

## 2.24 資源・生産・消費管理

### (1) 研究開発領域の定義

資源・生産・消費管理に関する科学、技術、研究開発を記述する。

製品やサービスの全ライフサイクルについて、環境負荷や影響を定量的に把握し低減するための評価・管理技術を扱う領域である。ここでは、データベース構築及びライフサイクルアセスメント、物質フロー分析または物質ストック・フロー分析、各種フットプリント、ラベリング等による行動変容などを対象とする。

### (2) キーワード

ライフサイクルアセスメント、ライフサイクル思考、マテリアルフロー分析、エコロジカルフットプリント（カーボンフットプリント、環境フットプリント）、環境ラベル、サーキュラーエコノミー、食料・水・エネルギーの相互依存性分析、産業共生

### (3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

循環型社会を構築していくためには、資源の有効利用度を高め、低環境負荷な生産工程を確立しつつ、適切な消費行動をとることができるようになる必要がある。このとき、単一のプロセスや意思決定において最適であると考えた選択肢が、他のプロセスや意思決定に対して悪影響を及ぼすことがある。製品やサービスのライフサイクル全体を対象にしながら、資源のフローやストックを分析することで可視化し、任意の選択肢が与える波及効果を利害関係者間で共有することで、よりよい管理を目指すことができる。本研究開発領域はこうした目的における分析や可視化、結果の共有における方法論を開発、普及させていくものである。

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。手法としてはマテリアルフロー分析やマテリアルフローコスト会計、など様々なものが提案、開発されてきている。なかでもライフサイクルアセスメント（LCA : Life Cycle Assessment）やその基礎的な考え方であるライフサイクル思考（life cycle thinking）は、製品のゆりかごから墓場まで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。例えば、軽量で頑丈な新素材を開発した場合、その素材を利用することで飛行機や鉄道車両、自動車などの環境性能を大幅に向上させうるが、素材そのものを生産するプロセスでは、高機能な製品を生産するために環境負荷が増大してしまう可能性がある。このようなとき、素材の製造と使用における環境負荷を比較し、素材の有効性を分析することがLCAを用いれば可能となる。消費者行動に関して、ライフサイクル思考に基づけば、例えば、自動車や家電製品の買い替えによる効果を製品の製造部分の環境負荷と使用部分の環境負荷を定量化することにより、可視化することができるようになる。このような可視化は、消費者の環境配慮行動を支援する上で重要な情報であり、共有されるべきものである。共有の方法としては環境ラベルのようなツールを開発し、情報の有効性だけでなくアクセシビリティを高めることができるようにしてきた。

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。

[研究開発の動向]

世界的な研究開発の動向を客観的に把握するために、Web of Science に 2008 年～ 2018 年 7 月に登録された学術論文のうち、タイトル、要旨、キーワードに “life cycle assessment” もしくは “life cycle analysis” を含んだ 13,853 件の論文に対し、書誌情報をテキストマイニング及びネットワーク分析により自動分析できる学術俯瞰システム<sup>1)</sup>を用いて、計量書誌分析を行った。表 2.24-1 のとおり 2008 年から 2017 年にかけて論文数は、大きく増加している。

表2.24-1 直近10年のLCA関連論文数の増加トレンド

年	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
件数	323	463	646	784	978	1272	1500	1732	2074	2377

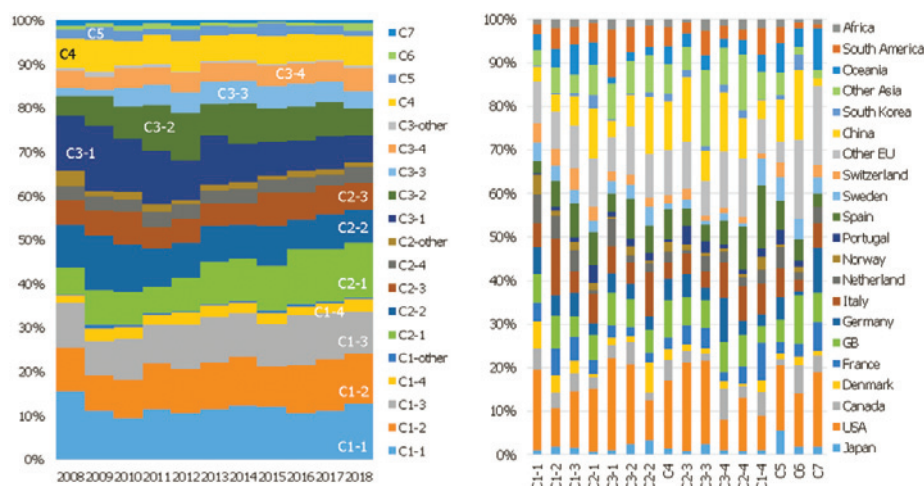
引用関係からのクラスタリングにより、上記の論文は 50 を超えるクラスタに分割された。この中で全体の 98% をカバーする特に大きなクラスタ 7 つに関して本稿では議論する。この 7 つの主クラスタ内で共通して利用されている主なキーワードは表 2.24-2 の通りである。

表2.24-2 LCA分野の論文における頻出キーワードをもとにしたクラスタリング

クラスタ	サブクラスタ	件数	キーワード
C1		4758	farm, food, land use, water
	C1-1	1568	social life cycle, input-output, sustainability
	C1-2	1443	farm, food, animal
	C1-3	1361	water treatment, land use, biodiversity
	C1-4	333	aquaculture, fishery
C2		3951	building, construction, vehicle, municipal
	C2-1	1404	building, construction, cement
	C2-2	1113	municipal solid waste, recycling
	C2-3	818	vehicle, battery, composite、
	C2-4	433	photovoltaic, payback, building
C3		3540	biomass, pyrolysis, biogas, fuel
	C3-1	1170	bioethanol, biodiesel, biofuels
	C3-2	1071	biomass, wood, pyrolysis
	C3-3	631	microalgae, biodiesel
	C3-4	607	biogas, hydrogen, digestion
C4		854	wind, turbine, capture
C5		278	symbiosis, reusable, design
C6		118	remediation, soil, contamination
C7		70	rare earth, metal, magnet

このうち相対的に件数の多い C1～C3 はさらにサブクラスタを同様に学術俯瞰システムにより分析した。

これらクラスタが全体の論文数に占める年次の割合と、著者の所属機関が立地する国について、図 2.24-1 に示す。C1-1～C1-4 に関しては 2010 年前後に全体の中の論文割合が減少しており、近年は微増している。C2-1 は過去 10 年で全体の中での割合を大きく増加させている分野であり、論文数も多い。逆に C2-2 や C3-1 は過去 10 年の間の割合が減少している。特にバイオマス関連の LCA については、近年は LCA による評価だけでなく、次節にて述べる最近の動向として、水消費や食料との関係に加え、循環経済からの解析を必要としており、LCA を含まない研究も増えてきている。国別の状況を見ると、米国の論文数は単独の国としては最大であり、多分野の研究報告がなされている。欧州においては、イタリアや英国、スペインなどからの報告が多く、次いでドイツやオランダ、フランス、デンマーク、スウェーデン、スイスなどからの報告が多い。アフリカや南米といった地域からの報告も増えてきている。中国からの論文数は米国に次いで 2 位であり、日本は論文数だけで見ると 17 位であった。



(a) 年別の発刊割合 (b) 著者所属の国別割合  
図2.24-1 2008～2018(7月)に発刊されたLCAを含む論文の概況

計量書誌分析に加えて、研究開発の動向を把握するために、関連する学会のセッション構成について調査を行った。学会としては、LCA の概念から手法の確立を行った環境毒物化学会 (SETAC : Society of Environmental Toxicology and Chemistry) 欧州大会<sup>2-4)</sup>、産業エコロジー学会<sup>5)</sup>、日本 LCA 学会<sup>6)</sup> の各研究発表会等からセッションテーマを抽出し、これに基づき、以下で研究動向を議論する。

毎年企画されているセッションとして、手法論の開発がある。特に SETAC Europe においてはライフサイクルインパクト評価のフレームワークとモデルの開発を、ケーススタディなどを通して実施している。通常的环境影響に加え、社会的な影響を定量化する Social Life Cycle Assessment (SLCA) の手法開発についても、議論されている。SLCA については上記計量書誌分析の結果のクラスタ C1-1 に該当し、2009 年にガイドライン<sup>8)</sup> が策定される前から研究が活発化している。方法論としては、いずれの学会においても、産業連関表を用いた Input-Output Analysis が意思決定支援にどのように活用できるかを議論するセッションが国

内外で組み立てられている。資源の循環や、自治体レベルでの物質と経済の循環を分析する上でも、産業連関表を用いた分析事例が増えつつある。開発されてきた手法を実践し、ホットスポットの分析や実際に設計等に利用する事例研究も増えている。例えば、生産現場においては複数の製品を様々な資源を投入することによって併産していることが多く、その工程で利用しなくなった資源やエネルギーも他の工程でカスケード利用することができるなど、単純ではない。生産される製品も単一の機能を有しているわけではなく、環境負荷の定量化における機能単位が定まりにくい場合がある。こうした生産現場の複雑性や製品の多機能性をどのような形で考慮し、適切な分析ができるか、事例における具体的な定量化を基にしながら方法論を開発する研究発表が増えている。特に、次節にて述べる Food-Energy-Water nexus や Circular economy、Assessment of emerging technology などの関連研究では、具体的な数値を用いた議論が多く存在しており、日本 LCA 学会研究発表会では特別セッションも組まれている。また、ライフサイクル情報を格納するデータベースの開発に関する研究事例も多い。特にライフサイクルインベントリデータを格納しているデータベースが複数存在していることから、これらの互換性やバウンダリの設定に関する研究報告が例年行われてきている。

以上の調査から、研究開発動向をまとめる。資源・生産・消費管理のための手法として広範に使用されている LCA に関し、研究論文はさらに増加している。LCA については、歴史的に、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きた。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、を挙げることができる<sup>7)</sup>。ここで、昨今の変遷として、社会の中で LCA は単純に環境負荷を分析するだけにとどまらないライフサイクル思考のための方法論として位置付けられ始めている。そのため、“LCA” を含まない物質・エネルギーの解析や、経済性の分析などにおいても、ライフサイクル全体に関する議論が必要であることは前提となりつつある。定量化すべき指標がさらに複雑化しており、研究のターゲットとされる製品やサービスについては、水素やバイオマス由来の製品製造など、新規なものもあるが、従来対象となってきた製品群についても、開発途上国に対してなど、継続的に解析が行われている。現在開発済の方法論に基づくことで、既に存在している技術システムや社会システムを何らかの指標により定量的に評価することは、様々な事例研究から可能となっているといえる。しかし、導入数が少ないシステムや、将来技術に関する分析は完全には実施できていない。

#### （4）注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

##### ● 計量書誌分析結果（図1）からの抽出

図 2.24-1 に示される計量書誌分析によって特定されたクラスタは、いずれも当該分野で重要なトピックである。C1-1 の **social life cycle, input-output, sustainability** では、環境性だけでなく社会性に関する評価指標を提案する研究分野であり、予てより存在していたものであるが、ESG 投資等の観点が必要となってきた中で、研究開発が再度増加している。C1-2 の **farm, food, animal** については、パーム油など開発途上国からの輸出が多い製品に関する評価が増えている。C1-3 の **water treatment, land use, biodiversity** については長い歴史があるが、定量化の方法論の確立に向けた研究が継続的に行われている。C2-1 の **building, construction, cement** については、先進国のスマートシティ構想や開発途上国の人口増、さらには自動車や情報技術の発展と普及により、急速に街づくりの概念が変わりつつある中、その生産と消費の評価が必要となってきた。C2-3 の **vehicle, battery, composite** などは、近年、導入が増えてきた蓄電池搭載の自動車の評価が活発化していることを意味しており、C2-4 や C3-1、C3-2、C3-3、C3-4 といったエネルギー関連クラスタとともに重要となってきた。

