

2.2 環境区分

2.2.1 気候変動観測

(1) 研究開発領域の定義

気候変動観測データの取得、生成、蓄積、処理、活用等を扱う。大気中の温室効果ガスや微粒子（エアロゾル、雲）、短寿命気候強制力因子（SLCFs：Short-lived Climate Forcers、エアロゾル粒子を含む）、その他の気候変動因子（雲、土地利用、植生など）の濃度や変化の情報を得るための衛星等のリモートセンシング、地上観測ネットワークなどの観測技術を対象とする。海洋は物理的、生物地球科学的に気候とその変動を記述するために有用な変数が多い。それらの必須気候変数を直接計測、または間接的に見積もる現場観測技術の開発や実装、データアーカイブ化、データプロダクト作成なども対象とする。大気、海洋に加え、気候変動に大きな影響を与えあう極地、森林、土地利用変化等の観測技術も含む。また、観測ビッグデータのアーカイブ化やデータ処理技術も含む。さらには、各種データの統合的解析や観測データアーカイブから社会利益をもたらす情報化手法についても対象とする。

(2) キーワード

- 衛星による観測：気候変動、環境観測、衛星観測
- 大気・陸域の観測：長寿命温室効果ガス、短寿命気候強制力因子（SLCFs）、GHG/AQ（大気質）統合解析、A-CCP（エアロゾル、雲・対流・降水）、リモートセンシング、地上観測ネットワーク、フラックス、必須気候変数（ECVs：Essential Climate Variables）、航空機観測
- 海洋の観測：海洋温暖化、海洋酸性化、貧酸素化、海洋状況把握、海洋炭素循環、水位上昇、海洋生態系、海洋熱波、必須気候変数（ECVs）、全球海洋観測システム、生物地球化学アルゴフロート（BGC Argo）、水中グライダー、キャビティリングダウン分光法

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

■衛星による観測

近年、我が国をはじめ世界各地では過去30年の気候に対して著しい偏りを示した天候、いわゆる異常気象が増加傾向にある^{衛星1)}。それに伴い、極端な異常気象が産業・経済に及ぼす損害も年々、増大している。例えば、2011年のタイ・チャオプラヤ川洪水による日系企業の損害は約3,150億円と見積もられている^{衛星2)}。2018年西日本豪雨では積乱雲が連なる線状降水帯が、11日間に60回以上も発生し1兆3,500億円を超える被害を発生させた^{衛星3)}。2020年に至っても規模や威力を増す傾向がある。これらの異常気象の要因として、中緯度偏西風の蛇行（ブロッキング）、温暖化に伴う海面水温の上昇による台風への水蒸気供給量の増大など全球的な気候変動による影響の大きさが指摘されている^{衛星4)}。

気候変動そのものと気候変動に伴う異常気象に対して、長期的な地球の自然気候変動のみならず、人為起源の影響がそれを助長する形で有意に大きな影響を与えているという指摘がなされている^{衛星5)}。地球の気候の状態を調べ、理解し、診断することが長期的な気候変動の予測及び人為起源の影響を抑制する政策を実施する上で極めて重要である。地球の気候は海洋および陸地、極域、そして大気のそれぞれを全球で評価する必要がある。局所的な気象も遠地の状況と密接に結びついている（テレコネクション）。しかし、地球の全地

表面に対して、人間が現場で直接計測できる領域や時期は極めて限定的で、全球を評価するために必要な均一で広域の観測を地表面上で行うことは困難である。人工衛星観測は同じ計測器によって、全球の地表面とその近傍の表層を均質かつ周期的・継続的に計測できる唯一の手段である。全球の気候を評価する基本データ取得の観点から、衛星観測は極めて重要である。

■大気・陸域の観測

地球規模での気候変動という極めて困難な課題解決にあたり、まず、放射収支に影響するCO₂などの物質の大気中存在量と分布の変化、排出量との関係、循環や収支を十分に明らかにした上で、削減へ向けた効果的な道筋を構築する必要がある。全球収支の現況把握や将来予測では数値シミュレーションが重要な役割を担っているが、プロセス表現が不十分な場合が多く、その検証と不確実性の軽減のために「観測」が必須となる。世界気象機関（WMO：World Meteorological Organization）が主導する国際プログラム全球気候観測システム（GCOS：Global Climate Observing System）は54の必須気候変数（ECVs）^{大気1)}を定義し、大気・陸域・海洋に関する系統的な観測を促している。2015年にパリ協定が採択されて以降、温室効果ガス排出量削減の正確性や信頼性の担保のためMRV（Measurement, Reporting and Verification、温室効果ガス排出量の測定、報告及び検証）の観点で、観測が極めて重要な意義を帯びている。2°C目標などの長期的な目標に向け、世界的に進捗状況を定期的に確認し、取組を強化していく「グローバル・ストックテイク」が2023年から実装される。その際、人為起源排出の管理や森林減少・劣化の抑制策（REDD+：Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation）の有効性を観測から評価する視点が重要となっている。近年、CO₂より寿命が短い「短寿命気候強制力因子（SLCFs）」を通じた将来気候影響にも注目が集まっている。SLCFsは、温暖化に寄与するメタン、対流圏オゾン、炭素を主成分とした微粒子のブラックカーボン^{大気2)}や、逆に直接放射効果や雲過程を通じて冷却効果をもたらす硫酸エアロゾル等の粒子、さらにはそれらの原料物質であるSO₂、NO_x等を含む総称である。排出増加・削減が速やかに気候に影響する特徴をもつ。これらは大気汚染物質で、人間活動の影響が顕著だが、排出と大気中濃度との間の非線形性や、数十種の重要成分間の相互作用、自然変動の寄与、温暖化に伴うフィードバックも含め、諸プロセスを定量化する必要がある。このような目的を果たすため、長寿命温室効果ガス（LLGHGs：Long-Lived Greenhouse Gases）、SLCFs、関連するパラメータについて、国際協力を基調としつつ特色ある観測が求められる。

■海洋の観測

地球表面の71%を占め、地球の水の97%を含む海洋は、熱の貯蔵・再配置、水循環、生物地球化学的循環に重要な役割を果たしている。上述の気候の特徴づけに重要な変数である54個のECVs^{大気1)}のうち19個が海洋に係るものである。海洋と大気は、熱・水・運動量の交換を通じて相互に影響を与え合うことで、気候システムに年単位～数十年スケールの自然変動を引き起こしている。大気のおよそ250倍の質量と4倍の比熱を有する水で満たされた海洋は、1970年以降、気候システムに蓄積された熱の90%以上を蓄え^{海洋1)}、海の温暖化が進行している。海洋の昇温と陸域の氷の減少に伴う海水位の上昇が加速している^{海洋2)}。海水位の上昇をその地域的な分布も含めて理解するためには、海洋の水温・塩分および循環の変化を知る必要がある。地球温暖化は、氷の減少に伴う淡水供給だけでなく、水循環の変化に伴う蒸発・降水の変化を通して海洋の塩分を変化させる^{海洋3)}。さらに、水温と塩分の変化は海洋の循環と混合を変化させる。1980年代以降、海洋は人為起源の炭素の総量の20～30%を吸収し、大気中のCO₂濃度増加を抑制している。しかし、それ

にもなって海洋の酸性化がもたらされている^{海洋2)}。表面付近ほど大きく昇温すること、そして高緯度海域における淡水供給の増加は、海洋上層の成層を強めて表層と深層の混合を抑制し、生物地球化学的循環を変化させて、酸性化とともに、生態系に深刻な影響を与えている^{海洋4)}。自然変動と地球温暖化が重なり合った気候システムの実態を、生態系への影響を含めて把握し、変動・変化のメカニズムを理解して将来を予測することは、持続的な発展を目指す人類に共通の喫緊の課題である。この課題に取り組むために、物理、生物地球化学、生物・生態系の分野を統合した全球的な海洋観測の展開が求められている。

[研究開発の動向]

■衛星による観測

気候変動に関する地球観測の基本は静止軌道から常時観測する気象衛星システムである。WMOが1963年に計画を立案した世界気象監視計画の基本構想に基づき構成され、気象衛星調整会議（CGMS：Coordination Group for Meteorological Satellites）の現業気象関係の国際枠組みにより維持されている。日米欧露中印韓の静止気象衛星ネットワークでは、日本においては気象庁ひまわり8号、9号が該当する。CGMSにおいては、低軌道の衛星による観測も近年追加され、気象観測あるいは気候診断を行っている。

科学的あるいは気候診断の地球観測の国際的な調整枠組みは地球観測衛星委員会（CEOS：Committee on Earth Observation Satellites）において、各国の観測衛星開発計画の情報共有がなされている。温室効果ガス、降水、陸域などの目的に応じ衛星集団（CEOS Virtual Constellation）が国際協力による相互データ交換・評価の仕組みとして構築されている。観測対象となる気候システムに必要な物理観測パラメータはECVs^{大気1)}としてリスト化されており、それをCEOSに答申することにより、観測パラメータの整理がなされた状況にある^{衛星6)}。並行して、特に長期観測が重要なパラメータについては気候データ記録（CDR：Climate Data Records）として識別されつつある^{衛星7)}。こうした活動においては欧州が観測衛星の計画作成・調整などで積極的に利用し、その推進を牽引している状況にある。

このような国際協調システムを含む衛星計画を前提とした科学的な研究ターゲットについては気候変動に関する政府間パネル（IPCC）報告書を起点とした議論が行われている。IPCCは特に人間活動とそれに伴う気候変動に主体を置いた報告を行っているため、現実社会に影響を及ぼす地球温暖化や、それに派生するとみられる極端気象、および新興国の工業発展・都市化（特にアジア領域）に伴うPM_{2.5}などを含む大気汚染などへの関心が高い。

① 温室効果ガス

地球温暖化について、IPCC第5次評価報告書において人間活動による温暖化への影響が確定的という報告がなされている。その主要因となるCO₂排出を含む炭素循環の定量的な評価を目標として、大気中のCO₂量の観測の高精度化が重要な課題となる。日本ではCO₂高精度評価に対して、環境省と国立環境研究所（国環研）と宇宙航空研究開発機構（JAXA）の温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」シリーズ（GOSATシリーズ：Greenhouse Gases Observing Satellite）などが対応している。

2009年に打ち上げられたGOSATはCO₂とメタンの濃度を宇宙からの観測を主目的とした世界唯一の衛星である。熱赤外域だけでなく短波赤外域のセンサを同時に搭載し、対流圏全層に感度を有している。その観測データを利用することで、大陸規模でのCO₂等の排出・吸収強度を推定する炭素循環の研究や、都市部などからのCO₂やメタンの排出インベントリの高精度化研究などに活用されている。

2018年に打ち上げられた「いぶき2号」（GOSAT-2）衛星はGOSATよりもセンサ感度が向上している。

晴天域を能動的に選定して観測効率を高められるインテリジェントポイントティングを採用するなどの高度化が実装されている。人為起源のCO₂を特定する能力を向上するため、CO₂とメタンに加え一酸化炭素(CO)も観測可能となっている。

米国は2014年に軌道上炭素観測衛星2号(OCO-2: Orbiting Carbon Observatory-2)の打ち上げを成功させている。その複製機であるOCO-3センサが2019年に国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」に搭載された。OCO-2衛星と類似した中国のTanSat衛星は2016年末に打ち上げられた。欧州は、大都市などをターゲットにした高空間分解能を有すMicroCarb衛星を2023年以降に打ち上げる予定である。我が国は、GOSATやGOSAT-2の後継機である温室効果ガス・水循環観測技術衛星(GOSAT-GW: GOSAT for Greenhouse gases and Water cycle)の打ち上げを2023年度に計画している。高性能マイクロ波放射計(AMSR3: Advanced Microwave Scanning Radiometer-3)はGOSAT-GWに相乗りする計画となっており、水循環と炭素循環との複合研究も進められる。

② 地球温暖化に影響する森林バイオマス量、土地利用変化

IPCC第5次評価報告書においてCO₂の主な吸収源となる陸域での森林バイオマス量の評価精度向上が課題として挙げられている。日本では、陸域のバイオマス評価に対してJAXAの陸域観測技術衛星「だいち」シリーズ(ALOS-2,3,4: Advanced Land Observing Satellite)、気候変動観測衛星「しきさい」(GCOM-C: Global Change Observation Mission - Climate)、宇宙ステーション搭載レーザー高度計などが対応している。陸域生態系の土地被覆分布(植生分布)や森林域の把握は、温室効果ガスや放射収支を通して、気候へ影響を与える。グローバルスケールで様々な土地被覆状況を把握する試みが続けられている。近年は衛星データを用いた土地被覆とその変化の把握が進み、年毎などの従来よりも高い時間分解能を達成している。また空間的にも全球を約30 mの空間分解能で土地被覆とその変化を把握できるようになってきた。

③ 地球温暖化に影響するエアロゾル・雲

エアロゾル・雲・降水のプロセスは地球の放射収支を大きく左右する。時間的変化の早いこれらのプロセスが、GHGの放射収支の評価に対しても大きく影響している。その正確な理解のため一層の観測的把握の発展が望まれる。また、後述する大気汚染とも関連する。日本においてはJAXAのGCOM-C、欧州宇宙機関(ESA: European Space Agency)とJAXAと情報通信研究機構(NICT)の雲エアロゾル放射ミッション(EarthCARE: Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer)が対応している。GCOM-C衛星に搭載されている多波長光学放射計(SGLI: Second Generation Global Imager)センサは、近紫外チャンネル搭載、高空間分解能観測、偏光観測に技術的な新規性があり、雲、エアロゾル、放射も含めた気候変動に関わる様々な因子を観測している。ひまわり8・9号は、これまでの静止気象衛星に比べて時間・空間解像度ともに2倍向上し、高時間・高空間解像度のエアロゾル観測が可能である。さらに、GOSAT-2衛星に搭載された雲・エアロゾルセンサ2型によって、雲に加えて、PM_{2.5}やブラックカーボンのモニタリングに貢献するデータの提供も試みられている。

雲レーダーによる雲の鉛直内部構造の観測は、気候変動に伴う放射収支の変化の評価に必要不可欠である。2006年に米国航空宇宙局(NASA)のジェット推進研究所(JPL: Jet Propulsion Laboratory)が初めて雲レーダー搭載のCloudSatを打ち上げている。我が国では現在、CloudSatよりも感度が10倍高く、雲内部の鉛直流の情報を衛星から世界で初めて取得するためのドップラー速度の観測が可能な雲

プロファイリングレーダーを開発している。このレーダーを搭載するEarthCAREによる観測が2022年度下半期以降に予定されている。なお、強い関連性を有する降水や水蒸気の衛星観測も推進することにより、雲・降水に関わる気候変動研究の相乗効果が期待される^{※1)}。「エアロゾル、雲・対流・降水研究(A-CCP)」は2017年に米国から発行された今後十年の地球観測への指針を示すDecadal Surveyにおいて最優先観測対象として選定されている。国際活動計画の検討において、降水レーダーの提供やアルゴリズムの開発とともに、日本からの貢献が期待される。

④ 極端現象

極端気象との関連については、温暖化により温まった海面水温とそこから放出される大気への水蒸気量の関連性が指摘されている。降水状況の観測と共に水循環について更に観測を詳細化する必要がある。日本においてはJAXAのGCOM-C、水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W: GCOM-Water)やNASA/JAXA/NICTの全球降水観測計画主衛星(GPM主衛星: Global Precipitation Measurement Core Spacecraft)が対応している。加えて、これまで技術的に困難であった大気の流れベクトルを計測するライダー(Light Detection and Ranging、※レーザーを用いたレーダーのこと)や鉛直風を計測する雲レーダーが登場しつつある。従来の海上風ベクトルや気象衛星の雲の変化から雲移動ベクトル(Cloud Moving Vector)を算出する大気力学的観測に対して、大幅な発展が期待される。

⑤ 大気汚染

大気汚染については、日本においては地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」(ADEOS/ADEOS-2: Advanced Earth Observing Satellite)に搭載した国環研の改良型大気周縁赤外分光計(ILASシリーズ: Improved Limb Atmospheric Spectrometer)に端を発し、対流圏上部より上方を中心とした大気汚染物質の赤外掩蔽観測がなされてきた。さらに宇宙ステーション搭載超伝導サブミリ波リム放射サウンダにおいてサブミリ波掩蔽観測に発展した。今後の大気物質観測計画としては宇宙からの大気汚染物質観測(APOLLO: Air Pollution Observation)の検討などが続いている。

⑥ プラットフォーム

これまでの観測データは主に衛星ミッション^{※注)}ごとに整備されてきた。近年、計算機技術の発達とともに、データを統合的に利用するためのインフラの整備が進められている。一カ所にデータを集積し、解析できるプラットフォームとして文部科学省(MEXT)のデータ統合・解析システム「DIAS」、経済産業省(METI)の政府衛星データのオープン&フリー化及びデータ利用環境整備事業「Tellus」などの国主導のものや、民間企業によるプラットフォームやクラウドサービスが提供されている。また、衛星データを一元的に提供するためのデータ提供サイトがJAXAの地球観測衛星データ提供システム(G-Portal)をはじめとして整備・運用されている。時間空間的に蓄積された衛星データは地理空間情報、地上観測データとあわせてビッグデータとして、機械学習、ディープラーニングなどのIT技術により情報としてサービスされる方向にある。

衛星観測ビッグデータは、演繹的な数値モデルである気象庁気象研究所による数値予報モデルや、東京大学/国環研/海洋研究開発機構(JAMSTEC)による大気循環モデルなどにデータ同化を行うためにも利用される。これらの数値モデルは計算機処理能力の発達とともに高分解能化しており、東京大学の全球モデルNICAM(Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model、※非静力学正20面体格子大気モデルのこと)や、名古屋大学の雲解像モデルCReSS(Cloud Resolving Storm Simulator)などを筆

頭として発展を見せている。

※注) 人工衛星におけるミッションとは、狭義には衛星で達成しようとする目的、宇宙飛行任務を指し、広義には衛星に関する一連の計画検討、搭載機器開発、運用、行動など全般を含んで用いられている。

■大気・陸域の観測

最近の動向として、GHGsとSLCFsを複合観測し、両者に共通となる「大規模エネルギー燃焼排出源」を特定して定量化し、削減や監視へ結び付ける方向性が強く打ち出されてきた。SLCFsは大気汚染物質であることから、GHG/AQ (Air Quality、※大気質のこと) 統合解析とも呼ばれる。とくに、我が国のGOSAT-GWミッション、欧州ESAの人為起源CO₂モニタリングミッション (CO₂Mミッション: Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring) といった衛星観測計画が公式化している。2019年のIPCC第49回会合において、第7次評価サイクルでは従来GHGsを扱ってきた国別排出インベントリ報告手法論に新たにSLCFsも対象に加えることが決まった。社会経済情報に基づいて報告される排出インベントリに対して、「濃度の観測」を元に、非線形性を見極めつつ「排出量」を適切に推定することは、実環境計測という独立した立場からの検証を可能とする。これは、温暖化緩和のための排出削減・エネルギー戦略の道筋を確かにするものであり、その実践が始まるものである。気候変動予測を確実にするためにはエアロゾル放射効果や雲相互作用、陸域植生変化を介したフィードバックの感度の不確実性を低減することも不可欠で、そのための観測計画についても進展がみられる。

① 温室効果ガスの地上、航空観測等

温室効果ガスに関連する地上観測ネットワークとしては、衛星データの検証に資する全量炭素カラム観測ネットワーク (TCCON: Total Carbon Column Observing Network) に加え、小型フーリエ変換赤外分光計 (FTIR: Fourier Transform Infrared Spectroscopy) を活用したCOCCON (Collaborative Carbon Column Observing Network) が立ち上がりつつある。高精度の地表付近濃度計測ではWMOの全球大気監視計画や米国海洋大気庁 (NOAA) の全球長期観測網などが代表的である。高精度の濃度計測や同位体計測にはキャビティリングダウン分光方式の計測器が実用化され、世界的に地上ステーションへの導入が進んでいる。

商用の航空機を活用した日本のCONTRAILプロジェクト (Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner)、欧州のIAGOSプロジェクト (In-Service Aircraft for a Global Observing System) によって長期に取得した大気3次元濃度データも重要である。COVID-19パンデミックに伴う定期航空便の縮小による影響が懸念されている。

大気中温室効果ガス濃度を大きく左右する陸域の炭素循環については、渦相関法によるタワー観測ネットワークが展開されており、全球ネットワークとしてFLUXNET、そのサブ組織としてアジア域ではAsiaFluxが展開されている。これらの観測により大気—陸域間の熱・水・CO₂等のフラックスが連続観測され、データ公開が進められている。FLUXNETについてはFLUXNET2015^{大気3)}としてユーザーが使いやすい形でデータが提供され、定期的に更新されている。メタンの観測網の統合解析もFLUXNETを主体に進み成果が出始めた状況である。さらに、これらの地上観測ネットワークデータと衛星観測データなどに対して機械学習を行わせて、地上観測ネットワークデータを広域化した全球プロダクトも構築され、研究コミュニティが利用可能となっている。

② 陸域生態系データ等

温室効果ガスのフラックスに限らず、陸域生態系に関連する様々なデータが集約されつつあり、大気―陸面の温室効果ガスの収支を把握する上での重要な知見を提供している。例えば、植生季節変動長期観測ネットワーク (PEN: Phenological Eyes Network) は日本で構築されたカメラを用いた生態系観測ネットワークである。同様のネットワークとして米国のPhenoCamがある。これらは現地観測ベースで植物の展葉・落葉の時期などを観測し、気候変動が植生に与える影響を評価できる。国際長期生態学研究ネットワーク (ILTER: International Long-Term Ecological Research) は植生バイオマス量などのプール量に代表される様々な生態系観測データを集約したデータベースなどの炭素収支の理解に重要な知見を提供している。また、TRYデータベースは植生の機能・形態パラメータを集約したもので、数値モデルの改良に重要な役割を果たしている。

③ エアロゾル・雲

エアロゾルの国際地上観測ネットワークについては、NASA主導のAERONETや、日本が主導しているSKYNET(主に千葉大学)、AD-NET(主に国環研)がそれぞれ、データ取得・準リアルタイム解析・データ公開を定常的に実施し、誰もがデータを使えるよう整備している。月を光源にした夜間観測、紫外可視波長帯による光吸収性エアロゾル観測、雲光学特性観測、エアロゾル組成情報の高度分布導出について、技術的な発展が見られる。光吸収性エアロゾルとしてはブラックカーボンに加え、ブラウンカーボンが含まれる。ブラウンカーボンは、黄色や茶色の炭素微粒子で光吸収性の有機エアロゾルである。

地上現場でのエアロゾル組成の自動連続計測では、ブラックカーボンの高精度計測装置や、主要無機イオン成分等の湿式計測、微量金属などの元素分析装置などの国産機も活用されている。エアロゾル計測の国際的な調和化の重要性は理解されているが、直近での大幅な前進は見られていない。エアロゾル-雲相互作用を通じた気候影響の不確実性は依然として大きい。その解明のため、雲凝結核^{大気4)}や氷晶核^{大気5)}の観測、それらと化学組成や起源との対応付け(有機エアロゾルのエイジングや、未解明度の高い生物起源バイオエアロゾルなどを含む)、エアロゾル-雲相互作用モデル化のためのエアロゾル個数濃度計測などが徐々に進展している。

④ SLCFs

2017年に欧州のSentinel-5 Precursor衛星が打ち上げられ、搭載した対流圏観測機器(TROPOMI: Tropospheric Monitoring Instrument)により、従来20 kmクラスだった水平解像度が最高で5.5 km × 3.5 kmまで向上し、二酸化窒素(NO₂)、一酸化炭素(CO)、メタンなどの日々の全球濃度分布の観測情報が複数年分蓄積され、都市や大規模排出源をおおまかに識別できるようになってきた。また、新型コロナウイルスの世界的蔓延に伴う経済活動の低下に関し、エネルギー燃焼の指標となるNO₂カラム濃度の2020年春季のマップが前年と対比されつつメディアから発信されるなど、迅速に社会ニーズにこたえた。しかしながら対流圏NO₂の衛星観測では25~50%もの低バイアスが報告されており、地上分光リモートセンシングによる検証が重要である。その際、紫外可視波長帯の太陽直達光・散乱光を利用したポータブルな受動型リモートセンシング装置として、NASA/Pandoraや各機関で開発されたMAX-DOASが活用されている。世界に配置されるようになってきたPandora観測と解析を標準化する、欧米主導のPGN(Pandonia Global Network)観測網がこの2年間で立ち上がった。また、これらの地上観測を衛星観測と統合的に用いることで、地上付近濃度を高精度に導出することも目標となっている。2020

年に韓国が打ち上げた静止衛星からのアジア大気汚染観測衛星の静止軌道環境監視分光器 (GEMS : Geostationary Environment Monitoring Spectrometer) への期待も大きい。ラッシュアワーなど日内変動をもつNO_x排出や光化学反応を追跡できるもので、成層圏オゾンと区別された対流圏オゾンカラム濃度の計測もなされる計画である。対流圏オゾンアセスメント (TOAR : Tropospheric Ozone Assessment Report) ^{大気6)} は、2020~2024年の第二期 (TOAR-II) に入り、オゾンの地上観測等の全球規模収集と気候影響評価等を継続している。我が国ではPM_{2.5}やオゾンの観測は越境大気汚染・都市汚染と気候変動両面で重要である。

5 データ基盤・情報配信システム

大気成分の地上観測データは、WMO全球大気監視計画のデータを中心に、気象庁のWDCGG (World Data Centre for Greenhouse Gases) や、WDCA (WDC for Aerosols)、WDCRG (WDC for Reactive Gases) に収録されている。NOAAの全球モニタリングデータベース、米国エネルギー省ARM (大気放射測定施設) のデータベースや、欧州Actrisデータセンターからのデータ入手も便利になりつつある。ファイルサイズなどの観点から衛星データも各機関から発信されることが多いが、WDCGGへはGOSATデータ等も取り込まれるようになり、統合的なデータ利用が推進されている。航空機観測ではCONTRAILデータベース (国内)、HALOデータベース (ドイツ)、船舶観測ではJAMSTEC DARWINサイト (国内) などもある。対流圏オゾンアセスメントレポートTOARで収集された地上オゾン濃度データベースも整備された。これらの観測データは、IPCC評価報告書等のための各種モデル間相互比較実験の検証や、収支・プロセス解析、MRVなどの政策に関連する排出量の把握など、多岐の目的のために活用されている。

陸域生態系物質循環に関する地上観測データは、FLUXNETなどの国際プロジェクトを通して、品質管理されたデータセットが提供されている。上述のILTERやTRYについても同様にデータ公開 (プロジェクト単位) が行われている。

■海洋の観測

気候把握のための海洋観測については、全球海洋観測システム (GOOS : Global Ocean Observing System) が国際的観測ネットワークの構築を、科学的・技術的な側面と政府間の調整の側面から支援し、推進してきた。GCOSは以下の通り、海洋に関するECVを設定している^{大気1)}。

物理変数：海面熱フラックス、海氷、海水位、海面の状態、海面の流れ、海面塩分、海面応力、海面水温、海面下の流れ、海面下の塩分、海面下の水温

生物地球化学変数：無機炭素、一酸化二窒素、栄養塩、海色、酸素、過渡的トレーサ

生物・生態系変数：海洋生息環境、プランクトン

ECVは気候システムとその変化を特徴づけるのに決定的に重要である。全球スケールでの観測・導出の実現可能性が十分に高く、費用対効果がよいという条件を満たすものが設定されている。

現在までに、全球的・持続的観測システムが概ね構築されているのは外洋域における物理ECVに限られている。しかし、気候変動への対応を含む国連のSDGs達成のため、外洋から沿岸域までをカバーし、かつ、生物地球化学の変数や生物・生態系に関する変数にまで対象を広げた分野横断の統合的観測の必要性が広く認識されるようになった^{海洋5)}。生物地球化学ECVについては、衛星観測が可能な海色を除いて、その全球的な観測はまだ限定的であり、生物・生態系ECVについては、全球的な観測網の構築は始まったばかりである。

海洋ECVのうち、水温、塩分、流れに関する海面から深度2000mまでの全球的な観測は、自動観測口

ポット（プロファイリングフロート）による観測網Argoの構築によって飛躍的に進展した^{海洋6)}。Argoはプロファイリングフロート技術によるリアルタイムのデータ取得と迅速かつ高品質なデータ公開を可能にする強力なデータ管理システムを柱としている。Argoの成功を受け、生物地球化学変数の計測への拡張したBGC Argo、海底または深度6000mまでの計測への拡張したDeep Argoを求める動きが生まれた。国際Argoプログラムは、従来の深度2000mまでの水温・塩分を計測するCore ArgoとBGC Argo、Deep Argoを一体とした観測網の構築を目指すことになった^{海洋7)}。BGC Argoは6つの生物地球化学変数（溶存酸素、硝酸塩、pH、クロロフィル蛍光、粒子による光散乱、下向き放射照度）を計測するフロートを1000台展開することを、Deep Argoは海面から海底近くまでの水温・塩分を計測するフロートを1200台展開することを、それぞれ目指している。Core Argoは、Argo開始当初の季節海氷域と縁辺海を除く、水深2000m以上の海域を緯度経度3度四方に1台のフロートでカバーするという目標を拡張している。季節海氷域と縁辺海を含めて、赤道域、西岸境界流域とその周辺、縁辺海におけるフロート密度を2倍とすることを目指している。BGC ArgoとDeep ArgoのフロートはCore Argoの計測も行うため、Core Argo専用のフロート2500台と合わせて計4700台の展開が目標である。

2020年7月現在、3854台のArgoフロート（注：Argoの構成要素となっているプロファイリングフロート）が展開されている^{海洋8)}。そのうち、生物地球化学センサを搭載したフロートは385台であるが、半数近くが酸素センサのみを搭載したものであり、6変数を計測するフロートは2割未満である。Deep Argoフロートは142台展開されており、そのうち4000m級のフロートが34台（日本製Deep NINJA 4台、フランス製Deep Arvor 30台）、6000m級のフロートが108台（米国製Deep SOLO 85台、Deep APEX 23台）である。新たなArgoの目標達成のためには、参加各国の予算獲得努力に加え、生物地球化学センサの低価格化、フロート・センサの長寿命化や、データ利活用の拡大を進める必要がある。また、フロート投入時のセンサ校正や投入後のデータ品質管理のために、船舶による多項目・高精度の観測が必要であり、全球海洋各層観測調査プログラム（GO-SHIP）等の高精度船舶観測との連携が不可欠である。

主に外洋域をカバーするArgoを補完し、外洋と沿岸域のギャップを埋める観測システムとして自律型水中グライダーのネットワーク構築が期待されている^{海洋9)}。水中グライダーの技術は2000年代に確立され、典型的には、海面から海底、または深度200～1000 mまでを0.5～6時間で行き来しながら水平方向に0.5～6 km移動しつつ物理・生物地球化学・生物パラメータを計測できる。水中グライダーの運用には高度な専門知識が必要だが、ユーザー間の科学的・技術的な情報交換や新たなユーザーの訓練に関する国際的な取り組みが過去十年ほどの間に組織化されてきた。国レベル、あるいは地域レベルで、水中グライダーの運用を提供する施設の整備も、欧州、北米、豪州で進んだ。このような動きを背景に、2016年に国際プログラムOceanGlidersが立ち上がり、2017年のWMO-IOC合同海洋・海上気象専門委員会第5回会合において、GOOSの構成要素として正式に認められた。OceanGlidersは境界流域をカバーする観測、台風予測に資する観測、主要水塊形成・変質の観測などを旨とするグローバルなネットワーク構築を目指している。

Argoとその拡張について、日本は継続的に貢献しており、とくにDeep Argoについては米国に次いで世界をリードしている。しかし、BGC Argoへの取り組みは、国レベルや地域レベルで戦略的に進めている米国や欧州に比べて遅れている。また、2000m級の国産プロファイリングフロートを持たないため、研究者と技術者あるいは民間企業が連携した生物地球化学センサの開発や利用が米国や欧州に比べて進みにくい状況にある。一方、JAMSTECや気象庁によるGO-SHIPやそれに準ずる高精度の船舶観測には大きな貢献をしており、Deep ArgoやBGC Argoを支える高精度データの供給に重要な役割を果たしている。水中グライダーについては、水産研究・教育開発機構が継続的な運用を目指しており、気象研究所も研究ベースでの運用を進めて

いる。しかし、国レベルで運用や新たな利用促進を支援する仕組みを整えている欧州・北米各国、豪州に比べると、その活動は限定的であり、また、OceanGlidersにも積極的には関与していない。

(5) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

■衛星による観測

① 陸域：多面的な植生・生態系パラメータの観測

従来は太陽光の反射を利用した植生の把握が主であったが、近年、様々なりモートセンシング手法によって、様々な陸域植生パラメータが計測されるようになってきた。例えば、光合成量をより直接表現できる物理量として注目度が高い太陽光励起クロロフィル蛍光はGOSATやGOSAT-2、OCO-2、TROPOMI衛星で観測が可能である。さらには、マイクロ波の放射を用いた植生バイオマスの推定、ライダーによる樹高の推定などが挙げられる。またフェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダー（PALSAR：Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar）に代表されるマイクロ波による能動的リモートセンシングデータが必要が高い。さらには、国際宇宙ステーション搭載型のセンサとして陸域植生を計測できる複数のセンサが搭載されている。樹高・植生ストレス・高波長分解能分光観測などの詳細な多面的な観測が可能になっている。これらは陸域における温室効果ガスのモデルを構築するにあたり、様々な物理量を提供できることから、不確実性の低減につながる。

疎な植生や雲・雨などを透過して地表の情報が得られるL帯の周波数を利用した合成開口レーダー（SAR：Synthetic Aperture Radar）は走査幅を増しつつ全球の森林領域の識別とバイオマスの評価を行う。100 t/ha以上の高密度森林領域での低感度性については、ライダーによる観測評価で補間することで全球バイオマスの測定を実現しつつある。L帯SARは日本で1992年に打ち上げた地球資源衛星「ふよう1号」（JERS-1：Japanese Earth Resources Satellite-1）からの長期の観測データの蓄積があり、現在もALOS-2によりその観測を継続するとともに、1.5ヶ月ごとに、熱帯域の森林変化の情報の観測および提供をJAXA/JICAが継続している。2020年代には、ALOS-2の後継であり観測幅を広げたALOS-4や、NASAとインド宇宙研究機関（ISRO：Indian Space Research Organization）がNISAR衛星（NASA-ISRO SAR、※NASAとISRO共同のS帯およびL帯の合成開口レーダー衛星）などを打ち上げ予定である。加えて、欧州ではコペルニクス計画の一環として2025年ごろを目指したL帯欧州レーダー観測システム（ROSE-L：Radar Observing System for Europe - L-Band）、米国ではNISARの後継がDecadal Surveyの中でのSDC（Surface Deformation and Change、※地表の変形・変化のこと）というミッションで研究されている。また、ライダーでは特に熱帯雨林の評価を行う米国のGEDIおよび、日本の植生観測ライダー（MOLI：Multi-footprint Observation Lidar and Imager）があげられる。森林評価は炭素循環の吸収源となる重要計測であり、大気中CO₂計測と並行した観測が重要である。加えて、林野火災によるCO₂排出の把握も重要であり、熱赤外などによる林野火災の発生域の把握、SARなどによる消失面積の把握、およびHAZE（※微粒子により視界が悪くなる現象のこと）の観測も行われている。

② 陸域：土地被覆、土地利用変化の詳細な把握

気候変動における不確定要素の一つには、都市化などによる土地利用変化がある。これまで土地被覆・土地利用の把握について、年単位の変動をグローバルで扱うことは、分類の精度や計算能力の観点から困難であった。しかし、近年になり、Google Earth Engineのようなクラウドコンピューティング

技術の発展により、土地利用変化、土地被覆変化を年々の単位で追跡することが可能になってきた。また、これらの詳細な正確な面積判定に対して、商業化された高分解能衛星群の台頭が挙げられる。商用衛星として35cm分解能撮像データの流通が始まっており、特に時間変化が大きい土地利用変化については有効な観測ソースとなりうる。分解能が要求されない場合にはGCOM-C、Landsat、Sentinel-2、Sentinel-3、MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer、※可視・赤外域の放射計のこと)、VIIRS (Visible/Infrared Imager and Radiometer Suite、※マルチチャンネルイメージャ・放射計のこと)などが全球の高頻度観測が無償で観測情報が提供しており、応用されている。例えば、Landsat衛星データ(分解能約30 m)を用いたグローバルでの森林の伐採・植林年が把握されている^{衛星8)}。そしてこれらのデータは毎年更新されている。また、欧州の衛星であるSentinel-1、Sentinel-2については、無料で公開されている点、Google Earth Engineやその他解析ツールの充実、複数機の打上による観測頻度の高さなどの利点もあり、広く利用されるデータセットとなっている。また、小型・超小型衛星などによる高頻度観測と無償の衛星データとの組み合わせ、あるいは熱帯域などの雲の多い地域では、Sentinel-1、ALOS-2のようなSARとの組み合わせによる土地利用変化の情報利用も進められている。新たなシステムとして、大型望遠鏡を用いた静止軌道からの観測システムも日欧などで検討されている。

③ 海洋衛星観測

海洋に関する基本パラメータはこれまで海表面温度、海上風速および海面高度が観測されてきたが、米国AquariusによるL帯放射計と散乱計の組み合わせや欧州のL帯受動合成開口放射計で海面塩分濃度が計測された。さらにTopex/Poseidon、JASONなどの直下型の高度計による海面の観測に加え、Ka帯合成開口レーダー(Ka-SAR)を使い、面的な観測を実現するSWOT衛星観測(Surface Water and Ocean Topography、地表水・海洋地形)の登場により、海流など海の循環についての知見が発展するとみられる。海面水温観測の詳細化による沿岸領域の観測(GCOM-C観測における250 mレベルの高分解能化)などが継続している。ひまわり、GCOM-W、GCOM-Cなどの異なる分解能のデータ、モデルなどの組み合わせによる高精度の海面水温の情報作成の研究も進められており、実利用面では「海しる」などの統合的海洋情報システムが開発されている。海上風は、アクティブなマイクロ波による散乱計やSARとともに、パッシブなマイクロ波放射計による観測が行われている。

④ 大気・エアロゾル・雲衛星観測

大気については、これまで観測が困難だった陸上に浮遊するエアロゾル観測について、GCOM-Cが紫外域観測、偏光観測を実装し、海上と陸上を合わせたエアロゾルの観測評価を可能とした。CO₂については、日本のGOSATを筆頭に米国OCO-2や欧州、中国による観測衛星開発が一層激化している。GCOM-C衛星は雲、エアロゾル、放射など気候変動に関わる様々な因子の包括的な観測を行い、現在データの検証やアルゴリズムの改良などが進められている。GOSAT-2衛星に搭載の雲・エアロゾルセンサ2型により、雲だけでなく、近年健康被害が懸念されている地表付近のPM_{2.5}やブラックカーボンのモニタリングに貢献するデータ提供に向けた検証やアルゴリズム開発の新展開が図られている。

観測時刻が固定される低軌道衛星だけではなく、米国では静止軌道から観測の検討も始まっている。またCO₂以外に不完全燃焼による人為起源や森林火災の指標となる一酸化炭素(※GOSAT-2で観測可能)や窒素酸化物(※GOSAT-GWで観測可能)の同時観測、メタンの鉛直分布計測(独仏MERLIN: Methane Remote Sensing Lidar Mission)などが注目されている。放射収支に高い影響を持つ雲の

生成消滅については、エアロゾル観測、降水観測の間を埋めるべく、CloudSat/CALIPSO (NASA) およびその後継ミッションとなる EarthCARE が開発されている。降水についてはマイクロ波放射計による全球観測が国際協調して実施されており、AMSR シリーズがリードしているが、欧州で新たな放射計の検討もなされている。それらマイクロ波放射計のキャリブレータとしての Ku/Ka 降水レーダーとマイクロ波放射計を搭載した GPM 主衛星が整備されている。また次世代の高頻度観測の技術実証である超小型衛星センサ (RainCube/NASA-JPL)、日米欧国際協力による後継ミッション ACCP (Aerosol and Cloud, Convection and Precipitation、※エアロゾル・雲、対流・降水の統合観測ミッションのこと) の検討が開始されている。大気物質循環/大気汚染の領域としては、対流圏から成層圏下部を観測中心とした掩蔽観測についてサブミリ波を利用する検討が続いており、また放射収支に影響の高い氷雲の詳細観測を目標としたサブミリ波観測も技術実証に入りつつある。海外では欧州で Sentinel-4、米国では TEMPO (Tropospheric Emissions : Monitoring of Pollution、※NASAの対流圏排出、汚染監視ミッションのこと)、韓国の GEMS (※機器は米国が開発) など、紫外可視領域の静止衛星搭載ハイパー分光計による対流圏大気物質観測などが計画・開発されている。特に欧州では低軌道においても欧州気象衛星 (MetOp- Second Generation) に紫外～短波長赤外イメージング分光計 Sentinel-5 がセンサとして搭載される予定である。

5 極域

極域は特に温暖化の感度が強いことから、極域の海水状況について米国軍事気象衛星搭載のマイクロ波撮像装置 (SSM/I : Special Sensor Microwave/Image)、改良型高性能マイクロ波放射計 (AMSR-E) などから時間的、面積的把握が始められた。現在、マイクロ波放射計である GCOM-W が続けられている。加えて、SAR や MODIS、VIIRS、GCOM-C による観測も続けられている。特に SAR ミッションにおいては、国際的な共同研究プロジェクトである MOSAiC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate、※北極気候研究のための分野横断漂流観測所での観測ミッションのこと) が立ち上げられ、ALOS-2、ドイツの TerraSAR-X、カナダの Radarsat-2、欧州の Sentinel-1 の SAR と光学衛星、現地観測などによって、北極域での氷床の移動を 2019 年 9 月から 1 年にわたり観測キャンペーンが実施されている。また氷床の厚さの変化を観測するため、ライダーによる氷床観測衛星の後継機 (ICESAT-2) が米国により打ち上げられた。

6 次世代静止気象衛星

静止気象衛星について、NASA の気象衛星 GOES-R とひまわり 8、9 号機が利用できるようになっている。ひまわり 8・9 号に搭載された可視赤外放射計によって従来の 1km 分解能から倍の 500m 分解能への高精度化および撮像間隔を 2 分半まで縮めたことによる動画観測が実現している。その上、エアロゾル観測が可能になっている。この水準での高時間・高空間解像度のエアロゾル観測は、欧米の新世代の静止気象衛星に先駆けたものであり、国際的にも注目されている。準リアルタイムデータについては、気象庁気象研究所のエアロゾルの数値シミュレーションモデルプロダクト共に、「JAXA ひまわりモニター」ウェブサイトで公開されるようになっている。CGMS は今後イメージャ搭載の他に、赤外サウンダおよび雷センサの搭載を推奨しており、次号機搭載の方向性で検討・調整が開始されている。

