州の大気改善政策）の策定には大気モデルでの評価結果が必要な体制が整備されている。</li> <li>● CMAQ（大気モデル）や NEI（国の排出インベントリ）を定期的に更新する枠組みが出来ている。</li> <li>● 民間の研究機関でも大気モデルを使った研究が出来ている。</li> <li>● モデル開発とツール化などソフトウェア研究の分野は、特に圧倒的に優位である。CMAQ 等様々なモデルが無償で公開され、世界中で利用されている<sup>17)</sup>。</li> <li>● サンプルングや分析技術についても、最先端の研究が行われている。</li> <li>● 政府系研究機関や大学からスピンアウトしたコンサルティング企業が、政府からモデル開発や環境影響評価を請け負って実施している。</li> <li>● 対策技術は特に群を抜いているという感じはしないが、測定技術開発などは常にトップを走るケースが多い。大学と民間の結びつきが強いことが推察される。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● UFP（超微小粒子、50nm以下の粒子）の生成メカニズム、粒子数に関わる研究（含むインベントリ）などの基礎研究は充実している。しかし、米国ほど広範囲な研究は実施されていない。</li> <li>● 伝統的に環境問題に取り組むことに熱心な国が多く、研究者の層、研究費の額、研究レベルともに、米国には及ばないが高い水準にある。</li> <li>● 大気汚染の状況は国によってかなり異なる。北欧、オランダ、英国では、以前から大気モデル開発の研究が行われており、研究レベルが高い。東欧や南欧では、まだまだ大気汚染が酷い都市があるため、モニタリングを中心とした研究が多く行われている。</li> </ul>

	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 大気環境基準達成に向けて、大気動態の観測解析や大気モデルを使った大気質評価が実施されている。</li> <li>● 大気拡散モデルのツール化では、オランダ国立公衆衛生環境研究所（RIVM）、オーストリアの国際応用システム分析研究所（IIASA）などが有名である。</li> <li>● 多くの国が隣接しているため、国境を超えた越境汚染について敏感である。越境汚染については、The European Monitoring and Evaluation Programme（EMEP）を中心として、様々な研究が進められている。研究の深度はバラツキがあるが平均点としては高いといえる。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 中国環境科学研究院、大学、各省の研究機関などで、積極的に取り組まれている。</li> <li>● 大気汚染問題が深刻であるため、近年、同分野の研究には、予算と人員はある程度割いているようである。</li> <li>● 欧米諸国や日本に留学した研究者が帰国し、研究と教育に従事している。研究レベルには幅があるが、高くなってきている。</li> <li>● 表論文数は非常に増えているが、解析内容が不十分に感じる。研究予算が飛躍的に伸びているようなので、今後の発展が注目される<sup>18)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PM2.5のモニタリング調査のような事例研究は、多く行われている。</li> <li>● 大気モデルについては、独自のモデル開発はあまり行われず、CMAQやWRFのような米国を中心とした海外製モデルを用いた適用研究が中心である。</li> <li>● モニタリングやシミュレーションは行われているが、実際の環境政策に生かされている例は少ないと思われる。</li> <li>● モニタリング技術や測定機器、排出防止対策技術などは、欧米や日本からの輸入が多いと思われる。</li> <li>● 新型の測定機器類の導入がめざましい。今後の応用への展開が期待される。2017年からEURO6に相当する規制を開始することになっているが技術的にそれに追いつけるのかは未知数<sup>19)</sup>。</li> </ul>
韓国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 大気汚染は改善されつつあるものの、都市部ではまだ問題であるため、大学や行政機関などで研究が行われている。</li> <li>● 中国と同様に、欧米諸国や日本に留学した研究者が帰国し、研究と教育に従事している。研究レベルには幅があるが、高くなってきている。</li> <li>● 以前はモニタリングをベースとした研究が多くを占めていたが、近年はモデルによるシミュレーション研究も多くなってきている。着実に研究を進めているが、広がりが少ない印象。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 大気モデルについては、独自のモデル開発はあまり行われず、CMAQやWRFのような米国を中心とした海外製モデルを用いた適用研究が中心である。</li> <li>● モニタリング技術や測定機器、排出防止対策技術などは、欧米や日本からの輸入が多いと思われる。</li> <li>● SO<sub>2</sub>の削減が短期間で強力に進められたことから、技術的裏付けがあることが推察される。</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

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

### (8) 参考資料（●は全体的に参考とした文献）

- 水・大気環境行政のご案内 ―日本の公害克服経験― 環境省水・大気環境局

[https://www.env.go.jp/air/air\\_pamph/air\\_pamph01.pdf](https://www.env.go.jp/air/air_pamph/air_pamph01.pdf)

- 環境省 HP (大気環境・自動車対策) <https://www.env.go.jp/seisaku/list/air.html>

- 1) 石油エネルギー技術センター JATOPII 成果発表会  
[http://www.pecj.or.jp/japanese/jcap/jatop2/index\\_jatop2\\_01.html](http://www.pecj.or.jp/japanese/jcap/jatop2/index_jatop2_01.html)
- 2) 国際環境経済研究所 ゼロからわかる PM2.5 のはなし  
<http://ieei.or.jp/category/special201307/>
- 3) 東京都環境局「ディーゼル車走行規制」の開始にあたって  
<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/vehicle/attachement/all.pdf>
- 4) 自動車工業会 微小粒子状物質 SPM から PM2.5 へ  
<http://www.jama.or.jp/eco/PM25/pdf/PM25.pdf>
- 5) 板野泰之(2006) 都市大気における光化学オキシダント問題の新展開
- 6) 大気環境学会関東支部講演会 大気汚染モデルの現状と課題
- 7) Science for a Sustainable Future (EPA Research program overview 2012-2016)  
<https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/strap-overview.pdf>
- 8) JST CRDS 俯瞰ワークショップ報告書 平成 27 年度環境科学技術分野 最新研究開発動向  
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/WR/CRDS-FY2015-WR-13.pdf>
- 9) UNECE ; Working Party on Pollution and Energy (GRPE) /Particle Measurement Programme (PMP) <https://www2.unece.org/wiki/pages/viewpage.action?pageId=2523173>
- 10) Hugo A.C.Denier van der Gon, et al, The Policy Relevance of Wear Emission from Road Transport, Now and in Future-An International Workshop Report and Consensus Statement Hagino, H., Oyama, M., Sasaki, S.: Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles, Atmospheric Environment, 131, 269-278 (2016)  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135223101630125X>
- 11) Hagino, H., Oyama, M., Sasaki, S.: Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles, Atmospheric Environment, 131, 269-278 (2016)  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135223101630125X>
- 12) Hagino, H., Oyama, M., Sasaki, S.: Airborne brake wear particle emission due to braking and accelerating, Wear, 334, 44-48 (2015)  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164815002100>
- 13) Y.Tonegawa, T. Fujikawa, S. Sasaki, Development of Tire Dust Emission Measurement for Passenger Vehicle, 19th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles(2015)  
[http://www.nanoparticles.ch/2015\\_ETH-NPC-19/Poster/44\\_Tonegawa.pdf](http://www.nanoparticles.ch/2015_ETH-NPC-19/Poster/44_Tonegawa.pdf)
- 14) L. Ahlm, et al, Particle number concentrations over Europe in 2030: the role of emissions and new particle formation, Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 10271-10283.
- 15) エアロゾル研究 Vol. 29 (2014) No. S1 (特別号)  
[https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jar/29/S1/\\_contents/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jar/29/S1/_contents/-char/ja/)
- 16) Pacifichem 2015, Symposium #56: Chemistry of Atmospheric Aerosols
- 17) 米国環境保護庁 (EPA) , Models, Tools and Databases for Air Research  
<https://www.epa.gov/air-research/models-tools-and-databases-air-research>
- 18) Chan and Yao, Atmospheric Environment 42 (2008) 1-42., Lu et al., Atmos. Chem. Phys., 10, 6311-6331, 2010.
- 19) 日本経済新聞, 「中国、欧州並みの排ガス規制 汚染物質 5 割削減 17 年から前倒し導入」 2016 年 4 月 24 日 [http://www.nikkei.com/article/DGXLASGM23H4D\\_T20C16A4FF8000/](http://www.nikkei.com/article/DGXLASGM23H4D_T20C16A4FF8000/)

### 3.2.2 水質汚染

#### （1）研究開発領域の簡潔な説明

水質汚染は、人間活動由来または自然由来の汚染物質などが、河川や港湾などの都市水域や湖沼、海洋に排出され、健康被害や環境被害などをもたらす事象である。ここでは、水域における汚染物質の観測・計測と予測・評価、ならびに排出源特定と浄化・回復技術を対象とする。（水処理等については研究開発領域「3.4.1 水循環」で扱う。）

#### （2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

##### [意義]

日本では、高度経済成長によって水質汚濁の問題が顕在化した。水質汚濁防止法に基づく対策によって、河川における水質は大きく改善された。しかし、汚染物質が蓄積・滞留しやすい湖沼では、富栄養化現象による着臭やマイクロキスチンなど藻類産生毒物による水道水質問題が現在もあり、海城内湾では、底層に無酸素水塊が広がり、それにとまなう漁業被害も報告されている。また、医薬品および日用品等由来化学物質（PPCPs: Pharmaceuticals and Personal Care Products）やマイクロプラスチック（5mm以下のプラスチック）など、新規汚染物質への懸念が国際的に高まっている。陸域からの化学物質の排出は、水生生物の内分泌かく乱を誘引するなど、水域生態系への懸念が指摘されている。マイクロプラスチックとそれに含まれる有害化学物質による水環境の汚染とその影響の把握は、生物多様性と食の安全性という点で国際的にも重要視されている課題である。こうした広域的かつ新たな環境汚染物質の出現により、水質汚染は複合的な汚染現象へと変化している。また、人間活動の多様化や生産活動の高度化等に伴い、水域環境へのインパクトも変貌しつつある。気候変動への対応や生態系の保全、国際連携等の様々な取り組みとも関連した、現状の把握と対策が求められている。

##### [動向（歴史）]

水質に関する初期の取り組みとして公衆衛生があげられる。1890年に明治政府はコレラなどの伝染病対策の一環として水道条例を制定し、1900年に下水道法を制定した。戦後の復興とともに、産業活動により排出された重金属による公害が問題となった。こうした問題に対処するため、1967年に公害対策基本法が制定され、1970年の公害国会で可決成立した水質汚濁防止法に基づき、排水基準が定められ、水環境保全施策が進められた。また、生活排水対策として、下水道や浄化槽の普及が進められた。現在では河川水質は代表的河川汚濁指標である生物化学的酸素要求量（BOD: Biochemical oxygen demand）で見る限りは、1960年以前の工業化や都市化が進む前の状況にまで、大きく回復した。

富栄養化が懸念される湖沼では窒素規制およびリン規制が実施され、さらに湖沼水質保全特別措置法によって水質改善が図られた。しかし、湖沼や閉鎖海域には現在も貧酸素水塊が広がる場所があり、また、異常に増殖するシアノバクテリアによって臭気物質や毒素が産生される問題がある。

有機物、溶存酸素、重金属や窒素・リンなどは古典的な汚染物質ということができるが、

様々な化学物質による汚染が社会問題となってきた。PCBs や DDTs、ダイオキシン類、有機スズ化合物、内分泌かく乱物質、近年では臭素系難燃剤、有機フッ素化合物、医薬品および日用品等由来化学物質 (PPCPs)、ナノ物質などがあげられる。最近では、微小なプラスチック粒子であるマイクロプラスチックによる海洋汚染、ヒ素などの自然由来物質による飲料水汚染も国際的に関心が高まっている (自然由来物質による地下水汚染は「土壌・地下水汚染」領域で扱う)。こうした物質群の処理の面からの技術開発が進められると同時に、これらの物質の分析技術の開発、環境動態や毒性の把握の努力が続けられている。さらにはこうした物質の特性をマーカーとして利用した排出源特定の技術も開発されている。

水質汚濁を測定するための機器については、ガスクロマトグラフ/高分解能質量分析計 (GC/HRMS) などがダイオキシンなどの分析に用いられ、医薬品などの測定には、高速液体クロマトグラフ/タンデム質量分析 (LC/MS/MS) などの技術が汎用されるようになった。また、従来指標の分析においても、例えば、溶存酸素計が従来の隔膜式に加えて、光学式が開発されるなど、より安定的に測定できる方法が開発されてきており、現場測定においても、水質を常時モニターし、データを蓄積あるいは携帯電話回線で送信する機器が開発されてきた。人工衛星からの光合成速度の推定などを行うリモートセンシング技術も進展した。

水質を原位置で浄化する技術として、水生植物の定着による水質浄化や、曝気による貧酸素水塊の解消技術などが開発、実証されてきた。また、水質変化と流体モデルを組み合わせた生態系モデルがさまざまな水圏に適用され、水質汚濁のメカニズムの解明や対策効果の推定に用いられてきた。

汚水と雨水を同一の管で排除する合流式下水道によって日本の大都市の下水道は整備されてきたが、処理場で処理できる下水量には限度があるため、雨天時に未処理のまま下水が水域へ放流される越流水問題 (CSO : Combined Sewer Overflow) があり、病原微生物リスクなどが懸念され、その実態の把握や評価が課題とされている。

2010 年以降世界的に問題となっているマイクロプラスチックに関しては、1972 年に海洋のプラスチック汚染の報告があり、1973 年に生物によるプラスチックの取込が<sup>2)</sup>初めて報告された。その後、先駆的な研究者により継続して報告されてきたが<sup>3)-9)</sup>、20 世紀後半の研究はまだ限定的なものであった。21 世紀に入り、海洋プラスチックが有害化学物質の海洋生態系での運び屋になることが明らかになってきた点<sup>10)-13)</sup>、微細なプラスチックが海洋表層水中を漂い外洋の環流 (Gyre) に集積し (いわゆるプラスチックスープの海)<sup>14)</sup>、さらには生態系に侵入する可能性が示された<sup>15)16)</sup>点の 2 つの面で新たな展開を迎えた<sup>17)</sup>。この頃から関連の研究者の関心が高くなり、2009 年以降このテーマの論文は年間 5 報以上出るようになり、論文数は急激に増加している。欧米の政策立案者もマイクロプラスチックには大きな関心を寄せはじめ、2010 年 7 月にパリで UNESCO-IOC (ユネスコ政府間海洋学委員会) の主催で国際ワークショップが開催され、結果が国連の海洋環境保護の科学的事項に関する専門家会合グループ (GESAMP) のレポートとして出版された<sup>18)</sup>。GESAMP は第 1 次のアセスメント<sup>19)</sup>を 2015 年に報告し、第二次のアセスメントも本年報告予定である。

海洋環境中で観測されるマイクロプラスチックの起源は一次マイクロプラスチックと二次マイクロプラスチックに大別される。一次マイクロプラスチックは、もともと 5mm 以下の粒子状に製造されたプラスチック粒で、レジンペレット、また、洗顔料、化粧品、などに含まれるマイクロビーズ (プラスチック製スクラブ ; 主にポリエチレン製) も含まれる。使用

後のマイクロビーズは家庭排水として下水処理場へ運ばれるが、下水処理場での観測から一次処理と二次処理を経ることにより 99%以上除去されることが報告されている<sup>20)21)</sup>。しかし、合流式の下水処理区では雨天時に家庭排水が下水処理場へ運ばれず雨水とともに放流され海へ運ばれると考えられるが<sup>22)</sup>、雨天時越流水自体の実態把握が遅れており、公共用水域へ放出されるマイクロビーズの量は定量的に把握されてない。

二次マイクロプラスチックは、使用後に海洋へ流入したプラスチック製品が紫外線、熱、風波などの物理的な力により破砕、細片化したものである。破片となっている製品の特定、破片化速度など定量的な事項はほとんどわかっておらず、破片と製品を結びつける化学的アプローチの開発が求められている。また、合成繊維の服を洗濯した時に発生するポリエステルやアクリルの繊維も含まれ<sup>23)</sup>、化学繊維の寄与の特定も意識する必要がある。

マイクロプラスチックの生物への影響に関しては3つの側面から考えられている。プラスチック自体が物理的異物であることによる影響、酸化防止剤や難燃剤などの添加剤の影響、プラスチックに吸着した化学物質による影響である。物理的な影響について、大型生物では摂食したプラスチックの物理的な作用により生理学的な影響が観測されている<sup>24)</sup>。マイクロプラスチックの曝露による牡蠣の再生産能力の低下<sup>25)</sup>、淡水魚の卵の孵化率の低下<sup>26)</sup>、ワムシの抗酸化酵素の誘導<sup>27)</sup>などが報告されている。ナノサイズ (20nm) のプラスチックが細胞膜を通過して、生物組織へダメージを与えることも、室内実験のレベルであるが示唆されている<sup>28)</sup>。マイクロプラスチックの生物影響の室内実験結果の解釈の際には、プラスチック自体の粒子毒性とともに、添加剤やプラスチックを構成するモノマーやオリゴマーによる影響も考える必要がある。吸着している化学物質については室内実験で、化学物質を吸着させたマイクロプラスチックを魚やゴカイ<sup>29)30)</sup>に曝露すると、肝機能障害や腫瘍の生成などの影響がでることが報告されている (影響が観測されている室内実験におけるプラスチックチックの暴露量は環境中よりもかなり (一桁以上) 多い量である<sup>31)</sup>)。

日本最大の水質汚濁に関する学会である水環境学会について、2016年3月に開催された年会での水質汚濁に関連する研究発表を分析すると<sup>32)</sup>、溶存酸素や栄養塩などの古典的な汚染物質についての研究例は依然として多い。底層溶存酸素濃度が環境基準として新規に設定されたり、従来の除去を中心とした栄養塩管理から漁業振興のための栄養塩管理へ環境管理手法が変更されつつあるなど、古典的でありながら常に新しい話題がある。地域再生に関連した課題に関する研究も多くみられる。その他、農薬、医薬品および日用品等由来化学物質 (PPCPs)、1,4-ジオキサンのような産業関連の物質、ビスフェノール A などのプラスチックからの溶出物、地下水を中心とした塩素系揮発性有機化学物質、多環芳香族炭化水素 (PAH : Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)、ダイオキシン類などが研究対象物質である。こうした個別の有機化合物による水質汚濁問題に対して、分解生成物や分析法、環境中での挙動、地域の汚染状況を報告などの研究が行われている。重金属については自然由来のヒ素やマンガンなども含めて相当数の研究がある。2011年の原子力発電所の事故以来、放射性物質 (主としてセシウム) に関する研究も多い。また、分析法や固相抽出などの分析前処理法にかかわる研究もなされている。水環境における微生物に関連した研究はほとんどが大腸菌、腸球菌、腸管系ウイルスなど衛生指標に関するものであり、糞便指標としての有効性やウイルスの回収方法などの研究が見られる。また、バイオテクノロジーや高分解能質量分析器を用いた特定微生物の検出法についての発表や、貯水池の水環境に関連したシアノバクテリア関連の研

究も多く、臭気物質や毒素の産生の研究報告が多い。水生植物、水生昆虫や魚介類についての生態学的研究も多い。日本では、排水の毒性の管理手法として、ミジンコ、メダカ、緑藻の生物応答を用いた排水試験方法の導入を環境省が目指しており、それに関連した研究がかなりの数見られる。

世界最大の水環境に関する学会である国際水協会 (IWA) が 2 年に一度開催する World Water Congress and Exhibition における水質汚濁に関する発表テーマを見ると、2014 年会議でのセッション (口頭発表としておおむね 4 件以上ある話題) では、気候変動による水質への影響、湖沼や貯水池の水質管理、沿岸環境や井戸の塩水化、微生物のモニタリング手法、健康関連微生物指標、地下水汚染、環境中医薬品、マイクロプラスチック、シアノバクテリア、ナノ粒子である<sup>33)</sup>。2016 年会議では、病原性微生物、湖沼の汚染解析とシアノバクテリア、地下貯留や人工湿地による下水処理水再利用、医薬品などの微量物質、流域管理と気候変動対応であった<sup>34)</sup>。

### (3) 注目動向

#### [新たな技術動向]

- ダイオキシン類や臭素系難燃剤など GC/HRMS (ガスクロマトグラフ/高分解能質量分析) を用いた分析技術に加えて、LC/MS/MS (液体クロマトグラフ/タンデム質量分析) による環境汚染物質の分析技術の環境分析への適用例が大幅に増加した。このことにより、医薬品、洗剤、有機フッ素化合物 (PFOS、PFOA など) などを環境中に存在する低濃度まで LC/MS/MS によって分析することが可能になり、研究室や各種検査機関でルーチンで行うことのできる分析法として定着した。こうした微量物質の分析技術を適用し、様々な新興汚染物質の挙動研究がこれからも行われると考えられる。
- 環境中の遺伝子を混合状態のまま解析できるメタゲノム解析に基づいた環境解析技術が進展し、環境分野への適用例が増加するものと考えられる。バイオテクノロジーに加えて、ナノテクノロジー、質量分析技術を用いた病原微生物同定の新技術も進展している。硝化細菌など特定の機能をもつ細菌に注目し、属レベルで新しい微生物の発見や未知の代謝様式をもつ微生物が発見される可能性もある。
- 水質汚濁の現場計測では、光学式溶存酸素計など、より信頼性の高い測定技術が普及し、また、連続計測器のデータを携帯電話回線で転送するなど、情報関連技術と融合した計測手法も広範囲の現場調査に使用されるようになってきている。

#### [注目すべき国内外のプロジェクト]

- 医薬品および日用品等由来化学物質 (PPCPs) による汚染にスポットライトを当てたのは、EU による POSEIDON プログラム (2001-2004) が最初である<sup>35)</sup>。POSEIDON プログラムの後継プログラムのひとつとして、European Research Council は、Designing new technical wastewater treatment solutions targeted for organic micropollutant biodegradation, by understanding enzymatic pathways and assessing detoxification (ATHENE) という研究課題に対して 350 万ユーロ (2011-2017) を助成している<sup>36)</sup>。EU は環境中の医薬品問題に対して、問題の発見、現場調査、処理実態の解明の時期から、対

処技術の開発といった応用面や生物分解メカニズムの解明といった基礎科学の面まで、医薬品の環境影響について総合的、かつ、継続的に支援している。

- EUの Solutions は、ヨーロッパ、ブラジル、中国およびオーストラリアから 39 機関が参加するプロジェクトである。河川における有害化学物質を現在の科学技術を結集して評価し直すために、化学分析から影響分析にわたる広範な領域をカバーしている。ライン川やドナウ川流域の生態系と人の健康における化学物質リスクの問題解決のための総合的な取り組みとして 2013 年より（5 年計画）開始された<sup>37)</sup>。
- 北欧を中心とする MARS プロジェクトは、16 の河川流域のケーススタディによって各流域における生態系の状態と化学物質およびその他の抑圧因子の解明を目指している<sup>38)</sup>。
- 米国環境保護庁(EPA)は、Human and Ecological Health Impacts Associated with Water Reuse and Conservation Practices と題したプログラムで下水処理水などの再利用による健康や生態系影響の研究（2015-2018）に総額 330 万ドルを助成しており、医薬品などを含めた新興汚染物質の処理水灌漑植物への移行を調べるプログラムもその中に含まれている<sup>39)</sup>。
- 米国環境保護庁（EPA）は、先端的な課題だけでなく、水に関する総合的な課題や気候変動などの目的に対応した水管理について研究助成をしている。例えば、気候変動による水資源問題について、Systems-Based Strategies to Improve The Nation's Ability to Plan And Respond to Water Scarcity and Drought Due to Climate Change プログラムの中で飲料水の水質、湖沼の水質・生態系などに 2015-2018 に総額 510 万ドルを研究助成している<sup>39)</sup>。また、栄養塩の管理についての総合的研究拠点形成として Centers for Water Research on National Priorities Related to a Systems View of Nutrient Management と題して、880 万ドルを支出している（2013-2017）<sup>39)</sup>。
- ドイツ連邦教育研究省（BMBF）の提唱による欧州レベルの研究プログラム「海洋環境におけるマイクロプラスチック」が、欧州の共同研究イニシアチブ Healthy and Productive Seas and Oceans（JPI OCEANS）の枠組みの中で行われる。公募の合計助成額は 2018 年までに 700 万ユーロ強となる。マイクロプラスチックの分析および測定方法に関する統一的标准に関する作業をドイツのアルフレド・ヴェーゲナー研究所ヘルムホルツ極地海洋研究センターが統括し、ヘルムホルツ環境研究センターがプラスチック廃棄物の分散経路、分解および毒性等に関する研究を統括する。その他の海洋生物および生態系に対するマイクロプラスチックの環境毒性学的影響に関するテーマについてはスペインとノルウェーが主導する。4 件の研究アライアンスで合計 51 の欧州の研究所が関与し、2015 年末に作業を開始する予定である<sup>40)</sup>。

#### （４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

- 閉鎖性水域での栄養塩の管理などの問題は、古くから知られた問題だが、多方面からのアプローチが継続的に必要な課題である。例えば、従来は栄養塩の除去のみを目指していたが、現在では、漁業の振興の観点から、季節によっては栄養塩を積極的に水域に排出した方がよいという考え方も支持されはじめており<sup>41)</sup>、水環境の分野に加えて、水産漁業、政

策、水の流動シミュレーション、生態系モデルなど、多方面の研究者が共同で特定の地域の栄養塩管理の事例研究に取り組む意義は依然として大きい。

- マイクロプラスチックに関しては、微細マイクロプラスチックの定量法と生物影響があげられる。まず、海洋へ流入するプラスチックとその行方の定量的把握は極めて不十分である。その背景には、通常の計測下限である 300 $\mu\text{m}$  以下のマイクロプラスチック、ナノプラスチックの計測法が確立されていないことがある。ここがブレイクスルーされると物質収支・動的な理解が飛躍的に進む。生物影響については、対象生物、発現する影響の多様性に対して、この問題にとり組んでいる化学、生物、毒性学の研究者が圧倒的に少なく、マイクロプラスチックとそこに含まれている化学物質による生物影響の解明が遅れている。
- 欧州は基礎研究によって新しい問題を発見し、それに基づき EU 内で販売する商品に環境配慮を要求し、環境規制を先導してきた。世界的に問題が認知された場合、その問題を先行して研究対象としていたアドバンテージは極めて大きく、日本は欧米の後追い研究となっている点は否めない。
- 水質現象のなかには、化学工場や原子力発電所の事故、タンカーや製油所からの油の流出、2012年の利根川でのホルムアルデヒドによる取水停止など、突発的な事故で問題が露見することがある。欧州においても、米国においても、石油採掘や石油輸送事故による油汚染は重要な水質汚濁研究テーマであり<sup>34)</sup>、研究助成も行われている。

[今後取り組むべき研究テーマ]

- バイオテクノロジーやナノテクノロジーを用いた汚染物質や病原微生物の測定方法の開発が求められる。ナノテクノロジーを用いたデバイス、メタゲノム解析や質量分析による微生物同定など、分析機器の性能向上によりこれまでにない検出手法が一般化していく可能性が高く、こうした高度分析機器を用いた環境測定技術の開発を進める意義は大きい。また、検査培地や検査機器、分析前処理のための消耗品などの形で産業の新興につながる。
- 特定の閉鎖性水域での栄養塩の管理、貧酸素水塊などの問題を解決する事例研究が求められる。学問的に新味はないものではあるが、先端的な課題が水環境で重要な問題とは限らない。地域の環境を理解し再生することを、水環境、水理シミュレーション、水産漁業、環境政策などの多面的観点から研究するプロジェクトに対して、欧米諸国も継続的に支援している<sup>39)42)</sup>。
- マイクロプラスチックに関しては、1) マイクロプラスチックとそこに含まれる化学物質による生物影響の多角的な解明や、2) 破片化、微細化したマイクロプラスチックの起源となっている製品の推定・特定を行うための化学的手法の開発が求められる。さらに、3) ある特定の水域・流域について、プラスチック廃棄物量、水域への流入量、破片化・細片化速度、堆積速度などを実測・推定し、プラスチック廃棄物のマスバランスを求める研究も対策上重要な課題である。2)の化学的手法とマスバランス的手法の組み合わせが有効である。また、4) マイクロプラスチックが海底堆積物中に蓄積しているレガシー汚染物質 (PCBs のように過去に使用・放出された化学物質で都市沿岸堆積物に蓄積されているもの) の水中への再懸濁・再輸送、分配、拡散に寄与しているのではないかという視点がこれまでの評価で見落とされている。より広い生態系影響という視点でこのプロセスを学際的に評価することが要請される。最後に 5) プラスチック汚染の進行速度の解明があげられる。マ

マイクロプラスチックの測定が近年始まったため経時的な測定データは海水中に関しては存在しない。それに代わるものとして、柱状堆積物を用いた汚染史の復元手法が適用できる可能性がある<sup>43)</sup>。

#### （５）政策的課題

- 水域における栄養塩の管理や貧酸素水塊の問題に関しては、水環境の研究者にモデルシミュレーション、水産漁業、農業畜産業、環境政策などの分野が連携し、研究を推進する環境の整備が求められる。また、うなぎの生育できる水環境の創成といった目的先行型研究も望まれる。先端的な科学技術ではない分野であっても、長期的なモニタリングの継続が新たな実用的知見の蓄積に寄与するため、長期的モニタリングを可能とする資金や人材、観測基盤やデータベースの整備が求められる。
- 特定微生物や特定汚染物質の検出、検査機器、消耗品などは国際的に標準法として認められれば、産業的な意義の大きい分野であり、新規検出法や標準的な検査方法に関して、日本が国際的に主導権を確保するための研究が求められる。
- これまでの理化学指標に加えて、臭気、透明度などの感覚指標が今後、水環境の評価には重要となる可能性がある。「沿岸透明度」の目標設定には、水生植物の保全の観点と親水利用の場の保全が掲げられ、それぞれ対象水域での水生生物種とその生育環境、水域の利水状況と地域住民のニーズ等に配慮した設定が望ましいとしている<sup>44)</sup>。科学的評価として常にその基準の信頼性を担保するためのモニタリングが求められる。
- マイクロプラスチックに関しては、化粧品等に配合されているマイクロビーズなどの一次マイクロプラスチック、並びに環境中で劣化しやすいプラスチック製品や化学繊維に対して予防原則的な観点から規制を行うことが世界的に進んできており、日本でも予防原則的な対応が求められる。また、欧米を中心にプラスチック廃棄物対策との組み合わせでマイクロプラスチック対策が進められている。発生源特定により対策への貢献が可能になる。石油ベースのプラスチックの消費量自体を抑える対策やバイオマスベースの素材の開発と積極的な利用が望まれる。
- 健康関連では、国際的な取り組みに対して、応分の貢献を日本が進めることが望まれる。例えば、WHOの薬剤耐性菌の制御の取り組みに対して、医療、農業畜産業、環境を横断する総合的研究推進体制の構築が望まれる。

#### （６）キーワード

栄養塩管理、溶存酸素、重金属、窒素、リン、PCBs、DDTs、ダイオキシン類、有機フッ素化合物、医薬品および日用品等由来化学物質（PPCPs）、添加剤、マイクロ粒子、マイクロプラスチック、ナノ粒子、粒子毒性、病原微生物、薬剤耐性菌、低濃度分析、レガシー汚染

（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>● <b>Water Research</b> 論文掲載件数はこの5年間現状維持の状態である。生物応答を用いた水質評価技術などの研究が環境省の政策動向に関連し増加しているが、欧米の後追い研究である点是否めない。</li> <li>● マイクロプラスチック中の化学物質の測定やデータベースの構築という点では世界をリードしている。生物影響の研究も海鳥については世界的な水準であり、世界をリードする成果を上げてきている。海水中のマイクロプラスチック量の測定としては西部太平洋の汚染状況をはじめて明らかにしてきた。しかし、生物影響の研究者を中心に、全体に研究者層が薄く、研究が頭打ちになる可能性がある。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 地方大学や地方自治体の研究所の弱体化に伴い、地域の水環境問題への総合的アプローチが弱体化している。</li> <li>● マイクロプラスチックに関して、環境省が東アジアや東南アジアも巻き込んだ研究プロジェクトを開始した。民間部門や自治体等での研究開発の動きが出てきた。欧州に比べると遅れている。</li> </ul>
米国	基礎研究	○	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 病原性微生物や微量物質の分析法などで優位に研究が進められている。論文数からは、依然として研究大国であるが、<b>Water Research</b> 掲載論文数は徐々に減少している。</li> <li>● マイクロプラスチックに関して、多くの分野の研究者が参画し、研究を進めている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 天然ガスや石油採掘に伴う水環境汚染、地域の富栄養化問題への総合的対応、気候変動への水環境面からの対応など、目的を気候変動や資源採掘、地域環境の保全においた研究が行われている。</li> <li>● 海洋大気局（NOAA）、環境保護庁（EPA）、州の研究機関、NGOがプラスチック汚染低減のための研究を進めている。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 医薬品・日用品による水環境汚染など問題自体の発掘に積極的に関与してきた。農薬や硝化反応阻害物質、アナモックス細菌などの研究も盛んである。ナノテクノロジーを用いた病原微生物同定に関する研究をEUが後押ししている。<b>Water Research</b> 論文掲載数は増加傾向。</li> <li>● マイクロプラスチックに関して、多くの分野の研究者が参画し、研究を進めている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 環境ラベルによる環境性能主張などの制度を用いて、新興汚染物質への規制を実施し貿易管理に利用している。気候変動への対応、漁業資源や生態系の保全などを目的とした水環境研究も盛んである。</li> <li>● 各国の研究機関、政府、NGOがプラスチック汚染低減のための研究を進めている。</li> </ul>
中国	基礎研究	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 様々な環境分野の研究に後追いで参加しているため、論文数は多いがインパクトの高い研究は少ない。</li> <li>● 中国科学院、中国環境研究科学院がマイクロプラスチックを重点課題と位置づけ、いくつかの研究室で研究が開始された。日本の大学との共同研究も開始されようとしている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水環境の調査事例など旧来からの水環境研究の分野だけでなく、新興汚染物質に関連した比較的新しい分野の研究まで、発表論文数で日本はもちろん、米国よりも多くなっている。</li> <li>● 中国のマイクロプラスチック研究で使われている手法は基本的に他国でこれまで使われてきた手法である。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水環境に関する基礎研究は論文掲載数などで見る限り、低下している。薬剤耐性菌の検討など、分野を限ると、ある程度の研究蓄積が見られる。</li> <li>● 韓国政府がマイクロプラスチックを重点課題と位置づけ韓国海洋科学技術院（KIOST）を中心に研究を推進している。これまでも、世界のマイクロプラスチック研究に貢献している。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水ビジネスへの参画が見られ、雨水利用による水資源の獲得などの分野で研究が行われている。</li> <li>● NGOと連携しプラスチック汚染低減のための対策を進めている。</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

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている  
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑: 上昇傾向、 →: 現状維持、 ↓: 下降傾向

## (8) 参考文献

- 1) Carpenter, E. J.; Smith, K. L. J., Plastics on the Sargasso Sea Surface. *Science* **1972**, *175*, 1240-1241.
- 2) Rothstein, S. I., Plastic particle pollution of the surface of the Atlantic Ocean: evidence from a seabird. *Condor* **1973**, *75*, (344), 5.
- 3) Colton, J. B.; Knapp, F. D.; Burns, B. R., Plastic particles in surface waters of the north-western Atlantic. *Science* **1974**, *185*, (4150), 491-497.
- 4) Morris, R. J., Plastic debris in the surface waters of the South Atlantic. *Mar. Pollut. Bull.* **1980**, *11*, (6), 164-166.
- 5) Ryan, P. G., The characteristics and distribution of plastic particles at the sea-surface off the southwestern Cape Province, South Africa. *Marine Environmental Research* **1988**, *25*, (4), 249-273.
- 6) Day, R. H.; Shaw, D. G.; Ignell, S. E. *The Quantitative Distribution and Characteristics of Marine Debris in The North Pacific Ocean, 1984-88*, Hawaii, 1990.
- 7) Ryan, P. G., The effects of ingested plastic on seabirds: correlations between plastic load and body condition. *Environ. Pollut.* **1987**, *46*, (2), 119-25.
- 8) Ogi, H. *Ingestion of plastic particles by sooty and short-tailed shearwater in the north pacific*; Hawaii, 1990.
- 9) Day, R. H.; Wehle, D. H.; Coleman, F. C. In *Ingestion of plastic pollutants by marine birds*, Proceedings of the workshop on the fate and impact of marine debris, 1985; 1985; pp 344-386.
- 10) Mato, Y.; Isobe, T.; Takada, H.; Kanehiro, H.; Ohtake, C.; Kaminuma, T., Plastic Resin Pellets as a Transport Medium for Toxic Chemicals in the Marine Environment. *Environ. Sci. Technol.* **2001**, *35*, (2), 318-324.
- 11) Takada, H., Call for pellets! International Pellet Watch Global Monitoring of POPs using beached plastic resin pellets. *Mar. Pollut. Bull.* **2006**, *52*, (12), 1547-1548.
- 12) Ogata, Y.; Takada, H.; Mizukawa, K.; Hirai, H.; Iwasa, S.; Endo, S.; Mato, Y.; Saha, M.; Okuda, K.; Nakashima, A.; Murakami, M.; Zurcher, N.; Booyatumanondo, R.; Zakaria, M. P.; Dung, L. Q.; Gordon, M.; Miguez, C.; Suzuki, S.; Moore, C.; Karapanagioti, H. K.; Weerts, S.; McClurg, T.; Burren, E.; Smith, W.; Van Velkenburg, M.; Lang, J. S.; Lang, R. C.; Laursen, D.; Danner, B.; Stewardson, N.; Thompson, R. C., International Pellet Watch: Global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) in coastal Waters. 1. Initial phase data on PCBs, DDTs, and HCHs. *Mar. Pollut. Bull.* **2009**, *58*, (10), 1437-1446.
- 13) Hirai, H.; Takada, H.; Ogata, Y.; Yamashita, R.; Mizukawa, K.; Saha, M.; Kwan, C.; Moore, C.; Gray, H.; Laursen, D.; Zettler, E. R.; Farrington, J. W.; Reddy, C. M.; Peacock, E. E.; Ward,

- M. W., Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches. *Mar. Pollut. Bull.* **2011**, *62*, (8), 1683-1692.
- 14) Moore, C. J.; Moore, S. L.; Leecaster, M. K.; Weisberg, S. B., A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Mar. Pollut. Bull.* **2001**, *42*, (12), 1297-1300.
- 15) Thompson, R. C.; Olsen, Y.; Mitchell, R. P.; Davis, A.; Rowland, S. J.; John, A. W. G.; McGonigle, D.; Russell, A. E., Lost at sea: Where is all the plastic? . *Science* **2004**, *304*, 838.
- 16) Browne, M. A.; Dissanayake, A.; Galloway, T. S.; Lowe, D. M.; Thompson, R. C., Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environ. Sci. Technol.* **2008**, *42*, (13), 5026-5031.
- 17) Thompson, R.; Moore, C.; Andrady, A.; Gregory, M.; Takada, H.; Weisberg, S., New directions in plastic debris. *Science* **2005**, *310*, 1117.
- 18) Bowmer, T.; Kershaw, P., *Proceedings of the GESAMP International Workshop on Microplastic Particles as a Vector in Transporting Persistent, Bio-accumulating and Toxic Substances in the Ocean, 28-30th June 2010, UNESCO-IOC, Paris*. GESAMP: 2010.
- 19) GESAMP, Assessment of microplastics and associated chemicals in marine environments. **2015**.
- 20) Murphy, F.; Ewins, C.; Carbonnier, F.; Quinn, B., Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment. *Environ. Sci. Technol.* **2016**, *50*, (11), 5800-5808.
- 21) Carr, S. A.; Liu, J.; Tesoro, A. G., Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research* **2016**, *91*, 174-182.
- 22) Eriksen, M.; Mason, S.; Wilson, S.; Box, C.; Zellers, A.; Edwards, W.; Farley, H.; Amato, S., Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes. *Mar. Pollut. Bull.* **2013**, *77*, (1-2), 177-182.
- 23) Browne, M. A.; Crump, P.; Niven, S. J.; Teuten, E.; Tonkin, A.; Galloway, T.; Thompson, R., Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks. *Environ. Sci. Technol.* **2011**, *45*, (21), 9175-9179.
- 24) Wright, S. L.; Thompson, R. C.; Galloway, T. S., The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environ. Pollut.* **2013**, *178*, (0), 483-492.
- 25) Sussarellu, R.; Suquet, M.; Thomas, Y.; Lambert, C.; Fabioux, C.; Pernet, M. E. J.; Le Goïc, N.; Quillien, V.; Mingant, C.; Epelboin, Y.; Corporeau, C.; Guyomarch, J.; Robbens, J.; Paul-Pont, I.; Soudant, P.; Huvet, A., Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2016**, *113*, (9), 2430-2435.
- 26) Lönnstedt, O. M.; Eklöv, P., Environmentally relevant concentrations of microplastic particles influence larval fish ecology. *Science* **2016**, *352*, (6290), 1213-1216.
- 27) Jeong, C.-B.; Won, E.-J.; Kang, H.-M.; Lee, M.-C.; Hwang, D.-S.; Hwang, U.-K.; Zhou, B.; Souissi, S.; Lee, S.-J.; Lee, J.-S., Microplastic Size-Dependent Toxicity, Oxidative Stress Induction, and p-JNK and p-p38 Activation in the Monogonont Rotifer (*Brachionus koreanus*). *Environ. Sci. Technol.* **2016**, *50*, (16), 8849-8857.

- 28) Frohlich, E.; Samberger, C.; Kueznik, T.; Absenger, M.; Roblegg, E.; Zimmer, A.; Pieber, T. R., Cytotoxicity of nanoparticles independent from oxidative stress. *The Journal of Toxicological Sciences* **2009**, *34*, (4), 363-375.
- 29) Browne, M. A.; Niven, S. J.; Galloway, T. S.; Rowland, S. J.; Thompson, R. C., Microplastic Moves Pollutants and Additives to Worms, Reducing Functions Linked to Health and Biodiversity. *Current Biology* **2013**, *23*, (23), 2388-2392.
- 30) Rochman, C. M.; Hoh, E.; Kurobe, T.; Teh, S. J., Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Scientific Reports* **2013**, *3*, 3263.
- 31) Lenz, R.; Enders, K.; Nielsen, T. G., Microplastic exposure studies should be environmentally realistic. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2016**, *113*, (29), E4121-E4122.
- 32) 第50回日本水環境学会年会講演要旨集 (2016)
- 33) IWA world water congress and exhibition 2014, Lisbon プログラム  
<http://www.iwa2014lisbon.org/>
- 34) IWA world water congress and exhibition 2016, Brisbane プログラム  
<http://www.iwa-network.org/event/world-water-congress-exhibition-2016/programme/>
- 35) European Commission, Poseidon プロジェクトウェブサイト  
[http://cordis.europa.eu/project/rcn/53072\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/53072_en.html)
- 36) European Research Council, Athene プロジェクトウェブサイト  
<https://erc.europa.eu/projects-and-results/erc-funded-projects/project/athene>
- 37) SOLUTIONS プロジェクトサイト <http://www.solutions-project.eu/>
- 38) MARS プロジェクトサイト <http://mars-project.eu/index.php>
- 39) US Environmental Protection Agency 水分野への助成ウェブサイト  
<https://www.epa.gov/research-grants/water-research-grants>
- 40) JST CRDS デイリーウォッチャー「海洋マイクロプラスチック汚染に関する研究」  
<http://crds.jst.go.jp/dw/20150930/201509306862/>
- 41) 山本民次、花里孝幸；海と湖の貧栄養化問題、地人書館(2015). ISBN 978-4-8052-0885-4
- 42) The EU Framework Programme for Research and Innovation  
<https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020> (水質汚濁系のテーマを検索)
- 43) Zettler, E. R.; Mincer, T. J.; Amaral-Zettler, L. A., Life in the "Plastisphere": Microbial Communities on Plastic Marine Debris. *Environ. Sci. Technol.* **2013**, *47*, (13), 7137-7146.
- 44) 環境省 (2015) 水質汚濁に係る生活環境の保全に関する環境基準の見直しについて (平成 27 年 12 月中央環境審議会). <http://www.env.go.jp/press/101764/28679.pdf>

### 3.2.3 土壌・地下水汚染

#### （1）研究開発領域の簡潔な説明

土壌・地下水汚染は、人為（人間活動）由来または自然由来の汚染物質などが、土壌さらには地下水を汚染し、健康被害や環境影響などをもたらす事象である。ここでは、土壌・地下水における汚染物質の観測・計測と予測・評価、ならびに浄化・修復技術に関する様々な技術およびシステムを対象とする。

#### （2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

##### [意義]

土壌汚染物質には、多くの重金属のように比較的水に溶けにくく土壌に吸着しやすい物質もあれば、揮発性有機化合物（VOC）のように比重が水より重く帯水層に深く浸透して土壌や地下水に残留する物質もあり、地下水の流れに沿って汚染が広域化してしまうことがある<sup>1)</sup>。よって、本領域では土壌汚染とそれに伴う地下水汚染の両者を扱う。

土壌・地下水汚染の調査や対策には、すでに多くの調査技術や修復浄化技術が開発され、実際に利用されている。しかし、掘削除去（汚染土壌を掘削してオンサイトあるいはオフサイトで浄化処理や埋立処分する方法）による対応では費用負担が大きいこと、また一般に土壌・地下水汚染の調査や対策には多くの時間とエネルギーを要するなどの課題がある。そこで、様々な手法で、特に原位置での処理を目指した新技術の開発や環境負荷低減を目指したグリーンレメディエーションが、大学や企業ともに行われている。

自然由来の重金属等による土壌や地下水の汚染も国内外で課題となっている。また、2011年の東日本大震災で発生した福島第一原子力発電所事故に伴う放射性セシウムによる汚染土壌への対応など、現行法の枠組みでは捉えられない新たな土壌環境問題が発生し、解決が求められている<sup>2)</sup>。

##### [動向（歴史）]

日本の土壌汚染の歴史は、1870年代後半の渡良瀬川流域の銅汚染をはじめとする、鉱山廃水を原因とする農用地の汚染に始まった。1970年代からは東京都江東区の鉱さい埋立跡地の六価クロム汚染など都市部の土壌汚染がクローズアップされ、1991年には重金属等10項目について土壌環境基準が設定され、その後対象が拡大されていった。1997年には23項目を対象とした地下水の環境基準が設定され、2001年にふっ素およびほう素が土壌環境基準項目に追加された<sup>2)</sup>。

1990年の土壌環境基準の施行以降は、基準値を超過する事例が多く見られた。また、典型七公害の中で土壌汚染のみに法規制が無かった<sup>3)</sup>。そこで、土壌汚染による人の健康への影響の懸念および対策の確立に対する社会的要請が強まり、それに応えるものとして土壌汚染対策法が2002年に成立、2003年に施行された。土壌汚染対策法は2010年に改正され、自然由来の重金属等含有土が規制対象とされるなどの大きな変更があった<sup>2)</sup>。

こうした社会的動向を受け、環境庁は1993年度から5カ年計画で「地下水汚染対策調査」と「土壌汚染浄化新技術確立・実証調査」を実施した（1994年以降「土壌・地下水汚染対策

事例等調査)。民間が開発提案した新技術について、ラボスケール試験や実際のフィールドで実証試験を実施するもので、サンプリング、分析、原位置封じ込め、原位置浄化技術、原位置抽出分離および分解技術、掘削除去後の分離・分解技術について、32の新技術が提案された。その後1999年まで継続され、これらの技術の中には現在も有効な対策技術として利用されている嫌気性微生物による原位置TCE（トリクロロエチレン）分解技術（バイオレメディエーション）や鉄粉によるTCE分解技術が含まれる。

1990年代後半、ダイオキシン類による土壤汚染が社会問題となると、2000年度以降、環境省はダイオキシン類汚染土壤浄化技術等調査などで技術開発を実施した。実際のダイオキシン類汚染土壤に適用された商業用分解技術は、ジオメルト法（ガラス固化）、TPS（間接加熱による熱脱着）とジオメルト法の組み合わせ、ジオスチーム工法（間接熱脱着＋水蒸気分解法）、減圧還元間接加熱分解法（ダイオ・スーパード）、パイル方式加熱脱着・分解によるダイオキシン類汚染土壤浄化技術である。これらの技術は確立されたと言ってもよいが、国内で継続して商業運転しているダイオキシン類分解施設は現時点では存在しない。代わって、850℃以上の燃焼温度としたロータリキルン炉によるダイオキシン類分解と排ガスの二次燃焼炉（850℃で2秒間以上の滞留時間）での分解とその排ガス処理設備からなる焼却施設が稼働している。

2002年度以降は、土壌・地下水を対象として、簡易で低コスト・低負荷型の土壤汚染調査手法や対策技術を実用化して普及させることを目的に、低コスト・低負荷型土壤汚染調査対策技術検討調査を実施している。

2011年の福島第一原子力発電所事故の発生後は、放射性物質の除染・減容化に関する様々な取り組みがなされている。内閣府では、平成23年度の科学技術戦略推進費において「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」を実施し、放射性物質の分布状況等に関する調査研究および農地土壌等における放射性物質除去技術の開発を行った。また、同年度には「除染モデル実証事業」を日本原子力研究開発機構（JAEA）に委託して実施した。除染や廃炉に関連したセシウムやストロンチウム等の放射性物質を対象とする技術開発の件数が増加しており、放射性物質の挙動の把握<sup>45)</sup>や、放射線遮蔽技術、吸着・洗浄に関する技術開発が多い<sup>6)</sup>。

比較的低濃度で広く分布している自然由来重金属等による土壤環境への負荷の軽減も重要な環境課題となっている。日本では、砒素、鉛、カドミウムなどのバックグラウンドでの濃度が比較的多いとされ、また平均的な曝露量も欧米と比べて高くなっている。最近では、リニア新幹線の建設工事などのトンネル工事に伴う土砂や岩石に含まれる重金属等の問題がクローズアップされ、その適切な対策と管理が求められている。これらは、従来のように人為的な高濃度の汚染ではないため、低コストかつ周辺環境に配慮した環境対策を実現することが重要である。そのため、土砂から重金属等の溶出を低減する技術、吸着マットなどによる重金属等の除去技術などが活発に研究開発されている。

従来の土壤汚染に対する要素技術としては、生物を用いた浄化・修復技術であるバイオレメディエーションや植物を用いるファイトレメディエーション等の生物的処理<sup>7)</sup>、固化・不溶化処理<sup>8)</sup>に関する研究が盛んであるが、処理技術は、処理を行う場所に違いから掘削除去と原位置浄化に分けられ、特に原位置での浄化が目指した技術開発が進められている。原位置浄化技術のうち化学的処理としては、フェントン法や鉄粉を用いた還元処理法、薬剤によ

る吸着処理および透過性浄化壁を用いた化学処理などがあげられる。いずれも、土壤汚染および土壤から溶出した重金属、揮発性有機化合物（VOC）および鉱物油、さらには地下水の汚染に適用される。国内外ともに適用事例は多くあり、特にフェントン法と鉄粉法の適用範囲は広い。新規の技術開発としては、マグネシウム化合物を用いた砒素やセレンの化学形態の変換や吸着処理、プラズマを用いたVOCの分解処理などが考案され、実用化されている。物理的処理としては、土壤洗浄やスパージングによる重金属やVOCの浄化・修復が行われている。土壤洗浄では、土壤粒径により汚染物質の存在割合が大きく異なることから、分級処理と選別処理のプロセスが重要となっている。スパージングは主に地下水汚染に適用され、空気や蒸気、さらには反応性のガスなどを利用した種々のスパージング技術が開発され、土壤汚染現場で実践されている。最近では、マイクロバブルの長期にわたる機能性や選択性を用いた効率的な洗浄やスパージング技術も研究開発されている。

微生物や植物を利用して土壤や地下水の汚染を修復するバイオレメディエーションは、1970年代に米国で石油の分解に微生物を利用したのが始まりである。バイオレメディエーションは、汚染土壤にもともと生育している微生物に水、酸素、栄養物質を供給して汚染物質の分解を促進させる方法（バイオスティミュレーション）と、汚染物質の分解菌を新たに導入する方法（バイオオーグメンテーション）の2種類に大別される。処理に時間がかかるが、温和な条件のもと低コストで汚染を処理できるメリットがある。しかし、バイオオーグメンテーションは社会受容性の確保が必要となり、遺伝子組換え改良菌を利用する場合は一定の規制がかかる。日本では、環境省と経済産業省の共管として、バイオレメディエーション指針が運用されている。現在、主に、ガソリン等の燃料油やその成分であるベンゼン、トルエン、その他の石油系炭化水素、トリクロロエチレン等の炭化水素系溶剤などの浄化に実用化されている。このほか、ダイオキシンや塩素系の残留農薬などへの応用研究も活発に行われている<sup>9)10)</sup>。

地下水汚染に注目すると、1997年の環境基本法により23項目について環境基準が制定され、その後、項目の追加や基準値の変更が行われてきた。1990年代は揮発性有機化合物を対象とした地下水汚染対策が始められたが、当初は土壤ガス吸引法と地下水揚水処理の組合せがほとんどであった。2000年代からバイオレメディエーションが一般的に行われるようになり、帯水層中に生息している *Dehalococcoides* 族細菌を活性化させるバイオスティミュレーション技術の適用事例が増えている。1990年頃からは、汚染拡散防止対策として自然の地下水の流れを妨げることなく地下水中の汚染物質を浄化・安定化する透過性地下水浄化壁も用いられている。米国では1990年代半ばより科学的自然減衰（MNA：Monitored Natural Attenuation）が地下水汚染対策に取り入れられており、日本でもリスク評価に基づく対策が今後取り入れられる可能性がある。硝酸性窒素は、地下水環境基準の超過率が最も高く、地下水汚染への対応が大きな課題となっている。長期的に硝酸性窒素を低減するためには、土壤浸透水や地下水の脱窒処理を含めた浄化技術が必要と考えられ、2000年代に入り透過性浄化壁などの技術開発が行われている。硝酸性窒素による地下水汚染では、窒素安定同位体組成（ $\delta^{15}\text{N}$ ）を指標として窒素の起源が化学肥料由来か動植物由来であるかの推定が行われている<sup>2)</sup>。

土壤・地下水汚染対策では、上記の技術開発に加えて、健康リスクに応じた合理的なリスクマネジメントが求められる。土壤汚染による健康リスクを科学的に評価するためのモデル

開発が行われている。例えば、(社) 土壤環境センターのサイト環境リスク評価モデル (SERAM) や、産業技術総合研究所の地圏環境リスク評価システム (GERAS) がある。また、重金属類の含有量や溶出量、形態などの情報を地理情報システム (GIS) 上で統合化し活用するための環境情報システムである地圏環境インフォマティクスシステム (GENIUS) が東北大学、産業技術総合研究所、DOWA ホールディングス (株) により開発されている<sup>11)</sup>。

リスク評価モデルの活用事例として、汚染地から離れたオフサイトでの土壤汚染のリスクマネジメント、汚染物質の地下水に沿った移動距離の推定、さらには各種の浄化技術の有効性や残存リスクの将来的な予測など、多岐にわたっている。最近では、建設発生土のリスク評価や土地利用用途に応じた浄化目標の設定などの環境政策にも活用されている。今後、法制度の中にリスク評価の枠組みを導入することにより、リスク低減とコスト軽減を同時に達成する合理的なサステナブルレメディエーション (下記) を達成する基礎となることが期待される。

様々な個別の浄化技術が開発、適用されてきたが、対策の意思決定に関わるアプローチ手法は、時代とともに変化してきた。具体的には、対策費用や浄化期間等に基づき、どの技術を用いて基準値以下に低減するか選択するコストベースアプローチが当初は主流であったが、その後浄化目標を汚染サイトや汚染土壌の利用形態に基づくリスクで評価するリスクベースアプローチが採用されるようになった。近年では、環境面だけでなく経済面や社会面を考慮したサステナブルレメディエーションといわれる考え方も取り入れられつつあり、サステナブルアプローチとして土壤汚染対策の多様化につながっている<sup>12)</sup>。

土壤・地下水汚染の社会情勢と技術の経緯を地盤工学会が図 3-4 の通りまとめている。

西暦	1950	1970	1990	2010	2030	2050
社会情勢	都市部の地盤沈下 (地下水過剰揚水)	工場・鉱山由来の重金属汚染 (イタイタイ病・土豆久藍山)	都市部の汚染量減少 ハイテク(VOC)汚染 (シリコハレー 太子町) ラフカナル汚染(米国) レッカーケルク事件(オランダ) ブラウンフィールドの顕在化(米国)	都市部の水位上昇 (地下構造物の漏水・浮上り) ダイオキシン問題 (能勢町ゴミ焼却施設) 東日本大震災 (塩害・放射性物質) 豊洲新市場予定地土壌汚染 神栖町地下水有機塩素汚染	気候変動による環境変化 世界的な水危機 米軍基地返還に伴う土壌汚染対応	広域な地下水利用障害 (硝酸性窒素汚染等) 汚染された土地の有効活用
地下水	地下水量 (地下水位・涵養)	1956年 工業用水法 1962年 建築物用地下水の採取の規制に関する法律(ビル用水法)	地盤沈下防止等対策要綱	2012年 森林法一部改正 2014年 水循環基本法	地下水資源マネジメント 統合的水資源管理 水源地の土地売買の制限	水循環を考慮した地下水資源マネジメント 都市部の地下水の適正利用 (地下水位の適正化)
	地下水質 (地下水汚染)	1967年 公害対策基本法(1993年廃止) 1970年 水質汚濁防止法	1993年 環境基本法 1994年 特定水道利水障害の防止のための水道水源地域の水質の保全に関する特別措置法 水道原水水質保全事業の実施の促進に関する法律	1997年 地下水環境基準 2009年 地下水環境基準追加(計29項目)	新たな環境基準の追加	
	調査測定	放射同位元素の利用	土壌ガス調査法 地下水汚染機構解明調査	遺伝子診断技術 シミュレーション技術 化合物別同位体分析(CSIA)	非掘削調査技術の高度化	
	対策技術	揚水処理法	土壌ガス吸引法 透過性浄化壁 酸化分解法	脱塩素化細菌の発見 バイオオーグメンテーション バイオスティミュレーション	低コスト・低環境負荷型の浄化技術の普及 物理・化学的浄化手法からバイオレメディエーションへ	
	リスク評価		Monitored Natural Attenuation(米国) Risk based corrective actionの普及(米国)	Green & Sustainable remediationの概念の登場(米国・欧州)	リスク評価の普及・ブラウンフィールドの有効利用	
土壌	地盤環境 (土壌汚染)	1971年 農用地の土壌の汚染防止等に関する法律 1980年 スーパーファンド法(米国)	1991年 土壌環境基準 2000年 ダイオキシン類の基準	2003年 土壌汚染対策法 2013年 放射性物質の環境法への追加	新たな環境基準の追加	
	調査測定		土壌ガス調査法 TPH測定(油汚染対策ガイドライン) 土壌・地下水汚染指針 自走式ボーリングマシンの日本導入 現地分析法の開発	放射性物質の測定(除染発生土壌等) ダイレクトセンシング 地盤調査-Phase-I調査普及	現地分析技術の精度向上 リスク評価を含めた自然由来重金属の適切管理	
	対策技術	汚染土壌の掘削搬出	土壌洗浄 熱処理 化学分解 汚染土壌の不溶化処理	バイオバイル バイオオーグメンテーション 物理・化学的浄化手法からバイオレメディエーションへ	地盤施工技術の活用・融合(自在ボーリング技術など) 放射性核種の除去技術	

図 3-4 地下水地盤環境における社会情勢と技術の経緯

(出典：地盤工学会<sup>2)</sup>)

### (3) 注目動向

#### [新たな技術動向]

- 新規対象物質

1,4-ジオキサンや塩化ビニルモノマーといった、新たに土壤環境基準が設定された項目について、従来技術の適用性と併せて技術開発が進められている<sup>13)14)</sup>。このような新規物質の中には発ガン性が懸念されるものもあり、早急な環境汚染対策の実現が望まれる。これらの物質は、産業活動の人為由来によるもののほか、自然界の反応プロセスで副生成物として生じるものもあり、そのメカニズムの解明も重要な課題である。また、1,4-ジオキサンや塩化ビニルモノマーは、それらの分配特性や環境中の挙動にも不明な点が多く、環境動態を考慮した簡易調査法の開発やシミュレーション技術の確立が求められている。

- 調査・評価技術

室内試験については、主流のバッチ溶出試験に加え、より実現象を再現しうるカラム通水試験の適用事例が、国際標準化 (ISO) への取り組みも相まって増えている<sup>15)</sup>。自然由来汚染についての研究も多く、存在形態や存在範囲、溶出メカニズムの解明、基準超過情報のデータベース化等の基礎的研究が数多くなされている<sup>16)</sup>。