追加の分析として、Web of Science に収録の学術雑誌の中から、2016 年 1 月～2018 年 7 月までに掲載された学術論文のうち、タイトル、要旨、キーワードに“life cycle assessment”もしくは“life cycle analysis”を含んだ 4,491 件の論文に対し、学術俯瞰システムを用いた計量書誌分析を行い、各国の近年の動向を分析して下表に整理した。計量書誌分析によって得られた主なクラスタは、以下の 10 クラスタでカバー率は 75%であった；食品関連（647）、新規エネルギー技術（543）、建造物（533）、廃棄物利用（522）、水処理（241）、サプライチェーン（227）、バイオ燃料（221）、一次産業（164）、シェール・新資源（152）、Social Life Cycle Assessment（130）。ここで、括弧内は各クラスタの論文数である。いずれも図 2.24-1 の中に含まれるものであった。

##### ● Food-Energy-Water nexus analysis: 食料・水・エネルギーの依存性解析

食料と水の生産とエネルギー消費の相互依存性に関する分析を国や地域ごとに行うものであり、食料と水に関する評価として近年多くの文献において採用されているアプローチである。単位量の水や食料を得るために必要となるエネルギーについて可視化することにより、食料と水の流れにより、エネルギーの流れを解析することが可能となる。2011 年頃から議論が増えてきている概念<sup>9)</sup>であり、FAO からガイドラインが発行<sup>10)</sup>され、多くの学会においてセッションが組まれる<sup>11)</sup>など、活発化している。本領域の主要雑誌である Applied Energy や Resources, Conservation and Recycling, Sustainability などにおいて Special Issue が組まれるなど、研究報告も増えてきている。

##### ● Circular economy : 循環経済

物質や資源の循環によって経済的な効果をも引き出し、生産と消費の在り方を根本的に変えることを意味しており、欧州委員会では、2030 年に向けた成長戦略の核に位置づけている。都市廃棄物の 65%をリサイクルすることや、包装廃棄物の 75%をリサイクルすること、埋め立て廃棄量を 10%削減することなどの廃棄物政策に加え、再生資源活用に基づく raw materials の資源枯渇と価格変動リスクからの脱却によるビジネスモデルの転

換を掲げている<sup>12)</sup>。世界経済フォーラムらによる報告書では、循環により価値の基準を再定義すべきことや、人工知能等を用いることでより高効率化された建造物や製品を生み出し得ることなどが議論されている<sup>13)</sup>。これらの提言は産業界からの関心を高め、技術開発や導入を促している。同時に、学界においても、*Journal of Industrial Ecology* において特集号が発刊される<sup>14)</sup> など、*Circular Economy* に関する研究開発が広がりを見せている。

● **Environmental footprint : 環境フットプリント**

欧州委員会は、2013年から環境フットプリントに関するパイロット事業を開始し、2017年末までに、第1期（2013年11月～日用品、工業製品及び組織）と第2期（2014年6月～食品）に分けて各製品・産業セクターに関して16の環境影響領域（温室効果ガスの排出量、資源枯渇や毒性等）について、LCA方法論をベースにした定量評価・検証のための製品カテゴリールール（*Product Environmental Footprint Category Rule : PEFCR*）、産業セクタールール（*Organisation Environmental Footprint Sector Rule : OEFSR*）を開発している。パイロット事業では、PEFCR開発等の経験において、二次データベース（環境負荷算定用に使う素材やエネルギー等の共通的な原単位）の構築、統合評価のための重み付け係数（*weighting factors*）の開発や、比較可能性を担保するためのコミュニケーションテスト等が実施されている。2018年からは、政策移行フェーズとして、環境ラベルやグリーン公共調達等の既存制度・施策への適用、環境配慮主張や情報開示の新政策を検討していくことが方針として示されている<sup>15)</sup>。

● **Assessment of emerging technology : 新規技術の評価**

近年、新規技術や生産システムに関して、システム評価を実施する研究に関する特集号が組まれている。例えば、*Journal of Industrial Ecology* では研究開発や政策における意思決定を支援するためのLCAに関する特集号が募集された<sup>16)</sup>。ここで想定されている技術は、技術成熟度がLevel 3から4といったもので、主に実験室レベルの研究段階のものから、ペロブスカイト型太陽電池など、低コスト化による実用化を目指しているような技術である。アメリカ化学会の*ACS Sustainable Chemistry & Engineering* においても、バイオ燃料の生産システムや、従来のシステムにおける更なる省エネ化による持続性の向上に関する特集号が発刊されている<sup>17)</sup>。材料開発に関する研究論文が多い、化学の雑誌で、こうした持続性の評価を特集することは珍しい。いずれの特集号においても、製品や生産システムだけでなく、社会システムに対しても構造的な変革をもたらさしめる技術にLCAといった評価手法を適用するものであり、導入してから持続性の検討をするのではなく、導入する前に可能な限り評価を行い、持続可能な技術導入を実現することを目指している。

● **Assessment of energy and environmental policy: エネルギー・環境政策の評価**

再生可能エネルギーの導入など、低炭素社会を目指したエネルギー・環境政策の重要性が増している。再生可能エネルギー電力のみならず、バイオエタノールや再生可能エネルギー熱などの利用促進に向けた制度や政策が各国で実施されてきた。今後もエネルギー技術の研究開発や普及促進に係わる効果的な政策や施策の立案が求められる。このようなエネルギー・環境政策の立案や評価に資するライフサイクル思考に基づく研究は、*Energy Policy* や *Renewable and Sustainable Energy Reviews* などの主要国際誌において近年、増えつつある。論文中にライフサイクルという言葉は必ずしも利用されていないが、ライ

フサイクル思考に基づき、再生可能エネルギー普及政策や省エネルギー政策などがもたらす社会経済影響を分析する研究が活発化している。国内でも日本 LCA 学会誌においても政策立案の支援を念頭に「エネルギーの LCA」の特集が生まれ、政策立案に資する LCA 研究の重要性が指摘されている。

今後、現実の政策や制度の立案に資するという視点から、ライフサイクル思考に基づくエネルギー技術導入に伴う影響に関する分析・評価の重要性が増しつつある。

#### [注目すべき国内外のプロジェクト]

資源・生産・消費管理に係る国内プロジェクトの動向として、近年の研究開発プロジェクトにおける LCA 等システム評価の必要性が高まっていることが挙げられる。例えば、JST 未来社会創造事業は、未来社会を構成しうる革新的な技術の研究開発と実証、導入に関するものであるが、並行して低炭素化や資源循環といった観点からの技術評価が各プロジェクトで必要とされている。戦略的イノベーション創造プログラムにおいても、LCA による技術評価を必要としている研究分野が存在している。資源・生産・消費管理における研究課題は広く材料・デバイス・システム研究と関連性が深く、学術研究だけではなく事業の中でも必須の要素となりつつある。従来からこの必要性は認識されてきたが、近年は学術雑誌における特集号の発刊や国内プロジェクトにおける要求から、重要性・緊急性が増しているといえる。

国際的にも、当該分野におけるネットワークの強化が図られている。Forum for Sustainability through Life Cycle Innovation (FSLCI) はライフサイクル思考に基づく持続可能性への挑戦に関連する、国際的な科学、産業、政策・行政に関わるステークホルダーによる組織であり、2015年に設立された。FSLCI が主催する第1回国際会議が2018年8月に開催され<sup>18)</sup> など、多分野の融合による資源・生産・消費管理の活動が活発化してきている。

国連環境計画 (UNEP) においても、LCA データベース間の国際協調枠組み「GLAD (Global LCA Data Access)」の構築を進めている。製品等のライフサイクルでの環境負荷を定量化するにあたっては、算出の基礎となるインベントリデータ収集に加え、二次データベースが必要となる。多様に存在するデータベース間の相互利用を実現するために、GLAD では、UNEP のもと、欧州委員会、米国、中国、日本など世界の13の国・地域の政府機関が運営に参加し、主要なデータベース開発者や専門家が協力して検討を進めている<sup>19)</sup>。

#### (5) 科学技術的課題

##### ● 社会（地域）システムの変革を伴う技術システムの設計・評価プロジェクト

資源・生産・消費管理として、特定の技術システムに限った設計や評価といった研究が行われてきた。しかし、例えば木質バイオマスからの化成品や燃料、エネルギーの生産を議論する場合、林業における技術システムや社会システムの変化が、ライフサイクル全体での性能に大きく影響しうる。この変化は地域性があり、日本全国の平均的な分析結果だけでは、個別具体的な技術の導入を議論することができない。

こうした社会システムの変革を伴う技術システムとしては、国内ではエネルギーシステムが最たるものの一つといえる。例えば太陽光パネルによる電力供給は、低炭素化効果があると言われているが、これは実際に発電が行われ、その電力が使用された場合に限っての話である。地域によっては系統連系が回答保留されたり、出力抑制が行われたりと、太

陽光パネルを設置するだけではその電力が有効に使われない場合が増えつつある。一方、リアルタイム市場やアンシラリーサービスといった電力システム側の変革が議論されている中、太陽光パネルが持ちうる価値が変化する可能性がある。デマンドレスポンスなど、従来とは異なる価値を社会システムの中で持ちうる技術もありえる。こうした技術システムの価値や使用形態は社会システムの変化によるところも多く、将来の技術システムを評価することが重要となる。

● 自然科学と人文社会科学との連携に基づく技術評価

エネルギー技術の導入が社会経済システムや人々の意識・行動に与える影響を明らかにするためには、自然科学的な観点のみならず、人文社会科学的な観点からも分析することが不可欠であり、Sociotechnical な分析が必要とされてきている<sup>20)</sup>。

低炭素社会の達成に向け、再生可能エネルギーなどの技術導入・普及政策が、社会システムにもたらす影響について事前に分析することが非常に重要となる。この点は「15. エネルギーシステム評価分野」にも深く係わり、エネルギーモデルを用いた研究も重要であるが、当該領域におけるライフサイクル思考に基づく分析や評価もまた不可欠である。例えば、木質バイオマス発電やバイオエタノールの設備建設、燃料生産、運転保守、廃棄というライフサイクルにわたる雇用創出や地域活性化などに関する社会経済分析は、それらの技術の普及促進政策の立案において重要な知見を与える。

また、消費者の価値観、ライフスタイル、行動などの変革も低炭素社会の構築においては重要な位置を占める。例えば、消費側の変革に向けて、社会においてライフサイクル思考自体を普及させるためには如何なる方策が有効か、また、製品レベルの LCA 情報などを消費者へ如何に効果的に伝達するか、などは引き続き重要な研究課題である。

以上のように、社会経済システムや人々の意識・行動の観点から、エネルギー関連技術の導入の影響を明らかにすることは今後不可欠であり、当該分野においては、ライフサイクル思考に基づく学際的な研究の重要性がますます高まっていくと考えられる。

● 最先端技術の詳細度に合わせたシステム評価

上記項目と関連するが、実際の技術開発における選択肢と、資源・生産・消費管理における評価との間に、技術システム条件の粒度の違いが存在している。例えば、蓄電池の技術開発において議論されているエネルギー容量や、電池寿命、C-rate をはじめとする充放電性能などは、現在の蓄電池 LCA における技術シナリオとして必ずしも明確に検討されていない。また、蓄電池としては移動体搭載向けのもが多く議論されているが、本来は定置型蓄電池の技術開発がもたらす低炭素化効果と比較することで、蓄電池開発の優先順位を議論すべきである。こうした技術開発の粒度との差異を埋めていき、実験的な技術開発における指針として、資源・生産・消費管理におけるシステム評価結果が利活用できるようになることが、技術システムイノベーションのマネジメントにおいて重要となりうる。

● 国際的な産業連関を考慮した技術評価

再生可能資源の利用量を増加させるために、国際的な再生可能資源の輸出入が活発化しつつある。これは、再生可能性資源が大量に入手可能な国・地域と、エネルギー需要密度が高い国・地域が必ずしも一致していないために起きるものである。国内においても、固定価格買取制度で認証されたバイオマス発電所において、輸入バイオマスの利用が多数計画されている。木質バイオマスに限らず、パーム油やパーム椰子殻など、品目が増えてき