⑦ 地上処理：IT技術（プラットフォーム、大規模データアーカイブ、機械学習・ビッグデータ解析）

膨大な衛星観測データを蓄積し、相互に利用するためにクラウドベースあるいは大型計算機システムを用いたプラットフォームが国内外で整備されている。国内においてもDIAS、Tellus、NICTや産業技術総合研究所の大規模アーカイブなどが存在している。地球観測衛星データ、地上データなどのビッグデータから社会情報を抽出して紐付ける機械学習、ディープラーニングなどのIT技術開発は、産業技術総合研究所や民間企業などにより急速に進みつつある。しかしながら、このようなデータを扱うためのプラットフォームの整備、運用とともに、データサイエンティストの観測データへの習熟やアプリケーションの研究開発などが喫緊の課題である。また、アウトプットとしての社会情報や、どのように利用されるべきかの検討についても課題である。米国では商業クラウド業者の提供するプラットフォームやNASAなどによる研究が、欧州ではコペルニクスDIASとHORIZON2020などの研究開発及び人材育成において主要な役割を果たしている。

⑧ 地上処理：衛星間データフュージョン

関連する複数衛星の観測データ結果から統合的に全球状況を把握する手法の研究が行われている。GPMを元としたGSMaP（衛星全球降水マップ）、実用海洋情報の統合化を図った「海しる」等が代表的である。またEarthCAREに搭載される複数種のセンサの統合解析、前述のバイオマス評価におけるL帯SAR（合成開口レーダー）/ライダーの統合処理などの活動がある。また、LandsatとMODISのデータの統合処理による高時間・空間分解能の正規化差植生指数の時空間適応反射率融合モデル作成や超高解像度化などの活動がある。

■大気・陸域の観測

① 東アジアの大気汚染の改善傾向とコロナウイルス感染拡大に起因した全球排出変化

衛星観測や地上観測の長期連続データなどが、2010年前後から、中国を含む東アジア域の大気汚染（ブラックカーボンを含むエアロゾル、NO_x、SO_x）レベルの改善傾向を示している^{大気7), 8), 9)}。これらの観測から近年の排出削減率が推定され、IPCCの気候シミュレーションに入力されている排出インベントリに修正が必要であることも指摘されている。硫酸エアロゾルの低減は今後の温暖化傾向を増強する大きな要因となっており、ブラックカーボンの低減がその効果をどれだけ打ち消すかなど、現実に沿った解析が重要である。一方、対流圏オゾンの明確な減少は観測されておらず、大気化学非線形プロセスの解明が望まれる。

新型コロナウイルスの世界的流行による経済活動低下に関し、2020年2月の中国を皮切りに、世界各地でNO_x濃度などの明瞭な低下が人工衛星データなどから確認された^{大気10)}。CO₂の排出^{大気11)}も一時的に最大3割削減されたとの推定もあり、交通や産業といった排出部門ごとの活動低下度との対応付けなどを手掛かりに、これまで困難であった部門毎排出量の推計などが実践されることも期待されている^{大気12)}。

② 極端な気候現象と大気-陸面環境への影響評価

地球温暖化などの気候変動の進行を一つの要因として、ここ数年の間に地球上の様々な地域で異常気象が発生しており、それらの影響が大気-陸面システムにも大きな影響を与えている。異常気象は大気だけでなく陸面にも大きな影響を与えており、その結果、大気環境にさらに大きな影響をもたらす。2018年における東アジアや欧州における熱波（異常高温）は、特に欧州においては乾燥が伴ったことにより、植生の生産量が減少するなどの影響があった。また、2019年末におけるオーストラリアの森林火災では、オーストラリアの森林（ユーカリに代表される広葉樹林・混合林帯）の約20%が2019年末から2020年初頭の

火災シーズンにおいて消失した。2020年の春～初夏においてはシベリアの北部で8万年に一度とされる規模の異常高温を示し、永久凍土の融解や森林火災の発生などのリスクが高まっている。米国における2020年の森林火災においても解析が行われている。これらの現象は、衛星リモートセンシングなどで、早急なモニタリングが可能になってきている。

■海洋の観測

① 国連持続可能な開発のための国連海洋科学の10年

2017年12月、国連総会において2021年から2030年までを「持続可能な開発のための国連海洋科学の10年」(以下、「国連海洋科学の10年」)とすることが決議された。国連海洋科学の10年は、海洋の持続的な開発に必要な科学的知識、基盤、パートナーシップを構築すること、および、海洋に関する科学的知見、データ・情報を海洋政策に反映し、多くのSDGs達成に貢献することをめざしている。この目的の実現には、海洋観測の充実が不可欠であり、重点的な取り組みの一つに、海洋観測システム、データシステム等の基盤強化が挙げられている。

② G7「海洋に関する環境・海洋・エネルギー大臣による共同会合」

2018年9月にカナダ・ハリファックスで開催された環境・海洋・エネルギー大臣会合では、持続可能な海洋の発展に向けた状況の改善を実現しつつ、海洋観測データ収集のギャップ解消に向けて協働すること、科学的知見の発展とより効率的・効果的な科学的海洋観測ネットワークの実現に向けた「海洋の未来に関するG7専門家作業部会」を開催することなどに合意した。これは、2016年のG7科学技術大臣会合における、国際的に海洋観測網を強化することなどを盛り込んだ共同声明「つくばコミュニケ」の内容を、G7各国が協力して継続的に推進することを確認したものと位置付けられる。

③ OceanObs'19

世界の海洋観測コミュニティが一堂に会し、海洋観測に関する将来指針を議論する OceanObs'19が2019年9月にホノルルで開催された。OceanObs'99(参加者約300名)、OceanObs'09(36か国から参加者約600名)と10年ごとに開催され、その後の海洋観測の方向に大きな影響を与えてきたが、OceanObs'19では、社会/産業/政策面のエンドユーザーとの連携を目標に掲げ、74か国から多様なセクターのエキスパート(従来海洋観測と関わりに薄かった社会学者、政策者、市民団体、産業界から幅広い参加者を含む)1300名以上が参加した。140本におよぶWhite Paperのテーマは多岐にわたり、異なるコミュニティ間の対話と連携を重視した、幅広いステークホルダーの議論を促すよう分野横断型の議論が展開された。この会議を機に新たな段階を迎えたコミュニティ間の連携が、今後の海洋観測のファンディングからデータ活用の在り方までを大きく変えていく可能性がある。

④ ユネスコ政府間海洋学委員会(IOC)によるArgoの拡張に関わる提案の承認

自動観測ロボット(プロファイリングフロート)による全球海洋観測網であるArgoの拡張に関わる2つの提案が2018年にIOC執行理事会で採択された。ひとつめは、Argoの計測項目に6つの生物地球化学パラメータを加えることである。これらのセンサを搭載したArgoフロートにも、沿岸国の排他的経済水域(EEZ)に漂流する可能性のあるフロートに係る情報の提供方針に関するガイドラインを適用することが合意された。ふたつめは、Argoへの新たな計測項目の追加を、(1) experimental、(2) global

approved pilot、(3) global implementationの3段階で行うことである。具体的には、段階(1)は上記のガイドライン適用外の各国の研究プログラムとして実施され、国際Argo運営チーム(AST)がその結果を評価して段階(2)に進めるか否かを判断する。段階(2)は、科学的評価を行うための期間に限定されるが、この間、上記のガイドラインが適用される。その結果を踏まえ、ASTとGOOS運営委員会が段階(3)への移行をIOCに提案し承認を得る。IOCによるArgo拡張への承認と支持は、Argoの新たなステージの幕開けを公式に告げるものといえる。

⑤ 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)「海洋・雪氷圏特別報告書」の公表

IPCCは第6次評価プロセスの一環として、2019年9月に「海洋・雪氷圏特別報告書」を公表した。第5次評価報告書で指摘した海水温や海水位などの海洋の変化が継続あるいは強まっていることを指摘し、生態系や社会への影響の広がりや将来の見込みが報告された。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■衛星による観測

【国内】

① GOSAT-GW

GOSATシリーズを継承した、新たな地球観測衛星である。GOSAT-GWは独自の温室効果ガス観測センサー(TANSO: Thermal And Near Infrared Sensor for carbon Observation)において引き続きCO₂観測性能を発展させ、排出源を都市別に観測できる性能を達成する。その上で、AMSRシリーズも継承し、同時搭載されるAMSR3では、固体降水を観測できる高周波数バンドが追加された。

② EarthCARE

EarthCAREは能動/受動の光学/電波センサを組み合わせた観測衛星である。ESAとJAXA、NICTが共同開発しており、世界初のドップラーレーダーにより、雲内を含めた鉛直風観測を行う。

③ 二周波降水レーダー後継機(DPR: Dual-frequency Precipitation Radar)

全球における降水状況の準リアルタイム観測予測システムの中心的衛星であるGPMの後継について、国際協力を前提に、今後の降水ミッション(ACCP)について検討中。

④ GCOM-C/GOSATシリーズの雲・エアロゾルセンサ後継機(CAI: Cloud and Aerosol Imager)を含む多波長光学放射計(SGLI)後継

多方向観測、偏光観測、近紫外バンドを用い、これまで観測困難だった陸上エアロゾルを高精度に観測する性能を有したSGLIの後継について検討中。

⑤ ALOS-5,6(次期光学・L帯SAR衛星)

大規模災害の監視、被害状況の観測を国際災害チャータ枠組みにより実現しているALOS-3,4の後継ミッションを検討中。特にALOS-4はJERS-1から続くL帯SARミッションを継続し、長期データやグローバルデータを持つ日本の特徴となるセンサである。

⑥ ISS搭載MOLI

ライダーの長寿命化技術を実証し、SARとの複合利用による森林バイオマス評価、また数値地形モデル (DTM: Digital Terrain Model) 3次元マップの高精度化を目的として、レーザー高度計ミッションを検討中。

⑦ ドップラーライダー

民間航空企業からの要望を基に航空路管理、また将来的に国際協力により全球の大気力学的観測を実現するシステムを目標に検討中。

【海外】**① フランス国立宇宙研究センター (CNES) のMicroCarb**

CO₂の排出源と吸収源とその季節変動を観測する小型衛星である。

② NASAのGeoCarb

静止軌道の商用通信衛星への同乗により、特定地域の常時観測性を獲得する目的であり、OCO-2の発展形である。なお、OCO-3はISSに搭載された。

③ ESAのCO₂M

人為起源のCO₂とメタンや二酸化窒素を監視する将来衛星である。

④ ドイツ航空宇宙センター (DLR) とCNESのMERLIN

差分吸収ライダーの原理により、メタンの精密局所観測を実現するライダー衛星。

⑤ NASA/ISROのNISAR

NASAがISROと共同開発した大型展開アンテナをもちL帯およびS帯のSAR観測を行う衛星。

⑥ NASA/CNESのSWOT

KaSAR2機と電波高度計を搭載し、従来は1次元の観測しかできなかった海面高度を2次元 (面的) に計測するTopex/POSEIDONの後継衛星。

■大気・陸域の観測**① 温室効果ガスと短寿命成分の統合解析・同時制御 (GHG/AQ統合解析)**

衛星によるGHGとSLCFsの計測を統合し、両者に共通となる化石燃料燃焼などの発生源を特定し、排出を定量化する取り組みが近2年で顕著に加速した。Sentinelシリーズで知られる欧州Copernicus計画の地球観測衛星ミッションでは従来の6ミッションにさらに6つの新規ミッションが加わりPhase Bへと進んだ。その中の1つにCO₂とNO₂を計測するCO₂Mミッションが選定され、この取り組みを推進している。日本でもGOSAT-GWにてCO₂大規模排出源の特定の目的でNO₂計測を取り入れることとなり、研究開発の起爆剤となることが期待される。IPCCの第7次サイクルでは、従来のUNFCCC (国連気候変動枠組条約) への国別温室効果ガス排出推計にSLCFsを追加していく動きが始まり、その検証観測も重要となる。

共通排出の理解に加え、両データを数値モデルへ同化させ、メタンの消失を支配するが大気質化学反応で決まるOHラジカルの理解向上を進展させることも重要である。SLCFは大気汚染物質であり大気質(AQ)にも深く関わるため、これらはGHG/AQ統合解析とも呼ばれる。今後に向けても、地上観測・衛星観測・モデルを統合した解析が有意義である。わが国の地上拠点である綾里・南鳥島・与那国島・昭和基地(WMO全球大気監視計画サイト)、千葉・沖縄辺戸岬・福江(SKYNET・AD-NET他の共通サイト)、能登・波照間島・落石・東京スカイツリーなどの研究・モニタリングサイト、つくば・佐賀・陸別(TCCONサイト)、EANET(東アジア酸性雨モニタリングネットワーク)局などの活用も望まれる。SLCF削減のための気候と大気浄化の国際パートナーシップ(CCAC)は、アジア太平洋地域における大気汚染の現状と具体的な政策措置について科学的見地から包括的に分析した初めての評価報告書「Air Pollution in Asia and the Pacific: Science-based Solutions」を2019年に公表し、温暖化緩和面についても述べている。

② 大気汚染・温室効果ガスの静止衛星観測の動き

大気汚染天気予報のように、汚染大気を時々刻々と追跡して時空間的に密に観測することの重要性からESA、NASA、韓国航空宇宙研究院(KARI)のそれぞれが静止衛星計画を進めており、地球観測衛星委員会(CEOS)のAC-VC会合(Atmospheric Composition Virtual Constellation)などでも連携が活発に議論されている。ESAのSentinel-4、NASAのTEMPOに先んじて、韓国が静止衛星軌道にGEMSを2020年に打ち上げに成功し、アジア域でのSLCFsの排出・光化学反応の日変化解析などが活性化する見通しがある。また、静止衛星からCO₂を計測する米国のGeoCarbミッションにも注目が集まっている。赤外サウンドの水蒸気から温室効果ガス計測への展開にも期待がある。

③ 地球観測衛星の戦略立案の新たな道筋：グランドデザインと提言

現業省庁ニーズ型以外の、学術界からの地球観測衛星ボトムアップ型提案は近年停滞していたが、25の学術団体などによる「今後の宇宙開発体制のあり方に関するタスクフォース会合・リモートセンシング分科会」による「地球観測グランドデザイン」とりまとめ(2017年)および2018、2019年ミッション公募、日本学術会議・地球惑星科学委員会・地球・惑星圏分科会地球観測将来構想小委員会による「持続可能な人間社会の基盤としての我が国の地球衛星観測のあり方」提言(2020年)とりまとめなどから、予算化への新たな道筋づくりと活性化が進められている。排出源の特定に資するキロメートル級観測実現などを目指したGOSAT-GW後の計画や、次世代静止衛星の議論などの場として重要である。

④ 北極観測研究の重点化と船舶観測

温暖化の進行が著しい北極域の気候環境変動メカニズムを明らかにするための観測研究が世界的に重要視されている。日本もArCS-II北極域研究加速プロジェクト(2020-2024年度)などにおいて、炭素やブラックカーボン循環や生態系変動の理解を進めるための現場観測などを推進している。国際的には、ドイツ連邦教育省の砕氷船R/V Polarsternを海氷域に閉ざして実施する通年観測計画MOSAiC(2019-2020)が実施され、国際北極科学委員会(IASC)と地球大気化学国際協同計画(IGAC)の合同アクティビティPACES(air Pollution in the Arctic: Climate Environment and Societies、※北極域大気汚染と地球の気候環境と人間社会の相互作用プロジェクト)や、北極評議会・北極モニタリング評価プログラムでのSLCFアセスメントレポート(2021年)に向け知見集約が進んでいる。文部科学省では砕氷能力のある北極研究船の基本設計が進められており、通年での北極観測などへの新たな展開が期待されている。北極

以外での船舶観測は研究船や商用船等を利用し気象庁・JAMSTEC・国環研などが実施している。

2020年1月、国際海事機関により、船舶からのSOx排出基準が3.5%から0.5%に世界的に大幅強化されたことに伴う気候環境への影響にも注目が集まっている。また、GHGの排出低減に向けた議論も行われている。GHG排出削減に向けたルールを議論する国際海事機関の海洋環境保護委員会の会合はCOVID-19の影響で延期されていたが、2020年11月に開催中である。国際貨物増大等により、船舶のCO₂排出量も加速度的に増大し、2008年と2018年を比較すると40%の増加となっている。日本は2018年から海洋環境保護委員会の議長国でもあり、2030年までに船舶CO₂排出量を40%減少させるため、全船舶での燃費性能を強化する提案を各国と協調して提案している。新規船舶だけでなく、SOx等の大気汚染物質とGHG排出とも多い現存船舶の省エネ化を促す提案が国際合意に達すれば、CO₂排出量削減につながるものと期待される。欧州や日本の新規船舶ではLNG（液化天然ガス）の大型貨物船が就航し、メタノール、LPG、水素等の新燃料の研究開発も行われている。

⑤ 航空機観測関連

2018年以降、NASA専用航空機による南極～北極にわたる高度プロファイル計測（ATom等）や森林火災による大気組成変化観測（FIREX-AQ）、ドイツ専用機HALOによるアジア観測（EMerGe-Asia）などが、長寿命気体・エアロゾル・SLCFsを網羅する形で総合的に実施された。日本は観測専用機を保有しておらず、欧米だけでなく、中韓にも遅れをとっている。

⑥ グローバルカーボンプロジェクト（GCP：Global Carbon Project）

温室効果ガス濃度の上昇速度を減少させるための地球規模の政策決定や科学的理解を助けるために2001年に設立されている。本プロジェクトでは、2007年以降、大気—陸域、大気—海洋間などの自然炭素収支と化石燃料燃焼や土地利用変化などの人為的排出量を毎年更新している。さらにその中に地域別炭素収支を推定する地域炭素収支評価（RECCAP：REgional Carbon Cycle Assessment and Processes）があり、現在はRECCAP-2が着手しつつある状況である。さらにメタンや一酸化二窒素についても同様の解析が進み、成果も公表されている。また、これら分野はIPCC報告書における生物地球化学分野における重要な貢献となっている。

⑦ Google Earth Engineなどのオープンなデータ解析プラットフォーム

Google Earth Engineでは、様々な衛星データ、気象データが収集されており、クラウドコンピューティングを利用して、大量データの解析が行える仕組みを提供する。特に個人研究者レベルでは扱えない大量のデータを所有しており、簡単なスクリプトを書くことで様々な解析ができるようになっている。Landsat衛星やSentinel-1, 2衛星データなどの空間解像度の細かいデータ（10-30 m程度）に加えて、中空間分解能（1 km程度）の衛星データなど広域の気候変動観測にも利用可能なデータセットも準備されている。

■海洋の観測

① TPOS2020（Tropical Pacific Observing System in 2020 project、熱帯太平洋海洋観測システム2020プロジェクト）

TOGA（Tropical Ocean and Global Atmosphere、※熱帯太平洋と全球大気、1994年に終

了) 計画で構築された太平洋海洋観測システムはTAO/TRITON (the Tropical Atmosphere Ocean/ TRiangle Trans-Ocean buoy Network) のブイ網に後継されている。TPOS2020は、そのブイ網を利用し、2020年までに再設計することを目指すGOOSプロジェクトである。日米だけでなく多国多機関の協力を得て、2040年まで有効な新たな観測システムとすることを目標としている。各大洋の赤道域と太平洋の緯度南北10度以内の熱帯域で、Argoフロートの空間密度を2倍にすることなどを含む提言をしている。

② AtlantOS

欧州連合 (EU) のHorizon 2020プロジェクトであるAtlantOSは、GOOSとGroup on Earth Observations (GEO、地球観測に関する政府間会合) による国際協調の枠組みの上に組み立てられた。GOOSとGEOの取り組みを補完し、物理学だけでなく、海や海底の生物学、生態学、生物地球化学にも焦点を当て、大西洋における海洋観測システムを「海洋観測枠組み (Framework for Ocean Observing)^{海洋10)}」に基づいて組織的に強化・最適化することを目指して、2015年4月に開始された。2019年9月に終了し、その成果をもとに、欧州の枠を超えた新たな国際プログラムAtlantOS (All-Atlantic Ocean Observing System) に移行した。ただし、移行後に大きな予算措置はなされていない。

③ Deep Ocean Observing Strategy

主に2000 m以深の深海の観測を、「海洋観測枠組み (Framework for Ocean Observing)」に基づいて推進しようとするGOOSプロジェクトである^{海洋11)}。学界、産業界、NGO、各国政府、国際政府機関を含む深海に関わる幅広いパートナーシップの下で、今後数十年にわたって物理学、生物地球化学、生物/生態系科学における深海の課題解決に資する重要な知見を継続的に提供できるような観測システムを構築することを目指している。

(6) 科学技術的課題

■衛星による観測

① 静止軌道・あるいは衛星多数フォーメーションを利用した観測常時化

- ・望遠鏡・アンテナの展開技術を含む大型化
 - 分割式大型望遠鏡技術 (NASA天文観測衛星JWST、JAXA静止光学衛星等)
 - 展開大型アンテナ技術 (NISAR、BIOMASS等)
- ・観測センサの小型軽量化
 - Ka帯など高周波採用や送信デバイスの固体化高出力化によるアンテナの小型化
 - 群衛星運用技術
 - 酸化ガリウム、ADC等を集積化した検知器などの採用による電気周りの小型省電力化
- ・軌道制御機能を持つ小型衛星バスの技術開発

② 能動光学 (レーザー) を用いた観測の高度化

- ・スキャニングなどによる高精度3Dイメージング
- ・ドップラー観測による地球大気運動観測

③ 表層下観測などを実現する新しい手法の研究

- ・電波センサの周波数域の拡大、能動センサの多周波化
 - サブミリ波など高周波およびP波など低周波の利用 (Ice Cloud Imager, BIOMASS) による観測対象の拡大
 - 多波長 SARによる観測対象識別 (NISAR)
- ・重力場観測による地下水推定 (GRACEシリーズ, GOCE)

④ 複数衛星による干渉観測によるリアルタイム化、高精度化

- ・複数衛星フォーメーションによる SAR 観測 (TANDEM-X, SAOCOM)
- ・地上/衛星、衛星/衛星間による干渉観測システムの発展 (電波天文衛星 VSOP 等)

⑤ MEMS (Micro Electro Mechanical Systems、※微小電気機械システム) 技術の発展に伴う要素技術の応用研究による新たな観測システム設計

- ・メタマテリアルアンテナ/光学素子、TypeII 超格子赤外センサ、マイクロボロメータ等

⑥ 設計開発プロセスにおける設計・検証の統合的デジタル化による開発期間短縮**⑦ SoC 技術、ソフトウェア通信技術等を取り入れた軌道上フレキシブルなシステムの研究****⑧ 観測データアーカイブから社会利益をもたらす情報化手法の研究**

- ・プラットフォーム (アーカイブ、クラウド)、IT 技術 (機械学習、ディープラーニングなど)

■大気・陸域の観測**① 小型センサやドローン、分光技術の気候変動観測への利用**

従来、大気汚染ガス (CO、NO_x、O₃、SO₂) や粒子状物質 (ブラックカーボン等)、温室効果ガス (CO₂ 等) は、ラックマウント型の比較的高額な機器により計測されてきた。近年、技術の進歩により、適度な精度を保ったまま価格やサイズが2桁程度低下したローコスト小型センサが多点稠密観測やドローン (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) 搭載観測に活用されるようになった。市民と一体となった IoT 型の計測や、Society 5.0 への貢献を視野においたきめ細やかでスマートな社会情報発信なども期待されている。その一方で、長期安定性や信頼度の向上が重要な課題である。ドローンでの自律・自動的な高度分布計測にも期待が集まるが、安全確保技術の確立が求められる。衛星や航空機からのイメージング分光によるリモートセンシングでは、可視・紫外から近赤外～熱赤外への波長域拡張が応用範囲の大幅な拡大を生むと期待されており、ハイパースペクトルカメラの応用などと合わせ、大気汚染物質・温室効果ガス・植生・海色・生物多様性などの高度な観測を視野に入れて研究開発を進めることが重要である。

② 衛星ライダーによるエアロゾル・温室効果ガス観測

衛星ライダーによるエアロゾル観測については、すでに直交偏光式雲エアロゾルライダー (CALIOP: Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)、雲エアロゾル輸送システム (CATS: The Cloud-Aerosol Transport System) が運用され、大気ライダー (ATLID: The ATmospheric LIDar)

の開発が進められている。しかしCALIOP はすでに寿命を越えており、CATS はISS 搭載のため観測緯度範囲が限定されている一方、ATLID は運用期間が3年と短い。このためATLID 以降の衛星ライダー計画に着手することが求められているが、高コストのライダー開発、長期間に渡るライダー運用可能性の問題がある。また、GOSAT、OCO-2 のような太陽光を使う観測の場合、太陽高度が低くなる冬期や夜間の観測が出来ないが、レーザーを使った差分吸収ライダー等の計測ではこれらの問題点を回避出来る可能性がある。その一方でライダーは長期間に渡る運用可能性にまだレーザー光源の寿命の問題等の課題がある。

③ ビッグデータへの対応

ひまわり8・9号をはじめとした静止衛星観測等の高機能化により、観測データ量が飛躍的に増大し、そういったビッグデータへの対応が課題である。データのアーカイブだけでなく、リアルタイム利用を可能とするサービス体制の充実化などによりデータ利活用を促進することも重要である。気候変動等に伴って頻発していると考えられる「広義の安全保障」に関わる防災情報をリアルタイムに自治体などが活用できる仕組みもここに含めて考えるべきである。

④ 人為的温室効果ガス排出量推定の見直し

Global Carbon Project などにおいて、様々な手法間における炭素収支量の比較解析により、人為的温室効果ガスの排出量にも不確実性が高いことが示されてきた。主には、化石燃料による温室効果ガス排出量や、土地利用変化によるCO₂排出量である。特に、後者は、地上観測と衛星観測を組み合わせると不確実性の低減を行うことができると考えられるが、まだ道筋はたっていない。

⑤ 河川を通じた流出など個々の素過程を明らかにする必要性

Global Carbon Project などにおいて、様々な炭素フラックスを比較して、整合性を確認すると、河川を通じた陸から海へのCO₂フラックスなど、推定を向上させる必要があるフラックスは多い。その他、収穫による炭素フラックスなど、多くの点を改善する必要がある。これらの理解には地上観測や統計データ（イベントリデータ）が非常に重要な役割を果たすこととなる。

⑥ 種々のデータの統合的解析

個々の研究結果の長所・短所を踏まえて、様々な研究結果を利用した統合的な解析が進められている。例えば、種々のリモートセンシングデータや地上観測データを利用した統合的研究として、各独立した手法からの成果を多面的に見ることによって、各手法の長所・短所や、今後必要な研究が明らかになる。近年はこういった統合的な解析が普及しつつあり、この傾向は今後も続くだろう。

⑦ 静止気象衛星を利用した陸域植生モニタリング

衛星リモートセンシングは、広範囲の植生を同一基準で観測ができるために有意義である。現在MODIS センサなどの極軌道衛星データが広く用いられているが、特に熱帯雨林地域では雲の頻度が高く植生のモニタリングが非常に困難である。静止気象衛星は10分等の高い時間分解能をもち、熱帯雨林などの地域のモニタリングには有効に利用できる可能性を持つ。特にひまわり8・9号では可視・近赤外域の観測バンド数が増えており、陸域植生のモニタリングへの応用が進められている。

■海洋の観測

① プロファイリングフロート技術の向上

現在Argoプログラムに用いられている主なフロートは、シェア順に、米国Teledyne Webb Research社製APEX、フランスNKE-INSTRUMENTATION社製ARVOR、米国スクリプス海洋研究所によるSOLO-II、米国Sea-Bird社製NAVIS、米国MRV社製のS2Aである。経費削減・投入機会確保・環境負荷軽減の観点からArgoの持続可能性を高める上で効果的なフロートの長寿命化は概ね年々進んできている。最も成績の良いSOLO-IIの場合、2018年に投入されたフロートはすべてが36サイクルの観測（1年に相当）を完了し、2015年に投入されたフロートの約90%が144サイクル（4年相当）を完了した。しかし、機種によって、故障率が異なり、たとえばARVORの場合、約5%のフロートが36サイクルに達しておらず、144サイクルに達する割合も5割程度となっている。技術的完成度を高める努力が望まれる。一方、トップレベルの寿命を達成している機種にとっては、バッテリーの長寿命化が課題となっている。スクリプス海洋研究所が米国Tadiran社製ハイブリッド型リチウム電池の長期試験を実施中で、現在まで良好な結果を得ており、140～150サイクル（寿命10年以上）の達成が期待されている。より長期的な視点からは、環境負荷の軽減のための化学物質排出削減等につながる抜本的な改良も望まれる。

② Argoフロート搭載CTDセンサの多重性・代替性の確保

Argo計画開始直後の一時期を除き、Argoに用いられているフロートに搭載されているCTDセンサ（Conductivity Temperature Depth profiler、※電気伝導度（塩分）・水温・圧力（深度）計）は、米国Sea-Bird社製SBE41またはSBE41CPである。一社独占の状況は、観測網の安定的な維持には好ましくない。過去2回、製品の不具合により、CTDの供給が滞り、Argo観測網の維持に重大な支障をきたした。国際Argo運営チームは、新たなセンサをArgoに導入する際の手続きを整備し、フロートに搭載可能で長期間安定した新たなCTDセンサの開発を奨励している。しかし、長期安定性の実証などのハードルは高く、現在パイロットフェーズとして搭載されている新たなCTDセンサの製造元であるカナダRBR社は、経費の面から、開発を継続できるか否かの岐路に立たされている。センサ開発を民間企業の努力だけに頼るあり方の限界を示しているといえるだろう。

③ BGC Argoフロート搭載生物地球化学センサ技術の向上

BGC Argoが対象とする6つの生物地球化学変数（溶存酸素、硝酸塩、pH、クロロフィル蛍光、粒子による光散乱、下向き放射照度）を計測するセンサは既に実用化されているが、長期安定性の向上が不可欠である。また、BGC Argoの持続可能性を確保するためには、センサの低価格化も必要である。さらに、長期的には、CTDセンサと同様に多重性・代替性の確保する必要もある。

④ データ提供・活用技術の向上

プロファイリングフロートや水中グライダーなどの自律型プラットフォームによって膨大な海洋データが蓄積されつつある。それらのデータを、研究現場から実社会までの幅広いコミュニティが目的に応じて自由にかつ適切に利用できるようにする技術の向上が望まれる。従来のデータベース化やデータプロダクト作成の枠に留まらない、分野横断的な利用を可能にすることは、統合的な海洋観測の価値を高めることにつながる。

(7) その他の課題

■衛星による観測

① 我が国として整備すべき観測データ項目の認識とデータ入手先についての戦略明確化

これまで地球観測衛星については、GCOS/CEOSで識別されたECVsリストを参考にしつつ、その充足を目指して計画立案/各々のミッション推進を実施してきた。しかしながら、我が国として気候変動観測についてどのような観測データベースを整備すべきかについて公式の設定は行われていない。他国との協力によるデータ取得も含め、観測データベース整備について、オープンな議論の下、国としての方針を定めていく必要がある。

② 国際協力戦略含め我が国としての地球観測計画を立案、評価判断する補助機能体制確立

前項の議論を受け、それらの観測要求を基に、我が国の衛星観測システムをどのように実現していくか計画を立案し、それらを評価する必要がある。衛星観測技術の性格から広範とならざるを得ない議論を、各専門分野の立場から補助する機能の体制確立が課題である。

③ 複数省庁で利用する観測衛星開発・運用経費の予算化の仕組み、衛星運用機関の必要性

地球観測衛星については技術開発を完全に民間/商用ベースにすることは難しく、技術開発に関する国の長期計画およびコスト負担の検討が必要である。現在、提案された衛星ミッションの予算化は各省庁の予算に帰属しているが、共用目的で使用されるものがほとんどであり、こうしたものの予算化の仕組みを考える必要がある。またJAXA等研究開発機関が科学技術研究を実施する一方で、開発された技術を用いた衛星を社会インフラとして継続的に運用・利用推進する目的を持つ機関の設置が課題である。

一方、民間が地球観測衛星を長期的に運用するためには、他国の例でも明らかなように、国としての「長期契約によって作り出された安定需要（アンカーテナンシー）」が望まれる。今後は技術開発省庁による長期的な技術開発計画/予算および利用省庁によるアンカーテナンシーにかかる計画/予算を、宇宙関連計画/予算として有機的に取りまとめることが期待される。さらにアンカーテナンシーについては単一省庁では規模/期間的に不十分であると考えられるため、各省庁の案件を国として集約し、民間に示すことが要請される。

④ 若手研究開発人材の枯渇対策、知と経験の体系化、拠点化と国際交流強化

衛星地球観測の研究開発人材については、世代交代が必ずしも適切にできておらず急速な科学技術力低下が発生しつつある。これまでに得られた知見を体系化し、若い世代を教育・啓蒙し科学技術力を維持するための実施体制や教育拠点の整備が課題である。例えば、既に構築されている東京大学-JAXA連携講座等を核とする方策もある。衛星観測は国際協力が前提となるため、こうした活動の中で国際的人材交流を一層推進すべきである。その他、日本学会会議による提言も科学技術発展シナリオのベースとして参考とすべき内容がある。

■大気・陸域の観測

① 長期観測の実施体制

気候変動との密接な関わりが指摘されている世界各地で頻発している極端現象による自然災害等から国民社会を保護する「広義の安全保障体制」の強化が喫緊に必要であり、そのために衛星観測や地上観測

の有効性を最大限に引き出した長期計画により社会基盤を維持する必要がある。そのためにも、国策での長期観測に関する戦略作りと計画実装が必要である。たとえば米国のNEON (National Ecological Observatory Network) では2019年から30年間の本観測実施が、欧州の衛星観測計画ではMetOpなどのシリーズ化によって30年規模の気象・地球観測衛星計画が実装されている。また欧州ではICOS (Integrated Carbon Observation System) として温室効果ガスの地上観測についてEU全体で長期にサポートする計画が実施されている。わが国での計画では5年程度のプロジェクトに依存し継続性が担保されない場合が多い。この点を見直し、特色を持った長期観測を維持するメカニズムを構築していくことが必要である。省庁内での観測再編などによりオゾンゾンデなどの長期継続観測が終了する場面も見られ、我が国全体としての戦略の議論も必要である。例えば、GCOM-C、GOSAT、PALSARなどの我が国の高性能な後継センサを高度化しつつ、継続的に打上げていくことにより我が国の優位性を持続することができる。また、次期静止気象衛星（ひまわり10、11号だけでなくそれ以降も含む）の継続的な打ち上げについては、気候変動に関わる成分の計測の可能性も含めて、今後、検討すべきである。SKYNETやAD-NET等の地上観測ネットワークも持続的な長期観測のメカニズムを検討すべき段階にあり、特に、観測のための人的リソースを含むインフラの維持が課題となっている。

② 観測専用航空機

先端的で高精度な観測装置を搭載でき、エアロゾル・雲の相互作用などの現象解明の切り札となる観測が実施できる観測専用航空機が新たに必要である。航空機観測は温室効果ガスなどの実際の観測に加え、台風や集中豪雨などを直接観測することで予測精度が向上し、防災効果も得られる。欧米では観測専用航空機により温室効果ガス観測やハリケーンの直接観測などが行われているが、東アジアは系統的な航空観測の空白域である。これを打破すべく、日本気象学会が中心となり「航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進」研究計画書を提案し、「第24期学術の大型研究計画に関するマスタープラン2020」の重点大型研究計画に選定されている。文部科学省の大型プロジェクト基本構想ロードマップ2020への選定には至っていないが、基礎的検討が進展している。既存航空機を利用した観測の継続・拡大や、無人機の地球観測利用などの実績の蓄積から次への発展が期待される。

③ 次世代の育成

上述の研究を確実に進める上で、次世代研究者の育成など、優秀な人材の輩出が急務である。特に近年では、日本人の博士課程学生数が低調で、40歳前後の中堅研究者層が未だ若手研究者と捉えられている現状がある。一方で中国を見ると、博士課程の学生数や若手研究者数は非常に充実している。さらに多くの学生・研究者が海外機関で研究をする機会を得て、活躍している。次世代の育成にあたっては、シニア研究者層がこれから研究者を目指す学生層に対して魅力を伝え、海外経験などの幅広い経験を提供し、良い教育を行う一方で、若手層のポジションの確保も重要である。

■ 海洋の観測

Argoの拡張等をリードしている欧米の研究機関では、科学研究部門と技術開発部門が密接に協力して、フロートやセンサを開発・改良している事例が多い。サイエンスの目的に即した技術開発が効果的に行われ、技術開発の成功が新たなサイエンスの開拓につながるという好循環ができています。ある程度完成した技術を民間に移転する、あるいは、新たなベンチャー企業を立ち上げるなど、測器の量産体制への移行も比較的ス

ムーズに行われている。日本では、具体的なサイエンスの目的を共有した科学研究者と技術開発者の連携が弱く、欧米のような好循環が生まれにくい課題がある。革新的な技術開発はもちろん、観測技術の漸進的改良においても日本が世界に貢献するためには、中長期的な目的を共有した研究者・技術者間の持続的な連携を可能にする仕組みが望まれる。

研究船の共同利用制度は、研究のアイデアはあるものの十分な観測資源・技術を有していない研究者の支援などの面でも、日本における観測的海洋研究の振興に大きな役割を果たしてきた。水中グライダーに代表される自律型観測プラットフォームの運用には、高度な技術・専門知識とマンパワーが必要だが、これらの観測プラットフォームを利用する個々の研究者にそれを求めるのは極めて非効率的である。日本でも、欧米並みに自律型観測プラットフォームの運用を集中的に行う組織の整備が望まれる。

分野横断の統合的海洋観測と社会的な課題の解決とを結びつけるうえで、国際的な枠組みや目標とは別に、日本として独自の目標の設定や日本の事情に即した効果的な国内連携の仕組み作りが重要である。その際には、欧州のEuroGOOS、豪州のIMOS (Integrated Marine Observing System)、米国のIOOS (Integrated Ocean Observing System) などが参考になるだろう。それらの活動の成果を Best Practice として発信し、西太平洋地域の活動をリードすることも望まれる。

(8) 国際比較

■衛星による観測

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↘	● IPCCや国際会議における活動は活発だが、欧米と比較して先進的な研究を実施している人数が少なく層が薄い。若い世代の育成が間に合っていない。世代交代や拠点化などの国内体制整備が必要。
	応用研究・開発	○	↘	● 気候変動観測衛星の戦略立案がここ数年停止している。次世代の衛星システムの準備がされていない。産官学それぞれにおいて若い世代の育成努力が不足している状況が続いており、早急に次期戦略が必要。
米国	基礎研究	◎	→	● ゴダード宇宙科学研究所 (NASA-GISS)、NOAAやスクリプス研究所、大学および軍関連の研究機関を中心とし、基礎研究についても世界を継続的にリードしている。
	応用研究・開発	○	→	● 地球観測衛星はDecadal Survey (10カ年計画)などで長期計画を立案してきているが、開発実施に至らない、あるいは大きく遅れる計画も散見される。後継機と新規ミッションのバランスを調整中。民営化よりも軍関連の研究推進が顕著である。
欧州	基礎研究	◎	→	● 欧州全体としては網羅性をもって十分な研究体制が敷かれており、ほぼ全ての分野をカバーできている。しかしながら先端性については米国あるいは日本などから遅れるところもある。 ● 英国では英国気象庁 (Met Office) などを中心とした研究の層が厚く、研究をリードする分野も多い。 ● ドイツは大学やマックスプランク研究所などの組織を中核として、特に電波センサを利用する分野を得意としている。 ● フランスは大学を中心とした基礎研究を展開しており、特に光学センサに関する分野を得意としている。
	応用研究・開発	◎	→	● センチネル衛星群を含むコペルニクス計画において、継続的な観測インフラシステムと得られたデータの社会利用を進めている。民営化の途上にある。

				<ul style="list-style-type: none"> ●英国は一時期開発から撤退したため開発力がかなり低下したが、SSTL社などが小型衛星は世界的にリードする力を保持している。今後、中大型、小型フォーメーション等で英国宇宙局(UKSA)を軸に復活の方向性がみられる。 ●ドイツはドイツ航空宇宙センター(DLR)を中心として発展を試みている。X-band SAR衛星の民営化などを実施している(Tandem-X)。近年はライダーの研究も推進している。 ●フランスはツールーズのフランス国立宇宙研究センター(CNES)やAIRBUS社などによる光学衛星の開発で欧州をリードしており、またライダーの開発も推進している。
中国	基礎研究	△	↗	●長期にわたる龍計画(ドラゴンプログラム)で欧州宇宙機関(ESA)から技術導入し、急速に成長しつつある。しかし、まだ習得中の状態であり、自ら新しい研究を確立し、地球環境の持続可能性の議論をけん引する段階にはまだ至っていない。
	応用研究・開発	○	↗	●国家資本集中により今後10年で100機程度の地球観測衛星を開発打ち上げるとしており、急速に技術的キャッチアップアップを行おうとしている状況である。温室効果ガス観測については、様々な観測方式による複数の衛星を打ち上げている。
韓国	基礎研究	△	→	●韓国気象庁や大学などで研究は行われているが、日米欧の研究を追隨するレベルに有り、急速に発展する様子がない。
	応用研究・開発	○	→	●欧州AIRBUS社、米国Harris社等から観測システムを調達して実利用観測を行っている。自国で小型衛星を開発しているが、実用衛星レベルの開発能力を持つにはまだ時間がかかると思われる。

■大気・陸域の観測

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●CO₂、SLCFs(メタン、NO_x等)、水循環を総合的に観測するGOSAT-GW衛星(温室効果ガス・水循環観測技術衛星)が公式化し、研究開発の起爆剤となる可能性が出てきた。衛星および地上からのエアロゾル観測にも一定の進展がある。 ●2021年公表のIPCC第6次評価報告書WG1へ向けて、関連チャプターへのリードオーサー、レビューエディターとして貢献しており、国際社会への知見提供が期待される。 ●大気組成のデータ同化、国際連携観測などでも着実な発展がみられる。 ●個々の観測を統合的に解析する分野での人材確保が必要である。また全般に若手研究者の育成に問題を抱えている。
	応用研究・開発	○	→	●現場観測のためのユニークな観測機器・技術開発が一部にみられるが拡大していない。GOSAT-GWや静止衛星などのデータ解析技術に関し、基礎研究の波及効果が後年度に期待できる。
米国	基礎研究	◎	↗	●国として、戦略的/長期的な視点に基づいて、競争的環境の中で様々な基礎研究を進めている。問題設定に優れ、航空機観測なども用いて、課題解決を強く意識した、発見性の高い研究成果を挙げている。若手研究者の層も厚い。
	応用研究・開発	◎	→	●ベンチャー企業などが地上観測での先端的な機器開発を多く手掛けている。

欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●先端的な衛星データと地上観測の連携や、国際標準作りが活発である。さらに各国が上手く連携・共同研究を進めている。新規衛星観測ミッションのための基礎研究の充実度は卓越している。 ●英国は中国やインド等との連携が活発で、気候変動と関連するプロセス理解の増進で成果が多くみられる。 ●ドイツは研究の層が厚く、北極観測や航空機観測などについても総合的かつ主導的に実施している。傑出した研究機関があり、組織として上手く研究が進められている。 ●フランスはマクロン大統領の施策により優秀な科学者を世界から集めるなど積極的な推進策が見られる。伝統的な赤外衛星観測と解析で進展がみられる。傑出した研究機関があり顕著な成果をあげている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●欧州中期予報センター（ECMWF：European Centre for Medium-range Weather Forecasts）やCopernicus計画でのサービスや、高解像度衛星の実現などにおいて、顕著な成果が上がっている。新型コロナウイルスの世界的蔓延による経済活動低下に関する大気汚染衛星データからの知見もいち早く発信された。 ●英国は小型ローコストセンサの開発や実装研究、ECMWFでの大気組成データ同化による再解析データ配信などが活発である。 ●ドイツは精度等の性能に優れた計測機器の継続的な開発がみられる。 ●フランスはライダーなど計測機器の継続的な開発がみられる。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●大気汚染や温室効果ガスの現場・航空機・衛星観測に進展がみられ、自国の技術も活用しながら欧米を追いかけている。若手研究者、博士課程学生の層が厚く、人材には非常に恵まれており、今後の著しい発展が期待される。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●独自の技術での製品化はみられるが、自国での活用の域を出ていない。
韓国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●2020年に、世界初となる静止衛星からのGEMS大気汚染計測を実現し、関連したアジア全域検証網の提案するなど、研究開発が活発化している。自国のセンサ開発は乏しい。若手研究者の育成については、日本と似た問題を抱えている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●機器開発の産業化などにおいては活発な状況はみられない。

■海洋の観測

国・地域	フェーズ	現状	トンド	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"> ●海洋における気候変動観測のバックボーンといえるArgoについて、海洋研究開発機構と気象庁が密接に連携し、米国に次ぐグループでの貢献を維持している。一方、Argoの深海への拡張（Deep Argo）では他国をリードしているが、生物地球化学への拡張（BGC Argo）では遅れている。 ●全球船舶海洋観測プロジェクト（GO-SHIP）では、米国に次ぐグループで貢献をしている。 ●欧米に比べ、組織的な水中グライダー観測が遅れている。2016年に立ち上げられたグライダー観測網のグローバルなネットワークOceanGlidersには積極的に参加していない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●国際的にプロファイリングフロートや水中グライダーなどの自動観測プラットフォームの活用が進展しているが、国内における開発・製品化がほとんどなく、海外展開が弱い。国産で4000m級の深海プロファイリングフロートDeep NINJAや、自動観測プラットフォーム搭載型の溶存酸素センサRINKOが開発されたが、利用実績が国内機関に留まっている。欧米と比較して、海洋における気候観測を推進するための組織的な国内連携・協力体制が弱い。

米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●世界の海に展開されているArgoフロート約3900台のうち2100台以上、BGC Argo、Deep Argoでも全体の半数前後を運用しており、文字通り世界をリードしている。その多くは、NSFの研究資金による南大洋観測のSOCCOMプロジェクトによって展開されたものである。 ●GO-SHIPも主導している。 ●外洋と沿岸をつなぐ観測網として水中グライダーを組織的に展開して、国際ネットワークOceanGlidersを欧州とともにリードしている。 ●測器やセンサの供給、データ品質管理、データプロダクト作成などの面でも世界の観測研究を牽引している。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●大学・研究機関内で技術者と研究者が協力して有用な次世代測器やセンサを開発できる、観測現場と開発現場の近さが大きな強みであり、その成果である製品を世界に供給している。 ●自動観測プラットフォームによる観測の推進でも、常に先頭を走っている。Core Argo、BGC Argo、Deep Argoの統合など、NOAAと有力大学・研究機関等が協調した長期的研究計画の立案を行っている。 ●温室効果ガスの観測に変革をもたらしたキャビティリングダウン分光装置を開発し市販しているPICARRO社、LOS GATOS Research社はともに米国のベンチャー企業である。 ●世界の海に4000台近くが展開されているArgoフロートも、“Navis” (Sea-Bird Scientific)、“APEX” (Teledyne Marine)、“Alamo” (MRV Systems)などの米国製である。それらに搭載されている水温・塩分・圧力センサのRBRargo CTD sensor (RBR Ltd.)とSBE41 CTD (Sea-Bird Science)も、米国企業の製品である。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●欧州各国が協調してArgo全体の25%に貢献することを目指すEuro Argoは2014年からEuropean Research Infrastructure Consortium (ERIC)として活動しており、欧州独自の関心も反映させつつBGC Argo、Deep Argoにも積極的に取り組んでいる。欧州各国の政府機関・研究機関・民間企業による協会EuroGOOS (European Global Ocean Observing System)が沿岸観測・データ利活用・科学研究・技術開発・海洋リテラシー普及等の各分野に組織的・計画的に取り組んでいる。 ●ドイツはArgoフロートを約160台展開し、国別5位の貢献である。そのうちBGCセンサ(酸素センサを含む)が搭載されたArgoフロートは6台で国別11位である。GO-SHIPやOceanGlidersにも参加している。海洋CO₂観測に加え、数値モデリングでも水準の高い研究が行われている。アルフレッドウェゲナー研究所(AWI)、GEOMARヘルムホルツ海洋研究キールセンター、ハンブルク大学CENなど主要研究機関・大学・博物館等からなるドイツ海洋研究コンソーシアム(KDM)が気候観測分野を含む戦略的研究計画立案、インフラ管理、政策決定者への提言などを担っている。海洋数値モデルによる物質循環の研究も高い水準にある。 ●フランスはArgoフロートを約250台展開し、BGC Argo、Deep Argoでも米国に次ぐ貢献をしている。CORIOLISプログラムを通じて、Argoデータを含む現場観測データの管理・プロダクト作成を組織的に行い、欧州はもちろん世界のデータセンターの役割を担いつつある。OceanGlidersプログラムを主導している。 ●英国はArgoフロートを約150台展開し、国別6位の貢献をしている。GO-SHIPでは、米国に次ぐ貢献をしている。Met Office (英国気象庁)、国立海洋学センター(NOC)、プリマス海洋研究所(PML)が連携してArgoを推進している。GO-SHIPにも貢献している。気象庁が作成・公開している水温・塩分データプロダクトEN4は、気候研究に世界で広く用いられている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●大西洋における統合的な海洋観測システムの最適化と強化を目指したEU Horizon 2020プロジェクトAtlantOSが2019年9月に終了し、欧州の枠を超えた新たな国際プログラムAltantOS (All-Atlantic Ocean Observing System)に移行したが、今後の予算措置は不透明である。

				<ul style="list-style-type: none"> ●ドイツは2019年に国内BGC Argoグループ (ICBM、IOW、GEOMAR) を設立し、資金提供官庁との交渉を継続している。 ●フランスはフランス海洋開発研究所 (Ifremer) がフロートやセンサの技術開発を積極的に進めている。IfremerがArgoフロートを市販しているnke instrumentation社と協力して、BGC Argo、Deep Argoを含むフロート供給の米国に次ぐ拠点となっている。 ●英国は国立海洋学センタ (NOC) のMarine Robotics Innovation Centerがハブとなり、科学研究と民間企業を結び付けて自動観測プラットフォームの開発を進めている。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●Argoフロートを約90台展開し、BGC ArgoとDeep Argoにも貢献している。自国の通信システムBeiDouの利用、国産のプロファイリングフロートHM2000の展開を進めている。 ●「青島海洋科学・技術国家実験室」に世界中から人材を集め、砕氷船や観測船の建造を進めるなど、海洋研究の強化に力を入れている。 ●海洋のCO₂研究では、砕氷船による北極海観測などを実施しているが、その他の活動については詳しい状況や成果が不明である。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●Argoの3か年 (2020-2022年) 計画が1200万ドルの予算で承認され、400台規模の展開を行う見込みである。BGC Argo、Deep Argoにも積極的で、とくにDeep Argoについては、フロート開発に5か年で約450万ドルの予算を充てている。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●韓国気象庁 (KMA) がArgoフロート約20台を日本海と東シナ海に展開し、KIOST (韓国海洋科学技術院) がTPOS2020などに参加している。海洋研究に力を入れ、海洋CO₂観測も実施しているが、まだ顕著な成果が見えていない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●Argoフロートがカバーしない東シナ海から黄海の浅海域3か所で、観測プラットフォーム (Ocean Research Station) をKIOSTが長期間維持している。物理・生物地球化学データを外部研究者との共同研究に供しており、幅広い応用研究・開発への活用のポテンシャルはある。
その他の国・地域	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●豪州はArgoフロート約340台を南太平洋・インド洋を中心に展開し、米国に次ぐ大きな貢献をしている。GO-SHIPでも南大洋で重要な貢献をしている。IMOSによって沿岸域の観測を組織的に整備し、水中グライダーの運用も活発である。 ●インドは継続的な予算を確保してArgoフロート約120台を展開し、BGC Argoにも国別で3位の貢献をしている。 ●カナダはArgo、OceanGliders、GO-SHIP等の国際プログラムに継続的・組織的に貢献している。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●カナダは小島嶼開発途上国支援も念頭に、主にBGC Argoに貢献する新規予算 (4年間で560万ドル) を2018年のG7会合で発表した。RBR社が省電力・低価格のフロート用CTDセンサを開発し商品化している。長期安定性の検証が課題だが、米国SeaBird社の独占状態の解消が期待される。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発 (プロトタイプの開発含む) の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1~2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ 気候変動予測 (環境・エネ分野 2.2.2)
- ・ 水循環 (水資源、水防災) (環境・エネ分野 2.2.3)
- ・ 生態系・生物多様性の観測・評価・予測 (環境・エネ分野 2.2.8)
- ・ 都市環境サステナビリティ (気候変動適応、感染症、健康) (環境・エネ分野 2.2.11)
- ・ 農林水産業における気候変動適応・緩和 (環境・エネ分野 2.2.12)

参考・引用文献

全体として参考とした文書

- 全1) 地球観測TF地球科学研究高度化ワーキンググループ,「地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析」『気象研究ノート』234号(2017):1-94, <http://www.jsprs.jp/pdf/TF20160531.pdf> (2021年1月アクセス)
- 全2) 高藪緑, 佐藤薫,「提言 我が国の地球衛星観測のあり方について」『文部科学省地球観測推進部会』, https://www.mext.go.jp/content/20191224-mxt_kankyoku-000003559_1.pdf (2021年1月アクセス)
- 全3) H. Shimoda and T. Kimura, *Comprehensive Remote Sensing : Japanese Space Program*, S. Liang (ed.), 1st. edition (Berkeley, CA : Elsevier, 2017), 246-280, <https://www.elsevier.com/books/comprehensive-remote-sensing/liang/978-0-12-803220-6> (2021年1月アクセス)
- 全4) 気象庁,「異常気象レポート2014 近年における世界の異常気象と気候変動～その実態と見通し～(Ⅷ)」『気象庁』, https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/climate_change/2014/pdf/2014_full.pdf (2021年1月アクセス)

■衛星による観測

- 衛星 1) 気象庁,「気候変動監視レポート2019 世界と日本の気候変動および温室効果ガスとオゾン層等の状況」『気象庁』, https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2019/pdf/ccmr2019_all.pdf (2021年1月アクセス)
- 衛星 2) 環境省, 文部科学省, 農林水産省, 国土交通省, 気象庁 他,「気候変動の観測・予測および影響評価総合レポート2018～日本の気候変動とその影響～」『環境省』, http://www.env.go.jp/earth/tekiou/report2018_full.pdf (2021年1月アクセス)
- 衛星 3) 国土交通省水管理・国土保全局河川計画課,「平成30年7月豪雨が統計開始以来最大の被害額に」『国土交通省』, <https://www.mlit.go.jp/common/001301033.pdf> (2021年1月アクセス)
- 衛星 4) Stephanie C. Herring et al., “Explaining Extreme Events of 2016 from a Climate Perspective”, *Bulletin of the American Meteorological Society* 99, no. 1 (2018): S1-S157
- 衛星 5) IPCC Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis*, IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate

(Cambridge : Cambridge University Press, 2013)

- 衛星 6) GCOS-107, “Systematic Observation Requirements for Satellite Based Products for Climate”, WMO
- 衛星 7) National Center for Atmospheric Research (NCAR) /University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) , “Climate Data Guide”, NCAR/UCAR, <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-data-records-overview> (2021年1月アクセス)
- 衛星 8) M. C. Hansen et al., “High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change”, *Science* 342, no. 6160 (2013) : 850-853, doi : 10.1126/science.1244693

■大気・陸域の観測

- 大気 1) GCOS, “Essential Climate Variables”, WMO, <https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system/essential-climate-variables> (2021年1月アクセス)
- 大気 2) 安成哲平, 「大気ブラックカーボン及びその役割を知る」『細氷』62号 (2016) : 3-42, http://www.metsoc-hokkaido.jp/saihyo/pdf/saihyo62/2016_02.pdf (2021年1月アクセス)
- 大気 3) FLUXNET, “FLUXNET2015 Dataset”, <http://fluxnet.fluxdata.org/data/fluxnet2015-dataset/> (2021年1月アクセス)
- 大気 4) Julia Schmale et al., “Collocated Observations of Cloud Condensation Nuclei, Particle Size Distributions, and Chemical Composition”, *Scientific Data* 4 (2017) : 170003, doi : 10.1038/sdata.2017.3
- 大気 5) BACCHUS project (Impact of Biogenic versus Anthropogenic emissions on Clouds and Climate : towards a Holistic UnderStanding) , “BACCHUS Ice Nucleation DataBase”, BACCHUS, <https://www.bacchus-env.eu/in/index.php> (2021年1月アクセス)
- 大気 6) Alastair Lewis, “Tropospheric Ozone Assessment Report (TOAR) ”, *Elementa : Science of the Anthropocene*, <https://collections.elementascience.org/toar/> (2021年1月アクセス)
- 大気 7) Hitoshi Irie et al., “Turnaround of Tropospheric Nitrogen Dioxide Pollution Trends in China, Japan, and South Korea”, *SOLA* 12 (2016) : 170-174, doi : 10.2151/sola.2016-035
- 大気 8) 鶴野伊津志 他, 「PM2.5越境問題は終焉に向かっているのか?」『大気環境学会誌』52巻6号 (2017) : 177-184, doi : 10.11298/taiki.52.177
- 大気 9) Y. Kanaya et al., “Rapid reduction in black carbon emissions from China : evidence from 2009–2019 observations on Fukue Island, Japan”, *Atmos. Chem. Phys.* 20 (2020) : 6339–6356, doi : 10.5194/acp-20-6339-2020
- 大気10) M. Bauwens et al., “Impact of coronavirus outbreak on NO₂ pollution assessed using TROPOMI and OMI observations”, *Geophysical Research Letters* 47, no. 11 (2020) : e2020GL087978, doi : 10.1029/2020GL087978
- 大気11) C. Le Quéré et al., “Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement”, *Nat. Clim. Chang.* 10 (2020) : 647–653, doi : 10.1038/s41558-020-0797-x

大気12) P. M. Forster et al., “Current and future global climate impacts resulting from COVID-19”, *Nat. Clim. Chang.* 10 (2020) : 913-919, doi : 10.1038/s41558-020-0883-0

■海洋の観測

- 海洋 1) IPCC Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis*, IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (Cambridge : Cambridge University Press, 2013)
- 海洋 2) N. Abram et al., “Summary for Policymakers : IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate”, IPCC https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/03_SROCC_SPM_FINAL.pdf (2021年1月アクセス)
- 海洋 3) IPCC Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis*, T. F. Stocker et al. (eds.) , IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (Cambridge : Cambridge University Press, 2013) , Technical Summary
- 海洋 4) J. Aristegui et al, *Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities*, N. L. Bindoff et al. (eds.) , IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (Cambridge : Cambridge University Press, 2019) , Chapter 5, <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-5/> (2021年1月アクセス)
- 海洋 5) S. Speich et al., “Editorial : Oceanobs'19 : An Ocean of Opportunity”, *Frontier in Marine Science* 6 (2019) : 570, doi : 10.3389/fmars.2019.00570
- 海洋 6) S. C. Riser et al., “Fifteen years of ocean observations with the global Argo array”, *Nature Climate Change* 6 (2016) : 145–153, doi : 10.1038/nclimate2872
- 海洋 7) D. Roemmich et al., “On the Future of Argo : A Global, Full-Depth, Multi-Disciplinary Array”, *Frontier in Marine Science* 6 (2019) : 439, doi : 10.3389/fmars.2019.00439
- 海洋 8) JCOMMOPS, “Integrated information, maps and tools to help coordinate and monitor global ocean observation efforts”, Oceanops, <https://www.jcommops.org/> (2021年1月アクセス)
- 海洋 9) P. Testor et al., “OceanGliders : A Component of the Integrated GOOS”, *Frontier in Marine Science* 6 (2019) : 422, doi : 10.3389/fmars.2019.00422
- 海洋10) The Global Ocean Observing System (GOOS), “Framework for Ocean Observing (FOO)”, https://www.goosocean.org/index.php?option=com_content&view=article&id=18&Itemid=118 (2021年1月アクセス)
- 海洋11) L. A. Levine et al., “Global Observing Needs in the Deep Ocean”, *Frontier in Marine Science* 6 (2019) : 241, doi : 10.3389/fmars.2019.00241

2.2.2 気候変動予測

(1) 研究開発領域の定義

本領域は気候変動予測に関する新しい研究アプローチや、新しい技術の導入等に係る動向を含む領域である。

ここでは、大気や海洋の物理法則から成る領域レベルや全球レベルの気候モデルのほか、エアロゾル、植生、海洋生態系などの要素も取り入れた地球システムモデル (ESM) やそのサブモデル、社会経済シナリオを取り入れた予測を行う統合評価モデル (IAM) 等を対象とする。モデル評価手法、ダウンスケーリング、データ同化、地球環境予測のための基盤技術も含む。また、国際的なモデル比較研究の進捗、データ配信やクラウド等の研究インフラ開発、現在のモデルの解像度や、領域を狭めて詳細な計算を行う力学的ダウンスケーリングの現状も含む。気候変動をめぐる国際動向を踏まえつつ、国内または国際的に共有されている目標値やシナリオについては本領域の現状を知る客観的な数値として記載する。

※気象と関連の深い各種影響予測 (豪雨や台風、海洋、極地) は本領域で触れるが、水資源、生態系 (農林水産業含む)、健康・都市生活についての影響予測や緩和・適応については別領域で扱う。

(2) キーワード

地球温暖化、シミュレーション、気候モデル (GCM)、地球システムモデル (ESM)、領域モデル、スケール間相互作用、多圏相互作用、海洋酸性化、土地利用変化、イベント・アトリビュション、力学的ダウンスケーリング、大型計算機、大規模計算、地球インフォマティクス、新型コロナウイルス

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

地球温暖化、オゾン層破壊、砂漠化、海洋汚染、酸性雨など、地球規模もしくは広域規模での環境問題が深刻化する中で、20世紀以降に観測された地球規模の環境変化を再現し、その中長期的な将来変化を精度良く推定する必要性が高まっている。こうした環境変化については、最近の20～30年で影響が顕在化していると考えられる専門家も多く、さらに今後数十年から100年以内には、全球的な影響がより顕著になると見込まれることから、予測・推定技術の高精度化が強く期待される。

気候変動・変化の予測には、数値モデルを用いたシミュレーションが不可欠である。二酸化炭素などの温室効果ガスの濃度上昇に対する気候システムの変化を推定するために、全球気候モデル (Global Climate Model、GCM) と呼ばれる、大気・海洋・陸域・海氷などの時々刻々の状態変化を物理法則に従って計算するプログラムが開発されてきた。また、自然の炭素循環や植生変化、海洋生態系までを取り込み、温室効果ガス排出に対する気候変化および温室効果ガスの大気中濃度を同時に計算する地球システムモデル (Earth System Model、ESM) はGCMを包含する形で開発されている。これらGCMやESMの開発には膨大な人員と時間が必要で、これまで30年以上かけてモデルの改良・拡張が進められており、モデルの再現性はその都度、観測データを用いて検証されている。気候変動・変化のシミュレーションには、多くの計算資源を要するため、地球シミュレータや京などの国内トップクラスの大型計算機が活用されている。またこれらのGCM・ESMおよびそれらのサブモデルに加えて、社会経済シナリオを取り入れた気候変動予測を行う統合評価モデル (Integrated Assessment Model、IAM) 等もある。

地球表層・海洋・大気についての必要十分な観測 (2.2.1 節) を活用しつつ、本研究開発領域を維持強化

することにより、全球の温室効果ガスや粒子状物質の動態把握とその将来予測の不確実性低減、大気海洋を含む地球表層に現れる長期変化や極端現象の変化の検出と予測、および温室効果気体排出削減の国際的な意思決定が与える効果の評価などが可能となる。GCM・ESMのシミュレーションから得られる降水量、日射量、風速、海水温等の将来変化に関するデータは、治水や再生可能エネルギー、農林水産業といった分野において利用され、大規模環境変化の影響を把握し対策を立案するために活用されるなど、他の関連分野への波及効果も大きい。

地球温暖化およびそれに伴う極端気象現象の増加により、居住環境の悪化や災害リスクが増加し、大きな経済的損失が懸念されている。他方、地球温暖化には、北極海航路の利用や北極域開発など、正の経済的効果をもたらされ得るとする一面も存在する。こうした正負いずれの観点からも、精確な気候変動予測に対するニーズは高い。地球温暖化は全地球規模の長期的変化である一方で、局所的かつ短期的な現象と密接につながっており、広い時空間スケールにわたる相互作用を伴う複雑系の問題である。さらには、人が居住する陸上地表付近だけではなく海洋（水圏）や雪氷圏あるいは生態系（生物圏）までに至る多圏が相互作用する複雑系の問題でもある。気候変動予測の難しさはまさにこれらの点にある。すなわち、予測の手段となる数値モデルにおいては、複雑系の個々の部分を精確に表現するばかりでなく、それらの多岐にわたる相互作用を適切に表現する必要もある。また、精確な気候変動予測を実現するためには、予測の初期値となる状態の正確な把握と記述、および数値モデルの検証という面から、新規的観測や継続的気候モニタリングの進展が並行する必要性が高い。

【研究開発の動向】

全球平均の地表気温が上昇していることは確かな観測事実であり、過去100年あたりで0.74℃温暖化している¹⁾。地表気温の上昇は世界のほとんどの地域で見られており、ヒートアイランドの影響を除去した日本の地表気温も、100年あたり1.24℃と全球平均を上回るペースで温暖化が進んでいる。地球温暖化の証拠は、地表気温以外の多くの気候システムの要素に見られているが、社会への影響という意味では、全球平均よりも地域の気候変化、さらに台風や熱波のような極端な気象現象（いわゆる異常気象）の変化が重要である。

異常気象自体は自然の変動として発現するが、その強さや出現しやすさに対する地球温暖化の影響が顕在化している、と考える専門家が増えている。実際、2018年7月に発生した「平成30年7月豪雨」と、引き続いて日本を含む世界各所を襲った猛暑について、気象庁や世界気象機関は、背景となる要因の一つとして地球温暖化を挙げている^{2), 3)}。こうした地球温暖化の顕在化という認識は、一般社会でも広まりつつある。社会からの要請に応え、地球温暖化の影響の深刻化を避けるために、大気や海洋の状態を再現し、将来の変化を予測するGCMやESMの開発と改良がますます重要となってきた。

2000年代はじめころまでは、気候変動における人間活動の影響検出やGCMによる地球温暖化予測の妥当性検証など、温暖化に関する科学的理解の増進が、地球規模の気候変動・変化の問題に携わる研究者にとって大きな課題であった。しかし2007年に公表された「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)の第4次報告書⁴⁾で、20世紀後半以降の温暖化が人間活動によるものとほぼ断定されて以降、科学的理解の増進に加え、温暖化への対策立案に資するデータの創出にも力が注がれはじめている。

こうした状況のもと、GCMを高解像度化し、今後避けられない温暖化に社会が適応するための政策（適応策）立案に資するよう、地域ごとに詳細な情報を発信する動きが盛んになってきている⁵⁾。この場合、地球全体（全球）を対象とした気候モデルでは計算機資源の面から高解像度化に限界があり、最も高解像度のもので格子間隔20km程度である。この解像度では、細かな地形の影響を受ける降水分布などについて、精

度の高い再現性が望めないため、日本周辺など特定の領域を対象とした領域モデルが用いられることが多い。ただし対象領域周辺に関する情報（境界条件）は、全球モデルによる予測結果から与える必要があるため、全球モデルと領域モデル両方の再現性や予測精度を向上させてゆく必要がある。

このように、全球モデルで得られた予測データの一部を境界条件として領域モデルに与え、対象領域に関する予測データを高解像度化する手法を、力学的ダウンスケーリングと呼ぶ（他に、統計的なモデルを用いて高解像度化を行う統計的ダウンスケーリングという手法もある）。実際、過去から将来の温暖化の影響評価のために、格子間隔60kmのGCMによるアンサンブル実験（初期条件を少しずつ変えて行う複数のシミュレーション）に領域大気モデルによる力学的ダウンスケーリングを組み合わせた大規模なデータセットd4PDF^{6), 7)}が作成されており、様々な分野での影響評価に役立っている⁸⁾。

1990年以來5～7年毎に出版されるIPCC評価報告書においても、気候変動予測モデリングは着実に高解像度化を進めてきた。その結果、予測ターゲットに関しては、初期にはグローバルおよび長期（100年程度）の時空間スケールが中心であったが、近年はより限定的な地域という空間スケールや社会的な意思決定により強く影響を及ぼす中期的（10年程度）時間スケールへとシフトしている。また、領域ごとの詳細な情報提供は、日本だけでなく世界的にも大きな趨勢になっている。例えば、2021年の公表が予定されているIPCC第6次評価報告書（AR6）では、地域的な空間規模における温暖化予測について、全12章のうち3章が充てられ、全球規模変化との関連、台風・豪雨などの極端気象現象の変化、災害影響などについて評価がなされることになっている。気候の中長期的変化の結果として現れる極端気象現象の増加は、社会的な意思決定という意味においてその局所的短時間スケール現象への影響も重要視されてきており、その科学的根拠および予測手法の確立が強く求められている。

一方、2000年から2015年程度にかけて生じた地球温暖化の停滞（ハイエイタス）は、これまでの気候変動予測モデルのいずれもが全く予測できていなかった現象でもあり、温暖化懐疑論も含めて気候変動予測研究における一大問題であった。過去数年の研究によって、ハイエイタスは（人為的温室効果気体増加等と関係ない）内部的気候変動の一部として海洋の蓄熱が10年スケールで変化することが原因になっている明らかとなり、現状の数値気候モデルではそれを表現する海洋過程が不十分であることも明らかとなった。ハイエイタスは太平洋十年スケール振動（PDO）と呼ばれる内部的気候変動と関係することが指摘されているが、そもそもPDOを適切に再現できる気候モデルは現状では存在しない。それはひとえに、現状の気候予測モデルにおいて海洋過程の表現が不十分なためである。PDOやハイエイタスに直接的に影響を及ぼす海洋過程は中層（数100～1000 m深）の循環であると考えられ、その適切なモデル表現のためには現状の数値気候モデルが用いているよりも格段に高い解像度が要求されることが数値海洋モデリングから示されている。

また、将来予測だけでなく、現在発生している異常高温や集中豪雨に関し、地球温暖化がどの程度寄与しているかを評価する、「イベント・アトリビューション」と呼ばれる研究も盛んになってきている。例えば今田ら⁹⁾は、2018年夏の日本の猛暑を対象にd4PDFのデータを詳細に解析し、20世紀の温暖化が進行していなければ、このときの異常高温はほぼ発生しなかったと推定している。大雨のイベント・アトリビューションは、現象がより局地的であるためにまだ途上であるが、川瀬ら¹⁰⁾は同年の西日本豪雨に対する温暖化の寄与を、力学的ダウンスケーリングを用いて推定し、大規模な場の温暖化に伴う水蒸気の増加（1℃あたり約7%）に相当する降雨量が温暖化で説明されることを示している。国際的にも、アメリカ気象学会誌（BAMS）が毎年1回イベント・アトリビューションの特集を組むことにするなど、この種の研究の発展は著しい。極端気象現象発生に対する温暖化の寄与の評価は、適応策を立案するうえでも重要な情報となる。

極端気象現象に関しては、夏季における豪雨増加や台風強勢化といった気候変動からある意味自然に導出

される現象にとどまらず、冬季における寒波の増加という気候変動とは逆方向に思われる現象も現れている。日本・北米・欧州で近年頻発する記録的寒波には、北極域が温暖化した結果として中緯度に出現する寒冷渦が関与していることが指摘されている。この寒冷渦はまた、2018年台風12号のような迷走台風の原因になったことも指摘されている。さらには、北半球中緯度における冬季寒波の直後の夏には熱波が訪れやすいという指摘もある。北極域・南極域は気候温暖化の影響が最も顕著に現れている領域であり、その影響が全地球規模に及んでいることが指摘されており、そのメカニズム理解や予測手法確立が気候変動予測の中でも大きなテーマとなっている。

一方、適応策だけではなく、地球温暖化の進行そのものを止める緩和策（抑制策）の立案にも、気候モデルによる予測は貢献している。こうした場合、二酸化炭素の「濃度」ではなく、人間活動による排出量を直接入力データとして、ESMを用いて大気中二酸化炭素濃度を予測の対象とする。ESMを用いた研究を通じた緩和策への貢献として代表的な成果の一つに、人間活動で排出されたCO₂の累積量と、その時点までの昇温とのよい比例関係を示したことがあげられる¹¹⁾。このときの比例定数は「排出に対する過渡気候応答」(TCRE)と呼ばれる。国際交渉でしばしば言及される2°C目標や、2015年に締結されたパリ協定で強調された1.5°C目標の達成のために、今後の排出量をどの程度にとどめておくべきか、その上限を定量化するのに重要な量である。TCRE等に基づいて評価された今後の二酸化炭素排出許容量はしばしばCarbon budgets（炭素予算）と表現される。

2013年公表のIPCC第5次評価報告書（AR5）の時点では、2°C目標達成のための炭素予算は産業革命以前からの累積値で790-900GtCと見積もられている。現在までの炭素排出量が約550GtC¹²⁾であることを考えると、残された炭素予算は240-450GtCと評価できる。これは現在の人為起源二酸化炭素排出量9.4 ± 0.5 PgC/y¹³⁾の20数年～50年ほどの量にあたる。1.5°C目標に対する炭素予算となると当然これより小さくなり、現在の人為起源二酸化炭素排出量の10年分ほどにしかあたらないことなどを考慮すると、1.5°C目標の達成は事実上不可能と考えられてきた。しかし近年、ESMによる予測結果に基づき、1.5°C目標達成のための炭素予算はもう少し多くて、現在の排出量20年分ほどにあたるのではないかと、という研究結果が複数発表されている¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。炭素予算の他に、ESMから社会的に有用な情報として提供できそうなものとしては、様々な社会経済シナリオに付随する土地利用変化の気候影響評価、温室効果気体の年々変動の収支の精確な把握などがあげられる。AR6に向けては、各国研究機関が最新のESMを用い、これらの課題に取り組むことになる。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• 気候変動適応法をめぐる動向

地球温暖化対策は、温室効果気体の排出削減と吸収の対策を行う「緩和（抑制）」と、既に起こっている、あるいは将来避けられない温暖化による影響への「適応」に分けられる。このうち、国内における適応策の推進のため、2018年に「気候変動適応法」が可決された。同法成立以前に閣議決定され、今後法廷計画への格上げと拡充が見込まれる「気候変動適応計画」においては、基盤的・国際的施策の一つとして、「モデル技術やシミュレーション技術の高度化」が挙げられている。こうした背景のもと、温暖化影響評価のため、農林水産業や防災に関する科学分野との連携を強め、シミュレーションモデルによる予測データの精緻化と整備、提供する動きが促進されることが予想される。

• 地球温暖化に関する国際交渉における展開

国連気候変動枠組み条約 (UNFCCC) 履行のため2016年から発効したパリ協定は、2021年から2030年までの地球温暖化対策の枠組みである。同協定では、2100年時点での温暖化を産業革命以前に比して2°C以内に抑え、さらに1.5°C以内に抑える努力も進めることが言明された¹⁷⁾。同協定採択以前から国際交渉の場でしばしば言及された2°C目標と異なり、1.5°C目標については温暖化影響の評価に関する研究があまり行われてこなかった経緯から、近年では1.5°Cと2°Cの温暖化で影響がどのように異なるか、評価する研究が盛んになってきており¹⁸⁾、2018年10月にはIPCCにより1.5°C目標に関する特別報告書 (SR1.5) が公表された¹⁹⁾。また、気候変動と人間の土地利用の関係についてまとめた「土地関係特別報告書²⁰⁾」(2019年8月)、海洋と雪氷圏の変化の実態・将来・適応に関する「海洋・雪氷圏特別報告書²¹⁾」(2019年9月)の3編の特別報告書が出版された。いずれも、地球温暖化下におけるこれらに対する問題意識の高さを反映している。

また同協定では、「自国が決定する貢献」(NDCs)として参加各国が定めた目標に従って温室効果気体の排出削減を進めることが定められており、さらに2023年を皮切りにして、「グローバル・ストックテイク」と呼ばれる、上記温暖化緩和目標へ向けての世界全体の進捗状況の確認作業が行われることになっている。グローバル・ストックテイクでは、実施時点での最新の科学的知見に照らして進捗状況が評価されることが謳われており、研究の現場でもこうした場への貢献を意識した課題に取り組む傾向が強まるであろう。

• 十年規模変動予測

上記のグローバル・ストックテイクにおいては、実施時期の直近数年間の気温や温室効果気体濃度の動態把握、さらには直後数年にわたっての予測が求められることが予想される。このため、2100年前後の予測のみならず、現在から先の1年以上、最大10年程度の時間スケールを対象とした予測研究が盛んになってきている^{22)、23)}。十年規模予測では、100年程度の時間スケールを対象とした予測と異なり、自然変動による揺らぎの位相を正確に取り込む必要があるため、データ同化と呼ばれる手法を用いて特定の時点に対応する観測データになるべく近い初期値を作成して予測を始めることになる。データ同化は従来、天気予報のような比較的短い時間スケールの予測のため発達してきた手法であるが、温暖化予測に対する要請の高度化に伴いより長い時間スケールや、生物・化学過程などへの応用が進みつつある。例えばフランスの研究チームは、「パーフェクトモデルアプローチ」(モデル結果を観測に見立てて行う予測可能性検証実験)に基づいた研究により、地球規模の炭素循環に最大6年間の予測可能性があることを示している²⁴⁾。国内では海洋研究開発機構と東京大学の研究チームが、データ同化により赤道太平洋域からの二酸化炭素フラックス変動を予測する研究などに取り組んでいる。

• 社会経済分野との連携とモデル結合

人間活動は、産業や森林伐採による温室効果気体の排出のみならず、耕作地の拡大などを通じ地表面の太陽光反射率(アルベド)を変えることによっても気候に影響を与えている。地球温暖化による農業生産性の変化が、人口を支えるため必要な耕作地拡大の推定量に影響を与え、それがさらにアルベドの変化を変化させ温暖化の度合いを変えるといった、地球温暖化と人間社会との相互作用の存在が指摘されている²⁵⁾。こうした相互作用は、特に地域スケールでの温暖化予測に有意な影響を与える可能性があり、社会経済分野と気候予測分野の間の連携課題として取り組む必要がある。相互作用の整合的・包括的推定には、社会経済分野で開発されている統合評価モデル(IAM)と、ESMとの結合モデルを開発することが望まれる。実際、そうしたモデルは米国等で開発され炭素税の課税手法の検討などに応用されている。例えば米国LBNLのJonesら

は、炭素税を森林伐採由来の炭素排出にも課した場合と、化石燃料と産業由来の排出のみに課した場合とでは、2100年時点での温暖化が後者において有意に抑制されることを示した²⁶⁾。また国内では、社会経済を結合したモデルではないものの、地球システムの不確実性が将来の温暖化対策費用の見積りに大きな不確実性をもたらすことなどを指摘した研究²⁷⁾ などが、今後社会経済モデルとの結合へと発展する可能性もある。

ただし、関連するプロセスのモデル化には大きな誤差が含まれるため、モデルの適用限界などを十分検討したうえで進めるべきとの慎重論も唱えられている²⁸⁾。

• 地球環境予測を支える技術基盤

2021年公表予定のIPCC第6次評価報告書 (AR6) へ向け、第6次結合モデル相互比較計画 (CMIP6)²⁹⁾ と呼ばれる枠組みのもと各国研究機関が共通の実験デザインに基づいて行う温暖化予測のデータについては、世界中の関連分野の研究者らが自由に使えるようデータ配信システムの整備がなされる。このシステムの開発は、欧米の情報技術分野の専門家を中心として形成される「地球システムグリッド連盟」(ESGF) によって主導され³⁰⁾、日本からは文部科学省「データ統合・解析システム (DIAS)」³¹⁾ の研究者らが関与している。またデータ配信システムのみならず、モデル仕様の説明やデータの内容などを示すメタデータの効率的な記述手法の統一規格「地球システムドキュメンテーション (ES-DOC)」³²⁾ や、データサーバ上でのデータ解析を可能にすることで通信の負担を軽減するサーバーサイドコンピューティングの導入も進められている³³⁾。後者に関しては、各国のモデル間で異なる格子点の自動変換や、一部のデータを切り出すシステムなどがESGFでも開発中である³⁴⁾。さらに、気象学、海洋学、生態学、水文学など個別の分野で開発される要素モデルを効率的に結合してモデル開発を促進するカプラ技術も盛んに開発されている³⁵⁾。国内では結合用ライブラリJ-Cupの開発が進んでおり、サブモデル間で異なるグリッドシステムやタイムステップの間で、保存則を満たしながらデータ交換を行うためのより一般的な手法などが開発を進める上での課題となっている³⁶⁾。こうした地球環境予測のための技術基盤開発は、「地球インフォマティクス」などとも呼ぶべき一大分野として興隆の兆しを見せている。

• 量子コンピュータの商用・実用化

2019年1月にIBMは初の商用の量子コンピュータを発表し、2019年10月にはGoogleが古典コンピュータの計算速度を超える初の量子コンピュータ計算の実現を発表した。GCM・ESMに適した量子コンピュータの実現にはまだ時間を要すると思われるが、量子コンピュータの実用化自体が多くの人々の想定を超える速度で進展しており、本領域としても状況を注視し対応を検討する必要がある。

• データ活用社会創成プラットフォーム

Society5.0の実現に向けてデータ科学・データ活用を推進するための手段として、データ高度利活用環境の整備が開始された (国立情報学研究所・東京大学)。ビッグデータに基づく科学的成果の社会応用 (実装) という側面を持つ本領域とはつながりが深いものであり、こうした動きと連携していく必要がある。

• 新型コロナウイルスのパンデミックに伴う温室効果ガス排出減

2019年12月に中華人民共和国武漢市で発生した新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) は、半年を待たずに世界各地に感染が拡大し、2020年3月11日にはWHOがパンデミックを宣言した。各国で都市封鎖などが続き、世界経済の停滞や人の移動の制限の結果、2020年初頭からの世界のCO₂排出量は減少した。

速報的な推定では、2020年5月までのCO₂排出は、前年比で-17%となった³⁷⁾。ただし、大気中CO₂濃度(7月20日時点で414ppm)にはまだ反映されておらず、もしCOVID-19の感染が年内に収束すれば、今年の終わりごろには排出経路は元に戻ると予測される。同様のCO₂排出量減少は、2009年のリーマンショック後にもみられたが、そのときも長期的なCO₂排出増への影響は一時的であった。とはいえ、COVID-19に伴う排出減が短期的な気候に与える影響の評価は行われる必要があり、国際的にGCM・ESMを用いた相互比較実験プロジェクトが始まったところである。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■国内

• 統合的気候モデル高度化研究プログラム

国内におけるGCM、ESMの開発および力学的ダウンスケーリングは、文部科学省によって2017年度より2022年度まで「統合的気候モデル高度化研究プログラム」(TOUGOU)において主に行われている³⁸⁾。予測モデルの開発、将来予測実施と国際プロジェクト(CMIP6)への結果提出、将来予測に係る各種データセットの整備提供に関する国内のフラッグシッププロジェクトである。TOUGOUの成果物である気候予測データは、プログラム内の連携研究に用いられるほか、同省「気候変動適応技術社会実装プログラム」(SI-CAT)や、環境省による「気候変動影響予測・適応評価の総合的研究」(S-18)といった影響評価・適応研究課題においても活用され、気候変動適応法に基づく施策立案に役立てられる。またそれ以外にも、TOUGOUで作成されたCMIP6の温暖化予測データは、ESGFに参加するDIASを通じて国内外に提供されている。

• 気候変動に関する懇談会 (気象庁・文部科学省共催)

気候変動予測から適応までを一本化するための省庁連携も進んでいる。文部科学省と気象庁は合同で「日本の気候変動2020-大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書³⁹⁾」を2020年12月に公表し、今後の世界平均気温が2℃上昇シナリオ及び4℃上昇シナリオで推移した場合の将来予測を取りまとめた。また、環境省は「気候変動影響評価報告書⁴⁰⁾」を2020年12月に公表し、その後は5年ごとに評価を見直す計画としている。2022年にはそのための「気候予測データセット2022」とその解説書が作成され、利用者に提供されることになっている。

• 北極域研究加速プロジェクト (ArCS II)

北極域環境の変化とそれがもたらす社会影響に関して統合的に扱う、北極域研究に関する国内のフラッグシッププロジェクトである。実施期間は2020～2024年度の5年間である。

■国外

• 世界気候計画

地球環境研究に携わる世界の研究者が参加する「世界気候計画」(WCRP)は、IOC-UNESCOやICSU(国際科学会議、International Council for Science)、WMO(世界気象機関、World Meteorological Organization)などから資金を得て活動するプロジェクトであり、1980年に設立された。温暖化予測に関して、国際的に共通の実験仕様(CMIP6)を作成しているのも、WCRPの下部組織である「結合モデル作業部会」(WGCM)である。また予測データの力学的ダウンスケーリングに関する国際協力を進める「統

合地域ダウンスケーリング実験」(CORDEX)もWCRPの活動の一部であり、世界をいくつかの区域に分け、参加研究機関に担当区域を割り当てたり、境界条件の与え方などを統一したりといった調整を行っている。WCRPは地球温暖化予測に関して国際的な研究コミュニティにおいて最も影響力の強いプロジェクトと評価される。加えて、一般社会における利害関係者も加えて地球環境に関する課題を検討し科学に基づいた解決策を探る「フューチャー・アース」においても、GCMやESMを活用した研究が展開されている。

また技術基盤に関しては、予測データの管理、配信システムを開発するESGFや、メタデータの体系的な記述法を検討するES-DOCなどの国際プロジェクトがあり、上述のCMIP6と密に連携を保ちながら活動している。