- 対策技術

土壤環境基準のみを考慮して画一的に浄化目標を定めるのではなく、リスク評価やサステイナブルレメディエーションのように複数の指標から目標を設定するためのモデル化やフレームワークの確立に向けた検討も多く行われている<sup>17)18)</sup>。

サステイナブルレメディエーション (SR: Sustainable Remediation) とは、土壤汚染対策において、リスクやコストだけでなく、外部環境負荷 (環境面) を低減しつつ、社会面、経済面を含めた浄化の意思決定を推進する考え方であり、技術ベース思考、リスクベース思考と進んできた土壤汚染対策において、さらに広範な概念として持続可能性 (環境・社会・経済) を取り込んでいく考え方である<sup>18)</sup>。

対策技術では、科学的自然減衰 (MNA) の適用も注目される。地下水汚染では長期間にわたる対策に多大なコストと労力を要するため、自然的な機能を活用してモニタリングを実施しながら浄化の進行を科学的に判断するプロトコル MNA が提案され、鉱物油などの一部の汚染状況で実際に適用されている。欧米では数多くの実証事例が報告されているが、日本では山形県、熊本県での VOC 汚染のモニタリングとその科学的な検証結果が報告されている。微生物分解が活発な状況や移流・拡散により汚染物質が急速に減衰するような環境では、MNA の導入を促進するための社会システムやガイドラインの整備が必要である。

#### [注目すべき国内外のプロジェクト]

- 日本国内における Sustainable Remediation の必要性、あり方を議論する国内研究会の必要性、さらには国際的な組織への参画について議論をする場として、Sustainable Remediation コンソーシアムが産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門に設立された (2016年)<sup>18)</sup>。
- 国家課題対応型研究開発事業「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」(平成27年度採択) において、「福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉ま

でを想定した地盤工学的新技术開発と人材育成プログラム」が実施されている。①地下水および地下の広域環境評価・将来予測技術、②放射線遮蔽特性を有する土質材料開発とデブリ取り出し補助技術、③構内除染廃棄物・解体廃棄物の処分、デコミッショニング技術の開発推進とともに、人材育成を行うものである<sup>6)</sup>。

- 欧州では、1995年から2年ないし3年ごとに土壤・地下水汚染問題をテーマとした「ConSoil」が開催されてきた。2013年からは会議名称が水資源管理も含めた「AquaConSoil」となっている。2017年には14回目の国際会議「AquaConSoil」がフランスのリヨンで開催予定となっており、土壤、底質、水資源の持続可能な利用と管理がテーマとされている。したがって、当初のテーマであった土壤・地下水汚染の調査対策技術とリスク評価に底質環境も加わり、さらに水資源の利用と管理にまで展開されようとしている。

#### (4) 科学技術的課題

[課題 (ボトルネック)]

- 調査・分析技術
  - 安価で正確な公定法分析  
土壤汚染の規制対象物質は30種類におよび、その分析コストは膨大である。効率的かつ低コストで実施できる一斉分析による公定法の手法や分析プロトコルの開発が求められる。
  - 現場で簡易に測定可能なオンサイト技術  
公定法分析以外でも現場で簡易に汚染物質の判定や濃度レベルの検査はメリットが大きい。VOCや重金属等を対象とした現場型オンサイト測定・検査技術の開発が求められる。
  - 溶出試験を代替する試験法 (カラム試験など)  
重金属等の溶出試験法には多くの技術的な課題 (再現性、ばらつき) があり、これを代替、補完する、ISOに準拠したカラム試験法などの公的試験法の開発が期待される。
- 浄化・修復対策技術
  - 複雑な汚染現場の状況と多様なエンジニアリング条件  
汚染物質の溶出メカニズムには種々の要因が影響しており、実環境下での汚染物質の長期的挙動を高精度で予測することが難しい。また、土壤汚染の現場では、土質や地質の違い、土地の形態や利用条件などが様々であり、汚染サイトごとの個別対応が必要である。建設工事 (土木) や地盤調査 (地質) との連携による対策の効率化、建物直下における汚染の調査対策として水平ボーリング技術が求められる。  
さらに、効率性、コスト、土地の特徴や広さ、土地利用形態、社会的側面などの多様な制約条件があり、個々の技術で適用可能性が異なるため、それらの関連性を総合的に評価できる仕組みが存在しない。エンジニアリングマニュアルの整備が臨まれる。
- リスク評価技術
  - リスク評価手法の社会実装  
国際的な土壤汚染対策は、リスクベースの合理的なリスクマネジメントが主流であ

る。日本では技術的に成熟していない理由から導入されていないが、近い将来はリスク評価に基づく合理的な対策が実現する可能性が高い。

- モデリング技術の高度化

リスク評価モデルの高度化に加えて、現場の高次元データを用いた順逆双方向の解析などの信頼性の高いリスクモデリング技術の開発が求められる。データ駆動による数理統計的な解析技術の開発、現場での実証試験によるデータベースの蓄積が求められる。

- 地圏環境情報の整備

- 地球化学図、土壤環境基本図の整備

土壤汚染対策では、重金属等の地域特性やバックグラウンドの把握など、もっとも基本となる土壤環境に関する各種情報の整備が遅れている。地域ごとの地質情報を反映した地球化学図、土壤環境基本図の整備、リスクマップの作成および公開が求められる。

- リスク情報の公開と情報伝達

地球化学情報やリスク情報などをいかに正しく理解し、市民に伝えていくかの仕組みが存在しない。土壤汚染リスク情報の整備およびコミュニケーションツールを開発することが望まれる。

[今後取り組むべき研究テーマ]

- 調査・評価技術

- 現在の汚染状況調査や浄化確認等においては、限られたサンプリング試料の濃度が  $100\text{m}^3$  や  $3000\text{m}^3$  の相当量の土壤を代表し、汚染の有無あるいは浄化の完了が判断されることから、低コストで空間的な汚染分布を精度良く、かつある程度迅速に把握しうるセンシング技術を確立することが求められる。

- 地下水は土壤に比べると移動および混合速度が速く、土壤の直接摂取リスクより地下水の飲用リスクの方が高いため、地下水のモニタリング強化を目指した簡易かつ低コストな地下水採取方法の開発が求められる。

- 移動という点では地下水よりも土壤ガスの方が注目されるが、土壤ガスを通じた汚染物質の移動に関する研究は少なく、吸入による健康影響の観点からも重要と考えられる。土壤ガス分析の高感度化により汚染状況を的確に把握することが求められる。

- 得られたボーリング試料、土壤や地下水試料から、地下の 3 次元的な空間を推定し、表現する「見える化」を図ることが求められる。

- 対策技術

- 廃熱や太陽熱等の再生可能エネルギーを活用したり、上部構造物での事業を停止させずに浄化できるなど、単に濃度を基準値以下に低減させるだけでなく、浄化によりインセンティブを与えうるサステイナブルな技術の確立、高度化が求められる。このような技術が普及することで、都市部でのブラウンフィールド問題の解決にも貢献できると考えられる。

- 低濃度基準超過土の地盤材料化は重要な課題であり、浄化せずにオンサイトで管理しつつ利用を図る工法が今後普及すると考えられるが、利用後のトレーサビリティを確

保するためのツール、制度の確立、モニタリング技術の開発に積極的に取り組むことが求められる。

- 遮水等の物理的処理は、長期に渡る安全性、確実性が求められるため、品質管理手法、維持補修技術についての研究開発推進が必要とされる。
- バイオ（ファイト）レメディエーションは、現状では浄化効果の持続性や完全な浄化といった観点で多くの技術的な課題をかかえている。地質や環境の諸条件の制約が極めて大きく、対象物質や汚染サイトごとに現象が異なるなどの問題がある。従来別々に行われていた、微生物の改変や耐性を中心とした基礎生物学や遺伝子情報の研究と、地質環境における微生物の生態や挙動に関する研究を融合させ、現場の条件に適合した効率的な技術とすることが肝要である。近年では、汚染サイトで採取した微生物を汚染物質に適合させ、さらに現場の環境条件に応じた微生物群の改変を可能にする新規の研究開発が進んでいる。
- グリーナー・クリーンアップの社会実装も求められる。グリーナー・クリーンアップ（greener cleanup）は、米国環境保護庁（EPA）で実践されているスーパンファンド法に基づく実行計画である。土壤汚染対策を他事業との連携で実施し、環境負荷を最小限に抑えた汚染対策を実現するための取り組みを提唱している。土壤環境に限定せず、広く地球環境問題を見据えた将来的な枠組みを構築して、大気、水質、地球環境（温暖化ガス）のトータルの環境保全を目標として、エネルギーの最小化、コストの軽減を図る技術体系である。汚染対策の資材を最小化し、廃棄物の循環を促進するため、公共事業や建設工事などと連携して総合的な設計を実現し、長期スパンにわたり生態系を配慮したトータルな環境改善を実践することが可能である。

## （5）政策的課題

- 法制度と技術開発のギャップ、リスク評価に基づく対策

土壤汚染対策法で問題となるのは、国際的に主流のリスクベースの対応をとっていないこと、溶出量と含有量の両者を採用していることなどである。これらは日本独自の考え方なので、国内外で開発した新規の対策技術を導入する際に、技術と法制度のギャップが課題となる場合が多い。例えば、バイオ（ファイト）レメディエーションのように、合理的で高度な技術であっても法制度に合わないために導入が困難な技術や手法が少なくない。

リスク評価については、例えば対策工として採用されることが多い掘削除去は、コストが高く汚染土壌の受入先（土壤浄化処理施設を含む）が必要となる等の問題があるが、適切な管理を行えば原位置浄化や封じ込め等の対策工でも十分に適用可能な現場もあり、その採用の増加が期待される。採用の際は、対策工の性能評価を精度よく行うこと、リスク評価の考え方を採り入れた対策目標の設定とそのため具体設計を行うことが求められる。そのため、特にリスク評価に基づいた対策の実施を後押しするような政策の実現が期待される。

- 土壤汚染と地下水汚染で異なる規制

日本の環境法は分野別に制定されるものがほとんどであり、土壤環境と他の環境（大気、水質、地球環境など）を一体ととらえていない。土壤汚染は土壤汚染対策法のもとで規制

されており、汚染調査は土地の所有者責任となっているため、汚染状況を把握するための常時監視が実施されない。一方、地下水汚染は水濁法により規制されており、都道府県による地下水の常時監視が実施されている。このため、地下水の汚染については見落としが少ないと考えられる。土壌汚染と地下水汚染とは関連した事象であることが多いので、土壌汚染対策法と水濁法との組み合わせによる効果的な対策につながる制度改革が求められる。

- ダイオキシン類、PCB、硝酸性窒素

ダイオキシン類対策特別措置法で規定されているのは誰も出入りできる公共的な土地のみで、民間の事業所などの土地には適用されない。土壌汚染対策法における特定有害物質としてダイオキシン類の追加検討が求められる。

PCBには含有量基準が設定されておらず、高濃度でも溶出量基準は満足する事例が認められている。PCBは直接摂取のリスクも十分考えられるので、PCBの含有量基準を設定することが望まれる。

地下水の環境基準を超過する割合が最も高い硝酸性窒素については、肥料や家畜ふん尿の影響が大きいと考えられているが、水濁法の有害物質使用特定施設に該当しないため、地下水汚染の未然防止のための構造基準の適用や定期点検などの遵守義務が課されないなどの課題がある。

- 地域特性と人材育成

日本は、もともと地質が複雑で鉱山活動が盛んな地域が多く、地域により重金属のバックグラウンド値の差異が大きい地質的な条件がある。このような地域特性は、居住する住民活動や農業活動、生態系を保全するための基盤となることから、対策において地域特性を反映することが重要である。また、土壌汚染対策法は、他の法体系と比べて新しい体系なので、社会システムの整備や人材育成が追いついていない。特に、現状では土壌汚染の分野で専門的な知識を有する人材が極めて少ないため、調査・評価、対策技術の現場適用の進捗が遅れている。

- アジア諸国との国際的共同事業

ごく最近では、中国やタイ国において土壌汚染対策に関して新たな環境規制となる法制度が制定されつつある。中国では2016年度以降に「土壌污染防治法」の制定が計画されており、予防措置を中心とした科学的なリスク管理の枠組みが提案されている。これらのアジア諸国と連携して土壌汚染対策を共同で実践していくことは、国家や企業や環境対策のみならず、国際的なセキュリティの観点からも重要な施策である。

## （6）キーワード

土壌汚染、地下水汚染、ブラウンフィールド、自然由来、重金属等、VOC、鉱油、硝酸性窒素、POPs、ダイオキシン類、調査技術、浄化技術、修復技術、封じ込め、吸着、リスク評価、バイオレメディエーション、ファイトレメディエーション、グリーンレメディエーション、サステイナブルレメディエーション

（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 1)2)	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 福島第一原子力発電所事故以降、放射性物質、特に放射性セシウムの吸・脱着やモニタリングなどに関する基礎研究が加速されたものの、土壌・地下水汚染研究領域において依然として非常に重要である重金属類や揮発性有機化合物などに係る研究は予算枠の相対的な減少などにより影響を受けており、国際的イニシアティブを確保するためには、今後更なる加速が必要である。</li> <li>● 封じ込め等の物理的な対策技術に関する研究は国内ではそれほど多くないが、吸着層工法等の研究は、基礎研究を中心に近年増加傾向にある。また、汚染物質の溶出機構等に関する研究は、これまで同様に多い。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 基礎研究と同様、放射性物質による汚染の浄化や汚染水のモニタリング技術および処理技術などの応用研究開発が加速され、復興支援に貢献したものの、自然由来の重金属類や揮発性有機化合物による土壌汚染に係る低コスト・低環境負荷対策技術の開発は関連研究予算と提案数の減少に伴い減速傾向になり、今後加速する必要がある。</li> <li>● 封じ込めや盛土の実証試験、モニタリング等の応用研究は数件見られるが、過去と比較して顕著な増加は見られない。</li> </ul>
米国 3)19)	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 米国国立科学財団（NSF）や環境保護庁（EPA）などのファンドによる土壌汚染に係る基礎研究が進められている。環境微生物や植物などを利用した浄化技術やリスク管理に基づく融合研究が進められている。</li> <li>● ポリマーやゼオライト等を添加した高機能型遮水材を対象とした基礎研究が盛んであり、学術雑誌への投稿も多いが、ここ数年で論文件数は大きく増加していない。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EPA や米国エネルギー省（DOE）などにより管理されている実汚染サイトで、開発技術の検証や実証試験ができ、応用研究の環境としては非常に優れている。</li> <li>● 汚染土利用時のモニタリング方法や地盤内浸透、溶出挙動についての技術開発、研究が進められている。</li> </ul>
欧州 9)10)	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 欧州、特に英国においては、環境的側面のみならず、社会的側面および経済的側面も統合的に考慮したサステナブルレメディエーションの研究開発が加速されている。</li> <li>● 米国同様、ポリマー系材料を混合した遮水材の基礎的研究が盛んであり、特にフランスやベルギー、イタリアからの学術雑誌への投稿が多いが、論文件数は大きく増加していない。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 土壌・地下水汚染対策の新しい取り組みとして、英国を中心に提案されたサステナブルレメディエーションに関する ISO 規格の提案が進められている。また、ドイツを中心に、PCB や多環芳香族炭化水素（PAH）およびダイオキシンなどの汚染物質に係る ISO 規格の提案が進められており、科学技術の国際的な競争は一段と激しくなっている。</li> <li>● 汚染土利用盛土での降雨浸透現象やリサイクル材を利用した地盤の挙動評価等が積極的に行われており、学術論文への投稿も増加傾向にある。</li> </ul>
中国 11)	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 環境に対する国民の関心が高まり、環境に対する投資も年々増加し、現時点では GDP の 2% 近くまで増加してきている。特に改正環境保護法の施行（2015 年 1 月 1 日より）や土壌污染防治法（仮称）の制定（2016 年内に予定）の動きに伴い、土壌・地下水汚染に係る基礎研究の予算が増大し、中国科学院傘下の研究所や各地の大学で認定された「国家重点実験室」研究が盛んに進められている。</li> <li>● J-STAGE に相当する中国の電子ジャーナル検索ツール CNKI.net では、封じ込め等の物理的対策について数編の基礎的論文が存在するのみである。ただし政府系資金による物理的対策に関する研究プロジェクト数は、近年増加傾向にある。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 中国では、土地が 100% 国有であるため、現場または原位置実証研究が行われやすい。現在国内で開発技術した技術のほか、欧米などで開発した技術の検証やクロスチェックが複数の大型プロジェクトで行われている。</li> <li>● 法整備が進められているところであり、現状では応用研究まで進展していない。現状では、この数年で飛躍的に応用研究が進展する見込みもない。</li> </ul>

韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 韓国国内において、特に目立った動きはないが、留学生や研究者の海外派遣は目立つようになってきている。</li> <li>● 現場適用技術の進展を目指した GAIA プロジェクトが、2008 年から国家主導で進んでいる。利用形態に応じた浄化レベルの設定、モニタリング・トレース技術の開発研究にも注力している。基礎研究は 2008-2011 年に重点的に実施されており、現在は現場適用性の検証等にシフトしている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 海外技術の導入や外国との連携により、今後応用研究が加速される可能性が極めて高い。</li> <li>● Country Report of Korea (Soils and Groundwater contamination) によると、Gangwon 地区、済州島、ソウル等の都市部で地盤汚染が顕在化しており、GAIA プロジェクトと併せて応用技術の開発とその適用が進められている。</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

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 参考文献

- 1) 国立環境研究所, 環境技術解説, 土壌・地下水汚染対策  
<http://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=52>
- 2) 地盤工学会, アカデミックロードマップ, 8-3 地下水地盤環境  
[https://www.jiban.or.jp/images/file/AR\\_PDF/8-3AR.pdf](https://www.jiban.or.jp/images/file/AR_PDF/8-3AR.pdf)
- 3) 国立環境研究所, 環境技術解説, 土壌汚染調査  
<http://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=51>
- 4) 例えば、Inui, T., Katsumi, T., and Takai, A. (2015): Cesium sorption/desorption characteristics of sodium bentonite affected by major cations in leachate from MSW incinerator ash, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, Vol.2, No.53, pp.1841-1844.
- 5) 例えば、池上麻衣子, 高瀬雄平, 米谷達成, 米田 稔, 島田洋子, 松井康人, 福谷 哲 (2014): 土壌の熱処理による Cs, Sr の溶出特性の変化, 土木学会論文集 G (環境), Vol.70, No. 7, pp.III\_203-III\_208.
- 6) 国家課題対応型研究開発事業 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業, 福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的の新技術開発と人材育成プログラム (事業代表者: 東畑郁夫)  
[http://www.jst.go.jp/nuclear//training/adoption/jiban\\_intro.pdf](http://www.jst.go.jp/nuclear//training/adoption/jiban_intro.pdf)
- 7) 例えば、山崎祐二, 長谷川愛, 稲葉 薫, 清水孝昭, 田 小維, 小林 剛 (2016): 嫌気性バイオレメディエーションの加温による促進効果及びそのモデル化に関する検討第 22 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp.264-267.
- 8) 例えば、鈴木祐麻, 中原史也, 縫部俊晴, 新苗正和 (2016): 酸化マグネシウムによるヒ素(V)汚染土壌の不溶化にフミン物質が与える影響およびそのメカニズム, *Journal of MMIJ*, Vol.132, No.8, pp.137-143.

- 9) 国立環境研究所, 環境技術解説, バイオレメディエーション  
<http://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=51>
- 10) JST CRDS, 研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野（2015年）, 研究開発領域「環境浄化」  
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/FR/CRDS-FY2015-FR-03.pdf>
- 11) 地圏環境インフォマティクス (GENIUS) ホームページ  
<http://geoserv.kankyotohoku.ac.jp/genius/>
- 12) 産業技術総合研究所 Sustainable Remediation コンソーシアム,  
[https://staff.aist.go.jp/t.yasutaka/SRCons/SRConsortium\\_sokai.html](https://staff.aist.go.jp/t.yasutaka/SRCons/SRConsortium_sokai.html)
- 13) 例えば、大橋貴志, 菊池 毅, 山本哲史, 黒澤典明, 未規制物質による土壤汚染調査・対策手法検討部会 (2016) : 1,4-ジオキサン及び塩化ビニルモノマーによる土壤・地下水汚染に係わる対策・処理技術の検討と対策上の留意点, 第 22 回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp.369-374.
- 14) 例えば、石森洋行, 遠藤和人, 中川美加子, 石垣智基, 山田正人 (2013) : 廃棄物処分場浸出水中の有機化合物成分に対する合成樹脂系遮水シートの遮蔽性能評価, ジオシンセティックス論文集, Vol.28, pp.99-102.
- 15) 例えば、Naka, A., Yasutaka, Y., Sakanakura, H., Kalbe, U., Watanabe, Y., Inoba, S., Takeo, M., Inui, T., Katsumi, T., Fujikawa, T., Sato, K., Higashino, K., and Someya, M. (2016): Column percolation test for contaminated soils: Key factors for standardization, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.320, pp.326-340.
- 16) 例えば、張 銘, 吉川美穂, 杉田創 (2015) : 自然由来重金属類の長期溶出特性評価, 第 21 回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp.217-220.
- 17) 土壤環境センター, サステイナブル・アプローチ部会 サステイナブル・レメディエーション (SR) に関する調査ワーキンググループ,  
<https://www.gepc.or.jp/engineer/sa-remediation/index.html>
- 18) 産総研コンソーシアム Sustainable Remediation,  
[https://staff.aist.go.jp/t.yasutaka/SRCons/SRConsortium\\_index.html](https://staff.aist.go.jp/t.yasutaka/SRCons/SRConsortium_index.html)
- 19) 特許庁, 平成 19 年度特許出願技術動向調査報告書, 固体廃棄物および土壤汚染の処理技術 (要約版) , [https://www.jpo.go.jp/shiryou/pdf/gidou-houkoku/kotai\\_youyaku.pdf](https://www.jpo.go.jp/shiryou/pdf/gidou-houkoku/kotai_youyaku.pdf)

### 3.2.4 物質循環・環境動態

#### (1) 研究開発領域の簡潔な説明

地球上の物質が、化学的・生物化学的作用を受けながら気圏-水圏-土壌圏-生物圏-岩石圏(多圏)を移動し循環していく際の物質やエネルギーの収支、物理化学素過程、その環境への影響などを明らかにする研究開発領域である。例えば、地球温暖化予測の基礎となる炭素、肥料など食糧問題や汚染問題に関係する窒素、その他の有害物質の挙動予測、資源となる物質の濃集現象などを対象とする。こうした物質循環を解析するために、物質の濃度、同位体比、化学形態を計測する技術の開発、現地観測、リモートセンシング、モデル研究などが進められている。

#### (2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

気候変動や窒素による環境負荷、汚染物質の動態や曝露など、様々な課題を理解し対応するための基盤として本領域の研究開発が必要とされている。大気や水などの流体の流れとそれに伴う影響を扱う地球物理的分野に対し、そこに含まれる物質は化学的・生物化学的作用を受けて化学種を変えながら循環する。そのため、その物質の物理化学的特徴や他の物質との相互作用を解明することが、物質循環や環境動態を正しく知る上で不可欠となる。

最も主要な温室効果ガスである二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を構成する炭素の循環・動態を把握し予測することは気候変動問題において根本的な重要性をもつ。窒素は温室効果ガスである一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)を構成するが、むしろ工業起源の窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)の排出と輸送拡散、農耕地での大量の化学肥料投入とその流出による富栄養化、さらに成層圏オゾン層の破壊物質として注目度が高く、環境問題と食糧問題など横断的な性質がある。窒素循環の人為改変は持続可能な範囲を超えており、特に活性の高い反応性窒素(N<sub>r</sub>)の動態を把握し予測することも課題である<sup>1)</sup>。炭素や窒素は生物体を構成する主要元素であり、炭水化物やタンパク質などの有機物、二酸化炭素や二酸化炭素などの無機物で様々な形態を取りつつ環境中を循環している。そのため、特定物質の動態を単体で論じることは難しく、元素動態の少なくとも主要なプロセスはカバーしつつ全体像を把握することが求められる。これら元素の循環・動態を扱う研究手法として、実験室でのプロセス解明、野外での現地観測による実態把握、数値モデルによるシミュレーション、人工衛星などを用いた広域観測、があげられる。

[動向(歴史)]

物質循環・環境動態の研究や手法開発の基礎は、1930年代に Goldschmidt が始めた地球化学の領域にあり、地球上の様々な系での物質の濃度や化学反応を系統的に理解する学問的な基礎ができた。その後、1950年代以降、同位体地球化学が大きく発展し、物質循環解析に広く利用されるようになった。最近20年間の大きな進歩として、濃度分析では、ICP質量分析計(ICPMS)などに代表される様々な分析法の高感度化が進められるとともに、ミクロンあるいはサブミクロンオーダーの局所領域での分析技術(例:各種電子顕微鏡、レーザーブレイション-ICPMS、マイクロビーム蛍光X線法など)が大きく発展し、微量成分も含め

て、物質の濃度分析や分配・分布が解明されるようになった。一方で、天然で起きる現象は非常に複雑であり、これらを解析する上では、各物質の濃度分析に加えて、同位体比の変動を利用することが有効であり、同位体地球化学分野は大きく発展している。同位体地球化学分野では、(i) ICP 質量分析の発展による重元素まで含めた様々な元素の同位体比の研究、(ii) 分子中の異なる部位の同位体比を用いた物質の起源や化学反応の理解、(iii) 質量に依存しない同位体分別 (Mass Independent Fractionation: MIF) に関する研究、などが進展し、物質循環・環境動態研究に広く応用されている。さらに近年では、放射光を用いた X 線分光や高分解能の電子顕微鏡などの発展により、対象とする元素の化学種を原子・分子レベルで明らかにし、濃度や同位体比の変動のメカニズムをミクロなレベルから明らかにできるようになってきた。これらにより原子・分子レベルの物理化学的なメカニズムを基に物質循環を扱えるようになると、環境科学・資源科学の基礎が深化するとともに、これらの情報を統合したモデルやシミュレーション技術の開発により、さらに正確な物質循環・環境動態の予測が可能になると期待される。

炭素や窒素の循環は、生物地球化学的循環とも呼ばれ、生物が関与する非線形性や空間的不均質性が極めて高いという特徴がある。そのため、現地観測で得られるデータは断片的なものに限られ、全体像を把握するためのモデルや衛星観測を組み合わせた手法が必要となる。これらの研究により、グローバルな二酸化炭素の放出・吸収の現状が徐々に解明されて温暖化の予測と対策に寄与している。また、環境中に放出された窒素などの栄養塩や酸性物質が輸送拡散される状況が明らかとなり、それがもたらす環境汚染さらには生物多様性喪失といった影響に関する理解が進んでいる。

環境中での炭素や窒素の循環・動態に関しては、その研究史は比較的浅く、酸性雨問題に関連して流域スケールの研究が開始されたのは 1950 年代以降である。また、温室効果ガスである二酸化炭素や一酸化窒素のグローバル循環が解明され始めたのは 1980 年代以降である。それ以前にも生態系における物質やエネルギーの流れに注目する生態系生態学などの学問分野は存在していたが、環境問題の観点から物質循環の変動に着目し始めたのは比較的近年のことである。大気中の二酸化炭素濃度に関する観測は 1950 年代から行われていたが、それが温暖化問題との関係で注目を集め始めたのはやはり 1980 年代以降である。炭素などの物質循環を表現する数値モデルは、極めて単純化されたものは 1970 年代に開発されていたが、本格的に広域を対象としたモデルが現れ始めたのは 1990 年代以降である (主に欧米の研究機関による)。この時期には気象モデルによるグローバルな数値計算が可能となるほど計算機能力が向上し、物質循環に関する基礎的な理解が形成されてきた。観測面で特筆すべきは、1960 年代から 1970 年代にかけて国際生物学事業計画が実施された事であり、主要な生態系タイプに関する基礎データが網羅的に収集され、そこでは国内研究者も大きな貢献を果たしていた。1990 年代以降には、実験室や野外での操作実験も行われ、変動環境下での物質循環の応答や、その制御メカニズムに関する理解も向上した。地球全域を対象とした衛星観測は 1980 年代から実施され、陸上植物の機能や人間活動による影響に関する継続観測が可能となった。現在までに衛星から観測可能な情報は質・量・種類の面で飛躍的に向上している。

環境中の物質循環を把握する場合、一見相反する 2 つの問題がある。1 つは、物質の濃度やフローが微量なことによる測定の困難さであり、もう 1 つは物質が広域・大量に存在する

ことによる定量化の難しさである。試料精製と測定技術の向上により、大気中の二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガス、揮発性有機化合物（BVOC）などの化学反応性に富む微量物質の測定精度は大幅に向上している。また、コンパクトな質量分析機器により同位体測定のスปีドや精度も向上しており、物質の発生起源や移動経路、平均滞留時間などに関する情報が得られるようになった。特に温室効果ガスの主要な発生源である陸域生態系については、二酸化炭素やメタンの交換量測定において渦相関法などの微気象学的方法が開発されて標準的に使用されるようになってきている<sup>2)</sup>。その他のより大気中濃度が低いガスについても簡易渦集積法などが開発されて継続観測が可能となった。一方、陸域生態系や海洋における炭素や窒素のストックは、大量である上で空間分布が不均質で定量化には大きな誤差が伴っていたが、近年、衛星観測やモデル予測、同位体研究などの進展により向上している（(3)注目動向 [新たな技術動向] 参照）。

### （3）注目動向

#### [新たな技術動向]

大量かつ空間分布が不均質なため定量化には大きな誤差が伴っていた陸域生態系や海洋における炭素や窒素のストックについて、近年では、衛星からのライダー観測により植生バイオマス量（約半分が炭素）の測定が可能となり、またハイパースペクトルなどの先進的な光学観測によって植生の窒素濃度を測定することが可能となりつつある<sup>3)</sup>。近年、炭素や窒素の循環・動態をシミュレートする統合的モデルが開発されて、相互作用（例えば葉の窒素濃度が光合成能力に与える影響）を考慮した予測が行われている。モデル研究におけるプロセス数式化や検証においては、野外で観測されたフローやストックに関するデータが利用されており、異分野の学際的研究が活発化している。

特に、物質循環研究において重要な技術である同位体分析の分野では、軽元素から重元素に至るまで、様々な技術開発が進んでいる。軽元素では、分子内の部位別の同位体比を区別しながら測定する技術が発展し、物質の起源・生成過程の解明<sup>4)</sup>や同位体温度計の開発<sup>5)</sup>が発展している。有機物に関しては、腐植物質などの天然の無定形有機物の分子式まで確定できる超高分解能フーリエ変換イオンサイクロトロン型質量分析器（FT-ICRMS）の発展が著しく、炭素循環の研究などで重要な役割を果たしている<sup>6)</sup>。同位体比の非質量依存の分別（MIF）を用いた研究は、軽元素ばかりでなく水銀などの重元素の研究にも展開されており、例えば世界的な課題になっている水銀の水圏-大気圏での循環研究においても重要な位置を占めている。一方、放射光を用いた X 線による元素状態分析研究は、nm レベルでの炭素の官能基マッピングなどに利用され、多くの成果をあげている<sup>7)</sup>。

#### [注目すべき国内外のプロジェクト]

- 国際的動向として、炭素循環の解明を目指した Global Carbon Project（GCP）が進められており、ほぼ毎年、二酸化炭素収支に関する統合解析のレポート<sup>8)</sup>が出版されている。その成果は IPCC 報告書における温室効果ガス動態に関する記述のベースとなっており、国際的な注目度や政策的重要性が高い。モデル研究分野では、GCP による統合解析の一環として行われているものを含め、多くのモデル相互比較研究が行われている<sup>9)</sup>。窒素に関

しては International Nitrogen Initiative (INI) が設立され、さらに 2015 年からはより実践的な International Nitrogen Management System (INMS: 国際窒素管理システム) に向けた準備活動が進められている。物質循環を含む地球観測の推進を目的として Group on Earth Observation (GEO) が設立されており、二酸化炭素の吸収源となっている森林監視を含むイニシアティブが推進されている。

- 現在の地球の気候変動の影響が最も顕著に表れている地域である北極域について、気候変動の解明と環境変化や社会への影響を明らかにし、精度の高い将来予測・環境影響評価等を行うことを目的とした北極域研究推進プロジェクト (ArCS: Arctic Challenge for Sustainability) が進められている。これは、文部科学省の補助事業として、国立極地研究所、海洋研究開発機構および北海道大学の 3 機関が中心となって実施されている (2015 年 9 月～2020 年 3 月)。
- 文部科学省科学研究費の新学術領域研究 (研究領域提案型) では、物質循環に関連した分野として「海洋混合学の創設：物質循環・気候・生態系の維持と長周期変動の解明」 (代表者：安田一郎・東京大学教授、2015～2019 年度) や、「福島原発事故により放出された放射性核種の環境動態に関する学際的研究」 (代表者：恩田裕一・筑波大学教授、2012～2016 年度) などの分野の研究が展開されている。
- 資源関係では、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「次世代海洋資源調査技術 (海のジパング計画)」が進められている。これは、主に海洋資源の成因、資源調査、資源開発を目指したプログラムである。

#### (4) 科学技術的課題

[課題 (ボトルネック)]

環境中で物質は様々な媒体によって輸送され、形態を変えつつ滞留しており、その複雑性や空間的不均質性が理解を困難にしている。炭素や窒素のような主要元素ですら反応プロセスの全容は解明されておらず、それが温室効果ガス収支の定量化とその予測における不確実性の原因となっている。そのため、生物地球化学的プロセスを解明する基礎研究が必要であり、空間的分布を把握するための観測ネットワークの拡充が求められる。近年の気候変動予測研究では、陸域生態系によるフィードバック効果の推定に不確実性が大きいことが問題となっている。具体的には、多くの炭素循環モデルには、大気二酸化炭素濃度の上昇に伴う成長促進 (施肥効果) が考慮されているが、その感度には大きな差があることが指摘されている<sup>10)</sup>。その差を生む原因の一つとして植生の窒素利用可能性における制限の強さが未解明である点が指摘されており、炭素・窒素の循環とその相互作用に関する理解深化が求められている。

また、物質循環研究の出口として、物質循環のメカニズムをよりミクロな視点から理解していくベクトルと、得られた成果をモデル化し、それを特定の系、よりグローバルな系、より多圏間の相互作用を含む系に拡張していくベクトルの 2 つがある。これらは相補的な研究であり、新たな本質的発見はミクロなメカニズム解明から生まれる場合が多い一方で、全体への影響を考察する上でモデル化は不可欠な要素である。特に前者のボトルネックとして、様々な混合物を含む天然試料から、目的とする物質の濃度・同位体比・化学種を選択性よく

測定する技術がよりいっそう必要になっている。そのために、個々の目的物質それぞれについて多くの技術的革新が進められており、特に不安定であるが物質循環において重要な物質や、微量であるが人間にとって重要な物質などに対する新たな分析法の開発が今後求められるであろう。また自然起源と人為起源の双方に起源をもつ物質については、人為的影響を定量的に考察していくことが期待される。

[今後取り組むべき研究テーマ]

- 地球温暖化・炭素循環における有機物や不安定化合物（例：海洋生物起源の硫化ジメチルなど）の分析とその影響の考察

土壌や根系に代表される地下部の寄与が非常に大きいことは共通認識になりつつあるが、地下部は直接観測が困難でプロセス解明やデータ集積が進んでいない。ライゾトロンなどによる観察や、同位体をトレーサに用いる研究も行われて来たが、さらに簡便で精度の高い測定手法の開発が望まれる。また、永久凍土中には大気中の炭素量の約2倍に相当する量が蓄積されていると見積もられているが不確実性の幅が大きい。極域を通じた炭素循環には重要性が指摘されながらも未知の要素が多く、科学的知見が不足している。

- 地上観測ネットワークや衛星観測によるデータの利活用

近年は大量かつヘテロなデータを扱うビッグデータに関する研究が各分野で進んでいるが、物質循環分野にどうそれらに応用するかが課題である。最近の動向として、数値モデルのパラメータを観測データで逐次的に更新するデータ同化が注目されているが、物質循環分野でも推定不確実性低減のために同様の試みを進めることが求められる。

- レアメタル（白金族元素など）やレアアースの濃集機構の解明に基づく資源開発
- 鉄などのように自然起源と人為起源の双方に起源をもつ物質での人為的影響の定量化
- 海洋-大気間、土壌-大気間、地下水-岩石間のような多圏間の物質移動とその環境影響

## （5）政策的課題

2015年のパリ協定において気候変動抑制に向けた国際的合意が形成され、日本もよりいっそうの温室効果ガス排出削減が求められている。国内から排出される二酸化炭素・メタン・一酸化二窒素などの温室効果ガスの量を精確に定量化することはもちろん、その輸送や吸収までの循環を把握することが適切な緩和策検討に必要である。最近のシナリオでは21世紀後半の大気中温暖化濃度抑制のため、大規模なバイオ燃料栽培が必要とされているが、それが環境に与える負荷については十分に評価されていない。それは温暖化だけでなく、生物多様性にも影響を与える可能性があり、生物多様性条約との関係からも注目される。

体制面では、基盤的予算の確保や国際的・学際的な研究の推進、汎用性の高い最先端分析装置の共同利用拠点の効率的な運用が求められる。

## （6）キーワード

炭素循環、窒素循環、元素循環、多圏相互作用、地球温暖化、有害物質、化学種解析、同位体比、質量分析、放射光、シミュレーション、生物地球化学、下方調節、CO<sub>2</sub>施肥効果、炭素循環フィードバック、純一次生産、メタ分析、地球システムモデル、衛星観測、ネクサス

（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>● 大気中の温室効果ガス濃度や同位体比測定は最高水準を維持している。地表のガスフラックス測定は、技術的には高いがデータ解析においてやや立ち遅れている感がある。炭素循環と窒素循環を含め、温室効果ガスを統合的に扱う陸域モデルが開発されている<sup>11)</sup>。文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムでは、炭素循環だけでなく窒素循環も取り入れた地球システムモデルを開発している。2009年にはJAXA・環境省・国環研による温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）の打ち上げを成功させ、衛星からの物質循環観測研究を先駆ける成果をあげている。</li> <li>● しかし、同位体分野等も含め論文数のシェアは低下しており、2010年代ではいずれも分野も中国に圧倒されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 温暖化緩和策の立案と評価のための応用研究が実施されており、IPCC報告書への貢献度も向上している。農地における一酸化二窒素放出の削減技術（農研機構）や、森林破壊からのCO<sub>2</sub>放出を監視するシステム（森林総研）などの研究開発が行われている。最近では福島第一原発から放出された放射性物質の動態を把握するための研究も重点化して行われている。</li> <li>● 有害物質や金属資源の分野では、福島第一原発事故に伴う放射性核種の挙動や資源のリサイクル分野では論文が多く発表されているが、国際的なシェアを押し上げるほどではない。</li> </ul>
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 米国大気海洋局（NOAA）やエネルギー省（DOE）による観測ネットワークだけでなく、North American Carbon Program（NACP）による統合化も積極的に推し進めている。特に航空宇宙局（NASA）や地質調査得所（USGS）による衛星観測では世界をリードする位置にある。物質循環モデル研究でも長い歴史をもつが、近年では淘汰が進んで少数のモデルに集約されつつある（例えば大気研究センター（NCAR）によるCommunity Land ModelやDynamic Land Ecosystem Modelなど）。</li> <li>● いずれの分野も論文数は順調に増加しているが、中国の伸びが大きい分、相対的なシェアは減少している。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 酸性雨研究や温暖化研究にいち早く取り組んでおり、応用面でも先端的研究を行っている。温暖化対策として注目されているバイオ燃料栽培に関しても、温室効果ガス収支など物質循環の面から多数の研究が行われてい<sup>12)</sup>。OCO-2衛星による温室効果ガスの監視や、国際宇宙ステーションに搭載予定のライダにより森林の監視でも取り組みを進めている。</li> <li>● 有害物質の動態分野では論文数の伸びが小さいが、米国で有害物質の問題の多くが解決されつつあるためと思われる。同様の傾向は日本でもみられる。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● International Carbon Observation System（ICOS）を推進して炭素および関連する物質循環研究を積極的に推進している。欧州宇宙機関（ESA）はSCIAMACHYなどの先端の衛星ミッションを成功させて物質循環の広域観測に取り組んできた。欧州全土にCarboEuropeFluxサイトが展開され、微気象学的手法による二酸化炭素等の観測が継続されている。</li> <li>● いずれの分野も論文数は増加している。多くの分野で、論文数が中国に抜かれているが、同位体地球・環境科学の分野ではまだ優位性がある。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 国レベルのコミュニティーで統合的モデルを開発し物質循環研究に応用している（例えばドイツのLPJmLや英国のJULESモデル）。英国の研究者が主導して窒素管理システムINMSを推進している。</li> <li>● 有害物質の動態分野で論文数の伸びがやや小さい。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 中国全土にChinaFluxを設立して急速に観測点数を増やし、温室効果ガスなどの物質循環の観測研究を進め、同時にデータ解析分野でも国際的に存在感を高めている。モデル分野では独自開発されたものはまだ少ない。INMSの東アジアセクションでは南京土壤研究所などの研究者が主導的な役割を果たしている。</li> <li>● いずれの分野でも論文数の伸びが非常に大きい。論文数のシェアに比べて被引用数のシェアが小さい傾向がある。</li> </ul>

中国	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 中国全土の炭素収支に関する統合解析などが行われている<sup>13)</sup>。窒素循環に関する事例研究は多いが、全体の収支を定量化する統合化には至っていない。</li> <li>● 有害物質の挙動や除去に関する研究、金属資源の開発やリサイクルの分野で特に優位性が高い。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 国内における炭素・窒素の現地観測研究は高麗大学などで行われている。広域的な解析やモデル研究例はまだ少なく人材育成の段階にある。</li> <li>● 多くの分野で論文数の絶対数は日本より小さいが、経年変化の傾向は日本と類似している。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 近年、GCP (Global Carbon Project) 韓国オフィスや国立生態学研究所が設立されるなど、物質循環分野の研究開発により多くのリソースを割り当てている。ソウル国立大学は韓国内のフラックス研究をリードしているだけでなく、気候変動への適応の観点からも研究を進めている。</li> <li>● 有害物質の挙動分野では、日本と比べると研究が増えている。</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

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 参考文献

- 1) Steffen, W., et al. (2015), Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet, *Science*, 347, 1259855, doi:10.1126/science.1259855.
- 2) Baldocchi, D., et al. (2001), FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 2415–2434.
- 3) Saatchi, S. S., et al. (2011), Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents, *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.*, 108, 9899–9904, doi: 10.1073/pnas.1019576108.
- 4) P. Wunderlin, M.F. Lehmann, H. Siegrist, B. Tuzson, A. Joss, L. Emmenegger, and J. Mohn, Isotope signatures of N<sub>2</sub>O in a mixed microbial population system: constraints on N<sub>2</sub>O producing pathways in wastewater treatment, *Environmental Science and Technology*, 47, 1339-1348, 2013.
- 5) D.A. Stolper, M. Lawson, C.L. Davis, A.A. Ferreira, E.V. Santos Neto, G.S. Ellis, M.D. Lewan, A.M. Martini, Y. Tang, M. Schoell, A.L. Sessions, and J.M. Eiler, Formation temperatures of thermogenic and biogenic methane, *Science*, 344, 1500-1503, 2014.
- 6) S.B. Hodgkins, M.M. Tfaily, C.K. McCalley, T.A. Logan, P.M. Crill, S.R. Saleska, V.I. Rich, and J.P. Chanton, Changes in peat chemistry associated with permafrost thaw increase greenhouse gas production, *Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America*, 111, 5819-5824, 2014.
- 7) T. W. Wilson et al., A marine biogenic source of atmospheric ice-nucleating particles, *Nature*,

- 525, 234-238, 2015.
- 8) Le Quéré, C., et al. (2015), Global carbon budget 2015, *Earth System Science Data*, 7, 349–396, doi:10.5194/essd-7-349-2015.
  - 9) Tian, H., et al. (2015), Global patterns and controls of soil organic carbon dynamics as simulated by multiple terrestrial biosphere models: current status and future directions, *Global Biogeochem. Cycles*, 29, doi:10.1002/2014GB005021.
  - 10) Hajima, T., A. Ito, K. Tachiiri, and M. Kawamiya (2014), Uncertainty of concentration – terrestrial carbon feedback in the Earth System Models, *Journal of Climate*, 27, 3425–3445, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00177.1.
  - 11) Ito, A., and M. Inatomi (2012), Use and uncertainty evaluation of a process-based model for assessing the methane budget of global terrestrial ecosystems, *Biogeosciences*, 9, 759–773, doi: 10.5194/bg-9-759-2012.
  - 12) Melillo, J. M., J. M. Reilly, D. W. Kicklighter, A. C. Gurgel, T. W. Cronin, S. Paltsev, B. S. Felzer, X. Wang, A. P. Sokolov, and C. A. Schlosser (2009), Indirect emissions from biofuels: how important?, *Science*, 326, 1397–1399, doi: 10.1126/science.1180251.
  - 13) Piao, S., J. Fang, P. Ciais, P. Peylin, Huang.Y., S. Sitch, and T. Wang (2009), The carbon balance of terrestrial ecosystems in China, *Nature*, 458, 1009–1013, doi: 10.1038/nature07944.

### 3.2.5 健康・環境影響

#### （１）研究開発領域の簡潔な説明

都市化、産業化による局所的な環境汚染、近隣国からの越境汚染、また、温暖化や海洋汚染をはじめとする地球規模の環境汚染・環境劣化は、人の健康や生物に影響をもたらすことが危惧されている。このような社会的要因や地球環境・地域環境要因による健康や生物への影響を把握あるいは予測し、対策につながる科学的知見を提供するための研究開発領域である。

#### （２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

##### [意義]

環境は人類、生物種繁栄の基盤であり、健康は個人・個体生存の礎である。過去の公害事例では、強毒性の少数の汚染物質による健康や生物への影響が問題となった。昨今、先進国においては、以前見られたような強毒性物質の大量曝露やそれによる健康影響（毒性影響）発現の可能性は減じている。しかし、残留性有機汚染物質（POPs：Persistent Organic Pollutants）による健康・生物影響、特に長期影響や継世代影響の問題をはじめ、多くの未解決課題が残存している。例えば、弱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・生物影響の問題、ナノマテリアル等、新規素材による健康・生物影響はその代表といえる。また、生活習慣病やアレルギー疾患などのいわゆる「現代病」の激増・悪化と環境要因の関連も指摘され、そのメカニズムも明らかにされつつある。しかし、これらに係る研究の集積は十分とはいえない。一方、進行しつつあ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や水系感染症の増加、節足動物媒介感染症の分布変動、ヒートアイランド現象とも関連した熱中症増加等の問題が、また、オゾン層破壊に関連し、紫外線増加による皮膚ガン増加といった問題も危惧されている。このように、気候変動、オゾン層破壊、資源循環などの地球レベルの環境問題が健康に与える影響の把握も重要性を増している。

本領域は、種々の環境の変容による人の健康や生物への影響を把握あるいは予測し、対策、軽減、未然防止に結びつけることを目標とし、人類・生物の持続可能な繁栄・生存に直結する重要な意義をもつ。従来と異なるアプローチが必要とされている領域でもある。

##### [動向（歴史）]

欧米では1930～40年代に大気汚染の問題が発生した。日本でも1950年代の公害に始まり、産業に起因する重金属やコンビナートの排煙が健康被害をもたらした。これらは、カドミウム、水銀、硫酸化物等の大量曝露による毒性が健康影響をきたした事例であった。こうした典型的な公害問題に対しては、1967年の公害対策基本法を皮切りに、排気ガス、工場排水の法的規制（質・量の両側面から）が行われるとともに、工場廃水・排気・自動車排気の処理技術の進歩などにより汚染の軽減が行われた結果、無制限に汚染が激化・拡散する状況を防ぐことができた。ただし、大気汚染における窒素酸化物のように、軽減まで長期間を要し

た例もある。こうした公害の問題を受け、現在も実施されている化学物質の影響評価は、単一物質の大量曝露時に、死亡や臓器障害を代表とする毒性影響を指標として実践されているのが実状である。

一方、1962年に『沈黙の春』が出版され、DDT等が母乳から排泄されていることも報告された。1980年代半ばから、内分泌かく乱化学物質（EDCs、環境ホルモン）の問題が認識されるようになり、1996年には『奪われし未来』が出版された。強毒性物質の禁止・削減後も生物個体数が回復しないことから、少量でも悪影響をきたす物質がある可能性が示された。これらの物質は、従来の「毒性」とは異なり、ホルモン受容体等を介した生体内シグナルの「かく乱」により影響を及ぼしているのではないかと考えられるようになった。1996年、欧州委員会が内分泌かく乱化学物質に関する初の国際会議を英国ウェブリッジで開催した。米国では、1997年に環境保護庁（EPA）が内分泌かく乱化学物質に関するワークショップ（スミソニアン会議）を開催した。日本では、1998年に「内分泌攪乱化学物質の健康影響検討会」発足し（厚生省）、「環境ホルモン戦略計画 SPEED'98」が発表（環境庁）され、省庁での取り組みが本格化した。同年、科学技術新興機構（JST）のCRESTでは内分泌かく乱化学物質問題の本質的な理解と解決をめざした研究を対象とする「内分泌かく乱物質」研究領域が発足した。2012年のWHO/UNEPによる報告書である「State-of-the-Science of Endocrine Disrupting Chemicals—2012」では、複数の内分泌かく乱化学物質が協同して相加的効果を発揮する可能性があることが述べられた。生涯にわたり様々な疾病に対する脆弱性を増大させる可能性<sup>1)</sup>や、影響が継代的に伝搬する現象も報告された<sup>2)3)</sup>。

このように、かつてはDDTやダイオキシンなど、少数の物質のみを影響評価の対象としていたが、現在汎用されている難燃剤や可塑剤、界面活性剤、食品添加物など、多種多様な毒性の弱い物質をも対象とし、内分泌系のみならず、神経系や免疫系も含めたかく乱影響を評価すべきであるという考え方も提唱されるようになってきている。

いわゆる環境汚染ではないが、環境と健康との関係を扱う研究で、1990年代中頃からの注目すべき動向として、社会疫学があげられる。個人や地域の持つ社会的特性が当人や住民の健康レベルを左右するという、直感的には当然と思われる仮定を綿密な調査で実証した分野であり、多くの成果をあげた。物理化学的要因と社会要因は、ある意味では互いにノイズの関係にあるともいえるが、現在に至っても両者をバランスよく組み合わせた研究はそれほど多いとはいえない。

また、近年の動向として、環境疫学に限らず疫学研究一般が大型化してきていることがあげられる。環境疫学では、世界各国で10万人を超える規模で長期間にわたり追跡調査を行い、得られた情報や試料を解析する疫学研究が、多数実施されるようになってきた。50カ国300機関の共同研究として2004年と13年の2回実施された世界の疾病負荷研究（Global Burden of Disease Study）では、死亡と疾病への罹患を同一の尺度（DALYs；障害調整生命年と訳されている）で表現し、問題のある国・地域や、負荷の大きな疾病をわかりやすく表現し、特に精神疾患のようなただちに人命を奪わない疾患の重要性を明らかにするなど成果を上げた。環境中の様々な疾病リスク因子についての分析<sup>4)</sup>も行っている。

局所的な環境汚染のみならず、近隣国からの越境汚染、また、地球温暖化やそれによる異常気象、海洋を広く汚染するマイクロプラスチックやPOPs、オゾン層破壊をはじめとする地球規模の環境汚染・環境劣化が、人の健康や生物に影響をもたらすことも危惧されてきた。

リオ・サミット (1992) や京都議定書を採択した COP3 (1997) のあった 1990 年代以降、地球規模課題の中でも化学物質のインパクトがとりあげられている。その健康影響メカニズムは複雑であり、従来の化学物質の毒性影響という図式だけでは捉えきれない。例えば、CO<sub>2</sub> 発生→温暖化→媒介動物の生息域のシフト→感染症分布の変化、あるいは過剰の化学肥料投入・生活排水→N、P による閉鎖的水系の富栄養化→生態系破壊→環境の劣化・漁業の衰退、農薬→pollinator (送粉者) の衰退→作物収量の減少→栄養状態悪化などである。課題と対策が国境を越えはじめたことを受け、化学物質関連の様々な国際的取り組みが増えた。主要なものをあげると、CFC の規制に関するモントリオール議定書 (1989)、化学物質管理のための戦略的アプローチ (SAICM、2002)、POPs を規制したストックホルム条約 (2004)、欧州の化学物質に関する包括的な取り決めである REACH 規制 (2007)、水銀の使用・国際的流通に関して定めた水俣条約 (2013) などがある。

また、2009 年にスウェーデンの研究者グループが提唱した Planetary boundaries (PB)<sup>5)</sup> では、超えるべきでないものとしてあげられた 8 つの boundary (境界) に、化学物質による汚染、大気中のエアロゾルの 2 つが記載された。しかし、その境界値 (それを超えると不可逆的なフェーズに入るような値) はいずれも不明とされている。2015 年夏には、Lancet とロックフェラー財団の共同研究により、Planetary Health (人間とその文明は健全な自然環境とその賢明な管理の上に成立するもの) という概念が提唱され、その中にも化学物質についての言及が見られる。同年終盤に採択された持続可能な開発目標 (SDGs) の第 3 目標は健康と福利であるが、その下位目標の一つに、化学物質による健康被害の軽減がうたわれている。

局所・地域に留まらず、広域かつ地球規模の視野を持って研究や取り組みを推進することが不可欠であることも認識されてきている。

### (3) 注目動向

[新たな技術動向]

- オミクスの発展、AOP (Adverse Outcome Pathway)

多くのオミクス (Genomics, proteomics, lipidomics, metabolomics など) やオーム (transcriptosome, proteome など) が考案されている。試料に含まれる微量で多種類の (ただし一定の性質は共有する) 化学物質群を分離・同定し、さらには定量する技術であり、生体内で生じている物質代謝にかかわる出来事を網羅的に定量化・可視化する手段として広く活用されており、実験的な毒性学、環境疫学のいずれの研究にも応用可能である。環境汚染の生体影響に関する分野では、従来、リスク評価を最優先し、量-反応関係として出入口のみの関連が解析の中心であった。その途中のブラックボックスであった過程を明らかにすることにより、化学物質の生体影響の本質に迫る手法が AOP (Adverse Outcome Pathway)<sup>6)</sup> であり、生体内の様々な代謝過程に関する知識の蓄積と、分析技術の進展によって実現されるようになった。

- in vitro アッセイ評価

米国環境保護庁 (EPA) が開発した ToxCast のように、数多くの化学物質における活性・pathway データを迅速に導き出すことのできる手法に焦点が当てられている。また、ヒト

や実験動物由来の細胞系だけでなく、遺伝子配列の解析から野生動物の遺伝子を組み込んだレポーター遺伝子アッセイも種間の感受性評価に有用である。

• ビッグデータ、地球観測・衛星観測データの活用

様々な領域のデータベースが整備され、公開も進み（入手可能性が増し）、衛星や地上のステーションによるモニタリングのデータが健康の研究に利用できるようになってきた。こうしたデータの活用により、世界の大気汚染による死亡者がマラリアとエイズを合わせた死者より多いとの研究報告<sup>7)</sup>や、熱波の夜の最低温度が高い地域で高齢者の死亡率が高かったとの報告<sup>8)</sup>、さらには人間活動のデータも活用して、マラリアやデング熱の伝播に人間の移動がどの程度寄与するかといった分析<sup>9)10)</sup>が行われている。こうした環境データと健康データの組み合わせは、空間分解能の優れた（衛星）画像撮影・分析の技術発展、いわゆるダウンスケーリングと呼ばれる広範囲のデータから小地域の詳細データを構築する手法の開発によって可能<sup>11)</sup>となってきた。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- 小児を対象とする大規模なコホート研究として、日本ではエコチル調査（環境省）や東北メディカル・メガバンク（文部科学省）などが実施されている。米国でも10万人の子どもを成人まで追跡するNational Children's Studyが計画され2013年までに予備調査を終了したが、本調査開始前に、プロジェクトの目標達成は困難であるとの判断のもとに中止された<sup>12)</sup>。ヨーロッパの8カ国が参加するHELIX (Human Early-Life Exposome) は28,000組の母子ペアを追跡する事業で、exposome という概念を看板に現在進行形である<sup>13)</sup>。Exposome とは、従来の様々な omics/ome が生体反応の包括的情報であるのに対して、多様な環境要因への曝露の包括的情報を目指すものである。
- EUのSolutionsは、ヨーロッパ、ブラジル、中国およびオーストラリアから39機関が参加するプロジェクトである。河川における有害化学物質を現在の科学技術を結集して評価し直すために、化学分析から影響分析にわたる広範な領域をカバーしている。ライン川やドナウ川流域の生態系と人の健康における化学物質リスクの問題解決のための総合的な取り組みとして2013年より（5年計画）開始された。
- 北欧を中心とするEUのMARSプロジェクトも注目される。16の河川流域のケーススタディによって各流域における生態系の状態と化学物質およびその他の抑圧因子の解明を目指している。
- カナダ環境・気候変動省と保健省は、有害な化学物質を特定し、適切に管理するための包括的統合戦略「化学物質管理計画（CMP）」に投資すると発表した<sup>14)</sup>。これまでに、優先物質のうち、約2750種類の化学物質のリスク評価が終了した。継続により、CMPの次期段階で残る1550物質の評価を完結し、次世代の人々と環境を有害化学物質のリスクから守るとともに、科学的根拠のある健全な化学物質管理で引き続き世界をリードしていくとしている。
- 米国環境保護庁（EPA）は、水の再利用や保全策が人と生態系の健全性に与える影響に関する研究に助成すると発表した<sup>15)</sup>。水の持続可能な再利用を促進するため、飲用水への再利用や地下水補充などが人や生態系の健康にどう影響するかを評価する。
- 持続可能な消費生産センター（CSCP）など欧州の機関が、健康と環境を守るためにライ

フスタイルをどのように変えていけばよいかを探る新プロジェクト「INHERIT」に着手した<sup>16)</sup>。住環境、移動、消費（食品、食習慣等）の3つに絞り、健康と環境を守る生活につながる分野横断的な施策を探る。

- ドイツ連邦環境省（BMUB）とドイツ化学工業会は、人体中の化学物質の分析方法を開発し測定するヒト・バイオモニタリング・プロジェクトを実施している<sup>17)</sup>。人における曝露が増加傾向にあり、人体に影響をおよぼす可能性がある50物質（群）の分析方法を開発しようとするものである。新分析方法は、ドイツ研究振興協会によって検証されたのち、第5次ドイツ健康環境調査と環境試料バンクのサンプルとして利用される。
- 米国環境保護庁（EPA）は、人のホルモン機能をかく乱する可能性のある化学物質を自動でスクリーニングする新検査方法を発表した<sup>18)</sup>。この手法は、数千もの化学物質を同時に検査し、計算モデルを利用して活性を予測するもので、従来の検査に比べ、時間も動物実験もコストも少なくて済むという。
- ドイツ BMUB と連邦環境庁（UBA）のバンクでは1980年代から人と環境の標本を収集しており、これにより国民の化学物質への曝露状況やその変遷、環境政策の有効性を示すデータが得られるという。新調査は、子どもと若者に重点を置き、重金属、多環芳香族炭化水素、プラスチックの可塑剤や溶剤などを対象としている<sup>19)</sup>。

#### （4）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

- 1990年代終盤には環境・健康をめぐる多くの国内外の取り組みが行われたにも関わらず、当時提起された多くの問題—いわゆる低用量効果（low-dose effect）、複合曝露、継世代影響などの問題—には、今なお答えが出ていないといえる。端的にいえば、我々の多くが日常接する化学物質の中から曝露量の多い10種類を選んで、総体としての健康へのインパクトはどの程度のものか、という質問には極めて曖昧な答えしかできないのが現状である。ほぼ単一の物質の影響のみを標的とし、さらに量-反応関係（入口と出口）を出発点としてきた従来のアプローチでは限界がある<sup>20)21)</sup>。  
上記の原因としては、細かい実験の手法の違いが大きな結果の違いを生む、再現性が得難い、時間・資金・労力が嵩むなどといった点があげられる。古くから指摘があったが、その背景には、動物実験における通常あまり注意が払われないような条件の違い等の要素がある（参考文献22など参照）。例えば、腸内細菌のパターンが栄養素や化学物質の代謝・毒性に影響を及ぼすという知見が増えてきている<sup>23)</sup>。
- 環境要因、健康・生物影響のいずれも多岐にわたるが、一部の環境要因による一部の健康・生物影響が研究対象となっているに過ぎない。高感受性（脆弱性）集団を対象とした研究、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、端緒についたばかりという状況にある。
- 曝露は本来、対象となる集団の個々の構成員について時間的な変化を含めて評価されるべきものだが、これを得ることは技術的に困難であった。多くの曝露情報は（対象とする環境要因の地理的な分布に基づく）集団の平均的な推定や、長時間の平均的な推定値に過ぎない場合が多い。