ており、計画通りに発電が開始されると輸入量も大きく増加しうる。このとき、国内では化石の代替としてバイオマスを用いることにより低炭素化効果を見込むことができるが、実際にバイオマスを輸出している国における実態として、国・地域の社会経済に引き起こされる影響や、リバウンド効果として発生しうる化石資源消費量の増大については、国際的な産業連関を考慮しながら技術の評価を実施すべきである。

## （6）その他の課題

### ● 過去の研究の再評価

LCAをはじめとした評価手法により環境影響などが定量化された研究が蓄積してきているが、電力システムをはじめとしたエネルギーシステムや、生産におけるインベントリが、プロセスシステムの省エネ化などによって変化している。10年など、一定の期間を経過した過去の研究対象については、Updateのための研究を実施すべきである。しかし、科学研究においては、こうした過去の結果の再評価に関して、研究費等を獲得しやすい状況にはなっていない。常に更新しながら現状を把握すべき環境性能などの技術システムの側面については、何らかの仕組みで継続的な分析を可能とすることが必要といえる。

### ● その他

分野間連携や若手人材の育成という観点では、当該分野の研究者ネットワークをさらに拡大していくことが必要といえる。サプライチェーンについてはますます国際化も進んでいることから、国際プロジェクトの支援も必要といえる。新規な技術開発における評価を実施するためには、新規技術のプロジェクトに対して、資源・生産・消費管理の観点からのシステム評価を義務付けるプロジェクトをさらに増やしていくことも有効といえる。

## （7）国際比較

資源・生産・消費管理においては、多くの研究が実際の技術システム・社会システムを対象としたものであり、応用研究といえる。そこで、基礎研究としては手法論やデータベースの開発に関して記載し、特定の技術システム・社会システムを対象としたものは全て応用研究として記載する。

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	○	→	インベントリデータベースとして IDEAv2 が公開された。国内のデータベースとしては最大のものであり、多くの LCA 研究で使用可能な状態となっている。また、日本版被害算定型影響評価手法 (LIME: Life-cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modelling) が広く一般的に利用可能となっており、インベントリデータベースと合わせて国内の状況を反映させた評価が可能となっている (2018 年には、国内評価版の LIME2 を踏襲し、グローバル評価が可能 LIME3 も公開された)。工業団体等からの提供データを格納した JLCA-LCA データベースも存在しているが、データの更新は必ずしも頻繁ではない。
	応用研究・開発	○	→	LCA やマテリアルフロー分析、産業連関分析を用いた各種研究報告がなされているが、かねてより、他国と比べて、温室効果ガス排出に特化した評価が多いことが問題となっている。近年でも、LCA を実施するとしながらも温室効果ガスを算定するだけにとどまる研究が多く、総合的な環境影響が評価されていない事例がある。国のプロジェクトにおいても、エネルギー起源の温室効果ガスの排出量のみを分析対象として公募されているものがほとんどであり、他国と比較して、環境影響の総合評価と、持続可能性の評価に関し、認識の違いができてきている。
米国	基礎研究	○	→	応用研究に比べると基礎的な手法論の研究報告は多国と同等の論文数であった。Social Life Cycle Assessment についてはイタリアやドイツ、カナダなどに比べて論文数が少ない。
	応用研究・開発	◎	↗	かねてより研究開発が盛んであり、近年もそれを維持している。いずれのクラスタにおいても上位の論文数を発刊した国としてランクインしている。特に、近年、太陽電池やリチウムイオン電池に関する研究報告が多くなってきており、建造物に関する研究事例も、中国に次いで 2 番目に多くの研究報告を挙げている。食品関連でもイタリアに次いで多い。水処理やバイオ燃料、サプライチェーン、シェール・新資源、においては、世界トップの論文数となっている。
欧州	基礎研究	◎	↗	世界最大のライフサイクルインベントリデータベース ecoinvent のデータ更新を継続的に行っている。現在の最新版は 2018 年 8 月 23 日に公開された version 3.5 である。 ecoinvent や Social Life Cycle Assessment 手法の開発は、欧州全体で執り行われていることであり、研究開発が盛んである。 イギリス化学工学会が総説した Journal である Sustainable Production and Consumption では、応用研究だけでなく、システム最適化手法における目的関数に LCA の結果などを置き、生産システムの特続性を高める方法論の議論が展開されるようになっている。 ドイツでは Social Life Cycle Assessment に関する研究が多く報告されている。
	応用研究・開発	◎	↗	かねてより研究開発が盛んであり、近年もそれを維持している。いずれのクラスタにおいても、欧州各国は論文数で上位に位置しており、研究が活発に行われているといえる。特に、イタリア、スペイン、英国、ドイツ、フランス、オランダ、デンマーク、スイス、ノルウェーの順に論文が多い。特定の研究機関としては、デンマーク工科大学、ライデン大学、マンチェスター大学、スイス連邦工科大学、ミラノ大学、ミラノ工科大学からの発表数が多く存在している。 なお、2013 年からは、これまでの研究成果の蓄積を踏まえ、欧州委員会が環境フットプリントのパイロット事業を開始しており、域内外のステークホルダーに参加を求めながら、日用品、工業製品、食品、組織のフットプリント評価カテゴリー開発を進めている。 再生可能エネルギー関連や、バイオ燃料、シェール・新資源関連の研究報告が増えている。マレーシアにおけるパーム産業に関する研究報告もなされている。 ベルリン工科大学などを中心に研究報告が増えている。太陽光等の再生可能エネルギー関連について論文数が増加している。 ミラノ大学、ミラノ工科大学をはじめとするイタリアからの研究発表が増加している。特に食品関連分野においては群を抜いて多くの論文が報告された。スペインからは特に水処理に関する研究報告や太陽光、風力に関する論文が報告されている。ecoinvent を有するスイスからの研究報告も多い。

中国	基礎研究	×	↘	中国国内のライフサイクルインベントリの多くはecoinventに格納されているが、一部のサプライチェーンにとどまっており、多くは明らかとなっていない。環境影響を定量化するためのライフサイクルインパクト評価手法についても、中国の状況に合わせた解析をできる係数は、完全には整備されておらず、手法論の開発水準は高くないといえる。
	応用研究・開発	◎	↗	清華大学からの研究報告が増加しており、多くのクラスタにおいてもトップレベルの論文数となっている。特に建造物や廃棄物利用に関する研究報告は世界でトップであり、報告件数が多い。ただし、サプライチェーンに関する研究報告は比較的少ない。
韓国	基礎研究	△	↘	特に目立った研究開発がなされておらず、報告論文数も少ない。
	応用研究・開発	△	↘	特に目立った研究開発がなされておらず、報告論文数も少ない。ただ、電子産業のサプライチェーンなど、韓国が関連するライフサイクルについての研究報告が他国からなされることがある。

(註1) 「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2) 「現状」 ※我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。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) 「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考・引用文献

- 1) 東京大学イノベーション政策研究センター、東京工業大学梶川研究室「学術俯瞰システム」、  
<http://academic-landscape.com>（2019年2月1日アクセス）。
- 2) SETAC Europe 2016,  
[http://nantes.setac.eu/nantes/home/?contentid=1009&nv=853&pr\\_id=1009](http://nantes.setac.eu/nantes/home/?contentid=1009&nv=853&pr_id=1009)（2019年2月1日アクセス）。
- 3) SETAC Europe 2017,  
<https://brussels.setac.org/programme/scientific-programme/>（2019年2月1日アクセス）。
- 4) SETAC Europe 2018,  
<https://rome.setac.org/programme/scientific-programme/>（2019年2月1日アクセス）。
- 5) ISIE/ISSST 2017 Joint Conference,  
<https://is4ie.org/events/isie-conferences/1>（2019年2月1日アクセス）。
- 6) 第13回日本LCA学会研究発表会、  
[http://www.ilcaj.org/meeting/13th/files/program\\_final.pdf](http://www.ilcaj.org/meeting/13th/files/program_final.pdf)（2019年2月1日アクセス）。
- 7) S. Hellweg and L. Mila I Canals, “Emerging Approaches, Challenges and Opportunities in Life Cycle Assessment,” *Science* 344, no. 6188 (2014): 1109-1113.
- 8) UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, *Guidelines for social life cycle assessment of products*, 2009,  
[http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/dtix1164xpa-guidelines\\_slca.pdf](http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/dtix1164xpa-guidelines_slca.pdf)（2019年2月1日アクセス）。
- 9) Morgan Bazilian *et al.*, “Considering the Energy, Water and Food Nexus: Towards an Integrated Modelling Approach,” *Energy Policy* 39, no. 12 (2011): 7896-7906.

- 10) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), “The Water-Energy-Food Nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture,” 2014,  
<http://www.fao.org/3/a-bl496e.pdf> (2019年2月1日アクセス) .
- 11) 例えば、International Conference on Process Systems Engineering, 2018 (PSE2018),  
<https://pse2018.org/index.cfm> (2019年2月1日アクセス) .
- 12) European Commission, “Closing the loop: Commission adopts ambitious new Circular Economy Package to boost competitiveness, create jobs and generate sustainable growth,” 2015,  
[http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-15-6203\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-6203_en.htm) (2019年2月1日アクセス) .
- 13) World Economic Forum and Ellen MacArthur Foundation, “Intelligent Assets: Unlocking the Circular Economy Potential,” 2016,  
[https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation\\_Intelligent\\_Assets\\_080216.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_Intelligent_Assets_080216.pdf)(2019年2月1日アクセス) .
- 14) “Special Issue: Exploring the Circular Economy,” *Journal of Industrial Ecology* 21 (3) (2017):471-795,  
<https://onlinelibrary.wiley.com/toc/15309290/21/3> (2019年2月1日アクセス) .
- 15) European Commission, Single Market for Green Products, “The Environmental Footprint Pilots,”  
[http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/ef\\_pilots.htm](http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/ef_pilots.htm) (2019年2月1日アクセス) .
- 16) *Journal of Industrial Ecology*, Call for paper, “Life Cycle Assessment of Emerging Technologies: Methodological challenges and new opportunities for impact,” 2018,  
<https://jie.yale.edu/life-cycle-assessment-emerging-technologies-methodological-challenges-and-new-opportunities-impact> (2019年2月1日アクセス) .
- 17) ACS Sustainable Chemistry & Engineering, “Systems Analysis, Design and Optimization for Sustainability,” 2018,  
<https://pubs.acs.org/page/ascecg/vi/systems-analysis-optimization.html> (2019年2月1日アクセス) .
- 18) FSLCI: Forum for Sustainability through Life Cycle Innovation, 1st Life Cycle Innovation Conference (LCIC 2018), 2018,  
<https://fslci.org/lcic2018/> (2019年2月1日アクセス) .
- 19) UNEP, Global LCA Data network (GLAD),  
<https://www.lifecycleinitiative.org/resources-2/global-lca-data-network-glad/> (2019年2月1日アクセス) .
- 20) Frank W. Geels *et al.*, “Sociotechnical Transitions for Deep Decarbonization,” *Science* 357, no. 6357 (2017): 1242-1244.