• EU Polar Cluster

Horizon 2020およびFramework Programme 7による連携を図るための枠組みで、現在15の北極・南極研究プロジェクトで構成されている。

(5) 科学技術的課題

• 観測データの拡充とモデル評価手法の確立

ESMによるシミュレーションから出力される変数として、海陸の炭素貯留量やその収支などがあるが、こうした変数の全球的な分布に関しては観測データが乏しい場合が多く、観測データの拡充が強く望まれる。また生物化学過程を含まないGCMに関しても、観測の再現性に関する判断には任意性が残るうえに、地球温暖化予測に関しては現実の再現性評価だけにとどまらず、将来予測の精度まで見積もる必要がある。最近になって、現在気候の再現性と将来予測の精度を結び付けて評価するEmergent Constraintと呼ばれる手法を適用した研究が盛んになってきており、この傾向は今後も続くと思われる。

• 低排出シナリオの検討

従来、GCMやESMを用いた地球温暖化予測では、自然変動に対して地球温暖化のシグナルが大きくなることから、二酸化炭素などの温室効果ガスの排出が比較的大きい排出シナリオに対する予測結果を解析することが通例であった。しかし、IPCCがSR1.5の編纂を決定したことが一つの契機となり、低排出シナリオに関する予測結果解析や、それを応用した影響評価研究が盛んになってきている。この流れはSR1.5公表後も続くと思われる。低排出シナリオにおける解析では、自然起源と人為起源の変化の分離が困難になるため統計的な処理に工夫が必要となったり、短寿命気候汚染物質(SLCP)を含む二酸化炭素以外の気候影響要因の重要性が相対的に増したりなど、従来とは異なった問題にも注意を向ける必要があり、今後大きな課題となる可能性が高い。例えば、現在の多くのESMにおいては、メタンや亜酸化窒素の循環過程は大気化学モジュールの中で閉じているため、将来の生態系-エアロゾル/大気化学の相互作用変化を予測に反映することができない。CO₂を含む温室効果ガス、エアロゾル、生態系との相互作用過程をあらわに組み入れた地球システムモデルの開発により予測の高度化を図ることが必要であろう。また、低排出シナリオにおけるシグナルの優位性を高めるため、長期的な地球温暖化予測では従来それほど重視されてこなかったアンサンブル実験の重要性も高まる可能性があり、計算機能力の向上が望まれる。

• モデル精度向上に伴う計算量増大

力学的ダウンスケーリングに用いられる領域モデルでは、扱う空間領域は全球モデルに比べ当然小さいものの、より詳細な計算を行うために数kmといった高い解像度を持つことも多く、計算負荷は全球モデルより

重くなることもある。同じ計算資源であれば、解像度を高くするとアンサンブル実験の数を少なくせざるを得ないというトレードオフが常に存在するため、アンサンブル実験数を重視したd4PDF⁷⁾では領域モデルの解像度は20kmと、比較的粗い。平成30年豪雨や令和2年豪雨のような大雨の再現と要因分析、将来予測を行うには、2km以上の空間解像度でアンサンブル実験数100以上のデータセットを揃えることが望ましいが、そのためには現在の1000倍以上の計算能力が必要とされる。

GCM・ESM開発の今後の大きな方向性としても、高解像度化、アンサンブル数増大、多くのプロセスを取り込む複雑化の3つが挙げられる。高解像度化は、細かな空間スケールでの大気の大気対流活動や地形の変化が重要な役割を果たす降雨過程などについて、モデルの再現性を向上させるために必須である。また、100年や1000年に一度と言った、非常にまれな集中豪雨、熱波、渇水の発生確率の変化を検出するためには、従来高々100程度が普通であったアンサンブル数を1桁は増やす必要がある。さらに前述のSLCPの取り扱いには大気中の化学反応などについて、これまでモデルに含まれていなかったプロセスも導入する必要がある。例えば、人為、自然両方のソースから排出される揮発性有機炭素(VOC)から、大気中の光酸化反応により二次有機エアロゾルが生成されるプロセスなどである。これらの方向性はいずれも計算負荷の増大を伴うことになるため、今後大型計算機の性能が順調に向上することがこの分野の発展にとって決定的に重要である。

• 計算機の発展とモデルの高度化に伴うプログラムコードの複雑化

これまでのところ、計算機の性能は「ムーアの法則」と呼ばれる経験則にしたがって向上してきた。性能向上のために、並列計算やグラフィックプロセッシングユニット(GPU)など、時代に応じて新しい技術が導入されてきている。これらの技術を活用するためには、ESMのプログラムコードを書き換える必要がある。また上述の通りモデルの高度化のため多くのプロセスが加わる傾向にあり、これらが相まってプログラムコードが著しく複雑化してきている。バージョン管理ツールなどのソフトウェア導入で対応を図ってはいるが、コードに初めて触れる若手研究者などに対する障壁となる可能性がある。プログラム構造を容易に把握できるツールの開発など、モデル開発環境の一層の整備が望まれる。

• 複合問題としての地球環境問題

ESMでは、温室効果ガスの排出による気候変化のみならず、二酸化炭素の海洋吸収による海洋酸性化、農作物やバイオ燃料栽培、あるいは都市化に伴う土地利用変化の環境影響など、様々な問題を包括的に取り扱うことができる。一方で、こうした問題は伝統的な気候科学の範疇では取り扱えず、農学や社会経済など多様な分野の研究者との協働が必要とされる。さらに、社会問題としての地球環境問題に対処するためには一般社会における利害関係者の意見も聞きながら問題設定を行う必要がある。こうしたアプローチは、専門性を高め取り扱う問題を厳密に定義することで知見を集積し発展してきた従来型の科学のそれとは異なる。多様な分野、セクターを巻き込んでコミュニケーションの場を設けることで、連携を深めていく必要がある。

• 観測研究との相互作用

GCM・ESMの対象には、その実態にまだまだ不明な点が残るものを多く含んでいる。モデルを高度化して予測を高精度化するためには、現象の観測的記述・理解が進展することが欠かせない。その際、モデル開発側が積極的にモデル高度化に必要とされる観測を提示すること、そしてそれを実現するためのインセンティブ(資金的枠組み等)が用意されることが望まれる。

• 計算機の変化への対応

気候変動予測の高精度化はこれまで常に最新の大型計算機の発展とともにあったが、主流となる大型計算機のアーキテクチャは大きく変化してきた。20年前の大型計算機の主流はB/F値が大きいベクトル型であり、計算過程で多くのデータ転送を必要とする流体（大気・海洋）計算に向いており、計算機の理論最大性能の30%以上の効率で気候モデルを稼働させることも容易であった。しかしながら、10年程度前から大型計算機の主流はB/F値が小さいスカラー型に移行し、気候モデルでは計算機の理論最大性能の5%の効率を出すことも困難となった。近年機械学習等で重用される加速演算（GPGPU等）型計算機においては、計算機の理論最大性能の1%を出すことすら困難である。変化していく計算機アーキテクチャの中で気候モデルが計算機性能をよりよく引き出すようなプログラム開発を行うことも重要であるが、世の流れに任せるのではなく気候モデルに適したアーキテクチャの大型計算機を確保していくことも検討する必要がある。同時に、来るべき量子コンピュータにどのように対応するか、できるかを検討することも必要だろう。

(6) その他の課題

• モデル開発者の評価・キャリアパス

GCM・ESMの開発には、気候における個々の要素や現象に関して高度な科学的知識が必要とされるばかりでなく、それを数値モデルとしてプログラムする技術、さらには複雑系の全体を俯瞰する能力が求められる。それらを併せ持つモデル開発者は希少な存在であるが、モデル開発自体は学術的な観点からは必ずしも論文成果を挙げやすいものではない、あるいは多大な労力が必要とされ、論文としての成果創出までに多くの時間を費やすことになる。加えて、出力データを管理、解析するためのサーバ管理といったメンテナンス業務に時間をとられるケースも多く、研究者らの間に、モデル開発に深く関わることを忌避する傾向が見受けられる。もしくは、開発者を踏み台にしてモデル利用者あるいはモデルプロダクトとしての予測結果データ利用者が論文成果を挙げていくという構図に陥ってしまう。そのような構図は開発者の意欲を削ぎ、開発者の育成にも大きな負の影響を及ぼす。

こうした状況の改善のため、研究者・モデル開発者の人事評価の際に開発面での貢献を重視したり、メンテナンス業務に専従する技術者を確保したりするといった対策をとっている機関もあるが、研究能力の指標として論文数が最重要視されるのは研究コミュニティ全体の傾向であり、機関単独での対処には限界がある。モデル開発者の成果を論文以外の形を含めて正当に評価し、それに見合う十分なキャリアパスを用意することが必要である。モデル開発者の減少に歯止めがかからなければ、地球環境問題に関する日本の国際的地位の低下と言った負の波及効果につながる可能性がある。

技術的には、多数の変数からなる膨大なモデル出力データを保管・配信し解析したり、多くのサブモデルを結合してGCM・ESMを開発する際の作業を支援したりするシステムが研究効率の向上のため必須であり、欧米ではプロジェクトベースで、情報技術者と気候学者との連携によりそうしたシステムの開発が進展している³²⁾。国内でも同様の取り組みが強く望まれる。

• 継続的な気候変動予測体制の確立

気候変動予測の研究開発および実施は、現状では文部科学省による有期プロジェクトに依存しており、必ずしも安定的な体制とは言えない。気候変動予測の社会的重要性に鑑みるならば、気象庁のような現業機関が継続的に実施することが望まれる。また、そのような体制があつてこそ、有能な人材の育成・集積が可能となる。

● 省庁間連携体制の構築

地球環境問題の解決のためには、モデルによる予測と産業への影響評価、適応策の立案、化石燃料使用量削減など様々な過程が必要となり、それぞれの過程に従事する関係者の協力も当然求められる。これらの過程に関しては、大型計算機を必要とする数値シミュレーションは文部科学省や気象庁、気候変動適応法に基づく適応策立案は環境省、化石燃料使用を始めとするエネルギー問題は経済産業省といった所掌が確立している。こうした役割分担は、作業を効率的に進める上で有効であるが、一方で、必要な連携を阻害する、いわゆる縦割りの問題につながる可能性がある。役割分担のうえでは見かけ上の重複があっても、十分な説明のもと必要な連携を進めていく柔軟な事業展開が望まれる。

(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"> ●東京大学、国立環境研究所、気象庁気象研究所、海洋研究開発機構などでGCMおよびESM開発が取り組まれている。いずれの機関でもオリジナルのモデルを開発しており研究コミュニティの潜在能力は高い。文部科学省「統合的気候モデル高度化プログラム」の実施により継続的に気候変動予測研究が実施され、CMIPおよびIPCCへの貢献を着実に進めている。 ●極端気象現象の気候変動との関係性の解明（イベントアトリビューション）や北極域温暖化の中緯度域への影響などにおいて特筆すべき成果を挙げている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●防災など適応に関する諸科学分野の研究者や、社会経済分野で温暖化緩和シナリオの開発に取り組む研究者と、気候科学者との連携が盛んになってきており、ESMの成果を適応策・緩和策立案に活用する素地ができてきた。基礎研究と同様、TOUGOU、文科省「気候変動適応技術社会実装プログラム」(SI-CAT) や、環境省「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究」などで資金が拠出されている。気候変動適応法の成立を受け、今後関連研究が盛んになることが予想される。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●地球流体力学研究所、米国大気研究センター（NCAR）、ローレンスリバモア国立研究所、NASAなど多数の研究機関がGCM・ESM開発に取り組んでいる。前政権による温暖化研究予算削減の圧力と、2019年末に宣言されたパリ協定からの離脱のため、下降的雰囲気があった。しかし、もともとの研究規模は日本よりもはるかに大きく、活発な活動を維持している。
	応用研究・開発	◎	↘	<ul style="list-style-type: none"> ●NCARには社会経済シナリオ開発部門が設置され、気候科学の成果を取り入れた温暖化抑制シナリオ開発に取り組むなど、ESMによる成果の政策立案への応用が進んでいる。モデル開発やデータ配信・処理のためのシステム開発も盛んである。科学研究費削減の圧力がありトレンドとしては若干下降気味かもしれないが、早晩回復する可能性もある。
欧州	基礎研究	◎	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●EUプロジェクトCRESCENDOには7つのESM開発チームが参加しており、また別のEUプロジェクトPREMAVERAでは高解像度GCMの開発に欧州諸国の研究機関が協力して取り組むなど、欧州全体での層は厚い。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●英気象局ハドレーセンターが早くから国内のGCM・ESM開発を一本化して最高レベルのモデルを構築している。気象局と協力する形で国内トップ大学（エクセター大学、レディング大学、イーストアングリア大学）などでもモデルを用いた研究が盛んである。

				<p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●マックスプランク研究所（ハンブルグ）で早くからGCM・ESMの開発が行われてきたが、最近ドイツ気象局とモデルの一部統合を行い、基盤を強化している。またドイツ航空宇宙センターの研究者がCMIP6仕様策定の中心となるなど、この分野への影響力は強い。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ピエール・サイモン・ラプラス研究所（IPSL）およびフランス気象局（MeteoFrance）でGCM・ESMの開発が行われている。英国と違い、現業機関と大学研究機関でそれぞれモデル開発している点で日本と似た状況にある。海洋モデルOPAが欧州全体の共通モデルNEMOとして採用されるなど、基礎的な開発能力や科学の水準は高い。 <p>【その他】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●英独仏以外ではノルウェーやスウェーデンなど北欧諸国やオランダの存在感が高い。ベルゲン大学、スウェーデン気象水文研究所（SMHI）、オランダ王立気象研究所（KNMI）などでGCM・ESMを用いた研究がおこなわれている。
	応用研究・開発	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●上記CRESCENDOやPREMAVERAでは社会経済シナリオ開発や温暖化影響評価とESMとの連携も重要な課題となっている。次期IPCC報告書サイクルで影響評価に関する部分を担う国際プロジェクトISI-MIPにおいても、米国と並び欧州出身の研究者が多数主導の立場で活動している。モデル開発やデータ配信・処理のためのシステム開発も盛んである。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ハドレーセンターが環境・食料・農村地域省およびビジネス・エネルギー・産業戦略省の支援を受けて、「英国気候予測2018」（UKCP2018）をまとめ、適応策立案に有用な情報の提供を図るなど予測データの応用が活発である。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ポツダム気候影響研究所（PIK）を1992年に設立し影響評価研究を行うなど、予測データの応用に早くから取り組んでいる。ドイツ気候計算センター（DKRZ）を中心にデータ配信・処理のためのシステム開発も盛んである。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●仏全国気候変動影響適応計画が2011年に策定され、それに基づいて仏国のモデルによる予測が影響把握に用いられるなど、予測データの応用が進んでいる。 <p>【その他】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●デンマークで「気候変動適応戦略」が、オランダで「気候変動に対する国家空間適応プログラム」が策定されるなど、適応策の法的後ろ盾の整備が進んでおり、予測データの活用も進むと思われる。
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●現在、大気物理研究所、第一海洋研究所など中国国内で少なくとも8つの研究グループがGCMあるいはESM開発に取り組み、CMIP6にも参画している。現状は海外で開発されたモデルを輸入して調整を行う程度であるが、海外から中国人科学者を呼び戻して基盤をつくりつつあり、数年後にはオリジナルモデルが増えてくるだろう。 ●IPCC WGIの共同議長を出すなど、国家的に気候科学分野のテコ入れを図っており、今後顕著な発展を見せると予想される。
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●ESMによる成果を活用して緩和策立案に資するという動きには乏しいが、上述の国家的支援の効果が予測データの応用面にも及んでくる可能性は高い。「国家気候変動適応全体戦略」「国家気候変動対応計画」をいずれも2012年に策定しており、後者では2020年までの行動計画が記載されている。

韓国	基礎研究	△	↗	●韓国気象庁（KMA）では、英国ハドレーセンターが開発した気候モデルをベースにGCM・ESM開発を進める方針になっている。自国でESM開発に取り組むには国内基盤を一層強化する必要があるが、基礎科学研究所（IBS）を2011年に創立し、2017年に気候物理センターを設置するなど力を入れている。
	応用研究・開発	○	→	●2015年に「第2次気候変動影響評価報告書」が公表され、様々な分野における影響や脆弱性が評価された。2020年までの適応マスタープランも策定されている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

<ul style="list-style-type: none"> ・気候変動観測（環境・エネ分野 2.2.1） ・水循環（水資源・水防災）（環境・エネ分野 2.2.3） ・生態系・生物多様性の観測・評価・予測（環境・エネ分野 2.2.8） ・都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）（環境・エネ分野 2.2.11） ・農林水産業における気候変動適応（環境・エネ分野 2.2.12）
--

参考・引用文献

報告書執筆全般、特に（7）国際比較の表作成については、以下の文献を参照した。

- ・環境省，気候変動への適応のあり方について（報告），気候変動適応計画のあり方検討会，平成27年1月，<https://www.env.go.jp/council/06earth/y060-125/mat02.pdf>（2020年12月29日アクセス）
- ・環境省地球環境局，気候変動の影響への適応の最近の動向と今後の課題，中央環境審議会地球環境部会（第137回）資料，<https://www.env.go.jp/press/y060-137/mat02.pdf>（2020年12月29日アクセス）

- 1) 気象庁地球環境・海洋部地球環境業務課，「気候変動監視レポート2019」，<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/index.html>（2020年12月29日アクセス）
- 2) 細川倫太郎，「世界の異常気象「地球温暖化と関係」国際機関」『日本経済新聞』2018年7月25日，<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO33372420V20C18A7MM0000/>（2020年12月29日アクセス）
- 3) 桑原紀彦，「昨夏の猛暑、温暖化なければ発生せず？気象庁など分析」『朝日新聞』2019年5月22日，<https://www.asahi.com/articles/ASM5P65XRM5PULBJ00V.html>（2020年12月29日アクセス）。
- 4) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) , Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the

- Intergovernmental Panel on Climate Change, S. Solomon et al. eds. (Cambridge and New York : Cambridge University Press, 2007)
- 5) 気象庁, 『地球温暖化予測情報第9巻 : IPCCのRCP8.5シナリオを用いた非静力学地域気候モデルによる日本の気候変化予測』長谷川直之編, 地球温暖化予測情報第9巻 (東京 : 気象庁, 2017)
 - 6) R. Mizuta et al., “Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 98 no. 7 (2017) : 1383–1398, doi : <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0099.1>
 - 7) 気象庁気象研究所他, 「将来の気候変化に関する政策決定に資するデータベース (Database for Policy Decision Making for Future Climate Change, d4PDF)」『海洋開発研究機構』, <http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/> (2020年12月29日アクセス)
 - 8) 脇岡靖明他, 「気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート2018 ~日本の気候変動とその影響~」『環境省』, <https://www.env.go.jp/press/105129.html> (2020年12月29日アクセス)
 - 9) Y. Imada et al., “The July 2018 high temperature event in Japan could not have happened without human-induced global warming”, *SOLA* 15A (2019) : 8-12, doi : 10.2151/sola.15A-002
 - 10) H. Kawase et al., “The heavy rain event of July 2018 in Japan enhanced by historical warming”, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 101, no. 1 (2019) : S109-S114, doi : 10.1175/BAMS-D-19-0173.1
 - 11) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) , Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T. F. Stocker et al. eds. (Cambridge and New York : Cambridge University Press, 2013)
 - 12) R. J. Millar et al., “Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5°C”, *Nature Geoscience* 10, no. 10 (2017) : 741-748, doi : 10.1038/ngeo3031
 - 13) C. Le Quéré et al., “Global carbon budget 2017”, *Earth System Science Data* 10, no. 1 (2018) : 405-448, doi : 10.5194/essd-10-405-2018
 - 14) O. Goodwin et al., “Pathways to 1.5°C and 2°C warming based on observational and geological constraints”, *Nature Geoscience* 11 (2018) : 102-107, doi : 10.1038/s41561-017-0054-8
 - 15) K. B. Tokarska and N. P. Gillett, “Cumulative carbon emissions budgets consistent with 1.5 °C global warming”, *Nature Climate Change* 8 (2018) : 296-299, doi : 10.1038/s41558-018-0118-9
 - 16) P. B. Holden et al., “Climate-carbon cycle uncertainties and the Paris Agreement”, *Nature Climate Change* 8 (2018) : 609–613, doi : 10.1038/s41558-018-0197-7
 - 17) United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) secretariat, “Paris Agreement/CP/2015/L.9/Rev.1”, UNFCCC, <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf> (2020年12月29日アクセス)
 - 18) C. -F. Schleussner et al., “Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming : The case of 1.5° C and 2° C”, *Earth System Dynamics* 7, no. 2 (2016) : 327-351,

doi : 10.5194/esd-7-327-2016

- 19) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) , “Special Report on Global Warming of 1.5°C”, IPCC, <https://www.ipcc.ch/sr15/> (2020年12月29日アクセス)
- 20) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) , “Special Report on Climate Change and Land”, IPCC, <https://www.ipcc.ch/srccl/> (2020年12月29日アクセス)
- 21) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) , “Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate”, IPCC, <https://www.ipcc.ch/srocc/> (2020年12月29日アクセス)
- 22) G. A. Meehl et al., “Decadal climate prediction : An update from the trenches”, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 95, no. 2 (2014) : 243-267, doi : 10.1175/BAMS-D-12-00241.1
- 23) G. J. Boer et al., “The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) contribution to CMIP6”, *Geosci. Model Dev.* 9, no. 10 (2016) : 3751-3777, doi : 10.5194/gmd-9-3751-2016
- 24) R. Séférian, S. Berthet and M. Chevallier, “Assessing the decadal predictability of land and ocean carbon uptake”, *Geophys. Res. Lett.* 45, no. 5 (2018) : 2455–2466, doi : 10.1002/2017GL076092
- 25) W. D. Collins et al., “The integrated Earth system model version 1 : formulation and functionality”, *Geosci. Model Dev.* 8, no. 7 (2015) : 2203–2219, doi : 10.5194/gmd-8-2203-2015
- 26) A. D. Jones et al., “Greenhouse gas policy influences climate via direct effects of land-use change”, *J. Climate* 26, no. 11 (2013) : 3657-3670, doi : 10.1175/JCLI-D-12-00377.1
- 27) K. Matsumoto, K. Tachiiri and M. Kawamiya, “Impact of climate model uncertainties on socioeconomics: a case study with a medium mitigation scenario”, *Computers & Operations Research* 66 (2016) : 374-383, doi : 10.1016/j.cor.2015.01.011
- 28) D. P. van Vuuren et al., “A comprehensive view on climate change : coupling of earth system and integrated assessment models”, *Environ. Res. Lett.* 7, no. 2 (2012) : 024012, doi : 10.1088/1748-9326/7/2/024012
- 29) V. Eyring et al., “Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization”, *Geosci. Model Dev.* 9, no. 5 (2016) : 1937–1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- 30) D. N. Williams et al., “A global repository for planet-sized experiments and observations”, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 97, no. 5 (2016) : 803-816, doi : 10.1175/BAMS-D-15-00132.1
- 31) データ統合・解析システム (DIAS) , 「DIASデータセット検索」, <http://www.diasjp.net/> (2020年12月29日アクセス)
- 32) S. Murphy et al., “The Earth System Documentation (ES-DOC) project”, Astrophysics Data System, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013AGUFMIN21D..07M/abstract> (2020年12月29日アクセス)
- 33) V. Eyring et al., “Towards improved and more routine Earth system model evaluation in CMIP”, *Earth Syst. Dynam.* 7, no. 4 (2016) : 813–830. doi : 10.5194/esd-7-813-2016
- 34) Earth System Modeling Framework (ESMF) , “Community Infrastructure for Building and

- Coupling Models”, ESMF, <https://earthsystemmodeling.org/> (2020年12月29日アクセス)
- 35) S. Valcke et al., “Coupling technologies for Earth System Modelling”, *Geosci. Model Dev.* 5, no. 6 (2012) : 1589-1596, doi : 10.5194/gmd-5-1589-2012
- 36) T. Arakawa et al., “Coupling Library Jcup3 : Its philosophy and application”, *Prog. Earth Planet Sci.* 7, no. 6 (2020) , doi : 10.1186/s40645-019-0320-z
- 37) C. Le Quéré et al., “Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement”, *Nature Climate Change* 10 (2020) : 647-653, doi : 10.1038/s41558-020-0797-x
- 38) 住明正他, 「統合的気候モデル高度化研究プログラム」『文部科学省』, <http://www.jamstec.go.jp/tougou/index.html> (2020年12月29日アクセス)
- 39) 気象庁, 「日本の気候変動2020 -大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書-」, <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html> (2020年12月4日アクセス)
- 40) 環境省地球環境局総務課気候変動適応室, 「気候変動影響評価報告書：総説2020年12月」, <https://www.env.go.jp/press/files/jp/115261.pdf> (2020年12月29日アクセス)

2.2.3 水循環（水資源・水防災）

(1) 研究開発領域の定義

水循環の観測・監視や解析・評価、予測に係る研究開発の領域である。水の時間・空間的な分布の動的な偏りから生まれる水資源としての側面と、集中による洪水災害としての側面をともに含める。空間として平面方向は全球から流域圏まで、鉛直方向は対流圏の降水から表層水、地下水までとする。観測・監視は衛星や地上観測、センサネットワーク、同位体分析等を扱う。解析・評価は水循環の自然変動に加え、気候変動に伴う変化、産業化や人口動態などの人間社会の変化が与える水循環への影響も含める。予測は、様々なスケールの水循環モデルや統合モデルの開発を扱う。応用として、ダム洪水調節操作、観測データ連携活用などの水防災への活用についても記述する。基盤的研究を元にした、水資源の持続可能な利用と管理として河川管理支援やデータ配信、デジタル化等の具体的取り組みに加え、ウォーターフットプリント等の概念の提示も含める。

(2) キーワード

気候変動適応、SDGs、超高解像度水文学、ダム事前放流、アンサンブル予測、フェーズドアレイ気象レーダー、データ同化、準実時間予測、危機管理型水位計、短時間降雨予測、レーザー分光分析法、同位体分析、地下水枯渇、河川流域統合マネジメント、水循環基本法

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

水は生命維持と健康で文化的な暮らしに不可欠である。産業や食料生産も大量の水消費に支えられている。一方、洪水や渇水は甚大な被害をもたらす。世界では風水害が地震などよりも主要な自然災害であり、日本でも頻度や損害保険金の支払額からみて最も深刻な自然災害は風水害である。このように水循環とそれともなう物質循環の測定、理解と予測は豊かで安全な社会の構築に不可欠である。国際的な観点からも、SDGsには水や衛生の利用可能性と持続可能なマネジメントの確保の目標をはじめ、貧困の撲滅、食料安全保障と農業、健康、エネルギー、女性の平等の実現など水と密接に結びついた目標が多く設定されている。水は国際的な戦略物質として利用されつつあり、水資源開発や水の輸出入、水処理など水ビジネスが国際的に拡大している。ESG投資を通して水リスクの概念も、企業経営に急速に浸透している¹⁾。

[研究開発の動向]

水循環研究は、主に水文学を中心とした素過程を探索する基礎的研究と、洪水警戒情報の発信やダムの運用などのより人に結びついた応用的研究に粗く分けることができる。さらに、基礎的研究にはリモートセンシングに代表される観測技術関連研究と全球モデルに代表されるような数値計算関連研究とに分けることができる。これらの区別は明確でなく、各分類をまたがる研究も多い。

降水の観測技術として、降雨観測用レーダーの開発が進んでいる。現在では電気系統、通信系統の技術開発が進み、ネットワーク化された降水量推定および短時間降雨予測が行われている。人工衛星を用いた観測も活発で、世界初の降雨レーダー（Precipitation Radar：PR）を搭載した熱帯降雨観測衛星（Tropical Rainfall Measuring Mission：TRMM）は、長期運用（1997-2015）により海陸問わず均質な長期降水

観測データを提供し、降水システムの理解を飛躍的に高めた。様々な衛星観測をもとに、JAXAが全球衛星降水量情報 (Global Satellite Mapping of Precipitation : GSMaP) を発信している。衛星観測による積雪分布の把握については、可視近赤外センサーによる積雪面積の抽出に加え、受動型マイクロ波センサーによる積雪深・積雪水量の推定も試みられ、降水と同様な全球・長期間をカバーするデータセットが作成・公開されている²⁾。地域・流域スケールでは、航空レーザー測量に基づく詳細な積雪分布の把握も試みられている。

河川の観測技術として、河川流量観測法について、低水流量観測では流速計法、高水流量観測では浮子法が古くから実務に利用されてきている。粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry : PIV) や粒子追跡法 (Particle Tracking Velocimetry : PTV)、LSPIV法 (Large Scale PIV)、STIV法 (Space-Time Image Velocimetry) が実用化されている。3次元流速観測が可能な超音波流速計 (Acoustic Doppler Current Profiler : ADCP) も広く用いられている。TPOに応じた観測手法の適用が進むものの、各手法の不確実性評価、適用判断の基準設計や統計データの連続性等の課題を解決しなければならない。

同位体を利用した水循環のモニタリング研究の歴史は古く、世界規模の降水同位体モニタリングが1961年から実施されている。水分子を構成する水素・酸素の安定同位体をトレーサー (追跡子) として用いる手法が降雨流出・地下水流動・蒸発散・大気水循環などの各過程について適用されている。水素や水中溶存炭素・塩素などの放射性同位体も年代測定に用いられている³⁾。これらの同位体利用研究により水の起源・流動経路・滞留時間などの情報が実測値にもとづいて得られるようになってきている。質量分析法に代わる新たな世界標準としてレーザー分光分析法が普及し、航空機観測や衛星リモートセンシングなどに応用されるとともに、観測値を時空間的に補間して同位体マップを描くアイソスケープ手法が2000年代以降大きく進展した。沈み込む海洋プレートからの脱水やマグマによる水輸送など、大深度地圏水循環に関する知見も蓄積されつつある。

蒸発散の観測研究として、植物の茎や幹内を流れる蒸散流を測定する方法や同位体比を利用する方法などが、対象が限定的ではあるが導入されてきた。森林樹木による蒸散量を見積もる技術として、グラニエ法など、樹液流速の測定値から単木蒸散量を見積もる安価な技術が普及しつつある。単木蒸散量の見積もる技術は、森林管理による蒸散量や森林内の水移動の変化を予測する技術を開発する上で、非常に有効な技術である。全体として、より短い時間スケール、より広域を対象とした蒸発散量の評価へ進むとともに、蒸発散の構成成分を蒸散、地面蒸発や遮断蒸発に分ける努力が続けられている。

降水の数値計算研究として、温暖化に伴う降雪・積雪量の減少や融雪流出の早期化だけでなく、アンサンブル気候予測データベース (database for Policy Decision making for Future climate change : d4PDF) を用い、将来気候のもとでの豪雪の規模や発生頻度の変化に関する検討事例も報告されている⁴⁾。特に全球気候モデル (Global Climate Model : GCM) を用いた研究は急速な発展を続けている。統計的ダウンスケーリングや力学的ダウンスケーリングによる高分解能化技術やバイアス補正の技術の発展が顕著で、従来の地域的な分析から、さらに小さい都市街区規模の範囲の詳細な水文分析が進んだ。複数のGCMや温暖化シナリオ、社会シナリオを組み合わせたデータを用いた分析、予測について、確率手法を用いた不確実性分析を取り込み、将来の経済評価や適応策の検討を行う手法がいまや一般的になってきた⁵⁾。渇水や洪水などの極値分析にとどまらず、水循環が与える環境や産業に与える将来の影響研究にまで対象とする研究分野を広げている⁶⁾。

河川の数値計算研究として、降雨から流量を推定する手法は、数値地図情報を用いた分布型物理流出

モデルが現在の主流になりつつある。洪水対策や水資源計画のソフトウェアはデンマーク水理・環境研究所の流域水循環解析統合ソフトMIKE-SHEや米国環境保護庁の雨水管理モデルSWMM (Storm Water Management Model) などの欧米製の汎用ソフトが利用されてきている。最近では、日本発の無償ソフトウェアiRIC (International River Interface Cooperative、河川の流れ・河床変動解析ソフト) や、RRIモデル (Rainfall-Runoff-Inundation、降雨流出氾濫モデル)、CaMa-Flood (Catchment-based Macro-scale Floodplain、全球河川流下モデル) も国際的に高く評価され、国内外で利用され始めている。国内では、リアルタイムの水位観測データを利用したデータ同化手法の導入や数時間先の降雨データを用いた予測手法などの開発も進んでいる⁷⁾。安価な危機管理型水位計を全国に配置して、詳細な洪水予報も検討されており、その一部では洪水水面形の時間変化から流量を推定できた事例が報告されている。

地下水の数値計算研究として、IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis、国際応用システム分析研究所) が地下水を含めた地球規模水循環水資源モデルを開発し、人間活動のデータ、GRACE衛星観測データ等を駆使して、地下水の枯渇化を視覚化した結果を報告している⁸⁾。

応用研究では、ダム貯水池運用の高度化が洪水災害への対策として、期待をますます高めている。1990年代頃から気象・水文予測情報と初期の人工知能技術を活用したダムのリアルタイム操作支援に関する研究が始まった。2000年代には既存貯留施設の有効活用によって大規模な出水への対応や利水安全性の向上を図る機運が高まり、ダムの弾力的運用に関する研究が行われてきた。近年、頻発化している広域の洪水被害に対し、アンサンブル予報を導入する研究が行われている⁹⁾。社会実装に向け、2019年に内閣官房「既存ダムの洪水調節機能強化に向けた検討会議」が設置され、電力ダムや農業ダムのような利水ダムでも治水目的に適用できるよう治水強化方針が検討された。既存ダムのある河川水系を共有する地方自治体が「治水協定」を締結するなど、実利用に向けた取り組みも進んでいる。さらに、田んぼに水を貯める田んぼダムも多くの地域で検討されてきている¹⁰⁾。

ローカルな洪水や渇水も、本をただせばエルニーニョ南方振動や気候変動などに伴う地球規模の水循環変動によって生じており、その観測と理解、予測技術の向上は国際連合教育科学文化機関「国際水文学十年計画」(1965～1974年) 以来の主要テーマである。地球温暖化に伴う気候変動などの地球環境問題が国際的な課題となった1990年代以降、大気モデルと陸面モデルによる全球水循環変動推計などによる世界の需給バランス推計や気候変動が水分野を通じて社会に及ぼす影響の推計などにおいて日本が世界をリードしている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

近年、水循環分野での雨量観測技術の進展が顕著である。X帯に続き、C帯のレーダーも二重偏波ドップラー化されて雨量推定精度が向上した。インターネットとスマートフォンの普及に伴い、雨量推定、短時間降雨予測、3次元情報の利用、出水予測等の利用が促進されている。レーダー観測において、レーダーの仰角に起因して、レーダーから遠い高強度を計測する際に上空を探知することになるため、地上雨量と異なる降雨強度となる。降雨強度の鉛直方向変化 (vertical profile of reflectivity: VPR)¹¹⁾ を勘案し、推定値を算出する解決策が検討されている。牛尾らにより、3次元で降水システムを測定するフェーズドアレイ気象レーダーが開発されている¹²⁾。30秒で天球内のレーダー反射因子 (radar reflectivity factor) をすべて観測で

きる点が革新的である。レーダーで降水強度を推定し、短時間降雨予測を行う数値計算技術も進展している。三好らはスーパーコンピュータOakforest-PACSを使い、30秒ごとにフェーズドアレイレーダーのデータをデータ同化し、30分先までの局所ゲリラ豪雨を予測するビッグデータ同化手法を開発している¹³⁾。今後の更なる計算能力の向上などにより30分以上の降雨予測に対しても期待が持てる。

衛星観測ではTRMMの後継ミッションである全球降水観測 (Global Precipitation Measurement : GPM) の主衛星に2周波降水レーダーが搭載されたことで、雪や弱い雨も観測可能となった。流量観測においても無人航空機 (Unmanned aerial vehicle: UAV) や設置カメラ画像を用いた観測、複数の観測の様々な組み合わせが試行されている。一方で、情報量が膨大になり、解釈や理解を困難にしている事例もある。

観測データ利用について、貯水池管理、河川管理と言った大規模施設の管理だけでなく、下水道の管理や、道路交通情報と高性能レーダー雨量計ネットワーク (eXtended RAdar Information Network : XRAIN) のレーダー情報を組み合わせた数値計算研究が行われており、冠水等による交通障害検知への実装が期待される¹⁴⁾。

水循環モデル開発では、ダム貯水池操作や運河導水、用途別取水、用途別水需要を推計するための人間水管理・水利用モデル、地下水の側方方向の流動も含む陸面過程モデルや、水温や貯水池操作を含めて氾濫を考慮可能なグローバル水動態モデルなどが開発され、現時点では日本が世界をややリードしている。

また、観測雑音のため精密な氾濫計算には利用が難しかった全球デジタル標高データの大幅な改良、国際共同による準実時間でのGSMapの配信など境界条件情報の向上により、精度の良い実時間での全球水循環モニタリングが可能となりつつある。

水文学の推定値を実用に用いる応用研究も進んでいる。都市およびその周辺域での大気環境の再現精度は、近年の計算機の能力向上と、空間平均モデルやk-εモデルなどの乱流計算スキームの向上を背景に、飛躍的に向上しつつある。従来の理想的な条件下でのシミュレーションから、現在はより大規模な大気場の再現や、メソ気象モデルとのカップリング、データ同化など、より現実に近い大気場でのシミュレーションに技術開発ターゲットがシフトしている。今後は、実際に人間が往来する、複雑な3次元構造を持つ都市内部のストリートキャニオン (ビル間) における大気乱流や放射伝達など、実際に人間が生活する場の熱環境、放射環境の再現が課題である。そのためには、新たな乱流スキームや放射スキームの開発が必要となる。人間の生活場としての快適な都市の大気/放射環境を実現するためには、大気場のシミュレーションに加え、大気場に対する人体の生理反応のモデリングが必要となる。

気象・水文予測情報などを活用し、出水が予測される場合に多目的ダムをあらかじめ放流し、貯水位を事前に下げて洪水調節のための空き容量を増大させる事前放流操作に関する研究が注目されている¹⁵⁾。急峻な河川が多く、雨水の流出時間が短い傾向にある我が国ではこうしたきめの細かい操作が必要なることもあり、この研究分野では世界をリードしている。また、近年、EUや米国、日本などで提供されている現業アンサンブル気象予報のダム運用への利活用に関する研究も各国で行われている¹⁶⁾。大ダムの新設が難しい状況下で、既設ダムの高経年化対策と長寿命化に向けた技術開発が主体である。

設備管理へのUAVやロボット、AI、IoT、ICT、AR、VR技術などを活用した技術継承支援システムなども最近のトピックスである。UAV活用に関して、平常時の河川の維持管理のみならず、豪雨時でも飛行可能な機器の開発を国が進めている。また、様々な波長データの分析や複数機のデータ分析のためのソフト開発が進み、高分解能の標高データや地峡面分類データが容易に手に入るようになった。加えてAIによる入力

データや誤差の補正が行えるようになり、水循環モデルの精度の向上が進んでいる。緑色レーザーによる水中内の情報も手に入れられるようになり、土砂や水質、河床データの取得も発展してきている。

他に地下水の恒温性を利用したヒートポンプシステム（地下水熱利用ヒートポンプシステム）が近年注目されている。10m以深の地中温度は、年間を通じて一定であり、その温度はおおよそ平均気温プラス1°Cから3°Cである。この特性を利用して、夏には冷熱を使った冷房、冬には温熱を使った暖房が行われている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・ 文部科学省 統合的気候モデル高度化研究プログラム (TOUGOU) (2017～2021年度)
- ・ 環境省/ERCA 環境研究総合推進費 戦略研究プロジェクト S-18 『気候変動影響予測・適応評価の総合的研究』(2020～2024年度)
- ・ 文部科学省 気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT: Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology) (2015～2019年度)
- ・ 内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP: Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program) 第2期 『国家レジリエンス (防災・減災) の強化』(2018～2022年)
- ・ 国際水文学科学会 『万物流転』活動 (IAHS: International Association of Hydrological Sciences) “Panta Rhei” (2013～2022年)
- ・ 温暖化影響評価モデルに関する分野横断型相互比較プロジェクト (ISIMIP: Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project) (2012年～) 地球規模の温暖化の影響評価に関する国際プロジェクト

(5) 科学技術的課題

降水観測ではフェーズドアレイ気象レーダーなどの高時空間分解能レーダーからの同化による力学的降雨予測手法の計算速度の向上と精度向上が課題である。また、降雪の推定精度の向上も望まれている。全球の降雨推定において衛星利用が実用化され、TRMM、GPM共に正確な降水観測を実施するが、時空間的カバー率が極めて低い。未観測ギャップをカバーするためには高性能マイクロ波放射計シリーズに代表される観測頻度の向上および長期観測の実施、降水推定アルゴリズムの改良、ひまわり8号に代表される第3世代静止気象衛星データによる時間補完、ならびに静止気象衛星データによる降水推定手法の開発、が挙げられる。重要なことは、これらの技術的課題を現象理解および検証¹⁷⁾も含め包括的、かつ連動性を高めることが極めて重要である。我が国ではJAXAの主導でGSMaPの開発改良を行っているが、国際競争と国際貢献の観点からも今以上の連動性が求められる。ゲリラ豪雨に見られるような洪水の局所化（鉄砲水など）に対応するため、簡易型水位計の設置が進められた。気象庁が出す河川の危険度分布と並んで中小河川にまで詳細な洪水が予報されるようになりつつある。国交省も粒子フィルターを用いた同化手法によって高精度な洪水予報を行う準備を進めている¹⁸⁾。

水循環において、蒸発散は未知のことが多い。現在、理論、技術ともある程度定常的に蒸発散量を評価出来る体制が整ってきているが、測定に必要な機材が高額なため、研究目的以外では蒸発散量の測定が行われておらず、必要な場所、必要な時に蒸発量のデータが存在しないことが最大の課題である。このため、蒸発量の時空間的な分布や変化については、未解決な問題が残されている。また、蒸発と密接に関係する様々な現象、例えば、二酸化炭素の吸収・放出、農地の灌漑や水消費、気候変化などを蒸発散とともに取り組む必

要がある。

地下水も観測データ不足が研究を妨げている。帯水層の不均一性は、地下水の流動を大きなスケールで見ただけには大きな問題にはならず、その流向や流速はおおよそ把握できる。しかし、小さなスケールが対象となる場合（例えば、土壌・地下水汚染サイトなど）には、帯水層の不均一性が地下水の流れや物質の輸送を複雑にしており、地下水位や地下水質の観測精度に影響を及ぼしている側面がある。

地下水の流動とならんで観測データが不足しているのが積雪情報である。受動型マイクロ波センサーによる積雪推定手法は、積雪の面的分布だけでなく積雪量（積雪水量）の把握も可能である一方、空間解像度が低い地域・流域内の積雪量の把握は困難である。また、林床積雪や湿雪に対する推定精度の低下などの問題を克服するためには、積雪量推定アルゴリズムの改良や積雪を対象とした陸面データ同化手法の開発などが必要である。さらに、積雪・融雪モデルや衛星アルゴリズムの検証に利用できる地上観測データの不足も当該分野における課題のひとつであり、今後、湿雪地域を含む多様な積雪地域への検証サイト設置と長期データの取得・蓄積が望まれる。