- 現在市場に出回っている化学物質の数百種が内分泌かく乱性を有するとされているが、生態系への影響を評価している物質は限定されている。また、内分泌かく乱化学物質（EDCs：Endocrine Disrupting Chemicals）の代謝産物や分解物、製造工程および廃棄処理過程で生じる不純物や非意図的生成物についての調査や毒性影響に関する研究も極めて少ない。
- EDCs を添加された製品の中には他国へ輸出されるものもあり、開発途上国などでは不適切な処理により環境汚染や曝露が深刻化する可能性がある。これまで得られた研究データは先進地域のものが主であり、アジア、アフリカ、中南米の開発途上国のデータは依然として欠落している。
- 実験的研究において、人への外挿手法が未確立である。
- ヒトと同様に、野生動物も EDCs 曝露のみによる影響を評価するのはほぼ不可能である。汚染地帯と非汚染地帯に生息する個体群間で観察される生体影響の相違などから予想はされるが、他の人為もしくは自然由来のストレスの寄与が存在するため解釈を複雑にしている。さらに、classical POPs を除く EDCs による野生動物の調査研究は、魚類を除き依然として少ない。
- 対象集団が大規模になること、多くの環境要因の情報を得て解析するということが、再現性の検証を難しくするというジレンマがある。また、例えば気候変動の影響について、現実の観測データから再現性を得ることは不可能であるし、過去に前例がない現象を追っているため、実験室的なあるいは繰り返し観察による再現性を検証すること自体が困難である。
- ミレニアム生態系評価ですでに指摘されていたように、環境の劣化による健康被害には、例えば生態系の破壊による食料生産の変化、感染症分布の変化など間接的影響も多く、その規模が無視できない<sup>24)</sup>。こうした複雑な影響についても、AOP と同様の考え方を適用して、将来的に定量的予測を可能とするモデル構築に向け、モジュール開発を行うことが期待される。
- 既存疾患の悪化や「現代病」の増加・悪化における環境要因の寄与率推計は未確定である。

[今後取組むべき研究テーマ]

- 環境要因の作用メカニズムの解明  
多くの研究は健康インパクト（毒性を含む）に至る経路のごく一部を点の形で見ていたといえる。今後は、AOP のように曝露から影響が出るまでの一連の経路を把握する線としてのアプローチ、さらには複数の経路の相対的な寄与を視野にいたした面としてのアプローチが必要になると考えられる。面的な解析が可能になれば、複合曝露（物理的要因と化学的要因のようなモードの異なるものを含む）や低用量効果などの問題の突破口となる可能性がある。
- 複合曝露を評価できるアプローチ法の検討  
例えばダイオキシンの TEF（毒性等価係数）や有機リン系農薬で用いられている既存のアプローチに加え、すでに提唱あるいは試行されている、共通のエンドポイントに焦点を当てたアプローチ、エクスポゾーム（exposome、生涯の全曝露量）のような考え方も含めたアプローチも並行して試す必要があると考えられる。

- ノイズやブラックボックスを積極的に検討対象とする研究  
ブラックボックスであった遺伝的要因と環境因子の相互作用についてはすでに多くの研究が進んでいるが、これを体系的に進める仕組みづくりが必要と思われる。また、腸内細菌のパターンや飼育条件のように、従来あまり注意を払われていない環境変数について、明確な論拠のもとに研究を行っていく必要がある。例えば、単一の化学物質の影響が欧米とアジアで異なる原因は、遺伝的・生理的・環境的要因のいずれにも求めることが可能である。
- 一般的な非伝染性疾患（NCDs）のリスクと化学物質曝露との関係に関する研究  
がんを中心に古くから研究はあるが、糖尿病、肥満、変性性の神経疾患など、多くの環境・遺伝的要因が関わり罹患率も高い疾患の発症に、化学物質への曝露がどの程度量的に関わるのかは難問であり、ブラックボックスの中身を含めた影響メカニズムの解明、ビッグデータの活用、複合曝露の解析方法などの解決が求められる<sup>25)26)</sup>。
- かく乱影響の評価  
内分泌かく乱以外にも、神経・行動のかく乱や免疫のかく乱についても、いっそうの研究の推進が望まれる。
- 分析法の改良および開発  
低濃度で存在する様々な物質を把握するための、高精度分析や同時測定法の改良や開発は依然として優先度が高い。
- 構造活性相関研究の向上  
化学物質の構造と生物学的な活性の間関係である構造活性相関に関する研究の、さらなる推進・向上が望まれる。
- ICTの活用により環境要因を同定する研究  
近年のICTの進歩により、様々な環境要因についての個人曝露情報を時空間的に追跡する手段が整備されてきており、これを活用したあらたな曝露評価により、解析の精度を格段に向上できる可能性がある。
- 健康影響に関する予測力の高いモデルの構築  
地球規模環境問題による健康影響については、再現性に基づく判断を待つわけにはいかない（手遅れになる）ため、予測力の高いモデルの構築が必要となる。環境要因の健康インパクト予測は、上述の諸問題が解決できないと原理的に困難であろうから、不十分な情報に基づきながら「それほど間違えることのない予測モデルの開発が望まれる。
- PB（Planetary Boundary）の健康影響の観点からの検証  
PBの境界値は、健康影響ではなく、気候システムと生態系への影響に基づいて決められているため、健康影響という点から見直す必要がある。化学物質やエアロゾルのPBは未確定であり、健康インパクトに基づいて決める必要性は高いと思われる。
- 物質の越境移動と開発途上国の汚染実態  
輸出入される製品中の含有量、大気・水経路による移動拡散（日本の場合であれば黄砂など）、そして開発途上国を対象とした環境汚染（発生源と曝露源）とヒト・野生動物への曝露・毒性に関する包括的・長期的（経年変動）調査が求められる。
- 代替物質の調査  
ある化学物質の生産・使用が規制された場合、代替物質が使用されることになるが、そ

の環境汚染と毒性影響の調査が求められる。また、環境分解産物や生体内代謝物などの実態も把握することが求められる。

### （５）政策的課題

- 政策決定者に科学的な情報を適切に伝えるしくみ・人材の養成が必要である。本領域では再現性が難しい課題が増えると考えられ、**evidence-based**による意思決定では手遅れになる可能性がある。予測に基礎をおく意思決定（予防原則の考え方も援用されるべき）が必要な局面も増えると思われる。科学的情報の不確定性を減らす努力とともに、不確定性をもった情報をどのように理解し、政策に活用するかは科学的・政策的両側面をもつ課題である。ステークホルダー間で、**evidence**にも不確定性が伴うという認識が共有されることや、当事者による時機を得た情報共有が必要であり、そのための制度づくりも求められる。
- 研究開発で健康データを積極的に活用できることが必要であり、個人のプライバシーに抵触しかねない情報について、技術的工夫とともに政策的判断も求められる。
- ヨーロッパを中心とする動物愛護の観点から動物実験が徐々に難しくなりつつある。また、ヨーロッパでは、ある化学物質に有害性の懸念が生じると、時間をかけたリスク評価よりも物質を代替・禁止する方向性へ移りつつあり、管理対象とされる化学物質が増大し負担も大きくなっている。
- 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。
- 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・生物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。
- 広範囲にわたる環境要因による健康・生物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、生物種の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望まれる。

### （６）キーワード

残留性有機汚染物質（POPs）、内分泌かく乱化学物質（EDCs）、新規素材、ナノマテリアル、マイクロプラスチック、難燃剤、可塑剤、界面活性剤、食品添加物、健康影響、高感受性（脆弱性）要因、継世代影響、毒性影響、かく乱影響、内分泌系、神経系、免疫系、現代病、生活習慣病、アレルギー、複合曝露、複合影響、低用量曝露、現代病、構造活性相関、*in vitro* アッセイ、オミクス（オーム）、AOP（Adverse Outcome Pathway）、一斉多種分析、ビッグデータ、地球観測・衛星観測データ、ダウンスケーリング、疾病負荷研究、大規模コホート、大規模疫学調査、影響予測モデル、公害、社会疫学、環境疫学、地球温暖化、海洋汚染、熱中症、越境汚染、Planetary boundary（PB）、実験動物、動物愛護、野生生物、SAICM、水俣条約

(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 27-47)	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 基礎研究のレベルは高い。化学物質影響、気候変動影響などで報告数も増え、レベルの高い研究成果も出ている。革新的な研究成果の発信もあるが、チャレンジングな課題への取り組みにやや不足が感じられる。</li> <li>● 内分泌かく乱作用が疑われる化学物質の試験法について、メダカを対象とした <i>in vitro</i> および <i>in vivo</i> スクリーニング試験、そして <i>in vivo</i> 確定試験が開発され、アフリカツメガエルとミジンコについても検討が進んでいる。また、低用量・複合曝露影響やエピジェネティックな世代を超えた影響についての基礎研究も展開されている。</li> <li>● 内分泌かく乱化学物質 (EDCs) について、下水処理過程における挙動や除去効率の調査研究、下水処理水の流入河川に棲息する野生魚の汚染実態調査、鳥類や海棲哺乳類の蓄積特性に関する研究が実施されているが、陸棲動物の調査が乏しいことに加え、高等野生動物の場合、POPsを除く EDCs データは極めて少ない。</li> <li>● 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>● ビッグデータの利用をはじめとして、斬新な手法を取り入れた研究はまだ少ない。一方で大規模コホートが確実に運営されており、将来的に多くの知見を産み出すことが期待できる。</li> <li>● 日米二国間協力による魚類 (メダカ) および無脊椎動物 (ミジンコ) の多世代繁殖試験の開発がおこなわれており、トランスジェニック魚を用いたバイオアッセイ系の開発や分子メカニズムの解析も進んでいる。高等動物に関しては、一部鳥類や鰭脚類 (ききゃくろい) について種固有の遺伝子を組み込んだレポーター遺伝子アッセイによる EDCs 作用の感受性が評価されている。</li> <li>● 下水処理技術の開発研究と副生成物の影響評価、未知物質の測定技術に関する開発もおこなわれている。</li> <li>● 学際的研究開発、例えば化学分析と毒性分野の研究者による共同研究成果が、欧米と比べ乏しい。</li> </ul>
米国 33)34) 48)54)	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 基礎研究は、多岐にわたり、かつレベルが高い。新しいアプローチが絶え間なく提案されている。大気汚染に関しても、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。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> <li>● 日本と同様に (一部共同で)、内分泌かく乱作用が疑われる化学物質の <i>in vitro</i> および <i>in vivo</i> スクリーニング試験、そして <i>in vivo</i> 確定試験が開発されており、低用量・複合曝露影響やエピジェネティックな世代を超えた影響についての基礎研究も展開されている。</li> <li>● EDCs の下水処理過程における挙動や除去効率の調査、そして下水処理水の流入河川に棲息する野生魚の National study も実施されている。野生高等動物についても以前は、classical POPs の蓄積特性に関する研究が実施されていたが、現在はカナダの POPs 関連物質調査を除き、ほとんど実施されていない。</li> <li>● 予算面、人材面で日本を凌駕している。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 他分野との連携が活発になってきている。大規模コホート/大規模モニタリングも盛んで、総合的に環境インパクトを捉えようとする姿勢が目立つ。(NCSは中止)</li> <li>● 米加共同研究にて、実環境の池を調査域とした大規模なエチニルエストラジオールの長期生態影響調査が実施され、個体群への影響のみならず種間の相互作用や生態系全体への影響が明らかとなった (学際研究)。</li> <li>● 日米二国間協力による多世代繁殖試験の開発がおこなわれており、トランスジェニック魚を用いたバイオアッセイ系の開発も進んでいる。鳥類種固有の遺伝子を組み込んだレポーター遺伝子アッセイによる EDCs 作用の感受性が評価されているが、高等動物の感受性に関する研究は少ない。</li> <li>● 下水処理技術の開発研究と副生成物の影響評価、未知物質の測定技術に関する開発もおこなわれている。</li> <li>● 日本に比較し、大きな予算が配分されている。</li> </ul>

欧州 33)34) 55)-66)	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EU機関のみならず、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。質の高い研究成果が発表されており、EU内を中心に多国間共同研究も多い点が特徴である。北欧からの報告が近年増加している。</li> <li>● 日本と同様に（一部共同で）、内分泌かく乱作用が疑われる化学物質の <i>in vitro</i> および <i>in vivo</i> スクリーニング試験、そして <i>in vivo</i> 確定試験が開発されており、低用量・複合曝露影響やエピジェネティックな世代を超えた影響についての基礎研究も展開されている。</li> <li>● EDCsの下水処理過程における挙動や除去効率の調査、そして下水処理水の流入河川に棲息する野生魚のNational studyも実施されている。高等野生動物の蓄積特性に関する研究が実施されているが、POPsを除くEDCsデータは乏しい。</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。HELIXなどのユニークな試みが実施されている。</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、日本との大きな差とも考えられる。</li> <li>● 日英共同研究において、下水処理水中に残留するエストロゲン類似物質が魚類の性発達に与える長期的影響を調査し、エチニルエストラジオール 4 ng/Lに2年間曝露された全オス個体のメス化を報告した。</li> <li>● 欧州近海に棲息する鯨類の大規模調査が実施され、PCBsによる繁殖影響が強く示唆される結果を、学際研究の成果として2016年に報告している。</li> <li>● トランスジェニック魚を用いたバイオアッセイ系の開発は進んでいるが、高等動物のEDCsによる感受性の種差に関する研究は乏しい。</li> <li>● 下水処理技術の開発研究と副生成物の影響評価、未知物質の測定技術に関する開発も行われている。</li> </ul>
中国 34) 67)-70)	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 環境問題が深刻であるだけに、研究に多くの資源が割かれており、トップレベルの国際学術誌に掲載される論文が増え、着実に実力をつけている様子が伺える。教員や学生、研究者の陣容が急速に拡大しており、研究レベルは上がっている。研究論文の事前チェック体制が整備されており、今後、国際誌におけるシェアがさらに高まることに寄与するとも予想される。</li> <li>● 日中韓三カ国間協力による野生魚オス個体のビテログニン生成に関する調査が実施されており、東シナ海沿岸域の大都市部周辺海域や工業・港湾地域において魚類の繁殖異常を報告している。</li> <li>● 2015年、中国農業省が“NY/T2873-2015 Evaluation Method of the Endocrine Disruption Effects of Pesticides”を発表し、農薬の内分泌かく乱作用について調査を開始している。</li> <li>● 内分泌かく乱作用が疑われる物質について、下水処理過程における挙動や除去効率の調査、下水処理水の流入河川に棲息する野生魚の汚染実態調査、そして高等野生動物の曝露実態調査が近年増加している。</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> <li>● 欧米との共同実施体制を組んだ多数の社会実験的プロジェクトが稼働している。特に都市計画プロジェクトの中に健康を組み入れたような研究が多く、急成長している。</li> <li>● 内分泌かく乱作用が疑われる化学物質の <i>in vitro</i> および <i>in vivo</i> スクリーニング試験およびトランスジェニック魚を用いたバイオアッセイ系の開発が急速に進んでいる。</li> </ul>

韓国 34)71)	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> <li>● 大気汚染・温暖化については意欲的な取り組みもみられるが、全体として量感に欠ける。</li> <li>● 日中韓三カ国間協力による野生魚オス個体のピテログニン生成に関する調査が実施されており、東シナ海沿岸域の大都市部周辺海域や工業・港湾地域において魚類の繁殖異常を報告している。</li> <li>● 内分泌かく乱作用が疑われる物質について、下水処理過程における挙動や除去効率の調査、そして河川水や底質など環境試料のモニタリング事例は報告されているが、野生生物を対象としたEDCsによる汚染実態調査は、日米欧中と比べ少ない。</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。</li> <li>● 内分泌かく乱作用が疑われる化学物質のin vitroおよびin vivoスクリーニング試験およびトランスジェニック魚を用いたバイオアッセイ系の開発はおこなわれているが、応用研究や開発の報告事例も日米欧中と比べ少ない。</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

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献 (●は全体的に参考とした文献)

- JST-CRDS, 俯瞰ワークショップ報告書 環境分野の研究開発の概況

<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2016/WR/CRDS-FY2016-WR-06.pdf>

- 1) WHO/UNEP、内分泌攪乱化学物質の科学の現状 2012年版 意志決定者向け要約

[http://www.nihs.go.jp/edc/files/EDCs\\_Summary\\_for\\_DMs\\_Jpn.pdf](http://www.nihs.go.jp/edc/files/EDCs_Summary_for_DMs_Jpn.pdf)

- 2) Jirtle, R.L., Skinner, M.K., Environmental epigenomics and disease susceptibility, Nature Reviews Genetics, Volume 8, Issue 4, April 2007, Pages 253-262.

- 3) Chamorro-García, R., Sahu, M., Abbey, R.J., Laude, J., Pham, N., Blumberg, B., Transgenerational inheritance of increased fat depot size, stem cell reprogramming, and hepatic steatosis elicited by prenatal exposure to the obesogen tributyltin in mice, Environmental Health Perspectives, Volume 121, Issue 3, 2013, Pages 359-366.

- 4) Lim, S. (2012). "A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010." Lancet 380: 2224-2260.

- 5) Rockstrom, J. (2009). "A safe operating space for humanity." Nature 461: 472-475.

- 6) Villeneuve, DL. (2015). "Adverse Outcome Pathways." from

[https://www.toxicology.org/groups/ss/rass/docs/RASSwebinar\\_040815.pdf](https://www.toxicology.org/groups/ss/rass/docs/RASSwebinar_040815.pdf).

- 7) Lelieveld, J (2015). "The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale." Nature 525: 367-371.

- 8) Laaidi, K. (2011). "The Impact of Heat Islands on Mortality in Paris during the August 2003 Heat Wave." *Environmental Health Perspectives* 120: 254-259.
- 9) Wesolowski, A. (2014). "Quantifying travel behavior for infectious disease research: a comparison of data from surveys and mobile phones." *Scientific Reports* 4.
- 10) Wesolowski, A. (2012). "Quantifying the impact of human mobility on Malaria." *science* 338: 267-270.
- 11) Cooney, C. (2012). "Downscaling Climate Models." *Environmental Health Perspectives* 120: A22-28.
- 12) [http://acd.od.nih.gov/reports/NCS\\_WG\\_FINAL\\_REPORT.pdf](http://acd.od.nih.gov/reports/NCS_WG_FINAL_REPORT.pdf)
- 13) Vrijheid, M. (2014). "The Human Early-Life Exposome (HELIX): Project Rationale and Design." *Environmental Health Perspectives* 122: 535-544.
- 14) 国立環境研究所 環境展望台 海外ニュース「カナダ、化学物質管理計画に約4億9000万ドルを投資」(2016年5月30日発表) <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=19123>
- 15) 国立環境研究所 環境展望台 海外ニュース「アメリカ環境保護庁、水資源の再利用が健康に及ぼす影響についての研究を助成」(2016年3月22日発表) <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=18407>
- 16) 国立環境研究所 環境展望台 海外ニュース「持続可能な消費生産センター、健康と環境により暮らし方を探る学際プロジェクト INHERIT を開始」(2016年3月2日発表) <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=18263>
- 17) 国立環境研究所 環境展望台 海外ニュース「ドイツ連邦環境省、ヒト・バイオモニタリングに新たな評価対象物質4種を追加」(2015年8月13日発表) <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=16935>
- 18) 国立環境研究所 環境展望台 海外ニュース「アメリカ環境保護庁、化学物質の内分泌かく乱作用を計算モデルによって評価する新検査方法を発表」(2015年6月18日発表) <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=16533>
- 19) 国立環境研究所 環境展望台 海外ニュース「ドイツ、環境汚染物質への人間の曝露を示すデータ収集を推進」(2015年1月23日発表) <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=15371>
- 20) Kortenkamp, A. (2007). "Ten Years of Mixing Cocktails: A Review of Combination Effects of Endocrine-Disrupting Chemicals." *Environmental Health Perspectives* 115: 98-105.
- 21) Vandenberg, LN (2012). "Hormones and Endocrine-Disrupting Chemicals: Low-Dose Effects and Nonmonotonic Dose Responses." *Endocrine Rev* 33: 378-455.
- 22) Reardon, S. (2016). "A mouse's house may ruin studies (News)." *Nature* 530: 2264.
- 23) Betts, K. (2011). "A study in balance: how microbiomes are changing the shape of environmental health." *Environmental Health Perspectives* 119: A341-346.
- 24) Corvalan, C., S. Hales and A. McMichael (2005). *Ecosystems and human well-being: Health Synthesis*, WHO.
- 25) Barouki, R. "Developmental origins of non-communicable disease: Implications for research and public health." *Environmental Health* 11: 42.
- 26) Mostafalou, S. (2013). "Pesticides and human chronic diseases: Evidences, mechanisms, and perspectives." *Toxicology and Applied Pharmacology* 268: 157-177.

- 27) WHO/UNEP、内分泌攪乱化学物質の科学の現状 2012年版 意志決定者向け要約  
[http://www.nihs.go.jp/edc/files/EDCs\\_Summary\\_for\\_DMs\\_Jpn.pdf](http://www.nihs.go.jp/edc/files/EDCs_Summary_for_DMs_Jpn.pdf)
- 28) WHO, Endocrine disruptors and child health: Possible developmental early effects of endocrine disruptors on child health  
[http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/75342/1/9789241503761\\_eng.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/75342/1/9789241503761_eng.pdf)
- 29) 環境省, 第3回国際化学物質管理会議 (ICCM3) の結果について  
<http://www.env.go.jp/press/15736.html>
- 30) Jirtle, R.L., Skinner, M.K., Environmental epigenomics and disease susceptibility, *Nature Reviews Genetics*, Volume 8, Issue 4, April 2007, Pages 253-262.
- 31) Chamorro-García, R., Sahu, M., Abbey, R.J., Laude, J., Pham, N., Blumberg, B., Transgenerational inheritance of increased fat depot size, stem cell reprogramming, and hepatic steatosis elicited by prenatal exposure to the obesogen tributyltin in mice, *Environmental Health Perspectives*, Volume 121, Issue 3, 2013, Pages 359-366.
- 32) Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S., Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet, *Science*, Volume 347, Issue 6223, 2015, Pages 1259855-1259855-10.
- 33) Hecker, M., Hollert, H., Endocrine disruptor screening: regulatory perspectives and needs. *Environmental Sciences Europe*, Volume 23, Issue 1, 2011, Pages 1-14.
- 34) Bhandari, R.K., Deem, S.L., Holliday, D.K., Jandegian, C.M., Kassotis, C.D., Nagel, S.C., Tillitt, D.E., vom Saal, F.S., Rosenfeld, C.S., 2015. Effects of the environmental estrogenic contaminants bisphenol A and 17 $\alpha$ -ethinyl estradiol on sexual development and adult behaviors in aquatic wildlife species. *General and Comparative Endocrinology*, Volume 214, 2015, Pages 195-219.
- 35) Miyagawa, S., Lange, A., Hirakawa, I., Tohyama, S., Ogino, Y., Mizutani, T., Kagami, Y., Kusano, T., Ihara, M., Tanaka, H., Tatarazako, N., Ohta, Y., Katsu, Y., Tyler, C.R., Iguchi, T., Differing species responsiveness of estrogenic contaminants in fish is conferred by the ligand binding domain of the estrogen receptor. *Environmental Science & Technology*, Volume 48, Issue 9, 2014, Pages 5254-5263.
- 36) Ihara, M., Ihara, M.O., Kumar, V., Narumiya, M., Hanamoto, S., Nakada, N., Yamashita, N., Miyagawa, S., Iguchi, T., Tanaka, H., Co-occurrence of estrogenic and antiestrogenic activities in wastewater: quantitative evaluation of balance by in vitro ER $\alpha$  reporter gene assay and chemical analysis. *Environmental Science & Technology*, Volume 48, Issue 11, 2014, Pages 6366-6373.
- 37) Ihara, M., Kitamura, T., Kumar, V., Park, C., Ihara, M.O., Lee, S., Yamashita, N., Miyagawa, S., Iguchi, T., Okamoto, S., Suzuki, Y., Tanaka, H., Evaluation of estrogenic activity of wastewater: comparison among in vitro ER $\alpha$  reporter gene assay, in vivo vitellogenin induction, and chemical analysis. *Environmental Science & Technology*, Volume 49, Issue 10, 2015, Pages 6319-6326.

- 38) Tohyama, S., Miyagawa, S., Lange, A., Ogino, Y., Mizutani, T., Tatarazako, N., Katsu, Y., Ihara, M., Tanaka, H., Ishibashi, H., Kobayashi, T., Tyler, C.R., Iguchi, T., Understanding the Molecular Basis for Differences in Responses of Fish Estrogen Receptor Subtypes to Environmental Estrogens. *Environmental Science & Technology*, Volume 49, Issue 12, 2015, Pages 7439–7447.
- 39) Tohyama, S., Miyagawa, S., Lange, A., Ogino, Y., Mizutani, T., Ihara, M., Tanaka, H., Tatarazako, N., Kobayashi, T., Tyler, C.R., Iguchi, T., Evolution of estrogen receptors in ray-finned fish and their comparative responses to estrogenic substances. *Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, Volume 158, 2015, Pages 189–197.
- 40) Tanoue, R., Nomiya, K., Nakamura, H., Kim, J.-W., Isobe, T., Shinohara, R., Kunisue, T., Tanabe, S., 2015. Uptake and tissue distribution of pharmaceuticals and personal care products in wild fish from treated-wastewater-impacted streams. *Environmental Science & Technology*, Volume 49, Issue 19, 2015, Pages 11649–11658.
- 41) Suzuki, G., Sato, K., Isobe, T., Takigami, H., Brouwer, A., Nakayama, K., Detection of glucocorticoid receptor agonists in effluents from sewage treatment plants in Japan. *Science of The Total Environment*, Volume 527–528, 2015, Pages 328–334.
- 42) Kunisue, T., Higaki, Y., Isobe, T., Takahashi, S., Subramanian, A., Tanabe, S., Spatial trends of polybrominated diphenyl ethers in avian species: Utilization of stored samples in the Environmental Specimen Bank of Ehime University (*es*-Bank). *Environmental Pollution*, Volume 154, Issue 2, 2009, Pages 272–273.
- 43) Kunisue, T., Takayanagi, N., Isobe, T., Takahashi, S., Nakatsu, S., Tsubota, T., Okumoto, K., Bushisue, S., Shindo, K., Tanabe, S., Regional trend and tissue distribution of brominated flame retardants and persistent organochlorines in raccoon dogs (*Nyctereutes procyonoides*) from Japan. *Environmental Science & Technology*, Volume 42, Issue 3, 2008, Pages 685–691.
- 44) Tanabe, S., Ramu, K., Monitoring temporal and spatial trends of legacy and emerging contaminants in marine environment: Results from the environmental specimen bank (*es*-BANK) of Ehime University, Japan. *Marine Pollution Bulletin*, Volume 64, Issue 7, 2012, Pages 1459–1474.
- 45) Kim, E.-Y., Suda, T., Tanabe, S., Batoev, V.B., Petrov, E.A., Iwata, H., Evaluation of relative potencies for in vitro transactivation of the Baikal Seal aryl hydrocarbon receptor by dioxin-like compounds. *Environmental Science & Technology*, Volume 45, Issue 4, 2011, Pages 1652–1658.
- 46) Mol, T.L., Kim, E.-Y., Ishibashi, H., Iwata, H., In vitro transactivation potencies of black-footed albatross (*Phoebastria nigripes*) AHR1 and AHR2 by dioxins to predict CYP1A expression in the wild population. *Environmental Science & Technology*, Volume 46, Issue 1, 2012, Pages 525–533.
- 47) Zushi, Y., Hashimoto, S., Tanabe, K., Nontarget approach for environmental monitoring by GC × GC-HRTOFMS in the Tokyo Bay basin. *Chemosphere*, Volume 156, 2016, Pages 398–406.
- 48) Kidd, K. a, Blanchfield, P.J., Mills, K.H., Palace, V.P., Evans, R.E., Lazorchak, J.M., Flick,

- R.W., Collapse of a fish population after exposure to a synthetic estrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Volume 104, Issue 21, 2007, Pages 8897–8901.
- 49) Ankley, G.T., Bencic, D.C., Breen, M.S., Collette, T.W., Conolly, R.B., Denslow, N.D., Edwards, S.W., Ekman, D.R., Garcia-Reyero, N., Jensen, K.M., Lazorchak, J.M., Martinović, D., Miller, D.H., Perkins, E.J., Orlando, E.F., Villeneuve, D.L., Wang, R.-L., Watanabe, K.H., Endocrine disrupting chemicals in fish: developing exposure indicators and predictive models of effects based on mechanism of action. *Aquatic toxicology*, Volume 92, 2009, Pages 168–178.
- 50) Hecker, M., Hollert, H., Endocrine disruptor screening: regulatory perspectives and needs. *Environmental Sciences Europe*, Volume 23, Issue 1, 2011, Pages 1–14.
- 51) Du, B., Haddad, S.P., Luek, A., Scott, W.C., Saari, G.N., Kristofco, L.A., Connors, K.A., Rash, C., Rasmussen, J.B., Chambliss, C.K., Brooks, B.W., 2014. Bioaccumulation and trophic dilution of human pharmaceuticals across trophic positions of an effluent-dependent wadeable stream. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Volume 369, Issue 1656, 2014, Pages 20140058.
- 52) Letcher, R.J., Bustnes, J.O., Dietz, R., Jenssen, B.M., Jørgensen, E.H., Sonne, C., Verreault, J., Vijayan, M.M., Gabrielsen, G.W., Exposure and effects assessment of persistent organohalogen contaminants in arctic wildlife and fish. *Science of The Total Environment*, Volume 408, Issue 15, 2010, Pages 2995–3043.
- 53) Karchner, S.I., Franks, D.G., Sean W. Kennedy, S.W., Hahn, M.E., The molecular basis for differential dioxin sensitivity in birds: Role of the aryl hydrocarbon receptor. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Volume 103, Issue 16, 2006, Pages 6252–6257.
- 54) Richardson, S.D., Kimura, S.Y., Water analysis: Emerging contaminants and current issues. *Analytical Chemistry*, Volume 86, Issue 6, 2014, Pages 2813–2848.
- 55) Vulliet, E., Cren-Olivé, C., Screening of pharmaceuticals and hormones at the regional scale, in surface and groundwaters intended to human consumption. *Environmental pollution*, Volume 159, 2011, Pages 2929–2934.
- 56) Harris, C.A., Hamilton, P.B., Runnalls, T.J., Vinciotti, V., Henshaw, A., Hodgson, D., Coe, T.S., Jobling, S., Tyler, C.R., Sumpter, J.P., The consequences of feminization in breeding groups of wild fish. *Environmental health perspectives*, Volume 119, Issue 3, 2011, Pages 306–311.
- 57) Brion, F., Le Page, Y., Piccini, B., Cardoso, O., Tong, S.K., Chung, B. chu, Kah, O., Screening estrogenic activities of chemicals or mixtures in vivo using transgenic (cyp19a1b-GFP) zebrafish embryos. *PLoS ONE*, Volume 7, Issue 5, 2012, Pages e36069.
- 58) Stuart, M., Lapworth, D., Crane, E., Hart, A., Review of risk from potential emerging contaminants in UK groundwater. *The Science of the total environment*, Volume 416, 2012, Pages 1–21.
- 59) Petersen, K., Fetter, E., Kah, O., Brion, F., Scholz, S., Tollefsen, K.E., Transgenic

- (cyp19a1b-GFP) zebrafish embryos as a tool for assessing combined effects of oestrogenic chemicals. *Aquatic Toxicology*, Volume 138–139, 2013, Pages 88–97.
- 60) Gaw, S., Thomas, K. V., Hutchinson, T.H., Gaw, S., Sources, impacts and trends of pharmaceuticals in the marine and coastal environment. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, Volume 369, Issue 1656, 2014, Pages 20130572.
- 61) Álvarez-Muñoz, D., Rodríguez-Mozaz, S., Maulvault, A.L., Tediosi, A., Fernández-Tejedor, M., Van den Heuvel, F., Kotterman, M., Marques, A., Barceló, D., Occurrence of pharmaceuticals and endocrine disrupting compounds in macroalgae, bivalves, and fish from coastal areas in Europe. *Environmental Research*, Volume 143, 2015, Pages 56–64.
- 62) Ruhí, A., Acuña, V., Barceló, D., Huerta, B., Mor, J.-R., Rodríguez-Mozaz, S., Sabater, S., Bioaccumulation and trophic magnification of pharmaceuticals and endocrine disruptors in a Mediterranean river food web. *The Science of the total environment*, Volume 540, 2015, Pages 250–259.
- 63) Jepson, P.D., Deaville, R., Barber, J.L., Aguilar, À., Borrell, A., Murphy, S., Barry, J., Brownlow, A., Barnett, J., Berrow, S., Cunningham, A.A., Davison, N.J., Doeschate, M., Esteban, R., Penrose, R., Perkins, M.W., Smith, B., Stephanis, R. De, Tregenza, N., Verborgh, P., Fernández, A., Law, R.J., PCB pollution continues to impact populations of orcas and other dolphins in European waters. *Scientific Reports*, Volume 6, Issue 18573, 2016, Pages 1–17.
- 64) Weijs, L., Das, K., Siebert, U., van Elk, N., Jauniaux, T., Neels, H., Blust, R., Covaci, A., Concentrations of chlorinated and brominated contaminants and their metabolites in serum of harbour seals and harbour porpoises. *Environment International*, Volume 35, Issue 6, 2009, Pages 842–850.
- 65) Jaspers, V.L.B., Dirtu, A.C., MARCEL Eens, M., Neels, H., Blust, R., Covaci, A., Predatory bird species show different patterns of hydroxylated polychlorinated biphenyls (HO-PCBs) and polychlorinated biphenyls (PCBs). *Environmental Science & Technology*, Volume 42, Issue 9, 2008, Pages 3465–3471.
- 66) Schymanski, E.L., Singer, H.P., Slobodnik, J., Ipolyi, I.M., Oswald, P., Krauss, M., Schulze, T., Haglund, P., Letzel, T., Grosse, S., Thomaidis, N.S., Bletsou, A., Zwiener, C., Ibáñez, M., Portolés, T., de Boer, R., Reid, M.J., Onghena, M., Kunkel, U., Schulz, W., Guillon, A., Noyon, N., Leroy, G., Bados, P., Bogialli, S., Stipaničev, D., Rostkowski, P., Hollender, J., Non-target screening with high-resolution mass spectrometry: Critical review using a collaborative trial on water analysis, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, Volume 407, Issue 21, 2015, Pages 6237–6255.
- 67) Liu, J.-L., Wong, M.-H., Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs): a review on environmental contamination in China. *Environment international*, Volume 59, 2013, Pages 208–24.
- 68) Liu, J., Lu, G., Xie, Z., Zhang, Z., Li, S., Yan, Z., Occurrence, bioaccumulation and risk assessment of lipophilic pharmaceutically active compounds in the downstream rivers of

- sewage treatment plants. *Science of The Total Environment*, Volume 511, 2015, Pages 54–62.
- 69) Xie, Z., Lu, G., Liu, J., Yan, Z., Ma, B., Zhang, Z., Chen, W., Occurrence, bioaccumulation, and trophic magnification of pharmaceutically active compounds in Taihu Lake, China. *Chemosphere*, Volume 138, 2015, Pages 140–147.
- 70) Wu, J., Zhang, Y., Luo, X., She, Y., Yu, L., Chen, S., Mai, B., A review of polybrominated di-phenyl ethers and alternative brominated flame retardants in wildlife from China: Levels, trends, and bioaccumulation characteristics, *Journal of Environmental Sciences*, Volume 24, Issue 2, 2012, Pages 183-194.
- 71) Aoki, J. ya, Nagae, M., Takao, Y., Hara, A., Lee, Y.D., Yeo, I.K., Lim, B.S., Park, C.B., Soyano, K., Survey of contamination of estrogenic chemicals in Japanese and Korean coastal waters using the wild grey mullet (*Mugil cephalus*). *Science of the Total Environment*, Volume 408, 2010, Pages660–665.

### 3.2.6 化学物質リスク管理

#### （1）研究開発領域の簡潔な説明

化学物質リスク管理に関する研究開発領域には多様な研究課題が含まれる。特に、環境分析、毒性研究、理論・予測研究、および観察的研究が大きなテーマとなる。リスク管理自体に関する研究開発も重要である。本研究開発領域では、これらのうち、主に環境分析、毒性研究、予測研究および観察的研究について、現状と将来の見込みをまとめる。

#### （2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

化学物質リスク管理では、古くは公害問題への対処として、排出規制、環境規制のための基準値の設定と環境監視が課題となり、これらに毒性学や環境分析の分野が展開されてきたところであった。しかしながら、近年、化学産業技術の進歩とともに、国際的な、またより包括的な化学物質の管理が指向されつつある。

国際的な化学物質リスク管理の枠組みとしては、2002年ヨハネスブルグサミット(WSSD)で定められた実施計画で2020年までに化学物質の製造と使用による人の健康と環境への悪影響の最小化を目指すこととされ、そのための行動の一つとして、「国際的な化学物質管理のための戦略的アプローチ」(SAICM : Strategic Approach to International Chemicals Management)が2006年に定められた。より具体的には、化学物質管理に関連の深い、残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約、ロッテルダム条約、バーゼル条約や、新たに締結された水銀に関する水俣条約など、さまざまな国際条約による取り組みが進められている。

一方、化学産業・技術の進歩は社会に大きな利便をもたらしているが、同時に、少量多品種にわたる機能性物質の展開により、潜在的に管理が必要な可能性のある化学物質数が飛躍的に増大しており、多数の化学物質や多様な用途、また、人から生物まで多様な影響範囲に対応する包括的なリスク管理が求められている。

化学物質リスク管理に関する研究開発領域では、このような国内外の背景を踏まえて、近年さまざまな新たな展開が行われている。

[動向（歴史）]

化学物質リスク管理における課題を踏まえて、従来から環境化学物質・汚染物質の化学分析と毒性影響、生態影響に関する多くの研究が実施されてきた。特に、汚染物質の環境における存在や動態を把握する基礎となる分析化学を中心として研究開発が進められてきたと理解される。

しかしながら、近年は対処すべき物質数の継続的な増加、環境規制の強化とともに物質の機能性の向上にも関連してさらなる微量分析の必要性、対応すべき試料と媒体の増加、対象物質の物性範囲の拡大などの新たな課題に直面しており、これらに対処するための研究開発が必要とされている。

また、近年の化学物質リスク管理は、個々の排出規制等の単純な集合体ではなく、社会全

体での化学物質管理の枠組みとして捉えられることが一般的になっていることから、分析化学や影響研究のみならず、化学物質の環境排出量の推定、マテリアル/サブスタンスフローの把握、これらの将来予測やシナリオ予測のための環境動態モデルや理論毒性学などより体系的、包括的な研究の必要性が意識されている。これらの概念を図 3-5 に示す。

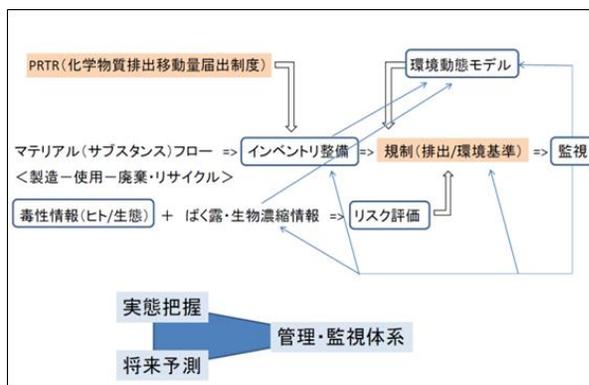


図 3-5 化学物質リスク管理の概念

(出典：JST-CRDS 俯瞰ワークショップ 報告書 国立環境研究所柴田フェロー資料<sup>1)</sup>)

本領域稿では、上記のような背景を踏まえて展開されている研究課題のうち、特に近年着目すべき取り組みの見られる環境分析技術（有機、無機および影響分析）、理論毒性学、大規模研究（大規模モデル技術、大規模疫学）を中心に注目動向をまとめる。

### (3) 注目動向

[新たな技術動向]

#### ■ 環境分析技術

環境分析技術のうち、有機化合物の分析については、サンプリング手法および分析技術の双方において、より広域・他地点・高頻度および同時多数の物質の網羅的一斉分析の技術開発が進められている。

広域・多地点・高頻度の普遍的モニタリングに対応するためのサンプリング技術としてパッシブサンプラーの開発が増えつつある<sup>2)</sup>。特に水質モニタリング技術の遅れから、水中パッシブサンプラーの開発が進められ、海洋モニタリングに有効とみられている。大気については Global Atmospheric Passive Sampling (GAPS) Network (カナダ主体、北極圏を中心に 7 か国、50 地点) が精力的に手法開発と応用展開を図っている。

採取した試料から可能な限り多くの情報を収集し、同時に個々の物質の同定を試みるために、GCxGC、LCxLC、LCxCE のような多次元分離技術<sup>3)</sup>や汚染源解析や未知汚染物質同定への ICR-FTMS や OrbitrapMS のような超高分解能質量分析技術の導入がトレンドの一つになっている。

その他には、リアルタイム計測やフィールドでの質量分析<sup>4)</sup>やマイクロデバイスの開発<sup>5)</sup>、バイオセンサのような生物応答の工学的実装<sup>6)</sup>、化学物質の毒性機構や生体中動態の解明のための質量イメージング分析<sup>7)</sup>が最新の動向といえよう。

無機分析については、従来の元素分析だけでなく、安定同位体比分析による有害金属元素

の研究が注目されている。環境中に遍在する有害金属のリスク管理を意図して、マルチコレクター型 ICP 質量分析装置を用いた高精度な安定同位体比分析による有害金属の発生源の推定と化学反応の機構解析がある。特に水銀は全球レベルで管理強化が求められている金属であり、水銀の同位体比計測技術は注目されている（例：参考文献 8）。分析技術に関しては、前処理手法の開発、ガスクロマトグラフ等の通常とは異なる試料導入系と接続した分析、さらに計測値の精度管理手法の確立に関する進歩がめざましい。

生体・生態影響を直接的に計測し、また網羅的的化学分析により影響要因を探索する影響分析の課題も近年注目される。新たな潮流を生むような顕著な新技術等は近年特に創出しておらず、環境試料の影響測定と網羅的的化学分析による影響要因の探索は 1980 年代から提唱されてきたにも関わらず飛躍的な進歩を遂げてはいない。しかしここ数年、飛行時間型質量分析計による質量分解能・物質分別能の向上、PC 性能の向上による解析の簡易化等の周辺技術の進歩により、ようやく実現可能な段階に近づいている。ハイスループットバイオアッセイ（High-Throughput Bioassay）については豪・日・独・仏・米・チェコ・瑞（スイス）・蘭・中・香の研究者・機関が参加してベンチマーキングが実施され<sup>9)</sup>、環境試料の生体・生態影響を直接的に計測する手法の共通化が図られている。

#### ■ 理論毒性学

影響研究については、従来の実験毒性学的課題は引き続き重要であるが、近年、影響を理論的に解析し、新規の物質や影響の予測等に応用を目指す試みが進められている<sup>10)</sup>。

人健康への影響に関して、計算毒性学の技術は、因果関係解析と機械学習、そして、機械学習を発展させた AI（人工知能）による作用機構の提示が今後、大きな発展が期待される。医療・ヘルスケア分野における IBM の Watson、理化学研究所で開発された SiGN: 大規模遺伝子ネットワーク推定ソフトウェアなどの発展を毒性学分野に活用できれば、理論毒性分野においても大いなる発展が見込まれる。

近年、リスク評価手法のパラダイムシフトが提案され、作用機構にもとづく、有害性の確認、標的分子レベルにおける有害物質の用量反応関係の解析など、化学物質の一次作用点から最終的な毒性の表現型にいたる全体の一環した手法が提示され、その概念を AOP (Adverse Outcome Pathway) とよび、その解析手法全体は IATA (Integrated Approaches to Testing and Assessment) と呼ばれている<sup>11)</sup>。これらには、既知の見本となる化学物質に関する情報と基盤としたいわゆるリードアクロス手法が有用と考えられており、精緻な構造活性相関の手法が求められている。この点に関しても Deep Learning やランダムフォレストのみならず新たな機械学習の技術が求められている。同時に、化学物質の曝露による毒性作用経路の詳細な予測、量反応関係についてシステムトキシコロジーもしくは毒性学におけるシステムバイオロジーという手法・概念の重要性と活用が期待されている<sup>12)</sup>。

生態影響についても、AOP のアプローチが生態毒性研究の新たな流れとして注目されている。生態毒性の評価において、ブラックボックスとして扱ってきた生物をできる限りシーサーボックスにすることによって化学物質の生態毒性のメカニズムを類型化しようという考え方である。生物試験で観察される有害な毒性影響の起点は分子、生物と物理化学的反応のほずであり、それらが生理学、生化学、遺伝学等でいずれ説明されるようになる生物体内でのカスケード反応を経て、最終的な有害性の顕在化へ繋がると考えられる。つまりある反応の条件が揃っていれば、得られる結論は同じになると予想できる。AOPs は毒性試験の省力

化、迅速化および動物愛護の観点から注目されているが、現在は確実な毒性発現のパスウェイを世界中から集めているところである<sup>13)</sup>。AOP Wiki は、インタラクティブな仮想プラットフォームを AOP の発展に提供して、提案された AOPs についての国際的なコンセンサスを促進することを目的としている。まだ AOP Wiki で承認された生態毒性関連の AOP は少ないが、将来的には増加していくと予想される。

#### ■ 大規模研究

化学物質リスクのよりシステム的な管理を進めるためには、いわゆるエンドオブパイプ技術的な化学分析と管理から、より大きな人間集団、広域あるいは地球規模での大規模研究が必要とされる領域が課題となる。

このうち、環境排出から実際の環境媒体中への移行や蓄積を評価可能な環境動態モデル、数理モデルについて、地球規模動態を示す残留性有機汚染物質 (POPs : Persistent Organic Pollutants) や水銀を対象とする大規模モデルの課題が近年特に注目されている。例えば、水銀の全球動態モデルは米国、カナダ、欧州また日本等において開発が進められている<sup>14)15)</sup>。

一方、より大きな人間集団を直接対象とする大規模疫学のうち、特に出生コホートといわれる子供の出生から成長過程を追跡する大規模疫学が近年各国で進められている。主な大規模出生コホート疫学プロジェクトとして、日本における子どもの健康と環境に関する全国調査 (エコチル調査)、ノルウェーの MoBa、デンマークの DNBC、フランスの Elfe、韓国の Ko-CHENS などの研究において、胎児期や小児期の化学物質曝露の影響が調査されている。

#### [注目すべき国内外のプロジェクト]

- EU の Solutions は、ヨーロッパ、ブラジル、中国およびオーストラリアから 39 機関が参加するプロジェクトである。河川における有害化学物質を現在の科学技術を結集して評価し直すために、化学分析から影響分析にわたる広範な領域をカバーしている。ライン川やドナウ川流域の生態系と人の健康における化学物質リスクの問題解決のための総合的な取り組みとして 2013 年より (5 年計画) 開始された<sup>16)</sup>。
- 北欧を中心とする EU の MARS プロジェクトも注目される。16 の河川流域のケーススタディによって各流域における生態系の状態と化学物質およびその他の抑圧因子の解明を目指している<sup>17)</sup>。
- Tox21 プロジェクトは、米国環境健康科学研究所、環境保護庁 (EPA)、食品医薬品局など複数の政府機関の共同プロジェクトである<sup>18)</sup>。毒性評価方法や化学物質に対する迅速試験法などの開発を目指して進めているものであるが、本稿であげた課題のうち特に理論毒性学に関連して、かつ多くの関連する分野も含めて進められている。
- 米国環境保護庁 (EPA) の ToxCast プログラムでは、多数の化学物質のハイスループットスクリーニングによるデータを蓄積し、成果は Toxicity forecaster として公開され、理論毒性学的アプローチの重要な成果を生み出しつつある<sup>19)</sup>。
- 欧州で実施された水銀に関する GMOS プロジェクト<sup>20)</sup>は、水銀の環境モニタリングから大規模全球モデルの検証までを含めたプロジェクトであった。水銀の環境動態を中心とする大規模プロジェクトとして注目されてきた。
- 大規模全球モデルについては、国連欧州事務局による越境大気汚染条約下での北半球タスクフォースが実施してきた、水銀に関するモデルレビューあるいは比較研究等が注目され

るところである<sup>21)</sup>。

- 大規模疫学については、すでに掲載した複数の注目すべき研究プロジェクトが進められているところであるが、関連して **Exposome**：エクスポゾーム（ヒトの生涯の全曝露）プロジェクトが進められており<sup>22)</sup>、GPS、リモートセンシング、omics などによる化学物質曝露測定技術開発を通じて大規模疫学での応用に向けた研究が進められている。

#### （４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

- 環境分析技術に関しては、有機化合物に関するパッシブサンプリングは定量性に欠ける、捕集容量が少ないといったことが問題である。リアルタイム計測のためには現在の装置感度は低すぎ、イオン化法や検出器の開発・改良が求められる。LC を用いた極性成分の分析では、万能な移動相・固定相が無いため、一度に測定する手段がない。また、試料間の高精度（微妙）な差の検出のためには再現性の高い測定技術が必要である。他にも、環境分野では大量のデータ解析のための情報科学のノウハウが著しく不足している。他の分野に比べ環境化学分野の立ち遅れが目立つ。
- 無機化合物分析については、高精度な金属同位体分析を実現する質量分析装置や周辺を試料導入装置等も海外製が多く、国内での装置維持単価が上昇しがちであることに加え、例えば装置仕様の改良などの研究がより困難な状況である。当該分野に取り組む大学の研究室が限定されており、慢性的な人的資源不足であることも重要な課題である。
- 影響分析については、多検体の測定に適用可能なハイスループットのバイオアッセイが限定的であり、様々なエンドポイントに対するハイスループットバイオアッセイが種類、精度ともに不足している。このほか、ノンターゲット分析を志向する研究が増加している一方で前処理法の検討など、有機化合物分析と共通の課題がある。
- これらいずれにも関連して、環境汚染状況を把握するための資料収集が系統的あるいは継続的でなく、系統的なデータ蓄積を図れていないこともあげられる。
- 理論毒性学的研究においては、数理統計学分野で認知されている手法をいかに化学物質リスク管理における研究に応用していくかが課題である。遺伝子発現量、タンパク質発現量、DNA 配列、エピジェネティック情報などの分子レベルと化学物質の応答性に関するデータが国内には少なく、海外の情報に頼らざるをえない。一方、化学物質リスク管理とは異なる各業界の立場によって個々にデータベースが作られているため、統合された細胞レベルでの物質応答性のカタログ化が進まないと、環境分野における理論毒性学が発展しない。
- 大規模モデル化研究では、大気質モデル、大気大循環モデルが開発の土台として国内外とも用いられているが、準揮発性の POPs、揮発性の高い水銀などでは、海陸面のフラックスをより積極的に結合する必要がある、大気あるいは大循環モデルを超えた多媒体的な取り組みがもっと着目される必要がある。大規模疫学研究では、疫学自体の課題とともに、個人のエクスポゾームの測定において、衛星観測から、リモートセンシング、GPS、パッシブサンプラー、高度分析機器まで、多種多様の技術を扱う必要があるが、その展開が不足している。

## [今後取り組むべき研究テーマ]

- 環境分析技術においては、網羅的な分析手法を達成するための、サンプリング技術、計測技術の高感度化、高極性有機化合物も可能となるより広範な極性成分の分析技術の開発などが必要である。また、モニタリング現場においてメンテナンスフリーで計測が可能な耐候性、堅牢性、再現性、感度の高い計測装置の開発も重要である。
- 多検体測定、網羅的分析データなどを解析するための情報解析技術の開発も重要である。特に精密質量スペクトル情報データベースの整備は、基盤研究として国際的にも貢献できるテーマである。情報解析技術は、健康・生態影響と環境中の化学物質を結びつけるための研究にも必須であり、理論毒性学にも密接な関連のある分野横断的なテーマとして取り組むことが必要である。また、多様化する化学物質と毒性データの急増に対応し、また複数の物質による複合生体影響の解明を目指した分析と理論毒性学的な有害性予測を複合したアプローチによる研究が考えられる。膨大なデータの解析処理への人工知能の応用といった研究となれば世界の先駆けとなる課題と考えられる。測定データからの未知物質の検索や同定、同定された物質の毒性推定を精度良く行うための手法（ソフトウェア）開発も取り組むべき課題としてあげられる。
- 有害元素のリスク管理のためには、天然資源や製品、そして食品等に含まれている極微量の有害金属のトレーサビリティの向上や曝露経路の特定につながる分析技術の高度化、同時に、発展途上国等でも活用できる分析技術の確立が地球レベルの環境汚染問題の解決には欠かせない。
- 理論毒性学あるいは大規模疫学に関連しては、化学的、物理的、生物学的、精神的、社会的環境ストレスへの生涯曝露（エクスポーズ）測定技術の開発、また、併せて、化学物質と生体応答の基本に立ち返って、人についても生態影響についても、物質レベルから見た健康・生態の状況を記述可能とするような蓄積が求められる。大規模疫学調査なども関連するところがある。
- 大規模モデル研究については、従来のモデルが概して無機的環境における物質循環の記述にとどまってきたのに対して、海産生物や陸生の各種生物など、曝露リスクに関連するより多様な媒体を含むモデル化研究が必要である。また、Planetary boundaries (PBs) の提案<sup>23)</sup>の中で未定義となっている化学物質の限界のように、大規模モデルを活用するシステムの考察を現実のリスク管理に結びつける研究も重要である。

### （５）政策的課題

本研究開発領域における課題が、従来までの大気、水、土壌、また食品、廃棄物、農作物などの媒体ごとに、あるいは健康影響、生態影響などの影響によって作られてきた既存の区分を超えて意識されつつあることを反映して、政策的課題としては、このような従来の視点からすると分野横断的となる枠組みの必要性が指摘される。国内では経産省、環境省、農林水産省、厚労省、内閣府食品安全委員会などが含まれ、省庁の枠組みを超えた研究実施体制やファンディング制度が求められる。

また、おそらく上記とも関連して、化学物質リスク管理に係わる大学等の研究活動が枯渇しつつあり、基礎力と応用展開力をともにそなえた優秀な人材の育成とそのキャリアパスの確立が求められる。

このほか、残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約、水銀に関する水俣条約など国際条約に基づく管理への即応または戦略的な関与、近年 REACH 規則を始め積極的な展開の目立つ欧州に対する日本としての的確な対応など、国内のみでなく国際的な動向の中で政策を構成することも重要となっている。

なお、近年、動物愛護の視点から in vivo 試験は最小限に留めるか、代替法へ移行する方向にある。その意味でもハイスループット (in vitro) バイオアッセイの開発は重要な課題である。一方で、研究開発において動物実験は最も重要な実験手法であって、代替法がすべてを取って代わることは全くあり得ない。さまざまな主体の意見を踏まえつつ、健全な科学技術の発展を可能とする政策的対応も求められる。

### (6) キーワード

ノンターゲット分析、リアルタイム計測、人工知能、国際ネットワーク、安定同位体、マルチコレクターICP 質量分析装置、effect-directed analysis (EDA)、whole effluent toxicity (WET)、構造活性相関学、システムトキシコロジー、多変量解析、遺伝子ネットワーク、エクスポゾーム (exposome)、大規模疫学、Planetary boundaries、水銀に関する水俣条約

### (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	◎	→	● 現状では、高分解の質量スペクトルデータベース MassBank が運用され、ノンターゲット分析の普及も進む。PBPK モデル中心に薬物の体内動態予測が行われ、子供と環境に関する全国調査の実施、大規模モデル開発など高い水準にある。ただし、安定同位体研究では、装置開発や研究室が不足している。
	応用研究・開発	○	→	● 各課題とも基礎研究のレベルは高いものの、毒性予測ソフトウェアの公開遅れ、同位体分析では層の薄さも関連して不正確な同位体比が提出されるなど、改善すべき課題が見られる。
米国	基礎研究	◎	→	● (北米全体では、特にカナダで) 超高分離技術と超高分解能質量分析計を合わせた装置開発が進む。同位体比分析の高度装置多数を有している。ハイスループットスクリーニング研究、理論毒性学的研究ともに基礎レベルは高いが、革新的な計算技術は出ていない。エクスポゾーム研究が進む。
	応用研究・開発	◎	→	● 毒性予測では ToxCast, Tox21, FutureToxII など大規模プロジェクトが進められ、基礎から応用への展開が進む。同位体比研究、大規模疫学研究とも展開される。
欧州	基礎研究	◎	↑	● ノンターゲット分析の手法開発、ソフトウェア・データベース整備、高分解能質量スペクトルデータベースなどでトップクラスの研究機関がある <sup>16)</sup> 。マルチコレクター質量分析装置はいずれも欧州に本拠を有し、英国の大学等との新たな開発が進む <sup>24)</sup> 。
	応用研究・開発	◎	↑	● Solutions や MARS プロジェクトなど世界に先駆けた国際的な取り組みが行われており、これは分析から毒性までカバーする研究として進む。有害金属の挙動や安定同位体比の活用が活発。大規模疫学研究も進む。欧州越境大気汚染条約の活動を基礎としたモデル研究が進む。
中国	基礎研究	○	→	● 欧米からの技術指導を受けながらではあるが、多数の分析装置を有して研究を実施。
	応用研究・開発	△	↑	● 毒性学分野での活動はほとんどない。大規模疫学は事例がある。環境汚染が著しい地域があり、鉱山資源や製品、農作物などの金属、同位体比を明らかにする複数のプロジェクトが進む。

韓国	基礎研究	△	↑	●すべての分野での情報はない。マルチコレクター質量分析装置など最新装置は整備数が少なく、研究者も少ないが、研究は開始されている。
	応用研究・開発	△	→	●WETの適用が行われる。大規模疫学 (KoCHENS) が開始予定との情報があるが未確認。環境分析は着実に実施されていると思われる。

(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

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑: 上昇傾向、→: 現状維持、↓: 下降傾向

## (8) 参考文献

- 1) JST-CRDS, 俯瞰ワークショップ報告書 環境分野の研究開発の概況  
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2016/WR/CRDS-FY2016-WR-06.pdf>
- 2) ScienceDirect による 2015 年論文数 (AS+PS)
- 3) ScienceDirect による 検索数 (GCxGC)
- 4) D.T.Snyder et al., Miniature and Fieldable Mass Spectrometers: Recent Advances. *Anal. Chem.* 2016, 88, 2-29.
- 5) D.M.Cate et al., Recent Developments in Paper-Based Microfluidic Devices. *Anal. Chem.* 2015, 87, 19-41.
- 6) C.Zhu et al., Electrochemical Sensors and Biosensors Based on Nanomaterials and Nanostructures. *Anal. Chem.* 2015, 87, 230-249.
- 7) Spengler, B., Mass Spectrometry Imaging of Biomolecular Information. *Anal. Chem.* 2015, 87, 64-82.
- 8) A. Yamakawa et al., Determination of Hg isotopic compositions in certified reference material NIES No.13 Human Hair by cold vapor generation multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Accred. Qual. Assur.* 2016, 21, 197.
- 9) Beate I. Escher et al., *Environ. Sci. & Technol.* 2014, 48, 1940-1956.
- 10) AM, Richard. et al., ToxCast Chemical Landscape: Paving the Road to 21st Century Toxicology. *Chem Res Toxicol.* 2016, 29, (8), 1225-51.
- 11) OECD Adverse Outcome Pathways, Molecular Screening and Toxicogenomics  
<http://www.oecd.org/chemicalsafety/testing/adverse-outcome-pathways-molecular-screening-and-toxicogenomics.htm>
- 12) I, Cote, et al., The Next Generation of Risk Assessment Multiyear Study- Highlights of Findings, Applications to Risk Assessment and Future Directions. *Environ Health Perspect.* 2016, DOI:10.1289/EHP233.
- 13) AOP Wiki [https://aopwiki.org/wiki/index.php/Main\\_Page](https://aopwiki.org/wiki/index.php/Main_Page) (8/29/2016),
- 14) Programme, U. N. E., Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport. 2013.