## 2.25 リサイクルと循環利用

### （1）研究開発領域の定義

リサイクル・資源利用効率化に関する科学、技術、研究開発を記述する。

資源利用の効率性や持続可能性をより一層進めるための処理技術、リサイクル技術等を扱う領域である。

ここでは、都市鉱山を含む様々な資源の物理的処理、化学的処理、生物学的処理の要素技術開発に加え、AIやIoT、センサ、ソーティング、データ基盤整備などの情報処理技術による分離や管理技術、資源の採掘から循環利用、最終形態までを考慮した製品設計やデザインやシステム構築などを対象とする。

### （2）キーワード

資源効率、都市鉱山、分離・選別技術、ソーティング、解体、トレーサビリティ、資源循環、廃棄物処理、中間処理技術、量のリサイクル・質のリサイクル、プラスチックリサイクル、臭素系難燃剤、使用履歴管理、フィードストックリサイクル、焼却残渣、新規普及製品リサイクル技術（太陽電池パネル、リチウムイオン電池、CFRP等）、AI・ロボット応用

### （3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

持続可能な発展が人類社会共通のゴールとなって久しく、資源利用という側面からは、その利用効率の向上が叫ばれ続け、例えばSDGsの目標12.2では「2030年までに天然資源の持続可能な管理および効率的な利用を達成する」が掲げられている。他方で、現在開発途上にある諸国にとって、その基盤を構築するための基礎素材、そして先進諸国にとっても先進材料の利用など、資源利用そのものを避けられない場面もある。よって、可能な限り利用効率を高めること、すなわち長期利用、循環的利用、歩留まりの向上などが必須になる。

天然資源の開発現場を見れば、広い意味での劣化（低品位化、開発現場の大深度化、環境影響の拡大など）が起きつつあり<sup>1)</sup>、その利用のための費用は増加し続けている。これは、天然資源を代替するリサイクル材に許容される費用も上昇していることを意味し、その利用拡大のチャンスであり、また利用拡大が我々の資源利用の社会的費用を削減することにもつながる。また我が国の立場から見れば、国内で発生する循環資源は、天然資源に乏しい我が国にとって貴重な国産資源であり資源セキュリティの意味からその利用拡大は望ましい。その際、一つの側面だけで考えるのではなく、社会的にみて持続可能な資源循環技術が望まれていることに留意する必要がある。

プラスチックについて、2015年に世界のプラスチック生産量は3億tを超えたが<sup>2)</sup>、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。世界規模の資源利用効率の向上、海洋汚染対策の観点などからも研究開発の進展が期待されている。

### [研究開発の動向]

本領域の俯瞰では、循環的利用に関わる問題に中心をおくこととした。また、課題解決型であり工学的側面の強い領域であるため、基礎学理のような学術的な意義を追求するよりも、新しい技術を使いこなすことに主眼を置くこととした。関連分野全てを網羅的に扱うことは難しいため、素材産業、例えば金属精錬等の素材技術開発の一環として整理される技術の言及は極力避けることとした。

リサイクルは大きく2種類に分類できる。それは加工ロスからのリサイクルと、使用済製品からのリサイクルである。前者は発生源が明らかで、素材の組成等の情報も得やすく、動脈側のステークホルダーを中心に取組まれてきた。一方、後者は、時として複雑な構造をもつ人工物から、利用可能な資源を回収する行為であることから、主として含有量の多い、そして比較的単一の（特に金属）素材からなる部材を中心にそのリサイクルが進められてきた。代表的な素材が鉄鋼材であり、アルミニウム素材である。これらに加え、銅などのいわゆる非鉄ベースメタルのリサイクルは比較的進んでいる。

ところが、社会的要請として違う種類のリサイクルが求められるようになってきている。その一つの対象がレアメタルなど量の少ない物質であり、更にプラスチックである。レアメタル等については、回収対象の使用済製品の中での含有量が少ないこと、また資源回収の最後段に位置する素材精錬において、いわゆる非鉄ベースメタル製錬の副産物として必ずしも回収されないものがあることなどから、分離・選別の段階である程度選択的に分ける必要がある。価値が高いと言っても貴金属ほどではないことから、経済的に成立させるためには新しい技術が必要になる。また、プラスチックについては昨今の海洋ごみ、マイクロプラスチック問題などから注目を集めているとともに、そもそも使用量の大きさに比してマテリアルリサイクルの規模の小さいことが常に懸念されており、現在利用されている主要な素材の中で言えば資源利用効率の全体的向上に我々が取り組むべき最後の大きな対象素材であるといえる。

上記の背景から、ここ数年の技術的变化と現時点の状況として以下があげられる。

- 金属を念頭におけば、リサイクルには人工物中に存在する対象金属を純度の高い産物へ分離濃縮する技術が必要である。常温で、物理的もしくは物理化学的な特性を利用して固体のまま濃縮するいわゆる選別技術と、熱や薬剤、電気などを用いて溶液や溶体から回収する乾式製錬、湿式製錬、あるいは電解精錬技術の二つに大別できる。このうち前者の選別技術の進展は、ここ数年の注目の高まりからか急速に進化をはじめている。
- 選別技術は正確には前段を担う単体分離技術があり、その上での選別が必要になる。選別技術の進展に伴い、単体分離技術自体が変わりつつある。基本的に破碎・粉砕であることに変わりはないが、圧縮力を用いた粉砕から、対象によるものの衝撃力を用い、異相境界面を選択的に破壊する「小さなエネルギーで過粉砕を避けつつ必要な単体分離を行う」タイプの破碎・粉砕への注目が高まっている。具体的にはドラム型衝撃式破碎機（パーツセパレータやクロスフローシュレッダ）などは、小型の電子機器類からの基板脱離や、更に基板からのパーツ類の脱離を目的に徐々に現場での利用が始まっている。また、水中で高電圧放電を発生、放電経路周辺の液体を急速に気化膨張させて衝撃波を発生させる電気パルス粉砕などが注目を浴びている。
- 選別に関してはセンサを用いるソーティング技術が急速に進化している。ただし10mm以上と比較的粗粒でかつ単体分離の進んだものが対象になることから、単体分離技術との

組み合わせが必要である。近赤外線、X線、レーザーなどの利用が進んでいる。例えばアルミ合金類の相互分離は難しいとされてきたが、我が国で世界初のレーザー誘起ブレイクダウン分光法（Laser Induced Breakdown Spectroscopy: LIBS）ソータが実用化された。この分析技術は、ほぼ全ての元素について ppm オーダーでの分析が可能であり、ミックスメタルや鉄合金の分類などへの適用にも期待がかかっている。

- センシングの結果の処理も必要であることから、情報処理技術の利用も急速に進化しつつある。電磁波利用の他に、画像処理による形状、大きさ、色など様々な特性のデータを用いることが出来る。これらの利用が進んでいる背景として、情報処理技術が進展していることも大きい。
- 単体分離・選別は循環資源に限ったものではなく、天然資源由来の鉱石についても技術の高度化が求められている。広い意味での鉱石の低品位化、これは欲しい成分が薄くなるだけではなく、忌避成分がより多く含まれるといったことも発生していることに起因する。こうしたことから固体分離に関する理論的な解明なども徐々に進みつつあり、これは循環資源の利用高度化に対しても好影響を与えることが期待される。鉱石については走査型電子顕微鏡画像と顕微鏡画像を組み合わせ、単体分離度を計測する自動鉱物単体分離システムの導入が進んでおり、また同様のアイデアに基づいた装置開発も進んでいる。
- 探査結果のビッグデータの分析や鉱山内での無人化へ向けたロボット技術の開発など資源関連分野全体に AI/IOT 技術の利用が急速に進んでおり、本分野も例外ではない。日本の ARENNA ソータ<sup>3)</sup>、フィンランド ZenRobotics<sup>4)</sup> が先行していたが、現在では米国 BulkHandling Systems<sup>5)</sup>、米国 AMP Robotics<sup>6)</sup> から同様の選別装置が上市されている。AI 画像認識ソータは旧来の単一分析に基づくソータに比べて、分類可能なクラス数と認識精度の点では格段に優れるが、複雑な計算アルゴリズムに基づくために処理速度は遅くなる傾向にある。現状において旧来の単一分析ソータを代替するものではなく、これまでソータが適用されてこなかった手選別工程に導入される事例が多い。こうしたことから AI 画像認識ソータでは、後段に多関節ロボットアームを配置してピックアップ選別を行う装置が主流となっている。最近では人手を上回るピックアップ速度（65 回/分）を有する装置も登場しており、米国の容器包装リサイクル現場で活用が始まっている。
- 機器に用いられるようなプラスチックのリサイクルはかなり大規模に検討されている。機器系プラスチックにおけるマテリアルリサイクルの課題は多いが、昨今の大きな課題は臭素系難燃剤である。残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約で規制対象とされていることから、廃プラスチックからこれらを含むものを選択的に除去する必要がある。家電リサイクルの一部では、透過 X 線ソータで分離するもの<sup>7)</sup>、比重分離を行うものなどが見られるが、大量に効率的に行える技術があるとは言い難い。また、自動車などにおいては、要求される品質を満たすためにタルクなどが添加されており、一口にポリプロピレンと言っても全く同じではない。結果として物理特性が異なることから物理選別を難しくしており、課題は多い。
- 日本では、材料リサイクルとフィードストックリサイクル、サーマルリサイクル（セメント原燃料化、ごみ発電、廃棄物固形燃料化など）の 3 つのプラスチックリサイクル手法が実用化されている。フィードストックリサイクルは廃プラスチック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る。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。

- ベースメタル中心のリサイクルから、含有量の大きくないレアメタル、貴金属、そして多種多様な合金類、また様々な添加剤、難燃剤などの問題の多いプラスチックなどがリサイクル対象になっていることから、その組成情報などをサプライチェーン全体で管理する、物質循環の高効率化のためのある種の情報管理が求められている。これは動脈側だけの問題ではなく、静脈産業側においても、再生材の付加価値向上のためにもトレーサビリティの確保は広く求められ、例えば静脈物流におけるブロックチェーン技術を求めた情報の制御なども検討されはじめている。<sup>8)</sup>
- 廃棄物焼却処理に関して、日本は世界最高の焼却率 80%に達しており、リサイクルされなかった可燃物もほぼ全量が焼却できている。近年では、埋立処分の約 9 割を焼却残渣が占めている。国土が狭く最終処分容量の新規確保が難しいこともあり、焼却残渣をセメント原料に加工する有効利用率の向上が期待されている。しかし、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る。欧州でも日本と同じく、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。国土が広大な米国では埋立処分が多勢を占めるものの、テネシー州、ペンシルバニア州などでは焼却灰を盛土材、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。
- 金属の精錬において、特に鉱山現場において湿式精錬が拡大しつつある。それは低品位化が進み、物理的な選鉱から乾式製錬という流れが馴染みにくく、また物流費の問題等から鉱山現場で製錬まで行う方が合理的だという背景もある。湿式精錬の一部で微生物を利用して金属を浸出させるいわゆるバイオリーチングの検討が進みつつあるが、これについて例えば電子機器類の基板からの貴金属回収への応用が進みつつあり、あわせてそのほかのレアメタル回収を念頭に置いた技術開発も動きつつある。<sup>9)</sup>

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

- 欧州委員会による循環経済（Circular Economy：CE）パッケージ採択とその展開

我が国の循環型社会という発想は、より効率的な資源利用を通し、天然資源消費を削減、また環境負荷を低減しようというものだが、欧州の CE はこれを通し、環境だけではなく経済にも好影響を与えることを明示的に目標においた経済政策として整理されている。

- プラスチックリサイクルの気運の高まり

2018年6月のG7シャルルボワ・サミットにおいて海洋プラスチック憲章が発表されたが、我が国は署名しなかったこともあり、大きな話題になった。ただし、我が国が海洋プラスチックを始めとする諸問題を軽視しているわけではなく、2018年12月現在、環境省がプラスチック資源循環戦略の案を作成しパブリックコメントを実施している。<sup>10)</sup> 我



が国では G7 サミット以前から、自動車リサイクル法において再生プラスチック利用の促進が議論され、各ステークホルダーが実証をはじめている。いずれにせよ、これまで採算の問題などから進まなかった容器包装以外のプラスチックリサイクルが大きく進む社会的機運が醸成されたといえる。

- レアメタルブームの沈静化

レアメタルブームと呼ぶべき状況が落ち着いたが、多くのリサイクル技術研究が行われたことは本領域にとって望ましいことであり、より選択的な単体分離技術などは、レアメタル回収などが契機になって進んだとあって良い。現在はここで行われた研究の中で取捨選択を行い、社会実装の段階へ進むべき状況にある。

- エネルギー関連技術に対するリサイクルの必要性

太陽光パネルのリサイクルに対する懸念が広がっている。年間最大で 80 万トン余りのパネルが発生するといった予測もある。これが全量最終処分されると、最終処分場の逼迫につながる一方、太陽光パネルの素材としての価値は極めて低いことから、効率的な適正処理技術が求められている。また、リチウムイオン電池など二次電池の適正処理技術への期待が高まっている。太陽光パネルの例と同じく有価性はそれほど高くないが、紛争地域であるコンゴが主たる供給国であり天然資源供給リスクが高いため、リサイクルへの期待も少なくない。現時点で決定版とよべる技術は存在していない。