台風は水災害をもたらす重大な気象現象の1つだが、実観測データが圧倒的に不足している。地球上で発生する熱帯低気圧のうち、約3割もが集中する地域に我が国は位置し、さらに気候変動の影響により台風の強化確率が高まっている。数km規模の積乱雲による線状降水帯と比較すれば、台風は長期大規模現象であり、予報しやすく水防災指針も立てやすいものの、実観測データ不足による予測不確実性の高さがその妨げとなっている。ハリケーン大国である米国では海洋大気庁 NOAA/ 空軍ハリケーンハンターズ¹⁹⁾ が航空機台風直接観測により、衛星や海洋観測で得られないデータを取得している。我が国でも航空機台風直接観測の基礎研究が行われた²⁰⁾ が、より継続的体制となるよう支援の充実が期待される。

多様な水文過程の理解に重要な同位体観測において、レーザー分光分析計の普及は大きなアドバンテージと言えます。水蒸気同位体比や同位体フラックスの連続測定と原位置キャリブレーションがほぼ確立されつつある。アイソスケープ手法についても、全球同位体循環モデル等の活用により高時間分解能のマッピングが期待されており、今後実測値との比較検証によって高度化を図る必要がある。

水循環研究の重要な目的である水資源利用、水防災活用においてダム果たす役割は大きい一方で、課題は多い。気象・水文予測情報に基づいたダム事前放流により河川氾濫を緩和する治水防災操作の効果は高いと見込まれている。一方、予測情報の精度が不十分な場合、出水後の水位を十分に回復できないといった利水面でのリスクの増加などが懸念される。気象予測の不確実性を考慮した上での、ロバストな操作方法の開発が課題である。予測精度に関する情報が含まれたアンサンブル気象予測情報の活用が期待されているが、研究事例が不足している。アンサンブル予測に含まれる膨大な情報を、ダム操作に有効活用するための更なる研究が求められる。

多くのアンサンブルメンバーを持つd4PDFに見られるような数千年のデータセットによって、大規模な確率統計分析が可能となった。特に非定常性についての研究が気候変動研究と同時に進められており、ジャンプやカタストロフィー現象の分析に注目が集まっている。従来、不得手とされたGCMによる極値の分析や温暖化の寄与を分析するイベント・アトリビューション研究も可能となりつつある。一方、これらを証明するには、長期かつ多地点の実データが必要であり、モデルと観測の両輪が必要である。

気候変動の影響はほとんどが水を通じて人間社会に悪影響を及ぼしており、気候変動影響の経済的な定量

化と、適応策の費用便益、さらには、人間のwell-beingに及ぼす影響を踏まえた最適な緩和策と適応策のバランスを求める研究が喫緊に求められている。

世界的IT企業による技術革新等を通じて、水文学における空間解像度が飛躍的に高まっている。これを受けて、全球水文モデリングにおいても、全球1km程度の解像度に向けて着実に研究が進展している²¹⁾。ただし、衛星観測やモデル計算などでは時間空間解像度の向上が見込めるものの、地上観測には同様の飛躍は見られない。地上観測情報を最小限にして高精度の情報を得るための技術、高解像度化した時に無視できなくなる諸要素(人工的な水路など)の取り込みなど、研究対象が変化しつつあり、その潮流に対応していく必要がある。

水循環それ自体が分野横断領域であり、これまでに流域統合、地下水を含めた水大循環モデルなどの研究が開拓されてきている。近年、デジタル化の進展に伴う基盤技術の向上やSDGs等の社会の求めを背景に、さらなる異分野連携研究が進行している。情報学と水文学の連携により、水理データの不足をAIにより補う検討がなされている²²⁾。水防災では激甚化、頻発化する水災害に対して気象学と水文学の連携が一層進展している²³⁾。また、人間活動と水循環の相互関係を一体的システムの観点から解析する社会水文学の研究が立ち上がりつつある^{24), 25)}。専門知見の深化とともに超学際研究に対応する視野が重要となる。

2.2 (6) その他の課題

国際水文学会 (IAHS) は、2019年に「水文学における23の未解決問題 (Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) - a community perspective)」をまとめた²⁶⁾。7つの大枠として、時間変化 (Time variability and change)、空間変化と大きさ (space variability and scaling)、極値の変化 (variability of extremes)、境界水文学 (interfaces in hydrology)、観測とデータ (measurements and data)、モデル化 (modelling methods)、社会との境界 (interfaces with society) に区別されている。23項目の全てが日本の水循環研究にも当てはまることであり、今後、これらの問題への資源投入が期待される。

日本の水循環研究は政策的課題の影響を強く受けてきている。水循環基本法 (平成26年法律第16号) は、多くの関係機関にまたがる水循環施策を総合的、一体的に推進することを基本的理念としている。内閣官房の水循環政策本部 (本部長: 内閣総理大臣) では、水循環基本法に基づき、政府が水循環に関して講じた施策を、通称「水循環白書」にまとめ、毎年国会に報告している。この白書で、科学技術振興の観点からは、①流域の水循環、②地下水、③水の有効利用、④水環境、⑤全球観測の活用及び⑥気候変動の水循環への影響に関して取り組まれたさまざまな調査研究プロジェクトの概要と成果が報告されている。健全な水循環の維持・回復のための流域の総合的かつ一体的なマネジメントを推進するために、関係する行政などの公的機関、事業者、団体、住民等が相互に連携して活動するために流域水循環協議会を設置し、流域の保全や管理、施設整備及び活動の基本方針を定めた「流域水循環計画」を策定して共有することになっている。計画の目標や目標達成のために実施すべき施策は、この計画を各地域の流域の関係者が共有し、相互に協力することによって森林、河川、農地、下水道、環境等、水循環に関する各種施策の連携のもと、効果的な課題解決が図られることになる。「水循環」に関するさまざまな活動の評価は「流域水循環計画」を策定し実行していく上で、何に貢献することにつながるのかをひとつのメルクマールにすべきである。

これらの取り組みは、わが国における健全な水循環を維持・回復することに寄与するのみにとどまらない。世界各国がそれぞれの自然・社会条件のもとで抱えている水循環にかかる課題を解決する上で、わが国がこれまで蓄積してきた、また蓄積しつつある知恵と経験を活かして、国際社会の中で応分の役割を果たしていく

ための基盤となることにつながる。さらには、いわゆる「水ビジネス」としてわが国の経済成長の原動力になることも期待される。

世界的に水資源の不足は深刻であり、灌漑用途などのため枯渇性の地下水の過剰な汲み上げなどの問題が発生しており、持続可能性に係わる課題として注目を集めている。先進国都市部などの生活において直接的に利用した水だけでなく、世界の多くの水資源を利用していることを意識するため、製品やサービスの提供にどの程度水が使用されたかを示すウォーターフットプリントという概念や、食料や製品の輸出入にあたって、その生産に用いられた水資源をバーチャル・ウォーター（仮想水）として推計する手法が提案され、欧州を中心に徐々に普及し、ESG投資における企業の評価指標への取り込みが話題となっている。

(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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●レーダーを用いた雨量観測の精度向上が進められている。 ●ダム有効活用に関する基礎研究で世界をリードしている。 ●地球規模の水循環や気候変動の影響解析に関する研究が体系的に実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●水文モデルの生態、産業、人間活動などへの利用が急速に進んでいる ●ダム有効活用や柔軟運用、連携運用などの研究が世界をリードしている。 ●地方自治体と大学・国研との学官民連携や、気象分野などの異分野と連携により、水防災につなげる水文学分野の応用研究が行われている。 ●広域の中小河川の流出予測の開発が進んでいる。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●地球規模の水循環や気候変動の影響解析に関する研究が体系的に実施されている。 ●衛星を利用した全球スケールの基本データの構築で先行し続けている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●NSFのINSPIREにおいて地球表面水文モデルの開発が急ピッチで進められている。 ●Water CouncilやWater Startなど、行政と大学の企業が連携して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が進んでいる。 ●近年のエネルギー、食料、水の持続的な供給への関心の高まりにより、大学や研究機関などが急ピッチでモデル開発などを進めている。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●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。 ●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。 ●英国でHyporheic帯（伏流帯）(HypoTRAIN) や応用統計水文学などの研究プロジェクトがEUのファンドで行われており、Brexit後の展開に懸念がある。 ●ドイツのハノーバー大学を中心とするグループが、躍進的な進歩を遂げている並列計算技術を生かした、大気乱流シミュレーションモデルの開発を行っている。近年では、実際の都市計画などへの貢献を念頭に、より現実に近い計算設定での大気乱流シミュレーションが可能になりつつある。

2.2 俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。 ● 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。 ● 英国ではUKCIPが洪水のソフト適応策を充実させている。濁水も同様で複数の事例研究、実施を行っている。 ● スイス連邦工科大学チューリッヒ校が大学世界ランキング (ARWU2020) の水資源分野で世界1位で、モデル開発で質の高い成果を出している。 ● オランダのコトレヒト大学、アムステルダム自由大学に傑出した全球モデル分野の若手研究者が集結している。また、デルフト工科大学が水文環境分野で質の高い研究を行っている。
中国	基礎研究	○	→	● 全球スケールの水文研究にあまり関心を持っていないようである。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 現政権が強力に開発を推進しようとしている雄安新区にかかわる水環境整備、水資源確保、都市洪水対策研究が急激に発展しようとしている。 ● モデル分野には優れた研究者が多く、予算が付けば大きく飛躍するポテンシャルは秘めている。
韓国	基礎研究	△	→	● 全球スケールのモデルにほとんど関心を持っていない様子である。
	応用研究・開発	△	→	● 研究者の絶対数が日本よりもさらに少なく、複数の分野を1人の研究者が担わざるを得ない状況である。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ その他の再生可能エネルギー発電（水力、海洋、地熱、太陽熱）（環境・エネ分野 2.1.7）
- ・ 地域熱供給（地域冷暖房）（環境・エネ分野 2.1.13）
- ・ 気候変動観測（環境・エネ分野 2.2.1）
- ・ 水利用・水処理（環境・エネ分野 2.2.4）
- ・ 除去・浄化技術（大気、土壌・地下水）（環境・エネ分野 2.2.5）
- ・ 都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）（環境・エネ分野 2.2.11）
- ・ 農林水産業における気候変動適応・緩和（環境・エネ分野 2.2.12）
- ・ 社会システムアーキテクチャー（システム・情報分野 2.3.3）

参考・引用文献

- 1) 花崎直太, 「企業の温暖化適応策検討支援を目的とした公開型世界水リスク評価ツールの開発」『国立環境研究所地球環境研究センターニュース』, <https://www.cger.nies.go.jp/>

- cgernews/201910/346004.html (2020年10月アクセス)
- 2) D. K. Hall and G. A. Riggs, *MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid, Version 6*, M. Roman, D. K. Hall and G. A. Riggs (contributors), (Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2016), doi: 10.5067/MODIS/MOD10A1.006.
 - 3) 山中 勤, 「環境同位体による水循環トレーシング」(東京: 共立出版, 2020)
 - 4) H. Kawase, et al., “Enhancement of Heavy Daily Snowfall in Central Japan Due to Global Warming as Projected by Large Ensemble of Regional Climate Simulations”, *Climatic Change* 139, no. 2 (2016): 265-278. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1781-3>
 - 5) Nurul F. Januriyadi et al., “Evaluation of future flood risk in Asian megacities: a case of Jakarta”, *Hydrological Research Letters* 12, no. 3 (2018): 14-22, doi: 10.3178/hrl.12.14
 - 6) Kei Nukazawa et al., “Projection of invertebrate populations in the headwater streams of a temperate catchment under a changing climate”, *Science of the Total Environment* 642 (2018): 610-618, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.109
 - 7) JST 未来社会創造事業, 「都市浸水リスクのリアルタイム予測・管理制御」『科学技術振興機構』, <http://www.recwet.t.u-tokyo.ac.jp/mirai/links.html> (2020年10月アクセス)
 - 8) 和田義英, 「地球規模の水資源研究の現状と課題」『CRDS 科学技術未来戦略ワークショップ報告書「環境や社会の変化に伴う水利用リスクの低減と管理」』(CRDS-FY2019-WR-04) (2020): 14-23, <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2019/WR/CRDS-FY2019-WR-04.pdf>
 - 9) 日本気象協会, 「日本気象協会、「ダムの事前放流判断支援サービス」を開始～「最大15日先」「解像度が高い」「精度が高い」予測の提供により浸水被害低減を目指す～」『日本気象協会』, <https://www.jwa.or.jp/news/2020/03/9451/> (2020年10月アクセス)
 - 10) 宮津進 他, 「田んぼダムによる内水氾濫被害軽減効果の評価モデルの開発と適用」『農業農村工学会論文集』80巻6号 (2012): 479-488, doi: 10.11408/jsidre.80.479
 - 11) 大石 哲, 「レーダ水文学の未来」『水文・水資源学会誌』31巻6号 (2018): 545-548, doi: 10.3178/jjshwr.31.545
 - 12) 牛尾知雄 他, 「フェーズドアレイ気象レーダーによる超高速3次元観測リアルタイムデータを活用した局地的風水害の防災・減災対策支援」『地域防災対策支援研究プロジェクト』, https://all-bosai.jp/chiiki_pj/index.php?module=blog&eid=10561&aid=10802 (2021年1月アクセス)
 - 13) 理化学研究所 他, 「30秒ごとに更新するゲリラ豪雨予報 - 首都圏でのリアルタイム実証実験を開始 - 」『理化学研究所』, https://www.riken.jp/pr/news/2020/20200821_1/index.html (2020年10月アクセス)
 - 14) 関根正人 他, 「リアルタイムな都市浸水予測が可能に」『早稲田大学』, <https://www.waseda.jp/top/news/64900> (2020年10月アクセス)
 - 15) G. Uysal et al., “Real-Time Flood Control by Tree-Based Model Predictive Control Including Forecast Uncertainty: A Case Study Reservoir in Turkey”, *Water* 10, no. 3 (2018): 340, doi: 10.3390/w10030340
 - 16) D. Nohara and T. Hori, “Integrated Reservoir Operation Considering Real-Time Hydrological Prediction for Adaptive Water Resources Management”, *Sustainable Water Resources*

Planning and Management Under Climate Change (2016) : 101-132, doi : 10.1007/978-981-10-2051-3_5

- 17) T. Terao, et al., “Direct Validation of TRMM/PR Near Surface Rain over the Northeastern Indian Subcontinent Using a Tipping Bucket Raingauge Network”, *Sola* 13 (2017) : 157-162, doi : 10.2151/sola.2017-029
- 18) 辻倉裕喜, 田中耕司, 宮本賢治, 「水位予測における粒子フィルタ適用上の課題とその対応」『土木学会論文誌B1 (水工学)』72巻4号 (2016) : I_181-I_186, doi : 10.2208/jscejhe.72.I_181
- 19) Office of Marine Aviation Operations (OMAO) , ”NOAA Hurricane Hunters”, OMAO, <https://www.oma.noaa.gov/learn/aircraft-operations/about/hurricane-hunters> (2020年10月アクセス)
- 20) 琉球大学 他, 「「2017年台風第21号の航空機観測を用いた強度解析と予測実験」の結果について」『琉球大学』, <https://www.u-ryukyu.ac.jp/news/509/> (2020年10月アクセス)
- 21) Jean-François Pekel et al., ”High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes”, *Nature* 540, no. 7633 (2016) : 418–422, doi : 10.1038/nature20584
- 22) 株式会社富士通研究所, 「過去の少ない雨量・水位データで河川の水位を予測できるAI技術を開発」『富士通株式会社』, <https://pr.fujitsu.com/jp/news/2019/08/16-2.html> (2020年10月アクセス)
- 23) 東京大学生産技術研究所, 「日本中の河川をいつでも誰でもモニタリング! ~ 『Today’s Earth - Japan』を公開~」『東京大学生産技術研究所』, <https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/3193/> (2020年10月アクセス)
- 24) Y. Wada et al., ”Human–water interface in hydrological modelling : current status and future directions”, *Hydrology and Earth System Science* 21, no. 8 (2017) : 4169–4193, doi : 10.5194/hess-21-4169-2017
- 25) 中村晋一郎, 「社会水文学の世界的動向と日本での展開の可能性」『水文・水資源学会2019年度研究発表会【超学際研究による水文・水資源学の新展開の探索】』: 88-89, doi : 10.11520/jshwr.32.0_88
- 26) Gunter Blöschl et al., “Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective”, *Hydrological Science Journal* 64, no. 10 (2019) : 1141-1158, doi : 10.1080/02626667.2019.1620507

2.2

俯瞰区分と研究開発領域

2.2.4 水利用・水処理

(1) 研究開発領域の定義

変動する水資源を安全に供給、利用するための水処理を対象とした領域である。水処理システムについて、用水処理や排水処理に用いる材料、薬剤、機器、膜、光、システム等の研究開発を対象とする。計測・制御システムについて、下水疫学によりウイルスや新興汚染物質等の検出、評価に向けた技術開発や、効率的、安定的に利用するためのICT応用等による管路システム維持、水処理のエネルギー高効率化、水管理支援システム等の研究開発を対象とする。再生水や無塩素給水等に関する定量的リスク管理技術等の研究開発も含める。

国内の過疎地や途上国での水利用や、自然災害などの非常時のための分散処理システムも含める。公衆衛生に関わる下水道の再生や浄化槽等の取り組みに加えて、ステークホルダー意思決定等の取り組みも対象とする。

(2) キーワード

飲料水、公衆衛生、下水疫学、水道システム維持管理、海水淡水化、再生水、リスク管理、栄養塩（窒素、リン）、病原微生物、逆浸透膜・正浸透膜、紫外線消毒、アナモックス

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

水処理技術は多量の水を必要とする現代の暮らしや生産活動に必須の人間社会の存立に欠かせない。水処理技術により、飲料に適さない様々な水を飲料に適する水質に変換したり、一度使用した水を再生利用したり、従来使用できなかった水資源を利用したりできる。また、公害を防止し、環境を維持するために、廃水をしっかりと浄化してから環境に排出することも必要である。歴史的に、都市における人口集中、より利便性を追求した様々な製品の製造工程などに起因する新たな化学物質等の出現などから、河川、湖沼、地下水などの水道水源として利用してきた水道原水の汚濁が進み、これに対応した水処理技術(浄水技術)の革新が行われてきた。近年、世界的な人口増、工業・農業などの産業活動の増大にともなって、水資源がひっ迫する地域がますます増加し、海水、下水処理水などを原水として飲料水を製造する技術の開発が求められている。浄水技術の基本形は既に確立されているものの、上述のような地域的あるいは地球的規模での状況の変化に伴い、水処理技術の革新はさらに必要とされており、社会的ニーズの極めて高い領域である。また、技術の適用にあたり、適用する地域の自然的、社会的条件が多様であるため、最適技術を適用するための手法開発も重要なテーマとなる特徴がある。浄水技術は、原水とする水の性状、処理の結果、供給する水道水の水質レベル、必要とする土地の面積、必要となる建設および維持管理・運転コスト、必要な技術者の数とレベルなどの様々な要因の制限をうけるため、これらの状況に応じて適した浄水技術は異なることに留意が必要である。

とくに、世界では、まだ衛生的なトイレを利用できない人や安全な飲料水を手に入れない人、きれいな水で手洗い、うがいができない人が多くいる。その解消が国連でもSDGsで取り上げられている。我が国の水処理技術を世界展開することによって、我が国の産業の振興はもとよりSDGsにも貢献できる。水利用のための科学技術は土木技術と密接にかかわり、防災、リスク管理、維持管理、資産管理などの分野と関連する。水処理に関する知見は、公衆衛生、微生物学、化学工学などの分野と関連する。

【研究開発の動向】

水利用全体に関連して、未規制物質や未規制微生物に対するリスク管理、災害対応、長寿命化、維持管理技術などが求められている。2020年の新型コロナウイルス感染症問題から、下水疫学の分野が期待を集めている。従来の感染者のモニタリングが検査対象、年齢構成などさまざまなことに陽性者数が影響を受けるのに対して、下水中の新型コロナウイルス濃度を測定できれば、検査対象者に依存しない感染状況の都市間比較やピーク推定、再流行の予見ができる可能性が示され、今後も懸念される新しい感染症に対して下水疫学の確立への重要性の認識が広がっている。下水疫学研究の関連として、日本をはじめ世界各国の排水基準や水道水質基準は年々、厳しくなってきた背景がある。対応が必要な物質が増加し、その都度、新たな除去技術の開発や既存の水処理装置の運転改良による除去率の向上が目指されてきた。日本国内では、ノロウイルスのように下水-沿岸域-魚介類-ヒト-下水という循環経路が疑われる病原体を対象に、感染症対策として下水疫学の研究が行われていた。

また、豪雨後の沿岸部悪臭問題などから雨水下水合流式下水道の改善も再び関心が高まっている。一方で、栄養塩を含んだ水を排水した方が、漁業の振興にはなるとの見方も存在し、季節により栄養塩の除去率を調整した運転を行う技術も開発されている。一部の物質を完全に除去しながら、一部の物質を除去しすぎないことは水処理技術にとっては難しい挑戦的な研究課題となっている。さらに、エネルギー使用の効率化、ICT技術やAI技術を用いた維持管理の効率化、整備から時間が経った水処理施設の長寿命化、津波や地震時でも最低限の機能を維持するための強靱化なども水処理技術に求められている課題である。

水処理には、大きく分けて用水処理と廃水処理（排水処理）がある。用水処理は原水から生活用水、工業用水などを製造する技術である。上水道で用いられる浄水技術も用水処理技術の一つである。一方、廃水処理は、生活廃水や工場廃水を環境に排出して問題のないレベルまで処理する技術で、下水処理も廃水処理技術の一つである。広義の水処理技術には、吸着剤や膜、凝集剤などの材料・化学製品に関する技術、汚泥のかき寄せや散気装置、オゾン発生装置、水質測定機器などの機械技術、リアルタイムに送気量などをコントロールする制御技術、水資源管理や水処理設備の施工に関する土木技術などが含まれる。現在最も広く使われている技術として、用水処理技術では急速ろ過法、廃水処理技術では活性汚泥法がある。これらの技術は開発されて約120年が経過しているが、そのエネルギー効率化や除去対象物質の変化への対応、新たな薬剤や素材の開発など地道な改良が現在でも重要である。

上水道における用水処理技術は、様々な汚濁物質あるいは飲用に適さない成分を含む原水から、これらの物質を除去し、安全でおいしい飲料水を製造するための技術が求められる。技術開発内容は大きく、①濁質等、金属類、塩類、化学物質、微生物類などを効率的に水中より除去する技術、②個々の水処理技術を他の要素技術と組み合わせるシステムを構築し、場合によりIoTやAIなどの技術を活用しながら、より効率的に処理を行うシステムの開発、③最先端の技術開発だけではなく、途上国対応、災害時対応などの多様な条件における適用を考慮した最適なシステムの開発、などに分類される。下水の処理プロセスで発生する汚泥の減量やその農業などでの利活用、栄養塩や炭素資源の地域での循環などに関しても、様々な技術開発がなされている。汚泥を嫌気性消化して得られるメタンによる発電技術などエネルギー回収技術も長く注目されている。

紫外線 (Ultra Violet: UV) 照射による消毒について、現在、新しい光源としてUV-LEDが注目されている。活性汚泥処理の運転の工夫により窒素やリンを除去できるプロセスの開発が1970年代から始まり、現在も徐々に普及が進んでいる。2000年頃から、生物処理技術の新しい展開として、アナモックス反応（嫌氣的

アンモニア酸化) を用いた窒素除去技術が汚泥返流水処理などを対象に実用化が加速してきている。凝集剤、消毒剤などの水処理用薬品の製造量は、都市や産業の成長とともに大幅に増加してきた。凝集剤は高性能な製品が次々と開発され、消毒用塩素については消毒副生成物の問題の指摘に対して、注入方法や貯蔵方法などの技術的工夫がされてきた。水処理に用いる化学製品は、各種水処理薬剤に加えてイオン交換樹脂、キレート吸着樹脂、活性炭、膜などがある。イオン交換樹脂は、半導体製造用水など純水製造には必要不可欠で、キレート吸着樹脂は、工場排水中の重金属の回収のための主要技術である。活性炭も各種水処理に広く用いられ、使用量も多い。膜については素材改良に加え、エンジニアリング面を含めて、1990年代から急速に使い勝手がよくなり、普及が進んだ。精密ろ過膜と微生物処理を組み合わせた膜バイオリアクター (Membrane Bioreactor : MBR) による廃水処理技術とRO膜による海水淡水化技術が、最も進展が大きかったといえる。

水資源がひっ迫している国、地域 (中東、米国、豪州、地中海沿岸、中国等) では、海水淡水化技術の効率化が求められてきている。従来の主要な技術であった蒸留法から逆浸透 (Reverse Osmosis : RO) 法への技術転換が進んでいる。RO法について実用上の要請に対応するための研究開発が進められている。具体的には、エネルギー効率の向上、耐薬品性、耐久性に優れた膜、加えたエネルギーを回収する技術の開発、特にほう素など海水中に含まれて、飲料水中における濃度が制限される物質のより効率的な除去方法の開発などである。RO膜を利用した技術では日本が世界をリードしているが、海水淡水化システムの開発は中国などでも研究開発が進んでおり、絶対的な優位性はない。中国では、水道水源の悪化から、化学物質対応の浄水処理技術の開発が中心となっている。米国、欧州でも、膜メーカーが存在し、膜処理関連の技術において高いレベルを維持している。

下水処理水を水道水源として位置づける議論は、水資源のひっ迫とともに進んでいる。下水処理水の飲用利用は、間接的再利用と直接的再利用に分類される。間接的再利用は、下水処理水を一度、自然水系あるいは地下水系に開放させた後、適切な浄水処理によって飲料水を製造し、供給するシステムである。一方、直接的再利用は、下水処理水をRO膜、UV照射などの技術を駆使して一挙に飲料水として適合するレベルの水質まで変換し、そのまま自然水系に開放することなく供給するシステムである。都市域における河川水に下水処理水が含まれる割合は、場合によっては50%以上となることもあり、直接再利用システムと間接的再利用システムにおいて、浄水処理工程における原水水質は極端に異なるわけではない。しかしながら、システム異常への対応方法、住民感情への対応など、水処理技術以外の要因により、その適用に当たっては多くの考慮すべき要因が存在する。

図表2.2.4-1に水処理分野の最有力誌Water Research誌 (IF=9.13) と、IWAが発行しているWater Science and Technology誌 (IF=1.64)の筆頭著者の所属国を示す。日本からの掲載論文数は極めて少なく、中国の勢いに大きく離されている。後者のWater Science and Technology誌は、途上国におけるケーススタディーなども掲載され、米国からの投稿が少ないことなどトップジャーナルではなく、研究の活発さを正確には必ずしも表さないが、あまりに低調な英文情報発信能力は、今後の水処理技術の海外展開に不利に働くと懸念される。

Water Research誌への掲載件数について経年変化でみると、図表2.2.4-2のようになる。

図表2.2.4-3にWater Research誌 (Vol. 184,2020) 掲載論文のテーマを抜粋した。水処理分野の研究課題は極めて多岐にわたり、特定の技術開発に結び付かない潜在的な水質リスクを与える物質などの研究も多い。中国の論文に特にその傾向が多くみられ、さまざまな環境リスク対象物質や微生物に対し、幅広く研

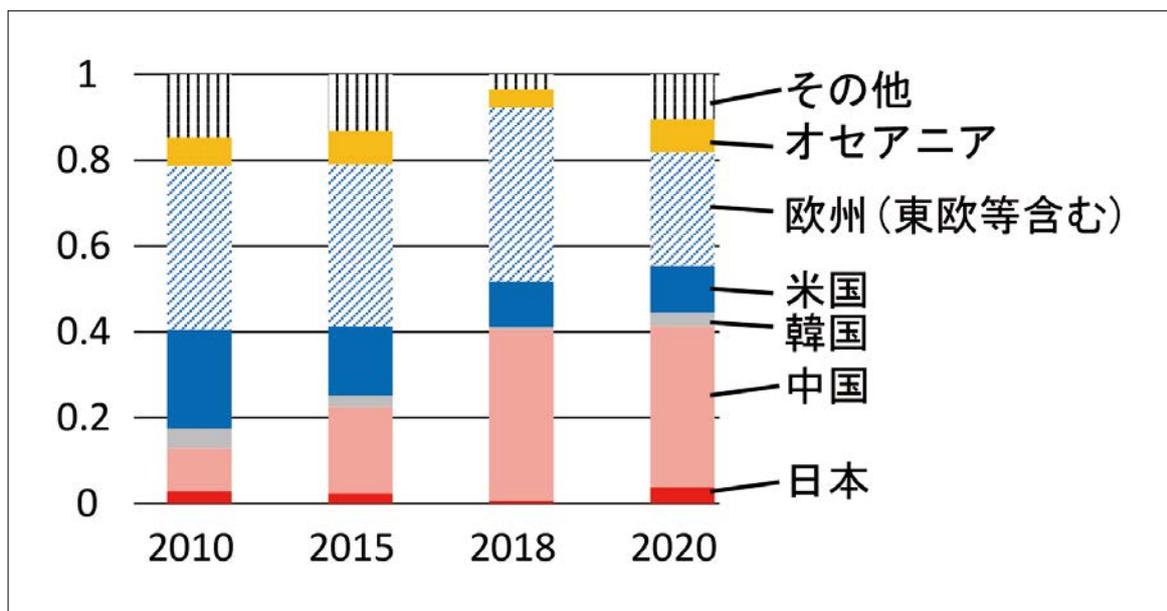
2.2

環境区分と研究開発領域

究が進展している。また、マイクロプラスチックや薬剤耐性菌などの近年の流行を研究にいち早く採り入れている。一方で、水処理技術の開発にそうした中国での基礎的研究が結びついているのか明らかではない。欧米の論文でもリスク発掘型の研究は見られる。新規性が高く、実用化や技術との関連で目的がはっきりした研究が多く、モデル化や水処理技術の開発に結び付く課題が多い。

図表 2.2.4-1 水環境分野の主要ジャーナル2誌の筆頭著者の所属国 (2020 上半期)

国	Water Research 誌	Water Science and Technology 誌
	vol.181-184, 2020	vol.81, num.1-8, 2020
日本	7	2
中国	68	63
韓国	6	1
米国	20	3
米国以外の北米	10	8
欧州 (東欧、トルコ含む)	48	58
オセアニア	14	1
東南アジア、南アジア	4	10
南米、アフリカ、中東	5	36



図表 2.2.4-2 Water Research 誌への掲載件数比率の経年変化

(※2010年と2015年は責任著者、2018年と2020年は筆頭著者をそれぞれ集計)

図表 2.2.4-3 Water Research 誌 (Vol. 184,2020) 掲載論文のテーマの抜粋

国	掲載論文のテーマ
日本	浄水配水管中で再増殖する細菌の基質 消火剤に含まれるフッ素系界面活性剤 塩素消毒配水管中のマンガン蓄積
中国	消毒副生成物の総説 廃水処理での N ₂ O 生成の総説 ビスフェノール A の塩素化物の廃水処理での生成と分解 溶存性有機物濃度と河川の細菌群集の関連 UV- 塩素処理での消毒副生成物 海洋での難燃剤汚染の地理的分布 マイクロプラスチック付着疎水性化合物 ノニルフェノール分解産物の女性ホルモン活性 新規吸着光触媒による薬剤耐性遺伝子や薬剤耐性菌の除去 合成女性ホルモンの底質での分解への天然有機物の影響 湖沼の水温形成メカニズム電気化学反応器の性能へのフルボ酸の影響 お茶を入れる際の消毒副生成物の生成抑制 酸化池処理システムの水理学的考察 嫌気性処理システムでの VFA 生成の AI 予測 藻類の影響を受けた塩素処理での消毒副生成物 低濃度医薬品の魚類への影響 新規の脱窒反応経路に関する検討 養殖池からのメタンガス排出 北西太平洋でのヒ素の形態別動態 閉鎖性海域での抗生物質のリスク コロイド粒子の土壌からの流出 揚子江の粒子状有機炭素の動態 アナモックスでの汚泥性状の変化 染色排水の処理生物膜形成の第一段階 マイクロプラスチックによる重金属の輸送 マイクロプラスチックによるカドミウムの輸送
米国	森林火災により生成した汚濁成分の処理困難性 活性炭への消毒副生成物の吸着への前塩素処理の影響 下水道によるウイルス疾患の調査 藻類由来有機物によるシアノトキシン除去阻害 イオン交換樹脂の電気再生 代謝活性を有する細菌のショットガンシーケンスによる測定 GIS との結合による糞便汚染の起源分析
韓国	嫌気性電気培養法の総説 排水処理施設からの N ₂ O 生成 新規の窒素系塩素処理副生成物 ミクロキスティンの促進酸化処理 抗生物質の病院排水からの処理
北米	人工甘味料の廃水トレーサーとしての活用 フッ素系界面活性剤の粘土表面での挙動 ミジンコの代謝による発生毒性の検出 水温とカビ臭物質の活性炭除去との関連

2.2
俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

<p>欧州</p>	<p>廃水処理に関するLCAの総説 浄水処理でのアルデヒド類の除去のための生物処理の馴致 バイオ生成ガスからの有用物質生産における含硫黄物質による阻害 粒子の沈でん理論 生物活性炭層によるマイクロプラスチックのろ過 UV処理下水処理水中の薬剤耐性大腸菌 移動研究室でのメタゲノム水質モニタリング 糞便汚染指標とソーストラッキング 雨水利用のコスト解析 配水管の破断に対するネットワーク強靱性 プラスチックから溶出する成分の生態毒性 硫黄を多く含む廃水の嫌気性MBR処理 下水処理水中の消毒副生成物の長期モニタリング フェントン処理でのジアゼピン系医薬品の分析法 有機塩素化合物のモニタリング方法 飲料水原水中の新規消毒副生成物前駆体 塩素処理、前オゾン処理における消毒副生成物 フローサイトメトリーによる消毒効果のモニタリング ヒドロキシルアミンの水生物による代謝 F特異大腸菌ファージの検出法</p>
<p>オセアニア</p>	<p>水処理施設での金属腐食防止剤の有用性 中国のウォーターフットプリント解析 トリハロメタンの生成モデル 人工DNAによる表流水のトラッキング</p>
<p>アジア</p>	<p>下水汚泥の脱水のための新規添加剤 香港での食品廃棄物と下水の混合処理 SARS-CoV-2に関する下水疫学</p>
<p>南米</p>	<p>海岸域での侵入種である貝類による水質浄化</p>

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

- ・新型コロナウイルス感染症の世界的流行に伴い、感染状況モニタリング方法として、下水中の新型コロナウイルス濃度を把握する下水疫学の有効性が注目されている¹⁾。従来の感染者数の把握は、検査対象が重症者から無症状者に広がることにより影響される指標であり、昼間人口や住民登録していない人口などに分母となるべき人口も左右され、政策判断の指標として不完全である。一方、下水中のウイルス濃度は、症状が生じるよりも前に濃度が立ち上がるとされ、早期の感染予測が可能になること、また、検査対象などの施策の差によらない地域間比較が可能になるなど、いくつかの点で、従来指標に対して有利な点がある。また、新型コロナウイルスの問題が収束したとしても、新たな感染症に人類が直面する可能性や、災害時の衛生状態の把握など、さまざまな目的で下水疫学の有用性が予想される。必要となる技術について、下水中からの病原微生物のDNAあるいはRNAの抽出技術やReal-time PCR法による特定遺伝子の特異的検出法であり、基本的にはそれぞれ確立している要素技術の組み合わせとなる。しかし、実際には調査対象によって、使い分けが必要で、感染症の流行に機動的に対応する研究や人材が国際的に見ても不足している。また、全国や海外での調査が迅速にできるよう、平時からこの分野に特化した人材や技術、協力体制を保有しておく必要がある。
- ・浄水処理技術を急速ろ過法から、より水処理性能が高度で確実な膜ろ過方式に変更する検討がなされ、

維持管理コスト削減のために大型化、効率化が注目されている。特に、原水水質が良好ではない地表水への適用に向けて、各国のメーカーがしのぎを削っている。例えば、従来のポリマー膜ではなく、セラミック膜を利用した技術の適用が進んでおり、モノリス型の円筒形膜ユニットを集積した大型ユニットの開発が注目を集めている。セラミック膜は日本のメーカーの技術に強みがあり、海外展開がいくつか成功している。

- ・海水淡水化技術のエネルギー消費量、および維持管理コスト削減は引き続き課題である。より耐久性の高い膜（ロバスト膜）やより透過性の高い膜の開発が注目を集めており、ポリマーに炭素粒子を混合させるなどの技術が開発されている。
- ・分散型水処理技術の事例として、P&Gの粉末型簡易浄水剤PURの取り組みが世界的に有名である。浄水剤PUR 1包で10リットルの水を浄化でき、水不足地域の子どもの安全な飲料水を提供している。現在では日本を含む先進諸国で1 for 1またはbuy 1 give 1と呼ばれる寄附購入キャンペーン（同社製品1点購入につき1包が寄附される）などを行い、SDGsに貢献する社会貢献型ビジネスモデルとして高い評価を得ている²⁾。イオン吸着剤を応用した分散型水処理技術では、国内では信州大学が独自の結晶成長技術により原子間隙を調整したイオン吸着剤を開発している。その高い重金属イオン除去性能を生かして携帯型浄水ボトルNaTiOの事業化に到っており、産学連携の成果として注目を集めている³⁾。その他の凝集剤なども水処理薬剤メーカーが継続して開発を進めている。
- ・UV照射技術は、塩素耐性のあるクリプトスポリジウム対策として極めて有効だが、従来のUVランプは水銀を用いていることが問題となっている。それに対して、UV-LEDは製品レベルまで開発が進んでおり、社会実装の進展が期待されている。
- ・原水の持つ浸透圧をそのまま活用し、加圧なしで水を透過させる正浸透（Forward Osmosis：FO）技術の開発が進んでいる。FO膜そのものはRO用の膜とほとんど同じだが、ユニット化の工夫や正浸透に用いるドロー溶液の選定が課題である。
- ・海水と淡水との濃度差を利用し、RO膜や電気透析膜を用いて発電するシステムの開発が進んでいる。これらは、従来のエネルギーを利用して、海水から高濃度海水と淡水を製造するシステムの逆のシステムであり、低炭素化社会への対応として注目される。
- ・窒素除去の理論はかなり完成されており、実証試験段階に入っている技術が多い。環境省「CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」の「革新的な省エネ・創エネ生活排水処理システムの開発」（2017～2019年）で、三菱化工機の下水中の有機物のメタンガス化とアナモックス反応（嫌気性アンモニア酸化）による窒素除去を組み合わせた嫌気性MBR方式の開発が進められた。アナモックス反応を利用した窒素除去の水処理技術分野は、諸外国でも公的な研究資金の支援が見られる。一方、従来の硝化脱窒素型の窒素除去技術でも、AI技術を活用した生物反応槽への供給空気量を制御する技術が進展してきている。
- ・微生物燃料電池についても引き続き、廃水処理と発電を同時に行う研究が行われている。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域

- ・国内では高度成長期に整備が進んだ上下水道管路の老朽化が進んでいる。老朽化に加え、自然災害による漏水・破損事故は日本各地で発生しており、水道インフラの耐久状況の簡易な把握に対するニーズが高まっている。また、他国でも水道インフラの老朽化は同様に進んでいる。Fracta, IncはAI/機械学習を活用した水道管の劣化予測ソフトを開発し、米国や日本で各水道配管の破損確率を解析し、優先的に更新を行う診断サービスを行っており、水道分野におけるデジタルトランスフォーメーションの事例として注目される。
- ・排水に含まれる栄養塩、エネルギーなどの回収、有効利用技術について様々な検討や試験的研究が国内外で行なわれている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

・世界の豊かな生活環境と地球規模の持続可能性に貢献するアクア・イノベーション拠点

文部科学省とJSTのCOIプログラム(The Center of Innovation Program)で、信州大学、日立製作所、東レ、長野県などが共同で拠点研究を推進している(2021年までの予定)。カーボンナノチューブを配合させたRO膜の開発と応用技術などを開発している。

・省エネルギー型海水淡水化システムの実規模での性能実証事業

日立製作所と東レがNEDOの支援で実施している(2018年4月~2023年3月)。この事業は内閣府の最先端研究開発支援(FIRST)プログラムの「Mega-ton Water System」(2009~2013年度)のRO膜関連成果を発展させたもので、注目されている。

・国土交通省「下水道革新的技術実証事業(B-DASH)」

国土交通省下水道部が支援する実証プログラムである。近年の補助対象として、(1)災害時の水処理技術、(2)水処理汚泥の減量化、燃料化、農業利用、(3)ICT技術とAI技術、センサー技術を統合した水処理施設や管渠施設の制御(エネルギー高効率運転化)、診断、維持管理(4)膜利用水処理(MBR、雨天時合流改善、酸素供給、FO膜による水処理)などがある。JST-CRESTの研究開発課題「21世紀型都市水循環系の構築のための水再生技術の開発と評価」の基礎研究成果をもとに、沖縄県糸満市でかんがい用水の慢性不足問題を解決する手段として「下水処理水の再生処理システムに関する実証事業」が行われ、1日1000トンの再生水を提供する実証試験が実施されるなど社会実装を強力に支援している。

・水道技術研究センターの研究助成

A-Dreams共同研究(Aqua-Desirable, Reliable, Enhanced and Advanced Management System)(2018年~2022年)で「将来を見据えたスマートな浄水システムに関する研究」と「将来を見据えた官民協業による技術レベルの維持・向上に関する研究」が行われている。

・フューチャーデザインによる水道システムの住民意思決定

水道インフラの敷設更新は100年単位で考えるべき事業で、現在の最適化だけでなく、将来水道を使用する人々の利益も考慮する必要がある。人口減少により縮小する社会環境の中で、仮想将来世代を設定し、世代間利害対立の解消を図るフューチャーデザイン手法による住民参加型意思決定の実践的取り組みが行

われている⁴⁾。

• 米国環境保護庁（EPA）の水研究助成⁵⁾

EPAは水環境に関連したテーマを設定し、競争資金を持続的に提供している。2019年に公募を開始した研究助成として「農業地帯でのパーフルオロアルキル化合物」「毒性のある藻類の異常増殖抑制のための栄養塩負荷削減方法」がある。これらは対象となる地域を変えて、これまでもEPAが支援してきた研究テーマである。

• 欧州の水研究助成

EUのFP7（2007～2013年）、Horizon2020（2014～2020年）の重点分野の1つが水で、大型の研究支援が行われてきている。Horizon Europe（2021～2027年）でも5つのミッションエリアの1つに水が位置づけられ、引き続き大型支援が行われると予測される。