- 15) Kawai, T.; Jagiello, K.; Sosnowska, A.; Odziomek, K.; Gajewicz, A.; Handoh, I. C.; Puzyn, T.; Suzuki, N., A New Metric for Long-Range Transport Potential of Chemicals. *Environmental Science & Technology* 2014, 48, (6), 3245-3252.
- 16) SOLUTIONS. <http://www.solutions-project.eu/>
- 17) MARS project. <http://mars-project.eu/index.php>
- 18) The Toxicity in the 21st Century (Tox21) program <http://www.ncats.nih.gov/tox21/about>
- 19) US Environmental Protection Agency Toxicity Forecasting.  
<https://www.epa.gov/chemical-research/toxicity-forecasting>
- 20) Global Mercury Observation System (GMOS) <http://www.gmos.eu/>
- 21) Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution <http://www.htap.org/>
- 22) The Human Exposome Project <http://humanexposomeproject.com/>
- 23) Rockstrom, J., et al., A safe operating space for humanity. *Nature* 2009, 461, (7263), 472-475.
- 24) T. Elliot et al., Collision Cell MC-ICPMS. *Goldschmidt Conference 2016, Yokohama, Japan* 2016.

### 3.3 生物多様性・生態系区分

生物多様性・生態系区分では、下記の2つの研究開発領域を設定した。

3.3.1 生物多様性・生態系の把握・予測

3.3.2 生態系サービスの評価・管理

区分の概要を以下にまとめる。

生物多様性・生態系の把握・予測では、追跡技術や衛星・航空機観測技術、画像解析技術、生物学的情報の取得等で大きな進展があり、高度な統計学的解析手法の開発も実施されている。欧米のレベルが高く、カナダや豪州の取り組みも注目に値する。米国はモニタリングとデータ整備の国際的な発信源であり衛星観測研究もリードしている。応用研究では工学的な環境再生に関する仕組みや指標づくりが目立つ。欧州では、従来の生態学的課題のほか、特に英国をはじめとして市民調査によるデータ蓄積や観光統計による生態系サービス情報収集などが進んでいる。GBIF, OBIS など世界規模のデータベースを維持している。カナダはFishBaseなどのデータベース構築、国際ネットワーク構築などで世界をリードし、Ecopath/Ecosimのような広く使われている生態系モデルも開発している。豪州では特に海洋生態系分野でデータ収集、データベース作成、データ解析、保全への応用のいずれにおいても群を抜く研究グループがある。日本も進展しているが特に体制面で課題がある。

生態系サービスの評価・管理では、効率的で持続可能な生態系サービス利用の評価やバイオバンキングなど、様々な指標の検討や評価の実施が行われている。いずれの国・地域においても研究開発の動向は上昇傾向にあるが、欧州は研究開発の歴史が長く景観とそれがもたらす生態系サービス研究が進んでいる。評価指標の提案からその標準化が進められ、さらなる進展が予想される。米国は評価ツールの開発でリードし、そのツールを用いた成果をあげている。日本では、2010年以降生物多様性と生態系機能、生態系サービスの関係の研究が急速に進められているが、欧米に比べて基礎データを活用した実用化や政策支援などの実践ツールのレベルで立ち遅れている。

### 3.3.1 生物多様性・生態系の把握・予測

#### （1）研究開発領域の簡潔な説明

生物多様性や生態系の保全・利用および、生物多様性の形成・維持機構の解明を目的とする研究開発領域である。データの取得や、生態系の分布と変動を予測するモデルの作成、進化を含めたその原理を検討する調査や実験、モデルの開発が遺伝子から景観までの幅広い時空間スケールで進められている。

#### （2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

##### [意義]

生物多様性や生態系に関する研究開発は、野生生物や自然環境の保護の観点だけではなく、生態系の仕組みの理解とその安定性や多様性が維持される要因を解明することを目的とする。その結果、学術的興味を深めるだけではなく、環境悪化の予測や防止、さらには生態系の保全や環境の修復や再生について検討することが可能になる。しかし、多様で複雑な生態系の理解はいまだごく限られており、個々の種や群集の動態を追う地道な研究の他にも、新たな技術や手法と施策が融合した対応が求められている。近年は、食料や水、気候の安定、文化、景観などの生物多様性を基盤として人間が享受する機能（サービス）が再認識され、持続的な利用のための評価や仕組みづくりも重要な課題とされている。

##### [動向（歴史）]

生物多様性の研究は生物の個体群や群集を対象とした生態学的な研究に由来する。20世紀前半には個体群の動態についての数理的な基盤が生まれ、それ以前の自然史研究や主に昆虫や害獣を対象とした生物の動態と種間関係の研究をもとに生態系への理解を部分的に深めていく科学的な研究が進展したが、1960年代までは社会的な関心は高くなかった。

ところが、増大する人口と土地改変、農薬や汚染物質による自然環境の破壊によって社会的な関心が国際的に高まった。日本においても高度経済成長期と重なり、現在で言うところの生物多様性分野よりもさらに幅広い分野を巻き込んで環境問題化した。これらは生物多様性研究の基盤づくりを後押しし、日本においてはこの当時に全国的に取得の検討を開始したデータが現在も基礎となっている例が多い。

1992年の地球サミット以降、生物の多様性の保全と持続可能な利用を促進することが共通の課題として広く認識され、生物多様性という用語が急速に広まった。その結果多様なモニタリングの国際プロジェクトや、データベースの促進、評価手法の検討が進められることになる。

観測については、全球地球観測システム（GEOSS : Global Earth Observation System of Systems）の一環として生物多様性を観測する生物多様性観測ネットワーク（GEO-BON : Group on Earth Observation - Biodiversity Observation Network）が2008年に発足し、生物多様性を間接的に推定する指標群が提案された<sup>1)</sup>。また、長期生態系観測ネットワークとしてILTER（International Long Term Ecological Research、国際長期生態学研究）が1993年に設立された。リモートセンシングでは、MODIS（MODerate resolution Imaging

Spectroradiometer)、Landsat 衛星を用いた森林分布の把握等全球規模の観測研究が進展している。また、地域においては衛星のみならず、ドローンなどの UAV（Unmanned Aerial Vehicle）の活用も進められている。水中の生物多様性の把握が難しい海洋では、ROV（Remotely Operated Vehicle）の活用とともに音響を使った観測技術も存在する。生物のトラッキング技術も進展しており、様々なロガーが開発され、衛星データを用いて個体群動態を追跡する計器がある。ゲノム科学の進展に伴う生物間の相互作用や環境変化の影響の把握や、環境 DNA（eDNA）による効率的な生息状況の把握なども進められている。生物多様性の指標開発、実測を補う分布推定モデル技術や、過去・将来の予測技術も他分野との連携の中で発展している<sup>2)</sup>。

生物多様性・生態系の評価のためのモデル開発も着実に進んできている。2000 年前後から、Ecopath/Ecosim（ブリティッシュ・コロンビア大学、カナダ）や Atlantis（オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO））という海洋生態系評価モデルが使用されるようになり、広い応用を見ることができるようになる。一方で、予測力を重視した統計手法の活用も図られ、機械学習手法を活用した生物多様性の新しい予測技術の開発にも大きな進展が見られている。

情報に関する動向として、生物多様性に関するデータ収集と全世界的な利用を目的とする国際的なプロジェクトである地球規模生物多様性情報機構（GBIF：Global Biodiversity Information Facility）および海洋生物のセンサス（CoML：The Census of Marine Life）が開始された（2001 年）。また、生物に関する Web 上の百科事典である Encyclopedia of Life（EoL）や、短い DNA 塩基配列より生物種を調べる手法に使われる DNA バーコーディングのライブラリを構築する International Barcode of Life Project（iBOL）などが始まり、相互に関連しながら巨大なデータ基盤を構築している。国際的な取り組みである GBIF、海洋生物地理情報システム（OBIS：Ocean Biogeographic Information System）、GEO-BON、ILTER、iBOL では、それぞれに対応する日本ノードが設立されている（JBIF、BISMaL、J-BON、JaILTER、JBOLI）。こうした生物分布情報の収集による生物多様性の広域分布の推定が進展し、現状把握とともに世界的な保護区の戦略や保全政策の提言に活用されてきた<sup>3)</sup>。さらに、生物多様性がどのように形成されたか、高緯度地域で高い傾向にある分類群が多いのはなぜかというマクロ生態学的課題に挑むベースデータとして活用された。国際的な協力や生物の分布情報のデータベース化の促進により生物多様性の広域パターンの形成や進化、人間活動（温暖化）とのかかわりに関する事例が散見される。陸上の大型生物についてのパターン研究では一定の結果が上がっており、一般的な緯度勾配と異なる分布をもつ対象や<sup>4)</sup>、機能などと対応させ分布変動のプロセスを検討できる対象を選定した研究が望まれる<sup>5)</sup>。なお、計画された実験データ以外の統計データの解析は容易ではなく、様々な手法が検討されてきた。特に時系列データについては近年の計算機の発達とともに階層ベイズモデルなどの高度に確率分布や非線形性を取り入れた方法が普及し、例えば発見率を考慮した時空間動態解析の取り扱いが容易かつより正確になった。今後も普及のための技術的・教育的な支援が必要である。

近年、情報技術や、センシング技術、遺伝情報の解析技術をはじめとするさまざまな技術的解決によって、応用の方向性を強化した研究が推進される<sup>6)</sup>と同時に、愛知ターゲット、持続可能な開発目標（SDGs）などの目標が国連と関連組織によって示され、これらに対応するプロジェクト研究も進展している。また、国家管轄権外区域の海洋生物多様性（BBNJ：

marine Biological diversity of areas Beyond National Jurisdiction)・遺伝資源の取得の機会及びその利用から生ずる利益の公正かつ衡平な配分 (ABS: Access and Benefit-Sharing)・越境汚染など、外交や国家間交渉においての重要な要素ともなっている。温暖化の適応に関する多数の計画も実施されている。

また、気候変動による陸面植生の変化や、その結果起こる大気・陸との相互作用の変化などをシミュレーションする動的全球植生モデル (SEIB-DGVM、海洋研究開発機構) や、炭素や窒素など、陸域植生の光合成・呼吸や温室効果ガスの収支に関連する物質の挙動を解明する生態系モデル (VISIT、国立環境研究所) などが開発され、気候変動予測分野でも貢献している。

### (3) 注目動向

#### [新たな技術動向]

- フィールドセンシング技術の発達と大量データの解析技術における課題

小型安価なデータロガー、マイコン、カメラ、レコーダー、測位・情報通信技術 (GPS、RFID、WiFi、Wi-SUN 等) の普及により、様々な生物と環境に関する局所スケールでのトラッキングやデータロギングが急速に進展している。今後、従来困難であった小型動物や海洋生物についての行動データや生物・非生物を問わず長期の連続観測データ、移動や分布データの収集が進む。一方で、大量のデータの解析技術がまだまだ成熟しておらず、機械学習手法を活用した特徴抽出や自動認識、分類が求められている。また、特に海洋分野においては現場計測・連続サンプリングのためのセンサ・機器の開発や小型化や安価な観測プラットフォームの作成が進展しており (例えば CO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>S センサ、江戸っ子 1 号)、今後の応用が期待される。

- 局所リモートセンシング技術の発展

衛星・航空機観測技術と画像解析技術が進展している。特に、無人機 (UAV; Drone) に代表されるように従来の衛星や航空機よりも小型かつ自律的なプラットフォームが急速に普及した<sup>7)</sup>。SfM (Structure from Motion) による画像の結合技術をはじめとするデータの解析技術も急速に普及しており、活用事例の増加が見込まれる。今後は赤外線カメラによる植生指数 (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index) の算出等、可視光カメラ以外のセンシング手法や UAV 自体の自動での離発着を活用した実測、水部での補正技術の開発などが課題である。

海洋分野においても技術的には UAV に相当する無人探査機 (AUV: Autonomous Underwater Vehicle)、無人洋上機 (ASV: Autonomous Surface Vehicle) は存在し、海洋保護区でのモニタリングに活用するなどの検討が進められている<sup>8)</sup>。また、音響技術の蓄積があり、音響データ合成開口技術、地層データの自動合成などが試みられている<sup>9)</sup>。特に魚群探知機をはじめとする音響によるセンシングには海洋分野で古くから活用されているが、近年国外の民生品においてそのコストダウンが著しい。今後、開発した技術者でなくとも運用可能なシステムづくりとコストダウンが課題である。

- 長期 3 次元の環境 (気象・海洋・地形) データの作成とデータベース化の進展

観測について、日本の周辺においても気候変動観測ミッション (GCOM: Global Change

Observation Mission) などで高頻度、高解像度、多バンドの衛星リモートセンシングが計画されており、野外においては森林におけるフラックス研究の進展や、海洋の全球観測を行う世界気象機関 (WMO) による Argo 計画での観測密度の増加、音響・光学センサなどの取得情報の高度化の検討が進められている。これらのデータを活用することで従来の長期の推定だけでなく、短期の基盤情報の蓄積による環境と生物の変動要因の解明や予測の進展が期待される。

- 環境 DNA、メタバーコーディング、現場シーケンス、機能遺伝子の特定

環境 DNA を活用した生物分布情報の収集に関する研究が急増した。また、従来の LAMP 法による現場での種同定技術以外にも USB 電源で動く卓上のシーケンサーなども試作されている<sup>10)</sup>。特に近縁種の多い植物やベントス (底生生物) などの現場での種同定に活用され、保全政策や外来種対策に応用できるものと考えられる。また、生物機能や機能的な遺伝子についての探索やデータベース化も進み、今後環境 DNA などと合わせて、地域の群集の特性や多様性維持機構の検討が一変する可能性がある。

- 機能・形質データベースの発展

形質データ・機能データベースによる生物多様性と機能の関係の理解の促進がバクテリアスケールから魚類のスケールまで進展している<sup>11)12)</sup>。生物多様性が高まると生態系の機能や安定性が高まるかという疑問をはじめとするこれまでの局所の検討の進展も含めて、単に多様性だけではなく形質や機能の視点から、生態系の形成の理解や長期変動の予測を試みている。

- クラウドによる解析システムの開発

データベース上での解析ツールの提供や画像モザイク・データの描画のための有料・無料の解析環境を提供する動きが見られる<sup>3), 13)15)</sup>。データの増大とともに解析の演算にかかる時間が伸びており、今後、大規模な解析を行う計算機資源を集中させ、効率的に解析を行う動きが広がる可能性がある。ただし、技術・コストなどの観点から可能な主体は限られていると考えられる。

- 時系列変動データをはじめとする高度な統計学的解析手法の開発

S-map、CCM、CMS などを用いた因果解析が近年話題を集めておりその適用可能な範囲についての検討が進む<sup>16)</sup>。決定論的な変動や Tipping Point の予測に関しては、理論研究や微生物を用いた単純な系の実験が先行するが<sup>17)</sup>、乾燥地などの単純な系では景観スケールでの検証がすすめられている<sup>18)</sup>。一方で、現実の生態系はその系自体の時間変化が起こるものであり、ネットワークの時間発展についての研究をはじめとするより動的なもの取り扱いが求められる。また、角度データや非線形の相関など時系列以外のデータ解析についても近年議論が見られ<sup>19)</sup>、より複雑なデータタイプの扱いが計算機のライブラリ等の出現により容易になる可能性がある。

- 意思決定支援システム、保護区選定技術

保全に必要な生物や多様性の分布データや推定手法が増加するにつれて、その結果の取り扱いを活用して、実際の提言や管理に応用する事例が増加している。そのためのツールが複数登場しており、活用事例も増加している<sup>20)</sup>。応用の側面から論じられることが多いが、手法そのものの特性や新たな手法の開発など技術的な側面からの検討も十分に行う必要がある。また、保護区の分布そのものの検討が進んだ近年は設置面積そのものよりも、

その有効性や管理体制の評価を行う必要が高いと考えられており、保護区のキュレーション、管理のレビュー、複合指標の比較など、異なるレベルの事象や価値観を統合する作業が強く求められており<sup>21)</sup>、関連する意思決定ツールの開発が求められる。

• 市民科学への注目

特に欧州や北米において市民科学が注目されている<sup>22)</sup>。情報メディアの利用の一環としてユーザにあまり意識させずに情報を収集活用している他分野もあり、特にゲーミフィケーションや依存性等の心理的手法は注目されており、環境情報収集のための社会実装技術の1つのアプローチとして研究として取り組むべき課題である。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- 環境省環境研究総合推進費 S9「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」（2011～2015 年度）において、陸域・海域における生物分布のデータ収集と、それに基づく生物多様性の評価と将来予測が行われた。バーバリウム（植物標本）にあるラベル情報から分布モデルを作り、東南アジアの樹木の主の多様性を推定した。収集した膨大なすべての標本の画像をデータベース化し、DNA 配列決定を進め、多くの新種を判定するなど、様々な多数の成果が得られている<sup>23)</sup>。現在は、S15「社会・生態システムの統合化による自然資本・生態系サービスの予測評価」（2016～2020 年度）において、アジア地域も視野に入れ、社会・生態システムの統合モデルを構築し、シナリオ分析に基づく複数の政策オプションを検討する研究が行われている。
- 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（小池勲夫研究総括）では、海洋の生物多様性および生態系を把握するための先進的な計測技術と将来予測に資するモデルの研究開発が行われている。
- 文部科学省ナショナルバイオリソースプロジェクトでは、ライフサイエンス研究の基礎・基盤となるバイオリソース（動物、植物等）について収集・保存・提供を行うとともに、バイオリソースの質の向上を目指し、ゲノム情報等の解析、保存技術等の開発によるバイオリソースの付加価値向上により時代の要請に応えたバイオリソースの整備を行っている。また、バイオリソースの所在情報等を提供する情報センター機能を強化している。
- 衛星から森林炭素蓄積（バイオマス）を推定するため、国際宇宙ステーション（ISS）からの観測を想定した衛星 LiDAR の開発が進んでいる。米国航空宇宙局（NASA）は、2019年の打ち上げを目標として、GEDI ミッションを推進している。宇宙から地球にレーザを照射し、レーザが森林の表面で反射して戻ってくる時間と、その一部が林冠を透過して地面で反射して戻ってくる時間の差から、森林の高さを計測し、森林炭素蓄積の推定精度を向上させることを目的としている。また、日本の宇宙航空研究開発機構（JAXA）でも ISS に搭載する植生 LiDAR の開発（MOLI ミッション）に取り組んでおり、2021年の打ち上げを目指している。
- 全米生態観測ネットワーク（NEON: National Ecological Observatory Network）の構築が10年間で4.3億ドルの巨額を投じて2012年に開始された。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り、2017年頃に本格稼働予定である。
- RAM Legacy Stock Assessment Database と呼ばれる世界の海洋生物資源の評価結果の

データベースが一般に公開されている（ワシントン大学等が中心）。このデータベースにより、世界の海洋生物の状態をより良く把握することが可能と考えられ、日本でも上記 CREST 課題の中で、このデータベースを使った生態系評価研究が進められている。

- 観測データからサービスの変動までの一連の研究プロジェクトとして、オーストラリアでは The Capturing Coral Reef & Related Ecosystem Services (CCRES) が、米国西海岸を中心としたメンバーでは Ocean Tipping Points が行われている。
- 世界各地で生物多様性の推定や保全策の検討に関する計画が動いており、海洋についてオーストラリアにおいて CISRO NERP BiodiversityHUB が実施されている。
- 生態系変動についての理論研究と実証研究を連動させたレジームシフトの予測が欧州にて CASCADE をはじめとして実施されている。
- カナダ・ブリティッシュコロンビア大学では、世界の海洋生物資源の基礎情報に関するデータベースが作成され、公開されている<sup>24)</sup>。同大学では日本財団が出資し、ネレウス (NF-UBC Nereus Program) と呼ばれる国際ネットワークが構築されている（プリンストン大学、デューク大学、世界自然保護監視センター (UNEP)、ケンブリッジ大学、ストックホルム大学、ユトレヒト大学などが参画)。大規模な気候変動と海洋資源の関係の探索などが進められている。

#### (4) 科学技術的課題

##### [課題 (ボトルネック)]

- データ基盤に関する課題として、データの流通の促進とキュレーション、データの前処理の共通化による効率化が望まれる。データは種の存在、現存量、DNA 情報など多種多様であるが、それらの品質管理が必ずしもなされていると言いがたい状況である（特に市民参加型調査データ）。データの流通や共通化、解析技術の共有などプラットフォームの部分が全体に情報科学と比べて遅れている。
- データの取得についての自動化・効率化や、全ゲノム情報等大量のゲノム情報を収集・解析するインフォマティクス技術の普及をはじめとして、分野横断的研究の促進（特に工学、情報学、社会科学）が要請されている。
- 様々な情報の不足が課題である。生物分布情報、DNA バーコーディング情報ともに不足している。特に DNA バーコーディング情報は取得の歴史が浅いため既知の種を網羅するには遠い状況にあり、これが環境 DNA 解析の大きなボトルネックとなっている。土壌圏の生物など、極度に情報が不足している対象も存在し、水中や土壌あるいは樹木や生体の中など、観測が容易でない部分の物質の循環や生物の動態の検討が課題である。生物の機能と関連する形質情報に関しては、一部で進展が見られる（例：サンゴの形質データベース<sup>25)</sup>）ものの、全般的には不足しており、さらに、機能や形質についてのデータは配列だけや種の分布だけのデータベースでは不足がある。地域的には特に東南アジアの情報が不足している。
- 長期的な時系列データが研究開発の進展に重要であり、継続的なモニタリングとデータの整備、その解析技術開発が必要である。統計的解析技術開発とともに、因果関係を解明する技術開発が求められる。

[今後取組むべき研究テーマ]

- 生物多様性の分布情報や現存量、遺伝配列情報のみならず、機能（または機能を反映する形質情報）やサービスを含めた情報収集と共有の促進。
- 生物多様性を間接的に推定でき、リモートセンシング等の計測技術により計測可能な指標群（森林面積等）の開発、指標群による生物多様性の推定の高度化。
- モニタリング・計測の高効率化や自動化、データ取得が困難であった領域を開拓する新たな計測技術の開発。
- データの不足を補う分布推定等の手法開発。
- ゲノム情報の解析技術、特に大量データの処理技術開発。
- 多様なデータを集約し気候変動データ等関連する情報と統合化するデータベースやユーザインタフェースの開発。
- 生物種間関係、食物網や地域内での動態、地域間の連結性を視野に入れたマクロ生態学の進展とその活用。
- 世界的に共有されつつある情報を活用した地域特性（生物多様性ホットスポット等）や保全優先地域の検出。
- 気候、人口、土地利用、サプライチェーン等の自然科学・社会科学シナリオとの統合による将来予測研究。
- 生物多様性と生態系機能・サービスの定量的評価。さらには、生態系サービスの予測・評価にもとづき社会科学分野と協力した意思決定支援。
- 市民への PR やコミュニティづくりの検討を含めた、市民によるデータ収集とキャパシティビルディングに関する検討。

(5) 政策的課題

- 基盤データの整備について、陸域では地理空間情報活用推進基本法（NDSI 法）や測量法に基づく基盤地図情報等の円滑な流通等を促進の精神がある程度成果をあげている。一方、海洋のほか、河川、沿岸、湖沼の周辺域（いわゆる水辺）においてはこれらの適用範囲もあいまいであり情報整備の遅れが目立つ。生物多様性の保全において移行帯はホットスポットになりやすく、海洋環境は島嶼が多く漁業も盛んな日本において重要と考えられ、このような地域の基盤情報整備への行政側の主導が求められる。
- データの流通や共通化について、海外では情報科学を専攻したテクニシャンが分類学者の研究室で働く例などが見られ、日本ほど分野間の垣根は高くない。学生時代から複数分野を習得する仕組みの促進が望まれるとともに、情報科学のような就職率の高い分野でも積極的に兼業などによって多分野で活躍できる社会的な支援や仕組みづくりが求められる。
- データの取得について、環境影響評価、水産資源調査などの公的仕組みで取得された公表資料のデータが死蔵されており、今後データのリポジトリ（一元的な保管場所）などを作成し、利活用することが望まれる。また、研究が広域にひろがるにつれ、データ取得における許認可等手続き、国外でのデータ収集などに事務手続き上のハードルが大きい。その他、税金を使った研究で得たデータ提供の義務化、データ取得重複の回避、データ不足地域でのデータ収集といった戦略的なデータの取得、品質管理とデータベース化、オープン

データの促進も求められる。

- 研究者の流動化や研究資金のプロジェクト化によって、情報交流の促進や目的の共有が図られた反面、根本要因を追及する実験や基礎研究、技術開発への努力量が減っている。また、長期的な視野をもったモニタリングやデータベースの継続的な運用にプロジェクト終了ごとに財政的な不安がある点は課題である。
- 遺伝情報の抽出や海洋観測技術を初めとして、技術的には容易に大量の情報が得られるようになったが、第一線の研究に必要な情報を得るためのコストがかかる点は従前と変わらないものが多い。コストダウンするための技術や特許の共有や商品化による普及を促す仕組みへの支援が求められる。
- 国内施策（生態系管理、保護区設計、自然再生等）への反映や、国際的なプレゼンスの維持や国際的な枠組み（CBD, IPBES, GEOSS 等）への貢献を視野に入れた取り組みが期待される。気候変動対策をはじめとする各種施策とのトレードオフやシナジーの検討（再生可能エネルギー適地と多様性保全地域のバランス等）、民間や市民を巻き込んだ研究開発の実施や意識の醸成も必要とされている。
- 基礎的研究については、技術そのものよりも新規人材の不足と限られた人材での努力量の配分が課題である。また、要素技術はあるものの、その統合や、実用化や低価格化が不得手であるという評価もある。

（6）キーワード

生物多様性、生態系、機能、生態系サービス、大規模化、自動化、計測技術、分布推定、意思決定、自然再生、変動データ

（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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 生物分布データの蓄積について 1970年代から90年代前半の生物の分布データの蓄積が様々な分野で見られ、その蓄積の活用と BISMAL, JBIF, J-BON をはじめとする国内のデータノードと博物館や大学をはじめとする協力機関の活動があって、近年の広域におよぶ空間研究のトレンドにも一定の対応ができています。一方で、在データ以外の形式の情報の収集や、過去の情報の電子化と公開、および、新規の情報収集について課題がある分野がほとんどである。モニタリングデータの必要性への異分野への理解、予算、個人情報、著作権、人手の不足などが主な要因。</li> <li>● 生物学的情報の蓄積について 近年形質や遺伝情報など、生物の個体そのものの情報を活用した研究が国内外で増加しているが、データベースへの登録が必須ともいえる遺伝情報を除くと、生物そのものの特性に関する情報の集約はいまだに行われていない。</li> <li>● 環境データの蓄積について 衛星データによる環境モニタリングは以前から実施されているが、国土数値情報などの容易に使えるデータベースにも活用されるようになった。今後も技術的な解決による広域のデータ収集と蓄積が重要である。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 近年プロジェクトなどの外部資金によって急速に進展しており、広域の生物多様性の情報の集約や推定などが実施されている。</li> </ul>

米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●多様な研究が国際的な連携の下に行われている。近年の大規模な会議としては隣国のカナダを含めて DNA バーコーディングの国際的な計画などに進展がみられる。また、LTER などモニタリングとそのデータ整備の国際的な発信源にもなっている。</li> <li>●衛星観測研究をリードしている。<sup>26)</sup></li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>●多様な研究が国際的な連携の下に行われている。応用的な研究のうち、工学的な環境の再生に関連する仕組みや指標づくりが目立つ。</li> <li>●分布推定モデル Maxent<sup>27)</sup>が開発され全世界で広く使われている。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●GBIF, OBIS などの世界規模のデータベースを維持している。</li> <li>●環境 DNA 技術を提唱した。<sup>28)</sup></li> <li>●従来の生態学的な課題への取り組みのほかに、特に英国をはじめとして、市民調査によるデータの蓄積や、観光統計による生態系サービス情報の収集などが進んでいる。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>●特に資源管理などについては NGO の圧力または協力によって、積極的に国際会議を開催しその成果をとりまとめることや国際規格の作成、管理プログラムの検討が実施されている。また、研究者の層が厚く、基礎から応用まで多くの人材がそろっている。</li> <li>●(国際機関の取り組みであるが) 世界自然保全モニタリングセンター (UNEP-WCMC) が全球の生物多様性保全に関わるデータベースと解析をリードしている。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>●近年急速に研究者人口が急増しており、データベースも組織的に進めている。また、遺伝データの抽出等においても安価に実施できる民間企業などもあり、官民ともに突然生物多様性研究を推進する体制を整えた様子が見られる。一方で、個別に発表されるデータや論文はまだ表面的なものも見られ、過去のデータ蓄積や時間変動などを含めてデータそのものの厚みがないものも見られるが、今後も量・質ともに向上していくものと考えられる。</li> <li>●鳥類ゲノム解読プロジェクト<sup>29)</sup>や生物多様性のデータベース化<sup>30)</sup>が進行中。</li> <li>●海洋に関して、北西太平洋地域海行動計画 (NOWPAP) や北太平洋海洋科学機構 (PICES) 等において取り組みを進めている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>●国際会議の誘致や支援などによって、積極的に主要な研究者との結びつきを強めている。また、国際誌で発表された指標をその著者らのグループと協力して早期に適応して評価した例を作成した例も複数見られる。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>●あまり情報が見られない。海洋については近年生物多様性の研究センターとなる「National Marine Biodiversity Institute of Korea (MABIK)」を舒川郡に設立している。</li> <li>●K-BON (Korean Biodiversity Observation Network) が設立されている。</li> <li>●海洋に関して、北西太平洋地域海行動計画 (NOWPAP) や北太平洋海洋科学機構 (PICES) 等において取り組みを進めている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>●あまり情報が見られないが、渡り鳥については East Asian - Australasian Flyway Partnership (EAAFP) の事務局を設置するなど以前から一部の地域と分野で積極的であるが、研究や他の生態系調査とのシナジーについては不明である。</li> <li>●2013年に National Institute of Ecology が設立され、基礎生態研究と生態系の問題解決のための生態系情報の提供を行っている。</li> </ul>
豪州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●特に海洋生態系に関する研究分野については、データの収集、データベースの作成、データの解析、保全への応用のいずれの分野においても、群を抜いている研究グループが見られる。一方で国内での横の連携がどのくらいあるのかや、現状のモニタリングや基礎研究の増減についての詳細は不明である。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>●保全の管理手法に関する研究、温暖化による予測評価に関する研究、生物多様性の評価に関する研究、海洋のリモートセンシング技術に関する研究など、大学ごとに特色のある研究が大型予算を使って進められている。著名な国際雑誌に大学院生やポスドクが欧州や米国の研究者と協力して作成した論文が掲載される例も多く見られる。また欧米には日本以上に遠路にも関わらず、世界各地の学会でのセッションの設定やワークショップの開催などを積極的に行う様子も見られている。</li> <li>●Atlantis のような世界的に使用されている生態系評価モデルを開発している。CCAMLR (南極海洋生物資源保存委員会) では、オキアミとその捕食者を考慮したオキアミ予測モデル開発を主導している。</li> </ul>
カナダ	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●FishBase などのデータベースの構築、国際ネットワークの構築などで、世界の研究をリードしている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●Ecopath/Ecosim のような世界中で広く使われている生態系モデルを開発し、応用研究を進めている。</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

## (註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

## (註3) トレンド

↑: 上昇傾向、→: 現状維持、↓: 下降傾向

## (8) 参考文献

- 1) H. M. Pereira, H.M. et al. (2013) Essential biodiversity variables. *Science*, 339, 277-278.
- 2) Turner (2014) Sensing biodiversity. *Science*, 346, 301-302.
- 3) 神保宇嗣. 2016; "生物多様性情報データベースの構築と公開の実践: 種名および標本情報を例に". *日本生態学会誌*. 66(1):221-7.
- 4) Woolley SNC, Tittensor DP, Dunstan PK, Guillera-Arroita G, Lahoz-Monfort JJ, Wintle BA, et al. 2016; "Deep-sea diversity patterns are shaped by energy availability". *Nature*. 533(7603):393-6.
- 5) Stuart-Smith RD, Bates AE, Lefcheck JS, Duffy JE, Baker SC, Thomson RJ, et al. 2013; "Integrating abundance and functional traits reveals new global hotspots of fish diversity". *Nature*. 501(7468):539-42.
- 6) Sutherland WJ, Aveling R, Bennun L, Chapman E, Clout M, Côté IM, et al. 2012; "A horizon scan of global conservation issues for 2012". *Trends Ecol Evol*. 27(1):12-7.
- 7) Gregory TS, Tse ZTH, Lewis D. 2015; "Drones: Balancing risk and potential". *Science* (80-). 347(6228):1323.
- 8) Bewley M, Friedman A, Ferrari R, Hill N, Hovey R, Barrett N, et al. 2015; "Australian sea-floor survey data, with images and expert annotations". *Sci data*. 2.
- 9) Hansen RE, Callow HJ, Sabo TO, Synnes SAV. 2011; "Challenges in seafloor imaging and mapping with synthetic aperture sonar". *IEEE Trans Geosci Remote Sens*. 49(10):3677-87.
- 10) Ashton PM, Nair S, Dallman T, Rubino S, Rabsch W, Mwaigwisya S, et al. 2015; "MinION nanopore sequencing identifies the position and structure of a bacterial antibiotic resistance island". *Nat Biotechnol*. 33(3):296-300.
- 11) Roger F, Bertilsson S, Langenheder S, Ahmed Osman O, Gamfeldt L. 2016; "Effects of multiple dimensions of bacterial diversity on functioning, stability and multifunctionality". *Ecology*.
- 12) Bellwood DR, Goatley CHR, Bellwood O. 2016; "The evolution of fishes and corals on reefs: form, function and interdependence". *Biol Rev*.
- 13) Williams N, Stewart A, Papadopoulos P. 2015; "Virtualizing Lifemapper Software Infrastructure for Biodiversity Expedition". *arXiv Prepr arXiv150906695*.
- 14) Hiroo Imaki. "Geopacific.org". Available from: <http://www.geopacific.org/>
- 15) 田中克彦, 新井隆弘, 岸良武文, 山内東, 齋藤秀亮, 華房康憲, et al. 2014; "海洋生物情報の公開と応用展開". *JAMSTEC Rep Res Dev*. 18(0):81-8.

- 16) Sugihara G, May R, Ye H, Hsieh C, Deyle E, Fogarty M, et al. 2012; "Detecting causality in complex ecosystems". *Science* (80- ). 338(6106):496–500.
- 17) Hajishengallis G, Lamont RJ. 2016; "Dancing with the stars: how choreographed bacterial interactions dictate nososymbiocity and give rise to keystone pathogens, accessory pathogens, and pathobionts". *Trends Microbiol.* 24(6):477–89.
- 18) "CASCADE(catastrophic shifts in drylands)". Available from: <http://www.cascade-project.eu/>
- 19) Speed T. 2011; "A correlation for the 21st century". *Science* (80- ). 334(6062):1502–3.
- 20) Domínguez-Tejo E, Metternicht G, Johnston E, Hedge L. 2016; "Marine Spatial Planning advancing the Ecosystem-Based Approach to coastal zone management: A review". *Mar Policy.* 72:115–30.
- 21) Yamakita T, Yamamoto H, Nakaoka M, Yamano H, Fujikura K, Hidaka K, et al. 2015; "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". *Mar Policy* [Internet]. 51:136–47. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2014.07.009>
- 22) Bonney R, Shirk JL, Phillips TB, Wiggins A, Ballard HL, Miller-Rushing AJ, et al. 2014; "Next steps for citizen science". *Science* (80- ). 343(6178):1436–7.
- 23) JST-CRDS, 俯瞰ワークショップ報告書 環境分野の研究開発の概況  
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2016/WR/CRDS-FY2016-WR-06.pdf>
- 24) <http://www.fishbase.us/>
- 25) <https://coraltraits.org/>
- 26) Hansen, M.C. et al. (2013) High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342, 850-853.
- 27) Phillips, S.J. et al. (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259.
- 28) Ficetola, G.F. et al. (2008) Species detection using environmental DNA from water samples. *Biology Letters*, 4, 423-425.
- 29) <http://avian.genomics.cn/en/index.html>
- 30) Asia Biodiversity Conservation and Database Network (ABCDNet)  
<http://www.abcdn.org/>

### 3.3.2 生態系サービスの評価・管理

#### （１）研究開発領域の簡潔な説明

生態系サービスとは、生物多様性を基盤とする生態系から得られる恵みのことをいう。食料や水の供給、気候の調整や水質浄化、生息・生育環境の提供や遺伝的多様性の維持、レクリエーションや観光の場と機会の提供などが該当する。生態系サービスの維持や活用のために、生態系サービスが発揮されるプロセスを明らかにし、生態系サービスの評価や管理を行うための研究開発領域である。

#### （２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

##### [意義]

生物多様性や生態系に関する研究開発は、従来の自然保護の観点のみならず、食料や水の供給、気候の調整、観光の場などの生物多様性を基盤とする生態系から得られる有益な恵み（サービス）である生態系サービスを持続可能な形で利用するという観点からも必要性が認識され、重要視されている。近年、生物多様性条約 COP10 で愛知目標が制定され、生物多様性の評価や生態系サービスの保持が謳われ、さらに、気候変動や、防災・減災、持続可能な開発に関する国際的な枠組みにおいても生態系サービスの維持や活用が重視されている。そうした社会的ニーズに応えるためには、生態系サービスを実現するプロセスの解明と定量的な評価や、生態系サービスを維持しながら利用していくための社会システム、管理技術、ガバナンスの検討が必要となる。

##### [動向（歴史）]

生態系のもつ生態系サービスは「公益的機能」と呼ばれ、日本では古くから注目されてきた。特に森林生態系のもつ水源涵養や土砂流出防備などの機能については、国としては 1972 年の林野庁による公益的機能の計量・評価を始めとして戦後多くの研究業績がある<sup>1)</sup>。政策的にも、明治 30 年の森林法制定時から保安林制度として導入され、伐採規制をしながら水土保全機能を維持する政策がとられている。

生物多様性に関する研究開発については、90 年代までは生物学・生態学で、90 年代からは地球環境問題として、2010 年以降は社会学や経済学との統合の中で行われてきた。1991 年には DIVERSITAS という国際的な生物多様性の研究枠組みが発足した。1992 年にはエコロジカル・フットプリントの概念が提唱され、1993 年には生物多様性条約（CBD）が発効した。また、生態系と人間活動との相互関係を把握する実験的生態系勘定は、国連が 1993 年の国民生態系計算の改定に際し、そのサテライト勘定として導入した「環境・経済統合勘定」（SEEA : Satellite System for Integrated Environmental and Economic Accounting）の中に導入されたものである。1997 年の Costanza の論文では、生態系サービスの経済評価を初めて世界中で行った<sup>2)</sup>。1998 年には、生態系がどの程度安定しているかを検証した研究（Resilience Alliance）がある。

2000 年代に入ると、地球規模生物多様性情報機構（GBIF : Global Biodiversity Information Facility）という、生物多様性に関するデータ収集と全世界的な利用を目的とする国

際的なプロジェクトが開始された。前述の DIVERSITAS はセカンドフェーズに入り、人間活動に目を向け始めた。全球地球観測システム (GEOSS : Global Earth Observation System of Systems) も始動した。そして、大きな動きとして国連が主導した MA 報告書 (Millennium Ecosystem Assessment) という世界の生態系サービス評価がある。同じ時期に、今まで無料と思われてきた生態系サービスに対して支払うシステム (PES : Payment for Ecosystem Services) を考えようという論文が発表された。PES は、生態系保全の財源を確保する方法として各地で研究開発と制度の導入がされている。ただし、PES の有効性が指摘されつつも、そのみでは問題を解決できず、その他の手法も組み合わせる必要性が指摘されている<sup>3)</sup>。PES 以外の手法として生物多様性オフセットが注目されており、欧米を中心に研究開発と社会実装が進んでいる。生物多様性オフセットとは、自然地の開発を行う際に、その開発の後に開発前よりも生態系を劣化させないことを目的として、開発の影響を開発地やそれ以外の地域において代償する手法である。実施する際の考え方として、米国で誕生したミティゲーション順位 (mitigation hierarchy、回避、最小化、代償の順に考えること) がある<sup>4)</sup>。また、生物多様性オフセットの達成基準としては、トータルとしての生物多様性の消失を発生させないというノーネットロス (no net loss) が必要最低限のものとなっている。さらに、トータルとしての生物多様性の向上を目指すネットゲイン (net gain) を要求している国もある。実施方法として、開発事業者自らがオフセットを行う場合の他に、バンキングを使う方法が発達し、米国やドイツで運用されている。特に豪州では、生物多様性クレジットを市場で売買する半官半民のシステムが導入され、注目されている。<sup>5)</sup>

前述の GEOSS の一環として、生物多様性を観測する生物多様性観測ネットワーク (GEO-BON : Group on Earth Observation - Biodiversity Observation Network) が発足した。2010 年には Tipping Point (重大な変化が起きる転換点) の概念が提唱され、生態系サービスや生物多様性を経済評価するレポート (「生態系と生物多様性の経済学」 (TEEB : The Economics of Ecosystem and Biodiversity) や、世界中の生物多様性の概況に関する「地球規模生物多様性概況第 3 版 (GBO3 : Global Biodiversity Outlook 3) 」が公表された。

日本では 2010 年に「生物多様性総合評価 (JBO1 : Japan Biodiversity Outlook 1) 」が実施された (環境省)<sup>6)</sup>。生態系を森林、農地、都市、陸水、沿岸・海洋、島嶼に区分し、様々な指標を用いながら定性的に評価され、特に陸水、島嶼生態系の劣化が著しいことが示された。同時期に日本の里山・里海評価 (JSSA : Japan Satoyama Satoumi Assessment) が公表され (国連大学サステナビリティ高等研究所 UNU-IAS)、人為の加わった日本の伝統的な二次的自然について、その生態系サービスや人間への福利が評価された。2011 年には、全国を対象とした生物多様性評価の地図化が実施され (環境省)、地形地域区分ごとおよび市町村ごとに評価が示され、GIS ベースで公表されている。2013 年には、千葉県をモデル流域とした様々な生態系サービスの定量評価が実施され地図化されている (環境省)。また、同年、日本の湿地が有する経済的な価値の評価が試行的に実施されている (環境省)。

国際的にも 2010 年以降、生物多様性と生態系サービス評価の流れがいつそう加速し、生物多様性条約の中で世界中の生態系や生物多様性を評価する組織である「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)」が 2012 年に設立した。気候変動でいう IPCC に相当する組織であり、2018 年に最初のレポートを出すこととなって

いる。

社会・経済的には、これまで無料であった生態系サービスを会計システムの中に組み込もうという動きが出てくる。先に述べた SEEA は、2003 年、2012 年と改定が続き、2012 年国連統計委員会にて中核的枠組み (SEEA-CF : SEEA Central Framework) が国際基準として策定され、2013 年には SEEA 実験的生態系勘定が国際ガイドラインとして採択された<sup>7)</sup>。2012 年には、GDP ではなく、自然資本と生産資本、人的資本の 3 つを富の指標として考え、世界中の経済成長を図るという、Inclusive Wealth に関する最初のレポートが公表された<sup>8)</sup>。2013 年には、ステークホルダーを巻き込んだ領域横断的な研究が必要だということで、Future Earth が活動を開始した。2015 年には持続可能な開発目標 (SDGs) が掲げられた。また、REDD+ (Reduction of Emission from Deforestation and forest Degradation plus) という、持続可能な森林経営のために経済的支援を国際的に行う仕組みが 2020 年の実施に向けて準備が進められている。このような流れの中で研究開発が進んでいる。

産業界における関心も高まり、様々な取り組みが進められている。全世界 250 社を超える会員企業をもつ非営利組織である BSR (Business for Social Responsibility) が 2013 年に公表した生態系サービス評価ツール群<sup>9)</sup>には、企業の生態系サービスへの依存や影響を評価し、意思決定や報告書作成に活用可能なツールが掲載されている。自然資本連合内の NCP (Natural Capital Protocol) は、企業における自然資本評価の標準化に向け 2014 年 6 月に立ち上げられ、2016 年 5 月にガイドラインを公開した<sup>10)</sup>。現状は食料・飲料業界とアパレル業界が対象のガイドラインであるが、今後、対象の業界を拡大する計画である。国連大学サステナビリティ高等研究所 (UNU-IAS) 等は社会生態学的生産ランドスケープ・シースケープにおけるレジリエンス指標に関するツールキットを取りまとめ 2014 年 11 月に発表した<sup>11)</sup>。指標を用いた評価から生まれた資金提供のメカニズムは、主に開発途上国において実用化が進んでいる。

生物多様性条約事務局が 2014 年に公表した Ecosystem Natural Capital Accounting: A Quick Start Package<sup>12)</sup>は、国際基準の SEEA-CF<sup>13)</sup>を基に、生態系サービスと生態系資産の評価方法を提案している。ここで示されている評価項目やフレームワークは、国だけでなく、企業や自治体での評価にも活用されることが期待されている。一方、米国スタンフォード大学が中心に取り組む Natural Capital Project が開発した、保全活動を測るツール OPAL<sup>14)</sup>や、費用対効果最適化ツール RIOS<sup>15)</sup>等は、世界的に活用が拡大している。

企業の生態系サービスの評価や管理は、CSR 側面のほか近年では、事業の持続性の側面として重視されている。国際統合報告評議会が公開を要求<sup>16)</sup>している自然資本などの非財務情報は投資判断に活用されつつある。また、2010 年発行の国際規格 ISO26000<sup>17)</sup>は人権と多様性尊重の概念を包含し、2015 年改訂の ISO14001<sup>18)</sup>では生物多様性保全の項目が追加され、事業活動のサプライチェーンにおける生態系への影響を考慮することが環境経営の要件となった。ISO20400 では持続可能な調達を実現するガイドラインの作成が進む。ISO14008 では事業活動における環境負荷を経済価値評価で示す方法をスウェーデンが 2015 年 9 月に提案した<sup>19)</sup>。2015 年 8 月には SDGs<sup>20)</sup>にも生物多様性の目標が掲げられるなど、生態系サービスの評価、管理の必要性がますます認知され、企業の関心は高くなっている。

### （3）注目動向

#### [新たな技術動向]

- 2013年に国際ガイドラインとして採択された **SEEA** 実験的生態系勘定では、生態系は生物群集と非生物的環境によって構成される地域（空間エリア）として定義され、生態系サービス（フロー）とそれを供給する生態系資産（自然資本＝ストック）によって捉えられている。他の会計も同様であるが、**SEEA**でも生態系勘定をストックとフローの概念でとらえている。資産はストックで表されるが、フローは生態系サービスと資産の変化の2つの意味があり、人間への便益に直接寄与するもののみ、生態系サービスとして位置付けられている。したがって、生態系内や生態系間のフローならびに、ミレニアム生態系評価（**MEA**）で定義された基盤サービスも生態系サービスには含まれていない。また、生態系サービスを生み出すポテンシャルを示す「生態系容量」と、ある利用パターンを前提とした場合に期待できる「生態系サービスの期待フロー」との両面から計測され、利用の持続可能性を評価しようとしている点が興味深い。この考え方によって地域における生態系サービスの資産のみならず効率的な利用とそれを難しくしている社会システムについても検討することが可能になる。
- 包括的な豊かさの指標（**Inclusive Wealth Index**）は、2012年国連持続可能な開発会議（リオ+20サミット）において、**The Inclusive Wealth Project**によって発表された指標である。この指標は、国民総生産（**GDP**）や人間開発指数（**HDI**）などの従来の短期的な経済発展を基準とせず、自然資本、人工資本、人的資本の合計を富の指標として捉え、これらの資本が直接、間接的に人間の福利に結びついていると考えている。自然資本の中には、化学燃料、鉱物、森林資源、農耕地があげられており、生態系サービスについては2014年の**Inclusive Wealth Report**の「**New insights**」の中で取り上げられている。古典的な経済学では、人間の福利は、主として所得と効用の増大として捉えてきたが、それらが必ずしも人間の福利の増加に結び付いていないことは先進国の事例からも明らかであり、これらの指標は、生態系サービスの持続的な発揮を考えるうえでも重要な視点を提示している。
- オーストラリアは、バイオバンキングなどの生物多様性の価値改良と維持政策に結びつける定量評価<sup>21)</sup>や、海岸線のサンゴの価値を定量化して保全と観光を繋げた生態系アプローチに成功<sup>22)</sup>した。オーストラリア国立大学は、スーパーコンピュータを用いた地球規模の気候シミュレーションにより、生物多様性の損失を科学的に予測して警鐘を鳴らした<sup>23)</sup>。英国では自然環境研究会議等による**UK NEAFO**<sup>24)</sup>の公開、生態系サービス評価のツールと事例集**"NEAT Tree"**<sup>25)</sup>の提供がある。日本では、社有林の生態系サービス定量化<sup>26)</sup>や自治体の森林や農地に関わる生態系サービスの経済価値を算出するツールの公開<sup>27)</sup>などがある。

#### [注目すべき国内外のプロジェクト]

- 地球環境研究の国際プログラムの再編が進み、**Future Earth**が誕生した。その特徴として、自然科学と人文・社会科学が強く連携すること、またトランスディシプリナリティを強調し、社会問題解決型の研究推進が謳われている。**JST**社会技術研究開発センターでは、**Future Earth**構想の推進事業の一環として、2014年度から、「日本が取り組むべき国際的優先テーマの抽出及び研究開発のデザインに関する調査研究」と「トランスディシプリナリー研

究として推進すべき研究開発の可能性調査」を実施しており、生物多様性や生態系サービス、また生態系を生かした防災・減災についてのフィージビリティ研究が幾つか実施されている。いまだ、フィージビリティ研究が始まったばかりであり、トランスディシプリナリティを可能にする研究計画や実施についての方法論は確立しておらず、今後の地域研究成果が注目される。

- 「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）（2011～2015年度）では、生物多様性条約（CBD・COP10）で採択された愛知目標への貢献、特に保全優先度を明示した地図を作製することを目標とした。結果的に森林、陸水、海洋生態系におけるアジアを含む生物多様性情報の集積、それを解析する新たな手法の開発が進み、多くの研究成果が国際誌ならびに国内学会誌に発表された。
- 「社会・生態システムの統合化による自然資本・生態系サービスの予測評価」（環境省環境研究総合推進費 S15）（2016～2020年度）では、日本を中心にアジア地域も視野に入れながら、自然資本・生態系サービスの自然的・社会経済的価値の予測評価を行い、シナリオ分析に基づく複数の政策オプションを検討している。最終的には、包括的な福利を維持・向上させるためのガバナンスのあるべき姿を提示することを目指して、自然・社会科学ならびに陸域・海域の研究者が集まり、大規模プロジェクト研究が進行中である。
- 世銀が主導するWAVESも注目に値する。国連機関、各国政府、NGO、学術研究機関などが参画する「富の勘定と生態系サービスの価値評価」についてのパートナーシップである。WAVESは英国、日本、オーストラリア、カナダ、フランス、ノルウェーが出資しており、環境勘定の方法を確立し、国の政策分析や開発計画に組み込むこと、さらに生態系勘定のための国際的ガイドラインを策定することを目的としている。
- ブラジルでは、2009年設立のNGO LIFE Instituteが生物多様性保全活動の効果の定量評価方法を公開し、企業の生物多様性保全の取組を認証する制度“LIFE Certification”<sup>28)</sup>の管理・運営を行っている。

#### （4）科学技術的課題

##### [課題（ボトルネック）]

フローとしての生態系サービス評価は、すでに多くの研究事例もあり、InVESTなど汎用性のある生態系サービス評価ツール（オープンツール）も公開されている。しかし、それらを精度よく計算するための基礎データが揃っていない。評価や管理には、環境、社会、経済に関わるデータが必要だが、環境、特に生態に関するデータが不足している。国や都道府県レベルの算定については統計データもある程度公開されており、粗い計算が可能であるが、自然資本を管理し生態系サービスの恩恵を受ける主体である流域レベル、市町村などの地方自治体レベルでは基礎データがほとんど公開されていないのが実情である。自治体レベルで統計データと地理空間情報とを地理情報システム（GIS）により連結するなど、綿密なデータ整備、そして定期的なデータ更新が求められる。

自然資本や生態系サービス、その利用を評価するためには質的、量的指標が必要になる。多くの場合、生態系サービスそのものを表す指標を既存統計データから見つけることは難しく、これまでの研究事例から代表値を定めたり、関連する統計データによって代替したりすることが多い。したがって、これらが本当に自然資本や生態系サービスを表す指標として適

当かどうかについての科学的検証が必要になる。SEEA 実験的生態系勘定でも、サービスの需要、供給、配分の計測方法に関するさらなる検討が求められている。そして、自然資本や生態系サービスを貨幣勘定する場合は、評価手法の適切な選択や設定根拠の検証など課題は多く、今後の研究が要請される。

生態系勘定を作成する際には、生態系サービスの恩恵を受ける受益対象範囲の適切な選定が必要である。これは、範囲如何によって生態系サービスの受益量や劣化コストの配分が変わるためである。そのためには、生態系間および生態系内の物的フローと生態系サービスとの関連性を検証し、その計測手法を確立する必要がある。自然資本と生態系サービスの関係性は複雑であり、どんな規模とどんな状態の生態系から、どの程度の生態系サービスが生み出されるのか、いまだ不明な点が多く、今後の研究開発が求められる。

さらに、生態系サービスについてはダブルカウントに気をつけなければならない。様々な生態系サービスはお互いに独立した機能ではなく、関係性が強いものも多い。例えば河川の水質浄化機能と栄養塩循環機能とは相互に関係するものであり、換算価値が計算できたとしてもそれを単純に足し合わせることはできない。この点についても検討が必要とされる。このように、複数の生態系サービス間には、シナジー効果（相乗効果）とトレードオフ効果（相反効果）が存在する。例えば森林を保全することは、二酸化炭素の吸収と野生生物の生息場提供など、複数の生態系サービスの向上につながるのに対して、森林を伐採することは、木材の供給として利益をもたらすが二酸化炭素の吸収の低下につながる。こうした生態系サービス間のシナジーとトレードオフの関係は、複雑でまだ解明されていない部分も多く、今後の検証が必要となる。

国外の生態系サービスへの依存は、貿易により多くの国外自然資源に依存している日本において重要であるが、研究は進んでいない。エコロジカル・フットプリントという土地生産力等に着眼した持続可能性につながる土地利用指標を用いて検討している例はあるが、生物多様性や様々な生態系サービスとの関連は不明である。英国ではマテリアルフロー分析により、海外からの輸入量を整理している。

ガバナンスも課題である。Future Earth においても地域社会やステークホルダーが強く意識され、IPBES の概念的枠組みでも生態系サービスを発揮するための制度やガバナンスが中心に据えられている。自然資本や生態系サービスを評価するだけでは不十分で、これらを持続的に利用する社会システムとしてのガバナンス研究が必要であるが、いまだ社会実装できるような研究は進んでいない。ここでも都道府県より小さい自治体や流域レベルでのガバナンス研究が求められる。

生態系サービスと自然資本は、定量化から経済に取り込む実践の段階に移行し、それに向けた課題解決の時期となった<sup>29)</sup>。生態系サービスをどの程度利用し、また環境への負荷をどの程度与えているのかを単に定量化するだけでなく、経済活動へ内部化することが可能になるように、金銭換算する技術を開発し、経済システムに組み込むことが課題である。例えば、内部化に向けての課題は、「生態系サービスの直接的利用価値をもつ供給サービス<sup>30)</sup>は、物量で定量化できるが、サプライチェーンを含めて生産工程で投入された価値（負荷）が考慮されない<sup>31)</sup>。」「CO<sub>2</sub>等は GHG プロトコルの Scope3 基準<sup>32)</sup>、水はウォーターフットプリント指標で評価<sup>33)</sup>されるが、供給サービスの対象物全般での考慮は不十分。」「生産工程を含むライフサイクルで投入される価値を供給物の価値に反映する必要がある。」ことである。

経済価値換算においては、間接的利用価値<sup>34)</sup>の定量化が課題である。間接的利用価値の調

整、生息・生育地、文化の各サービスは、機能の能力と処理量から定量化されるため、機能の抽出、選定と定量化の精度向上が課題である。また、間接的利用価値に適用される顕示選好法のうち、代替法では、生態系サービスを市場財である人工物の費用などで代替するが、人工物は特定の機能にフォーカスされていることが多いため、生態系サービスのもつ多様な価値を認識して代替することが課題である。

一方、非利用価値の遺産価値や存在価値は、利用価値に繋がる生物多様性の基盤として注目され、時間軸を用いて定量化することや、生態系への人間の介入や管理の度合いが生態系の質に与える度合の定量化が課題と考えられる。また、非利用価値に適用される表明選好法は、アンケート調査の対象者の価値観や社会情勢、地域、歴史などのバイアスの影響、実施に際しての調査期間や費用等が課題である。

供給サービスの経済価値換算では、供給物に市場価格があり、供給量と取引単価で換算する市場価格法が理解しやすいが、市場価格にはライフサイクルでの投資額のほか需給バランスの影響が大きく、精度高く換算できない側面もある。間接的利用価値や非利用価値の寄与を供給サービスの価値に反映させることが課題と考えられる。

日本国内の生態系サービスは減少か横ばいで<sup>35)</sup>、サプライチェーンにおいてもその源泉の自然資本自体が量的、質的に大幅に低下している。その一因として、現在の経済システムに基づく経済価値換算では本質的に生態系サービスの価値を評価できておらず、過小評価していることが考えられる。フローである生態系サービスのみならず、源泉としてのストックである自然資本を質と量の観点から適正に評価することが課題といえる。生きている地球指数<sup>36)</sup>やエコロジカル・フットプリント<sup>37)</sup>の評価からも、国、地域などで差異はあるが自然の再生機能の回復以上に生態系に負荷を与えていることは明らかであり、生態系サービスの持続的利用には、負荷低減のほか自然資本を維持、管理することが必要である。特に生物多様性の根幹をなす動植物等の生物資本は再生可能かつ枯渇性であるため<sup>38)</sup>、再生可能な負荷で枯渇しないように、質と量の両面で管理することが課題である<sup>39)40)</sup>。

#### [今後取り組むべき研究テーマ]

総合的な生態系評価手法の確立（例えば生態系勘定）と、計算するための基礎データの整備、データを利活用するための、データ収集、変換、統合、解析技術が必要である。基礎データについてはまずは都道府県レベルで整備し、そして生態系サービスの受益者であり、生態系の実質的な維持管理者でもある市町村レベルでの整備により、最終的に生態系評価自体の精度を上げていくことが必要になる。生態系勘定を計算するための自然資本データと生態系サービスの特定、そのフローに関する指標の選定、さらにサービスの需要、供給、配分、空間的つながりなど、検討すべきテーマは多い。これまでも生態系サービスの地図化は研究的には実施されてきたが、多くはポテンシャル評価であり、それを利用するためにはどのような社会・経済、土地利用システムが必要かについて検討できていない。また、対象地域の需要や供給、配分関係を空間明示的に示したものはない。これが示されれば、自然資本のオーバーユーズやアンダーユーズ、それに伴う生態系サービスの変化を可視化することが可能になり、将来に向けて持続的に生態系サービスを活用するためには、どのような土地利用計画を進めていけばよいか、処方箋を描くことが可能になり波及効果は高い。また、生態学を考慮したサプライチェーンでの間接的利用価値等の評価技術の構築や、自然の回復力を考慮した生態系サービスの能力を定量評価する技術も求められる。

生態系サービス評価のマクロスケールの研究としては、シナリオ研究が必要になる。想定シナリオとしての大きな駆動要因は、気候変動と土地利用変化であろう。気候変動もしくは土地利用形態の変化に伴い、生物多様性や生態系サービスが変化することについては多くの研究業績があるが、これらを同時に扱った研究は少なく未知の領域である。一方で、現実社会は、温暖化適応策として土地利用対策も同時に考慮しながら進む以外に道はなく、シナリオ研究が有効になる。環境保全か経済活動優先かなど、幾つかの現実的なシナリオを準備し、それらのシナリオによって生物多様性や生態系サービスがいかに変化するかを予測することは自然共生型の持続可能な社会を実現するためにも重要である。また、こうした流れからは、気候変動と生態系資産、生態系フローの変化を結び付けた研究が求められる。

生物多様性と生態系サービスの関連性も古くて未解明な課題である。先に述べた通り、生態系サービス間にはトレードオフが存在し、ある生態系サービスに特化した土地利用政策は生物多様性を劣化させる。一方で、生物多様性を維持することによって発揮される生態系サービスは何か。またそれを高く発揮するためにはどのような管理が必要かなどについては未解明であり、検討すべきテーマは多い。多くの資源を輸入に頼る日本の現状を考えると、日本での輸入などによる海外の資源利用が海外の生物多様性や生態系サービスに及ぼす影響の評価も課題である。

生物多様性と生態系サービスを持続的に維持しながらその恩恵を享受するためには、地域社会が共同で自然資本を管理する社会システム（ガバナンス）が必要になる。こうした共同管理については、伝統知であるコモンズ論を発展させる必要があり、本当の意味での文理融合型研究が必要となる。かつて地域社会は、薪炭・用材・肥料用の落葉を採取したり、屋根に葺くカヤなどを採取したりする共同の山林、原野を持っていたが、経済発展とともにこうした仕組みは姿を消した。生態系サービスを管理するためにはこうした共同管理、応益分担などの考え方が再び必要になると考えられ、これが **Future Earth** のめざす **Co-Design**、**Co-Production**、**Co-Delivery** の考え方である。こうした文理融合研究は、生態系サービスの管理に関する成果が社会実装されるために必要である。

