

### 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端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 Osmosis）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も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、バイオリギング、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た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、粉砕機内の「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かい離や、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たことと、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., Hammit, 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