- リユース判定技術への期待の高まり

上記のエネルギー関連技術については、製品自体が進化の途上にあることなどから、利用可能な製品が使用済として発生する可能性もある。よって、リユースへの期待も高い。その他の製品についても同じくではあるが、リユース、リマニファクチャリング（リマン）など、材料リサイクル以前にすべき循環利用を進める機運もたかまりつつある。そのために、製品がリユース可能かどうかを判定する技術などへの期待も高まっている。

- 使用履歴管理の必要性

リユース等については、使用履歴を含めた製品の情報管理が必要になる。例えば自動車用二次電池では走行履歴を把握することで、リユースの可能性の簡易推定が可能となる。こうしたデータを蓄積し、学習することでより正確に判定可能となる。上述の含有物質情報の把握や、静脈産業のトレーサビリティなど、サプライチェーン全体を通じた情報管理技術の導入が望まれる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- 欧州の CE 政策の実施に向け、欧州委員会 Horizon 2020（多国間研究開発・イノベーション促進プログラム）の Resource Efficiency and Raw Materials 等からリサイクル関連分野に大きな研究資金が提供されている。この多国間プログラムには、我が国の研究者も参加しているプロジェクトが散見される。<sup>11)</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。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、技術開発だけでなく、基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。

- 米国エネルギー省の資金を利用し、Critical Material Institute (CMI) とよばれるバー

チャルの研究組織が構築され、その中でリサイクルに関する研究も実施されている。CMIの中核をなすエイムズ研究所と我が国のNEDOは協力協定を締結、情報共有等を行っている。<sup>12)</sup> 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年で150億円規模の研究が実施され、2018年12月現在も30以上のプロジェクトが継続している。また、2016年6月から、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Reducing EMbodied-energy And Decreasing Emissions (REMADE)が開始している。

- 我が国では本領域に関連する研究は、大型プロジェクト等はあまり実施されてきておらず、個別の研究プロジェクト等が支えてきた。例えば環境省・環境研究総合推進費や科研費などのプロジェクトの中に多くの成果が見られる。最近では、2017年からJST未来社会創造事業・探索加速型「持続可能な社会の実現」領域がこれに密接的な課題（重点テーマ：新たな資源循環サイクルを可能とするものづくりプロセスの革新）を採択しており、本分野における期待が高い。小型家電リサイクルでは、NEDO「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業」（2017～2022）の大型プロジェクトが実施されている。<sup>13)</sup> このプロジェクトは産業技術総合研究所の戦略的都市鉱山研究拠点（Strategic Urban mining REsearch base : SURE）及びSUREコンソーシアムが核となっており、2018年6月には集中研究施設である分離技術開発センター（Center for Developing Separation Technology : CEDEST）が開設し、本格研究の発展が期待されている。

#### (5) 科学技術的課題

個別の技術課題以外で検討すべき課題は以下の通りである。

- 単体分離に関する科学的な機構解明は、現時点で利用可能な様々なシミュレーション技術等を考えれば極めて低いレベルにあり、積極的に研究開発を推し進めるべきである。これまで、当該分野は現場担当者の経験によって様々な課題を解決してきたが、理論的解明の推進が必要である。我が国の社会構造的課題である少子・高齢化などに伴う労働人口不足、経験知の喪失といった問題にも関係し、早期に手を打つべき課題である。
- 中小規模の現場が多く、そこにある経験知は構造化されていない課題がある。これを構造化しようとするような研究も若干は見られるが、より大規模に情報の集約を進め、これらを機械学習等によって半自動的にでも利用可能にすべきである。これは上記の理論的解明と同時並行的に行われるべき課題である。
- サプライチェーン全体を通じた情報管理技術も課題である。ブロックチェーンなどの情報セキュリティ技術との組み合わせも含め、世界全体のスタンダードの取り合いが起こることが容易に想像できる。実際フランスからCEのISO化に関する提案がなされており、早めの対応と、国際動向の見極めが重要になる。

個別の技術課題のうち、特に重要なものは以下の通りである。

- 様々なセンサーソーティング技術について対象にかかわらず、センシング技術とそこから得られた情報を処理する技術の組み合わせであるが、それらのより積極的な技術開発が必要である。
- レアメタル等はブームが沈静化したとはいえ、本領域の対象として引き続き重要である。
- プラスチックや太陽光パネルのガラスに見られるように、有価性は必ずしも高くないが大

量に使われる素材の利用法は重要な社会課題である。例えば太陽光パネルのガラスについて、粉砕せずに綺麗な一枚のガラスとしてガラス以外の部材と分離する技術の開発が一部で行われているが、剥離した後のガラスの用途が実は明らかではない。再生利用は需要があって初めて成立するものであり、再生利用のための技術と、その用途開発は車の両輪である。これは特に有価性の低い素材について顕著であり、逆に再生材を使った新しい製品開発などが必要である。

- プラスチックについて、喫緊の課題としては先述の通り臭素系難燃剤含有プラスチックの除去技術が上げられる。また二次電池の適正処理技術も、急速な自動車の電化などを考えれば比較的喫緊の課題である。炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastic：CFRP）の自動車部品適用拡大に伴い、CFRP リサイクル技術開発も喫緊の課題である。
- 将来的には現在ある破碎・粉砕中心の単体分離技術ではなく、ロボットによる解体へ一気に進む可能性がある。アップルコンピューターの取り組みはよく知られているが、ロボット解体は手解体を代替する技術であり、すなわちパーツレベルのリユースなど、リサイクルよりも優先順位の高い循環的利用を促進する技術である。本領域におけるロボットの利用という意味では我が国ではあまり取り組まれていない。
- 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。

#### (6) その他の課題

- 本分野の研究者人口が少ない。これまでリサイクルを担ってきた静脈産業が比較的中小企業によって構成され、あまり産業からの資金投入がなされてこなかったこと、また現場対応型のある種極めて工学的な分野であることから例えばインパクトファクターの高いジャーナルが無いことなどもあり、若手研究者にとって必ずしも魅力的な分野とは言えないことなどが背景にある。
- 研究資金について、動脈側の産業がより積極的に関わることで改善する可能性があるが、欧州が Horizon2020 から大型の資金投入を行っていることを参照すれば、我が国でもより積極的な対応があっても良いと思われる。
- 他分野との連携が比較的弱い。分離・選別技術に関する分野と素材関連分野との連携は歴史的に見てもそれなりになされてはいるものの、機械系の分野や物理シミュレーションの分野などとの連携はまだまだ少ない。バイオ関連技術の利用なども起きつつあるが、まだ十分ではない。
- 欧州などで、大型のソーティングセンターを設置するという提案が見られる。これは、ビジネスとしてみれば規模の経済を働かせるための仕組みに過ぎないが、こうした大型の処理施設は、研究開発の場として利用する可能性がある。我が国の静脈産業が比較的中小規模だが、技術開発のための資金投入とあわせ、こうした実証の場を確保するための公的促進策等が求められる。

- 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。多くの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。

(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>● 単体分離の基礎研究は世界的にあまり進んでいない。我が国でも現象の機構解明などについて多少のシミュレーションアプローチが見られつつあるが決して多くない。</li> <li>● 独自の鉱山向け粉砕・選別技術の開発など、国として高い技術蓄積をもつが、技術者の高齢化、研究者人口の減少などもあり、再興が急務の課題。</li> <li>● プラスチックのフィードストックリサイクルなどの基礎研究は継続的に行われている。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く、本分野の成果が表面化しにくい側面がある。</li> <li>● 焼却残渣の循環資源化に関する基礎研究も継続的に行われている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● LIBS ソータの実用化や電気パルス破砕など技術の社会実装は進みつつあるが、諸外国と比して圧倒的に進んでいる状況ではない。システムの側面は欧州に圧倒的に遅れている。他方、乾式製錬等の分野は多くの現場を持つこともあり決して弱くはないことから、分離・選別技術の開発という意味では若干の優位性がある。国際誌における論文数等でいえば非常に多いというわけではないが、本領域については和文誌に重要な論文が見られることもあり、評価は難しい。</li> <li>● 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。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。中小工場が多いため、装置単位での導入が主体で、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。装置メーカーから見ると保守的な市場で、手選別代替 AI などの新規技術導入に慎重な工場が多く、応用研究が進みにくい風土となっている。</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数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>14)</sup>。</li> <li>● 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を開発している。</li> </ul>
米国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 資源循環分野に強い国ではなく、それは基礎研究、応用研究ともいえる。特に基礎研究について顕著に改善する動きがあまり見られない。</li> <li>● 鉱山向け粉砕・選別技術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、CMI でも粉砕・選別技術の開発はあまり盛んには行われていない。</li> <li>● 都市廃棄物 (Municipal Solid Waste : MSW、日本の一般廃棄物に相当) においてプラスチックの材料リサイクル率は 10% に届かない低水準である。ただし、プラスチックリサイクルに関する基礎研究そのものの蓄積はある。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● CMI など実際の応用研究・開発が広がり始めている様子である。実用化する可能性があるとするならば動脈側の産業によるロボット解体など一歩先の技術開発・利用であり、アップルコンピューターの解体ロボット Liam, Daisy などがよく知られている。</li> <li>● 大規模集約的な中間処理が主体で「量のリサイクル」を実施している。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とともに、AI 大国にふさわしく、AI 選別装置メーカーが立ち上がり、市場導入が盛んになっている。</li> </ul>

欧州	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●単体分離の基礎研究は世界的にあまり進んでいない。欧州も例外ではない。</li> <li>●鉱山向け粉砕・選別技術のポテンシャルは極めて高い。ドイツ、スウェーデン等を中心に研究開発も進められている。中性子線やテラヘルツ波)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>●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>15)</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で、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碎、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>●基礎研究よりも応用が盛んであることは間違いないが、欧州は分離選別技術について一歩進んでいる。ソーティングセンターの設置など社会実装を進める中で研究も同時並行的に進んでいる。体系的なアプローチにも優れ、情報管理やリサイクルシステムの評価などの面においても明らかに我が国などと比べ進んでいる。学術側を見ても、後者のシステムに関する論文数などは非常に多い。</li> <li>●大規模集約的な中間処理が主体だが「質のリサイクル」へ移行可能な技術蓄積を有している。特に複数の装置メーカーでLIBソータ開発が一気に進展するなど、個別選別技術では世界トップ水準を維持している。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が、AI選別装置の製品化は意外に少ない。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> </ul>
中国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●単体分離の基礎研究は世界的にあまり進んでいない。中国も例外ではない。</li> <li>●現状の技術水準は高くないが、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>●2008年頃からプラスチックリサイクルに研究文献数が急増している。近年、自動車リサイクルに関連した基礎研究も見られる。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●社会実装すべき現場を多く持つこと、意思決定の速度の速さなどから急速に他国をキャッチアップしている。国際誌における関連する論文数なども急速に増えつつある。天然資源開発の現場を持つことによる優位性はある。</li> <li>●手作業による人海戦術的手法が主体だったが、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く、欧州の最新ソータをそのまま導入するケースが目立つ。今のところ自国での製品化は見られないが、ここ数年、関連特許の出願が急増しており、AI研究人口の多さからも今後の動向には注意が必要である。</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品質の良い廃プラ確保が課題である。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。</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>●単体分離の基礎研究は世界的にあまり進んでいない。韓国も例外ではない。</li> <li>●現状の技術水準は高くないが、日本との交流も深く、国立研究機関による集約的研究体制は日本よりも整備が進んでいる。</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>●状況は我が国とある意味近く、学術的な交流も多い。また社会システムの進展度合いも非常に近いことから社会実装される技術も近い。研究論文数でみれば多くも少なくもない。</li> <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。大学などでAIの応用研究も見られるが製品化には至っていないが、ここ数年、関連特許の出願数が急増している。</li> <li>●自動車リサイクル分野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」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2) 「現状」 ※我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。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない ×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) 「トレンド」