地殻変動、気候変動、人口減少、社会資本の老朽化など、多くの難題を抱える日本の将来を考えた時、生態系サービスの一つである防災・減災機能を活用することが肝要である。この点については、日本学術会議から「復興・国土強靱化における生態系インフラストラクチャー活用のすすめ」と題する提言書が出されており、ヨーロッパではグリーン・インフラストラクチャー、世界的には **Eco-DRR** (**Ecosystem-based Disaster Risk Reduction**、生態系を基盤とした防災・減災)として知られている。すでに生態系を活用した防災・減災研究は、インパクトファクターの高い世界のジャーナルに発表されているが、日本では環境省環境研究総合推進費として幾つかの課題が採択され、研究が始まったばかりである。実用的には、防災工学的なハードな構造物と自然生態系を生かした土地利用とのハイブリッド技術が必要であり、基礎的な研究開発が望まれる。また、自然生態系はハードな構造物と比べて高いレジリエンスをもつと言われている。しかし、こうしたレジリエンスがうまく生かされるためには、上に述べたガバナンス論に関連して、社会・経済的レジリエンスも検討しなくてはならない。こうした生態系がもつ減災・防災機能と環境（生態系）、社会、経済的レジリエンスをいかにつなげて分析し、政策に結び付けていくかも重要な研究開発分野といえる。

PES、オフセットを含む生物多様性保全のための財源確保の議論においては、経済的、環境的側面のみでは、スキームの持続可能性は評価できず、インセンティブの配分、貧困削減

等の社会的な側面が、持続的にスキームを運用するうえで無視できない<sup>3)</sup>。そのため、スキームの持続性を評価する社会・経済的な側面を含む指標体系の構築が課題となっている。また、PESの効果について、一般的に、環境の効果と経済の効率性の評価が不十分とされ、課題となっている<sup>4)</sup>。その効果、効率性の検証は、生物多様性オフセットにおいても課題である。PESの実用上の懸念事項として、追加性（addictivity）、リーケージ（leakage）、永続性（permanence）、負のインセンティブがあげられているが、その評価はほとんど進んでおらず、実地上の研究が必要とされている<sup>4)</sup>。科学的な評価手法の確立は、生物多様性オフセットにおいても必要とされている。今後、国境を越えたPESの取り組みが進展し、国際的なオフセットも一般的になる可能性を鑑みると、評価手法を発展させることは、国際的なイニシアティブを得るためにも課題といえる。

### （5）政策的課題

生態系サービスの価値の重要性を人々に広く認知させることが急務となっている。このため、生態系サービスの価値を評価する方法の標準化に向けた評価技術の指針と評価した結果を基に行うべき施策の提示が求められる。さらに、実社会における活用方法を見据えたデータ収集、解析、問題把握、技術による解決を探るプロセスは、「情報」を軸に、産業界やNGOも巻き込んだ透明性のある実践的な研究や議論に基づくことが、新しい制度立案や積極的な投資の意思決定の実現と拡大に繋がると考えられる。

このような状況から、自然資本までも含めた生態系サービスの必要性和定量的価値の認知度向上の課題として4項目をあげることができる。①「生態系サービスの適正価値の評価支援」、施策としては評価技術開発者へのインセンティブ付与や評価に必要な基礎データ、関連データの完備が考えられる。②「生態系サービスの価値を経営指標に導入する企業数の拡大」、施策として企業の経営指標に生態系サービスの価値を導入することの義務化や、実施企業へのインセンティブ付与があげられる。③「生態系サービスの価値を経営指標に導入するための簡素な仕組みの構築」、施策として環境レポート、会計の枠組みの提供や、算出技術のガイダンス提供などが考えられる。④「上記取組の普及促進」、例えば、トップランナー企業へのインセンティブ付与により普及促進につながると考えられる。

また、生態系サービスの評価技術は様々であり、元となるデータの性質からも精度の議論は難しいと考えられる。したがって、グローバルな合意に基づくオーソドックスな評価技術が必要であり、IPBESなどの国際的枠組みから指針が出た後、日本としての指針や方向性を示す必要がある。評価技術に関しては、上述のように国際標準化機構でも議論されており、実施可能な枠組みの構築が期待される。技術の決定に際しては、生態学的な観点と経済学的な観点のどちらからも納得できる技術でなければならない。生態学の専門家と経済学の専門家、加えるならば実際に使用するユーザとして企業担当を加えた議論の場を設けて、議論を重ねて決定するプロセスとそのような場の設定が必要と考えられる。

ストック、フローを含めた総合的な生態系評価を行う上でのデータが整っていないことが課題である。特に、市町村レベルにおけるデータを収集することが難しい。さらに、日本版SEEAのような生態系勘定の枠組みを日本の現状に合わせて構築することが必要であり、研究者と行政機関の共同で行うべき課題であると思われる。

さらに、生態系サービスの発揮のためには土地利用政策が最も重要になる。残念ながら日

本の政策を俯瞰すると、人口減少や社会資本の老朽化などは国レベルでは示されているが、それが空間明示的になっておらず、また土地利用政策と結びついていない。例えば社会資本の老朽化問題では、いかに既存施設を維持するかのみが工学的に議論され、その施設を必要とする地域社会がどうなるかまで議論ができていない。場所によっては、そうした施設を廃止し自然に戻す国土政策も必要になってくるだろう。そうした自然への復帰は新たな生態系サービスを生む可能性もあり、決して負の面だけで語られるべきではない。こうした将来社会や経済の変化と結び付けた生態系サービスの復元、維持を、空間明示的に議論すべきであるが、うまく実現できていないのが現状である。

受益者負担原則を実際に徹底することは難しく、ステークホルダー参加型で PES を運営することの困難さも指摘されている。PES は本来、環境価値の市場取引も包含するスキームとして捉えられる。しかし、実際には、純粋に環境価値の市場取引のみで制度を運用する事例は極めて少数派であり、政府・国際機関等による支払いの事例が多い。加えて、全 PES スキームの 90% は公的機関による出資<sup>42)</sup> となっており、公的機関に依存した取り組みが主流となっている。

生態系サービスへの対価を、国境を越えて支払う仕組みとしても位置づけられる REDD+ は、2013 年の COP19（国連気候変動枠組条約 第 19 回締約国会議）にて基本的枠組みが決定されている。財源や技術的な側面の詳細は交渉中である。森林へのアクセスについては、欧州のなかでもスウェーデンのように万人権として森林の副産物へのアクセスが確立している場合もあれば、オランダのように森林資源へのアクセス権が自動的に確立されていないケースもある<sup>43)</sup>。このように、生態系について、公共財としての価値を市場において取り引きすることの人間の要因が絡む困難さは常に存在し、生態系に対するアクセスの社会的通念は国や地域によって大きく異なることは、森林以外の生態系を対象とした国際的な取り組みの推進においても、ボトルネックとなる。また、REDD+ については、その制度趣旨が理解されず、少数民族への生活保障や従来への貧困対策との差が地方行政や住民の間で理解されていない実情があるとの指摘もある<sup>44)</sup>。特に、発展途上国の分析事例では、土地の所有権、持続的な生計手段、REDD+ 制度の機能などが相互に関連している。特に森林については、アフリカ、南米、アジアでは、基本的に森林へのアクセス、所有権が制度導入、活用における主な論点となり<sup>45)</sup>、ステークホルダーの参加の観点からも土地所有のあり方は、PES の立案、実施において、主要な要素として考慮すべき対象である。

## （6）キーワード

生態系サービス、生物多様性、生態系勘定、経済価値換算技術、自然資本、利用・非利用価値、ガバナンス、グリーン・インフラ、Eco-DRR、気候変動、サプライチェーン、ライフサイクル、外部性、レジリエンス、SDGs、ISO、生態系サービス直接支払、生物多様性オフセット、REDD+、生物多様性バンク

（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>● 森林生態系がもつ水土保全機能については、多くの研究成果が発表されている。</li> <li>● 環境研究総合推進費 S9 や S15 を通じて、生態系機能や生態系サービスについての基礎的研究は進みつつある。</li> <li>● 生態系勘定については、独自の手法開発は遅れているが、環境経済学による支払意思額評価は実施されている。</li> <li>● 地域での生態系管理に活用できるデータ整備や、評価指標として、国立環境研究所が開発した里地里山指標などのデータが整備されている<sup>46)</sup>。</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2010年以降急速に進められているが、欧米に比べて基礎データを活用した実用化や政策支援などの実践ツールのレベルで立ち遅れている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 明治30年の森林法制定から保安林制度によって生態系サービスの保全が行われている。</li> <li>● 総合治水事業、自然再生事業や多自然川づくりなど、生態系サービスを高める事業とその評価が実施されている。</li> <li>● 全国レベルでの湿地の生態系サービス評価やJBO 2による様々な生態系サービスの全国評価が実施されている。</li> <li>● 研究開発による産業化は特に進展していないが、産業界において企業が持つ敷地や周辺の生態系については、JBIB (Japan Business Initiative for Biodiversity、企業と生物多様性に関する研究及び実践を行う団体) では、生態系に配慮した事業所のあり方を「いきもの共生事業所」<sup>47)</sup>の持続的生物多様性土地利用のツールを活用する企業が増加している。</li> <li>● 国連大学サステイナビリティ高等研究所が中心となって、社会生態学的生産ランドスケープ・シースケープにおけるレジリエンス指標に関するツールキットを公開した開発途上国の農村地域において地域の人が生態系管理に活用して、資金調達のプロダクト制度を実施中である。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 多くの研究成果があり、InVEST など、空間明示型で汎用性の高い生態系サービス評価ツールの開発も世界をリードした。</li> <li>● Eco-DRR など、気候変動と結び付けた生態系の活用について、すでに多くの基礎的研究が実施されている。</li> <li>● 生態系を人為的攪乱や自然攪乱の影響から、生態系サービスを捉え、トレードオフなど広域的な生態系機能の研究が進んでおり、生態系サービスの定量評価ツール (InVEST)<sup>48)</sup> を用いた計算モデルを公開することにより成果を上げている。</li> <li>● ハリケーンなど異常気象の後の回復力を示すレジリエンスの視点から異常気象に対応するための生態系アプローチに基づく都市デザインの研究も進んでいる<sup>49)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 応用研究として Restoration (自然再生分野) や雨水管理としての Eco-DRR など進んでいるが、生態系サービス全体を生かした国土や地域計画はまだまだ試行段階にあると思われる。</li> <li>● スタンフォード大学などが開発した InVEST が自然資本連合などのビジネスにおける評価ツールとして推奨され始めた。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 歴史の長い欧州では、文化的景観も含めたランドスケープとしての景観とそれがもたらす生態系サービスについて研究が進んでいる。</li> <li>● 生態系サービスに関する様々な指標が提案され、研究論文としても発表されており、EU全体で統合化されると思われる。</li> <li>● EUのSEEA 実験的生態系勘定や英国による実施、WAVES をリードするなど、活発に基礎研究が実施されている。</li> <li>● H2020 プロジェクトにおいて、生態系と生物多様性に関連するデータとシミュレーション研究について、e-infrastructures を構築して統合的に研究が進んでいる。</li> </ul>

	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 英国では自然資本委員会が設置され、生態系サービスについても貨幣換算評価が行われている。</li> <li>● Birds Directive、Habitats Directive (Natura 2000) や LIFE プログラムの実施など、生物多様性とそのネットワークが形成されており、その機能としての生態系サービスについて検討がなされている。</li> <li>● 温暖化対策としての Eco-DRR 活用は早くから検討されており、デンマークでは、すべての自治体においてグリーン・インフラをツールとした気候変動適応計画を策定することを義務付けている。</li> <li>● 産業界においては、自らの事業がどのくらいの生態系サービスを楽しんで、生態系へ影響を与えているかを定量的に把握することが社会的責任の観点から関心が高く、生物多様性の配慮を考慮した ISO14001 の改良や、Natural Capital Coalition における Natural Capital Protocol が、自然資本に関連する評価の世界的標準化が進んでいる。特に、WBCSD (持続可能な開発のための世界経済人会議) も本プロトコルを推奨している。このように、研究開発による産業化は、標準化のための枠組みづくりにおいて開始され、今後、さらなる進展が予想される。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 衛星画像解析を使った広域な土地利用変化と生態系サービスへの影響について研究が進んでいる。</li> <li>● 自然湿地や復元された湿地に関する生態系サービス評価が実施されている。</li> <li>● 中国科学院の Laboratory of Animal Ecology and Conservation Biology において、主要研究テーマとして、生物多様性に関する情報収集、評価、計画、実施の情報システムとデータベースの研究や、多様性と空間生態学の研究が進んでいる。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 過去の広範囲の森林伐採により、土壌流出による莫大な生態系サービスの損失を引き起こし、退耕環林プロジェクトに代表される大規模な植林事業が実施された。</li> <li>● 急激な経済発展により大気、水質、土壌汚染が顕在化しており、これを改善するための措置として、生態系サービス評価が実施されている。</li> <li>● 研究開発による産業化は特に進展していない。ただし、米国が開発した評価ツール (InVEST) を研究者レベルで事例研究として積極的に取り入れている<sup>50)</sup>。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 国際誌に発表された研究事例も少なく、指標や評価方法の開発も進んでいるとは言い難い。東南アジア諸国へのネットワークの研究支援は実施している。</li> <li>● アジア生態系サービスの国際シンポジウムが 2016 年 6 月に韓国で開催され、基礎研究から実社会で活用するための応用研究への取組が増えてきている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 湿地の自然再生は、都市域も含めて実施されており、生態系サービス評価もある程度行われている。</li> <li>● 大統領府と環境省の傘下に研究所があり、生態系サービス等の制度を議論している。</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

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献 (●は全体的に参考とした文献)

- JST-CRDS, 俯瞰ワークショップ報告書 環境分野の研究開発の概況  
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2016/WR/CRDS-FY2016-WR-06.pdf>
- Maes J, Teller A, Erhard M, Liqueste C, Braat L, Berry P, Egoh B, Puydarrieux P, Fiorina C, Santos F, Paracchini ML, Keune H, Wittmer H, Hauck J, Fiala I, Verburg PH, Condé S, Schägner JP, San Miguel J, Estreguil C, Ostermann O, Barredo JI, Pereira HM, Stott A, Laporte V, Meiner A, Olah B, Royo Gelabert E, Spyropoulou R, Petersen JE, Maguire C, Zal N, Achilleos E, Rubin A, Ledoux L, Brown C, Raes C, Jacobs S, Vandewalle M, Connor D, Bidoglio G, Mapping and assessment of ecosystems and their services. An analytical framework for ecosystem assessments under action 5 of the EU biodiversity strategy to 2020. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2013
- Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services  
Indicators for ecosystem assessments under Action 5 of the EU Biodiversity Strategy to 2020  
2nd Report – Final, February 2014
- Adger, W.N., Hughes, T.P., Folke, C., Carpenter, S.R., Rockstrom, J., Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science* 309, 1036–1039, 2005.
- Egoh, B., Drakou E. G., Dunbar M. B., Maes J., and Willemsen L., “Indicators for mapping ecosystem services: a review.” Report. EUR 25456 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2012.
- Bagstad, K. J., Johnson, G. W., Voigt, B., and Villa, F., Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services. In Special issue: Mapping and modelling ecosystem services. *Ecosystem Services* 4:117–125, 2013.
- Bateman, I.J., Harwood, A.R., Mace, G.M., Watson, R.T., Abson, D.J., Andrews, B., Binner, A., Crowe, A., Day, B.H., Dugdale, S., Fezzi, C., Foden, J., Hadley, D., Haines-Young, R., Hulme, M., Kontoleon, A., Lovett, A.A., Munday, P., Pascual, U., Paterson, J., Perino, G., Sen, A., Siriwardena, G., van Soest, D., Termansen, M., Bringing ecosystem services into economic decision-making: land use in the United Kingdom. *Science* 341, 45–50, 2013.
- Nelson, E., Mondoza, G., Regetz, J., Polasky, S., Tallis, J., Cameron, D.R., Chan, K.M.A., Daily, G.C., Goldstein, J., Kareiva, P.M., Lonsdorf, E., Naidoo, R., Ricketts, T.H., Shaw, M.R., Modelling multiple ecosystems services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scale. *Frontiers Ecol. Environ.* 7 (1), 4–11, 2009.
- Mitchell, M., Suarez-Castro, A., F., Martinez-Harms, M., Maron, M., McAlpine, C., Gaston, K. J., Johansen, K., and Rhodes, J. R., Reframing landscape fragmentation’s effects on ecosystem services. *Trends Ecol. Evol.* 30 190–8, 2015
- Boerema, A., Rebelo, A. J., Bodi, M. B., Esler, K. J., and Meire, P., Are ecosystem services adequately quantified? *Journal of Applied Ecology*, 2016, doi: 10.1111/1365-2664.12696.
- Ouyang, Z., Zheng, H., Xiao, Y., Polasky, S., Liu, J., Xu, W., Wang, Q., Zhang, L., Xiao, Y., Rao, E., Jiang, L. Lu, F., Wang, X., Yang, G., Gong, S. Wu, B., Zeng, Y., Yang, W., Daily, G. C., Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science* 352, 1455-1459, 2016

- 1) 林野庁「森林の公益的機能に関する費用分担および公益的機能の計量、評価並びに多面的機能の高度発揮の上から望ましい森林について (中間報告)」, 1972
- 2) Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R.S., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M., The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253–260, 1997.
- 3) Hein, L., Miller, D. C., & de Groot, R. "Payments for ecosystem services and the financing of global biodiversity conservation". *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(1) (2013): 87-93.
- 4) 田中章. "" 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 (特集論説,< 特集> 生物多様性条約 COP10 と環境アセスメントの動向)." 環境アセスメント学会誌 7.2 (2009): 1-7.
- 5) Froger, G., Ménard, S., & Méral, P. "Towards a comparative and critical analysis of biodiversity banks". *Ecosystem Services*, 15(2015): 152-161.
- 6) 環境省・生物多様性総合評価検討委員会, 生物多様性総合評価報告書, 2010.
- 7) European Commission (EC), Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), United Nations (UN) and World Bank, "System of Environmental-Economic Accounting 2012, Experimental Ecosystem Accounting", White cover publication, 2013.
- 8) UNU-IHDP and UNEP "Inclusive Wealth Report 2014. Measuring progress toward sustainability. Summary for Decision-Makers", Delhi: UNU-IHDP, 2014.
- 9) Business for Social Responsibility (BSR). "Measuring and Managing Corporate Performance in an Era of Expanded Disclosure." January 2013.  
[http://www.bsr.org/reports/BSR\\_Ecosystem\\_Services\\_Tools.pdf](http://www.bsr.org/reports/BSR_Ecosystem_Services_Tools.pdf). (2016年7月27日閲覧)
- 10) Natural Capital Coalition (NCC). "PROTOCOL." 2016年5月.  
<http://naturalcapitalcoalition.org/protocol/>. (2016年7月27日閲覧)
- 11) 国連大学サステナビリティ高等研究所(UNU-IAS) and others."UNU-IAS、社会生態学的生産ランドスケープ・シースケープにおけるレジリエンス指標に関するツールキットを発表." ニュース. 2014年12月1日.  
<http://ias.unu.edu/jp/news/news/new-toolkit-provides-indicators-of-resilience-in-socio-ecological-production-landscapes-and-seascapes.html#info>. (2016年7月27日閲覧)
- 12) Secretariat of the Convention on Biological Diversity (SCBD). "ECOSYSTEM NATURAL CAPITAL ACCOUNTS :A Quick Start Package." CBD Technical Series No.77.  
<https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-77-en.pdf>. (2016年7月27日閲覧)
- 13) United Nations and others. "System of Environmental-Economic Accounting Central Framework." 2012. [http://unstats.un.org/unsd/envaccounting/White\\_cover.pdf](http://unstats.un.org/unsd/envaccounting/White_cover.pdf). (2016年7月27日閲覧)
- 14) Natural Capital Project." OPAL." Our software.  
<http://www.naturalcapitalproject.org/software/#opal>. (2016年7月27日閲覧)
- 15) Natural Capital Project." RIOS." Our software.  
<http://www.naturalcapitalproject.org/software/#rios>. (2016年7月27日閲覧)
- 16) The International Integrated Reporting Council (IIRC). "Integrated Reporting <IR>."

- <http://integratedreporting.org/>. (2016年7月27日閲覧)
- 17) International Organization for Standardization (ISO). "ISO 26000 - Social responsibility." <http://www.iso.org/iso/home/standards/iso26000.htm>. (2016年7月27日閲覧)
  - 18) International Organization for Standardization (ISO). "ISO 14000 - Environmental management." <http://www.iso.org/iso/iso14000>. (2016年7月27日閲覧)
  - 19) International Organization for Standardization (ISO). "ISO 14008 - Monetary valuation of environmental impacts from specific emissions and use of natural resources." ISO/TC 207/SC 1 Environmental management systems. <https://committee.iso.org/sites/tc207sc1/home/projects/ongoing/iso-14008.html>. (2016年7月28日閲覧)
  - 20) Division for Sustainable Development, Department of Economic and Social Affairs, United Nations. "Sustainable Development Goals." SUSTAINABLE DEVELOPMENT KNOWLEDGE PLATFORM. <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>. (2016年7月27日閲覧)
  - 21) Office of Environment and Heritage for the NSW Government. "BioBanking Assessment Methodology." Methodology. 27 April 2016. <http://www.environment.nsw.gov.au/biobanking/assessmethodology.htm>. (2016年7月27日閲覧)
  - 22) Wealth Accounting and the Valuation of Ecosystem Services (WAVES). "Managing Coasts with Natural Solutions." WAVES Technical Report. January 2016. [http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2016/02/17/090224b084187ca6/1\\_0/Rendered/PDF/Managing0coast0oves0and0coral0reefs.pdf](http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2016/02/17/090224b084187ca6/1_0/Rendered/PDF/Managing0coast0oves0and0coral0reefs.pdf). (2016年7月27日閲覧)
  - 23) Steffen, W., Richardson, K., Rockstrom, J., et al. "Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet". Science vol.347.Issue 6223(2015).
  - 24) The Natural Environment Research Council (NERC). "UK National Ecosystem Assessment Follow-on." [http://www.nottingham.ac.uk/cem/pdf/RHY\\_et\\_el\\_2014\\_NEAFO\\_Scenarios.pdf](http://www.nottingham.ac.uk/cem/pdf/RHY_et_el_2014_NEAFO_Scenarios.pdf). (2016年7月27日閲覧)
  - 25) The Natural Environment Research Council (NERC). "National Ecosystem Approach Toolkit." NAET Tree. <http://neat.ecosystemsknowledge.net/tree.html>. (2016年7月27日閲覧)
  - 26) 住友林業."社有林が生み出す生態系サービスの評価." 環境報告 国内社有林・海外植林地の生物多様性保全. <http://sfc.jp/information/society/environment/performance/preservation/preservation02.html>. (2016年7月27日閲覧)
  - 27) 富士通研究所."オープンデータによる地域特性の発見 EvaCva[エヴァシーヴァ]." <http://evacva.net/>. (2016年7月27日閲覧)
  - 28) LIFE Institute." LIFE CERTIFICATION STANDARDS." NOVEMBER 2014. <http://institutolife.org/wp-content/uploads/2015/07/LIFE-BR-CS-3-0-English.pdf>. (2016年7月27日閲覧)
  - 29) Anne D. Guerry, et al. "Natural Capital and Ecosystem services informing decisions :from

- promise to practice.” PNAS Vol.12.No. 24(2016): 7348-7355
- 30) 環境省、”生物多様性と生態系サービス。“ 自然の恵みの価値を計る。  
<http://www.biodic.go.jp/biodiversity/activity/policy/valuation/shuhou.html>. (2016年7月27日閲覧)
- 31) UNU-IHDP and UNEP.” Inclusive Wealth Report 2012.”  
[http://www.worldacademy.org/files/Trieste\\_Forum/TF\\_BG2\\_A.Duraiappah.pdf](http://www.worldacademy.org/files/Trieste_Forum/TF_BG2_A.Duraiappah.pdf). (2016年7月27日閲覧)
- 32) World Resources Institute (WRI) and World Business Council on Sustainable Development (WBCSD). ”Scope 3 Calculation Guidance.” Greenhouse Gas Protocol.  
<http://www.ghgprotocol.org/feature/scope-3-calculation-guidance>.(2016年7月27日閲覧)
- 33) 環境省.”ウォーターフットプリント算出事例集.”平成26年8月。  
<https://www.env.go.jp/water/wfp/attach/jireisyu.pdf>. (2016年7月27日閲覧)
- 34) 環境省.”自然の価値を評価する.“ 自然の恵みの価値を計る。  
<http://www.biodic.go.jp/biodiversity/activity/policy/valuation/shuhou.html>. (2016年7月27日閲覧)
- 35) 環境省.”生物多様性及び生態系サービスの統合評価報告書.”平成28年3月。  
[http://www.env.go.jp/nature/biodic/jbo2/pamph01\\_full.pdf](http://www.env.go.jp/nature/biodic/jbo2/pamph01_full.pdf). (2016年7月27日閲覧)
- 36) WWF and Global Footprint Network. ”Living Planet Report 2014.”  
[http://wwf.panda.org/about\\_our\\_earth/all\\_publications/living\\_planet\\_report/](http://wwf.panda.org/about_our_earth/all_publications/living_planet_report/).(2016年7月27日閲覧)
- 37) WWF and Global Footprint Network. ”Japan Ecological Footprint Report 2012.”  
[http://www.wwf.or.jp/activities/lib/lpr/WWF\\_EFJ\\_2012j.pdf](http://www.wwf.or.jp/activities/lib/lpr/WWF_EFJ_2012j.pdf). (2016年7月27日閲覧)
- 38) The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB). ”The Economics of Ecosystems and Biodiversity Ecological and Economic Foundations.”  
<http://www.teebweb.org/our-publications/teeb-study-reports/ecological-and-economic-foundations/>.(2016年7月27日閲覧)
- 39) Keith, H et al, 2014, 'Managing temperate forests for carbon storage: impacts of logging versus forest protection on carbon stocks', *Ecosphere*, vol. 5, no. 6, pp. 1-34.  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/ES14-00051.1/abstract> (2016年7月27日閲覧)
- 40) Lindenmayer, D et al,2012, 'A major shift to the retention approach for forestry can help resolve global forest sustainability issues', *Conservation Letters*, vol. 5, pp. 421-431.  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1755-263X.2012.00257.x/abstract> (2016年7月27日閲覧)
- 41) Prokofieva, Irina. "Payments for Ecosystem Services—the Case of Forests." *Current Forestry Reports* 2.2 (2016): 130-142.
- 42) Vatn A. “Markets in environmental governance. From theory to practice”. *Ecol Econ*. 117 (2015):225–33.
- 43) Mantau, U, et al. "Risks and chances to market recreational and environmental goods and services—experience from 100 case studies." *Forest Policy and Economics* 3.1 (2001): 45-53.
- 44) Trædal, Leif Tore, Pål Olav Vedeld, and Jón Geir Pétursson. "Analyzing the transformations

- of forest PES in Vietnam: Implications for REDD+." *Forest Policy and Economics* 62 (2016): 109-117.
- 45) Lambini, C. K. & Nguyen, T. T. "A comparative analysis of the effects of institutional property rights on forest livelihoods and forest conditions: Evidence from Ghana and Vietnam." *Forest Policy and Economics* 38 (2014): 178-190.
- 46) 国立研究開発法人国立環境研究所 生物・生態系環境研究センター."環境研究の基盤整備."2017.7.21. <http://www.nies.go.jp/biology/kiban/index.html>. (2016年7月28日閲覧)
- 47) 企業と生物多様性イニシアティブ (JBIB:Japan Business Initiative for Biodiversity) ."いきもの共生事業所@推進 WEB."<http://www.blunc.org>. (2016年7月28日閲覧)
- 48) Natural Capital Project. "InVEST." <http://www.naturalcapitalproject.org/invest/>. (2016年7月27日閲覧)
- 49) THE NATIONAL ACADEMIES. *An Ecosystem Services Approach to Assessing the Impacts of the Deepwater Horizon Oil Spill in the Gulf of Mexico (3 Resilience and Ecosystem Services)*. Washington (DC). U National Academies Press (US), 2013.
- 50) Natural Capital Project. "Ecosystem Planning in China." <http://www.naturalcapitalproject.org/china-case-study/>. (2016年7月28日閲覧)

### 3.4 循環型社会区分

循環型社会区分では、下記の5つの研究開発領域を設定した。

- 3.4.1 水循環
- 3.4.2 農林水産業の環境研究
- 3.4.3 リサイクル・廃棄物処理
- 3.4.4 資源・生産・消費管理
- 3.4.5 環境都市

区分の概要を以下にまとめる。

水循環の領域では、Food-Energy-Water Nexus の概念が提唱され技術革新が求められている。また、全球水文モデルの研究開発が急速に進展している。米国が衛星による全球スケールのデータ構築などで圧倒的な力を持ち続けている（航空宇宙局（NASA）の GRACE や SWOT など）。また、気候変動や都市づくりとの関連研究や水の再利用プロジェクトが展開されている。欧州は膜分離活性汚泥法（MBR : Membrane Bio Reactor）、膜技術などで世界をリードし、リン資源回収・利用に関する活動も活発である。ウォーターフットプリントなどの新しい基本概念の提唱と普及には圧倒的な伝統と力がある。日本でも窒素・リン除去技術、MBR や膜分離のファウリング防止技術、バイオマスエネルギー回収の研究開発が進み、モデル開発やシミュレーションでも世界的にも光る研究を展開している。

農林水産業の環境研究において、農業では、米国が基礎的解析技術で世界をリードし、各種リスクの考え方も発展している。日本は多品目の気候変動影響評価や農業の多面的機能評価、分布型水循環モデル開発、超過洪水管理等で世界をリードする。欧州は農業水資源に関する基礎的分野で、ドイツ、英国、フランスが特出し、緩和や適応の応用研究も活発である。林業では、米国が衛星モニタリングの膨大な研究の蓄積により基礎・応用ともに強い。欧州は CLT（Cross Laminated Timber）や木質バイオマス利用で世界をリードし、応用研究・開発が進んでいる。日本は、自然森林植生の気候変動影響評価は研究が進むが人工林は開始されたばかりである。衛星モニタリングでは合成開口レーダを用いた特徴的なセンサ開発を行う。CLT については欧州に続き研究が進んでいる。水産業では、米国が基礎・応用ともに進展している。長期的モニタリングを実施し、バイオロギングでは世界をリード、漁業生態系管理計画を先駆けて策定している。欧州もドイツ、英国、ノルウェー等を中心に強い。日本は数値モデル開発等ではリードし、素過程や要素技術の研究は進むが、学際分野や境界領域の研究は遅れている。

リサイクル・廃棄物処理の領域では、個別選別技術が発展している。プラスチックリサイクルでは実際に排出される実態に近い研究開発へと移行してきている。焼却残渣の処理ではセメント原料としての有効利用のため、高効率の塩素除去技術が求められている。欧州が強く、特に個別選別技術が世界トップの水準にある。技術のシステム化にも優れる。技術開発だけでなく規準や政策決定に資する情報網構築への注力が特徴である。日本は個別製品に対するレアメタルリサイクル技術は世界トップクラスである。

資源・生産・消費管理の領域において、LCA（Life Cycle Assessment）では応用研究・開発の推進が積極的に進められ、多様な評価対象で活用されている。環境影響を見る環境 LCA

（ELCA：Environmental LCA）や、多様な利害関係者に結びつく社会影響を見る社会 LCA（SLCA：Social LCA）にも関心が高まっている。欧米が基礎・応用ともに強く、欧州は評価指標開発を継続的に行い、世界的なデータベースやソフトウェアにより応用にも広がりを見せる。今後は、多面的な分析を解釈可能な形に変換する方法や、フロー情報の高解像度化・網羅性などが求められる。

環境都市の領域では、欧州が LCA やエコロジカル・フットプリント（EF）など都市にも用いられる評価手法を開発してきた。近年は気候変動への適応に向けた都市転換が各地で行われている。中国では LCA や EF などを用いた都市の評価研究が急速に進み、韓国でも環境都市の基盤整備が進められている。日本では、LCA などの様々な環境評価論の都市への展開が進められてきた。さらに、強靱な国土や災害レジリエンスなどを含む、より包括的な環境価値を定量化する理論の開発とともに、社会イノベーションなど実践を支援する方法論を含む産学連携研究も広がっている。

### 3.4.1 水循環

#### （1）研究開発領域の簡潔な説明

産業構造の変化、都市への人口集中、地球温暖化による気象の変化等により影響を受け、様々な問題に直面している水循環系に関して、健康な生活と健全な社会活動の維持に不可欠である安全な水供給のための技術、汚水処理技術、水のリサイクル技術等に加えて、地域や地球全体の水循環の把握技術も対象とした研究開発領域である。

#### （2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

##### [意義]

温暖化の進行による降水パターンの変化が顕在化する中、人口の増加や経済の発展により世界的に水利用は依然として増加しており、水資源が将来持続的に得られるか総合的なシナリオ分析を実施することが要請されている。こうした背景から、人間活動を含む全球水文モデル、およびそれを用いたシミュレーションの重要性が地球科学および地球環境学の両面から強く認識されるようになってきている。また、この100年で真水の利用率が500%以上増加し、2025年には世界人口の3分の2が水不足に直面するとも予測され、水の利用目的に応じた水処理技術は、水循環社会を構築するための根幹技術として位置づけられている。

将来にわたり健全な水循環の維持または回復がなされるためには、地球温暖化に伴う気候変動、少子高齢化、人口減少、過疎化、産業構造に関わる今後の長期的な変化等を踏まえて、水循環の量的かつ質的な把握や評価が求められている。その際、地球規模、地域や流域の規模、そして都市規模などの空間スケールと数年の短期から数十年の長期の時間スケールの両面から、水資源管理、水環境保全・管理、持続的な水利用システムを構想できるような知見や情報の体系立てが求められている。

##### [動向（歴史）]

国内の水技術の研究開発は、戦後の高度経済成長に伴う水需要の増大からスタートした。都市部への人口集中や工場の増加に伴い工業用水や生活用水の質と量が向上しただけでなく、汚染水排水による環境水質悪化に伴い下水処理場が整備され水循環の概念がもたらされた。その後、より効率よく水を浄化するために、膜の技術を積極的に採用した膜分離活性汚泥法（MBR：Membrane BioReactor）などの従来の下水処理よりコンパクトでかつ高速な水処理技術が発展してきた。また、日本の下水道については汚水と雨水の収集を分けた分流下水道で整備されているが、大都市は過去から合流式下水道で整備され、近年、雨天時下水越流（CSO：Combined Sewer Overflow）対策技術が開発されている。下水処理は、都市では標準活性汚泥法が、小規模ではオキシデーションディッチ法が主に使われてきたが、湖沼や内湾の富栄養化防止に、AO（Anaerobic-Oxic、嫌気好気）法、硝化脱窒循環法やA2O（Anaerobic-Anoxic-Oxic、嫌気無酸素好気）法などの生物学的栄養塩除去プロセスの導入が進んできている。さらに、省エネルギーとエネルギー回収の視点から、ANAMMOX（Anaerobic Ammonia Oxidation、嫌気性アンモニア酸化）法による窒素除去やUASB（Upflow Anaerobic Sludge Blanket、上向流式嫌気性汚泥床）法などの嫌気処理、DHS（Down-flow Hanging Sponge）などの中間処理が注目されている。さらに汚泥からのバイオ

ガス回収、バイオカーボンの固定技術も研究開発されている。

再生水製造技術に関しては、その品質を担保するための計測技術との連携も技術開発課題として重要視されてきており、近年では工場ですら使った水を工場内で再利用するだけでなく廃水すらしない（ゼロリキッドディスチャージ）といった動きもある。

水循環の具体的なプロジェクトとしては、経済産業省の低炭素技術発掘・実証プロジェクト事業にて「首都圏における低炭素化を目標とした水循環システム実証モデル事業」が実施され、水道システム、水循環システムのシミュレーションモデルを構築し、環境負荷低減につなげ低炭素社会構築に向けた基礎的な検討が行われた。この他にも、「太陽光等のエコ発電で高圧送水可能なポンプを活用した海水飲料水化システムの実証事業」、「臨海工業都市における水資源循環システムの低炭素・低動力プロセスの開発」が実施された<sup>12)</sup>。

海外では、米国において飲用水としての品質を確保する再生水利用の技術として間接的飲用（IPR：Indirect Portable Reuse）や直接的飲用利用（DPR：Direct Portable Reuse）が始まり、水不足が深刻なカリフォルニア州からアリゾナ・フロリダ・テキサスへの広がりを見せ、シンガポール、南アフリカやオーストラリアでも研究開発が進められてきた。欧州では、EUの水枠組み指令にしたがって、有機物、栄養塩、病原性微生物対策が進められ、さらに微量化学物質対策も進められている。中国では、栄養塩を除去する技術の開発が急速に進められており、膜分離活性汚泥法（MBR）や膜などの高度処理も注目されている。

全球水文モデルに関しては、人間活動を含むモデルが最初に報告されたのは約20年前である<sup>3)</sup>。以降、農業用水および工業・生活用水の推定<sup>4)5)</sup>、ダム貯水と放流<sup>6)7)</sup>、表層水および地下水からの取水<sup>8)10)</sup>と、人間活動のモデルは追加されている。現在のモデルは、自然の水文過程と人間の主要な水利用に関する計算を行い、空間分解能は緯度経度0.5度（赤道付近で55km四方）、時間分解能（計算を行う時間間隔）は1日というモデルが多く、通常、10年以上の長期期間の計算が可能である。

また、近年、気候変動に伴う洪水や渇水リスクの増大などの懸念から、気候変動の影響への適応策の検討のためにも研究や技術開発が求められてきている。気候変動に深くかかわる水循環や水利用システムの知識の集積、研究体制作りが求められる。また、ICTを活用したスマートな水管理システムなどの技術開発が水循環の分野で期待されている<sup>11)</sup>。

### （3）注目動向

#### [新たな技術動向]

水循環技術における処理には、原水の水質と再生水の用途目的に応じて様々な技術の適用が考えられる。既存処理技術の組み合わせで対応する場合には、水質評価手法をこれに組み込みかつ水を移動するためのエネルギーやコストまで考慮して総合評価する手法の構築が肝要であり、この分野は欧米が先行している。特に下水は水量として安定供給が期待でき、下水処理水の再利用化に関わる技術の開発が優先的に行われている。一方、下水にはさまざまな化学物質や病原微生物などが含まれるため、IPR・DPRやヒトが接触する場所での再利用にはリスク・マネジメントが必要である。環境影響なども考慮したリスク評価の手法は毒性情報が十分明らかになっていない化学物質の評価も含めて、処理や診断の新水技術構築が進められている。リスク管理のための統一的な規格の整備はこれからであるが、再生水の国際規格ISO/TC 282の幹事国としての日本の主導が期待される。

一方、水問題を食糧問題およびエネルギー問題とリンクさせて解決する考えが国際的に強まっており、米国を筆頭に、ドイツ、英国は、“Food-Energy-Water Nexus”の概念を提唱している。この観点のもとでは、廃水処理を従来の水処理プラントの概念から、新たにエネルギー製造プラント、栄養分製造プラント、水製造プラントとして捉え直すパラダイムシフトが起きており、そのための技術革新が必要となっている。エネルギー/栄養分/水製造プラントの総合化を推進するうえで鍵となる技術には、「分離精製」、「分析」、「微生物制御」があげられる。分離精製技術としては、水処理、エネルギー回収、栄養分回収など多くの用途に使用される膜技術が最重要であるとともに、栄養分の新たな吸着分離材などがあげられる。分析技術としては、ウイルスや細菌の迅速検出、分析対象物質を限定しない non-target analysis、細胞応答を利用したバイオアッセイなどがあり、それらをリスク評価やシステム制御と結合することが重要である。微生物制御技術としては、バイオガス（メタン、水素等）生成、水処理、有価物への変換、また、膜技術の障害となるバイオフィリングも微生物群集活動の結果であり、これを解析し、制御さらに活性を増加させる技術が重要である。

膜技術では、MF (Microfiltration) 膜に分類される公称孔径 0.1 $\mu$ m のモノリス型セラミック膜を使用し、随伴水に含まれる油分と浮遊物質 (SS : Suspended Solid) を分離除去する技術開発が進められている。小規模実証試験を通して随伴水処理技術を確認し、産油国等における現場実証が行われる予定である<sup>12)~15)</sup>。さらに、膜ユニットを中心とするハード技術とプロセス制御技術とを統合して、省電力の膜分離活性汚泥法 (MBR) の下水処理システムの開発が進められている。MBR は、従来の処理施設に比べ省スペース化が可能で、安全性の高い処理水質を確保することができ、老朽化した下水処理場の改築更新や高度処理化、処理水の再利用化や下水道未普及地域の解消などに活用できる技術である<sup>16)17)</sup>。

全球水文モデルの研究開発は、先進国が継続的・精力的に取り組み、分野的な進展が急速に進んでいる。特に、WaterGAP (ドイツ)、LPJmL (ドイツ)、PCR-GLOBWB (オランダ) の開発チームには多くの人材が集まっている。また、米国では 2012 年の干ばつを受けて、米国エネルギー省 (DOE) が Energy-Water Nexus Crosscut Team を組織し、水とエネルギーの問題の連鎖 (ネクサス) について組織的な取り組みを始めた<sup>18)</sup>。これを受けて、Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) などの有力な研究機関が人間活動を含む全球水文モデルの開発を急ピッチで進めている。また、水文モデルと社会経済モデルの連携が実施・強化されている。人間による水利用は人口、経済活動、技術などによって主に駆動されるため、連携の重要性が増している。さらに、全球水文モデルの超高解像度化が進み、具体的には 1km 解像度で全球をカバーするシミュレーションの実施が今後の全球水文モデルの共通目標との主張がされ、世界的に広く受け入れられつつある。2011 年米国の水文学者 Eric Wood プリンストン大学教授らによって Hyper Resolution Hydrology が提唱された。これは全球水文モデルの空間解像度を 30 秒 (赤道付近で約 1km、現在の標準的な解像度の 60 倍) まで高めることを提唱したものである。この解像度は、現在の個別流域を対象としたモデルの空間解像度に匹敵するため、全球モデルと地域モデルの区別がほぼなくなることを意味する。実現した際には温暖化などの地球環境研究と水質悪化などの地域環境研究、洪水氾濫などの防災研究などで共通のシミュレーションプラットフォームが利用できることになり、モデルやデータの統合が飛躍的に進むと考えられる。実現に当たっては計算機の効率的な利用、気象データや雨のデータの精度向上などの問題を一つ一つ解決していくことが必要で、極めて大規模で複合的な研究を進めることが求められる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

日本では、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」研究領域が 2016 度末まで研究を推進し、水循環や水利用を対象とした先進的な研究開発が実施されている。また、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・エクセレンス環境情報分野」（GRENE-ei）の研究課題「分野連携による地球環境情報統融合ワークベンチを活用した流域レジリエンスの向上」において、水循環と水関連分野（気候、食料、エネルギー、健康、生物多様性、災害、経済）のデータや情報の統融合により、地球規模課題を陸域水循環系のユニットである河川流域規模で解決するためパイロット研究が実施された<sup>19)</sup>。新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のエネルギー・環境新技術先導プログラムにて実施中である「正浸透膜法を用いた革新的省エネ水処理技術の開発」では、RO（Reverse Osmosis）膜に比べて大幅な省エネルギー化を目指す FO（Forward Osmosys）膜法による革新的水処理プロセスの創出を目指している。また、ウォータープラザ北九州で行っている海水淡水化と下水再利用のと統合システムの実証試験も国内技術の海外展開や国際規格の策定において重要である<sup>20)</sup>。

米国では、水資源の適応管理のために、気候変動に伴う潜在的な影響を予測するためのモデル化研究である Water Sustainability and Climate（WSC）<sup>21)</sup>、都市の人工的な水循環系だけでなく、自然の水循環系を含めた水システムの特徴づけや分類を行うための指標作成を行う Urban Water Sustainability Analysis Framework 等のプロジェクトが行われている<sup>22)</sup>。EU では、€800 億を 7 年わたって支出する研究開発プログラムである Horizon 2020 が 2014 年より行われている<sup>23)</sup>。ここでは、環境、水、処理、資源、エネルギーなど広範囲の分野の研究の助成が行われている。中国では、研究開発の焦点が、処理費用の削減、処理施設から生み出される再生水、汚泥、バイオガスなどの利用回収技術に移りつつある。下水処理事業の進展、膜分離活性汚泥法（MBR）の導入、処理水基準の強化が進むとともに再生水利用が推進されている。また、重金属汚染が他国より深刻であり、その処理法として電気化学的方法が検討されている。これらを背景に中国の大学等における下水処理研究も 2006 年から 5 年計画で始まり、第一フェーズでは 230 件ものプロジェクトに 600 億円の予算を投じている。第二フェーズでは、化学や公衆衛生等の多領域にまたがる研究も活発となっている。2016 年から第三フェーズに入り、水資源確保や汚染対策の研究プロジェクトに 25 億元の投資が行われる予定である。さらに、Jiaying Chengdong では、再生水を湿地へ循環させる実証プロジェクトを計画している。

全球水文モデルでは、Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project（ISI-MIP）が、全球規模の温暖化影響に関するモデル開発とシミュレーションを行うプロジェクトとしてドイツのポツダム気候影響研究所（PIK）が主導して 2012 年に立ち上げられた<sup>24)</sup>。フェーズ 1 には 11 の全球水文モデルが参加し、IPCC 第 5 次評価報告書に大きな貢献をした。現在はフェーズ 2 が実施されており、IPCC 第 6 次評価報告書などへの貢献を目指した活動が行われている。また、Water Future and Solutions（WFAS）は人間活動を含む全球水文モデルの機能のうち特に 21 世紀中の世界の水利用の予測に重点を置いたマルチモデルプロジェクトとして国際応用システム研究所（IIASA）によって 2013 年に立ち上げられている<sup>25)</sup>。

#### （４）科学技術的課題

##### [課題（ボトルネック）]

下水の再利用技術における大きな課題は、環境衛生やヒトに甚大な被害を及ぼす可能性が懸念される、新たな処理技術（促進酸化法や新規膜処理）や社会変化で発生する新規有害物質や新種のウイルス・微生物への対応である。これら懸念対象のリスク評価法が無い中、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が<sup>26)</sup>、動物試験からの脱却も含めた化学物質等の生体影響評価の構築が望まれる。また、水処理の分散型の推進により、水の安全性や性状を把握するための評価技術には、より簡便かつ安価な技術が期待される。水質は時々刻々と変化しているという認識の中で米国では4時間毎の濁度モニタリング規程が始まっているように<sup>27)</sup>、新しい迅速簡便な評価・計測技術が必要である。膜を多用する現行の水処理技術においては膜破断や閉塞を即座に検知する新しいセンシング技術の開発も求められる。

また、水資源と水需要・水利用間の水収支、多様な水源の水質評価だけでなく、想定される水循環システム、あるいは水利用システムにおける水質リスク評価、コストや環境負荷の評価、水利用システムの社会への実装する実現性など、環境経済学、環境政策学、さらには社会科学や心理学を含む学際的なプロジェクトの実施が必要である。

全球水文モデルの開発において最大のボトルネックとなっているのが集約されたグローバルな水利用関連データの不足である。水利用に関するデータはいずれの国においても地方自治体レベルで収集・管理されることが多いが、それらが国レベルに定期的に集約されるケースは少なく、ゆえに国を横断して世界を俯瞰するようなデータも存在しない。水利用に関するモデルを高度化するには、各国の統計データを収集・集約するところから開始せねばならず、水利用データを効率的に集め、広く社会に提供する仕組みづくりが求められている。また、モデルの開発と解析を行うにあたっては、水文学や農業土木工学などに加え、気候学や計算機科学にもある程度精通する必要があるなど、極めて学際的な知識や能力が要求される。モデルの開発と応用を担える人材を確保するのが、大きな課題となっている。

##### [今後取組むべき研究テーマ]

水循環に関する領域は多分野にわたっているため研究テーマは多い。以下に重要性が高いと考えられるものを記載する。

- 気候変動への適応策を具体的にシナリオ解析できるような基礎と応用との連動研究
- 水利用システムの実装を想定したコストや環境負荷の評価の学際的な研究
- 水資源管理や水利用の目標設定、合意形成のための利害関係者間の連携研究
- 地域レベル、流域レベルにおける食料・水・エネルギーとの連環研究
- コンパクトシティ、スマートシティ、ICTとの関連での水循環や水利用システム
- 水循環利用における未知の毒性物資や病原ウイルスを含めた水質リスク評価
- 海水淡水化、水再生における膜ファウリング研究、省エネ・環境負荷削減技術開発
- 下水処理系での多様な病原微生物を適正に評価する新たな指標／手法の構築
- 病原リスクのさらなる低減を目的とした下水処理の適切なプロセスの構築
- 災害時、障害時、合流式下水道雨天時越流時等における病原リスクの低減技術確立
- 窒素除去プロセスにおけるN<sub>2</sub>Oのモニタリングおよびその発生抑制技術の確立
- 重金属の発生源対策および面源対策としての合流式処理の再評価に関する研究
- 医薬品および日用品等由来化学物質（PPCPs：Pharmaceuticals and Personal Care Products）等、微量化学物質の処理系内での挙動解明

- 各種高度処理技術による微量化学物質処理の特性解明および経済的合理性の研究
- WET（全排水毒性）試験法の改良や選択肢の拡大に資する研究開発
- 下水処理系における生態毒性の挙動に関する調査研究
- 活性汚泥法における処理の高度化を実現するための微生物学的調査および技術開発
- 下水処理水の放流先水域での処理を補完する直接浄化システム等の適正配置
- 省エネルギー型水処理技術や分散型水処理システムの構築のためのカスケード型水利用のスキーム（設計）技術の研究
- 好気 MBR から嫌気 MBR へシフトすることによるエネルギー回収の高効率化
- 再度利用できる形態として有価物を回収するための吸脱着技術の研究開発
- 水のビッグデータを適切な水管理にフィードバックするための技術開発
- 廃水処理プラントをエネルギーや栄養分の製造プラントとして捉え、食糧やエネルギー問題と一体化して取り組む技術開発<sup>28)29)</sup>
- 空間解像度の上昇による全球水文モデルの超高解像度化

#### （5）政策的課題

世界的な水不足に対して日本の技術をどのように展開していくかは、政策的な戦略にも大いに関係してくる。また、国内の水不足だけでなく震災や洪水時等の災害時の対策についても同様のことがいえる。日本では、水に関わる施策が複数省庁に分断されていたが、この状況を克服するため 2014 年に水循環基本法が成立した。これまで水を管理する省庁も上水道は厚生労働省、下水は国土交通省、工業用水は経済産業省、環境水は環境省、と別々に水の施策を展開してきたが、水をキーワードとした省庁の壁を越えた水関連データ共有などの連携に期待がかかる。

また、これまで国が主導してきた水循環に関わる大型国家プロジェクトの今後の展開についても具体的かつ戦略的な策定が必要である。国内水技術をどのように世界展開していくのか、研究成果を社会実装に結びつける政策的な枠組み構築が重要である。その際、再生水の水質基準は国ごとに異なっていることと、国ごとに水の安全担保に求める考え方も大きく異なることから、国際標準化の視点も含めつつ、社会受容性についても十分な調査が望まれる。2013年に設置された ISO/TC 282 で水再利用に関する幹事国としての日本には水循環分野の先導が期待される。

#### （6）キーワード

膜処理技術、膜分離活性汚泥法（MBR）、直接的飲料利用（DPR）、間接的飲用利用（IPR）、非飲用利用、水質診断、オンラインモニタリング、リスク評価、エネルギー評価、国際標準規格、オゾン処理、紫外線消毒、促進酸化処理法（AOP）、高度処理、病原微生物、化学物質、生活排水、下水道、浄化槽、有機物、窒素、リン、再生水、バイオマス、バイオガス、固形燃料化、気候変動、地球変動観測、全球地球観測システム、適応策、食料・水・エネルギーのネクサク、地表水と地下水一体化モデル、水環境・生態系保全、水再生技術、循環利用システム、RO（Reverse Osmosis）、FO（Forward Osmosis）、海水淡水化、ウイルス、直接的引用利用、間接的引用利用、LID（Low Impact Development）、コンパクトシティ、スマートシティ、流出抑制、雨水収集・利用、人間活動を含む全球水文モデル、国際モデル相互比較プロジェクト、超高解像度モデル

(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>● 生物学的な窒素、リン除去技術から、MBR や膜分離のファウリング防止技術、汚泥系を含めた Annamox、UASB-DHS、バイオマスエネルギー回収の研究開発が進む。水再利用分野ではノロウイルス、環境ホルモンや医薬品など微量汚染物質除去の研究も進んできている。</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」では、膜分離技術に加え、微量化学物質や病原微生物のモニタリングや処理の研究等を行った。</li> <li>● 地球規模などでの水循環や気候変動への適応策に関する研究が体系だてて実施されている。</li> <li>● ただ、全球水文モデルの開発については、現象・過程の理解や水循環・水資源の基本概念の提唱、全球スケールの基礎データの構築という点において、日本の貢献はゼロではないが、大きいとはいえない。純粋な基礎研究も盛んとはいえない。</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技術展開プロジェクト「A-JUMP」で下水道への MBR 適用実証実験を行い、ガイドラインを策定<sup>30)</sup>。2011 年からは下水道革新的技術実証プロジェクト「B-DASH」<sup>31)</sup>により下水道事業における低炭素・循環型社会の構築研究を推進。</li> <li>● 2009-2013 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<sup>20)</sup>。</li> <li>● 2009~2013 年まで最先端研究開発支援プログラム（FIRST）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（Mega-ton Eater System）。</li> <li>● 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/TC 282 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。標準化に対応した MBR などの実証調査が 2014 年から開始。</li> <li>● 大手水企業が、国際水ビジネスの展開を進めており、海外での受注や調査研究が進展してきている。</li> <li>● モデル開発やシミュレーション分析においては、少数の優れた研究者が世界的にも光る研究を展開している。</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 膜による水処理技術、病原微生物や微量化学物質のモニタリング技術を研究してきた。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。</li> <li>● 地球規模などでの水循環や気候変動への適応策に関する研究が体系だてて実施されている。</li> <li>● WSC プロジェクトや UWIN など気候変動や都市づくりとの関連で水循環や雨水・雑排水利用の研究が展開されている。</li> <li>● 衛星情報を利用した全球スケールの基本データの構築などで圧倒的な力を持ち続けている（航空宇宙局（NASA）の衛星重力ミッション GRACE、打ち上げ予定の表層水・海洋ミッション SWOT など）。</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ており、水不足が懸念されているカリフォルニア州、アリゾナ州、フロリダ州、ジョージア州などを中心に数億ドル規模の再利用プロジェクトが行われおり、DPR や IPR などの実証試験もいくつか行われている。</li> <li>● カリフォルニア州コード Title22 再生水規格が再生水の安全基準として世界をリードしている<sup>32)</sup>。</li> <li>● 連邦省庁が主導する水の効率的利用と再利用技術の利用拡大を通じた研究開発への投資として内務省（DOI）の「WaterSMART Water and Energy Efficiency Grant Program」の下で、総額 2,000 万ドル超の水・エネルギー効率性助成機会を 2016 年に発表<sup>33)</sup>。</li> <li>● Water Council や Water Start など、行政と大学と企業が連携し事業化する技術開発や研究開発の枠組みが構築され、応用研究や革新的な技術開発力が強化されている。</li> <li>● 近年の Energy Water Nexus への関心の高まりにより、Pacific Northwest National Laboratory（PNNL）などが急ピッチでモデル開発などを進めている。</li> </ul>

欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EU の WFD 制定で水政策の強化に伴い、膜技術、MBR、微量物質除去など新たな水処理技術開発が行われ、さらに地球温暖化対策に伴うバイオマス技術、再利用技術開発など広範囲に行われている。</li> <li>● ドイツの大学を中心に、し尿分離、雑用水利用の研究や地下水の微量化学物質の影響評価や動態研究がなされている。</li> <li>● 第7次フレームワークプログラム (FP7) から Horizon 2020 を通して水の効率的な利用技術のイノベーション促進を図っている。</li> <li>● モデル開発やシミュレーション分析においては、ウォーターフットプリントなどの新しい基本概念の提唱と普及には圧倒的な伝統と力がある。また灌漑農地分布地図など、独創性と重要性の高いデータを収集・公開するなど分野全体をリードしている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● MBR、膜技術などで世界をリードしている。また、環境ホルモンや医薬品などの規制に近い将来期待できるため、除去技術開発が積極的。環境規制強化と下水道事業の民営化により、技術開発が積極的に行われ、需要が期待される圏域内外の新興国への進出が目覚ましい。</li> <li>● フランス水メジャーは、中東、アジア、アフリカへの展開を意識した応用研究を推進。</li> <li>● スペインは下水処理水の農業利用を積極的に展開し、フランス、ギリシャ、イタリアでも実施。</li> <li>● 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>34)</sup>。</li> <li>● Green Blue City の研究プロジェクトなど、都市雨水管理とグリーンインフラの応用研究が、多様な利害関係者を含めて展開されており、先駆的な取り組みが実施されている。</li> <li>● 人間活動を含む全球水文モデルが複数、精力的に開発されている。若く才能のある人材も引き続きこの分野に流入している。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 投資される排水対策事業費が巨大であり、科学技術研究費も多いため、窒素、リン除去、MBR など下水処理技術から、下水からの水、エネルギー資源回収技術の基礎研究開発が大学中心に目覚ましい。</li> <li>● ただ、少なくともこれまでは全球スケールの水文研究には大きな関心を持っていないようである。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 第十二次五カ年計画 (2011-2015 年) での再生水利用の目標を達成するため、MBR などの実証規模研究を実施。</li> <li>● 北京市では再生水のオリンピック公園での修景利用や下水処理場の工業用水や農業用水への供給が進み、現在再生水が第2の水源となっている<sup>35)</sup>。</li> <li>● 中央政府は再利用水の都市雑用水、修景用水、地下水滴養、工業用水、農地への基準値を設定。</li> <li>● モデル分野には優れた研究者が多く、予算が付けば大きく飛躍するポテンシャルは秘めている。</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を実施<sup>36)</sup>。</li> <li>● 再生水と海水淡水化の大型研究プロジェクトが継続して実施されており、研究レベルは高い。</li> <li>● ただ、全球スケールのモデルには、ほとんど関心を持っていないように見受けられる。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <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投資<sup>37)</sup>。</li> <li>● 雑用水や下水処理水を含めて全国の再生水利用量を 8.8 億 m<sup>3</sup>/年 (2008) から 25 億 m<sup>3</sup>/年 (2020) に引き上げる計画<sup>38)</sup>。</li> <li>● 下水汚泥の海洋投棄を全面禁止し、汚泥処理問題が浮上。汚泥再利用率の向上を目指す。またエネルギー節約や汚泥や嫌気処理からメタンなどを回収する下水道技術開発を開発導入。</li> <li>● LID やグリーンインフラに関する研究センターが設置され、都市計画との関連の応用研究も進展しつつある。</li> </ul>
豪州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 地球規模の研究で注目されているものは知られていないが、気候変動への適応策として渇水や洪水の対策に関する研究は実施されている。</li> <li>● 国レベルで地下水、海水淡水化、再生水利用の大型研究プロジェクトが推進されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 上記の大型研究プロジェクトのなかで、実用化を想定した再生水利用ガイドラインづくりなど実践的な取組がなされている。</li> <li>● Australian Water R&amp;D Coalition などの研究技術開発を推進する組織があり、戦略的な展開が可能な状況になっている。</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

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑: 上昇傾向、 →: 現状維持、 ↓: 下降傾向

(8) 参考文献 (●は全体的に参考とした文献)

- 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.htm](http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000307.htm)
- 国土交通省下水道部・国土交通省国土技術政策総合研究所、下水道技術ビジョン、2015  
[http://www.nilim.go.jp/lab/eag/gijyutsuvison\\_honbun.pdf](http://www.nilim.go.jp/lab/eag/gijyutsuvison_honbun.pdf)
- 国土交通省・土木学会環境工学委員会、今後の水環境保全に貢献する下水道システムの技術的課題と管理手法についての調査研究に関する小委員会報告書、2015
- 1) 経済産業省、低炭素技術発掘・実証プロジェクト  
[http://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/teitanso/teitanso\\_20100202/project/about/aboutl.html](http://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/teitanso/teitanso_20100202/project/about/aboutl.html)
- 2) 日本水道工業団体連合会、「首都圏における低炭素化を目標とした水循環システム実証モデル事業」報告書概要版  
[http://www.suidanren.or.jp/committee/pdf/metroW\\_1003/mw1003\\_summary.pdf](http://www.suidanren.or.jp/committee/pdf/metroW_1003/mw1003_summary.pdf)
- 3) Alcamo, J., P. Döll, F. Kaspar, and S. Siebert (1997), Global change and global scenarios of water use and availability: An Application of WaterGAP1.0Rep., 47 pp, Center for Environmental Systems Research (CESR), University of Kassel, Germany, Kassel, Germany.
- 4) Döll, P., and S. Siebert (2002), Global modeling of irrigation water requirements, *Water Resour. Res.*, 38(4), 1037, doi: 10.1029/2001WR000355.
- 5) Alcamo, J., P. Döll, T. Henrichs, F. Kaspar, B. Lehner, T. Rösch, and S. Siebert (2003), Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability, *Hydrolog. Sci. J.*, 48(3), 317-337, doi: 10.1623/hysj.48.3.317.45290.
- 6) Hanasaki, N., S. Kanae, and T. Oki (2006), A reservoir operation scheme for global river routing models, *J. Hydrol.*, 327(1-2), 22-41, doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.11.011.
- 7) Haddeland, I., T. Skaugen, and D. P. Lettenmaier (2006), Anthropogenic impacts on continental surface water fluxes, *Geophys. Res. Lett.*, 33(8), doi: L08406, doi:10.1029/2006GL026047.
- 8) Hanasaki, N., S. Kanae, T. Oki, K. Masuda, K. Motoya, N. Shirakawa, Y. Shen, and K. Tanaka (2008), An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12(4), 1007-1025, doi: doi:10.5194/hess-12-1007-2008.
- 9) Rost, S., D. Gerten, A. Bondeau, W. Lucht, J. Rohwer, and S. Schaphoff (2008), Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system, *Water Resour. Res.*, 44, W09405, doi: doi:10.1029/2007WR006331.