(5) 科学技術的課題

- ・ 新型コロナウイルス感染症蔓延を契機として、下水中の病原微生物濃度を測定する下水疫学について、急速に期待が高まっている。従来の検査対象や病院からの報告だけに頼らずに感染症流行把握が可能になる技術の確立が国内外で関心を集めている。
- ・ 浄水処理技術を適用する浄水場は、大都市圏以外では小規模で遠隔地にあり、維持管理のための人件費をかけられない条件のものが多い。特に日本をはじめとする人口減少社会への対応において、これらの小規模浄水場への対応は大きな課題となる。また、都市圏の浄水処理や下水処理の感染症蔓延下での事業継続に当たっても、遠隔監視や遠隔操作のニーズが高まっている。一方、農業用水の調整のため、内閣府SIPの支援などによりIoT技術を活用したスマートメーターなどの開発が進んでいる。IoT技術やAI技術を活用して、水処理装置の維持管理を遠隔操作で、自動的に行うシステムの開発と海外展開が期待される。
- ・ 世界的な水資源のひっ迫の状況を受け、海水や下水処理水を原水とする水処理技術へのニーズは引き続き高まっていく。これらの原水から飲料水を製造する技術はすでに確立されているものの、維持管理コストの削減、膜などの耐久性の改善、加圧などに必要となる電力の削減は引き続き大きな課題である。RO膜では透過性、耐薬品性、耐久性などの性能が求められる。従来のポリアミドや酢酸セルロースなどのポリマー以外の素材を用いた膜の開発などが進んでいくと予想される。
- ・ 産業的な実用化が期待される水処理に関する課題は機械工学（オゾン生成器、分析機器）や化学素材（RO膜、MBR用精密ろ過膜、各種吸着剤、凝集剤）の分野に多い。水処理膜、光触媒、特殊生物処理、UV、凝集剤、吸着剤などの日本が得意とする技術の開発を促進することで国際的な産業競争力の向上が期待される。一方、学術的に注目される課題には分子生物学に係わる課題が多い。次世代シーケンサーを用いたゲノム解析、微生物群集解析により水処理プロセスに係わる微生物学（水処理に関する微生物、病原微生物と薬剤耐性菌の拡散、挙動）の深化は水処理分野にとどまらず環境、医療、生物学分野への波及効果が期待できる。2020年の新型コロナウイルスの世界的大流行により、下水疫学が

社会的に大きな期待を集めることとなったが、学術的な蓄積があって、はじめて検討が可能となったものであり、基礎基盤の研究開発の平常時からの蓄積が重要である。

- ・近年、世界各地で地震、津波、ハリケーン、台風、豪雨、山火事などの自然災害が激甚化、頻発化し、浄水システムもこれらへの対応が迫られている。浄水場その他の浄水システムを自然災害に対して強靱化する技術開発へのニーズが高まっている。自然災害により浄水システムが壊滅的な打撃を受けた後、迅速に簡易な浄水システムを構築する対策がいくつか既に検討されている。従来の精密ろ過を用いた家庭用浄水器技術をベースにして、河川水やプール水などから飲料水を得る装置や、トラックなどに水処理装置を積載したモバイル水処理システムが開発されている。後者については、省スペースで高度な処理性能を担保できる膜処理装置をユニットとして積載する機能向上などが課題として残されている。
- ・広範囲の浄水場でのデータを集中的に管理し、データを分析しつつ、適切な維持管理を行う集中型管理システムについて、今後の適用研究が期待される。
- ・活性汚泥や急速ろ過といった伝統的な水処理プロセスにおいても、市場規模が大きいこと、新たな除去対象化合物や新たな資源としての回収対象物質が生じること、人手不足による維持管理の軽減化が求められることなどから、さらに技術改良する研究が必要である。
- ・水処理、下水処理に係るエネルギー使用量はたいへん多く、地球温暖化の緩和策として、エネルギー高効率化が大きな課題である。下水熱の有効利用や廃水からのエネルギー生産などもシステムとして含めて検討する課題となる。また、下水からのリン資源などの有効資源の高効率回収システムは循環型社会の構築への貢献だけでなく、資源ナショナリズムの高まりの影響を受けずに資源自給率を高める技術として注目される。
- ・SDGsに関連し、管路システムが十分でない国・地域などでの浄水システムの分散化のニーズを満たすためには、原水水質により選定された各種の膜ユニットを用いた装置が主力となるとみられる。中国ではRO膜を利用した浄水器が既に普及しているが、この装置の信頼性の向上、コスト削減が引き続き関心を集めるとみられる。

(6) その他の課題

国内の水道事業は地方公共団体あるいは一部事務組合（県や市町村が事務を共同処理する組織の呼称）がほぼ実施しており、地方議会などへの対応が必要である。また、水道システムはユーザーの多くは住民であって、常に正常に稼働していなければならない、システム異常などの事態は絶対に避けなければならない状況にある。従って、従来と異なる新たなシステムの導入に対して、水道事業者は常に慎重で、実績が多い、あるいは長期にわたる実証実験のデータがあるなどの条件が新技術導入の条件になる。また、水道事業者は、一部を除いて基本的には市町村であり、新技術導入のための余裕がないケースがほとんどである。これらの背景は時には浄水技術の革新をためらわせる方向に働く。技術の革新のためには、水道事業の広域化が有効である。

社会普及や地方創成の観点では、魚類の養殖水、水族館、温浴施設などニッチな水処理市場の高度化と

いった観光産業と水処理技術の連携も一考に値する。人口減少による地方の衰退に対して、下水道遊休施設を活用した魚と植物を同時に育てる循環型農業「アクアポニックス」や、下水処理水中栄養塩の有効利用を兼ねて、日照の確保できる場所で藻類を用いた有用物質生産などの技術開発の進展が期待される。

下水処理分野では国土交通省 B-DASH の支援で、実際に適用するレベルに近い技術を実装置に取り入れる実証実験など、非常にインパクトの高い応用研究・開発が行われている。一方、浄水処理分野では、国などが主体となった大型プロジェクトが十分ではなく、先進的な技術開発の実証試験などを進めていく環境としては厳しい状況である。水再利用や下水処理分野での状況を比較すると特に顕著で、浄水処理分野でも B-DASH のようなインパクトのある支援が望まれる。

海水淡水化分野では日本の膜メーカー主導による技術開発が進んでいるが、海水淡水化が適用される中東地域などの外国の事情に左右され、さらにプラント建設レベルにおいて日本の国際競争力が低下しており、システム開発面では日本は停滞している。浄水処理分野でも一部の膜メーカーは国際競争力をつけて世界的に展開しているが、浄水システムとしての展開はまだ不十分である。膜ユニットのレベルにとどまらずシステムのレベルでの国際競争力を日本の産業界がつけることで、日本の産業界の技術開発力も上がっていくと期待される。

(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"> ● 水分野の国際専門誌の掲載件数が中国と比べて少なく、英語発信力に課題がある。 ● 膜処理、紫外線処理、高度浄水処理（オゾン・活性炭処理）、新規凝集剤（高塩基度ポリ塩化アルミニウム（PAC））、膜分離活性汚泥法（MBR）、光触媒などの技術、並びに病原性微生物の処理リスク評価などで、個々に優れた研究がみられ、国際的な貢献がみられる。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 企業による技術開発は逆浸透膜、淡水化前処理用の限外ろ過膜、オゾン発生装置、MBR装置などの膜製造および機械設備産業分野では、海外からの大型受注をうけるなどの世界的な地位を維持している。 ● 下水道分野では国土交通省 B-DASH 支援により、下水道の有効利用の実証技術開発が進められている。 ● 水道分野では国立保健医療科学院において飲料水の安全、公衆衛生研究が精力的に実施されているが、欧米と比較して規模が小さい。水道技術研究センターでは、従来から産官学共同研究が推進されてきているが研究費は参加企業が支出する形態で、十分に大きい規模とは言えない。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 下水中のウイルス濃度測定など、公衆衛生学と連携した研究や、その診断検査技術の事業化などの動きがみられる。 ● 水不足地域を多くもつ背景から、海水淡水化や下水処理水再利用に関する基礎研究、とくに下水処理水利用のリスク評価研究が盛んである。 ● 水処理分野のトップジャーナルである Water Research 誌への掲載件数が多く、水処理において重要な原理や新規の汚染物質に関する知見を発信している。 ● NSF（全米科学財団）による継続的な基礎研究支援と EPA（環境保護庁）によるテーマを絞った新規汚染物質についての知見の集積支援により、国際的に注目される研究が発信されている。

2.2 俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

2.2 俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●麻薬成分物質を下水から検出する技術をもっていた研究者らがベンチャー企業を設立し、下水中の新型コロナウイルスを受託計測する事業を展開している。 ●膜分離技術、イオン交換樹脂の水処理素材、地下水利用技術、下水廃水の再生利用などの分野で、経験が多く、産業化も進んでいる。 ●慢性的水不足問題を抱えるカリフォルニア州、テキサス州、フロリダ州、アリゾナ州、ネバダ州等をはじめ関心が高く、住民との合意形成などのアプローチをとおり、社会実装が進んでいる。下水処理水の再利用について、間接および直接の飲用再利用の実用化に向けた検討が進展し、テキサス州で米国初となる下水処理水の直接飲用再利用が導入された。海水淡水化事業も盛んである。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●オランダKWR（水研究所）やスイスEAWAG（水科学技術研究所）などが高い研究レベルを保っている。両国とも塩素消毒によらない給水方式を採用していることから基礎研究のニーズが大きい事情も一因に考えられる。とくにオランダKWRは各水道事業者と強力なネットワークを構築していた強みから、下水中の新型コロナウイルス検出と相関性を見出す研究に早期かつ組織的に着手し、国際誌に掲載するなど世界をリードする研究を展開している。 ●個別の有害物質への関心が高く、マイクロプラスチックなど新規の汚染物質に関する知見を多く発信している。アナモックス反応による窒素除去など原理的に新しい水処理方法の提案能力や、薬剤耐性菌などの新しい汚染物質を見つけて発信する能力が高い。 ●モデル化やコスト推算などに関連した研究が進展している。 ●共通の大陸河川を要し利害関係を伴う国家が多い背景から、EU水枠組み指令（2000年12月発効）やEU飲料水指令（2018年2月改正）などの政策の関心が高く、環境保全、流域管理、健康リスク等の多様な側面から基礎研究が高い水準で行われ、国際的にリードしている。 ●ドイツは世界初のセラミック膜などの開発実績があり、水道分野における独自の膜ユニットの開発意欲が日本よりも旺盛で、基礎研究のポテンシャルも高い。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●オランダの定量的微生物リスク評価手法の整備と実務への導入が特筆される。オランダ北部の水道事業者PWNは2015年から膜ろ過法を浄水場に導入しており、膜ろ過に対する技術開発も盛んである。 ●水メジャー（英国テムズウォーター、仏ベオリア、スエズ）の技術開発力は高く、世界水協会（IWA）などの国際会議における発表件数も多い。水メジャーは国際展開に多くの実績があり、多様な排水や地域の状況に合わせた適切な処理プロセスの設計に強みがある。水処理プロセスの設計、更新のために有用なシミュレーションモデルが優れている。中東やアジアの発展途上国に対する水道ビジネスを広く展開しており、適用技術に関する応用研究のレベルが高い。 ●スイスは風光明媚な観光立国という背景もあり、下水に継続的に注力している。2040年までに医薬品や新興化学物質など各種の微量物質を下水から除去する処理施設を導入する更新が進められている。 ●英国の水道事業は完全に民営化されているが、独立機関のOfwatの監視下におく独自の体制をとっている。民営化による浄水技術の基礎研究や応用研究に対する影響は確認できない。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●水資源ひっ迫や深刻な水質汚染への関心から、上水分野だけでなく環境工学分野における教員・学生の陣容が急速に拡大し、研究レベルも上がっている。IWA（世界水会議）などの国際会議での発表件数や、Water Research誌やWater Science and Technology誌での論文掲載件数が飛躍的に増加している。日本の発表件数を桁で上回っている。とくに精華大学などの有力校は潤沢な予算を活用して、研究レベルが非常に上がっている。

				<ul style="list-style-type: none"> ● 様々な水処理用吸着材料、既知の汚染物質の水処理プロセスでの挙動、最新の処理プロセスの運転経験蓄積など多数の論文報告が発信されている。多くの研究が中央政府のNational Natural Science Foundation of China (NNSFC) による支援を受けている。さらに、中央政府の支援と重複して、州政府からの支援も得ている研究も多い。戦略的に外国人研究者を招聘または外国人研究者と連携して英語文献を発信している。研究論文を国際誌に投稿するための体制が、国家的に形成されている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 膜処理分野では、低コスト性の武器を維持しながら、開発・製造能力を向上させて、精密ろ過膜などの品質も上げてきている。日本のメーカーの製品はコスト的に対抗が極めて難しくなっている。RO膜の開発では、まだ日本メーカーが優位性を保持しているが、今後については技術力の差は縮まっていくと予想される。 ● 水需要が大きく、MBRなどの新技術導入が進み、下水再生利用の経験が急速に蓄積されている。 ● 水十条などの環境政策が強烈に進められ、工場や鉱山に由来する重金属汚染、石炭採掘に伴う廃水などの産業公害対策が一気に進展している。 ● 急速に実力を付けている基礎研究を水処理産業に結び付けられている事例や先見的な報告があまり確認できない。
韓国	基礎研究	○	↘	<ul style="list-style-type: none"> ● 韓国水資源公社 (K-water) が基礎研究に継続的に取り組んでいる。 ● ナノテクノロジーを用いた水処理など新規性の高い研究は実施されているが、水処理全般の論文発表数が減少している。既存技術の改良発展のための地味だが研究の裾野を広げる着実な研究は低調で、懸念される。
	応用研究・開発	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> ● 過去には韓国政府主導で水処理技術や膜処理技術の国際競争力を高める国家プロジェクトの施策が打ち出されていたが、近年は勢いがみられない。海水淡水化分野で過去に世界的な競争力を有していた斗山重工業が逆浸透膜開発で出遅れ、主力事業の石炭火力発電所と原子力発電所の低迷から経営危機に陥り、海水淡水化の新規開発にも動きがみられない。 ● 下水処理水の再生利用、畜産糞尿の処理などの研究は行われている。
豪州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 水資源が偏在し、絶対量としても水不足である国土条件を背景として、下水の再生利用や逆浸透膜、雨水利用に関する研究が盛んである。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 膜分離の技術開発研究は継続的に行われており、実装が進められている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) テレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ 水循環 (水資源・水防災) (環境・エネ分野 2.2.3)
- ・ 除去・浄化技術 (大気、土壌・地下水) (環境・エネ分野 2.2.5)
- ・ 社会システムアーキテクチャー (システム・情報分野 2.3.3)
- ・ 分離技術 (ナノテク・材料分野 2.1.5)

参考・引用文献

- 1) M. Kitajima et al., "SARS-CoV-2 in wastewater : State of the knowledge and research needs", *Science of the Total Environment* 739 (2020) : 139076, doi : 10.1016/j.scitotenv.2020.139076
- 2) P&G, 「「安全な飲み水を 世界中の子どもへ」活動」『P&G』, <https://jp.pg.com/community-impact/#supporting-communities> (2021年1月アクセス)
- 3) 信州大学独創図鑑, 「水を安全に変える、信大クリスタルが変える。」『信州大学』, <https://www.shinshu-u.ac.jp/zukan/cooperation/post-22.html> (2021年1月アクセス)
- 4) 吉岡律司 「矢巾町におけるフューチャーデザイン」『学術の動向』 23巻6号 (2018) : 10-12, doi : 10.5363/tits.23.6_10
- 5) United States Environmental Protection Agency (EPA) , "Water Research Grant", EPA, <https://www.epa.gov/research-grants/water-research-grants> (2021年1月アクセス)

2.2.5 除去・浄化技術 (大気、土壌・地下水)

(1) 研究開発領域の定義

大気、土壌・地下水の汚染物質等の把握、拡散防止と除去・浄化に関する研究開発を扱う領域である。人体や大気、土壌・地下水環境の公害を招く原因物質や、負の影響が懸念される物質等について、人為的な排出そのものを抑制する技術や排出後に除去・浄化する技術、リスク評価に基づくマネジメント等を対象とする。

大気汚染物質に関しては、人為的な排出のうち特に移動発生源を対象として、自動車エンジン排ガス後処理技術をはじめとした規制開発等を扱う。

土壌・地下水汚染物質に関して、人為活動に伴う重金属や揮発性有機化合物に加え、自然由来汚染物質も対象として、拡散防止技術やリスク持続的な浄化技術等を扱う。

(2) キーワード

自動車CASE 変革の進行、自動車排出ガス、排気後処理技術、規制開発、三元触媒、粒子捕集フィルター、リスク評価、サステナブル・レメディエーション、自然由来重金属、放射性セシウム、揮発性化学物質

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

■大気

大気汚染物質の排出源は自動車、船舶、航空機等の移動発生源と工場等の固定発生源に大別される。固定発生源対策技術は技術熟成度が高く、研究開発動向が少ない一方、移動発生源は各国で開発競争や規制開発が続けられている。特に自動車排出ガスに含まれる大気汚染物質やその前駆物質に対する排出規制の達成は、陸上生活圏の環境保全に加え、世界市場において環境技術の優位性を示すことに直結する。各自動車メーカーが高度な技術をもとに、環境性能の向上にしのぎを削っており、各国も環境保全と産業競争力の維持に注力している。

我が国では、人の健康の保護及び生活環境の保全のため望ましい基準として、窒素酸化物や浮遊粒子状物質などの有害大気汚染物質に対する大気環境基準が設定され、様々な発生源に対する排出規制の強化が段階的に施行されてきた。これらの規制が功を奏し、主に、エンジンの燃焼改善などのエンジン自体の改良と排気触媒など排気後処理の抑制対策が進められ、我が国の大気環境は著しく改善されている。しかし、オキシダントや微小粒子状物質 (PM_{2.5}) などの光化学反応の寄与が大きい物質については課題が残されている^{大気1)}。日米欧等の先進諸国を除き、世界の各都市の大気環境はまだ深刻で^{大気2)}、排出ガス低減に対する要求は高い。

■土壌・地下水

土壌汚染は地下水汚染と一体的に考える必要がある。その理由として、揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds : VOC) のように比重が水より重い物質は土壌深くの帯水層にまで浸透し、汚染が広域化してしまう問題があげられる。

現在利用されている土壌・地下水汚染処理技術は掘削除去が主体である。汚染土壌を掘削してオンサイトまたはオフサイトで浄化処理や埋め立て処分する手法であり、長期の修復期間や多額の費用負担、エネルギー消費を要する課題がある。原位置浄化処理を目指した新技術開発や環境負荷低減を目指したグリーンレ

メディアエーションの進展が期待されている。

我が国では2011年の福島第一原子力発電所事故に伴って放出された放射性セシウムによる土壌汚染対策が大規模に行われた^{土壌1)}。また、2014年以降、東京都豊洲市場で大規模な土壌浄化事業が実施され、揮発性化学物質（ベンゼン、水銀等）摂取リスクに係わる対策が行われ、社会的に高い関心を集めた。また、我が国では人間活動に由来する汚染ばかり社会的に注目を集めるが、自然由来の重金属等の把握や、リスク評価に基づく合理的マネジメント等の課題も持続的な環境、社会、経済に対して重要である。また、持続可能な開発目標（SDGs）に関連し、環境保全やリスク低減に加え、住み続けられる強靱な都市づくり、産業、社会の持続的発展の観点を一体的に捉えた土壌環境対策が近年検討されている^{土壌2)}。

[研究開発の動向]

■大気

自動車排出ガス低減技術は規制に対応して技術開発が高度化してきた（図表2.2.5-1）^{大気3)}。自動車排出ガス対策は、エンジンの改良と排気触媒や粒子除去フィルターなどの排気後処理技術との両輪により成立しているが、日米欧が主導してきた厳しい排出ガス規制に対応するには、排気後処理が必須、かつ今後とも極めて重要な技術である。

図表2.2.5-1 日米欧三極における自動車排出ガス規制開発の流れ

時期	国・地域	出来事
1940年代	米国	カリフォルニア州で炭化水素（HC）と二酸化窒素（NO ₂ ）から生成された光化学オキシダントによるスモッグ発生
1962年	米国	カリフォルニア州がHC抑制のためクランクケース・エミッション規制を制定
1963年	米国	大気浄化法が制定
1965年	米国	カリフォルニア州がエンジンからの排出ガスを対象にした規制が導入
1966年	日本	ガソリン車の一酸化炭素（CO）濃度規制
1968年	日本	大気汚染防止法の公布
1968年	米国	排気規制が開始
1970年	米国	マスキー法成立。大気汚染対策としての自動車排出ガス規制を段階的に強化
1970年	欧州	排出ガス規制が制定
1970年	日本	東京新宿区でのガソリン含有4エチル鉛による鉛中毒事件、東京杉並区の高校での光化学スモッグ等が原因と疑われた大気汚染問題が発生
1973年	日本	昭和48年排出ガス規制でガソリン車のHCと窒素酸化物（NO _x ）が追加
1974年	日本	昭和49年排出ガス規制以降、ディーゼル車の排出ガス規制が段階的に強化
1975年～	日本	昭和50年、53年規制でマスキー法水準に引き上げ。対策として、点火時期遅延や排出ガス再循環（Exhaust Gas Recirculation：EGR）、副燃焼室を採用した燃焼改善等でNO _x を低減、COとHCを酸化触媒で浄化する技術が採用。電子式燃料噴射制御装置や酸素センサーの実用化により、CO、HC、NO _x を同時に浄化する三元触媒システムが開発され、一部の車両で採用された。
1990年代	欧州	大気汚染の深刻化により、段階的に規制が強化 ^{大気4)} （米国並みの規制に強化）

1994年～	日本	短期規制（1994年）でディーゼル車のPMの排出重量規制を導入。その後もディーゼル車の規制を段階的に強化。試験モードを定常運転から過渡試験に変更。新短期規制（2003～2004年）以降、ディーゼル車にも、様々な排気後処理装置が採用。
2000年～	日本	平成12年、17年規制でガソリン車コールドスタート時のエミッション低減が強化
2009年	日本	燃費性能に優れた筒内直接噴射ガソリンエンジンで、最新のディーゼル車を超える粒子排出があったこと ^{大気5)} から、吸蔵型窒素酸化物還元触媒を装着した希薄燃焼方式の直接噴射式エンジンを有する自動車を対象に粒子に対する排出規制が導入
2020年	日本	全ての直接噴射式エンジン搭載車で粒子に対する排出規制を導入予定

ガソリン車の多くが排出ガス低減システムに三元触媒システムを採用している。自動車用触媒は、多孔質状の担持体にアルミナ (Al_2O_3)、セリア (CeO_2) などの酸化物と、白金 (Pt)、パラジウム (Pd)、ロジウム (Rh) などの貴金属を担持した物質で、現在はハニカム状のコーゼライトや金属などのモノリス基材が使われている。コールドスタートエミッションの低減には、触媒をできるだけ低温から機能させる必要があり、熱容量が少ない高密度薄壁モノリス担体、低温活性に優れた触媒などが開発されている。排ガスの酸化・還元雰囲気変動を利用し、貴金属が結晶から固溶・析出を繰り返す自己再生機能で貴金属粒子の肥大化による劣化を防ぎ、高活性を維持するインテリジェント触媒なども開発されている^{大気6)}。

ディーゼル車の排出ガス規制に対しても、多くの技術が導入されている。国内ではディーゼル車にもディーゼル用粒子捕集フィルター (Diesel Particulate Filter : DPF)、酸化触媒、NO_x 触媒などの排気後処理装置が採用されている。DPFについて、そのもの自体の改良に加え、エンジンやその制御技術の改良等により、実用化に至っている。DPFの材料として、一般に耐熱性の高いコーゼライトやシリコンカーバイド (SiC) などの多孔質セラミックスが用いられているが、高気孔率材料の開発やフィルター構造の改良などが行われてきた。DPFは目詰まり防止のため、捕集したPMを燃焼等により処理し再生する必要がある。ヒーターやバーナー等により燃焼させる方式やDPFの前段に酸化触媒を設け、排気中のNOを酸化能力の高いNO₂に変換して、それによりPMを処理する連続再生式DPFなどの様々な方式のDPFが開発されている。最近ではDPFとSCR触媒などのNO_x触媒を組み合わせたシステムが主流となっている。このような排気後処理技術の採用で、ディーゼル車からの大気汚染物質は著しく低減されてきた。同時にディーゼル燃料の開発も進み、触媒の被毒や劣化を防止するため、ディーゼル燃料中の硫黄分は10ppm以下に低減化している^{大気7)}。

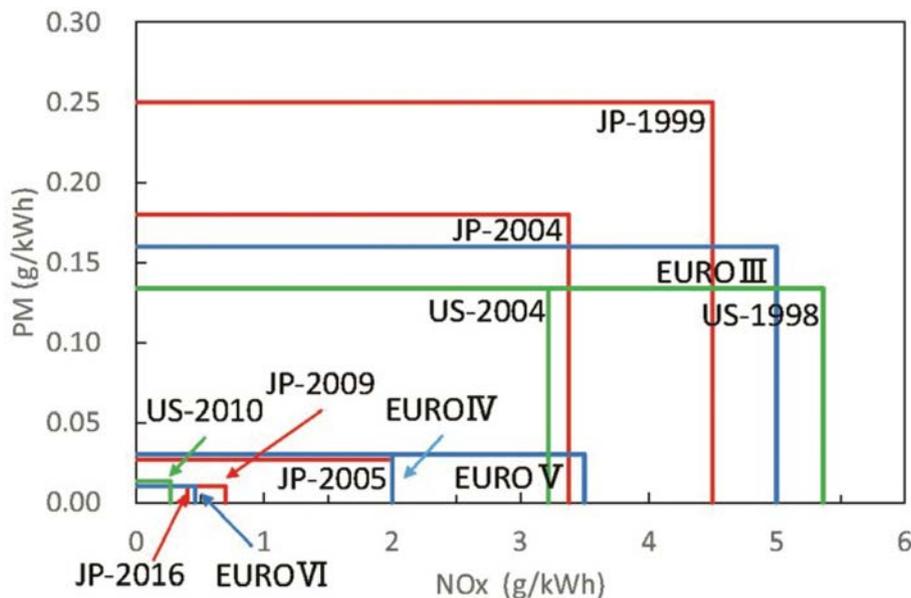
図表 2.2.5-2 に日米欧の重量ディーゼル車の規制値の比較を示す^{大気4)}。

日米欧の現在の排出ガス規制値はガソリン車、ディーゼル車とも同水準で、浄化技術は高い水準であり、汚染物質の排出量は過去と比べ著しく低減している。ディーゼル車のNO_xについては、認証時と実使用条件下との排出量の乖離が問題視され、広範囲の運転条件下における排出量の低減が求められている。世界最大の自動車市場となった中国やインドでは、欧州と同等の規制が数年遅れで採用されている。都市部の大気汚染対策として、排気後処理装置への要求は年々高まっており、貴金属等の資源の不足が懸念されている。

排気後処理装置は、最新の低排出ガス車を支える重要であり、浄化性能としては極めて高い技術水準に達している。今後の課題としては、広範囲の運転条件下における浄化性能の向上や更なる信頼性の向上、触媒等に使用する貴金属等の省資源化などがあげられる^{大気8)}。これらの研究開発を効率的に進めるため、後処理装置内における粒子堆積の挙動や反応機構を解明してモデル化するための研究が進められている^{大気8), 9)}。

2.2

環境区分と研究開発領域



図表 2.2.5-2 デーゼル重量車に対する日米欧の排出ガス規制値の比較

■ 土壌・地下水

土壌汚染は典型7公害の1つとして古くから認識されていたものの、土壌環境基準の制定や土壌汚染対策法の成立は他の公害と比べて遅かった。その後も新たな知見や汚染問題を受けて、法改正が行われている。

一般に、土壌・地下水汚染の対策コストはきわめて高額で長期間に及ぶ。そのため、環境への負荷が小さく、比較的低コストで実施できる生物学的処理や自然機能活用による修復技術であるグリーンレメディエーションが期待されている。生物学的処理を利用する修復技術はバイオレメディエーションと呼ばれ、そのうち特に植物を用いる場合にファイトレメディエーションと呼ばれている。1970年代に米国で石油の分解に微生物を利用したのが始まりで、様々な手法が検討されてきている。バイオレメディエーションはバイオスティミュレーションとバイオオーグメンテーションの2種類に大別される。前者は汚染土壌にもともと生育している微生物に水、酸素、栄養物質を供給して汚染物質の分解を促進させる処理である。後者は汚染物質の分解菌を新たに導入する処理で、時間を要するが、温和な条件のもと低コストで汚染を処理できる利点がある。

鉱山跡地や鉱廃水の対策として、自然的な環境および資材を活用したパッシブ・トリートメント（自然力活用型坑廃水処理）が研究開発されている。企業や自治体が持続可能な土壌汚染対策を行うには環境面、経済面、社会面を一体的にとらえたサステナブル・レメディエーションの考え方が重要である。効率的かつ低コストであることに加え、使用する資材の安全性や環境適用性を高め、投入するエネルギーも最小化する必要がある。操業中で資金に余裕のある段階からしっかりと土壌汚染対策を実施することが持続的な環境マネジメントの一貫と考えられる。今後は、コストと効果のバランスを重視した土壌浄化、環境施策と都市計画を両立させた合理的なサステナブル・レメディエーションの実践が求められる^{±(2), 3)}。

自然由来の重金属等による土壌環境への負荷の軽減も重要な課題である。自然由来の重金属は低濃度で広く分布していることが多い。我が国では砒素、鉛、カドミウムなどの自然土壌中での濃度が比較的高く、平均的な曝露量も欧米と比べて高い。トンネル工事に伴う土砂や岩石に含まれる重金属等の問題で時折クローズアップされているが、その適切な対策と管理が求められている。人為的な高濃度の汚染と異なり、低コストか

つ周辺環境に配慮した環境対策が求められる。土砂から重金属等の溶出を低減する技術、吸着マットなどによる重金属等の除去技術などが研究開発されている。

新規化学物質に対する土壌・地下水汚染分野での評価や対策も進められている。2011年の福島第一原子力発電所事故の発生後は、放射性物質の除染・減容化に関する様々な取り組みがなされている。内閣府・科学技術戦略推進費「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」で、放射性物質の分布状況等に関する調査研究および農地土壌等における放射性物質除去技術が開発された。「除染モデル実証事業」の支援を受け、日本原子力研究開発機構（JAEA）が除染や廃炉に関連したセシウムやストロンチウム等の放射性物質を対象に、放射性物質の挙動の把握や、放射線遮蔽技術、吸着・洗浄に関する技術開発を行った。関連して、地下水土壌汚染除去に関わる人材育成が行われている^{土壌4)}。

図表 2.2.5-3 日本における主な土壌・地下水汚染規制等の流れ

時期	出来事
1870年代後半	渡良瀬川流域の銅汚染をはじめ、鉱山廃水を原因とする農用地の汚染問題
1970年代以降	東京都江東区の鉱さい埋立跡地の六価クロム汚染など都市部の土壌汚染問題
1991年	重金属等10項目について土壌環境基準を設定
1997年	23項目を対象とした地下水の環境基準を設定
2001年	ふっ素およびほう素が土壌環境基準項目に追加
2003年	土壌汚染対策法の成立
2010年	自然由来の重金属含有土も規制対象に追加するなど土壌汚染対策法の大きな改正
2011年	福島第一原子力発電所事故に伴って放出された放射性セシウムによる土壌汚染の対策。放射性物質の除染・減容化の取り組み、研究が活性化。
2014年から2017年	東京都豊洲市場の大規模な土壌浄化事業が実施。揮発性化学物質（ベンゼン、水銀等）摂取リスクに係わる対策が社会的に高い関心を集めた
2017年	クロロエチレンや1,4-ジオキサン等の特定有害物質の追加、自然由来土壌や海上埋立地に対する調査・対策の一部が緩和などの土壌汚染対策法の大きな改正
2019年	1,4-ジクロロエチレン等の土壌環境基準の見直し

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

■大気

• 自動車の変化

自動車は100年に一度の変革期にあると言われ、「CASE」という用語を一般向け報道で目にする機会も増えている。CASEは、「Connected：繋がる車」「Autonomous：自動運転」「Shared：シェアリング（共有）」「Electric：パワートレインの電動化」の頭文字をとった、今後の自動車の姿を示すキーワードとなっている。CASE分野の研究や製品開発には、これまでの自動車産業と異なる新しい分野の研究開発資源、人材や研究設備への多額の投資が必要とされる。この背景と排出ガス対策を含む内燃機関の技術の高

度な成熟性を考慮すると、今後、研究開発への投資は削減される可能性が高い。このような状況を踏まえ、これまで各メーカーが独自に実施してきた内燃機関の基礎研究が、国の助成を受けて各メーカーの壁を越え産学共同で行われるようになってきている。技術レベルを維持するとともに、高めていくための継続的な取り組みが必要となる。

• 自動車用パワートレインの電動化と中国市場の動き

世界最大の自動車市場の中国では、深刻な大気汚染や温室効果ガスの削減対策とともに、自国の自動車産業を育成するため、国を挙げて、動力源の電動化を進めている。これは環境保全の観点に加え、世界の先端企業のエンジン技術に追いつくのが困難な背景を踏まえての中国の産業戦略と認識されている。2018年から中国新エネルギー車 (New Energy Vehicle : NEV) 規制が導入されている。これはハイブリッド車 (Hybrid EV : HEV) を除いた純バッテリー式電気自動車 (Battery EV : BEV)、プラグインハイブリッド車 (Plug-in HEV : PHEV)、燃料電池車 (Fuel Cell EV : FCEV) のみで販売数量を義務化する規制だった。しかし、財政逼迫による補助金支給額の削減等により、NEV市場がマイナス成長に転じたため、電動化一本の政策を見直し、HEVなどの低燃費車も重視する方針を示している^{大気10)}。新型コロナウイルス感染症に伴う景気後退への対策として、2020年終了予定だったNEV補助金を2022年まで延長する措置などが打ち出されている。中国政府は、2023年7月から欧州の最新規制であるユーロVI規制にあたる「国6」基準を導入する予定である^{大気11)}。四川・重慶など大気汚染対策の重点地域は「国6」基準を前倒しで適用する方針だったが、コロナ禍等による市場低迷から、適用を遅らせる動きも加わり、流動的な状況である^{大気12)}。今後、世界水準の最新規制が適用されることになれば、大量の排気後処理装置が必要になることから、関連する業界や研究開発動向にも影響を与えることが推察される。

• 内燃機関搭載車両の販売禁止の動き

欧州では中国市場への対応に加え、ディーゼル車の排出ガス対策に関する不正や地球温暖化対策への対応から、ガソリン車やディーゼル車を販売禁止にする議論が勢いづいている (図表 2.2.5-4)^{大気13), 14)}。ノルウェー、スウェーデン、オランダ、ドイツ、フランス、イギリスの議会や政治家などが2025年から2040年にかけて、ガソリン車やディーゼル車の販売禁止を検討していると報じられている。この動きに、巨大自動車市場の中国、インドを含めた世界の各国が追随している。現時点では、法規制に至っておらず、ほとんど議論段階だが、このような内燃機関排除の動きがもし現実的になれば、自動車業界にとって影響が大きい。EV等の新型車の現実的な普及予測では、2050年もHEVやPHEV、大型車の動力源として、内燃機関搭載車が残ると推察されている^{大気15), 16)}。ただし、この情勢をみて、脱エンジン宣言をする自動車会社が欧州では相次いでいる。さらに、2021年1月に米国GM社も2035年に全ての普通乗用車をゼロエミッションにする構想を公表した。EVと比較して内燃機関の技術優位性や価格競争力は高い。それらの観点では短中期に内燃機関市場は消えないが、EVのコスト低下や普及動向に加え、各国の環境政策・産業政策の不確実性は高く、注視する必要がある。

図表 2.2.5-4 内燃機関自動車の販売禁止の動き

国 (地域)	規制開始年	動力源		新車販売規模	備考
		ガソリン車・ディーゼル車	PHEV車		
米国 カリフォルニア州	2018年	規制	規制なし	約200万	カリフォルニア州ゼロエミッション車両プログラム。販売台数比率の規制を段階的に引き上げ。
コスタリカ	2021年	販売禁止	販売禁止	約4万	大統領が就任式で表明 (2018年)
ノルウェー	2025年	販売禁止	販売禁止	約10万	中道右派と中道左派が合意 (法規制化は不明)
スウェーデン	2030年	販売禁止	販売禁止	約40万	環境大臣が欧州規制を促す発言 (法規制化は不明)
オランダ	2030年	販売禁止	販売禁止	約40万	与党が提議して、議会下院を通過
ドイツ	2030年	販売禁止	販売禁止	約340万	規制案がドイツ連邦参議院を通過
イギリス	2030年	販売禁止	販売禁止	約240万	首相が2040年からガソリン車は2030年に前倒し発表 (2020年)。PHEV車は2035年。
アイルランド	2030年	販売禁止	販売禁止	約10万	首相が発言 (2018年) (法制化は不明)
中国	2040年	販売禁止	販売禁止	約2800万	工業情報化部発表、NEVクレジットによる規制。
イスラエル	2030年	販売禁止	販売禁止	約30万	エネルギー大臣が計画を発表 (2018年)
フランス	2040年	販売禁止	販売禁止	約220万	国務大臣兼環境連帯移行大臣が発表
スペイン	2040年	販売禁止	販売禁止	約340万	首相が発表 (2018年)

• 粒子個数 (Particulate Number : PN) 規制

欧州では、粒子状物質の排出重量に加えて、PN規制が2011年からディーゼル車を対象に実施されている^{大気4)}。さらに、2014年からガソリン車、LPG車 (液化石油ガス、Liquefied Petroleum Gas) に対してもPN規制が実施され、2017年からディーゼル車と同水準の規制が適用されている。

PN規制に対応するため、欧州ではガソリンエンジン用粒子捕集フィルター (Gasoline Particulate Filters : GPF) 搭載車両が販売されている。我が国でも直噴ガソリン車が普及しつつあることと国際的な基準調査の観点から、PN規制の導入が検討されている。規制が適用された場合、GPFへの要求が高まるものと推察される。さらに、欧州におけるPN規制は、当初、粒径が23nm~2.5μmの粒子を対象としていたが、粒径の下限値を10nmへと引き下げる検討がされている。

• 実路走行排ガス (Real Driving Emission : RDE) 試験への対応

従来の自動車排出ガス測定は、シャシダイナモを使った試験室での台上試験だった。しかし、実路上での排出量との大きな乖離の問題から、欧州で2017年9月からRDE試験が行われることとなった。RDE試験では、公道上で車載排ガス測定装置 (Portable Emission Measurement System : PEMS) 搭載車

両を実際に走行させて、その際の排出ガスを測定する。規制値として、NO_xとPNの上限値が設定され、順守が義務付けられる^{大気4)}。我が国でも、2022年10月からの実施が決まっている。国連欧州経済委員会の下自動車基準調和世界フォーラム (UN-ECE/WP29) で、様々な条件下における排出ガス試験の議論が続いており、触媒等の排気後処理装置はより広範囲の運転条件下における高い浄化性能を求められていくこととなる。

• 希薄燃焼ガソリンエンジンの開発

希薄燃焼がガソリンエンジンの燃費向上に有利なことは周知の事実だったが、技術的困難が実用化を阻んできた。具体的には希薄燃焼範囲が限定的である困難や、排気中に酸素を含むことから三元触媒が適用できないために排出ガス規制へ対応できない困難などがあった。しかし、国内自動車会社が広範囲の運転条件で希薄燃焼実現できる新しい燃焼方式を開発し、高い燃費性能を示すエンジンを市場に投入した。このエンジンでは、新しい燃焼方式と排出ガス再循環 (Exhaust Gas Recirculation : EGR) 等により窒素酸化物の排出を抑制し、GPF搭載のみで、最新規制をクリアしている。

• 船舶の低硫黄燃料

船舶の排出ガスは主に海洋で排出されることから、人間の生活圏広域で大気環境悪化に直結する自動車と比べると影響は緩やかである。一方で主要港湾を有する国や都市などでは関心が高く、自動車に遅れて徐々に規制が強化されてきている。船舶の国際的な排気規制は船舶による汚染防止のためのマルポール条約で定められ、沿岸を要する国家でも独自規制が設けられている。マルポール条約は世界174か国が加盟する世界海事機関が監督しているが、署名国は先進国を中心に89か国である。個別の規制を定める付属書の批准国数は異なっている。2020年1月に全ての海洋でSO_x排出規制を3.5%から0.5%に引き下げる改正が行われた^{大気17)}。技術的には既に完成しており、排気浄化処理装置 (SO_xスクラバー) を搭載した船舶等の普及が進むものと期待される。

• 航空機の新燃料開発

航空機の排出ガスは主に高度10km程度の上空で排出されることから、船舶同様に、自動車と比べて影響は緩やかで、自動車より遅れて規制の強化が議論されてきている。自動車以上に厳しい安全性基準や騒音規制に技術開発が集中し、ジェット燃料は船舶用の重油と異なりSO_x含有率が少ないことも背景にある。一方、1970年頃から飛行場周辺の大気汚染がみられ、1980年代にNO_xやHC、COの規制が国連傘下のICAO (International Civil Aviation Organization、国際民間航空機関) で制定された。2010年以降、欧州を中心に温室効果ガスの排出への関心が高まり、CO₂の規制が議論されてきた。COVID-19が拡大する前の議論においては、2027年以降に排出権取引を原則導入する方針や、2020年以降には毎年2%ずつCO₂削減の義務努力が同意されている^{大気18)}。COVID-19を受けた逆風下においても、各国、各航空会社における自主努力は進められている。我が国においては、石油代替の持続可能航空燃料 (Sustainable aviation fuel : SAF) の開発、導入などの努力が続けられている^{大気19)}、²⁰⁾。

■ 土壌・地下水

• 原位置浄化技術の新規開発

化学的処理による原位置浄化技術として、フェントン法や鉄粉を用いた還元処理法、薬剤による吸着処

理、透過性浄化壁を用いる手法などがある。これらは土壌・地下水汚染、および土壌から溶出した重金属、VOC、鉱物油に適用されている。マグネシウム化合物を用いた砒素やセレンの化学形態の変換や吸着処理、プラズマを用いたVOCの分解処理などが新規に技術開発され、実用化されている。

物理的処理による原位置浄化技術として、土壌洗浄やスパージングにより重金属やVOCの浄化・修復が行われている。土壌洗浄では、土壌粒径により汚染物質の存在割合が大きく異なることから、分級処理と選別処理のプロセスが重要となる。スパージングは主に地下水汚染に適用されている。空気や蒸気、さらに反応性のガスなどを利用した種々のスパージング技術が開発され、土壌汚染現場でも実践されている。マイクロバブルの長期にわたる機能性や選択性を生かした効率的な洗浄やスパージング技術も研究開発されている。