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考・引用文献

- 1) 村上進亮「明日を支える資源 (134) <連載：持続可能な資源の利用①>持続可能な資源の利用」『エネルギー・資源』34巻2号(2013): 107-111.
- 2) Plastics Europe, “Plastics – the Facts 2014/2015 An analysis of European plastics production, demand and waste data.”
- 3) 産業技術総合研究所「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> (2019年2月1日アクセス) .
- 4) ZenRobotics,  
<http://zenrobotics.com/ja/> (2019年2月1日アクセス) .
- 5) Bulk Handling Systems,  
<https://www.bulkhandlingsystems.com/> (2019年2月1日アクセス) .
- 6) AMP Robotics,  
<https://www.amprobotics.com/> (2019年2月1日アクセス) .
- 7) 井関康人、他「家電混合プラスチックの先進的リサイクル技術」『精密工学会学術講演会講演論文集』(2013), F31,  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2013S/0/2013S\\_407/\\_article/-char/ja/#article-overview-abstract-wrap](https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2013S/0/2013S_407/_article/-char/ja/#article-overview-abstract-wrap) (2018年8月22日アクセス) .
- 8) 「「ブロックチェーン」活用の意義・・・透明性・信頼性・追尾可能性の確保」『環境新聞』2018年1月31日 .
- 9) Arda Işıldar *et al.*, “Electronic Waste as a Secondary Source of Critical Metals: Management and Recovery Technologies,” *Resources, Conservation and Recycling* 135 (2018): 296-312.
- 10) 環境省 中央環境審議会 循環型社会部会 プラスチック資源循環戦略小委員会、  
<http://www.env.go.jp/council/03recycle/yoshi03-12.html> (2018年8月25日アクセス) .
- 11) European Commission, “Towards a circular economy,”  
[https://ec.europa.eu/commission/priorities/jobs-growth-and-investment/towards-circular-economy\\_en](https://ec.europa.eu/commission/priorities/jobs-growth-and-investment/towards-circular-economy_en) (2018年8月22日アクセス)
- 12) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「レアメタルの有効活用などで日米が協力 —米国エイムズ研究所と協力協定を締結—」、  
[http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_100224.html](http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100224.html) (2018年8月22日アクセス) .
- 13) 大木達也、「戦略的都市鉱山」を支える物理選別技術の新たな自動化思想—リサイクル工場の省人化を目指して、環境管理、54(7), 28-35, 2018
- 14) 林孝昌「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』26巻6号(2015):

440-448.

- 15) Plastics Europe, “Plastics - the Facts 2015 An analysis of European plastics production, demand and waste data.”
- 16) 所千晴「資源循環における固体分離濃縮技術の概要」『材料の科学と工学』54 巻 2 号 (2017): 48-51.
- 17) 古屋仲茂樹「資源リサイクングにおけるセンサー選別技術の最近の動向」『Journal of MMIJ』129 巻 10 号 (2013): 615-625.
- 18) Marc A. Hillmyer, “The Promise of Plastics from Plants,” *Science* 358, no. 6365 (2017): 868-870.
- 19) D. Larcher and J-M. Tarascon, “Towards Greener and More Sustainable Batteries for Electrical Energy Storage,” *Nature Chemistry* 7, no. 1 (2014): 19-29.

## 2.26 健康・都市生活

### (1) 研究開発領域の定義

健康、都市生活に関する科学、技術、研究開発を記述する。

気候変動による健康および都市生活への影響予測、評価、およびそれらに関する適応方策を扱う領域である。

ここでは、気候変動による都市気候の変化と住民の健康への影響（熱や感染症）の把握、その適応のための各種方策検討（都市構造の活用やグリーンインフラ等）などを対象とする。

### (2) キーワード

健康、気候変動適応策、温暖化ダウンスケーリング、予測不確実性、熱関連超過死亡（熱波、熱中症）、自然災害（洪水、台風、干ばつなど）、防災、低栄養、下痢性疾患、動物媒介感染症（デング熱、マラリアなど）、Co-benefit（共便益）、都市ヒートアイランド現象、ライフスタイル転換、地方自治体、超高齢社会、SDGs

### (3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

健康、都市生活への気候変動影響評価とは、ハザード（危険な事象）、曝露（影響を受ける可能性のある人的・物的損害の大きさ）、脆弱性の観点から気候変動による影響をリスク評価する手法である。影響予測はモデルを用いて行う。リスク評価は IPCC 第 5 次評価報告書の主要なリスクの特定の考え方から、基本的に「重大性」「緊急性」「確信度」の観点で行う。世界の平均気温は、最近 100 年間で  $0.73^{\circ}\text{C}$  上昇している。今世紀末には 1986～2005 年平均と比較して最大で  $4.8^{\circ}\text{C}$  上昇するという予測シナリオが提示されている。温暖化が不可避で、ますます深刻化する将来に向けては「緩和」努力に加え、温暖化を前提として「適応」していくことが欠かせない。気候変動「適応策」は、2015 年に採択されたパリ協定の第 7 条においても、強化が明確に位置付けられている。地球温暖化の進行により、社会的・経済的な影響が顕著に表れ始めており、「適応策」の能力向上、気候変動の影響に対する強靱化と脆弱性の減少も求められる。「緩和策」は、一般的に、エネルギー使用の効率化やエネルギー転換などが中心である。一方、「適応策」は、あらゆる分野に関わり、その内容・優先順位は地域ごとに異なる。気候変動の将来予測、その地域レベルへのダウンスケール、その結果を踏まえた地域への影響予測、地域特有の脆弱性とリスク評価、優先順位の設定、対策技術、社会実装化など、多岐に渡る研究がある<sup>1)</sup>。健康分野では、世界的に見ると、気候変動によって熱ストレスによる死亡者数、下痢性疾患、洪水による死亡者数の増加や、感染症を媒介する生物の生息可能域の拡大などを通じたマラリアやデング熱による死亡の増加がもたらされると予測されている<sup>2)</sup>。我が国のような先進国では、熱ストレスによる影響と洪水や台風などによる災害などの極端な気象による影響が特に重要である。世界の人口の半分以上が「都市」に居住している現在<sup>3)</sup>、ライフスタイルの転換は多くの場合、都市生活におけるものとして考える必要がある。適応は、クールビズを一例として、従来の慣行からの転換を促すものも含まれる。日本のような超高齢社会で特に、熱的快適性の議論にとどまらず、健康維持さらには生命維持のために不可欠となる。とりわけ、中緯度地域では豪雨の激甚化が起こる確信度は高いと予測されている。2018 年夏の多くの地域で起こった洪水被害や長引く熱波など、日本でも気候変動の影響が既に現れてお



り、深刻化が懸念されている。日本ではこれまで、温暖化対策は緩和策が中心であり、適応策の認知はまだ低い。また、単体の技術開発は進んでいるが、システムとしての社会実装はあまり進んでいない。一方、自然災害に対処するための防災対策は、既存の適応策と位置付けられる。

本領域はSDGsのうち目標3「すべての人々の健康」、目標11「持続可能な都市」に直接的に関係し、他にも間接的に関連する目標が含まれる。

#### [研究開発の動向]

##### ・温暖化ダウンスケーリング

気候変動が都市生活や住民の健康に及ぼす影響を予測・評価するためには、温暖化を適切に解析・予測できるシミュレーションモデルの開発が不可欠である。シミュレーションモデル開発では、文部科学省「人・自然・地球共生プロジェクト:温暖化予測「日本モデル」ミッション」（2002～2006年度）の成果がIPCC第4次評価報告書に、「21世紀気候変動予測革新プログラム」（2007～2011年度）の成果がIPCC第5次評価報告書に対して大きく貢献している。「気候変動リスク情報創生プログラム」（2012～2016年度）の成果もIPCC第6次評価報告書（2021～22年公表予定）に貢献することが期待されている。

全球気候モデルの空間解像度は通常100～数100km程度であり、そのままでは都市生活や住民の健康への影響予測・評価に用いられない。そのような空間解像度のギャップを埋めるために開発されてきたのが「温暖化ダウンスケーリング」と呼ばれる技術である。ダウンスケーリングは空間詳細化を意味する。全球気候モデルの出力結果をより高解像度のシミュレーションモデルを用いて空間詳細化を施す力学的ダウンスケーリングと、広域の気象場と局所の気象要素の経験的・統計的關係に基づいて空間詳細化を施す統計的ダウンスケーリングの2つの手法に大別される<sup>4)</sup>。「適応」を主眼とした文部科学省「気候変動適応研究推進プログラム」（2010～2014年度）と環境省「環境研究総合推進費S-8：温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究」（2010～2014年度）の中で世界をリードする温暖化ダウンスケーリングモデルの先導的な開発研究が進められた。特に、「気候変動適応研究推進プログラム」で開発された温暖化ダウンスケーリングモデル<sup>5),6)</sup>は、世界でも類を見ない空間詳細度であり、地球スケールから大陸・国スケール、地域スケール、都市スケール、街区・建物スケールに至る気候・微気候を段階的かつ連続的に解析・予測可能なモデルとなっている。このような研究成果によって初めて、地球規模の温暖化が都市生活や住民の健康に及ぼす影響を、局所的な都市ヒートアイランドの影響と合わせて定量的かつ詳細に予測・評価でき、適応の具体的な方策を検討できるようになった。温暖化ダウンスケーリングモデルは、既に、将来の都市暑熱環境下の健康被害の推定<sup>7)</sup>や、暑熱環境に適応する都市・街区計画の検討<sup>8),9)</sup>などに応用され、都市計画などの政策決定に向けても数々の重要な知見を提供している。

##### ・熱ストレス影響

2018年夏の日本では、最高気温35度を超える猛暑が続き、各地で40度を超えるなど観測史上最高の記録を軒並み塗り替えた。この猛暑による熱中症の搬送者数は9月末までに9万5千人を超え、気象庁は「命が危険な暑さ」と表現し、「災害」として警戒を呼びかけた。将来、こうした高温が常態化する前に、この猛暑さで起こった事象を検証し、科学に基づく適応策を社会実装しなければならない。地方自治体でとられた熱中症対策は予防のための普及啓発、放送等での注意喚起や高齢者の訪問・声掛けといったソフト対策が主体で、

避難場所の確保や公共施設の空調設備の設置、緑地を増やす、風の道をつくるといったハード対策はあまりなされていない。今後は適応策のメニューの充実、社会実装のための合意形成等、新たな分野の研究が望まれる。

世界を見ると、熱ストレス影響のうち、死亡に関して既に大規模な国際共同研究体制が構築されている<sup>10)</sup>。多くの都市に関して同一の手法で解析され、しかも統計的なバラツキを制御可能になったことで、気候や社会経済的な要因の影響の評価が可能になった。また、将来予測もより正確に行えるようになってきている。都市生活分野との関連では、ヒートアイランド現象による熱ストレス影響に関して、量的に評価した論文が発表された<sup>11)</sup>。この論文では、ホーチミン市を細分化して、それぞれの区分における気象要因を温暖化ダウンスケーリングで推定することで、ヒートアイランドによる熱関連超過死亡の増加を量的に評価している。今後、世界各都市で同様の評価を行うことで、ヒートアイランド現象を考慮した将来予測が可能になる。これまで地球温暖化の緩和策としてエアコンを極力我慢する風潮もみられたが、熱波も災害の一つであるという認識が広がり、エアコンの適切な使用が重要という考えの転換が進んでいる。これに関連して、東日本大震災の翌年に電力消費を抑制する必要に迫られ、東京電力管内で電力消費は減少したが、熱関連超過死亡は増加しなかったことが報告された<sup>12)</sup>。詳細な検討が待たれる。一方で、熱ストレスの影響は、死亡にとどまらない。救急搬送データなど、気温が高くなることによって起こる非死亡影響の評価もなされている。そのほか、睡眠障害などの研究も行われている。