- 10) Wada, Y., L. P. H. van Beek, C. M. van Kempen, J. W. T. M. Reckman, S. Vasak, and M. F. P. Bierkens (2010), Global depletion of groundwater resources, *Geophys. Res. Lett.*, 37(20), L20402, doi: 10.1029/2010GL044571
- 11) 内閣府、科学技術基本計画 <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index5.html>
- 12) JOGMEC、技術ソリューション事業 技術開発テーマの決定  
[http://www.jogmec.go.jp/news/release/news\\_06\\_000030.html](http://www.jogmec.go.jp/news/release/news_06_000030.html)
- 13) 国際石油開発帝石株式会社、JOGMEC 技術ソリューション事業 (フェーズ 2) 「セラミック膜による随伴水処理技術の小規模実証試験」の受託について  
<http://www.inpex.co.jp/news/pdf/2015/20150724.pdf>
- 14) JOGMEC、技術ソリューション事業 技術開発テーマの決定  
<http://www.jogmec.go.jp/news/release/content/300249910.pdf>
- 15) 茨城県企業局・メタウォーター株式会社、浄水処理技術シンポジウム発表資料  
<http://www.pref.ibaraki.jp/kigyoutopics/20130401/format/data15.pdf>
- 16) 株式会社クボタ、ニュースリリース MBR 下水処理システムの省エネルギー化技術を共同開発～電力使用量 50%削減に向けてスクラム～、2016 年 1 月 19 日  
<https://www.kubota.co.jp/new/2015/15-36j.html>
- 17) 株式会社東芝、プレスリリース、MBR 下水処理システムの省エネルギー化技術を共同開発 電力使用量 50%削減に向けてスクラム、2015 年 07 月 09 日  
[https://www.toshiba.co.jp/about/press/2015\\_07/pr\\_j0901.htm](https://www.toshiba.co.jp/about/press/2015_07/pr_j0901.htm)
- 18) US Department of Energy, (USDOE) The Water Energy Tech Team:  
<http://energy.gov/under-secretary-science-and-energy/water-energy-tech-team>
- 19) GRENE-ei、分野連携による地球環境情報統合ワークベンチを活用した流域レジリエンスの向上 [http://www.editoria.u-tokyo.ac.jp/projects/grene-water/GM\\_Link/index.html](http://www.editoria.u-tokyo.ac.jp/projects/grene-water/GM_Link/index.html)
- 20) NEDO、ニュースリリース 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 年 3 月 12 日  
[http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_100254.html](http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100254.html)
- 21) 米国 NSF, Water Sustainability and Climate (WSC)  
[https://www.nsf.gov/funding/pgm\\_summ.jsp?pims\\_id=503452](https://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503452)
- 22) Urban Water Sustainability Analysis Framework  
[https://erams.com/UWIN/research\\_main/](https://erams.com/UWIN/research_main/)
- 23) JST CRDS 「Horizon 2020 の概要」  
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/FU/EU20140221.pdf>
- 24) Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP)  
<https://www.isimip.org/>
- 25) Water Future and Solutions (WFAS)  
<http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/water-futures.html>
- 26) 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.
- 27) 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)
- 28) Wen-Wei Li, Han-Qing Yu& Bruce E. Rittmann, "Reuse water pollutants" *Nature*, 528, 29-31, 2015.

- 29) Call for action on Water, Energy and Food Security  
<http://www.waternexusolutions.org/220/call-for-action-on-water-energy-and-food-security.html#.V7Ea9bWq29Q>
- 30) 国土交通省 下水道膜処理技術会議、下水道への膜処理技術導入のためのガイドライン [第2版]、平成23年3月 <http://www.mlit.go.jp/common/000146906.pdf>
- 31) 国土交通省、平成28年度 B-DASHプロジェクト実施技術を決定 ～中小処理場向けの下水汚泥肥料化・燃料化技術など～ 平成28年4月5日  
[http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo13\\_hh\\_000297.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo13_hh_000297.html)
- 32) State of California, Water recycling criteria, California Code of Regulations, Title 22, Division 4, Chapter 3. (2000)
- 33) White House  
[https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/whitehouse.gov/files/documents/Water\\_Resource\\_Challenges\\_and\\_Technology\\_Innovation\\_12\\_14.pdf#zoom=100](https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/whitehouse.gov/files/documents/Water_Resource_Challenges_and_Technology_Innovation_12_14.pdf#zoom=100)
- 34) European Sustainable Phosphorus Platform  
<http://www.phosphorusplatform.org/>
- 35) JST CRDS、デイリーウォッチャー、再生水が北京市の「第2の水源」に（元記事公開日：2016/01/27） <http://crds.jst.go.jp/dw/20160315/201603158121/>
- 36) 韓国 KIST Center for Water Resources Cycle Research  
[http://eng.kist.re.kr/kist\\_eng/?sub\\_num=496](http://eng.kist.re.kr/kist_eng/?sub_num=496)
- 37) 国土毎日（韓国）、Eco-Innovation 기술개발사업의 추진 방향、2014/03/31  
[http://www.pmnews.co.kr/sub\\_read.html?uid=9718](http://www.pmnews.co.kr/sub_read.html?uid=9718)
- 38) Water Reuse 2020  
[http://www.bwf.kr/2014/pt/02\\_session1/PPT\\_S1-3\\_Lee%20Seock-heon.pdf](http://www.bwf.kr/2014/pt/02_session1/PPT_S1-3_Lee%20Seock-heon.pdf)

### 3.4.2 農林水産業の環境研究

#### （1）研究開発領域の簡潔な説明

気候変動に対応した農林水産業の適応技術や持続可能な農林水産技術の研究開発等、地球温暖化や生物多様性の保全を含めた地球環境問題対策の研究開発領域である。なお、本領域は気候変動区分や生物多様性・生態系区分にも大きく関連する。

#### （2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

##### [意義]

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第5次評価報告書（AR5）では、世界平均地上気温は今世紀末には最大 4.8℃上昇するほか、世界のほとんどの地域で異常気象（極端な高温や強い降水）の発生頻度が増加する可能性が非常に高いと報告している。その影響のなかでも、生態系を基盤とする農林水産業には極めて大きな影響が予測されている。食料の安定供給と安全確保は、農林水産分野に課された最大の使命であるが、世界的な食料安全保障の低下が危惧されている。気候変動を含む将来の環境変化を見通しながら、専門分野を超えた統合的な視点で環境研究と環境技術開発を推進することにより、人間社会の持続的発展を支える生物資源生産システムを構築していくことが急務となっている。

農業と森林を含む土地利用分野からの温室効果ガス排出に対しても、化石燃料使用にともなう二酸化炭素排出とともに、その削減が求められている。また、IPCCの第5次評価報告書（AR5）では、人為起源の温室効果ガス排出の11%が発展途上国における森林減少を中心とした土地利用の改変による排出であるとされている。持続可能な森林管理が、気候変動抑制に向けて炭素蓄積を安定的に維持するために必須である。さらに、農林水産業および社会において生態系サービスを持続的に提供しており、水源涵養機能の持続的な発揮や、災害防止・低減などのためのインフラコスト抑制に必須となっている。気候変動は水資源の確保にも大きな影響を及ぼすと予想されている。世界における水利用量の大半は農業用であり、最も重要な農業用水資源を核にして、農学、工学、システム工学の観点から循環型社会形成を図る技術を明らかにすることが求められている。

##### [動向（歴史）]

2015年に開催された気候変動枠組条約（UNFCCC）第21回締約国会議（COP21）では、2020年以降の新たな国際枠組みである「パリ協定」が採択された。

日本の農林水産分野では、2005年に閣議決定された「京都議定書目標達成計画」における6%の削減目標に対し、森林吸収源に高い目標値（3.8%分）が設定されるとともに、農地や農林水産業における化石燃料消費からの排出削減策も盛り込まれた。また、2007年に決定された「農林水産省地球温暖化対策総合戦略」において、農林水産分野における緩和策と適応策の実施が策定された。適応策では、政府全体の適応計画作成の動向を捉えて、農林水産分野での気候変動による将来予測等を踏まえた適応策を講じていくため、2015年に「農林水産省気候変動適応計画」が策定された。

以上の地球温暖化と気候変動等に関する国際および国内での対応状況に対し、これまでに

行われてきた主な技術開発は以下のように整理される。

#### ■ 農業

高温条件にともなうコメの品質低下を回避するため、生育・登熟期間の気象条件に応じた適切な窒素肥料施用の判断を行う「気象対応型栽培法」を確立する取り組みがはじまっている<sup>1)</sup>。さらに、高温耐性品種が開発され、全国での栽培が広がっている<sup>2)3)</sup>。小麦については、冬季および春季の気温上昇により播種から出穂までの生育期間が短縮し、幼穂が低温を受けて凍死する凍霜害リスクが高まる。これに対し、温度が変化しても幼穂形成や出穂時期の変動が小さい早生品種の開発が進められている<sup>4)</sup>。果樹については、高温被害を減少させるための樹体管理法の改良や、土壌など栽培環境の改善、植調剤の使用などの技術が開発されている<sup>5)</sup>。畜産においては、暑熱環境下の家畜の酸化ストレスを低減するため、抗酸化成分を多く含む紫黒米の豚への給与技術が開発されている<sup>6)</sup>。

温室効果ガス排出量・吸収量の評価に関しては、農林水産省による全国規模でのモニタリング事業等で得られたデータを元に、算定法に関する最新の研究成果が集められ、環境省が設置・運営する温室効果ガス排出量算定方法検討会において評価が行われている。その結果は、毎年、「日本国温室効果ガスインベントリ報告書」として、他国と同様に国連気候変動枠組み条約事務局に報告されている<sup>7)</sup>。

緩和技術に関しては、農地管理の改良や家畜の飼料と排泄物管理の工夫により、その排出量を大きく削減できる技術開発が進められている。水田については、初夏に行われている短期排水（中干し）を一週間程度延長する技術が開発され、約30%の $\text{CH}_4$ および排出削減効果を実証されている<sup>8)</sup>。施肥窒素にともなう $\text{N}_2\text{O}$ 排出については、世界の各地での実証試験をとりまとめ、硝化抑制剤や緩効性肥料の効果が示されている<sup>9)</sup>。また、有機物の投入量増加や不耕起栽培による土壌炭素蓄積量の増加により、農地を $\text{CO}_2$ 吸収源として活用する技術は世界的に実証されており、日本でもその全国的な吸収可能量が評価されている<sup>10)</sup>。畜産においては、家畜排泄物処理方法の改善<sup>11)</sup>や低タンパク質飼料の給与による排泄物量の削減技術<sup>12)</sup>が開発されている。

水循環に関しては、農林水産省において水循環プロジェクト「地球規模水循環変動が食料生産に及ぼす影響の評価と対策シナリオの策定」（2003～2007年度）を立ち上げ、日本の食料需給に直接的に影響するアジアモンスーン地域における水の変動状況の予測、水の配分方式の分析、食料生産変動予測技術の開発を行うとともに、それらをもとに最適な水配分、社会的ルール・施策に関するシナリオの策定により、国内外の食料と環境問題の解決に貢献することを目指すプロジェクトを実施した。

1999年に食料・農業・農村基本法が制定し、農業や森林のもつ多面的機能（国土の保全、水源のかん養、自然環境の保全、良好な景観の形成、文化の伝承等農村で農業生産活動が行われることにより生ずる食料その他の農産物の供給の機能以外の多面にわたる機能）の発揮が記載された。2001年には、農林水産大臣による諮問に対する答申として、日本学術会議が農業及び森林の多面的機能の分類をしている。

#### ■ 林業

森林に関しては、地球サミット（1992年）によって持続可能な森林管理が共通目標となり、地域的国際共同ワーキンググループが多数発足し、基準指標（生物多様性は基準の一つ）を用いて森林が多面的に評価され、順応的森林管理手法の開発を目指す研究が進捗した。1990

年代には、インベントリ作成にかかる研究と、代替指標の抽出研究が盛んにおこなわれた。また、生物多様性条約 2010 年目標により目標達成評価が進展、国内の森林については 2010 年までに評価研究が実施された。

また、「京都議定書目標達成計画」における森林吸収量の目標値（3.8%）に対応するため、林野庁において森林吸収源対策が進められた<sup>13)</sup>。ここでは、森林の炭素蓄積量を増大させる管理技術<sup>14)</sup>、吸収量算定に必要となる森林情報の管理技術<sup>15)</sup>の高度化が図られた。また、併せて、カーボンニュートラルな木質資源（バイオマス、マテリアル）の利用に注目が集まり、バイオマスイエネジーの実証プラントで実用化に向けた試験が行われ<sup>16)</sup>、大型の木造建築のため、直交集成板（CLT：Cross Laminated Timber）の実用化に向けた取り組みが進められてきた<sup>17)</sup>。

なお、森林の減少や劣化の防止と、炭素蓄積や持続可能な森林経営に関する取り組みである REDD+ に関しては、2000 年代に気候変動枠組条約の締約国会議で議論が進展し、セーフガードとしての生物多様性保全および生態系の便益に関する保全研究および社会経済学的研究が進展した。日本では 2013 年から 2015 年にかけて、環境省、林野庁等が REDD+ に基づく二国間のカーボンメカニズム（JCM：Joint Carbon Mechanism）を推進し、セーフガードとしての生物多様性保全および生態系の便益増強に関するチェックリストを開発している。

森林の水循環に注目すると、その研究の歴史は 19 世紀末にスイスで始まった流域試験に遡る。日本でも 20 世紀初めに栃木県（足尾）と茨城県（太田・笠間）で有林地と無林地からの流出特性の比較を目的とした流域試験が行われた<sup>18)</sup>。その後、1920～30 年代には、愛知県（瀬戸）、山形県（釜淵）、群馬県（宝川）、岡山県（竜ノ口山）において流域試験が始まり、現在も降水や流量の観測が続いている。こうして得られた長期観測データは、荒廃地からの森林の回復、森林の伐採や成長、山火事や病虫害など、様々な地被状態の変化が水流出に及ぼす影響の解析に利用されている<sup>19) 20)</sup>。

その後の研究は森林内における水の動きをより克明に調べる方向に進んだ。1960～70 年代には、遮断蒸発、樹幹流、浸透能など森林の水収支や水流出特性に関する様々な研究が行われた<sup>21) 22)</sup>。河川源頭部の降雨流出現象について、変動流出寄与域概念<sup>23) 24)</sup>という考え方が生まれたのもこの頃である。それまで、降雨時の溪流の増水は、主に降雨強度が地表の浸透能を超えた時に発生する地上流（浸透余剰型地上流）により起こると考えられてきた。しかし、透水性のよい土壌で覆われた森林の斜面において降雨強度が地表の浸透能を超えることは少なく、むしろ河道周辺のもとと湿潤な場所に降った雨や地中から浸出する水が地上流（飽和余剰型地上流）となり増水を引き起こすことが知られるようになった（林床植生が消失して地表の浸透能が低下した森林では浸透余剰型地上流が水・土砂流出に寄与するとの指摘もある）。この湿潤な場所（流出寄与域）が降水の季節的ないし短期的な変化に応じて拡大・縮小し、それに連動して流出水量も増減するというのが変動流出寄与域概念の骨子である。この概念は、河川あるいは溪流のある地点における流量の変化が、その地点の上流における水の分布と動きに密接に関連していることを示し、その後の研究に大きな影響を与えた。1970～80 年代には、斜面における水の移動経路や洪水流出への寄与に関する研究や、水素・酸素の安定同位体比をトレーサとする流出水の起源など、流域内の水の動きに注目した研究が世界各地で行われた<sup>25)</sup>。そして、これらの詳細な観測研究の成果は、空間情報処理

技術の進歩と普及を背景に、数値地形情報を用いた分布型水文モデルの開発へと発展した。

研究が大きく前進したもう一つのテーマは蒸発散である。森林は裸地や草地に比べ、降水量に占める蒸発散量の割合が大きい。これは、樹木が他の植物に比べ個体サイズが大きく、主な蒸発の場である葉群層が地上から離れているため、蒸発が起こりやすいことに由来する。湿潤温帯の多数の流域試験における降水量と流出量の観測結果を解析した研究では、森林の伐採率が大きくなると年流出量が増加し、その増加割合は落葉広葉樹よりも常緑針葉樹の方が大きいことが示されている<sup>26)</sup>。その後、森林の蒸発散に関する研究は、流域試験による降水量と流出量の観測結果の解析に加え、森林から蒸発する水の量をより詳細かつ直接的に評価する方向に進んだ。特に1980年代以降は、観測タワーと乱流変動法による水蒸気フラックスの測定法が普及し、同じ手法を用いる二酸化炭素フラックスの観測ネットワークの拡大とともに研究事例が急速に増えた。さらに近年は、樹液流（樹木の幹内を鉛直方向に移動する水の流れ）を比較的低コストで測定できるセンサの普及により、樹木や森林群落の蒸散に関する研究事例が増えている。

#### ■ 水産業

カリフォルニア大学の Halpern らの研究グループが、世界の海洋の健全性を判断するための指標として、自然科学的な要素に社会・経済的な要素を加えた10個の目標を設定し、それぞれの達成度を集計する形で世界各国の領海の Ocean Health Index（海洋健全度指数）を提示したことが契機となり<sup>27)</sup>、海洋の環境・生態系・生物資源の健全性を適切に診断・評価するための考え方や方法が議論され始めている。

国内においては、閉鎖性海湾の健全性に関して、生態系の構造の多様性や物質循環機能の健全性に着目した「海の健康診断」の方法や基準等の検討が10年ほど前から開始され、事例の解析が進められている<sup>28)</sup>。その成果も踏まえながら、2010-2013年度には環境省の事業として「海域の物質循環健全化計画」が実施され、生態系の健全性の保全・回復のための栄養管理のガイドラインの整備が進められた。

資源確保の観点からは、ワカサギの「適期放流技術」の開発、イサザの人工産卵床の造成、高水温下における養殖技術の開発、水温耐性をもつノリ育種素材の開発など、水産資源が少しでも頑強な構造をもつように支援する技術開発が進められている。

### （3）注目動向

[新たな技術動向]

#### ■ 農業

影響評価については、温暖化を背景とした気象条件を考慮して作物を管理する必要性の増加に対し、1kmメッシュの農業気象データを全国について作成・配信するシステムが開発された<sup>29)30)</sup>。水稲では、多収品種が高いCO<sub>2</sub>濃度下でも高い収量性を示すメカニズムが解明され、将来の高CO<sub>2</sub>濃度下での水稲品種開発に役立つ知見が得られている<sup>31)</sup>。また、エルニーニョ/ラニーニャと世界の主要穀物の生産変動との関連を解析し、これらの予測に基づく穀物豊凶の早期予測の活用可能性が示された<sup>32)</sup>。

適応技術に関しては、すでに顕在化している温暖化影響や今後予想される気候変動に伴う作物被害について、地域特性を踏まえたリスク評価や将来影響予測などを考慮した栽培管理

支援技術、ならびに気象情報と連動した早期警戒・栽培管理支援システムの開発が進められている。ブドウ果皮の色調を制御する遺伝子座を特定し、遺伝子タイプの組合せが果皮の色調を主に決定することが解明され、温暖化に対応した優良着色品種の育成を加速することが期待される<sup>33)</sup>。

温室効果ガス排出量・吸収量の評価に関しては、水田からの温室効果ガス排出量の測定に広く使われる「手動チャンバー法」を包括的に解説した手引き書(英文)が作成され、排出量計測のために国際的に活用される標準ガイドラインとして公表された<sup>34)</sup>。また、数理モデルを用いた農地の土壌炭素貯留量<sup>35)</sup>と水田からのメタン排出量<sup>36)</sup>を推定する新たな算定方法が開発され、IPCCで定める最も高度なTier 3手法として『日本国温室効果ガスインベントリ報告書』に採用された。農地における土壌炭素の増減と温室効果ガス(CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、化石燃料消費由来CO<sub>2</sub>)の発生量を同時に計算して温室効果ガス発生量の総合評価を簡単に行えるウェブサイトが公開され、農家や行政、生産者団体などが、農地管理による温室効果ガス削減の効果を評価するために活用されることが期待される<sup>37)</sup>。

緩和技術に関しては、燃焼・炭化条件によるイネ残渣の残存量、理化学性、および微生物分解性の程度が室内実験より明らかにされ、土壌の炭素貯留に最適なイネ残渣の燃焼・炭化程度が示された<sup>38)</sup>。N<sub>2</sub>Oについては、窒素ガス(N<sub>2</sub>)に還元する能力を持った土着の根粒菌をダイズ種子に接種することにより、収穫期のダイズ畑からのN<sub>2</sub>O発生を30%削減できることが野外実験より実証された<sup>39)</sup>。また、微生物が付着する炭素繊維担体を現行の活性汚泥処理施設に追加投入することにより、家畜ふん尿污水处理からのN<sub>2</sub>O発生を9割抑制する技術が開発された<sup>40)</sup>。

発展途上国での森林減少と森林劣化によるCO<sub>2</sub>の排出量を推定するため、リモートセンシングと地上調査を組み合わせ、国レベルでの森林の炭素蓄積量の変化を精度良く把握する手法が開発された<sup>41)</sup>。

水環境に関しては、2000年以降に実施されてきたJST CREST「水の循環系モデリングと利用システム」や農林水産省水循環プロなどにより、農業水利用や水利施設の管理等の人間活動を組み入れた分布型水循環モデルが構築された<sup>42)43)</sup>。この技術は、農業水資源に対する気候変動影響予測<sup>44)46)</sup>などに広く適用され、その実用性が明らかにされつつある。基礎的分野としては、近年、酸素安定同位体である<sup>17</sup>Oの高精度な分析が可能となっており、複数の水文過程が混在する農業農村地域において、どのような過程を経て水循環が形成されたかを示す指標として<sup>17</sup>O-excess ( $\delta^{18}\text{O}$  と  $\delta^{17}\text{O}$  の特定の関係からのズレ)が利用できる可能性がある<sup>47)</sup>。一方で、将来の気候変動による両極端現象(渇水と洪水)の増大等に対応するためには、農村における災害に対するリスク管理が重要になる。そのため、農村における多面的機能の再評価と多様性(ダイバーシティ)の増進、サーキュラー・エコノミーの増進などの対応が検討されている。特に、リスク管理に関しては、水田稲作に対する被害の側面だけでなく、水田地帯が持つ洪水防止機能を地域の洪水管理等へ利活用しようとする検討も始まっている<sup>48)50)</sup>。

#### ■ 林業

リモートセンシング技術と空間情報処理技術の進歩と普及にともない、標高や植生高に関する高解像度(~1mグリッド)の空間情報が使える機会や地域が拡大している。流域地形や林分構造に関する詳細な数値情報が利用可能となることにより、森林が水循環に及ぼす影

響の解析や分布型水文モデルの開発等における進展が期待される。

また、分析技術の進歩にともない、軽元素（水素、酸素、炭素、窒素）の安定同位体比が、従来よりも遙かに少ない試料で、しかもより短時間で測定できるようになった。より詳細なトレーサ情報が利用可能となることにより、森林の水・物質循環の研究における進展が期待される。

木質バイオマスのエネルギー利用や木材のマテリアル利用を普及することは、森林の吸収源としての役割を活かし、気候変動の緩和策となる。木質バイオマスのエネルギー利用を促進するためには原料の安定供給が鍵であり、地域の資源量および供給可能量の把握、木質バイオマスの収集方法、エネルギー効率の向上に向けた研究が進められている<sup>51)</sup>。また、木材マテリアルとしての CLT については、国産材 CLT の諸性能の検証が行われている<sup>17)</sup>。

気候変動に対する緩和策の一つとして注目されている REDD+ においては、発展途上国において、国レベルでの森林の炭素蓄積とその変化についてモニタリングし、将来の排出量を推定することが求められている<sup>52)</sup>。IPCC では、森林から他の土地利用への変化面積（活動データ）と単位面積あたりの森林の炭素蓄積量（排出係数）の積から排出量を推定する<sup>53)</sup>。土地利用の変化面積については、地上でデータを得ることは困難であり、リモートセンシング技術が用いられる。従来の光学衛星を用いた観測に加え、熱帯地域での雲により観測できない問題を回避するために、雲を透過するマイクロ波を用いた観測にも期待されている。ALOS 衛星 2 号の PALSAR センサにより、熱帯における森林減少をモニタリングし配信するシステムが開発されている<sup>54)</sup>。一方、単位面積あたりの森林炭素蓄積量は、地上での系統的な調査から推定されるが、森林へのアクセスが困難であることから系統的な調査ができない場合に、衛星 LiDAR<sup>55)</sup>、航空機 LiDAR<sup>56)</sup>やドローンによる空中からの調査により推定する手法の開発が試みられている。

生態系サービスの経済評価について、エコロジカル・フットプリントなどのような国際的（自然資本利用などにおける）格差の定量的比較手法の開発<sup>57)</sup>が行われている。また、炭素吸収や蓄積に関しては、熱帯林を中心とした生物多様性と炭素蓄積等生態系サービスの正の相関の実証<sup>58) 59)</sup>がされている。これは、REDD+ 等の保全メカニズム推進への貢献などが目的の活動である。また、生物多様性解析手法（state-space model などの不確実性を含む情報の統計解析手法、多変量解析手法など）の発展により、広域や異なるスケールの生物分布予測手法が発展し、実証研究開始されている<sup>60)</sup>。

#### ■ 水産業

水産業においては、生物資源—環境系の現象解析へのモデリングの導入が進んでいる。最近では、精度の高い流れの数値モデルの開発が進み、卵や仔稚魚、幼生等の産卵場所から成育場所への輸送やその過程での生き残りの状況を数値実験で調べる試みが多くの事例で行われるようになってきている。これらは生物資源—環境系の数値モデリングの先駆けとみることができる。水産資源の数量変動や生産のメカニズムの解明を進めるためには、これまでの定性的な現象解析を中心とする生態系の研究を、より定量的で動的な要素を組み込んだ多次元・多変量の生態系解析に発展させていくことが必要である。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

#### ■ 農業

影響評価に関しては、国際的な研究プロジェクトとして、気候変動による農業影響とその対策の評価を目的としたモデルや評価手法を検討するための「農業モデル相互比較・改善プロジェクト（AgMIP : Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project）」が行われている。また、「気候変動対応型農業のためのグローバル・アライアンス（GACSA）」や、国際農業研究協議グループ（CGIAR）の「気候変動・農業・食料安全保障研究プログラム（CCAFS）」等、持続的な食料生産と気候変動への適応および緩和を包括的に対象とした国際イニシアティブが立ち上がっている。

緩和技術については、政府間合意に基づく自発的な研究ネットワークである「農業分野の温室効果ガスに関するグローバル・リサーチアライアンス（GRA）」が推進されている。また、土壌炭素蓄積を活用するための「4/1000 イニシアティブ」が立ち上がったほか、持続的な土壌管理を目指す「地球土壌パートナーシップ（GSP）」においても、温暖化緩和技術について議論されている。

国内では、農林水産分野における温室効果ガスの排出削減技術・吸収源機能向上技術、農林水産物の生産安定技術の開発を目指した農林水産省委託研究プロジェクトが進められている。2016年度は「農林水産分野における気候変動の影響評価及び適応技術の開発」として、中長期的な気候変動予測に基づき、温暖化による収量や品質の低下、病害虫の侵入リスクの回避・軽減、豪雨による農地等の被害の軽減のための技術開発が推進されている。2017年度からは、これに加えて、「農林水産分野における気候変動緩和技術の開発」が新たに開始される予定である。

また、環境省環境研究総合推進費においては、「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 : 2012～2016年度）」や「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究（S-14 : 2015～2019年度）」等、および文部科学省による「気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT）」が推進されており、その中に農林水産分野も研究項目として含まれている。

#### ■ 林業

国内では、大型の公共建築物への木材利用促進に関する法律が制定され、林野庁では、2015年度より「新たな木材需要創出プロジェクト」を実施しており、中高層建築物等における木質の新たな製品・技術の開発や木質バイオマス利用拡大に向けた技術開発を促している<sup>61)</sup>。

2020年の東京オリンピックの開催に向けては、国、東京都、東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会で構成する木材利用に関するワーキングチームが設置され、関連施設の建設資材や内装等への木材利用の促進が図られている。この中で、新国立競技場は、木材と鉄のハイブリッド屋根構造を採用するとともに、内装等においてCLT（直交集成板）を活用する予定である<sup>62)</sup>。このような国際的なイベントを契機として、新たな技術革新が期待される。

衛星から森林炭素蓄積（バイオマス）を推定するため、国際宇宙ステーション（ISS）からの観測を想定した衛星LiDARの開発が進んでいる。米国航空宇宙局（NASA）は、2019年の打ち上げを目標として、GEDIミッションを推進している<sup>63)</sup>。宇宙から地球にレーザを照射し、レーザが森林の表面で反射して戻ってくる時間と、その一部が林冠を透過して地面

で反射して戻ってくる時間の差から、森林の高さを計測し、森林炭素蓄積の推定精度を向上させることを目的としている。また、日本の宇宙航空研究開発機構（JAXA）でも ISS に搭載する植生 LiDAR の開発（MOLI ミッション）に取り組んでおり<sup>64</sup>、2021 年の打ち上げを目指している。

気候変動による森林・林業への影響評価および適応策に資する技術開発については、農林水産省が 2015 年 8 月に気候変動適応計画を発表し、森林・林業分野において必要となる対策に向けた技術開発を整理している<sup>65</sup>。これを受けて 2016 年度より農林水産技術会議では、「農林水産分野における気候変動対応のための研究開発」に取り組んでいる<sup>66</sup>。

#### ■ 水産業

日本では、2011 年度より 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」が実施されている。先進的な生物計測技術や生態系の将来予測に資するモデル等の基盤技術の研究開発を目標とするプログラムであり、生物資源生産に関する研究開発にどのような形でつなげていくのが注目される。実施されているプロジェクトである「データ高回収率を実現するバイオリギングシステムの構築」では、低価格・大容量で小型・多機能のロガーを開発し、音響通信技術の革新により個体データの回収率を高め、個体群（生物資源）レベルの情報取得を可能にすることを目指している。

また、環境省・環境研究総合推進費におけるプロジェクトでは、「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発」（沿岸海域とその後背地である陸域を統合的にとらえ、沿岸海域の物質循環や生態系サービスの全体像を事例解析により明らかにするとともに、その適切な管理のための数値モデルの構築）や「人工構造物に囲まれた内湾の干潟・藻場生態系に対する貧酸素・青潮影響の軽減策の提案」（大都市圏に隣接する内湾、特にその浅海域の干潟・藻場生態系にとって大きな脅威となっている貧酸素水や青潮の影響を軽減する実効性のある方策の提案を目指し、生態系モデルの構築とそれに必要な現地データ解析の実施）が注目される。

その他、文部科学省新学術領域研究（研究領域提案型）「生物ナビゲーションのシステム科学」（2016–2020 年度）では、「多次元バイオリギングによる鳥類・魚類の長距離ナビゲーション行動の包括的理解」が採択されている。水産環境整備事業（水産庁、2010 年創設）では、水産資源の増大とともに海の豊かな生態系の維持・回復に重点を置き、生態系全体の生産力の底上げをはかるための低次生産の基盤整備、水産生物の生活史に対応した構造的な生息環境整備、変動する環境や資源に適応していくためのモニタリングと順応的管理等に注目し、「環境基盤の重視」、「点から空間へ」、「資源・環境変動への対応」の 3 つを基本理念に掲げている。

国際的には、2005 年度より IMBER（Integrated Biogeochemistry and Ecosystem Research）が実施されている。ここでは、生物地球化学的な物質循環と海洋食物網の相互作用に関する理解を促進し、地球環境変化や人為的な環境変化に対する海洋生態系の応答を的確に予測できるようにしていくことを目指している。水産資源の利用を含む人間社会の持続性への貢献にも重点が置かれている<sup>67</sup>。

#### （４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

##### ■ 農業

不確実性の改善が最大の研究課題である。そのためには、将来気候の予測と農林水産業の応答予測の双方について、さらなる精緻化が必要である。個々の農作物、樹林、水産物の品目について応答予測モデルが開発され、影響評価に用いられているが、影響予測実験結果との検証を積み重ね、さらに精度の高いものに改善する必要がある。また、国連気候変動枠組条約事務局への報告が義務づけられている「温室効果ガスインベントリ報告書」における各排出量・吸収量の精緻化が、最重要課題としてあげられる。緩和技術については、基本的な技術オプションについては多くの実証データが蓄積されている。しかし、それらの技術が現場で活用されるための施策や社会システムが準備されていないことが、技術を社会実装するためのボトルネックとなっている。そのために、J クレジット等のカーボン・オフセット制度や国際的な排出権取引への技術の活用方を構築することが求められている。また、そのために、ユーザが緩和技術の効果を算定できる支援システムの開発も有効と思われる。

農業水資源を核とした地域資源管理に関する課題は、基礎的分野としては、解析モデルに関して、気候モデルと分布型水循環モデルの一体化が要請されるが、気候モデルは GCM (Global Climate Model) を開発している気象分野の研究者や研究機関で独自に開発され、一方水循環は独立して開発利用が行われている。これを一体的に取り扱うことが可能なモデル開発が望まれる。農業水利用の中では、地下水と地表水の交流の過程解明やモデル化が必要で、特に水循環の中の経時的な地下水形成の問題、特に地質年代や岩石や土壌の形成を含めた経時変化と地下水流出の関係などの解明が望まれる。一方で、災害対応等を組み込んだ農村地域のリスク管理の実現、極端現象の増大と農業用水や農業水利施設に対する適応策の策定やそれに応じた水利施設の管理方策の策定も政策的な面での大きな課題である。

##### ■ 林業

流域の水循環は、地質、地形、土壌、地被状態等に加え、長期的な気候条件や短期的な気象条件の相互作用として起きる。洪水や渇水など、水に関する問題の多くは比較的大きなスケールで起きるのに対し、森林の水循環に関する従来の研究は、森林（変化）の影響を検出しやすい比較的小さなスケールを対象にしてきた。多様な地被状態がモザイク状に分布する流域、あるいは長期的な時間スケールの元で森林自体および森林以外の条件がともに変化する状況の中で、森林が流域の水循環に及ぼす影響を広域的かつ長期的に予測する手法の確立が課題となっている。

気候変動に関する森林・林業分野での環境研究においては、技術の適用範囲が広範囲に及ぶため、技術開発とともに低コスト化に向けたイノベーションが求められる。また、木質資源の利用においては、過剰な利用になると森林減少（伐採地の他の土地利用への転換）を引き起こす可能性があり、木質資源の利用による排出削減効果に関する基礎研究の推進が求められている。

##### ■ 水産業

生態系モデリングが極めて有用なツールではあるが、高次栄養段階の生物までつながりを持った「生物資源－環境系のモデル」については、高次栄養段階になるほど生物のサンプリングが難しくモデルの検証に必要なフィールドデータが限定的であること、移動能力や環境変化に対する能動性が高まるため広範囲における行動の把握が必要となること、さらには相対的に寿命が長いため発育や成長に伴って環境要因や食物関係が複雑多様に変化すること、などの課題が残されている。

また、生態系モデルの検証に必要な海域の生物情報の基盤が、欧米諸国に比べて極めて貧弱であり、日本周辺の多くの海域で継続的に利用できる生物情報は漁獲統計に限られることが多く、研究推進のボトルネックとなっている。海洋生物の継続的なモニタリング体制を強化するとともに、モニタリング結果を適切に評価し国内外にタイムリーに発信する仕組みを構築することは、今後取り組むべき最重要の課題の一つである。

[今後取り組むべき研究テーマ]

■ 農業

- 将来気候ダウンスケール手法の開発、将来の農業環境変動とその不確実性を評価できる気候シナリオ作成など、気候変動の影響評価に必要な基盤情報の整備
- 現場における影響予測実験結果との検証を基盤とする、農作物、樹林、水産物の品目に対する応答予測モデルの開発と高度化
- 生理的メカニズムや遺伝要因の解明を基盤とする生産安定技術と新たな品種の開発
- 各地の生産現場でのニーズに対応した技術の普及方策の検討
- 気候変動リスク評価や将来影響予測等を農林水産業の現場に提供する早期警戒・栽培管理支援システムの開発
- 温室効果ガスインベントリにおける各算定値の精緻化
- 衛星画像等を用いた新たな広域評価手法の開発
- 生産現場で適用可能な緩和技術の開発とその適用のための社会システムの構築
- 温室効果ガス排出削減と他の環境負荷軽減、あるいは適応策とのシナジーを有する技術の開発
- 植物資源環境の促進に関して、「農業」の「人間活動」の側面を前面に出した農業水資源の評価と管理
- 両極端現象（渇水と洪水）の同一地域での発生に合わせたシームレスモデルの構築
- 分布型水循環モデルを基本にした気候変動影響評価法を用いて、基本的な水文・気象データが極端に不足する地域（例えば、カンボジア、ラオス、ミャンマー等の発展途上国）の農業水資源計画、水利施設計画の計画手法を開発する。→農業水利に関する知識インフラ（ソフト分野も含む）の海外輸出
- 流域について、河口沿岸部も含めた新しい概念を展開し、農地・森林域からの土砂生産が沿岸河口部や水産資源に及ぼす影響範囲の特定と農地・森林管理の重要性の立証
- 畑地・水田農地からの土砂流出の把握と“新たな流域”内の土砂循環モデルの構築

■ 林業

- 森林の多面的機能（水源かん養、生物多様性保全、地球環境保全、土砂災害防止、保健・文化、物質生産等）を地域に応じて効果的に発揮させるための、複数の機能の相互関係（トレードオフ、コベネフィット等）の解明と多面的機能の総合的な評価手法の開発
- 乾燥に強い品種の開発や大規模台風に強い森林の造成技術の開発
- 森林モニタリングの精度向上のための衛星モニタリング技術の開発
- ドローンを利用した高精度炭素蓄積推定技術の開発
- 大規模長期実証研究による持続可能な森林管理手法の開発
- 生物多様性による生態系のレジリエンスに関するメカニズム、特にメカニズムにおける生物間相互作用の評価
- 生物多様性／生態系劣化と感染症拡大の関係解明および対策として適切な生態系管理手法の開発

- 環境アセスメント、自然再生など既存の保全政策に加え、開発に対して生物多様性オフセット（開発による生態系の損失をゼロにするまたは増加への転換を求めるシステム）を導入するための生態系および生物多様性の定量的評価手法の開発
- 有効な生物多様性保全政策、特に地域連携が効果的な政策制度のための自治体連携に関する研究
- 水産業
  - 海洋生態系統合モデル（end-to-end model）の構築と現場データによる検証
  - 海洋フロント等のメソスケールの現象のフィールド計測とそのための技術開発
  - 海洋再生可能エネルギー開発にかかわる環境モニタリングおよび影響評価技術の確立
  - 基礎科学から応用研究開発までを統合した海洋環境変化への体系的な適応方策に関する基盤技術開発

## （５）政策的課題

### ■ 農業

湿潤地域における稲作農業と乾燥・半乾燥地における畑作主体の農業の違いの認識、水資源基本法のもとでの地下水の公的財産権と農業用水利用の観点の検討、農村が持つ多面的機能の再評価と利活用による農村地域の活性化方策の策定などがあげられる。これらの課題の解決のためには、国際連携、国内の省庁における関連部局の連携が求められる。研究予算に関しては、日本の研究予算による外国の研究支援、国内での省庁を超えた予算等が求められる。

### ■ 林業

発展途上国における森林減少、森林劣化からの排出削減を目指す REDD+は、2005年のCOP11での問題提起から10年が過ぎ、2015年パリで開催されたCOP21で、ようやく2020年からの実施に向けた国際的体制が構築された。今後、各国での森林減少、森林劣化を抑制したことによる温室効果ガスの排出削減量を科学的に推定していくためのモニタリングシステムの構築が進められることになり、この中で、それぞれの国に適応した排出削減量算定のためのシステム構築に向けた技術開発が求められる。

### ■ 水産業

海洋生物の継続的なモニタリング体制を強化し、モニタリング結果を適切に評価して国内外にタイムリーに発信する仕組みを構築することは、今後取り組むべき政策的課題の一つである。また、沿岸海域底層水の溶存酸素濃度（DO：Dissolved Oxygen）が、2016年3月に基準に加えられたことにより、生物生産環境の保全・回復の目標が明確にされた。今後、モニタリング体制を強化するとともに、貧酸素化が進行する多くの閉鎖性内湾で貧酸素環境の改善に取り組んでいくこと、そのための基本的な考え方や方法論を提示していくことは重要な政策的課題と考えられる。

さらに、森林・農地・河川・沿岸海域を統合した学際領域の科学の推進についても、それが地域社会にどのような新しい視点や概念、あるいはどのような社会システムを提供できるのかを明確にしていくことが求められる。自然と人間の連環を視野に入れた多様な関係者間の合意形成と、それにもとづく実践的な活動の展開が強く求められる時代を迎えており、そうした観点から環境管理の政策基盤を強化していくことも重要な課題である。

### ■ その他の共通課題

土地利用は行政機関が縦割りに対応するため、例えば、日本の耕作放棄地の自然生態系への誘導等の技術開発や制度化（税制含む）に遅れがみられる。人畜共通・野生動物媒介感染

症研究においては、感染症は厚生労働省が取り扱うため病原菌が主たる研究テーマとなり、病原菌媒介者の生態、野外における分布等の研究が立ち遅れている。そのためマダニ媒介感染症における野生動物管理、蚊の生息地管理における総合的かつ持続的な管理手法の開発が進んでいない。また、生物多様性保全是国境や自治体の境界に依らないが、行政単位ごとに手法や制度が異なるため障壁があることも課題である。さらに、生物多様性がもたらす生態系サービスは、スピードと完全性において薬剤などの人工物による対策に劣るが、安全性、コストや持続性に優れることの理解と実証研究によって、インフラ整備・維持コストの低減が求められる。これらの課題はおおよそ世界的に共通するものである。

### （6）キーワード

洪水防止機能、人間活動のモデル化、時間軸指標、環境指標、環境同位体、河川還元率、分布型水循環モデル、GCM（General Circulation Model）、多面的機能、気候変動、カーボンニュートラル、CLT、木質バイオマス、森林減少、森林劣化、REDD+、統合的水資源管理、排出削減量、航空機 LiDAR、ドローン、衛星 LiDAR、GEDI、MOLI、生物多様性、生態系サービス、Eco-DRR、グリーン・インフラ、レジリエンス、感染症、海洋生態系、海洋生物資源環境、水産資源生産、沿岸環境管理、生態系モデリング、バイオロギング、海洋温暖化、生態系アプローチ、影響評価、適応技術、温室効果ガス、緩和技術

### （7）国際比較

#### ■ 農業

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>● 影響評価について、コメや果樹をはじめ、多くの品目で定量的な評価が行われている。</li> <li>● 温室効果ガス排出／吸収量評価について、主要排出源で Tier 2 または 3 の評価が行われている（Tier：排出量（吸収量）算定方法の複雑さ）。</li> <li>● 農業の持つ多面的機能の評価や分布型水循環モデルの開発、水田の洪水防止機能等を活用した超過洪水管理等では、世界をリードする研究を展開している。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2015 年に「農林水産省気候変動適応計画」が策定され、農林水の各分野で適応技術の開発が進められている。</li> <li>● 水田、農地土壌炭素、畜産廃棄物管理、森林について緩和技術が開発され、政府の削減目標に盛り込まれている。</li> <li>● 応用研究・開発の進展が最も要求されており、農業水資源の特徴を共有する東アジア、東南アジア、南アジア等の諸国において研究進展を図る必要がある。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 主要作物（トウモロコシ、ダイズ、コムギ）について、定量的な影響評価が行われている<sup>68)</sup>。</li> <li>● 温室効果ガス排出／吸収量評価について、主要排出源で Tier 2 または 3 の評価が行われている<sup>69)</sup>。</li> <li>● 基礎的解析技術、例えば GCM、流出解析モデルの構築等、については世界の先端をいっている。ただし、モンスーンアジアの農業水循環等についての知識には欠けている。</li> <li>● 米国における先進研究や関連する研究機関、研究者に関しては、吉田ら（2010）<sup>70)</sup>が事例調査を実施している。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2014 年に農務省（USDA）より「気候変動適応計画」が策定されている。しかし、技術的な内容に乏しい<sup>71)</sup>。</li> <li>● 農業分野の排出源について幅広く緩和技術が開発され、コスト評価も行われている<sup>72)</sup>。</li> <li>● 気候変動や極端現象への対応等、応用研究も進んでいる。各種リスクの考え方についても発展している。</li> </ul>

欧州	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● コムギについて、定量的な影響評価が行われている<sup>73)</sup>。</li> <li>● 温室効果ガス排出/吸収量評価について、主要排出源で Tier 2 または 3 の評価が行われている。</li> <li>● 農業水資源に関する基礎的分野では、ドイツ、英国、フランスが諸国中ではぬきんでている。フランスは、欧州の中でも農業大国であり、農業はエコシステムととらえ、日本の農業が持つ多面的機能には理解を示している。ドイツは農業水資源の社会システマ的評価、英国は気候変動関連技術、フランスは各種予測技術に強みを持っている。</li> <li>● 農業水資源の解析技術では、ドイツのポツダム気候影響研究所 (PIK) が農業水資源やその社会経済的な影響評価の先端をいっている<sup>74)-77)</sup>。また、フランスの国立科学研究センター (CNRS) の Agnès Ducharne を研究リーダーとする成果<sup>78)-80)</sup>、さらにはフランスの国立環境・農業科学技術研究所 (IRSTEA) の水文グループによる流出モデルや予測モデルの開発<sup>81)-83)</sup>が代表的なものである。</li> <li>● 欧州における先進研究や関連する研究機関、研究者のまとめは、吉田ら (2010)<sup>70)</sup>が行っている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 適応策に関する EU プラットフォームが整備され、各国の施策と技術に関する情報を集積・発信している<sup>84)</sup>。また、英国で 2010 年に「気候変動適応計画」が策定されたのをはじめ、各国で施策と技術の展開が進められている。</li> <li>● 農業分野の排出源について幅広く緩和技術が開発され、コスト評価も行われている<sup>85)</sup>。</li> <li>● フランス、イタリア、スペインの地中海沿岸には、水田農業が行われており、モンスーンアジアの農業水資源にも興味がある。国際誌「Paddy and Water Environment」(Springer 社)の関連論文は欧州からもダウンロードされている。</li> <li>● 応用の分野では、Ostfalia University of Applied Sciences の Klaus Röttcher 教授ら<sup>86)-88)</sup>が、農地と洪水問題の視点から農業水資源に取り組んでいる。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 主要作物 (トウモロコシ、ダイズ、コムギ) について、定量的な影響評価が行われている (日本との共同研究成果)<sup>89)</sup>。</li> <li>● 温室効果ガス排出/吸収量評価について、基礎研究は見られるが、国全体での評価は比較的単純である。</li> <li>● 水田農業や農業水資源分野の関連論文を掲載している国際誌「Paddy and Water Environment」(Springer 社)への掲載論文に中国からの投稿数ならびに採択論文数は、圧倒的に多いものの、研究レベルに関しては、台湾が日本に近い研究を行っている。台湾大学 (National Taiwan University) 等と日本の大学、国立研究法人機関等との情報交換も行われている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 農林水産業を対象とした適応技術に関する成果の発信に乏しい。</li> <li>● 緩和技術に関する基礎研究は見られるが、実用に近いものは見当たらない。</li> <li>● 中国の農業は、北部黄河流域にみられる半乾燥地としての畑地農業と南部長江流域に代表される水田農業とに分けることができ、農業水資源に関してはその特徴が大きく異なっている。この点では、南部の大学や研究機関で行われる応用研究・開発が日本にとって参照となる。洪水と農業水利用の一体的管理に関しては、長江流域の洪水管理など、世界に互した研究を行っている。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 影響評価や温室効果ガス排出に関する研究成果に乏しい。</li> <li>● 温室効果ガス排出/吸収量評価について、基礎研究は見られるが、国全体での評価は比較的単純である。</li> <li>● 日本と同様に農業としては水田農業が中心であり、関連技術の基礎的研究が行われているが、日本の研究成果や技術情報を常に参照している傾向がある。</li> <li>● 専門家の数は、日本に比べて少ない。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2009 年に政府の「気候変動適応計画」が策定されているが、技術的な情報発信に乏しい。</li> <li>● 緩和技術に関する基礎研究は見られるが、実用に近いものは見当たらない。</li> <li>● 農業水資源の管理分野に関しては、農業の持つ多面的機能の利活用などが進んでおり、研究予算や行政施策の重点的投資が可能であり、農業水資源管理としての農業用ダムの改修を全国一斉に実施・完了するなど、応用研究・開発のスピードは著しく速い。</li> </ul>

■ 林業

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>● 木質資源利用のための基礎研究は、森林総合研究所を中心として行われている。</li> <li>● 森林生態学や森林の CO<sub>2</sub> フラックスにおける基礎研究による知見が蓄積されており<sup>90)</sup>、国内での森林吸収源の応用研究や REDD+における炭素蓄積変化に関する手法開発<sup>52)</sup>に活かされている。</li> <li>● 生物多様性について、異なる調査地点間による生物群集の分類学および機能的類似化の要因と課程の解明<sup>91)</sup>、材密度や樹形などの樹木の形態的特徴と共存の関係性<sup>92)</sup>などの多様な生物が群集を形成するメカニズムに関する研究が進展。基礎研究では大きなトレンドは認めたいが、国際共同によるハイインパクトな国際誌への掲載は安定している。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 国土の3分の2を森林で覆われているため、木質資源の利用に関する応用研究は民間を含めて進んでいる<sup>93)</sup>。CLTについては欧州に続き研究が進んでいる<sup>94)</sup>。これは木材利用促進と構造（特に地震の多い国であることからの要求）の両面の影響を受けている。</li> <li>● モニタリングにおいては、ALOS-2 PALSAR という合成開口レーダを用いたセンサ開発が特徴的であり<sup>95)</sup>、その実用化に向けた研究が望まれる。ドローンを用いた森林モニタリングにも期待が高まっているが、航空法による規制が障壁となっている<sup>96)</sup>。</li> <li>● 自然森林植生の気候変動の影響評価については研究が進んでいるが、人工林への影響評価のための研究は開始されたばかりであり<sup>66)</sup>、適応策に資する技術開発もこれからである。</li> <li>● 生物多様性について、広域データに基づくトレンド解析、予測研究により国内における管理手法や政策への貢献を目的とするものが見受けられる<sup>97)98)</sup>。生物多様性保全にかかる森林管理手法の実証研究を北海道において開始<sup>99)</sup>。国内で分野横断研究が増加傾向にあるが、国際的インパクトや他地域の研究は特に顕著でない。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 米国では、非常に早い段階から将来予測に関する研究が進んでおり<sup>100)</sup>、森林分野においてもシナリオ研究が行われてきている<sup>101)</sup>。</li> <li>● 衛星モニタリングの膨大な基礎研究の蓄積があり<sup>102)</sup>、衛星観測の REDD+などへの応用に役立っている。また衛星 LiDAR などセンサ開発のための基礎研究にも力を注いでいる<sup>103)</sup>。</li> <li>● 生物多様性について、フィールド研究ではこれまで通り熱帯林の研究が主流だが、モデルの精度向上を実証<sup>104)</sup>などモデル研究が進捗。論文の投稿や掲載は国内で増加傾向はなく、他地域と比較しても増加傾向はない。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 木質バイオマスエネルギー利用を最初に商業化した国であり<sup>105)</sup>、エネルギー効率に関する研究も進んでいる。REDD+の実施に向けた研究では、米国地質調査所 (USGS) に蓄積された衛星データの大量のアーカイブの利用や<sup>106)</sup>、航空機 LiDAR を用いたモニタリングに関する応用研究<sup>107)</sup>が進んでいる。</li> <li>● 生物多様性について、リモートセンシングなど大型スケールのアセスメント、手法がやや優位。最近では外来種、突発的大発生害虫の生態系影響に関する国スケールの分析研究が増えてきた<sup>108)109)</sup>。森林を含む都市生態系に関する社会-生態システムの主流化が進展しているほか、森林性種を含む野生動物および人畜共通感染症の拡大機構に関する研究が増加（2016年 ESA 大会発表より）。他地域と比較してトップクラスの研究が多いが、研究分野としての増加傾向は特に認められない。</li> </ul>
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 多くの国で気候変動に対する適応戦略・適応計画を立てており、シナリオによる将来予測に関する研究が進んでいる<sup>110)</sup>。</li> <li>● IPCC における温室効果ガスの吸収・排出量を算定するための 2006 年ガイドラインの策定に多くの研究者が参画し、方法論の開発に寄与している<sup>53)</sup>。</li> <li>● 生物多様性について、特に目覚ましい理論や技術の発展は見受けられないが、気候帯ごとの特有の森林タイプを扱うほか、熱帯林における理論研究がみられる。EU 内で過去と比較して増加傾向はない。</li> </ul>

欧州	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● CLT や木質バイオマス利用では世界をリードしている<sup>17)111)</sup>。このためこの分野での応用研究・開発が進んでいる。</li> <li>● 森林蓄積のモニタリングへの航空機 LiDAR の応用研究は 2000 年代初頭より積極的に行われてきており、特に北欧で実用段階に至っている<sup>112)</sup>。この技術を REDD+ のためのモニタリングに応用する研究も行われている<sup>113)</sup>。</li> <li>● 生物多様性について、グリーンボンドなどの資金メカニズムや政策研究に特徴<sup>114)</sup>。ブラジル・アマゾンでは J Barlow らのグループによる精力的な研究蓄積があるが、人為攪乱が森林減少だけでなく重要な生物多様性 (High value Conservation Value) の損失を引き起こしていることを明確にし、政策的対応の必要性を示した<sup>115)</sup>。世界的に見て他地域より増加の傾向にある。</li> </ul>
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 中国の環境分野では、水質汚染や大気汚染が最重要課題であり、気候変動問題における森林分野での基礎研究は余り進んでいない<sup>116)</sup>。しかしながら、新規植林を積極的に進めており、森林減少国から増加国に転じたことなどから<sup>117)</sup>、今後、森林の成長 (炭素の蓄積) に関する基礎研究が進むことが考えられる。</li> <li>● 生物多様性について、元々理論に関する中国国内の研究者による基礎研究は少ない (過去 10 年程度の中国人研究者による科学論文から評価)。他国と比較して低下。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 木造建築が少なく、森林資源も乏しいことから木質資源の利用に関しては輸入に頼っている<sup>118)</sup>。ただし、今後、植林した森林の成長とともに、この分野での応用研究が進むことが予想される<sup>119)</sup>。また、中国政府は GDP1 ドルあたりの二酸化炭素排出量を 2030 年までに 2005 年比で 60~65% を削減する目標を示しており<sup>120)</sup>、この分野で算定可能な削減量を確保するため応用研究が急速に進展する可能性がある。</li> <li>● 生物多様性について、炭素蓄積と生物多様性保全の 2 つをキーワードとする論文が多い。また生物多様性保全のみでは希少種保全にかかる研究事例が優占する傾向がある (Web of Science による科学誌掲載論文の状況より)。国内で過去より増加傾向。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 気候変動の森林分野における韓国の基礎研究に関する情報は少ない。</li> <li>● 生物多様性について、元々理論に関する基礎研究は少ない (過去 10 年程度の韓国人研究者による科学論文から評価)。他国と比較して少ない傾向。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 木造建築が少ないが、木質バイオマスの利用は積極的であり利用のための技術開発に取り組んでいる<sup>121)</sup>。また、REDD+ については、インドネシアとパイロットプロジェクトが行われているものの<sup>122)</sup>、限定的である。</li> <li>● 生物多様性について、生物多様性保全では restration がキーワードになっている (CBD/COP12 final report)。リモートセンシング技術を利用した炭素蓄積保全にかかる研究、病虫害との関連研究が多い傾向<sup>123)124)</sup>。国内で増加傾向。</li> </ul>

■ 水産業

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>● 各専門分野における素過程や要素技術の研究は進んでいるが、それらを統合した学際分野や境界領域の研究は遅れている。</li> <li>● バイオロギングについては、対象生物の行動生態を記載するような個体レベルの研究が主体で、水産資源研究への応用例はまだ少ない。海洋研究やモデリング等との連携も緒についた段階である。微細な運動計測等に活用されている「加速度センサ」等の新規のセンサの導入や応用には大きく貢献している。</li> <li>● 生態系や生物資源に関する時系列評価の基礎となる継続的・体系的な生物データの基盤が貧弱である。小達和子博士 (東北区水産研究所) が 1960 年代以降に収集した動物プランクトン標本 (小達コレクションとして世界的に知られている) の解析が行われた例を除けば、長期的な海洋生物モニタリングのデータベースはほとんど確立されていない。</li> </ul>

	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水産資源生産に関連する水産海洋学分野の国際共同研究プログラム（PICES や IMBER、[注目すべき国内外のプロジェクト] 参照）において、数値モデル開発等で世界をリードしている。</li> <li>● 水産資源管理や漁業管理が中心であり、生態系を基礎にした水産資源や環境の管理については、検討が開始された段階である<sup>125)</sup>。</li> <li>● 生物資源の成育場として重要な沿岸浅海域の多くは埋め立て等により消失しており、生態系の健全性を回復するための修復技術の確立や健全性の評価手法開発はこれからの課題となっている。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PICES や ICES、IMBER 等の国際的な研究組織で世界の研究をリードしている。</li> <li>● 海洋大気局（NOAA）等による長期モニタリング：水産資源や環境のモニタリングとデータ解析を 1949 年からカルフォルニア沖で継続している（CalCOFI：California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations）<sup>126)</sup>。また、2000 年代初めから、カリフォルニア海流 LME（Large Marine Ecosystem）でも、気候変動が低次生態系や漁業資源に及ぼす影響の監視を目的とする沿岸生態系モニタリング（PaCOOS：Pacific Coastal Ocean Observing System）<sup>127)</sup>を開始している。</li> <li>● バイオロギングについては、様々な生物種を対象として回遊や潜水行動の基礎科学から水産資源管理への応用まで、幅広い領域で世界の研究をリードしている。モデリングとの融合研究にも着手している。</li> <li>● 仔稚魚等の魚類プランクトンの現場での連続計測ができる ISiIS（In Situ Ichthyoplankton Imaging System）<sup>128)</sup>を開発するなど、微細な時空間規模の物理—生物相互作用の解明に貢献している。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● チェサピーク湾において、生態系を基礎とした漁業資源の保全と管理に取り組む漁業生態系管理計画を世界に先駆けて策定している<sup>129)</sup>。</li> <li>● 富栄養化や貧酸素化が問題となっているチェサピーク湾を対象に、過去の環境変遷の解析結果を踏まえて、流入負荷削減と湿地やカキ礁の生物機能修復を組み合わせた体系的な環境修復戦略を提示<sup>130)</sup>。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ICES、IMBER 等の国際的な研究組織で世界の研究をリード（ドイツ、英国、ノルウェー等が中心）。</li> <li>● プランクトン連続採集器（CPR：Continuous Plankton Recorder）による生物モニタリング（1931 年からプリマス海洋研究所で開始、現在は、SAHFOS（The Sir Alister Hardy Foundation for Ocean Science）に引き継がれている<sup>131)</sup>）。</li> <li>● バイオロギングについては米国と同様の状況。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Oslo Paris Commishion（OSPAR）や Helsinki Commission（HELCOM）等で、モニタリングに基づく海洋生態系の健全度評価指標の開発に取り組み、定期的に公表する仕組みを構築している<sup>132)133)</sup>。</li> <li>● ICES の Science Plan において、社会科学分野を含む分野統合的な研究の推進や産業界との連携が提唱され、生態系保全を基礎とする海洋空間の統合的な利用計画（Marine Spatial Planning）を策定するようなプロジェクト等が実施されている<sup>134)</sup>。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 気候変動の生物資源や生態系への影響に関する国際共同研究を推進しているが、学際領域の科学や分野統合型の研究への取り組みは遅れている。</li> <li>● バイオロギングについては、一部で日本等との共同研究が実施されているだけで、目立った研究実績はない。台湾の方が研究開発で先行している。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水産資源管理・漁業管理のための研究開発が中心で、生態系アプローチへの取り組みは遅れている<sup>125)</sup>。</li> <li>● 富栄養化や流域開発など個別の環境問題への取り組みが主体<sup>135)</sup>。生態系評価手法の開発は今後の課題。</li> </ul>
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PICES-FUTURE 等の国際プログラムを主導するなど、気候変動の生物資源や生態系への影響に関する国際共同研究を推進しているが、学際領域の科学や分野統合型の研究への取り組みは遅れている。</li> <li>● バイオロギングについては中国と同様の状況。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水産資源管理・漁業管理のための研究開発が中心で、生態系アプローチへの取り組みは遅れている<sup>125)</sup>。</li> <li>● 韓国海洋研究院、韓国水産課学院等により環境モニタリングや水産資源管理に関する研究が行われているが、海洋生態系の健全性の評価は今後の課題。</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