• グリーンレメディエーションの実践

バイオレメディエーションには環境への負荷が小さく、比較的低コストであることなど様々な有効性がある。一方、汚染物質の分解菌を新たに汚染土壌に導入するバイオオーグメンテーションには社会受容性の確保が必要となり、遺伝子組換え改良菌を利用する場合には一定の規制がかかる。我が国では、環境省と経済産業省の共管として、バイオレメディエーション指針が運用されている。バイオオーグメンテーションで、自然環境から分離した特定の微生物を選択して培養されたものを意図的に導入する際には、環境省と経済産業省の双方が審査することで微生物を安全に活用可能な状況となっている。主に、ガソリン等の燃料油やその成分であるベンゼン、トルエン、その他の石油系炭化水素、トリクロロエチレン等の炭化水素系溶剤などの浄化に実用化されている。ダイオキシンや塩素系の残留農薬などへの応用研究も行われている^{±壤5)}。

• 科学的自然減衰 (Monitored Natural Attenuation : MNA)

薬剤を使用せずに、低エネルギー消費で、鉱物や微生物などの環境が有する自然力を活用した持続可能な対策の1つとして、科学的自然減衰 (Monitored Natural Attenuation : MNA) の国内外の鉱山跡地への適用が期待されている。MNAはモニタリングしながら自然力による浄化の進行を科学的に判断するプロトコルで、鉱物油などの汚染サイトで適用され始めている。欧米では数多くの実証事例が報告され、我が国でも山形県、熊本県などでのVOC汚染のモニタリングと科学的な検証結果が報告されている。微生物分解が活発な状況や移流・拡散により汚染物質が急速に減衰するような環境では、MNAの導入を促進するための社会システムやガイドラインの整備が必要である。

• リスク評価に基づく合理的マネジメント

土壌・地下水汚染対策では、健康リスクに応じた合理的なリスクマネジメントが求められる。土壌汚染による健康リスクを科学的に評価するためのモデル開発が行われている。例えば、(社)土壌環境センターのサイト環境リスク評価モデル (SERAM) や、産業技術総合研究所の地圏環境リスク評価システム (GERAS) がある。また、重金属類の含有量や溶出量、形態などの情報を地理情報システム (GIS) 上で統合化し活用するための環境情報システムである地圏環境インフォマティクスシステム (GENIUS) が東北大学、産業技術総合研究所、DOWAホールディングス (株) により開発されている。

リスク評価モデルの活用事例として、汚染地から離れたオフサイトでの土壌汚染のリスクマネジメント、汚染物質の地下水に沿った移動距離の推定、さらには各種の浄化技術の有効性や残存リスクの将来的な予測など、多岐にわたっている。最近では、建設発生土のリスク評価や土地利用用途に応じた浄化目標の設

定などの環境政策にも活用されている。法制度にリスク評価の枠組みが導入できれば、リスク低減とコスト軽減を同時に追及する合理的なサステナブル・レメディエーション達成への基礎となりうる。

●揮発する化学物質に対する土壤汚染対策

東京都豊洲市場土壌・地下水汚染調査において、ベンゼンや水銀等の揮発による地上施設での摂取リスクに関する検討が行われた。従来の土壌汚染対策では、揮発性物質は対象ではなかったため、地下からの揮発フラックスおよび健康リスクを科学的に明らかにすることが求められた。最近では、揮発性物質の揮発フラックスの観測および予測に関する研究開発が実施され、地上施設における漏洩防止のための遮蔽構造や建物内の換気設備などが技術的に検討されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■大気

排気後処理装置では、更なる浄化性能の向上や貴金属の低減などが課題である。従来の技術開発は主に企業が単独実施してきたが、近年、学術的な基礎研究の成果をもとに実用的なソフトウェアを開発する産学連携研究が日本でもやっと始まり、触媒やDPF内での挙動解明やそれらを元にしたシミュレーションモデルの開発を実施している。このような産学連携で業界共通の基礎研究を行う研究組織は、ドイツが数十年前に先駆けてきた歴史がある。

●ドイツ内燃機関研究協会 (Die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen : FVV)

ドイツの内燃機関に関する産学連携研究コンソーシアム。広範囲にわたる業界共通の基礎研究等を実施している。170以上の団体が参加しており、基礎研究に加えて、専門的な人材の育成についても重点を置いている。ドイツではこのような研究組織で得られた成果や育成された人材を応用研究や製品開発に繋げる道筋が確立されている。

●自動車用内燃機関技術研究組合 (AICE)

ドイツFVVなどの研究組織を参考に組織された研究組合。自動車関連9企業2団体が加盟し、自動車用内燃機関の燃焼技術や排気後処理技術の高度化などを研究している。内閣府SIP「革新的燃焼技術」(2014～2018年)の熱効率50%以上のガソリンエンジン、ディーゼルエンジンなどの研究成果を活用した産学連携研究も推進している。

●米国U.S.DRIVE (United States Driving Research and Innovation for Vehicle efficiency and Energy Sustainability) パートナーシップ

米国エネルギー省が主導する次世代軽量自動車の研究開発を支援するパートナーシップ。米国の自動車会社やエネルギー関係企業が参画している。電動化、水素燃料などに加え、内燃機関の効率向上や排気浄化技術の性能向上なども研究目標に含めている。2020年の計画では、2025年を目標年としたバッテリーや燃料電池のコスト低減、内燃機関の効率向上によるハイブリッド車を含む効率向上などが開発目標として示されている。

■土壌・地下水

• 環境省 低コスト・低負荷型土壌汚染調査対策技術検討調査

地下水・土壌汚染の研究開発支援について、簡易で低コスト・低負荷型の土壌汚染調査手法や対策技術を実用化して普及させるため、様々な処理技術を開発・利用してきている。環境関連企業やゼネコン、各種製造業が参入し、汚染土壌の浄化・修復を実施している。

• サステナブル・レメディエーション・コンソーシアム

2016年に産業技術総合研究所で設立され、持続可能な土壌汚染対策に取り組んでいる。

• 福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的新技术開発と人材育成プログラム

文部科学省 国家課題対応型研究開発事業「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」の支援で2015年度から2019年度まで実施された。土壌・地下水汚染に関わる内容として、①地下水および地下の広域環境評価・将来予測技術、②放射線遮蔽特性を有する土質材料開発とデブリ取り出し補助技術、③構内除染廃棄物・解体廃棄物の処分、デコミッショニング技術の開発推進とともに、人材育成が行われた^{土壌4)}。

(5) 科学技術的課題

■大気

• 触媒の貴金属等の使用量削減

従来からの課題であるが、新興国における著しい自動車の普及により、これまで自動車触媒に使用されてきた主要な貴金属の資源が不足すると言われており、その使用量の削減や代替金属の開発が望まれている。特に、最大の市場である中国の動向を注視する必要がある。中国は車両の電動化を強く推進してきたが、補助金支給額の削減等から電気自動車の販売が伸び悩み、HEV等の低燃費車にも関心を示している。加えて、欧州のユーロVI規制と同等レベルの排出ガス規制を今後導入する予定である。

• ディーゼル車用NOx触媒の性能向上

国内では道路沿道大気のNOx濃度は、年々、低下傾向にある。しかし、一般環境大気に比べて道路沿道大気のNOx濃度は高い。特にディーゼル車の寄与が大きいため、ディーゼル車用NOx触媒の浄化率向上が求められている。

さらにRDE規制への対応には、より広範囲の運転条件下で高い浄化性能の維持が要求される。そのため、浄化性能に加えて、低温活性、暖機性能の向上などが求められる。ディーゼル車用NOx触媒は、大型車を中心に、尿素水を用いたアンモニアによるNOx選択還元触媒（Selective Catalytic Reduction：SCR）が主流である。一方、中小型車については、アンモニアを使用しないNOx触媒の研究開発についての今後の発展が期待される。

• 粒子フィルターの性能向上

粒子フィルターについては、ディーゼル車（DPF）に加えて、直噴ガソリン車（GPF）への対応も必要とされてきた。気孔率の最適化や連続再生能力の向上による圧力損失の低減や信頼性の更なる向上が求め

られている。GPFについては、粒子フィルターに三元触媒機能を持たせたもの等が開発されており、今後の発展が期待される。

• 再始動時における浄化性能向上

燃費向上を目的にアイドリングストップ機能搭載車やHEV、PHEVの普及が進んでいる。これらの車両は信号待ちなどの間にエンジンが停止する。この期間に触媒に空気が流れ込んで、触媒の貴金属が酸化状態になり、再始動後の排出ガスの浄化性能が低下し、特に、NOx排出量の増加を招くことがある。最近では、触媒材料の改良により、触媒内における蒸気改質反応を促進させ、水素量を増やすことで、再始動時のNOx排出を抑制する手法が開発されている。RDE規制にも有効とみられ、注目される。

• 後処理装置内の挙動解明とモデル化

排気後処理装置の性能はかなり高い水準にある。さらに性能を効率的に向上させるには、後処理装置内で起きている様々な物理・化学的な現象を解明してモデルを作成し、それらを組み込んだシミュレーションソフトの開発が必要とされている。既に産学連携研究プロジェクトで取り組みが進行しているが、今後の進展が期待される。

• 排気後処理システム全体の改良

現在のディーゼル車の排気後処理システムは酸化触媒、連続再生式粒子フィルター、尿素SCR触媒、アンモニア除去触媒などの複数の処理装置を直列に繋いだ複雑なシステムで、それらを搭載するために大きなスペースを割り当てている。各処理装置の機能の複合化や性能向上により、コンパクトで低コストのシステムの開発が期待されている。

ガソリン車も、温室効果ガス削減対策のためにHEVやPHEVなどの複雑なパワートレイン制御システム搭載車両が増加していくと予測される。やはりガソリン車でも排気後処理を含めた車両全体でのシステムの最適化が必要とされる。

■ 土壌・地下水

• バイオ（ファイト）レメディエーションの高度化

浄化効果の持続性や未完全な浄化といった技術的な課題が未だ多い。地質や環境の諸条件の制約が特に大きく、対象とする物質や汚染サイトごとに現象が異なるなどの問題がある。微生物の改変や耐性を中心とした基礎生物学や遺伝子情報の研究と、地質環境における微生物の生態や挙動に関する研究は別々に発展してきた。これらを融合して現場の条件に適合した効率的な技術を創出する必要がある。近年、汚染サイトで採取した微生物を汚染物質に適合させ、さらに現場の環境条件に応じた微生物群の改変を可能にする研究開発が進んでいる。

• 浄化・修復対策技術

- 複雑な汚染現場の状況

汚染物質の溶出メカニズムには多様な要因が影響しており、実環境下での汚染物質の長期的挙動を高精度で予測することが難しい。土壌汚染の現場では、土質や地質の違い、土地の形態や利用条件などが様々であり、汚染サイトごとの個別対応が必要である。建設工事（土木分野）や地盤調査（地質分野）との連

携による対策の効率化、建物直下における汚染の調査対策として適用可能な水平ボーリング技術が課題である。

- 複雑な汚染現場の状況と多様なエンジニアリング条件

土壌汚染技術には効率性、コスト、土地の特徴や広さ、土地利用形態、社会的側面などの多様な制約条件がある。個々の技術で適用可能性が異なり、それらの関連性を総合的に評価できる仕組みも存在しない。エンジニアリングマニュアルの整備が望まれる。

• 調査・分析技術

- 安価で正確な公定法分析

土壌汚染の規制対象物質は30種類もあり、分析コストは膨大である。効率的かつ低コストで実施できる一斉分析による公定法の手法や分析プロトコルの開発が課題である。

- 現場で簡易に測定可能なオンサイト技術

公定法分析以外でも現場で簡易に汚染物質の判定や濃度レベルの検査ができれば、実作業上のメリットが大きい。その実現には、VOCや重金属等を対象とした現場型オンサイト測定・検査技術の開発が課題となる。

- 溶出試験を代替する試験法（カラム試験など）

重金属等の溶出試験法には再現性、ばらつきをはじめとした多くの技術的な課題がある。これを代替、補完可能な公的試験法としてISO準拠のカラム試験法の開発が求められる。

• リスク評価技術

- リスク評価手法の社会実装

土壌汚染対策は、リスクベースの合理的なリスクマネジメントが国際的に主流だが、我が国では技術的に成熟していない理由から導入されていない。そのため、リスク評価に基づく合理的な対策の実現可能性を高め、広める必要がある。

- モデリング技術の高度化

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

- リスクコミュニケーションの円滑化

土壌汚染に代表されるストック型の環境汚染問題を円滑に解決するための社会的な取り組みとして、レギュラトリ・サイエンスを基礎とした文理融合型の研究開発が必要である。ストック型環境汚染問題に対する学際的解決手法の構築と社会実装が課題である。

• 新規化学物質に対する土壌汚染対策技術

近年、1,4-ジオキサンや塩化ビニルモノマーなど新規化学物質の土壌・地下水汚染の評価や対策が進展している。それらの分配特性や環境中の挙動にも不明な点が多く、環境動態を考慮した簡易調査法の開発やシミュレーション技術の確立が求められる。新規化学物質による汚染は、産業活動に起因した人為由来によるもののほか、自然界の反応プロセスで副生成物として生じるものもあり、そのメカニズムの解明も重要な研究課題である。

• グリーナー・クリーンアップ (greener cleanup) の社会実装

グリーナー・クリーンアップは米国環境保護庁で実践されているスーパーファンド法に基づく実行計画である。土壌汚染対策を他事業と連携で実施し、環境負荷を最小限に抑えて汚染対策する取り組みを提唱している。土壌環境に限定せず、広く地球環境問題を見据えた将来的な枠組みで、大気、水質、地球環境（温暖化ガス）を一体的にみた環境保全を目標にしている。エネルギーの最小化、コストの軽減を図る技術体系である。汚染対策の資材を最小化し、廃棄物の循環を促進するため、公共事業や建設工事などと連携して総合的な設計を実現し、長期間にわたり生態系を配慮したトータルな環境改善を実践できる。

• 地圏環境情報の整備

- 地球化学図、土壌環境基本図の整備

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

- リスク情報の公開と情報伝達

地球化学情報やリスク情報などを市民が正しく理解するための仕組みが存在しない。そのため土壌汚染リスク情報の整備とコミュニケーションツールの開発が課題となる。

(6) その他の課題

■ 大気

• 途上国における都市の大気環境問題

自動車排出ガス規制が厳しい日米欧の都市部の大気環境は継続的改善傾向にあり、WHOや各国の環境基準を満足しつつある。一方、世界の多くの都市の大気環境は、いまだに極めて厳しい。原因の多くが自動車や発電所、工場、事業所等での燃料の燃焼に起因している。2000年上半期、新型コロナウイルス感染症拡大防止のため世界各国、各都市で次々とロックダウン、外出自粛要請等の措置が取られ、工場稼働停止や自動車走行数減少などの経済活動の縮退が人為的に行われた。その間、中国やインドで濁った大気が透明化したことが報道され話題となった。これに伴い、一時的にNO_x濃度、SO_x濃度も低下したものとみられるが、経済活動再開に伴い、すぐに透明度の低い汚染大気環境に戻ったとみられている。

固定発生源自動車排出ガスの低減には、排気後処理の付いた車両への代替が効果的だが、燃料の低硫黄化が未達で、低排出ガスの車両が導入できない状況にある。経済的事情から新型車に更新されず、古い車両が長期間使用されることも一因である。使用過程車に対する排出ガス対策は、触媒やDPFなどの後付け可能な処理装置が効果的だが、一般的な排気後処理装置は、低硫黄燃料を前提に開発されており、大気汚染が深刻な途上国での適用が困難な状況にある。途上国における排出ガス低減対策は、ビジネスとして成立し難い側面もあるが、燃料事情の悪い条件下で使用可能な排気後処理装置の開発が望まれる。

• 船舶への規制強化

船舶の排出ガスはマルポール条約の付属書VIで規制されている。批准国の海洋でSO_xを0.5%以下とする規制強化が2020年に行われたが、特定排出規制海域（北欧のバルト海、北海、北米大陸のカリブ海と米国西海岸、東海岸）では2015年から0.1%以下とされ、以前より航行時の燃料切り替えがなされている。

- 航空機需要のCOVID-19による不確実性

中国をはじめとする世界的な経済発展により民間航空機需要は顕著に増加してきたが、2020年に本格化したCOVID-19による航空機需要の低下は、2003年のSARSの影響を遥かに上回っている^{大気21)}。国際線の運航本数の回復には向こう数年を要するとみられ、世界の主要航空会社、航空機会社の経営への打撃は深刻である。逆風下で、関連した研究開発の余力は低下せざるを得ない。持続可能な技術への開発投資などの不確実性が高まっている。

■ 土壌・地下水

- 法制度と技術開発のギャップ

我が国の環境法は分野別に制定され、土壌環境と他の環境（大気、水質、地球環境など）を一体的にとらえていない課題がある。土壌汚染対策法での特段の問題は、国際的に主流であるリスクベースの対応をとっていないこと、溶出量と含有量の両者を採用していることなどが具体的にあげられる。これらは我が国独自の考え方であるため、国内外で開発した新規の対策技術を導入する際に、技術と法制度のギャップが課題となる場合が多い。バイオ（ファイト）レメディエーションのように、合理的で高度な技術であっても法制度に合わないために導入が困難な技術や手法が少なくない。我が国では、鉱物油（ガソリン、軽油、重油など）の規制は行われていないが、トルエンやキシレンといった健康影響が懸念される化学物質が多く含まれ、消費量も多いことから鉱物油の土壌汚染に関わる法整備が期待される。

- 地域特性と人材育成

我が国は、地質が複雑で鉱山活動が盛んだった地域が多く、地域により重金属のバックグラウンド値の差異が大きい。このような地域特性は、居住する住民活動や農業活動、生態系を保全するための基盤で、土壌汚染対策への反映が重要である。土壌汚染対策法は新しい法体系のため、社会システムの整備や人材育成が追いついていない。土壌汚染の専門知識を有する人材が極めて少なく、調査・評価、対策技術の現場適用の進捗が遅れている。

- アジア諸国との国際的共同事業

アジア諸国において土壌汚染対策に関する環境規制法の制定が進んでいる。予防措置を中心とした科学的なリスク管理の枠組みも提案されており、アジア諸国と連携して土壌汚染対策を共同で実践していくことは、国家や企業の環境対策のみならず、国際的なセキュリティの観点からも重要である。

(7) 国際比較

■大気

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"> ●自動車の排気後処理技術に関する基礎研究が大学、国立研究機関、自動車会社や触媒メーカー等で実施され、世界をリードする研究成果を生み出している。大学や国立研究機関と企業との共同研究では、大型放射光施設SPring-8を利用した研究等により、貴金属が自己再生するインテリジェント触媒や貴金属に代わる鉄触媒の開発などの成果を挙げている。産業界が必要とする共通の基盤研究を産学官が連携して実施する研究組織が設立され、自動車の排気浄化技術について触媒やDPF内での挙動解明等の基礎研究が実施されている。これらの成果をもとにした研究開発ツールとしてのモデル化の研究等が進められ、今後の発展が期待できる。 ●企業における内燃機関や排ガス浄化に関する基礎研究への投資が削減する傾向にあり、産学官が連携して継続的に研究を行える体制の整備が望まれる。また、世界の自動車技術者、研究者が参加する米国SAE (Society of Automotive Engineers) 等の国際的な学会での報告が、過去に比べて減少しており、懸念される。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●ガソリン車用の三元触媒を始め、ディーゼル車用のDPFやNOx還元触媒など、広範囲の分野で高い技術開発能力を保有している。特に、触媒担体やDPFなどのセラミック製品の分野では、市場シェアも大きく、世界をリードしている。 ●米国SAEにおいて、これまで自動車会社や触媒メーカー等から、多くの研究報告がなされてきたが、近年報告数が減少しており、懸念される。 ●ディーゼル車分野は、欧州と比べて産官学の連携研究の遅れなどがあったが、最近では、AICEなどの研究組織が立ち上がり、欧州と同様な開発環境になりつつある。 ●自動車の排出ガス対策には、後処理装置の性能だけでなく、後処理装置を有効に作動させるためのエンジン側の制御技術などの総合的な技術力が要求されるが、この分野についても高い技術力を有している。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●自動車排出ガス規制をリードしてきており、広範囲に渡って、高度な研究が実施されている。基礎研究は、我が国と同様、大学、国立研究機関、自動車会社や触媒メーカー、担体メーカー等で実施されている。大学等には、世界から若手の研究者が集まり、政府や企業の支援を受けて研究に取り組んでいる。 ●内燃機関から電気自動車への移行が進みつつある世界的な情勢を反映して、基礎研究においても、内燃機関に関連する研究の割合が縮小し、バッテリー、燃料電池、水素燃料などの研究の割合が増えつつある。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●自動車産業の中心地として世界を牽引してきた歴史から、各国の自動車会社や部品メーカー等が開発拠点や生産拠点を有しているため、研究開発水準は高い。特に、日欧に比べて、厳しい排出ガス規制の試験法が適用されており、技術開発に対する要求も高いことが、技術レベルを押し上げてきた要因と考えられる。 ●米国SAEでの報告も多い。近年、大型ディーゼルの排気浄化に関する報告が多い。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●欧州は、他に先駆けて、研究コンソーシアムを組織し、企業における競争領域以外の基礎研究を産学連携で実施してきた。対象はエンジンだけでなく、排気触媒などの後処理分野も含め広範囲に及んでいる。BASF (独)、ジョンソン・マッセイ (英)、ユミコア (ベルギー) など、世界の自動車触媒のリーダー的企業の拠点もあり、自動車用触媒の材料や後処理装置内の挙動解明などの広範囲にわたって、高い研究能力を有している。

2.2 俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

				<ul style="list-style-type: none"> ●米国SAE等の国際学会での報告も欧州各国から広く行われている。 ●ディーゼル車エンジン排ガス制御用ソフトウェアの不正発覚のショックや温室効果ガス排出削減のためディーゼル車離れが顕著に進んでおり、二次電池などの電気自動車や水素などの燃料電池に関連する基礎研究の振興を図っている。ドイツやフランスでの各国水素戦略に続き、EU水素戦略のビジョンが打ち出され、燃料自動車の基礎研究への誘因を大きく打ち出している。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●自動車用触媒の世界的リーダー企業に加え、世界の自動車会社からエンジンシステム開発業務を受託しているAVL（オーストリア）、FEV（独）、リカルド（英）などの著名なエンジニアリング会社が存在し、高い技術開発能力がある。米国SAEへの論文発表も多い。 ●最近、VWは、SCR触媒を2段にし、広範囲の温度条件で高い浄化性能を有するシステムを開発している。 ●ディーゼル車エンジンの排ガス制御用ソフトウェアの不正発覚から、ディーゼル離れが明確に進んでおり、パワートレインの電動化を進めている。 ●粒子個数の排出規制やRDE規制など、世界に先駆けて、新しい規制を導入しており、一歩、先んじている。
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●環境触媒等において、優秀な人材も多く精力的に基礎研究をしていると言われており、自動車の排気浄化分野で近年、米国SAEに大学等からの報告も見られるが、欧米に比べて件数は少ない。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●世界一の乗用車市場となった背景から、世界の主要な自動車会社や排出ガスの後処理装置を含めた部品会社等が、現地企業との合併等により、生産開発拠点を設けている。 ●中国政府は、エンジン車から電動車等の新エネルギー車への転換を強力に推し進めてきたが、補助金の縮小などにより勢いに陰りがみられる。欧州の最新規制と同等の排出ガス規制の導入が検討されており、今後の動向について注視する必要がある。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●生産台数世界5位の自動車メーカーを有し、高品質の自動車が生産されているものの、自動車排気浄化に関する基礎研究について、米国SAE等の学会への報告数が日米欧に比べて少ない。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●厳しい排出ガス規制の欧米市場に、多くの車両を輸出しており、排ガス浄化技術は、世界のトップクラスにある。触媒等の後処理装置について、世界の主要な触媒メーカー企業やその提携企業等と開発、生産しており技術水準は高いと推察されるが、国際会議等での報告数が少ない。
インド	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●近年、米国SAEに大学等からの報告が増加している。注目すべき研究は少ないが、研究水準が年々向上していくトレンドにあると思われる。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●乗用車市場として中米日に次ぐ規模となっている。海外企業や海外との合併企業が多いが、技術水準が年々向上していくトレンドにのっていると推察される。 ●特に乗用車の排出ガス規制では、2020年4月から欧州ユーロVに相当する、バーラトステージ6と呼ばれる規制を導入した。ユーロIII相当だったバーラトステージ4を2017年に導入したばかりだったが、深刻な大気汚染などを背景に、一足飛びに規制を強化している。景気動向により自動車市場の不確実性はあるものの、排出ガス低減技術に対する要求は高止まりしており、規制対応に向けて技術水準も高まっていくものと思われる。 ●米国SAE等にも関連する研究についての報告が増加している。

2.2 俯瞰区分と研究開発領域

■土壌・地下水

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"> ●福島第一原子力発電所事故以降、放射性セシウムの吸・脱着やモニタリングなどに関する放射性物質に関する基礎研究が加速された。 ●しかし、重金属類や揮発性有機化合物などの土壌・地下水汚染研究領域において非常に重要な基礎研究に対して、依然として予算の減少が続いている。国際的なイニシアティブを確保するためには、加速が必要である。また、揮発性化学物質の摂取リスクに関する研究の充実が急務である。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●福島第一原子力発電所事故以降、放射性物質による汚染の浄化や汚染水のモニタリング技術および処理技術などの応用研究・開発が加速され、復興支援に貢献した。 ●一方、自然由来の重金属類や揮発性有機化合物による土壌汚染に係る低コスト・低環境負荷の技術開発は予算と提案数の減少に伴って減速傾向であり、加速する必要がある。 ●鉱山や工業跡地を中心に、持続可能な政策を目指したサステナブル・レメディエーションの研究開発が盛んに進められている。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●米国国立科学財団 (NSF) や米国環境保護庁 (US EPA) などが継続的に土壌汚染に係る基礎研究を支援し、推進している。環境中の微生物や植物などを利用した浄化技術やリスク管理に基づく融合研究が進められている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●米国 EPA や米国エネルギー省 (DOE) などが管理する実汚染サイトで、開発技術の検証や実証試験ができる。応用研究の実施環境としては非常に恵まれている。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●英国が環境の側面、社会的側面、経済的側面を統合的に考慮したサステナブル・レメディエーションの研究開発を継続的に支援している。 ●欧州 AquaConSoil が隔年で開催され、土壌・地下水汚染問題に加え、水資源管理、底質環境などとの一体的な観点で持続可能な利用と管理について最先端の検討がなされている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●欧州各国で土壌・地下水に関する関心が非常に高く、国際的な科学技術や規制をリードし、他地域に対する優位性を一段と高めている。 ●英国を中心に提案されたサステナブル・レメディエーションに関する国際標準規格 (ISO 18504:2017) が議論されている。 ●ドイツを中心に、ポリ塩化ビニフェル (PCB) や多環芳香族炭化水素 (PAH)、ダイオキシンなどの汚染物質に係る国際標準規格の提案や議論が行われている。
中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●環境に対する関心が高まりから、環境への投資も年々増加している。特に改正環境保護法の施行 (2015年1月) や土壌污染防治法の施行 (2019年1月) に伴い、土壌・地下水汚染に係る基礎研究の予算が増大し、中国科学院傘下の研究所や各地の大学で認定された「国家重点実験室」研究が盛んに進められている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●中国は土地が100%国有であるため、現場または原位置実証研究を行いやすい利点がある。 ●中国国内で開発技術した技術のほか、欧米などで開発された技術の検証やクロスチェックが複数の大型プロジェクトで行われている。 ●土十条と呼ばれる土壌汚染防止行動計画 (2016年5月) や土壌污染防治法の試行 (2019年1月) に伴い、浄化技術やリスク低減措置、サステナブル・レメディエーション等の応用研究・開発が飛躍的に進展している。

2.2 俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

韓国	基礎研究	○	→	●韓国国内において、特に目立った動きはない。 ●留学生や研究者の海外派遣は目立つようになってきている。
	応用研究・開発	△	→	●海外技術の導入や外国との連携により、今後応用研究が加速される可能性が極めて高い。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・火力発電（環境・エネ分野 2.1.2）
- ・化学エネルギー利用（環境・エネ分野 2.1.12）
- ・反応性熱流体（環境・エネ分野 2.1.15）
- ・気候変動観測（環境・エネ分野 2.2.1）
- ・水利用・水処理（環境・エネ分野 2.2.4）
- ・分離技術（ナノテク・材料分野 2.1.5）

参考・引用文献

■大気

- 大気 1) 環境省, 「大気汚染状況」『環境省』, <https://www.env.go.jp/air/osen/index.html> (2020年9月アクセス)
- 大気 2) World Health Organization (WHO), *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease* (Geneva, Switzerland: WHO, 2016), <https://www.who.int/phe/publications/air-pollution-global-assessment/en/>
- 大気 3) トヨタ自動車75年史, 「文章で読む75年の歩み第2部第2章第3節「排出ガス規制への対応」」『トヨタ自動車75年史』
- 大気 4) Diesel Net, “Emission Standards”, Diesel Net, <https://www.dieselnet.com/standards/> (2020年10月アクセス)
- 大気 5) 小林伸治 他, 「直噴ガソリン乗用車の粒子状物質排出特性」『自動車技術会論文集』43巻5号 (2012): 1009-1014, doi: 10.11351/jsaeronbun.43.1009
- 大気 6) 田中裕久, 「自動車触媒のプロジェクトXX」『自動車技術』59巻1号 (2005): 42-47
- 大気 7) 石油連盟, 「サルファーフリーについて」『石油連盟』, http://www.paj.gr.jp/eco/sulphur_free/ (2020年10月アクセス)

- 大気 8) 植西徹 他, 「Diesel Particulate Filterの内部輸送現象の研究 (第2報) - Soot cake 層に及ぼす堆積条件の影響のモデル化」『自動車技術会論文集』46巻4号 (2015): 725-730
- 大気 9) 岡耕平 他, 「SCRモデルの高温領域でのNOx浄化性能予測精度向上の試み (第2報)」『自動車技術会論文集』48巻2号 (2017): 291-297
- 大気10) 多部田俊輔, 「中国、環境車優遇にHVも 日本勢に追い風」『日本経済新聞』(2020年6月23日), <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO6063814050A620C2FFE000/>
- 大気11) 株式会社エヌ・エヌ・エー アジア経済ニュース「排ガス基準「国6」、23年までに2段階導入」『株式会社エヌ・エヌ・エー』, <https://www.nna.jp/news/show/1551928> (2020年10月アクセス)
- 大気12) JETROビジネス短信, 「国家発展改革委員会など11部門が連名で自動車消費拡大策を発表」『JETRO』, <https://www.jetro.go.jp/biznews/2020/05/5a2df065b298cfc1.html> (2020年10月アクセス)
- 大気13) 安川洋, 「各国のガソリン車禁止・ディーゼル車販売禁止の状況」『EVsmartブログ』, <https://blog.evsmart.net/ev-news/global-petrol-gas-car-ban/> (2020年10月アクセス)
- 大気14) 宮口祐貴, 「化石燃料車販売禁止まで15年、産業界が直面する課題とは (英国)」『JETRO』, <https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/2020/eb53475efa5d9387.html> (2020年10月アクセス)
- 大気15) Shell, "Sky Scenario", Shell, <https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/shell-scenario-sky.html> (2020年10月アクセス)
- 大気16) bp p.l.c., "BP Energy Outlook 2020 edition", bp, <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html> (2020年10月アクセス)
- 大気17) 国土交通省 海事局, 「海事分野におけるSOx規制の概要及び国土交通省の対応について」『国土交通省』, <https://www.mlit.go.jp/common/001292832.pdf> (2020年10月アクセス)
- 大気18) 日本航空機開発協会, 「航空機関連データ令和元年版 (令和2年3月発行) 第VI章航空輸送を取り巻く環境2. 排出ガス規制」『日本航空機開発協会』, http://www.jadc.jp/files/topics/43_ext_01_0.pdf (2020年10月アクセス)
- 大気19) IATA (International Air Transport Association, 国際航空運送協会), "What is SAF?", IATA, <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-what-is-saf.pdf> (2020年10月アクセス)
- 大気20) ANAグループ, 「再生可能エネルギー大手NESTEと中長期的なSAFの調達に関する覚書を締結」『ANA』, <https://www.anahd.co.jp/group/pr/202010/20201026-2.html> (2020年10月アクセス)
- 大気21) 一般財団法人日本航空機開発協会 (JADC), 「民間航空機に関する市場予測2020-2039」『JADC』, http://www.jadc.jp/files/topics/157_ext_01_0.pdf (2020年10月アクセス)

■土壌・地下水

- 土壌 1) 高畑陽 他, 「小項目テーマ: 8-3地下水地盤環境」『地盤工学会』, https://www.jiban.or.jp/images/file/AR_PDF/8-3AR.pdf (2020年9月アクセス)
- 土壌 2) 駒井武 他, 「SDGsに向けたサステナブル・レメディエーション」『環境工学連合大会講演集』29巻

(2020)

- 土壌 3) 保高徹生, 古川靖英, 張銘, 「わが国と諸外国のサステナブル・レメディエーションへの取り組み」『環境情報科学』46巻2号(2017):43-47
- 土壌 4) 東畑郁生 他, 「福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的新技术開発と人材育成プログラム」『地盤工学会』,
https://www.kenkyu.jp/nuclear/training/adoption/jiban_intro.pdf (2020年10月アクセス)
- 土壌 5) 国立環境研究所, 「バイオレメディエーション」『環境展望台』,
<https://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=53> (2020年9月アクセス)

2.2

環境区分
と研究開発領域

2.2.6 有機化学物質分析・毒性評価

(1) 研究開発領域の定義

本領域は、化学物質の環境リスク評価に係る研究開発動向を含む領域である。環境媒体（大気、水、底質、土壌、生物）中の化学物質の計測や分析、人の健康や生態系への悪影響の評価（毒性評価など）に関わる機構解明や手法・技術などの研究開発動向を含む。具体的には工業的に生産される有機化学物質（ナノマテリアルやマイクロプラスチック含む）の採取・前処理、計測・分析（微量分析や一斉/網羅分析）、その精度管理、ならびにデータ解析（インフォマティクス、モデリングなど）に係る技術を対象範囲とする。また個体レベルで毒性を把握するためのバイオアッセイやAOP（Adverse Outcome Pathway:有害性発現経路）、構造解析などのリスク評価技術や種レベルのリスク評価手法なども対象に含む。なおPM_{2.5}およびそれに含有される化学物質は「2.2.7 無機化学物質分析・動態把握」で扱う。

(2) キーワード

多成分一斉分析、ノンターゲット分析、Adverse Outcome Pathway (AOP)、リスク評価、プラスチック添加剤、製品含有物質、マイクロプラスチック・ナノプラスチック、マイクロファイバー、生物影響

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

化学物質の環境リスク評価において、有機化学物質の分析および毒性評価は最も重要な科学技術的課題であり続けている。有機化学物質は種類が極めて多く、性状が様々であることが特徴である。そのため各物質による環境への影響はさらに多様である。また対象とする媒体や製品ごとに、異なる手法や技術が必要となるため、技術体系も複雑である。このような多数、多様、複雑な課題に対して、いかにシンプルかつ迅速に、十分な正確さをもって包括的に評価できるかが本領域における研究開発の主要な関心となる。

分析技術に関しては、多成分一斉（ワイドターゲット）分析やノンターゲット分析への取り組みが進められている。近年の分析機器の性能向上、機器制御やインフォマティクス技術の進歩に伴い、より広範な取り組みが進められつつある。その一方、なお範囲が限定的であること、分析結果の信頼性を一層高める必要があることなどが指摘されている。

影響評価では、毒性パスウェイに関する知見などの生物学および情報科学的進歩に伴い、多成分一斉分析なども連動する新たな方向性が試みられている。その他にもナノ・マイクロプラスチックなど製品由来の固体粒子、製品含有成分、ナノマテリアルなどの分析や評価のニーズが高まっており、一部で活発な取り組みも進められているが、全体としては十分とは言い切れない状況にある。

有機化学物質の分析・毒性評価は工業的な有機化学物質や製品の安全・安心な利用に最も重要な意義を持つが、物質全体や製品全体をカバーする検討は不足しており、取り組みをさらに進めて、物質、製品全体の安全・安心の確保に貢献することが期待されている。新規材料や用途開発が進むナノマテリアルについても依然として安全性に対する関心が高く、安全性評価に向けた計測技術の開発やその標準化・妥当性評価などが重要な課題となっている。マイクロプラスチックに象徴される海洋プラスチックごみ問題は今や世界的な関心事項の一つとなっているが、環境中での挙動や毒性およびそれらを総合した環境リスクについて未解明な点が多い。

[研究開発の動向]**• 有機化学物質の分析とデータ解析**

有機分析では、多種多様化する化学物質に対応した多成分一斉（ワイドターゲット）分析やノンターゲット分析¹⁾、理論同族異性体が極めて多い塩素化パラフィンなどのような分析困難な物質への対応²⁾が依然として世界的な潮流である。ワイドターゲット分析やノンターゲット分析の環境モニタリングへの展開では、ハイスループット化と未知物質の同定に力が注がれている³⁾。これらの流れに従い、分析で得られる情報量は格段に増大しており、その処理や解析に情報科学分野を取り込んだ分野横断的展開が世界的な動向になっている。即ち、未知物質の推定や毒性の予測、異常検出に深層学習などの人工知能の活用が広がりつつある⁴⁾。

また、有機化学分析とばく露影響評価や毒性化学との融合的研究として、上述の情報科学的なドライ系の分析に加え、ウェット系の分析においても、分子インプリント技術（分子鋳型技術）による分子選択的な前処理などの新技術の導入が進められている⁵⁾。化学物質の生体内（臓器内）への吸収・代謝・分布を一目瞭然とするようなイメージング質量分析法（IMS）に代表される可視化技術も注目されている⁶⁾。医学・薬学分野では投与薬剤の体内動態や代謝、プロテオームやトランスクリプトーム解析に用いられているが、環境化学分野では汚染物質の動態や代謝、あるいはそれによって誘導される生体化学物質の全観察という切り口から研究のブレークスルーが期待されている。

GC×GCやLC×LCのような多次元クロマトグラフィーによる分離の他、イオンモビリティのような別の分離軸を加える分析情報の多次元化が進んでいる。その一方で、様々な形態・状態の試料を前処理なしに直接、リアルタイム分析できるDART（Direct Analysis in Real Time）や先のIMSのような直接分析手法も潮流となっている。後者の場合、測定時には分離せず、測定後に任意のデータを分離あるいは抽出する手法や全データを用いた解析手法の併用が必須であり、いずれの場合でも優れたアイデアの創出とそれを実現するためのソフトウェアの開発が研究の成否を左右する。

• 個体レベルで毒性を把握するためのバイオアッセイ、AOP（Adverse Outcome Pathway：有害性発現経路）、構造解析などのリスク評価技術

リスク評価技術としてのバイオアッセイ・毒性評価では、人への影響を評価するための実験動物（哺乳類）の急性・亜急性・慢性毒性、変異原性・発がん性、神経・免疫・内分泌毒性、行動試験、次世代影響といった様々な試験法が長年開発されてきたが、近年は培養細胞系や無細胞系による短期毒性試験法（バイオアッセイ）の開発に移行している。こうした潮流の背景には、2008年頃から米国の環境保護庁（EPA）、環境健康科学研究所（NIEHS）、食品医薬品庁（FDA）などが共同で取り組んできた「21世紀の毒性学プロジェクト（Tox21）」がある。Tox21は、毒性物質との最初の相互作用から動物個体の毒性発現にいたる経路（toxicity pathway）の解明、およびこれに沿った一連のバイオアッセイ系による、実験動物に頼らない毒性試験法の確立を目標としている。欧州でも、動物福祉や動物実験の3R（使用動物数の削減：Reduction、動物の苦痛軽減：Refinement、動物を用いない代替法の利用：Replacement）の機運が高まり、2003年頃からは化粧品に関する動物実験への規制強化が進み、2013年には原則禁止となった。こうした中、標的分子への作用（MIE：Molecular Initiating Event）が有害事象の発現へと至る毒性経路を、分子や細胞レベルのKey Event（KE）の繋ぎ合わせだけでなく、最終的な個体、集団、生態系レベルの有害影響との関連性にまで繋げて考えようとする有害性発現経路（AOP）という考え方が2010年にEPAのAnkleyらにより提唱された。動物試験によらない化学物質の評価・管理への積極的な利用を目指し、EPAや経済協力開発機構（OECD）がAOPのデータベースであるAOP Wikiのシステムを開発・構築している。またOECD

では、試験によらない方法として定量的構造的活性相関 (QSAR: Quantitative Structure-Activity Relationship) など予測手法を活用した統合的なアプローチ手法である「IATA: Integrated Approach to Testing and Assessment」のケーススタディ開発・評価プロジェクトも進行中である⁷⁾。

生態系への影響評価を目指して、植物や無脊椎動物、魚類などを含む各種生物に対する同様の試験系の確立と応用も進められている。これまでは、例えば内分泌かく乱化学物質の評価のためのスクリーニング試験や、長期間を要する確認試験 (例:「メダガ拡張一世代繁殖毒性試験 (MEOGRT)」) などが多く提案・承認されてきた。しかし最近では先述のような欧州での動物福祉の考え方が波及してきており、無脊椎動物の試験や魚類胚を用いた試験などにおいても動物福祉を考慮した試験法の提案・改正が議論されている。

• 材料成分の分析ニーズの増大と技術開発

2000年代以降、欧州連合 (EU) ではELV指令、RoHS指令、REACH規則、EN71-Part3などの製品含有化学物質管理に関する法制度が急速に整備され、米国カリフォルニア州や中国、韓国などでもRoHS指令に類似した規制が進められている。国内では2005年に「電気・電子機器の特定の化学物質の含有表示法 (JISC 0950)」(通称、J-Moss) が制定され、RoHS指令と同じ6物質について、特定の電気・電子機器への含有の表示義務を負うことになっている。POPs条約では2000年代後半から特定の臭素系難燃剤 (PBDE、HBCD) と塩素系難燃剤 (SCCP) を条約対象物質に追加登録しているが、さらに現在、PBDE代替物質の塩素系難燃剤 (デクロラプラス) が条約対象物質として検討段階に進んでいる。これらにおいて規制対象となっている元素 (鉛、カドミウム、水銀、六価クロム、ヒ素、アンチモンなど) の定量分析には、蛍光X線分析、原子吸光法、誘導結合プラズマ (ICP: Inductively Coupled Plasma) 発光分析法、ICP-MS法が一般に適用されている。また臭素系難燃剤や塩素系難燃剤の定量分析には高分解能GC-MSなどの先端計測機器を用いる精密測定法が主流となっているものの、アジア途上国をはじめとするより多くの試験機関で基礎情報収集を実現するために、含有製品・廃棄物の検定を目的とした汎用機器による実用的な簡易測定法の開発も進められている⁸⁾。

• ナノマテリアルやマイクロプラスチックを含む工業的に生産される有機化学物質の分析

素材分析は、新規素材の設計、既存素材の改良、安定供給のための生産管理などを目的として素材高分子の分子特性と物理特性を解析・評価するために行われてきた。平均分子量や分子量分布をはじめ、微細構造や共重合体の化学構造、高分子添加剤の含有量など、評価対象に応じて様々な解析・評価手法が整備されている。