・ Co-benefit（共便益）

緩和コストを考慮する場合に重要な概念である Co-benefit に基づく研究が最近、加速している。緩和に必要な化石燃料の削減は、短寿命気候汚染物質（Short-Lived Climate Pollutants：SLCPs）の減少を意味する。SLCPs には、大気汚染で重要な粒子状物質の成分やオゾンが含まれている。緩和策をとれば、粒子状物質とオゾンの減少を通じて、健康影響の減少が期待されるが、これまでは気温の影響は気温の影響として評価し、大気汚染の評価に際しては、気温を共変量としてその影響を除いて大気汚染の影響を評価されてきていた。Co-benefit を定量的に評価するために、この二つの要因をモデル化するための研究が始められている。

・ 極端気象による多様な影響評価

重要な極端な気象による影響についても、国際的なデータベースなどの整備により、評価が可能となってきている。しかし、地球レベルを対象とした健康分野の評価研究はほぼ死亡と経済損失に限られる。2018年の国内の多地域における豪雨、洪水に際しても、単に死亡だけでなく、避難所における生活を強いられることの問題、家族や家などを失う精神的な問題なども非常に大きな問題だが、個別の災害についての報告にとどまっているのが現状であり深堀が必要である。

・ 人口集中部への持続可能な水資源・食料・エネルギー供給

海外では、都市や地域との具体的なプロジェクトとして適応策を実装し、その情報を発信共有するトレンドがある。特に途上国では健康分野で安全な水供給と感染症に重点が置かれている。また、都市における貧困層の住居は、自然災害などに脆弱である場合が多い。日本でもあまり認識されていないが、都市は水資源・食料・エネルギーの一大消費地であり、その需要は周辺の地域が支えている場合が多い。今後も都市への人口集中が進む地域での、気候

変動にレジリエンスで持続可能な水資源・食料・エネルギー資源供給についてのプロジェクトが増加傾向にある。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

##### ・気候変動の健康影響予測手法の精緻化

代表濃度経路シナリオ（Representative Concentration Pathways : RCPs）と共通社会経済経路（Shared Socioeconomic Pathways : SSPs）を組み合わせることで気候変動による健康影響予測を行う際、SSPごとの人口を用いて熱関連超過死亡数や動物媒介感染症死亡数などの死因別死亡数を計算している。しかしながら、現時点で用いられているSSPsは、それぞれのSSPにおける社会経済的状況によって死因別死亡数が異なる、という公衆衛生学では常識となっている事実を考慮していない。米国 University of Washington の Dr. Kris Ebi らの研究グループは、上記の事実を考慮に入れた SSP ごとの死因別死亡率将来予測を開始した。これが完成すると、より妥当性の高い健康影響の将来予測が可能となる。

熱関連超過死亡の推定では、大きく二つの現象が明らかになりつつある。(1) リスク関数として、気温が高くて低くてもリスクが高く、その間にリスクが最低となる気温 (Minimum Mortality Temperature : MMT) が存在する。この MMT が、気候の変化に応じて変化することはわかっていたが、どの程度の早さで起こるのかは不明であった。最近、その早さに関する研究が進展している。(2) MMT に比較して、一定の高温になったときのリスクも、年代とともに一定ではないことが明らかになってきている。ただし、国ごとに状況が異なり、リスクが減少している国もあれば一定の国もある。エアコンの普及率や社会経済的状況などとの関連に関する研究が始まっている。これら二つの現象に関する理解が深まれば、熱関連死亡の将来予測がより妥当になると期待される。

##### ・街区・建物スケール（空間解像度 1m 程度）の温暖化ダウンスケーリング

空間解像度が最小でも数 km 程度までの温暖化ダウンスケーリングがほとんどだが、近年、街区・建物スケール（空間解像度 1m 程度）に至る温暖化ダウンスケーリングのモデル開発<sup>5), 6)</sup>が行われている。

##### ・Co-benefit（共便益）

近距離の移動を車から自転車に変えることで緩和と健康増進の Co-benefit が可能であるとの報告は以前からあったが、ある地域での報告に限られていた。また、将来予測に用いるような枠組みができていなかった。最近では SLCPs に関する理解が深まり、緩和策に応じた SLCPs の将来予測が可能となってきているため、国、あるいは全球レベルでの Co-benefit の評価を目指すプロジェクトが可能となってきている。ただし、気温と大気汚染の影響を同時に評価するモデルはまだ開発途上で、大きな進展が期待されている。

##### ・タイムライン<sup>13)</sup>

2012年、ニューヨーク州がハリケーン・サンディ来襲時に実施した「タイムライン」という手法は注目されている。発生が予測される被害や過去に起きたことのある事象を時系列に並べ、被害の発生を抑えるために計画を作る。これをもとに住民避難を進めたニューヨーク州では被害を最小限にすることができた。国土交通省と防災関連学会が2013年に合同調査を行い報告書にまとめている。

- ・ハザードマップ  
シミュレーションにより、豪雨時の特に都市部での浸水予測がより正確にできるようになったことから、日本では、多くの自治体がハザードマップを作成・公開するようになった。国土交通省では、洪水のほかに土砂災害、津波のハザードマップ情報も併せて提供している。先進的なところでは、地域住民と協力し、避難経路や避難が難しい高齢者などの介助の情報なども含めたマップを作成している。
- ・雨雲レーダー（高解像度降水ナウキャスト）  
気象庁や各気象情報会社などが提供する雨雲レーダー等の画面が、スマートフォンなどの携帯端末で誰でも気軽に確認できるようになった。これは、防災・減災対策のツールとして有効である。
- ・VR や CG の活用  
災害リスクコミュニケーションツールとして、VR や CG を用いた研究が行われている。具体的には、VR を利用して過去の災害の可視化する、または予測される状況を再現する、その疑似体験などであり、災害を我が事としてリアルにとらえるために有用である。
- ・グリーンインフラ  
アメリカで発案された社会資本整備の手法で、自然環境が有する機能を社会における様々な課題解決に活用しようとする考え方。2015年の国土形成計画の第4次社会資本整備重点計画に採り上げられた。
- ・都市農業<sup>14)</sup>  
気候変動への適応という考え方のみならず、農業の担い手の高齢化、土地利用などの課題から、農産物の消費拠点である都市において、持続的な都市農業の実現が課題となっている。単なる地産地消だけでなく、教育機能やグリーンインフラとしての防災機能、新たな産業としての雇用創出、QOLの向上など多岐にわたるベネフィットも期待できる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・ヒートアイランド現象の影響評価、環境省 S-14 プロジェクト  
ヒートアイランド現象による影響を、都市の区画ごとに死亡状況と気温の推定値それぞれを用意して熱関連死亡を評価する研究が最近始まった。現在はホーチミン市のみだが、他の都市でも同様の評価を行うプロジェクトが計画されており、今後数年で飛躍的に発展する可能性がある。これに関して、環境省 S-14 プロジェクトの3次元の建物情報を考慮に入れた都市気候のシミュレーションの発展が注目される。このシミュレーションは、1) 都市の区画ごとの正確な気温推定に大きく寄与することから、ヒートアイランド現象の影響評価に、2) 都市計画の違いによる将来の熱関連死亡数の相違の予測に用いられることから、将来の緩和・適応策に関わる政策決定への大きく貢献が期待される。
- ・国立環境研究所の SLCPs による将来影響予測  
米国において Co-benefit を軸にした新たな研究が開始しており、日本の国立環境研究所でも、SLCPs が気温と大気汚染に与える影響を同時に評価するモデル開発が開始している。
- ・気候変動適応技術社会実装プログラム（Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology : SI-CAT）（2015～2019年度）  
文部科学省 SI-CAT は気候変動適応方策の確実な社会実装に重点を置いている。地方自治

体（モデル自治体を設定）のニーズを汲み取った気候変動適応方策の技術開発を実施し、地方自治体が策定する適応計画や企業における新ビジネスの創出に貢献することを目的としている。様々な研究の成果などを発信しており、地方自治体、地方大学や地域の研究機関との連携によって、地域のステークホルダーやアクターと共に行うこのような研究プロジェクトはさらに多く実施していくべきであろう。

・気候変動適応情報プラットフォーム（climate change Adaption information PLATform : A-PLAT）

国の法制度、国内外の先進事例、地方自治体の取組みなど、充実した情報を環境省が提供している。特に、環境研究総合推進費 S-8「温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究」の成果であるダウンスケーリング予測結果（格子間隔 1 km）は地理情報システム（Geographic Information System : GIS）で公表されており、地方自治体がリスク評価や将来シナリオに基づく計画を作成する際に有用である。今後、分野別の影響予測研究の充実が望まれる。

・「世界首長誓約（Global Covenant of Mayors）」<sup>15）、16）</sup>

世界首長誓約は、世界の地方自治体の首長が、持続可能なエネルギーの推進、温室効果ガスの大幅削減、適応策の推進などを誓約し、アクションプランを策定してモニタリングしながら進める取組みである。京都議定書の枠組みでは、国によるトップダウンの取組みが主流であったが、パリ協定の枠組みからは、新たなステークホルダー、すなわち、地方自治体や NGO、企業等によるボトムアップのアプローチが主流になると考えられている。特にアメリカ合衆国では、大統領がパリ協定離脱を表明したが、地方自治体や企業によるネットワークにより取組みが推し進められている。日本では、欧州の取組みを参考に日本版「首長誓約」が 2015 年に始まり、2017 年からは欧州委員会のプログラム（International Urban Cooperation、日本では名古屋大学が受託）により、「世界首長誓約/日本」が立ち上がっている。

今後、脱炭素社会に転換していくためには、そのための新たなインフラまたはインフラの改修が必要であり、並行して、適応策も地域レベルで進めていかなければならない。これらは、新たなビジネスチャンスにもなり得る。今後、世界の大きな潮流になっていくと考えられる。

## （5）科学技術的課題

・温暖化ダウンスケーリングと予測不確実性

将来の気候変動（温暖化）の影響に対する各種暑熱対策の導入効果の検討・評価に関しては、温暖化ダウンスケーリングを活用した都市暑熱環境予測が欠かせない。しかし、その将来予測においては、温室効果ガス排出シナリオ、土地利用・土地被覆シナリオ、エネルギー利用シナリオなど、様々な将来シナリオの導入が必要となる。不確定な将来に対して、どのような将来シナリオを導入するかにより、将来予測の結果は大なり小なりの差が生じる。これは「予測不確実性」と呼ばれ、将来予測において不可避である。温暖化ダウンスケーリングで用いる各空間スケールのシミュレーションモデルの選択も、大きな予測不確実性をもたらす要因の 1 つとなる。したがって、可能な限り多くの将来シナリオやシミュレーションモデルを導入した温暖化ダウンスケーリングを実施し、予測不確実性の幅を定量的に評価・把握しておくことが非常に重要となる。それを踏まえた上で、各種暑熱対策の導入効果の幅も評価・把握する必要がある。

- ・都市ヒートアイランド緩和方策

緑化、高反射率建材・塗装や保水性建材・舗装など、局所的な都市ヒートアイランドに対する緩和策の開発や、実証実験などを通じた緩和策の導入効果の検証については、建築・都市環境工学分野などで数多くの研究実績・知見がある。都市の気温上昇は地球温暖化と都市ヒートアイランドの2つの温暖化によって生じているが、今後、都市ヒートアイランド緩和方策として取り扱われてきた暑熱対策の役割がますます重要になる。地球温暖化の緩和策は日本一国の努力のみでは困難である。すなわち、日本の諸都市の場合、地球温暖化に伴う都市の気温上昇（あるいはその一部）は各種の都市ヒートアイランド緩和方策の導入によって相殺することを目指していくしかない。これまでに数多くの研究実績・知見を有する暑熱対策をさらに積極的に活用していくことが求められる。都市ヒートアイランド現象の影響評価に関して、高度なシミュレーションが可能になっているが、計算資源をかなり多く消費する課題がある。計算機の進歩、あるいは計算方法の進歩が待たれる。

- ・SSP ごとの死因別死亡率将来予測

健康影響共通の課題である。完成出来れば非常に有用であるが、どのように枠組みを考え、どのようにすすめるかも含め、議論が必要であるし、かなりの人的資源を投下する必要がある。