## (註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

## (註3) トレンド

↑: 上昇傾向、→: 現状維持、↓: 下降傾向

## (8) 参考文献 (●は全体的に参考とした文献)

- 水産海洋学会編 (2014) 水産海洋学入門 海洋生物資源の持続的利用、講談社.
- 牧野光啄 (2013) 日本漁業の制度分析 漁業管理と生態系保全、恒星社厚生閣
- Takacs D (1996) 狩野秀之ら訳 生物多様性という名の革命. 日経 BP
- Pullin AS (2004) 井田 秀行訳 保全生物学—生物多様性のための科学と実践 丸善
- European Food Safety Authorit : <http://www.efsa.europa.eu/>
- 1) 森田敏(2011) イネの高温障害と対策, 農文協, 143 pp.
- 2) 森田敏 (編著), 2010 : 近年の九州における水稻の作柄・品質低下の実態・要因の解析と今後の対応, 九州沖縄農業研究センター研究資料, 94, 105 pp.
- 3) 農研機構, プレスリリース, 2014 : 高温下でも品質が優れ、良食味で多収の水稻新品種「恋の予感」を育成, [http://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/warc/054028.html](http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/warc/054028.html)
- 4) 塔野岡卓司, 2008 : 温暖化に対応した麦類の出穂安定性の改良, 研究ジャーナル, 31(5): 20–23.
- 5) 杉浦俊彦・杉浦裕義・阪本大輔・朝倉利員 : 果樹の生育変化と異常 : 地球環境, 17, 75-81 (2012).
- 6) 松本光史・井上寛暁・山崎 信・村上 斉・梶 雄次, 2012 : 人工消化による赤米および紫黒米の抗酸化能評価と種雌豚への短期給与が酸化ストレス指標に及ぼす影響, 日豚会誌, 49:109–116.
- 7) 国立環境研究所地球環境研究センター温室効果ガスインベントリオフィス (GIO) 編, 2016 : 日本国温室効果ガスインベントリ報告書  
[http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/2016/NIR-JPN-2016-v3.0\\_J\\_rev\\_web.pdf](http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/2016/NIR-JPN-2016-v3.0_J_rev_web.pdf)
- 8) Itoh, M., Sudo, S., Mori, S., Saito, H., Yoshida, T., Shiratori, Y., Suga, S., Yoshikawa, N., Suzue, Y., Mizukami, M., Mochida, T., and Yagi, K.: Mitigation of methane emissions from paddy fields by prolonging mid-season drainage. *Agric. Ecosys. Environ.*, 141, 359– 372 (2011)
- 9) Akiyama, H., Yan, X., and Yagi, K.: Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N<sub>2</sub>O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis. *Global Change Biol.*, doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02031.x (2009)
- 10) Yagasaki, Y., Shirato, Y. (2014) Assessment on the rates and potentials of soil organic carbon sequestration in agricultural lands in Japan using a process-based model and spatially explicit land-use change inventories - Part 2: Future potentials, *Biogeosciences*, 11, 4443-4457
- 11) Fukumoto Y, Suzuki, K, Waki, M, and Yasuda, T, 2015, : Mitigation option of greenhouse gas emissions from livestock manure composting. *JARQ* 49 (4), 307–312

- 12) Ogino A, Osada T, Takada R, Takagi T, Tsujimoto S, Tonoue T, Matsui D, Katsumata M, Yamashita T, and Tanaka Y (2013) Life cycle assessment of Japanese pig farming using low-proteindiet supplemented with amino acids, *Soil Science and Plant Nutrition*, 59:1, 107–118
- 13) 農林水産省、地球温暖化対策における森林吸収源対策 (2004年)  
<http://www.rinya.maff.go.jp/puresu/h16-11gatu/1129b2.pdf>
- 14) 林野庁、平成19年度森林・林業白書 (2008年)  
[http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w\\_rinya/h19/zenbun.html](http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_rinya/h19/zenbun.html)
- 15) 松本光朗・栗屋義雄・家原敏郎・高橋正通、京都議定書\*に対応した国家森林資源データベースの開発、森林総合研究所平成18年度研究成果選集 (2007年)  
<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/seikasenshu/2006/documents/p4-5.pdf>
- 16) 森林総合研究所プレスリリース、「トレファクション処理による高性能な木質ペレット」国内初の実証プラントが竣工—発熱量と耐水性に優れる木質バイオマス燃料 (2014年)  
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/press/2014/20141204/documents/20141204press.pdf>
- 17) 森林総合研究所、季刊森林総研 No27 特集：CLT 開発の現状 地方創生の切り札 (2014年)  
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/kikan/documents/kikanffpri-27m.pdf>
- 18) 木村喬顯、山田熹一 (1914) 有林地と無林地とに於ける水源涵養比較試験. 林業試験場報告 12:1-84.
- 19) 志水俊夫 (1997) 宝川森林理水試験地における水研究の歩み. 水利科学 233:1-29.
- 20) 玉井幸治、後藤義明、深山貴文、小南裕志 (2004) 林野火災とマツ枯れによる森林の衰退が流出量と流況曲線に及ぼす影響—岡山市竜の口山量水試験地の場合—. 日本林学会誌 86:375-379.
- 21) 村井宏 (1970) 森林植生による降雨のしゃ断についての研究. 林業試験場研究報告 232:25-64.
- 22) 中野秀章 (1976) 森林水文学. 共立出版、東京、238p.
- 23) Tsukamoto Y (1963) Storm discharge from an experimental watershed, 日本林学会誌 45:186-190.
- 24) Hewlett JD and Hibbert AR (1967) Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. in Sopper WE and Lull HW (eds.), *Proceedings of International Symposium on Forest Hydrology*, Pergamon, New York, p.275-290.
- 25) Anderson MG, Burt TP (1990) *Process studies in hillslope hydrology*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, p.1-8.
- 26) Bosch JM, Hewlett JD (1982) A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55: 3-23
- 27) Halpern et al. (2012) An index to assess the health and benefits of the global ocean. *Nature*, 488: 615-620.
- 28) 海洋政策研究財団 (2009) 平成20年度全国閉鎖性海湾の海健康診断調査報告書 全国71閉鎖性海湾の海健康診断一次診断カルテ.
- 29) 農業環境技術研究所, 2014: 主要成果, 作物気象データベース『MeteoCrop DB』改訂版—最新データの提供でイネの生育診断や高温対策への利用が可能に—,  
[http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result30/result30\\_24.html](http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result30/result30_24.html)
- 30) 農研機構中央農業総合研究センター, 2015: 成果情報, 1kmメッシュの農業気象データを全国

- について作成・配信するシステム,  
[http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/narc/2015/15\\_066.html](http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/narc/2015/15_066.html)
- 31) 農業環境技術研究所, 2016: 主要成果, 多収品種タカナリの高 CO<sub>2</sub>濃度環境における子実の成長特性 ~高 CO<sub>2</sub>濃度で増収に寄与する一要因~,  
[http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result32/result32\\_30.pdf](http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result32/result32_30.pdf)
- 32) 農業環境技術研究所・海洋研究開発機構, 2014: プレスリリース, エルニーニョ/ラニーニャと世界の主要穀物の生産変動との関係性を解明,  
<http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/press/140515/>
- 33) 農研機構果樹研究所, 2015: プレスリリース, ブドウ果皮の色調を制御する二つの遺伝子座を発見, [http://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/fruit/058581.html](http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/fruit/058581.html)
- 34) 農業環境技術研究所, 2016: 主要成果, 水田から排出される温室効果ガスの手動チャンバー法による測定手法ガイドライン (英文) を公表,  
[http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result32/result32\\_26.pdf](http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result32/result32_26.pdf)
- 35) 農業環境技術研究所, 2014: 主要研究成果, 農地土壌における炭素貯留量算定システムの開発,  
[http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result30/result30\\_02.html](http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result30/result30_02.html)
- 36) 農業環境技術研究所, 2016: 主要研究成果, 数理モデルに基づく水田からのメタン排出量算定方法の開発, [http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result32/result32\\_02.pdf](http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result32/result32_02.pdf)
- 37) 農業環境技術研究所, 2015: プレスリリース, 農地からの温室効果ガス削減効果を計算するウェブサイト—土壌炭素量の増減と温室効果ガス発生量を総合評価—,  
<http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/press/150220/>
- 38) 農業環境技術研究所, 2015: 主要成果, 土壌の炭素貯留に最適なイネ残渣の燃焼・炭化程度を解明, [http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result31/result31\\_14.html](http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result31/result31_14.html)
- 39) 農研機構農業環境変動研究センター, 東北大学, 2016: プレスリリース, 土着微生物を利用した農耕地由来の温室効果ガスの削減,  
[http://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/niaes/071893.html](http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/niaes/071893.html)
- 40) 農研機構畜産草地研究所, 2015: プレスリリース, 温室効果ガス発生量が少なく窒素除去効果も高い炭素繊維担体を利用した畜舎汚水浄化処理技術を開発,  
[http://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/nilgs/055597.html](http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/nilgs/055597.html)
- 41) 森林総合研究所, 2015: 研究成果選集, 森林減少と劣化を防ぎ、温暖化を防止する,  
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/seikasenshu/2015/documents/p40-41.pdf>
- 42) Masumoto, T., T. Taniguchi, N. Horikawa, T. Yoshida and K. Shimizu (2009): Development of a distributed water circulation model for assessing human interaction in agricultural water use, M. Taniguchi, W.C. Burnett, Y. Fukushima, M. Haigh & Y. Umezawa (Eds.), "From Headwaters to the Ocean: Hydrological Changes and Watershed Management", pp.195-201: Taylor and Francis
- 43) Yoshida, Takeo (2015): Dynamics of water circulation and anthropogenic activities in paddy dominant watersheds –From field-scale processed to catchment-scale model–, Bulletin of the National Institute for Rural Engineering, No.54, pp.1-72
- 44) 工藤亮治・増本隆夫・吉田武郎・堀川直紀 (2012): 気候変動が灌漑主体流域における農業水利用に与える影響の定量的評価法, 農業農村工学会論文集, 277, pp.31-42

- 45) 工藤亮治・増本隆夫・堀川直紀・吉田武郎 (2013) : 気候変動と水資源開発がナムグム川流域の水循環に与える複合的影響の評価, 農業農村工学会論文集, 283, pp.57-66
- 46) KUDO, Ryoji, Takao MASUMOTO and Naoki HORIKAWA (2015): Modeling of paddy water management with large reservoirs in northeast Thailand and its application to climate change assessment, *Japanese Agricultural Research Quarterly (JARQ)*, 49(4), pp.363-376
- 47) 土原健雄, 吉本周平, 白旗克志, 石田 聡 (2016) : 茨城県の水田農業地域における降水, 地表水, 地下水の  $^{17}\text{O}$ -excess および水素・酸素安定同位体比, 農業農村工学会論文集, 302 (84-2), pp. I\_185- I\_194
- 48) 皆川裕樹・増本隆夫・堀川直紀・吉田武郎・工藤亮治・北川巖・瑞慶村知佳 (2013) : 洪水時の水田環境を再現した水稻減収尺度推定のための模擬冠水試験, 応用水文, 25, pp.25-34
- 49) Minakawa, Hiroki and Takao Masumoto (2013): Variability in Intensity of Heavy Rainfall due to Climate Change and its Impact on Paddy Inundation in Low-lying Areas of Japan, *Irrigation and Drainage*, 62(5), pp.679-686
- 50) 皆川裕樹, 増本隆夫, 北川巖 (2016) : 洪水時の流域管理に向けた水田域の水稻被害推定手法, 農業農村工学会論文集, 303 (84-3) (印刷中)
- 51) 森林総合研究所、第2期中期計画成果集 重点課題アアb 木質バイオマスの変換・利用技術及び地域利用システムの開発 (2011年)  
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/seikasenshu/dai2ki/documents/aab.pdf>
- 52) 平田泰雅・鷹尾元・佐藤保・鳥山淳平編、REDD-plus Cookbook (2012年)  
[https://www.ffpri.affrc.go.jp/redd-rcd/ja/reference/cookbook/REDD-plusCookBook\\_20131213.pdf](https://www.ffpri.affrc.go.jp/redd-rcd/ja/reference/cookbook/REDD-plusCookBook_20131213.pdf)
- 53) IPCC、2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use (2006年)  
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- 54) JICA Press Releases、JICA and JAXA Announce Forest Monitoring System Using ALOS-2 Satellite: Constant monitoring of deforestation throughout the tropics and open data access on the Internet (2015年)  
[http://www.jica.go.jp/english/news/press/2015/151215\\_01.html](http://www.jica.go.jp/english/news/press/2015/151215_01.html)
- 55) 森林総合研究所プレスリリース、アマゾン熱帯林全域の高精度樹高マップを作成 —衛星データと地上踏査で熱帯林の三次元構造の精度検証に成功— (2015年)  
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/press/2015/20150805/documents/20150805press.pdf>
- 56) 農林水産技術会議、高精度リモートセンシングによるアジア地域熱帯林計測技術の高度化 (2016年)  
<http://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2039017855.pdf>
- 57) Wiedmann, T.O., et al. 2012. The material footprint of nations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol.112, no. 20, 6271-6276.
- 58) International Union of Forest Research Organizations (IUFRO), 2012, World Series Vol.31.
- 59) Onaindia, M., et al. 2013. Co-benefits and trade-offs between biodiversity, carbon storage and water flow regulation. *Forest Ecology and Management*, Vol.289, 1-9.
- 60) 富士通研究所、プレスリリース「生物多様性保全に向けて、山梨県でニホンジカの生息数を予測する技術の実証を開始」、2016年1月18日

- <http://pr.fujitsu.com/jp/news/2016/01/18-2.html>
- 61) 林野庁、新たな木材需要創出総合プロジェクト [新規] (2015年)  
[http://www.rinya.maff.go.jp/j/rinsei/yosankesan/pdf/27\\_mokuzaijuyou.pdf](http://www.rinya.maff.go.jp/j/rinsei/yosankesan/pdf/27_mokuzaijuyou.pdf)
- 62) 林野庁、平成27年森林・林業白書 (2016年)  
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/27hakusyo/zenbun.html>
- 63) 米国航空宇宙局 (NASA) ホームページ、Global Ecosystem Dynamics Investigation Lidar (GEDI on ISS) (2016年)  
<http://eosps.nasa.gov/missions/global-ecosystem-dynamics-investigation-lidar>
- 64) 浅井和弘・沢田治雄・杉本伸夫・下田陽久・平田泰雅ほか、植生ライダー (MOLI) 計画の現状報告 (2013年)  
[http://laser-sensing.jp/31thLSS/31th\\_papers/04\\_A-4\\_Asai.pdf](http://laser-sensing.jp/31thLSS/31th_papers/04_A-4_Asai.pdf)
- 65) 農林水産省、農林水産省気候変動適応計画 (2015年)  
<http://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/kankyo/pdf/150806-01.pdf>
- 66) 農林水産技術会議、農林水産分野における気候変動対応のための研究開発」に係る企画競争参加者を募集 (2016年)  
<http://www.s.affrc.go.jp/docs/project/2016/pdf/koji2.pdf>
- 67) Hofmann, E. et al. (2015) IMBER – Research for marine sustainability: Synthesis and the way forward. *Anthropocene*, 12: 42-53.
- 68) Hatfield, J.L., K.J. Boote, B.A. Kimball, L.H. Ziska, R.C. Izaurralde, D. Ort, A.M. Thomson, and D. Wolfe, 2011: Climate impacts on agriculture: implications for crop production. *Agronomy Journal*, 103(2), 351-370.
- 69) US EPS, 2016: Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2014, [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/9492.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php)
- 70) 吉田武郎・増本隆夫・堀川直紀 (2010) : 流域水資源および農業への温暖化影響評価に関する世界の先進研究調査, 農村工学研究所技報, 210, pp.285-305
- 71) USDA, 2014: 2014 USDA Climate Change Adaptation Plan, [http://www.usda.gov/oce/climate\\_change/adaptation/adaptation\\_plan.htm](http://www.usda.gov/oce/climate_change/adaptation/adaptation_plan.htm)
- 72) ICF International and USDA, 2013: Greenhouse Gas Mitigation Options and Costs for Agricultural Land and Animal Production within the United States, [http://www.usda.gov/oce/climate\\_change/mitigation\\_technologies/GHG\\_Mitigation\\_Options.pdf](http://www.usda.gov/oce/climate_change/mitigation_technologies/GHG_Mitigation_Options.pdf)
- 73) Iglesias, A., L. Garrote, S. Quiroga, and M. Moneo, 2012: A regional comparison of the effects of climate change on agricultural crops in Europe. *Climatic Change*, 112(1), 29-46.
- 74) Gerten, D., Heinke, J., Hoff, H., Biemans, H., Fader, M., Waha, K. 2011: Global water availability and requirements for future food production. *Journal of Hydrometeorology* 12, 885–899.
- 75) Biemans, H., Haddeland, I., Kabat, P., Ludwig, F., Hutjes, R.W.A., Heinke, J., von Bloh, W., Gerten, D. 2011: Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century. *Water Resources Research* 47, W03509

- 76) Fader, M., Gerten, D., Thammer, M., Heinke, J., Lotze-Campen, H., Lucht, W., Cramer, W. 2011: Internal and external green-blue agricultural water footprints of nations, and related water and land savings through trade. *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 1641–1660.
- 77) Rockström, J., Falkenmark, M., Karlberg, L., Hoff, H., Rost, S., Gerten, D. 2009. Future water availability for global food production: The potential of green water for increasing resilience to global change. *Water Resources Research* 45, W00A12.
- 78) Ducharne A (2009). Reducing scale dependence in TOPMODEL using a dimensionless topographic index, *HESS*, 13, 2399-2412
- 79) Ducharne A, Baubion C, Beaudoin N, Benoit M, Billen G, Brisson N, Garnier J, Kieken H, Lebonvallet S, Ledoux E, Mary B, Mignolet C, Poux X, Sauboua E, Schott C, Théry S, Viennot P (2007). Long term prospective of the Seine river system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of the Total Environment*, 375, 292-311
- 80) Ducharne A, Golaz C, Leblois E, Laval K, Polcher J, Ledoux E, de Marsily G (2003). Development of a High Resolution Runoff Routing Model, Calibration and Application to Assess Runoff from the LMD GCM. *Journal of Hydrology*, 280: 207-228.
- 81) Andréassian, V., N. Le Moine, C. Perrin, M.-H. Ramos, L. Oudin, Thibault Mathevet, Julien Lerat, Lionel Berthet (2012): All that glitters is not gold: the case of calibrating hydrological models, *Hydrological Processes*, 26(14), pp.2206–2210
- 82) Andréassian, V., N. Le Moine, T. Mathevet, J. Lerat, L. Berthet, C. Perrin (2009): The hunting of the hydrological snark, *Hydrological Processes*, 23(4), pp.651–654
- 83) Moine, N. L., V. Andréassian, C. Perrin, C. Michel (2007): How can rainfall-runoff models handle intercatchment groundwater flows? Theoretical study based on 1040 French catchments, *WATER RESOURCES RESEARCH*, 43, W06428, 11 PP.
- 84) European Commission and European Environment Agency: The European Climate Adaptation Platform (CLIMATE-ADAPT), <http://climate-adapt.eea.europa.eu/about>
- 85) Pérez Domínguez, I., T. Fellmann, F. Weiss, P. Witzke, J. Barreiro-Hurlé, M. Himics, T. Jansson, G. Salputra, A. Leip (2016): An economic assessment of GHG mitigation policy options for EU agriculture (EcAMPA 2). JRC Science for Policy Report, EUR 27973 EN, 10.2791/843461
- 86) Röttcher, K., N. Haustein und D. Bruns 2007: Strategische Umweltprüfung für Hochwasserschutzpläne - Anforderungen an die Wasserwirtschaft. Seminar „Die neue EU-Hochwasserrichtlinie – Wohin geht die Reise im europäischen Hochwasserschutz?“ der DWA am 19./20. 11.2007 in Koblenz. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 22.07, S. 97-111. Selbstverlag der Fachgemeinschaft hydrologische Wissenschaften.
- 87) Röttcher, K., O. Grant, E. Walesch, H. Kreuwel 2005a: Hydrological efficiency of near natural measures for the reduction of floods. Beitrag zur SDF Konferenz vom 17.-19. Oktober 2005, 7 Seiten.
- 88) Röttcher, K. und F. Tönsmann 2005b: Environmentally compatible Flood Protection for the catchments of the Fulda and Diemel. 3. International Symposium on Flood Defence, 25.-27.

- May, 2005, Nijmegen.
- 89) Tao, F., Z. Zhang, and M. Yokozawa, 2011: Dangerous levels of climate change for agricultural production in China. *Regional Environmental Change*, 11(Suppl. 1), S41–S48, doi:10.1007/s10113-010-0159-8.
- 90) 森林総合研究所ホームページ、FFPRI FluxNet (2016年)  
<http://www2.ffpri.affrc.go.jp/labs/flux/index.html>
- 91) Mori AS, et al. 2015. Concordance and discordance between taxonomic and functional homogenization: Responses of soil mite assemblages to forest conversion. *Oecologia*, 179, 527-535.
- 92) Iida, Y., et al. 2012. Wood density explains architectural differentiation across 145 co-occurring tropical tree species. *Functional Ecology*, 26, 274–282.
- 93) 一般社団法人木質バイオマスエネルギー協会ホームページ、木質バイオマス加工・利用システム開発事業 (2016年)  
<http://www.jwba.or.jp/woodbiomass-kakou-riyou-system/>
- 94) 一般社団法人日本 CUT 協会ホームページ、CLT の性能把握のための試験 (2014年)  
<http://clta.jp/actandtech/>
- 95) JAXA ホームページ、陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」(ALOS-2) (2016年)  
<http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos2/>
- 96) 国土交通省航空局、無人航空機 (ドローン、ラジコン機等) の安全な飛行のためのガイドライン (2015年)  
<http://www.mlit.go.jp/common/001128047.pdf>
- 97) Iijima, H., et al. 2013. Estimation of deer population dynamics using a Bayesian state-space model with multiple abundance indices. *Journal of Wildlife Management*, 77, 1038–1047.
- 98) Aiba, M., et al. 2016. Context-dependent changes in the functional composition of tree communities along successional gradients after land-use change. *Journal of Ecology*, 104, 1347-1356.
- 99) 森林総合研究所、プレスリリース「人工林の公益的機能と木材生産を両立する施業方法を探る-国内初の大規模実験を開始-」、2013年5月15日  
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/hkd/pr/pressrelease.html>
- 100) 米国環境問題諮問委員会、米国国務省、西暦 2000 年の地球 (1980年)
- 101) 米国環境保護庁ホームページ、Climate Impact on Forest (2016年)  
<https://www3.epa.gov/climatechange/impacts/forests.html>
- 102) メリーランド大学、Global Forest Change (2014年)  
<https://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>
- 103) 米国航空宇宙局 (NASA) ホームページ、New NASA Probe Will Study Earth's Forests in 3-D (2014年)  
<http://www.nasa.gov/content/goddard/new-nasa-probe-will-study-earth-s-forests-in-3-d/>
- 104) Taubert, F., et al. 2015. The structure of tropical forests and sphere packings. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112 no. 49, 15125–15129.
- 105) 熊崎実、岐路に立つ日本の木質ペレット産業 (2013年)

- <http://www.jwba.or.jp/>レポート/日本の木質ペレット産業/
- 106) カーネギ・サイエンスホームページ、CLASLite (2013年)  
<http://claslite.ciw.edu/en/index.html>
- 107) カーネギ・サイエンスホームページ、The Carnegie Airborne Observatory (2016年)  
<https://carnegiescience.edu/projects/uncovering-canopy-chemistry-carnegie-airborne-observatory>
- 108) Cunniffe, N., et al. 2016. Modeling when, where, and how to manage a forest epidemic, motivated by sudden oak death in California. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 113, no. 20, 5640–5645.
- 109) Lovett, G.M., et al. 2016. Nonnative forest insects and pathogens in the United States: Impacts and policy options. *Ecological Applications*, Vol.26, 1437–1455.
- 110) 気候変動適応計画のあり方検討会、気候変動への適応のあり方について (報告) (2015年)  
<https://www.env.go.jp/council/06earth/y060-125/mat02.pdf>
- 111) 梶山恵司、木質バイオマスエネルギー利用の現状と課題—FITを中心とした日独比較分析— (2013年)  
<http://www.fujitsu.com/downloads/JP/archive/imgjp/group/fri/report/research/2013/no409.pdf>
- 112) Jean Matthieu Monnet、Airborne Laser Scanning for Forest Applications - State-of-the-Art - (2012年)
- 113) The REDD Desk ホームページ、REDD in Tanzania (2016年)  
<http://theredddesk.org/countries/tanzania>
- 114) Dallimer M, Strange N (2015) Why socio-political borders and boundaries matter in conservation. *Trends Ecol Evol* 30:132–139.
- 115) Barlow, J., et al. 2016. Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. *Nature*, 535, 144–147.
- 116) 横塚仁士、中国の温暖化政策の動向と今後の展望—企業・政府・民間への個別アプローチが重要に— (2009年)  
[http://www.daiwa-grp.jp/csr/publication/pdf/090501\\_2.pdf](http://www.daiwa-grp.jp/csr/publication/pdf/090501_2.pdf)
- 117) 中村知子、気候変動問題に対する中国国内の取組み—中国国内における政策実施の視点から— (2010年)  
[http://www.ndl.go.jp/jp/diet/publication/document/2011/201002\\_10.pdf](http://www.ndl.go.jp/jp/diet/publication/document/2011/201002_10.pdf)
- 118) 日本貿易振興機構 (ジェトロ) 上海事務所農林水産・食品部、中国における建築木材の需要と利用の現状 (中国、四川省) 調査 (2012年)  
[https://www.jetro.go.jp/ext\\_images/jfile/report/07000859/mokuzai.pdf](https://www.jetro.go.jp/ext_images/jfile/report/07000859/mokuzai.pdf)
- 119) 社団法人日本エネルギー学会、アジアバイオマスハンドブック—バイオマス活用の手引き— 第7章 (2008年)  
[http://www.jie.or.jp/biomass/AsiaBiomassHandbook/Japanese/Part-7\\_J.pdf](http://www.jie.or.jp/biomass/AsiaBiomassHandbook/Japanese/Part-7_J.pdf)
- 120) 経済産業省産業技術環境局、地球温暖化問題について (2015年)  
[http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/sangyougijutsu/pdf/002\\_03\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/sangyougijutsu/pdf/002_03_00.pdf)
- 121) アジア・バイオマスエネルギー推進協力オフィスホームページ、韓国の木質ペレット需要 2020年に500万トン (2011年)

- [https://www.asiabiomass.jp/topics/1107\\_04.html](https://www.asiabiomass.jp/topics/1107_04.html)
- 122) The REDD Desk ホームページ、Korea-Indonesia Joint Project for Adaptation and Mitigation for Climate Change in Forestry (2016年)  
<http://theredddesk.org/countries/initiatives/korea-indonesia-joint-project-adaptation-and-mitigation-climate-change>
- 123) 2015年 the 70th Annual Meeting of the Korean Association of Biological Sciences 講演プログラム
- 124) 2016年 the 7th meeting of East Asian Federation of Ecological Societies
- 125) PICES (2010) Report of Working Group 19 on Ecosystem-based Management Science and its Application to the North Pacific, PICES Scientific Report, No. 37.
- 126) <http://calcofi.org/>
- 127) <http://pacoos.org/>
- 128) Cowen, R.K. and C.M. Guigand (2008) In situ ichthyoplankton imaging system (ISIIS): system design and preliminary results. *Limnology and Oceanography, Method 6*: 126-132.
- 129) Chesapeake Bay Fisheries Ecosystem Advisory Panel (2006) Fisheries ecosystem planning for Chesapeake Bay. American Fisheries Society, Trends in Fisheries Science and Management 3.
- 130) Kemp, W.M. et al. (2005) Eutrophication of Chesapeake Bay: historical trends and ecological interactions. *Marine Ecology Progress Series*, 303: 1-29.
- 131) <http://www.sahfos.ac.uk/services/the-continuous-plankton-recorder/>
- 132) Helsinki Commission (2010) Ecosystem Health of the Baltic Sea 2003-2007: HELCOM Initial Holistic Assessment, Baltic Sea Environment Proceedings, No. 122.
- 133) Oslo Paris Commission (2010) Quality Status Report 2010.
- 134) Portman, M.E. (2011) Marine Spatial Planning: achieving and evaluating integration. *ICES Journal of Marine Science*, 68: 2191-2200.
- 135) Qu, J. et al. (2005) Global International Waters Assessments East China Sea, GIWA Regional assessment 36.

### 3.4.3 リサイクル・廃棄物処理

#### （１）研究開発領域の簡潔な説明

過去の大量生産・大量消費社会から、環境負荷低減が見込まれる省資源・省エネルギーを基盤とした循環型社会の構築を目指した廃棄物等の処理技術やリサイクル技術に関する研究開発領域である。

#### （２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

##### [意義]

リサイクルは各国の生活水準や産業構造と深い関係をもつ。途上国では、大量廃棄物の埋立処分量を削減することを目的とした「量のリサイクル」技術の必要性が指摘されている。先進諸国においては、都市鉱山に代表される質の高い資源循環の構築が期待されている。特に素材原料の大半を輸入に依存する日本において、優良天然資源の減少や資源の安定供給に関するリスクは、技術立国の根幹を脅かす問題である。「質のリサイクル」技術の確立は、自国の未利用資源の活用を可能にする極めて重要な課題であり、その技術を有効活用可能な社会システムの構築が新たに求められている。

プラスチックに関しては、2013年の世界のプラスチック生産量は2億9,900万tに上り10年間で1.5倍に増えているものの、適正処理技術・リサイクル技術を持ち合わせていない国・地域も存在し、その対応は喫緊の課題となっている。廃棄されるプラスチック（以下「廃プラ」）の有効利用の観点のみならず、世界規模の資源利用効率の向上、地球温暖化対策の観点から研究開発の進展が求められている。

また、日本では、中間処理されずに直接、埋立処分される廃棄物量はわずかであり、埋立処分される廃棄物の約9割が焼却残渣で占められ、この焼却残渣の循環資源化が求められている。焼却残渣には無機物（金属、無機塩類）が集積しており、鉄、アルミニウム、銅等の常用金属の回収が期待されている。

##### [動向（歴史）]

本領域の技術は、対象別、用途別に極めて多岐にわたっている。その中でも都市鉱山開発は重要技術であり、共通技術でもある物理的な選別技術は、天然鉱山の選鉱技術がベースとなり、各種の粉砕機と選別装置（比重選別、磁選等の集合選別技術）が利用されてきた。さらに1980年頃から、対象物の物性を検出して個別選別する、リサイクルに特化したソーティング技術（Sencer based sorting）が開発・導入され始め、近年においても発展し続けている。集合選別技術に各国の差はないが、個別選別技術は特に欧州での開発が盛んである。これは、日本では中小工場による分散的処理が主体であるが、欧米では大工場による集約的処理がなされていることに起因する。同様の理由により、個別の装置を組み合わせるシステム化も欧州が高い実績を有している。また、集約的処理技術においては、現状、必ずしも質を追求するものではないが、こちらも欧州が先導しているといえる。なお、都市鉱山に求められる分離技術は、法制定や政策によって大きく左右されるのが特徴である。特に2010年～2011年には中国の輸出制限政策によりレアアースが急騰し、国内ではいくつかのレアメタ

ルを対象とした分離技術の開発が加速した。

一方、日本におけるプラスチック（樹脂）の生産量は1963年頃100万tを超え、1970年代になるとその5倍に増加している。最終処分埋立地許容量の問題などが顕在化し、当該分野の研究が行われる一方、プラスチック製容器に係る環境負荷分析を起点とするLCA（Life Cycle Assessment）研究<sup>2)</sup>も行われるようになった。その後、1995年に「容器包装リサイクル法」が制定されると、プラスチックの再資源化に係る研究・技術開発に対する社会的要請は高まり、廃プラリサイクルに関する研究・技術開発が大きく進展した。

日本で実用化されているリサイクル手法としては、材料リサイクル（再生利用）とサーマルリサイクル（セメント原燃料化、ごみ発電、RPF：Refuse Paper and Plastic Fuel、RDF：Refuse Derived Fuel）、そしてフィードストックリサイクルがある。フィードストックリサイクルは廃プラに化学的な組成変換を施した後にリサイクルする手法の総称であり、日本では、①原料・モノマー化、②高炉原料化、③コークス炉化学原料化、④ガス化、⑤油化に分類されている。フィードストックリサイクル技術の研究開発技術としては、加溶媒分解による有機原料回収、熱分解油化、熱分解ガス化があげられる。加溶媒分解による有機原料回収は、PET等のエステル系樹脂を中心とした廃プラを解重合により化学原料やモノマーにして回収する手法で、原料まで戻すためバージン品と同等品質まで再生可能である。モノマー化のプロセスは多様に存在するが、代表的なものとして水による加水分解、アルコールによるアルコリシス・グリコリシス、アミンによるアミノリシス等があげられる。これらの反応を基礎として、常温・常圧、高温・高圧の亜臨界・超臨界等の反応条件を駆使した多くの研究がなされ、比較的低温において高収率のモノマー回収が可能となっている<sup>3)</sup>。熱分解法は、空気を遮断した不活性ガス雰囲気下でプラスチックの化学結合を熱的に切断し、低分子化する手法である。例えば容器包装プラスチックでは、この手法により得た熱分解油は蒸留プロセスを経ることで、軽・中・重油相当の原燃料として再利用することができ、気体および残渣も燃料として有効利用可能である<sup>4)</sup>。

近年のプラスチックリサイクルの地球温暖化防止に対する寄与度について見ると、2014年度はプラ製容器包装の再商品化により、エネルギー資源消費換算で少なくとも190億MJ、CO<sub>2</sub>排出量換算で164万tの削減効果があった。廃プラの有効利用・天然資源節約・地球温暖化防止に寄与しているといえる。

廃棄物に関して日本は、戦後の高度経済成長に伴う廃棄物排出量の急増に対処するため廃棄物の焼却処理が推進されてきた。その結果、世界でも最も高い焼却率80%に達しており、リサイクルされなかった可燃物のほぼ全量を焼却するに至っている。近年では、埋立処分される廃棄物の約9割を焼却残渣が占めている。一方、最終処分容量の確保は難しく、最終処分場の延命化のために、焼却残渣がセメント原料としての有効利用されているものの、焼却残渣にはセメントの忌避物質である塩素が高濃度に含有されているため、効率的な塩素除去技術が求められている。欧州においても、日本と同様、廃棄物の焼却処理が推進されており、焼却灰の土木資材としての有効利用が行われている。米国においても、テネシー州、ペンシルバニア州を始め、焼却処理が進んでいる地域においては、焼却灰を盛土材、埋戻し材として利用している。

焼却灰の循環資源化において求められる技術開発は、焼却灰中の未燃物の除去、篩選別による粒度調整、鉄・アルミニウム等の高効率の有価金属回収である。排出直後の焼却灰は活

性が高く性状が不安定であり、また、重金属、無機塩類が溶出しやすいことからエージングによる前処理技術開発も課題となっている。

### （3）注目動向

#### 〔新たな技術動向〕

近年、日本において、製品の形態特徴量からニューラルネットワークにより個体認識が可能なソーティング技術（ARENNA ソータ<sup>5)</sup>）が、世界に先駆けて開発された。また、その後、フィンランドの ZenRobotics Ltd<sup>6)</sup>では、同様の思想に基づいた建設廃材の選別システムを製品化している。旧来の単一検出から、3D 形状や画像等の複合的な形態特徴量に基づく検出システムへ展開が進んでおり、廃製品を資源価値別に自動選別する技術の開発が、現実味を帯びてきている。また、スイスの SELFRAG AG<sup>7)</sup>では、パルス電気粉砕による単体分離を促進する装置の製品化に成功しており、日本でも同装置の性能評価が行われている<sup>8)</sup>。単体分離促進装置の開発は、まだ始まったばかりであり、今後、様々な形式の装置開発が期待される。

一方、集合選別は、新たな選別原理に基づく装置の発明は近年見られないものの、その制御方法については、新たな手法の開発が始まっている。日本で開発された廃電子素子群からタンタルコンデンサを回収する技術<sup>9)</sup>において、世界で初めて、廃電子素子の物性情報に基づく計算によって、装置スペックや装置運転条件の最適化を実現し、製品化した。従来の経験制御では、集合選別装置の能力の一部しか利用できていなかったが、数値計算に基づく最適化により、能力を最大限引き出すことにより、今後、革新的な選別精度の実現が期待される。

イオン液体による新規分離剤の開発が行われている。常温で液体を呈するイオン液体は、100 年ほど前からその存在は知られていたものの、工業的な利用が研究開発され始めたのはここ 20 年ほどのことである。ここ数年、従来とは異なる選択性を有する分離剤としての利用研究が、計算科学との融合によって積極的に進められている。

プラスチック材料のリサイクルでは、選別技術・再製品化技術が高度化し、スケールメリットを活かしてコスト削減を図る試みが出てきている。フィードストックの熱分解法に関しては、プラスチック・木質バイオマス混合廃棄物を高付加価値化合物に転換する熱分解プロセス技術の開発<sup>10)</sup>や、金属含有 PET から、有用なベンゼンを同時回収するプロセス技術開発<sup>11)</sup>が進んでいる。一方で、近年は混合プラスチックの分解触媒の開発が行われ<sup>12)</sup>、実社会から排出される廃プラ実態に近い研究開発対象へと移行してきている。また、今後は炭素繊維複合材料<sup>13)</sup>のリサイクル問題に直面すると考えられる。炭素繊維強化プラスチック（CFRP：Carbon-Fiber-Reinforced Plastic）のリサイクルに関しては、近年、熱分解法の他に常圧溶解法<sup>14)</sup>や超臨界・亜臨界流体を用いた CFRP リサイクル手法などの研究・技術開発<sup>15)</sup>が進められている。熱可塑性の CFRP も市場に投入されてきており、今後、新たな対応技術が求められると考えられる。さらに、リサイクルの採算性を含めた検討や、リデュース・リユースも含めた技術と社会のインタフェースの在り方も含めた研究<sup>16)</sup>も求められる。

一方、個別リサイクル法毎の技術動向を見ると、容器包装プラスチックでは、前処理工程を見直し RCP（Rotary Channel Pump）を適用してリサイクル費用削減を図る技術・シス

テム開発などが行われている。自動車リサイクルでは、軽く強度・寸法精度・導電性に優れた CFRP への部品適用が進むことが予測され、CFRP のリサイクル技術に対する研究・開発を進める必要性も高まると考えられる。また、蛍光物質を特定成形品に微量に練り込むことでリサイクル時に高精度の自動選別が達成できる技術は、これまで赤外線・ラマン散乱光、X線等で行ってきた光学選別の可能性を広げている。家電リサイクルでは、PP や ABS・PS 等高純度単一プラスチック選別技術の実用化が進められている。色彩選別の高度化による白色 PP ペレットの製造の実現化や、シボ金型による異物隠蔽技術により意匠部品への混合プラスチック由来のリサイクル材の意匠部品への導入が可能となってきた<sup>17)</sup>。

焼却残渣の処理については、セメント原料としての有効利用のため、高効率の塩素の除去技術が求められている。難溶解性塩素であるフリーデル氏塩 ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) は、二酸化炭素、硫酸イオンによって分解され脱塩素される。新たな脱塩素技術として、二酸化炭素のウルトラファインバブル (UFB) を用いた分解技術や焼却灰への薬剤 (硫酸塩) の添加による分解技術開発の取り組みがなされている。また、新たな取り組みとして、一般廃棄物をセメント工場で受入れ、遊休キルンを改造したごみ資源化キルンで都市ごみ中の有機物を好気性分解させた後、破碎・選別を行った上で、他のセメント原料とともにセメント焼成キルンに投入し、高温で焼成するシステムが導入されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

米国エネルギー省 (DOE) では、Critical Materials Institute を組織し、傘下の研究機関のイノベーションハブとして 30 のプロジェクトを実施している。特にレアアース関連の製錬・材料プロセスを中心に 2013 年から 5 年間で 150 億円規模の研究開発をしている<sup>18)</sup>。また、2016 年 6 月には、リサイクルやリユースに関する 70 億円規模の資金提供プログラム REMADE (Reducing Embodied-energy And Decreasing Emissions) を開始した<sup>19)</sup>。

EU では、欧州委員会における Horizon 2020 (2014~2020) の Resource Efficiency and Raw Materials 等に、多くのリサイクル関連プロジェクトが立ち上がっている<sup>20)</sup>。廃製品別の技術開発や流通情報網の構築など、各プロジェクトを合わせると 100 億円以上になると推定される。一例を上げれば、ProSUM (Prospecting Secondary raw materials in the Urban mine and Mining waste) プロジェクト<sup>21)</sup>では、2017 年までに廃家電等の希少金属データの抽出法・分析法を開発し、Urban Mine Knowledge Database Platform (EU-UMKDP) を作成する。また、開発中の他のデータベースと連携して、EU 内の動脈産業~静脈産業に至る希少金属量やフローの可視化を目指している。EU では、技術開発もさることながら、規準や政策決定に資する情報網構築に勢力が注がれているのが特徴である。

日本では、文部科学省が「東北発素材技術先導プロジェクト」を実施中である。希少元素高効率抽出技術領域<sup>22)</sup>では、前述のパルス電気粉碎をはじめ、廃小型家電に対する選別や金属抽出する技術を検討するとともに、計算科学、構造解析などの基礎的なアプローチから、これらの技術開発の支援を行っている。また、NEDO では、エネルギー・環境新技術先導プログラムの中で「動静脈産業連携による循環制御型資源再生技術」を 2016 年 1 月より実施している<sup>23)</sup>。製品の資源配慮設計や製品情報の利用と新規リサイクル技術を連携させるとともに、都市鉱山ポテンシャルや金属需要の推計・予測など都市鉱山の計画的な開発を実現することで、多くの金属種に対する経済的な資源循環を目指している。産業技術総合研究所の

SURE コンソーシアム<sup>24)25)</sup>が核となって推進しており、今後の本格研究への発展が期待される。

なお、NEDO では 2016 年度よりアジア省エネルギー型資源循環制度導入実証事業を実施している。これは、リサイクルによる資源・エネルギーの安定供給および温室効果ガス削減の達成に向け、アジア全体での省エネルギー型資源循環制度の実現を目指すため、相手国において適切な資源循環制度が構築されるよう、日本の自治体等が過去に実施してきた環境負荷を低減させるノウハウ（政策ツールや技術・システムなど）を提供し、実証事業を通じてその有効性を検証するものである。これにより相手国への資源循環に係る制度と技術の一体的な導入を進める。同時に国内において、動脈産業側と静脈産業側が一体となった高度な資源循環システムの構築を目指して、資源リサイクルの効率化・高度化を図る研究実証事業を実施するものである<sup>26)</sup>。

プラスチックリサイクル関連では、PLA-PLUS プロジェクト（「平成 27 年度製品プラスチックの効率的な回収・リサイクル方策に係る調査・実証業務」、日本環境設計（株）・環境省）や、平成 27 年度容器包装における環境負荷低減効果等モデル実証事業・離島における小型油化施設を用いた分別収集参加市町村の増加方策検討実証事業（環境省）、平成 28 年度バイオマスプラスチックの二酸化炭素削減効果及び信頼性等検証事業（環境省）などが行われた。

また、最終処分量を最小化させるための焼却残渣の有効利用に関する注目すべき取り組みとして、二酸化炭素 UFB を用いた焼却残渣中の難溶解性塩素の分解（九州大学）、薬剤（硫酸塩）による焼却残渣中の難溶解性塩素の分解（栗田工業）、遊休キルンを活用した生ごみの処理とセメント原料化（太平洋セメント）、焼却灰の分級による高効率の金属回収（デンマーク・AFATEK 社）、焼却灰からの水素ガス回収と回収残渣のセメント原料化（九州大学）などの研究がなされている。

#### （４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

「質のリサイクル」を経済ベースで確立するには、化学分離工程の前に、低コストで一次濃縮可能な物理選別で、どこまで濃縮できるかが鍵となる。しかし、物理選別プロセスは複雑な個々の粒子物性に強く依存するため理論的解釈が困難であり、経験値に基づく操業が余儀なくされている。混沌とした状態をなし変動が激しい廃製品群に対し、経験則に基づいてプロセスや運転条件を常に最適に保つことは事実上不可能であり、現状では装置が本来持つ性能が十分に発揮できていない。さらに、装置の理想的な機構についても理論的解釈が進んでいないため、装置開発もその追求が十分にできていない状況にある。

物理選別の高度化を実現する上で理論解釈の構築が特に重要なものは、粉砕工程での「単体分離機構」と各種選別機内での「粒子運動（選別機構）」である。いずれも従来は、装置をブラックボックス化して、装置投入前後の産物状態を実験的に観察することで最適化が行われてきた。しかし、実際には変動パラメータが非常に多く、実験結果と多くの仮定に基づいて最適条件を推定してきたため、予測と実際の結果が合わない、再現性が乏しいなどの状況が日常的に発生していた。このため、学術的にも、粉砕や選別の予測結果は、確率的に発生するものとして曖昧さを残していた。しかし、これらの精緻な理論解釈が進めば、確率が何

によって支配されるかが明らかになり、確率を制御することで、物理選別工程の精度が格段に向上することが期待できる。

プラスチックのリサイクルでは、徹底した異物除去・材料選別、熱履歴・経年劣化等による物性低下への対応などが技術的課題としてあげられる<sup>27)</sup>。しかし、多層性フィルムなど材料リサイクルには適さない<sup>28)</sup>製品が次々と出現しているため、材料リサイクルの技術的課題を補完するフィードストックリサイクル技術の開発が必要である。また、フィードストックリサイクルの熱分解技術に関しては、PVCやPETが含有した複合プラスチックの熱分解法における課題が残存している。PETは熱分解でTPA（テレフタル酸）や安息香酸等の昇華性物質を生成するため、機器や配管等の腐食と閉塞の原因となり<sup>29)</sup>、PVCについては、熱分解の過程で脱離した塩化水素ガスが塩酸となるため、機器・配管の腐食の原因になる<sup>30)</sup>ばかりでなく、他のプラスチックと混合することで、有機塩素化合物を生成し、生成物の品質が低下する課題もある。フィードストックリサイクル技術においても、プラスチック製品の多様化・高機能化に対応する技術開発研究が欠かせない状況にある。

焼却残渣については、その利用に伴う地盤の土質力学特性の解明、環境影響評価、長期的な化学鋳物学的な性状の変化と有害重金属の挙動の解明などが課題となる。また、セメント原料としての利用については、セメントの忌避物質である焼却残渣中の塩素、クロニウム、ステンレスの制御が課題である。焼却残渣からの有用金属の回収、水素ガスの回収によって、いっそう、セメント原料としての利用は促進されると考えられる。

#### [今後取り組むべき研究テーマ]

これまで、粉碎機内の「単体分離機構」と各種選別機内の「選別機構」の理論解釈は、世界的に見ても十分に発展してきたとは言いがたい。予測精度の高い「単体分離機構」と「選別機構」の理論を体系化できれば、対象物に応じた合理的な最適化手法を確立できる。また、その理論を応用すれば未踏の装置開発を短期間に実現することも可能となるであろう。このような思想は、世界的にもいまだ着手されておらず、日本が世界に先駆けて上記理論の体系化を実現できれば、都市鉱山のみならず、広く難処理未利用資源の開発手段を独占的に獲得できることを意味し、日本の資源開発を優位に展開することが可能となる。

また、新規に都市鉱山向けの製錬設備を立ち上げることも構想の一つとして考えられる。白金元素などの貴金属元素は高価であり、その設備投資の回収も比較的容易であり、都市鉱山に特化したプロセスが、実際に操業されている（ローズ法）。しかし、貴金属以外の元素では、現時点で都市鉱山資源に特化した製錬は行われていない。今後、リサイクルの社会システムが成熟し、効率的な製品の解体分離技術が発展すれば、目的成分を多く含む部品を集積できるようになり、これら成分に適した高効率・省エネルギーの製錬法の開発の必要が生じると予想される。

プラスチックリサイクルの今後取り組むべき研究テーマとしては、熱分解プロセスにおいて有害物質の発生を抑制する技術開発、有害物質の分解・無害化技術開発があげられる。一方CFRPの自動車部品適用拡大に伴い、CFRPリサイクル技術の高度化が必要であるとともに、将来的にはカーボンニュートラルの観点からバイオFRPリサイクル技術の研究・開発の必要性も高まると考えられる。

さらに、日本の焼却処理においては、エネルギー回収（waste to energy）に留まらず、廃

棄物より土木資材（粒状骨材）、土木建築資材の3要素（セメント、鉄、ガラス）の一つであるセメント原料の生産のための焼却（waste to materials）へと転換を図ることが望まれる。そのための原料たる焼却対象廃棄物性状の改質、燃焼制御、焼却残渣排出時の改質技術の開発に取り組むことが求められる。

### （5）政策的課題

リサイクルにおいて、技術と制度は両輪であり、一方だけでは資源循環は成立しない。従来は、制度の網羅性を担保するため、現有技術の底辺に合わせた制度が構築されてきた。これは、日本のリサイクルが、極めて多くの中小工場により支えられてきたことにも起因する。近未来の日本の高度なリサイクル技術を最大限に活用するには、1.高度な技術の普及（教育・啓発）、2.高い技術に基づく制度の制定、3.都市鉱山ポテンシャルや資源の需要予測に基づいた戦略的・計画的な都市鉱山の運用など、政策面が担う役割も極めて重要である。特にこれまでは、発生した廃製品を静脈産業が個別かつ非制御的に再資源化する構図が主体であったため、時々の資源相場に強く影響され、安定的な再生資源の供給が困難な面があった。戦略的な都市鉱山開発においては、動脈産業と静脈産業が密に連携し、国内の資源循環をコントロールしてゆく体制を整えることが必要となる。

一方、国内で生産される製品の多くは海外に輸出されるため、国内都市鉱山だけを開発したのでは、需要の一部しか賄うことができない。日本製品の市場は世界であり、海外で発生した廃製品をどのようにハンドリングしてゆくかは、大きな課題である。各国における廃棄物処理の法律や文化、あるいはバーゼル条約による廃棄物移動の制約などを、どのように解決してゆくかの議論も重要となる。

プラスチックリサイクルに関しては、「容器包装リサイクル法」、「自動車リサイクル法」、「家電リサイクル法」等それぞれの個別リサイクル法の枠組みの中で対応しているのが現状である。しかし効率性の観点からは、個別リサイクル法の枠組みを超えたりサイクルシステムの適用が望ましい場合も考えられる。国は「素材別リサイクル戦略マップ策定に向けた調査・検討」を始めたところではあるが、金属同様に動脈・静脈を含めた物質フロー、コスト（回収・輸送・処理）、静脈産業インフラ、等を含めて効率的な社会システムのあり方、その実現のための法規制のあり方について検討を急ぐべきである。一方、リサイクル効率を高めるための技術適用の側面からの検討も進めるべきである。

都市鉱山と同様、日々、排出される焼却残渣、さらに過去に最終処分された膨大な量の焼却残渣より鉱物資源を回収する取り組みが求められる。最終処分される廃棄物が極小化され、焼却残渣中の枯渇性資源が徹底して循環利用される持続型社会の構築が急がれる。

### （6）キーワード

都市鉱山、物理選別、中間処理技術、希少金属、資源循環、廃棄物処理、プラスチックリサイクル、フィードストックリサイクル、熱分解法、ハロゲン化物、窒素含有プラスチック、CFRP、焼却残渣、最終処分、土木資材、セメント原料、高効率金属回収、水素ガス回収

(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>● 国としては高いポテンシャルは有しているが、かつての技術者の高齢化、研究者人口の減少などもあり、研究分野の再興が急務の課題。</li> <li>● プラスチックリサイクルに関して1990年代より先進的技術開発に向けた基礎研究が継続的に行われている。フィードストックリサイクルに関しては既存の技術では再資源化が不可能であった混合廃プラの分解に関するメカニズム解明のための嚆矢となる基礎研究が行われている。しかし、製品として社会に投入されるプラスチックの多様化・高機能化の速度があまりにも速いため、成果が表面化しにくい側面もある。</li> <li>● 焼却残渣の循環資源化に関する基礎研究は、1990年代後半より継続的に行われている。コンクリートの骨材、焼却灰の道路路盤材への有効利用に関する基礎研究や焼却灰のセメント原料のための脱塩素の研究がなされている。関連して土石系資材のマテリアルフロー研究や有効利用に関する基準策定に向けた取り組みが近年、始まっている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 個別製品に対するレアメタルリサイクル技術(方法)は世界トップクラス。ただし、欧州開発装置をベースにしている技術や輸入品の導入が多く、オリジナル装置の開発は限定的。また、中小工場が多いため、装置単位での導入が主体であり、大規模・集約的な選別システムや、プラントエンジニアリングに関しては未成熟の段階。</li> <li>● プラスチックリサイクルに関しては、高機能選別機・破砕機の導入が進んでいる。日本のリサイクル産業は欧米に比べて中小規模の企業が多くスケールメリットが得にくい構造であったが、その見直しの展望も出てきた<sup>31)</sup>。</li> <li>● セメントの原料としての有効利用で、多くのセメント企業が焼却灰の洗浄技術、塩素バイパスの開発を行っている。環境プラントメーカーにおいても、焼却残渣から高効率の塩素除去技術の取り組みを行っている。遊体キルンを用いた生ごみからセメント原料化の技術開発もなされている。</li> </ul>
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 世界トップの鉱山向け粉砕・選別技術を有し、国としてのポテンシャルは極めて高い。ただし、都市鉱山向け技術開発の研究者人口は少なく、Critical Materials Institute<sup>18)</sup>でも、粉砕・選別技術の開発は盛んではない。</li> <li>● 日本の一般廃棄物にあたるMSW (Municipal Solid Waste) においてプラスチックの材料リサイクル率は8.8%に留まる<sup>32)</sup>ものの、プラスチックリサイクルに関する基礎研究は1980年代後半から行われており、研究の蓄積がある。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 大規模集約的な中間処理が主体であり、水準技術によって「量のリサイクル」を実施している。新規技術開発は必ずしも盛んではないが、光学選別に高い技術力を有する装置メーカーが少数存在する<sup>33)</sup>。今後、リサイクル関連装置の市場が拡大すると台頭する可能性がある。</li> <li>● 廃プラを原料とした油化 (PTF : plastics-to-fuel) 施設の導入が進んでいる。現段階ではその成果は不明だが、2015 - 2016年にかけても複数の施設の建設計画がある<sup>34)</sup>。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 世界トップの鉱山向け粉砕・選別技術を有し、国としてのポテンシャルは極めて高い。また、ドイツ、スウェーデン等を中心に、野心的な研究開発も進められている。中性子線<sup>35)</sup>やテラヘルツ波<sup>36)</sup>を利用した選別技術の研究は他の追随を許さない。レアメタルリサイクルでは、日本が優位にあるが、都市鉱山向け粉砕・選別の研究レベルは世界トップクラス。</li> <li>● 一方、埋立処理政策に対する国のスタンスによりリサイクルの現状に大きな差異が存在する<sup>37)</sup>。プラスチックリサイクルに関してはドイツ、英国、イタリア、スペインにおいて基礎研究が盛んに行われ、特にドイツ、イタリアでは2010年以降研究文献数の増加傾向が顕著にみられる。</li> <li>● 都市ごみ焼却残渣の無害・安定化方法として、最低3か月間のエージング処理を施すなど、焼却残渣の有効利用に伴う環境影響および環境負荷低減のための基礎的な研究がなされている。また、金属、貴金属、非鉄金属を高純度で回収するための破砕、分級、選別、回収の各技術の基礎的研究が活発である。</li> </ul>

	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 大規模集約的な中間処理が主体である。現状、「量のリサイクル」に視点があるが「質のリサイクル」へ移行可能な技術ポテンシャルを有している。特に個別選別技術（ソーティング技術）の開発は盛んであり世界トップの水準にある。最新の機械学習を用いた選別技術の研究開発も進められている<sup>38)39)</sup>。集合選別技術は他国と大差ないが、これらをシステム化するプラントエンジニアリングに優れており、選別システム単位での販売が盛んである。</li> <li>● リサイクルメジャーの進出や買収により企業の集約化が進む。高度で大規模な選別技術により高い品質の材料リサイクルが実現している<sup>40)</sup>。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 現状の技術水準は決して高くないが、集約的な研究開発が進められており、諸外国の技術の分析・導入が進められている。</li> <li>● 2000年代後半からプラスチックリサイクルに関する基礎研究が増えてきており、2008年頃から研究文献数が急増している。近年 WEEE や自動車リサイクルに関連したプラスチックリサイクルに関する基礎研究も見られる。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 手作業による人海戦術的手法が主体であったが、近年、機械化が進められている。多くは先進国製の模倣品であることが多いが、ここ数年、関連特許の出願数が急増している。</li> <li>● 「循環経済政策」に伴い産業区などで大規模なリサイクルインフラ整備が行われている一方で、国内からの循環資源としての廃プラ確保が課題である<sup>41)</sup>。また現状としては選別効率も低く再生資源の品質も高くない<sup>42)</sup>。</li> <li>● 焼却残渣は、道路路盤材、セメント原料、コンクリート二次製品への利用が活発である。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 現状の技術水準は決して高くないが、日本との交流も深く、国立機関による集約的研究体制の整備は日本よりも進んでいる。</li> <li>● プラスチックリサイクルに関する基礎研究は低調である。</li> <li>● 焼却残渣の有効利用動向は、法律上、リサイクルが制限されていることからリサイクル施設も少なく、あまり有効利用されていない。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 諸外国の技術導入により、先進国と同水準の中間処理を実施。また、ここ数年、関連特許の出願数が急増している。</li> <li>● 自動車リサイクルでバンパーリサイクル技術成果が見られるが、その他特筆すべき事項が見当たらない。</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