- ・各種疾患データ等の不足、不備

下痢性疾患、動物媒介感染症については、低中所得国で大きな問題になるが、これらの国における発生率の正確な情報を得ることが困難であるため、正確な将来予測が困難である。世界的な取り組みで、発生率の予測精度を改善することが必要である。熱関連超過死亡に関しては、(4) 注目動向に記載した通り MMT の気候に応じた変化を評価しなくてはならない。しかし死亡データの存在する期間が長期である国は少なく、その評価は簡単ではない。

極端な気象による影響に関しては、死亡数の評価など、全球で評価出来るようになってきているが、被害者の精神的な問題、避難所生活による影響などは研究が不足している。

- ・Co-benefit 評価

Co-benefit 評価のための、SLCPs の気温と大気汚染を同時に評価するモデルの開発が必要である。これまで単に一つのモデルに二つの変数を含めて対処してきており、その妥当性の評価は課題である。

- ・脆弱性評価

地域の持つ脆弱性をどのように同定し評価していくかが課題である。地域の既存の脆弱性によって現れ得るリスクが変わるからである。ドイツのプレーメンでは、将来予測はシナリオにより変動するため、現在の脆弱性評価に基づいた適応策の導入を進めている。

- ・影響分析とリスク評価

ダウンスケールにより地域の気候予測データが得られたとしても、それが、どの分野にどの程度の影響をもたらすかの影響分析とリスク評価は一部の分野でしか進められていない。これらは地域性が大きく、現象・対象ごとの解析が必要になる。研究者からの視点だけではなく、地域のステークホルダーによる「地域知」や「伝統知」も必要であり、今後の研究が期待される。

- ・適応策の優先順位

地域で適応策を進める場合、様々な分野における対策が求められる。その優先順位を決めていく際に、どのような手法をとればよいのか。地域のステークホルダーの参加をどの

ように得ていけば良いのかなどの課題がある。

- ・蓄積された研究資産の活用

暑熱環境下の健康影響評価に関しては、被験者実験などを通じてこれまでに数多くの研究実績・知見がある。これらの知見と、温暖化ダウンスケーリングモデルを活用した都市暑熱環境の将来予測を融合すれば、将来の暑熱環境下の健康影響評価（熱中症などの健康被害の推定など）が可能となる。ただしこの場合も、温暖化ダウンスケーリングの予測不確実性の幅に伴う健康影響評価の幅を定量的に把握しておくことが必要である。

## (6) その他の課題

- ・国レベルの追加的気候変動適応策の推進、研究成果の社会実装

IPCC 第4次評価報告書・第2作業部会報告書で「最も厳しい緩和努力をもってしても、今後数十年間の気候変動の更なる影響を回避することができないため、適応は、特に至近の影響への対処において不可欠」と記載されたことをうけ、世界で気候変動に対する緩和・適応の両面作戦の重要性が認識されるようになった。しかし、「適応策」の社会における位置づけは、日本よりも海外、とりわけ自然災害の被害が多い途上国で高い。日本では2018年に気候変動適応法が成立したが、オランダが2007年、イギリスが2008年、アメリカやEUが2009年に適応に関する法や戦略を策定していた。最近の傾向として、健康・都市生活の分野では、気候変動の影響によるゲリラ豪雨や熱波、感染症の発症などで、住民に具体的な被害が生じたことが一つのきっかけとなり、研究や対策を進めざるを得ない状況になってきている。科学的には予見されていた事象であっても、社会的に認識されていない、法制度に反映されていないなどの乖離がある。実際に極端現象が起こってから社会的・経済的な被害により、一般に認識が進み、原因解明と防止対策のための研究の重要性が認められつつある。日本では歴史的にも自然災害を多く経験しており、防災対策としての「適応策」はすでに研究、社会実装の両面で進んでいる。しかしながら、気候変動の進行により、これまでの基準値を超える事象の発生や、災害の記録や対策が継承されていないことによる人的な被害も現れている。気候変動の新たなフェーズに対処すべく、「追加的適応策」のためには、学際的な研究が必要不可欠である。研究成果がまとめられ、社会へ発信されても、社会実装を行う部分で科学に基づく政策がうちだされないと結果として、長期的視点の弱い対症療法的な状態で終止することとなる。

- ・疾病発症率や健康情報などのデータ整備、アクセス性

低中所得国での感染症疾病発生率のデータが質的にも量的にも不十分である。この解決に近道はなく、国際開発における健康増進の優先度を上げ、低中所得国の公衆衛生インフラストラクチャーを構築することで低中所得国にも利益となり、その結果として良質のデータも収集可能となる。我が国を含む先進国においても、健康情報は一元管理されているわけではなく、実際の研究を行う場合には研究者が様々な規制をクリアして情報をリンクする必要がある。このために研究者の作業時間、研究費ともに大きな負担になっている。個人情報保護の観点から難しい点もあるが、一元的な健康情報の蓄積は、気候変動の影響にとどまらず、人間を対象にしたほとんどの医学研究にとって有益である。

- ・多分野連携、実務者やコミュニケーターまで含めた連携、国際、ステークホルダー連携

都市生活や住民の健康への影響評価を行う上で都市暑熱環境の予測する温暖化ダウンス

ケーリングのモデル開発・応用研究には、気候・気候学、地理学を専門とする理学系の研究者、建築・都市環境工学、土木工学を専門とする工学系の研究者の協働が必要である。膨大な計算量の対処には、計算科学を専門とする研究者と協働し、計算高速化・効率化の取り組みも必要である。都市生活や住民の健康に対する気候変動影響評価に関しては、さらに工学系の実務者とも協働して取り組む必要がある。その評価を踏まえた具体的な適応策の検討には、社会科学系や人文学系の研究者・実務者との協働も必要となる。適応方策の社会実装を行う際には、地方自治体との官学連携が不可欠であり、新しいビジネスモデルが創出可能な場合には、産との連携も必要である。学際的研究や関係ステークホルダーとのコミュニケーションを行うファシリテーターなどのスキルを持った人材が不足しており、真の分野連携が進まない。関係ステークホルダーとの連携が不足している。研究者の国際ネットワークへの積極的な参加が望まれる。境界領域であり、研究費の獲得が難しく、社会実装の分野の研究が遅れている。

(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	○	↗	● SI-CAT や温暖化ダウンスケーリングなどで世界的にも高水準の研究が行われている。
	応用研究・開発	○	↗	● 個別に先進的な研究がなされてきているが法体系の整備などで社会実装の遅れが見られている。地方自治体への社会実装などを加速するため SI-CAT、A-PLAT などのプロジェクトが進められ、強化が図られている。
米国	基礎研究	-	-	最新の研究動向が不明瞭であるため評価を避ける。
	応用研究・開発	○	↗	● 米国環境保護庁（Environmental Protection Agency : EPA）、米国国立科学財団（National Science Foundation : NSF）、Wellcome Trust などにより適応策に関する研究支援が行われている。 ● タイムラインやグリーンインフラなどの手法を創出しており、一定のポテンシャルがある。
EU	基礎研究	◎	↗	● 本分野では基礎、応用ともに伝統的に世界をリードしており、最新の知見も世界に発信続けている。多くのプロジェクトが実施されてきている。 ● 英国ロンドン大学 London School of Hygiene and Tropical Medicine が中心となって Multi-City Multi-Country (MCC) 研究 <sup>10)</sup> を進めており、世界的に注目される。
	応用研究・開発	◎	↗	● 本分野では基礎、応用ともに伝統的に世界をリードしており、最新の知見も世界に発信続けている。Horizon 2020 に代表される EU 全体の枠組みに加え、英国、ドイツ、フランスといった国の単位においても健康、環境都市に関した応用研究が実施されており、地域単位の適応策に関する政策にも影響を与える研究がなされている。
中国	基礎研究	-	-	最新の研究動向が不明瞭であるため評価を避ける。
	応用研究・開発	△	↗	● キャッチアップ型であり、強化が図られている様子であるが、深刻な大気汚染などの中国内に関心の高い分野と比べて未だ目立った応用研究の報告などは見えていない。
韓国	基礎研究	-	-	最新の研究動向が不明瞭であるため評価を避ける。
	応用研究・開発	△	↗	● キャッチアップ型であり、強化が図られている様子だが、まだ報告数は少なく、世界的に高いインパクトの成果は見えていない。

(註1) 「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。



- (註2) 「現状」 ※我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。  
 ◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている  
 △：顕著な活動・成果が見えていない ×：特筆すべき活動・成果が見えていない
- (註3) 「トレンド」  
 ↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 参考・引用文献

- 1) 三村信男 監修、太田俊二、武若聡、亀井雅敏 編『気候変動適応策のデザイン』(2015).
- 2) S. Hales *et al.* ed., *Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s*, (Geneva: World Health Organization, 2014).
- 3) United Nations, “World Urbanization Prospects: The 2018 Revision,” 2018.
- 4) 稲津将、佐藤友徳「大は小を兼ねるのか：ダウンスケーリング」『天気』57巻4号(2010): 195-199.
- 5) 文部科学省 気候変動適応研究推進プログラム「フィードバックパラメタリゼーションを用いた詳細なダウンスケールモデルの開発と都市暑熱環境・集中豪雨適応策への応用」(研究代表者：飯塚悟)、  
<https://www.restec.or.jp/recca/staticpages/index/iizuka.html> (2019年2月1日アクセス).
- 6) 文部科学省 気候変動適応研究推進プログラム「都市・臨海・港湾域の統合グリーンイノベーション」(研究代表者：高橋桂子)、  
<https://www.restec.or.jp/recca/staticpages/index/takahashi.html> (2019年2月1日アクセス).
- 7) 日下博幸 他「複数のCMIP3-GCMからの力学的ダウンスケール実験と問題比較型影響評価手法による健康影響評価：2070年代8月を対象とした東京・名古屋・大阪における熱中症および睡眠困難の将来予測」『日本建築学会環境系論文集』78巻693号(2013): 873-881.
- 8) S. Iizuka, Y. Xuan and Y. Kondo, “Impacts of Disaster Mitigation/prevention Urban Structure Models on Future Urban Thermal Environment,” *Sustainable Cities and Society* 19 (2015): 414-420.
- 9) S. Iizuka, “Future environmental assessment and urban planning by downscaling simulations,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 181(2018): 69-78.
- 10) MCC Collaborative Research Network,  
<http://mccstudy.lshtm.ac.uk/> (2018年8月20日アクセス).
- 11) T. N. Dang *et al.*, “Green Space and Deaths Attributable to the Urban Heat Island Effect in Ho Chi Minh City,” *American Journal of Public Health* 108, no. S2 (2018): S137-S143.
- 12) Y. Kim *et al.*, “Heat-Related Mortality in Japan after the 2011 Fukushima Disaster: An Analysis of Potential Influence of Reduced Electricity Consumption,” *Environmental Health Perspectives* 125, no. 7 (2017): 077005.
- 13) 国土交通省 防災関連学会合同調査団 (防災関連学会：土木学会，日本災害情報学会，日本自然災害学会，地域安全学会)「米国ハリケーン・サンディに関する現地調査報告書（第二版）—先進国の大都市を初めて襲ったニューヨーク都市圏大水害からの教訓—」(2013)

年 7 月)、

[http://www.mlit.go.jp/river/kokusai/main/america/america\\_hurricane\\_201307.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/kokusai/main/america/america_hurricane_201307.pdf) (2019年 2 月 1 日アクセス) .

- 14) 日本学術会議 農業委員会 農業生産環境工学分科会 「報告 持続可能な都市農業の実現に向けて」 (2017 年 7 月 19 日)、

<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-h170719.pdf> (2019 年 2 月 1 日アクセス) .

- 15) Covenant of Mayors for Climate & Energy,

<https://www.covenantofmayors.eu/en/> (2019 年 2 月 1 日アクセス) .

- 16) Global Covenant of Mayors for Climate & Energy,

<https://www.globalcovenantofmayors.org/> (2019 年 2 月 1 日アクセス) .