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 参考文献（●は全体的に参考とした文献）

- 環境省：平成 28 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書第 3 章循環型社会の形成、  
[http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h28/pdf/2\\_3.pdf](http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h28/pdf/2_3.pdf)
- 環境省：平成 26 年度版 日本の廃棄物処理、  
[http://www.env.go.jp/recycle/waste\\_tech/ippan/h26/data/disposal.pdf](http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/h26/data/disposal.pdf)
- 環境省：産業廃棄物の排出及び処理状況等（平成 25 年度実績）について、  
<http://www.env.go.jp/press/101858.html>
- セメント協会：生産高、[http://www.jcassoc.or.jp/cement/3pdf/jh2\\_0900.pdf](http://www.jcassoc.or.jp/cement/3pdf/jh2_0900.pdf)
- 野村幸治、石田泰之：最終処分場の延命化に貢献するセメント産業、都市清掃、Vol.69、No.333、

pp.48~54、2016

- 日本環境衛生施設工業会: 欧州における都市ごみ焼却残さの土木資材化による有効利用の現地調査業務報告書、2015
- 1) Plastics Europe “Plastics – the Facts 2014/2015 An analysis of European plastics production, demand and waste data”
- 2) U.S. Environmental Protection Agency(1974) “Resource and Environmental Profile Analysis of Nine Beverage Container Alternatives”
- 3) 吉岡敏明・熊谷将吾 (2014) 「プラスチックの化学原燃料化に関する研究動向」化学経済,61(8) ,pp.51-61
- 4) Okuwaki,A;Yoshioka,T;Asai,M;Tachibana,H;Wakai,K;Tada,K.(2006)“The Liquefaction of Plastic Containers and Packaging in Japan”,Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics,pp.665-708
- 5) 古屋伸茂樹・小林賢一郎・大木達也、アリーナ (ARENNA) ソータによる廃携帯電話製品の選別 <https://staff.aist.go.jp/s-koyanaka/ARENNA.pdf>
- 6) ZenRobotics <http://zenrobotics.com/ja/>
- 7) SELFRAG <http://selectivefragmentation.com/index.php>
- 8) 東北大学 希少元素高効率抽出技術領域 平成 24 年度の成果 <http://tohoku-timt.net/rare-elements/achievements.html>
- 9) 産業技術総合研究所、廃プリント基板からタンタルコンデンサーなどの電子素子を種類別に回収ー都市鉱山からのレアメタルリサイクルを実現する高精度選別機一、2012/05/17 [http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2012/pr20120517/pr20120517.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20120517/pr20120517.html)
- 10) Shogo Kumagai,Jon Alvarez,Paula H. Blanco,Chunfei Wu,Toshiaki Yoshioka,Martin Olazar,Paul T.Williams(2015)“Novel Ni-Mg-Al-Ca catalyst for enhanced hydrogen production for the pyrolysis-gasification of a biomass/plastic mixture”Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,113,pp.15-21
- 11) Shogo Kumagai,Guido Grause,Tomohito Kameda,Toshiaki Yoshioka(2015)“Simultaneous Recovery of Benzene-Rich Oil and Metals by Steam Pyrolysis of Metal-Poly(ethylene terephthalate)Composite Waste”Environmental Science & Technology,Vol.48,No.6,pp.3430-3437
- 12) 上道芳夫 (2014) 「プラスチックリサイクル触媒の開発と新しいケミカルリサイクルシステムの構築」PETROTECH,37(9),pp.683-686
- 13) 山口晃司 (2013) 「炭素繊維ならびに CFRP について - 炭素繊維の構造や CFRP の力学特性と用途」プラスチックリサイクル化学研究会講演会資料『CFRP のリサイクル技術の最前線』,pp.119-138
- 14) 柴田勝司 (2013) 「常圧溶解法による CFRP リサイクル技術」プラスチックリサイクル
- 15) 岡島いづみ (2013) 「超臨界・亜臨界流体を用いる CFRP のリサイクル」プラスチックリサイクル化学研究会講演会資料『CFRP のリサイクル技術の最前線』,pp.79-102
- 16) A.Herrmann,T.Witte(2015)8th International Symposium on Feedstock Recycling of Polymeric Materials Book of Abstracts,p.16
- 17) 井関康人 (2015) 「家電破砕混合プラスチック選別技術と自己循環リサイクルの進展」成形加工

- 27 (12) pp.503-506
- 18) The Ames Laboratory for USDOE, The Critical Materials Institute  
<https://cmi.ameslab.gov/>
  - 19) USDOE , REMADE  
<https://www.manufacturing.gov/doe-foa-clean-energy-manufacturing-innovation-institute-for-reducing-embodied-energy-and-decreasing-emissions-remade-in-materials-manufacturing/>
  - 20) Horizon2020, Climate Action, Environment, Resource Efficiency and Raw Materials  
<https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/climate-action-environment-resource-efficiency-and-raw-materials>
  - 21) ProSUM project <http://www.prosumproject.eu/>
  - 22) 東北発素材技術先導プロジェクト 希少元素高効率抽出技術領域  
<http://tohoku-timt.net/rare-elements/>
  - 23) NEDO 平成27年度エネルギー・環境新技術先導プログラム 第2回公募採択テーマ一覧  
<http://www.nedo.go.jp/content/100769336.pdf>
  - 24) 産業技術総合研究所 SURE コンソーシアム  
<https://unit.aist.go.jp/emri/sure/cons.html>
  - 25) 産業技術総合研究所 戦略的都市鉱山研究拠点 (SURE)  
<https://unit.aist.go.jp/emri/sure/project.html>
  - 26) NEDO「アジア省エネルギー型資源循環制度導入実証事業」に係る公募について、平成28年3月31日 [http://www.nedo.go.jp/koubo/EV2\\_100125.html](http://www.nedo.go.jp/koubo/EV2_100125.html)
  - 27) 植田知美・中瀬道行 (2013) 「サステナブルな社会の実現とプラスチックの役割 - プラスチックが演出するグリーンイノベーション -」プラスチックエージ 2013.10,
  - 28) 一般社団法人プラスチック循環利用協会 (2015) p.9
  - 29) 社団法人プラスチック処理促進協会 (1995) 「廃プラスチック類の熱分解油化の事例 (技術及びその経済性の調査)」
  - 30) 福島正明他 (2011) 「外熱式ロータリーキルンを使用した容器包装廃プラスチックの熱分解技術の開発」廃棄物資源循環学会論文誌,Vol.22,No.2,p.114
  - 31) 林孝昌 (2015) 「日本のリサイクルビジネスの将来展望」廃棄物資源循環学会誌,Vol.26,No.6,pp.440-448
  - 32) EPA(2014)“Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States Tables and Figures for 2012”
  - 33) <http://www.magsep.com/>
  - 34) The American Chemistry Council(2015)“2015 Plastics-to-Fuel Project Developer’s Guide”
  - 35) M. Hirsch, et al., Online Prompt Gamma Neutron Activation Analysis for the Characterization of Raw Materials, Proceedings of 7th Sensor-Based Sorting & Control 2016, Aachen, 2016
  - 36) C. Brand., et al., Sorting of brack plastics using statistical pattern recognition on terahertz frequency domain data, Proceedings of 7th Sensor-Based Sorting & Control 2016, Aachen, 2016
  - 37) Plastics Europe“Plastics-the Facts 2015 An analysis of European plastics produc-

- tion,demand and waste data”
- 38) T. J. Lukka, et al.,Zenrobotics Recycler–Robitic Sorting unsig Machine Laering, Proceedings of Sensor-Based Sorting 2014, Aahen, 2014
  - 39) H. E. Melin, Data Driven Recycling of End-of-Life Electronics, Proceedings of Going Green – Care Innovation 2014, Vienna, 2014
  - 40) 浅川薫 (2015) 「欧州、ドイツと日本におけるプラスチック製容器包装のリサイクル」廃棄物資源循環学会誌,Vol.26,No.4,pp.275-282
  - 41) (株)NTT データ経営研究所「中国天津市における廃プラスチックのマテリアルリサイクル事業報告書」平成 25 年 3 月
  - 42) Chen Qinghua(2015)“China Recycle Plastics Industry High Value Utilization Technology Trend and Innovation Development Mode Research”2015 The 3rd Global Meeting of World Plastics Council & the 11th China International Forum on Development of Plastics Industry

### 3.4.4 資源・生産・消費管理

#### （1）研究開発領域の簡潔な説明

製品やサービスの全ライフサイクルについて、環境負荷や影響を把握・低減するための評価・管理技術に関する研究開発領域である。データベースの構築およびライフサイクルアセスメント（LCA: Life Cycle Assessment）、物質フロー分析（MFA: Material Flow Analysis）、物質ストック・フロー分析（MSFA: Material Stock / Flow Analysis）などが該当する。

#### （2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

##### [意義]

資源には枯渇性資源（化石資源や鉱物資源など）と再生可能資源（自然資源など）があるが、多種の資源を複雑に利活用することで製品の製造や消費、サービス、日常の社会活動を行っている。複雑かつ拡大化するサプライチェーンにおいて、適切に資源・生産・消費を管理するためには、俯瞰的な視野における全体の可視化と、科学的な分析手法によるフローやストックの定量化が必須である。手法としては、上記の LCA、MFA、MSFA などがある。これらは、資源・生産・消費のそれぞれのフェーズを含み対象地域における物質の流れを表すものであるが、なかでも LCA やその基礎的な考え方であるライフサイクル思考は、製品のライフサイクル全体を対象とした環境負荷や社会的影響、コストの定量的分析を行う手法として開発され、国内外で利用されている。また、MFA は、国や地域のすべての物質（もしくは特定物質）の流れに着目して、投入・生産・消費・蓄積・排出・リサイクル・廃棄といった流れ分析するものであり、自然資源の利用と人間活動との関わりを客観的かつ経年的に表すこと、社会経済指標と比較することで社会の状況を様々な視点から分析・評価することが可能である。このような分析と可視化、共有、判断により資源や環境負荷の持続性を高め、生産や消費を管理することができるようになるため、これらの方法論やデータベースの開発と構築など、当該領域における研究開発の必要性はさらに高まっている。

##### [動向（歴史）]

ライフサイクル視点で資源消費・環境負荷排出を考えるようになった研究は、1969年にコカ・コーラ社が米国のミッドウエスト研究所に委託して実施した飲料用容器の比較とされている。その後、1980年代には「エコバランス」の名称が用いられ同様に製品・社会システムの要求する資源の流れ、環境負荷排出を測る研究が進められてきた。同時期に、英国の Bousted らが中心となって LCA 評価のための原単位データベースが開発されはじめた。オランダのライデン大学環境科学センター（CML: Centre of Environmental Science, Leiden University）は、1992年にライフサイクルインパクト（影響）評価でその後広く利用される特性化係数について示した“Life Cycle Assessment of Products”という報告書を発表し、現在の影響評価の枠組みの基礎となっている。スウェーデン環境研究所は EPS（Environmental Priority Strategies for Product Design）と呼ばれる環境影響評価システムを開発し、広く利用された。スイスでは、スイス連邦内務省環境局（BUWAL: Bundesamt für Umwelt）が容器包装に使われる素材についてエネルギー消費量や環境負荷についてまとめている。1991

年には環境毒物化学会 (SETAC : Society of Environmental Toxicology and Chemistry) が LCA の方法論を発表し、世界的な LCA ソフトウェア SimaPro が発売されている。その後、欧州では Eco-Indicator95 が発表され、環境影響の統合化手法が公開され、LCA を実行するための手法群が開発された。1998 年には日本において LCA 国家プロジェクトが開始され、国産のデータベースの開発が進められるようになった。

国連では、UNEP-IRP (国際資源パネル) を中心にデカップリング<sup>2)</sup>や資源効率性<sup>3)</sup>の議論・研究が進んでおり、日本の研究者も中心的役割を果たしている。2011 年には、社会における資源消費量を推計し経済活動と資源消費量・環境負荷排出量の正の関連があった流れを「デカップリング」する必要性が指摘された<sup>4)</sup>。経済成長と資源消費との乖離状況 (デカップリング度) を計測するためには、物質フローの定量化および分析・評価が不可欠となっている。一方、物質ストックにも着目した定量化や評価手法の議論も増えている。

なお、物質フロー分析は、低炭素社会、循環型社会、自然共生型社会に対し、横串の役割を果たせる可能性がある。投入資源を確保するために利用した自然環境の量も「隠れたフロー (HMF : Hidden Material Flow)」として表すことが出来る。鉱物資源に関する HMF は、物質・材料研究機構、国立環境研究所、東北大学を中心とするグループにより詳細なデータベースが構築されている。

2016 年現在においては、各国で LCA データベースや影響評価手法の開発がなされ、利用可能な状態となっている。日本国内においては日本 LCA 学会が 2005 年に設立され、日本 LCA 学会誌や年に 1 回の研究発表会で研究発信を行っている。産業技術総合研究所においては、被害算定型環境影響評価手法 (LIME : Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling) の開発も進められている。SETAC は現在も SETAC Europe、North America、Latin America、Africa、Asia/Pacific といった地域ごとに研究会を開催し、学側・産側からの環境影響評価に関する報告や方法論の開発、議論が続けられている。

### (3) 注目動向

#### [新たな技術動向]

近年、LCA に関しては、基礎的な方法論の深化とともに、応用研究・開発の推進が積極的に進められている。LCA の適用先としては大きく、(A) 製品レベル LCA、(B) 組織の LCA、(C) 消費者/ライフスタイルの LCA、(D) 国の LCA、をあげることができる<sup>5)</sup>。いずれの適用先においても、LCA の基本的なステップである、目的および調査範囲の設定、ライフサイクルインベントリ分析 (LCI)、ライフサイクル影響評価 (LCIA)、その統合化、およびライフサイクル解釈における方法論の深化が不可欠である。例えば、目的および調査範囲の設定においては、高機能化する ICT 技術の評価などにおいて、機能単位の設定方法が複雑になりつつある。インベントリ分析においては、食料+バイオマスや木材+バイオマス・エネルギーなど、植物資源由来の製品製造プロセスなどで、複数製品を生産する工場における環境負荷の配分問題がさらに複雑化している。こうした中、環境情報を開示するための規格の整備も進んでいる。ISO14072<sup>6)</sup>では組織の LCA に関する方法論がまとめられており、GHG の見える化<sup>7)</sup>における各 Scope に合わせた定量化のガイドラインとして参考とすることができるようになった。定量化した情報の開示方法の 1 つとして、フットプリントがあるが、これ

についても、ISO14067においてカーボンフットプリント (CFP)<sup>8)</sup>、ISO14046においてウォーターフットプリント (WFP)<sup>9)</sup>などが規格化されている。これらの規格により、情報の開示における要件が定義され、フットプリントの算定を行い開示した際に算定方法による不公平が発生しにくくなったといえる。

このような規格化の流れは、基礎的な LCA に関する研究が基になり手順が策定されているといえるが、前述の ISO14067、ISO14046 に加えて ISO14040 シリーズにより規格化が行われたことにより、今度は規格に則った定量化と実態の乖離や、理想的な評価と意思決定の関係に関する研究開発が世界的に進められていくことが想像できる。例えば、フットプリントに関しては、すでにカーボンや水以外のフットプリントについても提案や算定の取組が進められている。欧州委員会は温室効果ガス以外の指標も考慮した「製品の環境フットプリント (PEF)」と「組織の環境フットプリント (OEF)」に関する方法論の開発に着手し、2013年4月にその最終版を発行している<sup>10)</sup>。Global Footprint Network は、各国の Ecological Wealth の一側面として Ecological Footprint を算定し、Web 上にて公開・更新している<sup>11)</sup>。その他、様々な国においてコンソーシアムや算定のためのガイドラインが策定されてきている<sup>12)</sup>。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

これまでマテリアルフロー・ストック分析について Yale U. の Prof. Graedel らのグループが多くの研究出力を生み出してきた。日本においては、国立環境研究所、東北大学、東京大学をはじめとして、ベースメタル (鉄、アルミ、銅)<sup>13)-17)</sup>、稀少金属・戦略物質のマテリアルフロー・ストック分析が行われてきた<sup>18)-21)</sup>。また建築・土木構造物に着目をしたストック分析は名古屋大学、立命館大学の研究グループが多くの研究出力を生んでいる<sup>22)-24)</sup>。近年、LCA 研究をベースとした資源消費に関わるフットプリント研究が盛んであり、水<sup>25)-27)</sup>、炭素<sup>28)</sup>の他に、窒素<sup>29)</sup>等に踏み込んだ研究もなされている。

また環境産業連関分析 (EIOA : Environmental Input-Output Analysis または EEIO : Environmentally Extended Input-Output) による解析も活発に行われている。特に多地域産業連関分析モデルの手法を世界大に適用して、ある国の産業活動が引き起こす貿易を介した他国における環境負荷排出量の推計や、土地改変や水消費等の環境影響についての解析結果が多数報告されてきている。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・産業連関モデル、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<sup>30)-34)</sup>。日本においては国立環境研究所を中心とした研究グループによる GLIO モデルによる解析が行われている<sup>35)-37)</sup>。特に、豪州グループは初めて大規模な産業連関データを用いて、サプライチェーンを通じた資源利用と生物多様性への影響の解析を行った<sup>38)</sup>。

また資源供給側の Criticality に関わる研究が着目されており、Yale U. のグループによる積極的な研究報告が行われており<sup>39)-43)</sup>、国内では産業総合研究所 畑山らによる研究報告がなされている<sup>44)</sup>。

また、2015年9月25日の「持続可能な開発サミット」で採択された「持続可能な開発のための2030アジェンダ」の中には、17個の持続可能な開発目標 (SDGs) が含まれている<sup>45)46)</sup>。

今後、持続可能性に関わる国際的なプロジェクトやSDGsに関する定量化手法、ケーススタディなどといった研究が行われていくことが予想され、注目すべきといえる。

#### （４）科学技術的課題

##### [課題（ボトルネック）]

複雑かつ多様化する資源、生産、消費の形態に対して、定量的な分析を行っていくためには、複雑なシステムを簡易に扱える方法と、多面的な分析を解釈可能な形に変換する方法が必要になる。複雑なシステムを、科学的正確性を失わないように、簡易に扱うためには、方法論の考案だけでなく、多種多様なケーススタディを実施し、その結果を共有していくことが必要となる。しかし、サプライチェーンや製品製造プロセスシステムの技術情報を共有することは必ずしも容易ではなく、常にデータの守秘性と秘匿化を考慮しなければならない。他方、GDPとエネルギー消費がデカップリングしていることが明らかになっているように、必ずしも、サプライチェーンで消費するエネルギーや排出する環境負荷がコストに結び付いているとは限らないことは明らかである。ライフサイクル情報の公開と技術の優位性との関係を明らかにしていくことが、今後のさらなる研究開発には必要と考えられる。その上で、複雑なシステムを簡易に扱える方法の開発が必要といえる。任意の製品、技術、プロセスシステムに対し、複数のデータ、複数の手法による解析を行うケーススタディを行い、方法論を構築していくことが望まれる。

多面的な分析を解釈可能な形に変換する方法については、上述のSDGsをはじめとする、国際的な動きに留意しながら進めることが必要といえる。環境影響の定量化方法には様々なものが存在するが、近年、コンセンサスマodelの策定に関する研究が始まっている。日本からも研究者が参加しているが、こうした国際的な影響評価手法の開発と規格化における日本の貢献が、今後の方法論開発においては必要なネットワークといえる。

ただ、積み上げ型のマテリアルフロー・ストック研究には技術的にはある程度確立しており、近年は、サプライチェーンを通じた資源利用とそれによって引き起こされる環境・社会影響についての解析に関する社会的要請が強まってきている。環境負荷発生や資源フローに関する情報は多くの場合、国レベルの解像度で整備されている。しかしながら一方で、環境・社会影響や、資源調達に関わる安定性（Criticality）に言及しようとする、国レベルよりも詳細な解像度が求められる。これらの解像度の違いを埋めるステップは困難な課題となっている。

サプライチェーンを通じた資源の流れを解析する手法の一つとしてEIOAによる輸出入を考慮した環境負荷原単位の算定、地球規模での地域的な影響評価への展開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。

##### [今後取り組むべき研究テーマ]

上述のインベントリ分析手法や影響評価手法のように、LCAにおける定量化手法の開発に加えて、LCA結果を使う方法についても開発が必要といえる。一方、実際の意思決定においてLCAの結果だけが最終結果を左右することは珍しい。実際には経済性評価や社会性評価、

安全評価など、資源、生産、消費における意思決定には様々な観点が考慮される。この中で適切に環境情報が解釈されていくためには、実際の意思決定における環境情報の提示とその結果のトレースが必要である。上述のインベントリ分析や影響評価と合わせて、ケーススタディの実施と結果の詳細な共有を行う研究活動が必要といえる。

また、GHG プロトコルの「スコープ 3 算定報告基準」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」など、組織に対して、直接的な環境負荷排出や間接的なエネルギー起源の環境負荷排出だけでなく、原料・資源調達などサプライチェーンに起因する環境負荷の算定および報告を求める動きが活発になってきている。国内経済の事業継続・環境保全を目的とした地域規模、ならびに地球大の環境保全、資源調達の安定性、資源安全保障の向上を目的とした地球規模、双方のレベルのサプライチェーンホットスポットを特定する研究の発展が今後期待される。また、ライフサイクルを通じた環境影響を見る環境 LCA（ELCA：Environmental LCA）の発展の一方で、人権、紛争、文化遺産なども含め、多様な利害関係者に結びつく社会影響を見る社会 LCA（SLCA：Social LCA）についてはデータベースの構築、分析手法の確立とともに更なる拡張が期待される。

加えて、物質ストックとも対象領域が広く、日本において統計データが充実しているとはいえ、直接物質フローを計測してはいないため様々な推計手法を用いているのが現状である。また、地域別（都道府県や都市レベル）の物質フローは、その重要性が認められつつも、統計データ不足や推計の難しさ等からなかなか普及していない。国の環境政策の実現に向けて、地域間で比較できる物質フローデータの整備が必要である。

物質ストックについては、定量化に向けた研究が進行している段階であるが、物質フロー同様にデータ不足を補う推計手法の確立が求められる。また、物質ストックの評価は、ストックによるサービスを利用している主体が多いため、非常に難しく、今後の研究の進展が望まれる。

## （5）政策的課題

稀少資源の消費増大に伴う環境・社会（水・土地改変・生物多様性損失、人権・文化遺産・雇用）への影響は今後、革新技術の開発普及において注視しなければならない。しかしながら稀少資源の社会全体での流通把握が十分になされておらず、サプライチェーンを通じてどのステークホルダーにどの程度の責任配分を行うべきかが見えにくい。稀少資源の調達に関わる生物多様性への影響や、水資源の利用等のインパクト分析は地理情報との接続が求められる。特に稀少資源利用に関わるインベントリデータベースの充実と、その調達先の地理情報の充実において大きな課題がある。現在、分析を行うために十分な情報蓄積が行われておらず、拡散している専門家知識を集約・共有するためのプラットフォームが無いことは学術的課題というより政策的課題といえる。

また、物質フロー分析においては、物質フロー指標は環境政策に関連する指標として使われてきたが、環境政策に留まらず社会、経済、産業、エネルギー等々を含む総合政策として利用すべきである。そのためには、さらなる多分野融合型の研究プロジェクトが望まれる。欧州では早い段階から社会科学分野の研究者が物質フロー分析を行い、EU や UN の資源戦略にも貢献してきた。日本においても多くの学術分野で Interdisciplinary（学際的）な研究が望まれて久しいが、本分野でもさらなる多分野融合型研究が必要である。また、物質スト

ックに関する政策 (特に建築・土木) は、国土交通省にでも「ストック型社会」「コンパクトシティ」をはじめ多くの議論がなされてきたため、国土交通省・経済産業省・環境省が一体となり総合政策として検討することが望まれる。

さらに、産学が連携して取り組む環境影響評価・公開に関する研究プロジェクトを進めていくことが必要である。環境影響評価においては秘匿データの範囲に関する第三者からの判断など、これまでにない枠組みでの実施を許容する、もしくは推奨する仕組みが必要である。また、得られた結果をデータベース化し、共有していくためには、データベースの維持・管理に関する動機付けが必要であり、何らかの補助が必要といえる。こうした資金的な補助により、当該分野の研究者や従事者を増やすことができるようになり、安定した基盤となりうる。

(6) キーワード

ライフサイクルアセスメント (LCA : Life Cycle Assessment)、物質フロー分析 (MFA : Material Flow Analysis)、物質ストック・フロー分析 (MSFA : Material Stock / Flow Analysis)、環境ラベル、フットプリント (FP)、持続可能な開発目標、デカップリング、資源効率、ストック型社会、サプライチェーン、稀少資源、地理情報

(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>● MFA, MSFA とも基礎研究は進んでいる。</li> <li>● マテリアルフロー研究・LCA 視点に基づく資源の消費・廃棄に関わる研究が複数の企業、研究機関などで継続的に行われている。</li> <li>● JOGMECによる鉱物資源マテリアルフロー情報が継続的に整備されている。</li> <li>● 日本 LCA 学会、資源エネルギー学会、廃棄物資源学会、土木学会環境システム委員会等を中心に学術的議論が進んでいる。</li> <li>● Web of Science では、456 件の文献が抽出され、115 国・地域のうち 14 位であった。2010 年頃までは第 3 位につける文献数であったが、この数年順位は落としている。近年も文献数は伸びており、成果を着実にあげている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 豊富な統計情報とともに、MFA では政策実装まで進み、循環型社会形成推進基本計画による指標導入・数値目標設定が進んでいる。</li> <li>● AIST/IDEA や JLCA-LCA など、LCA データベースが公開され、MiLCA をはじめとするソフトウェアも開発されてきており、さらに、エコリーフや CFP プログラムにより、環境情報の開示についても推進され、応用研究・開発の基盤が強化されてきている。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Yale U.をはじめ、多くの研究出力がなされている。国際会議 International Society for Industrial Ecology (ISIE)<sup>47)</sup> やジャーナル Journal of Industrial Ecology (JIE)<sup>48)</sup> を中心に国際的議論の中心となっている。</li> <li>● Web of Science では、2,496 件の文献が抽出され、1992 年以降、1 位を維持している。近年も文献数は伸びており、着実に研究成果をあげているが、増加率は落ち続けている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ISIE の北米会議等を通じて研究者同士の交流も盛んである。</li> <li>● 都市レベルの分析として、世界の主要都市のメタボリズムを計測する研究グループが基礎的なデータベースを構築<sup>49)</sup>している。</li> <li>● Criticality matrix により Criticality 評価の視覚的提示を行うなど、戦略物質の管理に関わる優先順位を供給リスクと重要性に応じて評価しており、政策・意思決定プロセスへの積極的な活用がなされている。</li> <li>● ウォルマートによる Hotspot 分析や、再生可能エネルギー研究所 (NREL) による LCA データベースの公開なども進んでおり、環境情報の開示に関する応用研究・開発は大きく進展しつつある。</li> </ul>

欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 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。MFA 関連の研究では、フッパタール研究所（ドイツ）、IFF（オーストリア）、ライデン大学（オランダ）、ポツダム影響気候研究所 PIK（ドイツ）、NTNU（ノルウェー）を中心に盛んである。</li> <li>● Web of Science では、欧州全体で 8,596 件の文献がある。OECD 加盟国では、イタリア（2 位）やドイツ（4 位）、スペイン（5 位）など、文献数で上位に入っている。欧州全体の文献増加率も高いが、特に OECD 非加盟国における文献の増加率が著しく伸びている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 上場企業の気候変動リスクに関する情報開示の義務化や各種環境ラベルに関する欧州委員会の事業展開などにより、強く環境性能の可視化が推進されている。世界最大の LCA データベースの 1 つである ecoinvent やソフトウェア SimaPro などにより、LCA の応用研究は大きく広がりを見せている。特に環境フットプリントについては欧州の B to C 市場において、政府だけでなく、生産者や流通・小売などの業種から多くの産業も協力するなど、ライフサイクル思考に基づく情報の開示が進められている。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ISIE の学術誌 JIE の中国語版を発行しており、産業共生分野を中心に急速に論文数を伸ばしている。</li> <li>● 都市の MFA についても研究事例<sup>50</sup>が見られ基礎研究が進んでいる。</li> <li>● 清華大学、東北大学、中国科学院が積極的に取り組んでいる。欧州、米国、日本で MFA や産業共生・連携などを学んで帰国した研究者が活躍している。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 中央政府が関心をもつ希少資源の管理・保全については、マテリアルフロー研究が活発化してきている。</li> <li>● 産業共生・連携分野を中心に研究が進んでいる。</li> </ul>
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 韓国環境産業技術院（KEITI）を中心に、LCA 研究が継続的に行われている。</li> <li>● 産業共生・連携などの分野では、ウルサン大学の研究者を中心に進められているものの、MFA、MSFA 関連の研究は少ない。</li> <li>● Web of Science では、168 件の文献が抽出され、115 国・地域のうち 20 位であった。研究の開始は日本よりも遅いが、文献の増加率において 2005 年以降は日本を大きく上まっている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 韓国環境産業技術院による製品由来の GHG 排出量算定に関する取り組みなどが展開されている。</li> <li>● マテリアルフロー研究の出力数は多くないが、今後、発展する可能性はある。</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

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 参考文献

- 1) 産業環境管理協会、環境経営実務コース：環境適合製品・サービス支援手法コース「ライフサイクルアセスメント」、(2004)  
[http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/3r\\_policy/policy/pdf/text\\_2\\_3\\_a.pdf](http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/3r_policy/policy/pdf/text_2_3_a.pdf)
- 2) UNEP・International Resource Panel, Decoupling, 2011
- 3) UNEP・International Resource Panel, Resource Efficiency Potential and Economic Implications, 2016
- 4) UNEP, Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth.

- A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel, 2011.
- 5) Hellweg, S. and Canals, L.M. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment, *Science*, 344: 1109-1113 (2014)
  - 6) ISO/TS 14072:2014, Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines for organizational life cycle assessment, (2014)
  - 7) 環境省、温室効果ガス「見える化」の役割について、  
<[https://www.env.go.jp/council/37ghg-mieruka/y370-05/mat03\\_1.pdf](https://www.env.go.jp/council/37ghg-mieruka/y370-05/mat03_1.pdf)> (Accessed in 2016-Aug)
  - 8) ISO/TS 14067:2013, Greenhouse gases -- Carbon footprint of products -- Requirements and guidelines for quantification and communication,(2013)
  - 9) ISO 14046:2014, Environmental management -- Water footprint -- Principles, requirements and guidelines, (2014)
  - 10) European Committee, 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, (2013)
  - 11) Global Footprint Network, Ecological Wealth of Nations,  
< [http://www.footprintnetwork.org/ecological\\_footprint\\_nations/index.html](http://www.footprintnetwork.org/ecological_footprint_nations/index.html) > (Accessed in 2016-Aug)
  - 12) 環境省、グリーン・バリューチェーンプラットフォーム：国際動向、  
< [http://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply\\_chain/gvc/intr\\_trends.html](http://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/intr_trends.html) > (Accessed in 2016-Aug)
  - 13) Daigo, I., et al., Accounting for steel stock in Japan. *Isij International*, 2007. 47(7): p. 1065-1069.
  - 14) Daigo, I., et al., Material stocks and flows accounting for copper and copper-based alloys in Japan. *Resources Conservation and Recycling*, 2009. 53(4): p. 208-217.
  - 15) Hatayama, H., et al., Assessment of the Recycling Potential of Aluminum in Japan, the United States, Europe and China. *Materials Transactions*, 2009. 50(3): p. 650-656.
  - 16) Nakajima, K., et al., Material Flow of Iron in Global Supply Chain. *Isij International*, 2014. 54(11): p. 2657-2662.
  - 17) Hashimoto, S., et al., Measuring the status of stainless steel use in the Japanese socio-economic system. *Resources Conservation and Recycling*, 2010. 54(10): p. 737-743.
  - 18) Matsubae-Yokoyama, K., et al., A material flow analysis of phosphorus in Japan: The iron and steel industry as a major phosphorus source. *Journal of Industrial Ecology*, 2009. 13(5): p. 687-705.
  - 19) Daigo, I., Y. Matsuno, and Y. Adachi, Substance flow analysis of chromium and nickel in the material flow of stainless steel in Japan. *Resources Conservation and Recycling*, 2010. 54(11): p. 851-863.
  - 20) Nakajima, K., et al., Global supply chain analysis of nickel: importance and possibility of controlling the resource logistics. *Metallurgical Research & Technology*, 2014. 111(6): p. 339-346.

- 21) Ohno, H., et al., Unintentional Flow of Alloying Elements in Steel during Recycling of End-of-Life Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 2014. 18(2): p. 242-253.
- 22) Huang, T., et al., Materials demand and environmental impact of buildings construction and demolition in China based on dynamic material flow analysis. *Resources Conservation and Recycling*, 2013. 72: p. 91-101.
- 23) Shi, F., et al., Toward a Low Carbon-Dematerialization Society Measuring the Materials Demand and CO<sub>2</sub> Emissions of Building and Transport Infrastructure Construction in China. *Journal of Industrial Ecology*, 2012. 16(4): p. 493-505.
- 24) Wang, T., et al., Concrete transformation of buildings in China and implications for the steel cycle. *Resources Conservation and Recycling*, 2015. 103: p. 205-215.
- 25) Berger, M., et al., Water Footprint of European Cars: Potential Impacts of Water Consumption along Automobile Life Cycles. *Environmental Science & Technology*, 2012. 46(7): p. 4091-4099.
- 26) Ercin, A.E. and A.Y. Hoekstra, Water footprint scenarios for 2050: A global analysis. *Environment International*, 2014. 64: p. 71-82.
- 27) Hoekstra, A.Y. and M.M. Mekonnen, The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012. 109(9): p. 3232-3237.
- 28) Hertwich, E., G.P. Peters, Carbon footprint of nations: A global, trade-linked analysis. *Environmental science & technology*, 2009. 43(16): p. 6.
- 29) Allison M. Leach, J.N.G., Albert Bleeker, Jan Willem Erisman, Richard Kohn, Justin Kitzes, A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment. *Environmental Development*, 2012. 1: p. 22.
- 30) The Eora MRIO Database <http://worldmrio.com>
- 31) CREEA. <http://creea.eu/>
- 32) EXIOBASE. <http://www.exiobase.eu/>
- 33) World Input-Output Database. <http://www.wiod.org>
- 34) EXIOPOL. <http://www.feem-project.net/exiopool/>
- 35) Nansai, K., et al., Improving the Completeness of Product Carbon Footprints Using a Global Link Input-Output Model: The Case of Japan. *Economic Systems Research*, 2009. 21(3): p. 267-290.
- 36) Nansai, K., et al., 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*, 2012. 46(16): p. 9146-9154.
- 37) Shigetomi, Y., et al., Changes in the Carbon Footprint of Japanese Households in an Aging Society. *Environmental Science & Technology*, 2014. 48(11): p. 6069-6080.
- 38) Lenzen, M., et al., International trade drives biodiversity threats in developing nations. *Nature*, 2012. 486(7401): p. 109-112.
- 39) Graedel, T.E., et al., Criticality of metals and metalloids. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015. 112(14): p. 4257-4262.

- 40) Graedel, T.E. and N.T. Nassar, The criticality of metals: a perspective for geologists. *Ore Deposits in an Evolving Earth*, 2015. 393: p. 291-302.
- 41) Harper, E.M., et al., Criticality of the Geological Zinc, Tin, and Lead Family. *Journal of Industrial Ecology*, 2015. 19(4): p. 628-644.
- 42) Nassar, N.T., et al., Criticality of the Geological Copper Family. *Environmental Science & Technology*, 2012. 46(2): p. 1071-1078.
- 43) Nassar, N.T., X.Y. Du, and T.E. Graedel, Criticality of the Rare Earth Elements. *Journal of Industrial Ecology*, 2015. 19(6): p. 1044-1054.
- 44) Hatayama, H. and K. Tahara, Criticality Assessment of Metals for Japan's Resource Strategy. *Materials Transactions*, 2015. 56(2): p. 229-235.
- 45) Sustainable Development Knowledge Platform, Sustainable development goals, < <https://sustainabledevelopment.un.org/?menu=1300> > (Accessed in 2016-Aug)
- 46) 国連開発計画 (UNDP)、新たな持続可能な開発アジェンダ、< <http://www.jp.undp.org/content/tokyo/ja/home/sdg.html> > (Accessed in 2016-Aug)
- 47) International Society for Industrial Ecology, <http://www.is4ie.org>
- 48) *Journal of Industrial Ecology* ,  
[http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1111/\(ISSN\)1530-9290](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1111/(ISSN)1530-9290)
- 49) C.A.Kennedy et al, Energy and material flows of megacities, *PNAS*, 112(19), 5985–5990, doi: 10.1073/pnas.1504315112, 2015
- 50) Li, Ying; Beeton, R. J. S.; Halog, Anthony; et al., Evaluating urban sustainability potential based on material flow analysis of inputs and outputs: A case study in Jinchang City, China, *Resources, Conservation and Recycling*, 110, 87-98, 2016

### 3.4.5 環境都市

#### （1）研究開発領域の簡潔な説明

地球環境への負荷を削減しつつ、居住者の QOL（Quality Of Life）も高い、持続可能な都市・地域を実現するための戦略づくりを支援するための、科学的かつ実践的な方法論に関する研究開発領域である。

#### （2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

##### [意義]

21 世紀に入り、産業や暮らしの拠点であった都市は、人口減少や高齢化などこれまでに経験のない転換に直面している。近い将来、海外でも気候変動や資源枯渇などの影響が不可避であり、産業化と人口増加を支えてきた都市では、新たな規範の下での計画、評価、再構築が必要になっている。一方、変化への対応を社会全体で一律に達成するのではなく、環境都市やモデル地区など身近なスケールでの「社会転換（社会イノベーション）」として具体化し、それを「モデル（模範）」として国や世界に広げる試みも世界の各地で広がっている。21 世紀の都市は、これまで果たしてきた生産、暮らしの空間に加えて、地域と地球の環境保全への先導的な貢献を担うとともに、新しい革新（イノベーション）を生み出す場として捉えられ、理論的な目標設計とその実践をつなげる新しい社会科学・工学融合型の研究が広がっている。

##### [動向（歴史）]

従来の都市環境政策では、経済成長のもとで現状延長と発展を軸にして、関係主体の間で多数の合意を得ることができた。しかし、21 世紀は成長から緩やかな縮小まで、関係主体の目指す将来像が多様化していることが課題といえる。また、統計情報の整備とともに、衛星情報の高度化、さらに空間情報などの利用性の向上により、都市の評価を可能にする情報群が拡大しており、そこから得られる研究知見そのものが多様化するということもその背景にある。将来の方向性の多様化の中で極めて不効率な都市空間の制御が実現する可能性も存在しており、住民や企業を含む都市の関係主体に柔軟な選択肢を提供しつつ、都市の活力を短期的かつ中長期的に維持、確保できる方向性を提供するために、透明で合理的な科学的アプローチが求められている。

温暖化の防止と適応、資源循環、生態系保全などの影響発現は長期かつ広域にわたるため、現在の環境都市研究では、対策を講じてもその効果が見えにくい要素を評価に取り込むことが求められる。21 世紀の最重要課題である気候変動の影響を評価に内生化するには、快適性や利便性、経済活力に加え、長期的な産業活力や人口変動に伴う都市基盤の効率性を考慮するまちづくりを含めて議論をする必要がある。しかし、これらの短期的な都市像と長期的な都市像が必ずしも一致するとは限らない。都市の産業構造の転換や、都市インフラの整備更新という長期的目標を総論として賛成を得ることはできても、具体的な費用を含む短期的な各論については、短期的な効率を優先する立場と、中長期的なリスク回避を優先する立場で目指すべき方策が一致しないことがあり、こうした課題を解決する研究理論と方法論の開発

が期待される。

#### ■ 環境都市評価

国内の都市の環境評価は、公害の被害が深刻になった高度成長期に生活環境として守るべき環境基準を設定して、水質や大気の質を定点観測することから始まった。1980年代には多様な都市の快適性を求める住民と行政の要請にこたえて、快適環境指標が開発された。環境汚染や生活質の指標が住民の許容できる閾値（環境基準あるいはシビルミニマム）として利用されたことに対し、快適環境指標は住民の多様な環境満足度を定量化して複数の指標間を統合化した<sup>1)</sup>。住民意識調査と環境観測情報を組み合わせることと、実際の自治体で具体的に導入されたことに、この時期の環境評価論としての先駆性がある。地理情報システムなど都市情報の整備などが進む現在において、その有用性が再び高く評価されている。

ヨーロッパを中心に 1990 年代に地球環境問題の解決を含む社会の持続可能性への関心が高まるにつれ、国連持続可能な開発会議（UNCSD）が提案した持続可能性指標を都市のスケールで定量化する方法論が開発されてきた。持続可能性を P-S-R (Pressure-State-Response) あるいは D-P-S-I-R (Driver-Pressure-Impact-State-Response) で評価する指標体系の開発は、現在でも環境基本計画における評価の論理的フレームの議論でも活用されているが、個別の指標群を総合化して都市の持続可能性を定量化するための論理について検討が深まらないまま現在に至っている。持続可能性指標は、都市の経済、環境の状態をその原因と対策を含めて相対比較するうえで有用ではあった。しかし、多元的であることから都市政策の立案につなげることが困難であるなどの理由で、環境と共生する都市を政策のターゲットとする 21 世紀の環境都市の議論では、むしろ十分に統合化された形で指標を集約化することが重要になってきている<sup>2)</sup>。

さらに、21 世紀に入り住民の志向を定量化するステークホルダー会議を通じての指標の算定<sup>3)</sup>や、多元的な指標間での重要度の相対性を定量化する試み<sup>4)</sup>がアジアにも広がっている。

なお、世界銀行を中心とするグループは、都市が自らのパフォーマンスを測定・報告・改善し、成功事例を共有することができるプログラムとして、世界都市指標プログラム (Global City Indicators Program) を実施している<sup>5)</sup>。開発された指標は ISO 37120 として標準化され、経済、教育、エネルギー、環境、ファイナンス、火事と緊急事態への対応、ガバナンス、健康、レクリエーション、安全、避難所、廃棄物、通信、交通、都市計画、廃水、水と公衆衛生という 17 のテーマについて、計 100 種類の指標を定めている<sup>6)</sup>。日本も国際標準化活動を進めており、都市インフラの評価指標の標準化のための委員会 ISO/TC 268/SC 1 が日本主導で設置され、2015 年に発行された技術仕様書 ISO/TS 37151 では、エネルギー、水、交通・運輸、廃棄物処理、情報の少なくとも 5 インフラでパフォーマンス特性が選定された<sup>7)</sup>。

#### ■ ライフサイクル評価

環境問題への関心の高まりは産業と環境の統合的な評価を必要とし、LCA (Life Cycle Assessment) の方法論がヨーロッパの研究グループを中心に開発されてきた。LCA はもともと工業製品について、原料採掘から、輸送、製造、使用、廃棄までをひとつのシステムとして捉え、そこから発生する環境負荷を定量的に算定し、政策担当者や企業責任者の意思決定を支援する手法である<sup>8)9)</sup>。90 年代より建設物、廃棄物の評価を通じて都市の評価へ適用が進められてきた。

日本では資源循環システムに LCA を適用する研究が 2000 年代に入り先行し、地域性を考

慮する手法開発が進められた。既存の都市部を対象に、更新も含む環境改善施策の実施シナリオごとの LCCO<sub>2</sub> を算定し、都市再開発の政策を提言する研究が行われた<sup>10)</sup>。また、コンパクト都市や基盤の再編など都市の更新を評価する LCA 研究<sup>11)</sup>や、地域 LCA システムの開発<sup>12)</sup>が進められてきた。都市の LCA 研究では、具体的な対象地域を特定して積み上げ的な算定を行い、産業連関表などのマクロ的な算定手法で補完することが行われてきた。各発生源からの発生量および質が地域によって異なるため、普遍的な算定が可能な工業技術対策と比べ、都市政策が低炭素や資源循環の対策として、二次的に取り扱われる状況を招いたことも否定できない。一方で、GHG プロトコルの SCOPE3 のように、間接的な環境影響を考慮する評価手法が注目される中で、生産に伴う温室効果ガスの発生を消費者あるいはその集合体である都市で担うべきとする原則を社会で実装するためには、国際的に共有できる都市の LCA の理論と手法が必要となる。また、多様な利害関係者に結びつく社会影響を見る社会 LCA (SLCA : Social LCA) のような観点も今後期待される。

#### ■ フットプリント評価

ヨーロッパでエコロジカル・フットプリント (EF) の概念が 1990 年代に提案された。一定の人口が消費する資源および化石、核燃料消費によって生じた廃棄物の一部を吸収するために必要となる、生物学的な土地利用と水の量とで定義される<sup>13)</sup>。耕地の利用、牧草地の利用、樹木/森林の利用、市街地の利用、生産的海域の利用 (漁業)、人工林の利活用<sup>14)</sup>を総合的に算定することで、EF は都市活動が消費する総生態資産と解釈できる。国土や都市、地域の持続可能性の評価に用いられてきた。

アジアでも中国や日本の都市で EF を比較する研究が行われている<sup>15)</sup>。特に、都市化のもたらす水資源の不足が深刻な中国では、水のフットプリントを明らかにすることで、北京市の都市政策への政策を協議する研究<sup>16)</sup>や、中国遼寧省での研究がある<sup>17)</sup>。

気候変動への対策に社会関心が高まるとともに、CO<sub>2</sub> 排出緩和に特化するカーボンフットプリント (CF) 研究も世界の各地で進められている。人間活動によって直接および間接的に生じた CO<sub>2</sub> の換算排出量として定義されている<sup>18)</sup>。CF 研究は国、都市、家庭、組織、生産プロセスおよび製品など様々なスケールで行われているが、その多くは産業連関表による推計を行っており、産業連関表が存在しない都市単位での研究は試行段階にある。12 の大都市圏の CF 推定や<sup>19)</sup>、IPCC の方法を利用した中国都市の CF 算定も行われている<sup>20)21)</sup>。1980 年代に提唱された Energy 指標は、都市活動で直接的、間接的に利用された資源エネルギーを太陽エネルギーに集約する方法であり<sup>22)</sup>、人間社会の環境効率を統合的に評価するものとして近年注目が集まっている<sup>23)</sup>。

#### ■ エネルギーシステム研究

都市・地域計画においては元来、エネルギーシステムについての考慮があまり行われてこなかった。これは、日本をはじめ多くの国々でエネルギー供給は民間事業者によって行われており、自治体による都市・地域計画の埒外であったことや、エネルギー供給政策が国レベルで検討・実施されるものであったことが理由である。しかし、21 世紀に入ってから欧州では二酸化炭素排出削減の観点から化石燃料依存を抑制するための未利用エネルギー・再生可能エネルギー活用が盛んに研究・導入されるようになり、また米国では電力自由化に伴う大停電などの供給不安から、地域で送配電網を管理し自家発電・蓄電設備を設けることで供給を安定化させるスマートグリッドの取組が進展した。さらに IT を活用して需給の変動を平

準化しギャップを緩和するとともに、供給が不安定な自然エネルギー導入を容易とするシステムへと発展させた。また、20世紀からすでに普及していた熱供給システム、そしてコージェネレーション（熱電併給）とも融合し、いわゆるスマートシティを構成する重要なインフラとして認識されるようになってきている。さらに近年では、環境負荷削減に加え災害リスクへの対応と両立しうるエネルギーシステムに関する研究が注目されつつある。

一方で、スマートシティの考え方は従来の都市・地域計画とあまり融合できていない。もともとエネルギー工学と土木・建築分野とが疎遠であったこと、都市・地域計画は長期間で効果を発揮し、新規開発地域でなければ自由に設定することが困難であることから、比較的短期で整備できるエネルギー技術とスケジュール感が合わないことが原因である。しかし、都市・地域の空間構造を固定してエネルギー技術を導入しても、根本的なエネルギー需要構造は変わらず、導入コストや効率性にも影響を与える。エネルギー技術と都市・地域計画を融合した真の意味でのスマートシティ・デザイン手法が現在求められている。

### （3）注目動向

#### [新たな技術動向]

- 観測技術の進展により様々な環境情報が入手可能となり、データの蓄積やその解析技術も発展している。近年は土地利用や人の移動に関する情報も活用されるようになり、自然科学的な情報だけでなく社会経済的な情報も含めて総合的に解析する様々な研究開発が行われている。多種多様な要素が複雑に関係し影響しあう都市研究において総合的な把握は重要であり、こうした動向はいっそう加速するものと考えられる。
- 都市・地域計画の分野では、空間構造による民生・交通エネルギー消費量（および温室効果ガス排出量）の違いが実データやモデル分析によって検討され、交通については違いが大きいものの民生については違いが小さいことが明らかにされてきた。しかし近年、エネルギー技術導入の可能性や効果が空間構造によって異なること、例えばある程度密度が高く、職住近接のような用途混合が行われている地区（いわゆるコンパクトシティ）では高い効果が発揮できる可能性があることが示唆され、都市・地域計画における配慮必要性への認識につながっている。

#### [注目すべき国内外のプロジェクト]

- 科学技術新興機構（JST）社会技術研究開発センター（RISTEX）では、2014年度より研究開発領域「持続可能な多世代多世代共創社会のデザイン」を開始した。本領域では、環境・社会・経済など多面的に持続可能な社会の実現に向け、多世代・多様な人々が活躍するとともに将来世代も見据えた都市・地域を、世代を超えて共にデザインしていく研究開発が進められている。
- EUの共同プログラミングイニシアティブ（JPI）「Urban Europe」において、一国では対応できないような課題に国を超えて取り組む都市研究が実施されている。優先的に取り組む5つのテーマとして、アクセシビリティと接続性、都市環境の持続可能性とレジリエンス、都市管理と参加、変化する経済の中での活力、福祉と金融があげられている。
- サンパウロ研究振興財団（FAPESP）、英国経済・社会研究会議（ESRC）、オランダ科

学研究機構（NWO）による「持続可能な都市開発（Sustainable Urban Development）」が実施されている。総額約 540 万ユーロの資金提供を行う共同公募に 7 件の国際研究プロジェクトが採択され、2015 年から開始、レジリエンスや社会的公正とガバナンス、民主主義などのテーマを調査する共同研究プロジェクトの実施を通じて、ブラジル・サンパウロ州、英国、オランダ間における研究協力体制の強化を目指す<sup>24)</sup>。

#### （４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

- 多様な都市効用の複合評価

高齢化や人口減少、強靱化など地域に帰属する効用の改善とともに、低炭素、資源節約、自然生態系保全など、地域間や国際的にも共有しうる課題の解決への貢献を含めた将来の都市像を、多面的な機能を総合化して描くことが必要となる。各分野の個別最適ではなく全体最適につながるような複合便益型の包括的な将来ターゲットが求められる。

- 長期と短期の都市の効用の総合評価

重大な中長期の将来負担を避けるために、身近な負担水準などを科学的、定量的に設定し提示することが求められる。その際には短期的に実現可能な事業と長期的な事業のスコープの広がりや、短期的な住民要望と中長期的な地域目標を描くことが求められる。

[今後取り組むべき研究テーマ]

- 分野横断的な統合評価研究と都市計画への展開の理論と手法

あらゆる要素の国際的な相互依存が高まる中で、日本の都市の個性や長所を、客観性と透明性を持って国際社会と共有し、日本の経験と知恵を技術や事業とともに国際社会と共有することにより、市町村で将来の活力を高める可能性がある。そのためには様々な個別技術を地域特性等を踏まえシステムとしてくみ上げる必要がある。また、気候変動に対する緩和と適応、高効率の資源利用とともに、地域の活力を再生しつつ強靱化を実現するためには、生産チェーンや交通ネットワークなど異なる都市間や世代間が連携し、適正な効用と負担を共有する技術や政策評価の理論と手法の開発が求められ、今後発展すると考えられる。

- 社会転換を環境都市で実現する方法論の研究（社会システムイノベーション）

OECD の「Green Growth Strategy（グリーン成長戦略）」では、環境効率の高い生産と消費システムの構築には市場メカニズムだけでは不十分であり、価格シグナルに加えて適正な規制とともに、消費者生産者の意識を高める施策が必要としている。また、F.W.ギールら<sup>25)</sup>は、交通、通信、住宅、エネルギーや食糧の分野では個別の技術革新だけではなく社会技術システム（socio-technical systems）のイノベーションが必要であり、小さな実験的な試み（ニッチ実証；niche）での実現から、そのパッチワークを経て、社会潮流の変化に進めるプロセスを提案している。総合的なイノベーションの議論をふまえ、理念から政策や事業や行動の段階に進むために、社会実践と連携する研究推進が必要となる<sup>26)27)</sup>。

### （5）政策的課題

● 地域の特徴を生かす政策パッケージの設計

個別の技術あるいは技術システム群の開発は、環境制約下での社会の効用を高める原動力となる。その際、対象技術の選定のプロセスが重要となる。単体の技術による部分的な個別機能の最適を目指すよりも、複合技術群の組合せによる総合的な機能最適により、その開発の限界費用を低減して社会への限界効用を高めることができる。

● 都市評価を活用する双方向の計画策定

情報システムに関する技術開発が目覚ましい。地理情報システム、双方向のネットワークシステムなどを活用し、計画策定にあたり、専門家だけでなく関係主体と情報を共有し、現在から将来にかけての経済活力や環境快適性、外部影響などの、都市や地域の行動特性等を解析する「地域診断」をリアルタイムで共有するプロセスが求められる。また、環境都市の実現に向けた技術と社会制度を含む総合的な解決策を、地域の特徴に応じて参加型により計画し、その効果の算定結果に基づいて都市の将来像と方策を選定する双方向型のシミュレーションモデルに都市の評価論を活用することも期待される。短期、中期、長期についての将来ターゲットを可能な限り選択的に組み合わせるとともに、社会変化の下で定期的に見直せる意思決定のプロセスなどをもつことも想定される。

● スマートシティとコンパクトシティの検討の融合

エネルギーや IT 分野でのスマートシティ検討と、都市・地域計画分野でのコンパクトシティ検討があまり関係なく進んでいる。また、都市・地域計画が IT 普及やエネルギー供給構造変化、シェアリングエコノミーといった今後の趨勢をあまり考慮できていない。このような各分野の連携・融合が進めばブレークスルーが起きる可能性がある。日本だけでなく世界的に見ても必ずしもできていない。

### （6）キーワード

環境モデル都市、低炭素社会、気候変動、資源循環、LCA、統合評価モデル、社会イノベーション、フットプリント、環境評価指標、社会実践、スマートシティ、コンパクトシティ、低炭素交通システム、再生可能エネルギー

### （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
日本	基礎研究	◎	→	● 1980年代の都市環境指標の研究推進に続いて、リオサミット以降、環境基本法成立などを背景にLCAなどの様々な環境評価論の都市への展開が進められてきた。
	応用研究・開発	○	↗	● 2007年の環境都市政策の実践に伴い、分野横断的な環境評価理論と、計画支援手法の開発が進められてきた。強靱な国土や災害レジリエンスなどを含むより包括的な環境価値を定量化する理論の開発とともに、社会イノベーションなど実践を支援する方法論を含む産学連携研究も広がっている。 ● 都市開発に環境価値を生産化することで付加価値を高める事業が進められており、環境モデル都市やスマート都市などでの事業化がみられるものの、公共事業と市場経済の合理的な連携の方策については数年進捗していない。

米国	基礎研究	○	→	● LCA、スマート都市などの個別の技術開発研究は進捗しているが、産官連携での事業を支援するための論理構造の構築につながっていない。
	応用研究・開発	○	↑	● 環境価値の定量化を合意形成につなげることや、空間情報の整備を背景とする方法論の開発などが急速に進展している。 ● 郊外都市、都心再開発に環境価値を内包化する取り組みが目立ちつつあり、成長管理政策などで先行しているポートランド市の方法論を事業展開する試みも見られる。
欧州	基礎研究	◎	↑	● 気候変動対応のための新たな都市計画論に対する要請が 1990 年代より急速に広がり、それに応える研究展開がみられる。
	応用研究・開発	◎	↑	● IPCC、パリ協定の中でも都市の低炭素社会実現への貢献が記載されていることを受け、具体的な社会イノベーションの実現を支援する研究開発の進展も見られる。 ● 気候変動への適応に向けた都市転換の事業化の動きが欧州の各地で見られる（テムズ川 2100 年計画、Copenhagen Adaptation Plan, 2011）。
中国	基礎研究	△	↑	● 都市の統計データの整備が途上であるため、特別市など限られた地域での研究にとどまっている。
	応用研究・開発	◎	↑	● LCA、エコロジカル・フットプリントなどの手法を用いて、代替データを活用した都市の評価研究が急速に進んでいる。 ● 21 世紀以降の行政主導による新都市開発の中では、必ず環境都市や生態都市であることが求められる。環境汚染の急速な悪化とともに、環境費用を内生化する独自の都市開発理論と手法の開発が期待される。
韓国	基礎研究	◎	→	● 環境汚染対策の取り組みが一段落した中で、Green Innovation の一環として環境都市の基盤整備が進められている。
	応用研究・開発	○	↑	● Cleaner Production Center での Ulsan の評価研究や、気候変動の影響などの個別研究が各分野で進められている。 ● 2010 年より Low Carbon Green Project などの低炭素化都市の事業化が進められている。

（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

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## （8）参考文献

- 1) 内藤正明・森田恒幸(1995)；「環境指標」の展開，学陽書房。
- 2) Graymore, M.L., Wallis, A.M., Richards, A.J., 2009. An Index of Regional Sustainability: A GIS-based multiple criteria analysis decision support system for progressing sustainability. Ecological complexity 6, 453-462.
- 3) Kaptein, M., Van Tulder, R., 2003. Toward effective stakeholder dialogue. Business and Society Review 108, 203-224.
- 4) Bai, C., Sarkis, J., 2010. Integrating sustainability into supplier selection with grey system and rough set methodologies. International Journal of Production Economics 124, 252-264.
- 5) University of Tronto, Summary Report of Global Indicators, [http://rendiciondecuentas.org.mx/data/arch\\_docu/GlobalIndicators.pdf](http://rendiciondecuentas.org.mx/data/arch_docu/GlobalIndicators.pdf)

- 6) World Council on City Data, ISO 37120, <http://www.dataforcities.org/>
- 7) 高橋玲子, インフラシステムの相互利用がもたらす価値の見える化, 東芝レビュー Vol.71 No.2 (2016).  
[https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2016/02/71\\_02pdf/r02.pdf](https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2016/02/71_02pdf/r02.pdf)
- 8) Hertwich, E.G., Hammitt, J.K., Pease, W.S., 2000. A Theoretical Foundation for Life-Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology* 4, 13-28.
- 9) Ayres, R.U., 1989. *Industrial metabolism*. National Academy Press, Washington, DC.
- 10) 藤田壮., 盛岡通, 村野昭人., 1999. 都市集積地区から派生するライフサイクルニ酸化炭素の評価の都市マネージメントへの展開についての考察. *環境システム研究論文集*, 355-364.
- 11) 林良嗣., 加藤博和., 北野恭一他, 2000. 都市空間構造改変施策に伴う各種環境負荷のライフサイクル評価システム. *環境システム研究論文集* 28, 55-62.
- 12) 稲葉, 陸太., 2003. リサイクルに関するLCA研究の整理. *廃棄物学会誌* 14, 321-332.
- 13) Wackernagel, M., Rees, W., 1998. *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth*. New Society Publishers.
- 14) Hoekstra, A., 2009. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics* 68, 1963-1974.
- 15) Geng, Y., Zhang, L., Chen, X., Xue, B., Fujita, T., Dong, H., 2014. Urban ecological footprint analysis: a comparative study between Shenyang in China and Kawasaki in Japan. *Journal of Cleaner Production* 75, 130-142.
- 16) Zhang, Z., Yang, H., Shi, M., 2011. Analyses of water footprint of Beijing in an interregional input-output framework. *Ecological Economics* 70, 2494-2502.
- 17) Dong H., Geng Y., Xi F., Fujita T., 2013, Carbon footprint evaluation at industrial park level: A hybrid life cycle assessment approach [J]. *Energy Policy*. 2013, 57: 298-307.
- 18) Wiedmann T., Minx J., 2007, A definition of Carbon Footprint [J]. *ISA Research Report*, 01: 1-9.
- 19) Sovacool, B.K., Brown, M.A., 2010. Twelve metropolitan carbon footprints: A preliminary comparative global assessment. *Energy policy* 38, 4856-4869.
- 20) Xi F., Geng Y., Chen X., Zhang Y., Wang X., Xue B., Dong H., Liu Z., Ren W., Fujita T., Zhu Q. Contributing to local policy making on GHG emission reduction through inventorying and attribution: A case study of Shenyang, China [J]. *Energy Policy*. 2011, 39(10): 5999-6010.
- 21) Lin, J., Liu, Y., Meng, F., Cui, S., Xu, L., 2013. Using hybrid method to evaluate carbon footprint of Xiamen City, China. *Energy Policy* 58, 220-227.
- 22) Odum, H.T., 1996. *Environmental accounting*. Wiley.
- 23) Hau, J.L., Bakshi, B.R., 2004. Promise and problems of energy analysis. *Ecological modelling* 178, 215-225.2013
- 24) JST CRDS デイリーウォッチャー「持続可能な都市開発にかかる総額 540 万ユーロの国際共同公募」<http://crds.jst.go.jp/dw/20150701/201507016060/>
- 25) Frank W. Geels (2005) *Technological Transitions and System Innovation*, Edward Elgar Publishing.
- 26) 藤田壮(2013); 成長分野へ企業と地域が取り組む「環境社会イノベーション」(特集 地球環境浄化に貢献する日本の技術)月刊誌商工ジャーナル, (株)商工中金経済研究所, pp.14-17, 1101, 2013
- 27) 藤田壮 (2013) ;環境都市に向けての評価論の展開,都市計画