現在、環境中に流出した高分子素材 (いわゆるプラスチックごみ) の問題が世界各地で注目されている。その中では微細化された高分子素材 (マイクロプラスチック) による環境リスクを懸念する声もある。また特定の高分子添加剤に関しても、製品含有化学物質管理に関する法整備が進み、残留性有機汚染物質 (POPs: Persistent Organic Pollutants) に関するストックホルム条約 (POPs条約) の対象物質に追加登録されるなど使用規制が国際的に強化されている。これら化石資源由来の高分子素材や規制対象の高分子添加剤に関する実態把握では素材分析で培われた解析・評価手法が適用されている。バイオマス由来プラスチックや生分解性プラスチックなどの再生可能資源、あるいは規制対象物質に代わる代替高分子添加剤の評価にも適用されている。

・海洋プラスチックごみ・マイクロプラスチック (MP) 研究の進展

プラスチックごみに関する研究は、海洋表層に浮遊するプラスチックごみの研究から始まり⁹⁾、陸域や海洋での動態や、マイクロ (μm) あるいはナノ (nm) サイズのプラスチック片の生物影響の研究へと広がっている。一般的にMPは5 mm以下の細かなプラスチック粒子のこととされている。これまでに大気、雨水、大気降下物中でもMPの存在が確認されている。

MPとして多くみられるものの中にはPETなどの化学繊維製織物由来の繊維状のプラスチックがあるとの指摘がある。繊維状のMPは洗濯排水として下水に流れ込み、処理過程を経て下水汚泥に含まれるという経路が確認されている。下水汚泥が農地還元される欧米や中国では、洗濯排水由来の下水汚泥中のMPが農地土壌に混入することへの懸念があるとされている。また農地土壌中のMPは農地表面の流出によって水域への流入源ともなりうると考えられている。同様に都市 (路面) 表面流出も水域へのMPの大きな負荷源であることが明らかにされつつある。なお道路粉塵中のMPの起源ではタイヤ摩耗物など自動車の走行に由来するものおよび路上のプラスチックごみが劣化したものが大きな割合を占めるとの報告がある。このようにして陸域で発生したMPは河川を通して海洋に流入する。海洋に流入したプラスチックの大半は海底堆積物に蓄積すると考えられている。

大気中にもMPが存在するとの報告が出始めている^{10), 11)}。しかし大気中MPは従来の粒子状物質 (PM) 研究の対象からすると大きな粒子であり、呼吸器経由のばく露量は体内沈着効率を考慮するとそれほど多くないと考えられている。ただしMPよりも小さな微小プラスチックも存在しうるため、研究動向に関心が持たれている。

海洋に流入したMPは動物プランクトン、貝、魚、甲殻類、海鳥などに取り込まれることが知られており、食物連鎖を介した補食者への移行を確認したとの報告もある¹²⁾。取り込まれたMPの生物影響については実験室レベルでの研究が進んでいる。物理的な異物としての粒子毒性は生物の細胞への酸化ストレスおよび炎症を通して起こることが確認されている。より小さいナノサイズのプラスチック (1 μmより小さなプラスチック粒子) が腸管粘膜などを通過して細胞毒性を示す可能性を指摘した報告もある¹³⁾⁻¹⁶⁾。粒子毒性に加えてプラスチックに元々含まれている添加剤や環境中で吸着した疎水性有機汚染物質による影響、あるいはそれらと粒子毒性との複合影響を指摘する報告もある¹⁷⁾。ただしこれらの報告の大半は室内実験に基づくものであり、実環境下での実測はほぼない^{18), 19)}。

MPによる環境やヒト健康への影響の科学的解明が道半ばという状況にある中、社会的関心の高まりを受けて、欧州の化学物質規制であるREACH規則においてプラスチックの使用を制限しようとする動きがあり注目されている。しかし科学的解明が不十分な中での判断であるとしてこうした動きを懸念する声もあり、MPの環境リスク評価を体系的に実施することを目指して、評価フレームや必要な科学的知見を整理しようとする議論が、産業界とアカデミアの連携の下で起きている²⁰⁾。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

・多成分一斉分析、ノンターゲット分析

多成分一斉 (ワイドターゲット) 分析やノンターゲット分析、理論同族異性体が極めて多い塩素化パラフィンなどの分析困難な物質への対応が引き続き世界的な潮流となっている。ワイドターゲット分析やノンターゲット分析の環境モニタリングへの展開ではハイスループット化と未知物質の同定に多くの研究者が注力している。またこれらを通じて膨大化する情報量を背景にして、未知物質の推定や毒性の予測、異常検出などに

深層学習などの人工知能を活用する動きも活発化している。これらに加えて分離軸の多次元化の展開も最近の動向である。GC×GCやLC×LCのような多次元クロマトグラフィーによる分離の他、イオンモビリティのような別の分離軸を加える分析情報の多次元化が進んでいる。

• 作用機序に基づくリスク評価技術の新展開

米国EPAやOECDはAOPのデータベースであるAOP Wikiのシステムを開発・構築している。またOECDでは、AOPに加えて、試験によらない方法として定量的構造的活性相関 (QSAR) などの予測手法を活用した統合的なアプローチ手法「IATA: Integrated Approach to Testing and Assessment」のケーススタディの開発・評価プロジェクトが進められている⁷⁾。AOP Wikiには350件程度の登録があるが (2020年7月現在)、その多くはヒト健康にかかわるAOPであり、生態系影響に関するものはまだ数件程度である。遺伝子発現を網羅的に測定するトランスクリプトーム解析などが飛躍的に進んだことからAOPに対して多くの提案が挙げられた。化粧品に関する動物実験の制限強化を受けて、特に皮膚感作性に関する検討が先行的に進められた。*In vitro* 試験、*in chemico* 試験 (ペプチドへの結合性などを調べる試験)、*in silico* 解析、動物試験結果などを組み合わせて証拠の重み付け (WoE: Weight of Evidence) を行うIATAや、より厳密にルーリ化したDefined approach (確定方式) が提案されている。

• 動物福祉の観点への対応

生態影響の試験系では、魚類の胚や細胞株、無脊椎動物を用いた試験が多く提案されているほか、従来から広く利用されてきた魚類急性毒性試験 (OECDテストガイドライン No. 203) の2019年改訂において、動物福祉の観点から、利用する魚体数の削減や、診断症状の確認や瀕死状態の場合の安楽死処置などの観点が追加された²¹⁾。前述の作用機序に基づくリスク評価技術は、こうした動物福祉の観点への対応を支援する意味合いでも期待されている。

• 各種素材や製品含有化学物質の環境影響評価への分析技術の適応

素材高分子の状態評価には、走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) や透過型電子顕微鏡 (TEM: Transmission Electron Microscope)、ゲル浸透クロマトグラフィー (GPC: Gel Permeation Chromatography)、フーリエ変換赤外分光装置 (FT-IR: Fourier Transform Infrared Spectroscopy) やラマン分光装置、熱分解ガスクロマトグラフィー質量分析計 (Py-GC-MS: Pyrolysis-Gas Chromatography-Mass Spectrometry) などによる分子化学構造の解析が一般に行われている²²⁾。また、エネルギー分散型X線分析装置 (EDS: Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy) を搭載した走査型電子顕微鏡 (SEM-EDS)²³⁾、二次元アレイ (FPA: Focal plane array) 検出器を搭載した顕微FTIR (FPA-FTIR) も検討されている^{24), 25)}。これらの手法の多くは従来からあるものであるが、近年は製品含有化学物質への関心とともに新たな応用が試みられるようになってきている。

• 生物学的分析と化学分析の融合、イメージング質量分析

有機分析とばく露影響評価や毒性化学との融合的研究として、分子インプリント技術 (分子鑄型技術) による分子選択的な前処理などの新技術の導入がウェット系の分析において行われている⁵⁾。化学物質の生体内 (臓器内) への吸収・代謝・分布を一目瞭然とするようなイメージング質量分析法 (IMS) に代表される可視化技術も注目されている⁶⁾。医学・薬学分野では投与薬剤の体内動態や代謝、プロテオームやトラ

ンスクリプトーム解析に用いられているが、環境化学分野では汚染物質の動態や代謝、あるいはそれによって誘導される生体化学物質の全観察という切り口からの研究のブレークスルーが期待されている。この方向の分析では素材分析とも共通する技術があり、例えばマトリックス支援レーザー脱離イオン化飛行時間型質量分析法 (MALDI-ToFMS: Matrix Assisted Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometry) は、イメージング質量分析画像から測定対象領域の分子化学構造と形態に加え、分子量と分子量分布に関する情報を併せて取得できる手法と期待されている。飛行時間型二次イオン質量分析法 (ToF-SIMS: Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry) は、100 nm以下の空間分解能で測定されたイメージング質量分析画像に基づいて、測定対象領域に存在する元素、無機・有機化合物の解析や、イオンエッチングを併用しての深さ方向との三次元解析が可能である。Py-GC-MS、FPA-FTIR、MALDI-ToFMS、ToF-SIMSはいずれも素材分析における先端的な解析・評価手法だが、定量的な評価には向かないため、その克服に向けた方策検討が期待されている。

• ナノマテリアルの毒性研究

ナノマテリアルの毒性研究はまだ研究途上だが、組成や形状のほか表面の状態や吸着した化学物質など様々な影響因子が検討されており、分析項目の精密化や細分化の進展が今後の方向性と見られている。個別事項としては、多層カーボンナノチューブの発がん性を示す情報が蓄積されている。アスベストとカーボンナノチューブの吸入毒性の類似性が指摘され、共通して中皮腫を生成すること、またその機序として腫瘍抑制遺伝子 Ink4A/Arf のメチル化ないし欠損による不活性化が報告されている²⁶⁾。

スウェーデンのNGOであるChemSec (国際化学物質事務局) は、2019年末、同団体が公表する化学物質リスト (SINリスト) にカーボンナノチューブ類を追加した。従来から特定の多層カーボンナノチューブは発がん性の可能性が疑われていたが、単相カーボンナノチューブなども含め、全ての種類のカーボンナノチューブを含めたことに大きな意義があると受け止められている。ナノ物質が“非常に高い懸念のある物質 (Substances of Very High Concern, SVHCs)”であることを示唆したことについてその是非を含めて専門家間で注目されている。

• マイクロプラスチック (MP) の標準的分析手法の開発

MPの環境中での分布・動態の解明を進めるためには試料採取法から計測・モニタリング法に至るまであらゆる面で高度化が不可欠となる。当面の目標は、誰もが納得できる標準的な分析法の確立、定量的な情報の収集、シミュレーションモデルの開発と考えられている。こうした研究を推進するためには、膨大な実験を行い、データを収集して解析する必要があるため、これまで手作業で行われてきたサンプリングや分析操作を自動化していくことがより一層重要となる。日本ではJAMSTECのグループがハイパースペクトルイメージングを用いてMPを迅速に識別する技術の確立に取り組んでいる。MPをスペクトルパターンで区別して機械学習により自動で識別させる装置であり、画像解析を組み合わせることでMPの材質・形状・サイズ・個数を同時に収集することができる。海外でもMPやマイクロファイバーを迅速に識別する技術開発が進んでいる。例えば二次元アレイ検出器を搭載した顕微FTIR (FPA-FTIR) を用いてフィルター上に捕集したMPを高分子の種類ごとに疑似色化して表示するイメージング技術によってMPの同定および粒度分布測定の自動化を図る取り組みなどがある²⁷⁾。なお高分子の同定では赤外分光法やラマン分光法のような振動分光法を用いた官能基解析が一般的だが、より精密な高分子の解析を行うためには、今後は質量分析法の利用が増えてくると見られている。熱分解ガスクロマトグラフィーのほか、イメージング分析を行えるマトリックス支援レーザー脱離イ

オン化質量分析法 (MALDI-MS) の利用も期待されている。サンプリングに関しては複数の小型船を利用した広域サンプリング、鉛直方向での海水サンプリング、船上でのその場分析などあらゆる技術の向上が求められている。

• マイクロプラスチックの粒子毒性や添加剤の影響の解明

実環境下での粒子毒性解明が期待されている。現在は、粒子毒性を調べた実験で設定されたMP濃度の多くは現在環境中で観測される濃度よりも高く、環境濃度で行われた実験では影響が観測されないという報告がある一方で²⁸⁾、環境濃度でもメダカの生殖腺の成熟の遅れや繁殖力の低下が見られたとの報告もある¹⁵⁾。いずれの実験もポリスチレンが使用されており、実験に使われたポリスチレン粒子に含まれる添加剤の影響が大きいとの報告もあり²⁹⁾、一定程度の判断ができるほどの知見蓄積には至っていない。

プラスチックがナノサイズになると腸管粘膜などを通過して生体内に侵入し、生体内異物を排除しようとする免疫機能が働き免疫系を攪乱する可能性があるとの懸念がある^{13), 14)}。渦鞭毛藻に65 nmのポリスチレン粒子をばく露すると細胞毒性と酸化ストレスへの影響が観測され¹⁵⁾、ムール貝に50 nmのポリスチレン粒子をばく露すると血リンパへの移行や免疫細胞への影響が観測された¹⁶⁾との報告がある。また、低濃度で長期間ミジンコにナノプラスチックをばく露させるとビテロジェニンの合成などへの影響が継世代的に観測されたとの報告もある²⁹⁾。ただしこれらについても、実際の環境中でのナノプラスチックの実測やヒトの組織中でのナノプラスチックの存在が確認されていないことから、これらの実験の結果が現実を反映しているのかどうかの判断は現状では難しいと考えられている。

大きなプラスチックごみだけでなくMPにも添加剤が残留していることが明らかにされてきた³⁰⁾。添加剤の脱着や、MPへの海水中からの疎水性有機汚染物質の吸着・脱着についても研究が増えてきている。これらの化学物質の生物への取込みや粒子毒性との複合影響についてもばく露実験が行われている¹⁷⁾。ただしこうしたMPを介した化学物質ばく露の相対的寄与は小さいとの指摘が実験³¹⁾ やモデル計算³²⁾ からも報告されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

• SOLUTION プロジェクト (2013～2017年)

欧州水域の水質保全と持続的な利用を目的とした「水枠組み指令」のもとで2013年から5年間実施されたSOLUTIONプロジェクトでは、Effect-directed Analysis (影響指向型分析) 手法を活用し、各種の*in vitro* (もしくは*in vivo*) バイオアッセイと化学分析や分画前処理とを組み合わせることで環境中で影響が大きいと考えられる汚染化学物質のランク付けや特徴化・同定などが行われた。

• SeqAPASS プロジェクト (2013年～)

2013年から実施されているUSEPAなどが実施する「Sequence Alignment to Predict Across Species Susceptibility (SeqAPASS)」プロジェクトは、各種のハイスループットな細胞試験などの結果を、生物種間の遺伝子配列の違い、あるいはAOPや毒性作用機序に着目して評価に利用する取り組み。エストロゲン作用などの内分泌かく乱を対象に始め、ミツバチに対するネオニコチノイドの影響などに発展してきている。

• EU-ToxRisk (2016年～)

Horizon2020の一環として2016年から実施されており、動物実験の3R原則の下、動物実験を用いな

い有害性ならびにリスク評価を目指したプロジェクト。欧州38機関と米国1機関が参加しており、EUのREACHで要求される反復投与毒性試験ならびに発生・生殖毒性試験の代替となる新規アプローチ法(NAM: New Approach methodology)(QSAR、*in vitro*試験、各種オミクス解析など)の開発が進められている。

• **ANDROMEDA、HOTMIC、FACTS、microplastiX、i-plastic、RESPONSE(JPI Oceans)(2019年～)**

JPI Oceansは、EUの国際的な共同研究プラットフォームである「共同プログラミングイニシアチブ(JPI)」の1つとして2011年に発足した。このJPI Oceansの2019年の公募テーマに海洋生態系におけるマイクロプラスチック汚染のリスク評価が掲げられた。その結果、合計6つの研究プロジェクト(ANDROMEDA、HOTMIC、FACTS、microplastiX、i-plastic、RESPONSE)が採択された。RESPONSEは2020年4月に公表された新しい採択課題だが、欧州11ヶ国の14の研究機関からなる科学コンソーシアムが海洋生態系におけるマイクロプラスチックとナノプラスチックの環境運命と生物学的影響を研究するプロジェクトである。

• **QUASIMEME/NORMAN 環境試料中マイクロプラスチック分析に関する国際相互検定研究(2019年～)**

欧州海洋環境モニタリング情報品質認定(Quality Assurance of Information on Marine Environmental Monitoring in Europe、QUASIMEME)が幹事機関となり、EU内外の試験機関を対象に、環境試料中マイクロプラスチック分析に関する国際相互検定研究(QUASIMEME/NORMAN Interlaboratory Study on the Analysis of Microplastics in Environmental Matrices)を実施している。

• **次世代型毒性予測手法開発(AI-SHIPS)(2017年～)**

日本では、経済産業省において、人工知能を活用した次世代型毒性予測手法開発プロジェクト(AI-SHIPS)が2017年から進められている。日本での化学物質のヒト健康影響評価で重要視されるげっ歯類を用いた全身毒性試験である反復投与試験結果を、薬物動態(PBPK)や吸収・分布・代謝・排泄(ADME)、各種データベースやQSAR活用、ゲノミクスなどを組み合わせることで実現することを目標としている。

• **海洋プラスチックごみに係る動態・環境影響の体系的解明と計測手法の高度化に係る研究(環境研究総合推進費・課題番号SII-2)(2018～2020年度)**

地球規模(全球レベル)での海洋プラスチックごみの分布と動態に関する実態を把握し、将来を予測するための数値モデリングの開発を目指すプロジェクト。海洋プラスチックごみの沿岸～地球規模での海洋中の分布状況についての実態把握及び予測に関する研究が進められている。マイクロプラスチックの影響やナノプラスチックの影響、添加剤およびマイクロプラスチックに吸着している化学物質の影響についても検討を行っており一定の成果が挙げられている。

• **東南アジア海域における海洋プラスチック汚染研究の拠点形成(SATREPS地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム)(2019～2024年度)**

海洋プラスチックごみの分布実態や予測を精力的に行っている磯辺(九大)らが、タイにおいて現地の研究者と共同してプラスチックごみの発生量解析や現存量調査、環境影響評価、将来予測を行うプロジェクト。また得られた結果を踏まえて行動計画を政府に提言し、プラスチックごみ発生量の削減を目指すとしている。

• **新規POPs含有プラスチック廃棄物の環境上適正な管理に向けた国際的な分析技術基盤の整備(環境研究**

総合推進費・課題番号3-1901)(2019～2021年度)

プラスチック廃棄物を対象としたPOPs分析を国際的にリードし、新規POPs分析技術の基盤整備の方向性を探ることを目指したプロジェクト。

- **マイクロプラスチックの環境リスク評価のための概念モデルの構築と東京湾での試行的リスク評価 (Long-range Research Initiative : 化学物質が人の健康や環境に及ぼす影響に関する研究の長期的支援活動) (2020年度～)**

LRIは国際化学工業協会 (ICCA) が1999年にグローバルな自主活動として始めた研究助成事業であり、現在は日米欧三極の化学工業会 (JCIA、ACC、Cefic) の協力の下で運営されている。日本におけるLRIでは、「その他、緊急対応が必要とされる課題」としてマイクロプラスチックに関する研究課題が第8期 (2020年度) 時点で4件採択されている。第8期に新たに採択された課題が本課題であり、試行的リスク評価の実施過程での感度解析から不確実性の高い要因の洗い出し、およびより現実的なリスク評価に必要な研究課題や留意点を明らかにするとしている。

(5) 科学技術的課題

- **ノンターゲット分析のための品質管理**

ノンターゲット分析を環境モニタリングで実用化させるためには、検出される物質の種類と数が測定機器・機種に依存することが目下の課題となっている。手法の標準化、定性・定量の再現性向上、およびそれを担保する「ノンターゲット分析のための品質管理」が課題である。特にLC-MS法は機種・製品依存性が高い傾向にあり、LC分離とイオン化条件の一般化が困難な状況にある。メーカー横断的な取り組みにより同一手法で互換性のある結果が得られるような標準化の取り組みが必要とされている。

- **多次元化の困難性と限界**

GC-MS法では、GCの多次元化による分離性能の向上が図られているものの、一般的なEI法 (電子イオン化法) では物質混合の見分けが困難で、未知物質の同定に必須の分子イオンが検出されない場合も多いといった問題がある。一方、FI (フィールドイオン化法)、PI (光イオン化法) のようなソフトイオン化ではイオン化効率が低く微量分析には適さない。

多くのMS機種ではサンプリングレートの上昇にともない測定質量誤差が大きくなるという性質をはらんでおり、未知物質同定も可能なハイスループットノンターゲット分析の障壁となっている。

生体組織あるいは環境試料中の化学物質の定性・定量と分布を一度に直接計測できるイメージング質量分析法 (IMS) には更なる空間分解能の向上、イオン化効率 (検出感度) の向上、イオン化可能な物質の種類が増大が望まれている。

- **作用機序に基づくリスク評価手法の難しさ**

IATA (Integrated Approach to Testing and Assessment : 統合的なアプローチ手法) ケーススタディでは、Defined approach (確定方式) が確立されている皮膚感作性などは、ある程度、AOP (有害性発現経路) に基づいて反復投与毒性試験ならびに発生・生殖毒性試験の代替となる新規アプローチ法 (NAM) の利用が進められている。しかし他の反復投与毒性試験結果の特定の臓器への影響に関しては、かなり限定した化合物グループのカテゴリーアプローチにとどまっており、全身毒性の評価までには至っていない。また

魚類胚を用いた手法では、AOPが十分に整っている内分泌かく乱化学物質以外は、症状と長期的な影響を繋げるための情報が不足しており、それを充実させることが今後の課題とされている。

• 定量分析の課題

熱分解ガスクロマトグラフィー質量分析計 (Py-GC-MS)、二次元アレイ検出器を搭載した顕微FTIR (FPA-FTIR)、マトリックス支援レーザー脱離イオン化飛行時間型質量分析法 (MALDI-ToFMS)、飛行時間型二次イオン質量分析法 (ToF-SIMS) は分子化学構造や形態などの定性的な評価に有効だが、定量的な評価には向かないため、これを克服するための方策検討が期待されている。

• アジア途上国への普及に向けた課題

海洋プラスチック問題や製品含有化学物質管理への対応が求められるアジア途上国に化学物質分析技術を普及させるためには、初期投資や維持管理費などのランニングコスト、調整やメンテナンスの操作性などを考えると困難が大きい。これに対応するためには、最先端の計測分析機器を用いる精密測定法のみならず、汎用機器を用いる実用的な簡易測定法を併せて整備することも必要と考えられている。

• マイクロプラスチック (MP) および付随する有害化学物質の生物影響

MPを介した有害化学物質の生物へのばく露や蓄積は室内実験では明らかにされているが、実際の野外生物への影響は明確になっていない。極小のプラスチック片により実際にどの程度のリスクがあるのかについての科学的な解明が期待されている。MPの影響を“正しく恐れる”ためにも生物影響は現場のレベルに近い濃度、あるいは将来起こりうるレベルでの検討が今後は重要と考えられている。

またプラスチック製品に含まれる性能維持・向上のため多種の添加剤について、プラスチック製品の生産から廃棄、またその先でナノプラスチックへと至るライフサイクルの中での多種の添加剤の行方を評価する研究も必要と考えられている。日本学術会議が2020年4月に行ったMP研究に関する提言の中でも、添加剤のライフサイクルでのヒトへのばく露評価とその免疫系の攪乱の可能性について早急にとり組む必要があると指摘されている³³⁾。

• マイクロプラスチックのサンプリング

未だに標準的な方法が確立されていない。世界的に相互比較できるよう標準的な採取法に関するガイドラインを作成する必要がある。また現在は300 μm以上のMPを対象とした観測データが多いが、より小さなプラスチックの分析も必要な段階にきている。

ふるい分けによる荒い粒径分離では環境動態解明には不十分で、より精密な粒径分離および粒径分布測定法が必要である。一方、大量の環境試料を簡便・迅速・安価・現場測定可能とする手法の開発も重要である。

海洋での浮遊微細MPは300 μm未満であり、300μm未満のMPの動態把握が世界的にも大きな課題と認識されている。ところがモニタリング手法調和ガイドラインに基づく日本沿岸の海水中のMPの測定は300 μm以上のものに対して行われており、300 μm未満のMPの現状把握が進んでいない。世界的な潮流に合わせ、大気、陸域、海域 (海水、堆積物、生物) 中の微細なMPの実態把握、例えば10 μm以上の大きさに統一しての実施が必要と考えられている。

• ナノ粒子やマイクロプラスチックなどの新たな課題

金属ナノ粒子やMPの環境中での動態解明のためには、ピコからナノスケールの懸濁物質近傍の無機元素の環境動態を研究する必要性が認識されている。また大気中MPを測定するためには、前処理が煩雑であるため、簡便な新手法の開発が急務と考えられている。更に従来の粒子状物質 (PM) のオンライン化学成分測定法が応用できれば有用と見られている。

(6) その他の課題

• 多数化学物質のリスク評価への対応

化学物質審査規制法において製造・輸入される化学物質は少量多品種化が進んでいるものの、日本ではダイオキシン類など以外は混合物の評価・管理手法が十分に整っていない。類似物質について相対毒性係数 (Relative potency factor) のようなものを求める組成物アプローチ (Component based approach) か、あるいは排水や環境水そのものの毒性影響をバイオアッセイで測定する混合物アプローチ (Whole mixture approach) のいずれか又は両方の利用が必要と考えられている。

バイオアッセイ (生物応答) を用いた排水の評価は米国の全排水毒性試験WET (Whole Effluent Toxicity) と同様の手法だが、日本では2019年に中間取りまとめ「生物応答試験を用いた排水の評価手法とその活用の手引き (中間とりまとめ)」が作成・公表されたところで検討が一旦休止となっている。今後の普及にあたっては、個別の化学物質の評価に依存するだけではなく、多種多様な化学物質が製造・輸入されていることに対応するため米国やドイツ、韓国などでも利用されている生物を用いた評価・管理を、産業界にとってもメリットのある形で導入するための何らかの工夫が必要と考えられている。

• 社会との協働、人材育成の必要性

製造・輸入される化学物質の少量多品種化の進展によって、化学物質に関する問題の複雑化・不顕在化が進み、問題が生じても社会に対して単純明快な説明が困難、あるいは市民が自ら理解しようとしても難しいといった状況が深まっている。このような状況を改善するためには、市民が環境問題に関する情報やニュースに触れる機会を増やしたり、高等教育課程における環境教育の充実を図ったりすることで、環境分野、とりわけ環境化学分野への理解増進を強化するとともに、若手研究者の育成を進めることが喫緊で取り組む必要のある課題となっている。

• 動物福祉、動物実験の削減、コストと安心・安全の確保

動物福祉の推進による動物実験の削減はコスト削減 (国際競争力) とも方向性が類似しているが、反復投与毒性試験ならびに発生・生殖毒性試験の代替となる新規アプローチ法 (NAM) とされる各種の細胞試験や定量的構造的活性相関 (QSAR) などの予測手法、他の物質のデータ利用などの組合せをWoE (Weight of Evidence) を考慮して評価に利用するDefined approach (確定方式) の適用は、現時点で極めて限定的であり、より幅広く安心・安全を確保するための評価系の確立が課題となっている。

ところが動物を用いた従来の毒性学・生態毒性学に関わる研究者は減少傾向にあり、多くはNAMの開発に移行しており、総合的なWoEに基づく評価ができる人材の育成が課題と認識されている。

• 新たな素材と廃棄物、再生素材への対応

将来的に新しい廃棄物処理・再資源化技術が生み出され、様々な再生素材が流通することも考えられる

中、高分子素材とその廃棄物はより複雑化していくことが予想される。新たな高分子素材や高分子添加剤による深刻な環境汚染が引き起こされることがないように、実情に即した分析技術基盤を整備し、実態調査を行い、発生状況、物質動態、劣化・分解挙動、環境リスク評価など、設計・製造側では把握困難な学術的知見を着実に蓄積し、社会に提示していくことがこれまで以上に求められると見られている。

● ナノマテリアルの安全性評価

材料分野では応用を目指した研究が急速に展開されている一方、毒性評価や環境分析技術の開発が追いついていない状況が常態化している。ナノマテリアルの生体への影響に関する試験法や毒性評価の基準の設定など、いかにして新素材開発と並行して安全性評価に係る研究を進めていくかが課題となっている。

(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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●多成分一斉分析、ノンターゲット分析についての研究が活発に行われている。 ●各種 <i>in vitro</i> 試験法、内分泌かく乱などの生態毒性試験法の開発に係る基礎研究が進められている。 ●代替試験法 (JaCVAM) に関する研究や、トランスクリプトーム解析に基づく機能解析による Toxicity Pathway や AOP 提案が進められている。 ●海洋プラスチックごみ問題・マイクロプラスチック (MP) 問題に関して、有害化学物質の野外での実測や生物への移行メカニズムに関する研究、海域における 300 μm 以上のサイズのプラスチック片の分布を測定する手法の国際相互比較や分布動態の将来予測に関する研究など、世界に先駆けたと取組みがある。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●「AI-SHIPS」プロジェクトをはじめ、QSARに関する技術開発や活用の検討が進められている。 ●国立医薬品食品衛生研究所などの国内研究機関がOECD IATA ケーススタディに貢献している。 ●漂流マイクロプラスチックの測定手法の調和ガイドライン検討や環境リスク評価の実施に向けた検討など、応用的な研究が進められている。 ●研究現場への最新機器や技術の導入は欧米と比して遅れが目立つ。
米国	基礎研究	○	↘	<ul style="list-style-type: none"> ●超高分解能質量分析による未知物質同定、ハイスループット分析による研究が加速している。 ●大気、沿岸海域、下水、下水処理水、海洋生物中のマイクロプラスチック (300 μm 以下を含む) のモニタリングが行われており、関連の国際学術雑誌への論文掲載も多い。その他にはプラスチックのマテリアルフローに関する研究も進んでいる。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●「Tox21」プログラムから数多くのハイスループット試験の開発・実施が進み、有害物質規制 TSCA での利用も進んでいる。 ●AOPの提案やSeqAPASSプロジェクトなども積極的に実施・提案されており、化学物質管理への応用が模索されている。QSARやデータベース構築などへの貢献も大きい。 ●影響指向型のバイオケミカルハイブリッド分析の検討が進められている。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●「Solutions」や「NORMAN」のような多機関参加型のプロジェクトによりライン川やドナウ川のノンターゲットモニタリングを実施。 ●イメージング質量分析のばく露解析への応用、イオンモビリティや複合・多次元分離技術といった先端的技術を取り入れた応用研究を国際研究で推進。

				<ul style="list-style-type: none"> ●動物福祉への機運が高まる中、Horizon 2020 (2014～2020年)の下で動物実験によらないリスク評価技術や手法の開発を目指す「EU-ToxRisk」プロジェクトを実施し、欧州38機関が参加した。 ●ドイツ (Alfred Wegener Institute) やフランス (Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement) をはじめとする欧州の研究グループがマイクロプラスチック (MP) に関して精力的に論文を発表している。QUASIMEME (欧州海洋環境モニタリング情報品質認定) が幹事機関となってEU内外の試験機関を対象に環境試料中MPの分析に関する国際相互検定研究を進めている。MPおよびナノプラスチックの粒子毒性についての先導的な研究も進めている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●OECDや規制当局ECHAなどがQSAR Toolboxの改良を進めている。 ●Horizon2020の下で化学物質管理に係る研究開発を進めている。 ●皮膚感受性のDefined approach (確定方式) を先導しているほか、IATAケーススタディへの提案も積極的に行っている。 ●遺伝子導入した魚類胚を用いた試験や、動物福祉に配慮した魚類の診断症状に基づく毒性評価に関する研究などが進む。 ●大気、沿岸海域、下水、下水処理水、海洋生物中のマイクロプラスチック (300µm以下を含む) モニタリングが行われており、関連の国際学術雑誌への論文掲載も多い。
中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●第13次5か年計画 (2016～2020年) の中で種々の環境施策が強力に推し進められてきた。全国の大学に「環境」が名に付く学部、学科、研究室が多数創設され、関連研究機関も潤沢な研究予算を持って研究を進めてきた。コロナ禍以前は国際会議やシンポジウムの自国開催も盛んで国際アピールを精力的に行っていた。 ●多成分一斉分析を使った環境汚染実態報告例が増加している。 ●各種の試験法開発に関する論文も多く出されているが独自路線。 ●マイクロプラスチックおよびナノプラスチックの粒子毒性について先導的な研究を進めている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●ハイスループット分析や大量のデータ解釈のために人工知能を応用した研究論文が増加している。超高分解能な質量情報などを使った計算科学的応用研究の論文も増加している。 ●リスク評価技術の研究開発では国際的な枠組みへの関与はまだ小さい。 ●大気、沿岸海域、下水、下水処理水、海洋生物中のマイクロプラスチック (300µm以下を含む) モニタリングが行われており、関連の国際学術雑誌への論文発表が非常に多い。(環境科学主要5誌の2019年-2020年のモニタリングをテーマにした掲載論文数は37報)
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●多くの<i>in vitro</i>試験が開発・提案されている。 ●マイクロプラスチックの計測法の開発が進んでいる。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●AOPに多くの提案を出し、またOECDへの関与も一定程度ある。 ●大気、沿岸海域、下水、下水処理水、海洋生物中のマイクロプラスチック (300µm以下を含む) モニタリングが行われており、関連の国際学術雑誌への論文掲載もある。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発 (プロトタイプの開発含む) の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・無機化学物質分析・動態把握 (環境・エネ分野 2.2.7)
- ・ナノ・マイクロマテリアルのELSI/EHS、国際標準 (ナノテク・材料分野 2.7.1)

参考・引用文献

- 1) E. L. Schymanski et al., “Non-target screening with high-resolution mass spectrometry: critical review using a collaborative trial on water analysis”, *Anal. Bioanal. Chem.* 407 (2015) : 6237-6255, doi : 10.1007/s00216-015-8681-7
- 2) J. Gluge et al., “Environmental Risks of Medium-Chain Chlorinated Paraffins (MCCPs) : A Review”, *Environ. Sci. Technol.* 52, no. 12 (2018) : 6743-6760, doi : 10.1021/acs.est.7b06459
- 3) J. Hollender et al., “Nontarget Screening with High Resolution Mass Spectrometry in the Environment : Ready to Go?”, *Environ. Sci. Technol.* 51, no. 20 (2017) : 11505–11512, doi : 10.1021/acs.est.7b02184
- 4) X. Sun et al., “Identification of Potential PBT/POP-Like Chemicals by a Deep Learning Approach Based on 2D Structural Features”, *Environ. Sci. Technol.* 54, no. 13 (2020) : 8221–8231, doi : 10.1021/acs.est.0c01437
- 5) K. Huang et al., “Structure-Directed Screening and Analysis of Thyroid-Disrupting Chemicals Targeting Transthyretin Based on Molecular Recognition and Chromatographic Separation”, *Environ. Sci. Technol.* 54, no. 9 (2020) : 5437–5445, doi : 10.1021/acs.est.9b05761
- 6) T. T. Wang et al., “Uptake and Translocation of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) and Perfluorooctanesulfonic Acid (PFOS) by Wetland Plants: Tissue- and Cell-Level Distribution Visualization with Desorption Electrospray Ionization Mass Spectrometry (DESI-MS) and Transmission Electron Microscopy Equipped with Energy-Dispersive Spectroscopy (TEM-EDS) ”, *Environ. Sci. Technol.* 54, no. 10 (2020) : 6009–6020, doi : 10.1021/acs.est.9b05160
- 7) OECD IATA Case Study, “Integrated Approaches to Testing and Assessment (IATA) ”, OECD, <http://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-assessment/iata-integrated-approaches-to-testing-and-assessment.htm> (2021年1月18日アクセス)
- 8) 環境研究総合推進費・課題番号3-1901 梶原夏子他「新規 POPs 含有プラスチック廃棄物の環境上適正な管理に向けた国際的分析技術基盤の整備」, https://www.erca.go.jp/suishinhi/seika/pdf/seika_2_04/3-1901.pdf (2021年1月18日アクセス)
- 9) C. J. Moore et al., “A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre”, *Marine Pollution Bulletin* 42, no. 12 (2001) : 1297-1300, doi : 10.1016/S0025-326X (01) 00114-X
- 10) L. Lebreton, M. Egger and B. Slat, “A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean”, *Scientific Reports* 9 (2019) : 12922, doi : 10.1038/s41598-019-49413-5
- 11) A. Isobe et al., “Selective transport of microplastics and mesoplastics by drifting in coastal waters”, *Marine Pollution Bulletin* 89, no. 1-2 (2014) : 324-330, doi : 10.1016/

j.marpolbul.2014.09.041

- 12) O. Setälä, V. Fleming-Lehtinen and M. Lehtimiemi, “Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web”, *Environmental Pollution* 185 (2014) : 77-83, doi : 10.1016/j.envpol.2013.10.013
- 13) M. Shen et al., “Recent advances in toxicological research of nanoplastics in the environment : A review”, *Environmental Pollution* 252 Part A (2019) : 511-521, doi : 10.1016/j.envpol.2019.05.102
- 14) C. Barría et al., “Effect of nanoplastics on fish health and performance : A review”, *Marine Pollution Bulletin* 151 (2020) : 110791, doi : 10.1016/j.marpolbul.2019.110791
- 15) T. Zhao et al., “Size-dependent oxidative stress effect of nano/micro-scaled poly-styrene on *Karenia mikimotoi*”, *Marine Pollution Bulletin* 154 (2020) : 111074, doi : 10.1016/j.marpolbul.2020.111074
- 16) M. Sendra et al., “Nanoplastics : From tissue accumulation to cell translocation in *Mytilus galloprovincialis* hemocytes. resilience of immune cells exposed to nanoplastics and nanoplastics plus *Vibrio splendidus* combination”, *Journal of Hazardous Materials* 388 (2020) : 121788, doi : 10.1016/j.jhazmat.2019.121788
- 17) N. González-Soto et al., “Impacts of dietary exposure to different sized polystyrene microplastics alone and with sorbed benzo[a]pyrene on biomarkers and whole organism responses in mussels *Mytilus galloprovincialis*”, *Science of The Total Environment* 684 (2019) : 548-566, doi : 10.1016/j.scitotenv.2019.05.161
- 18) L. G. A. Barboza et al., “Microplastics in wild fish from North East Atlantic Ocean and its potential for causing neurotoxic effects, lipid oxidative damage, and human health risks associated with ingestion exposure”, *Science of The Total Environment* 717 (2020) : 134625, doi : 10.1016/j.scitotenv.2019.134625
- 19) J. L. Lavers, I. Hutton and A. L. Bond, “Clinical Pathology of Plastic Ingestion in Marine Birds and Relationships with Blood Chemistry”, *Environmental Science & Technology* 53, no. 15 (2019) : 9224-9231, doi : 10.1021/acs.est.9b02098
- 20) T. Gouin et al., “Toward the Development and Application of an Environmental Risk Assessment Framework for Microplastic”, *Environmental Toxicology and Chemistry* 38, no. 10 (2019) : 2087-2100, doi : 10.1002/etc.4529
- 21) OECD, “OECD Guideline for the Testing of Chemicals, Section 2 : Test No. 203 : Fish, Acute Toxicity Test”, OECD, https://www.oecd-ilibrary.org/environment/test-no-203-fish-acute-toxicity-test_9789264069961-en (2021年1月18日アクセス)
- 22) S. Huppertsberg and T. P. Knepper, “Instrumental analysis of microplastics-benefits and challenges”, *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 410, no. 25 (2018) : 6343-6352, doi : 10.1007/s00216-018-1210-8
- 23) C. B. Crawford and B. Quinn, “10-Microplastic identification techniques”, in *Microplastic Pollutants* (Amsterdam : Elsevier Science, 2017) , 219-267, doi : 10.1016/B978-0-12-809406-8.00010-4

2.2

環境区分と研究開発領域

- 24) M. G. J. Löder et al., “Focal plane array detector-based micro-Fourier-transform in-frared imaging for the analysis of microplastics in environmental samples”, *Environmental Chemistry* 12, no. 5 (2015) : 563–581, doi : 10.1071/EN14205
- 25) J. P. Harrison, J. J. Ojeda and M. E. Romero-Gonzales, “The applicability of reflectance micro-Fourier-transform infrared spectroscopy for the detection of synthetic microplastics in marine sediments”, *Science of the Total Environment* 416 (2012) : 455–463, doi : 10.1016/j.scitotenv.2011.11.078
- 26) E. D. Kuempel et al., “Evaluating the Mechanistic Evidence and Key Data Gaps in Assessing the Potential Carcinogenicity of Carbon Nano-tubes and Nanofibers in Humans”, *Critical Reviews in Toxicology* 47, no. 1 (2017) : 1–58, doi : 10.1080/10408444.2016.1206061
- 27) S. Primpke et al., “Automated identification and quantification of microfibrils and microplastics”, *Analytical method* 9 (2017) : 1499-1511, doi : 10.1039/C6AY02476A
- 28) M. Revel et al., “Realistic environmental exposure to microplastics does not induce biological effects in the Pacific oyster *Crassostrea gigas*”, *Marine Pollution Bulletin* 150 (2020) : 110627, doi : 10.1016/j.marpolbul.2019.110627
- 29) Z. Liu et al., “Effects of nanoplastics at predicted environmental concentration on *Daphnia pulex* after exposure through multiple generations”, *Environmental Pollution* 256 (2020) : 113506, doi : 10.1016/j.envpol.2019.113506
- 30) B. G. Yeo et al., “PCBs and PBDEs in microplastic particles and zooplankton in open water in the Pacific Ocean and around the coast of Japan”, *Marine Pollution Bulletin* 151 (2019) : 110806, doi : 10.1016/j.marpolbul.2019.110806
- 31) A. Batel et al., “Histological, enzymatic and chemical analyses of the potential effects of differently sized microplastic particles upon long-term ingestion in zebrafish (*Danio rerio*)”, *Marine Pollution Bulletin* 153 (2020) : 111022, doi : 10.1016/j.marpolbul.2020.111022
- 32) A. Bakir et al., “Relative importance of microplastics as a pathway for the transfer of hydrophobic organic chemicals to marine life”, *Environmental Pollution* 219 (2016) : 56–65, doi : 10.1016/j.envpol.2016.09.046
- 33) 日本学術会議 健康・生活科学委員会・環境学委員会合同 環境リスク分科会, 「提言：マイクロプラスチックによる水環境汚染の生態・健康影響研究の必要性とプラスチックのガバナンス」, <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t288-1.pdf> (2021年1月18日アクセス)

2.2.7 無機化学物質分析・動態把握

(1) 研究開発領域の定義

本領域は、無機元素、微量元素、無機化学物質、およびヘテロ原子を含む低分子有機化合物の分析などを利用して、任意の元素や化学物質の環境動態把握や生態系の機構解明、あるいは物質循環機構解明などに取り組む分野の研究開発動向を含む領域である。必要に応じ、新規素材に係る無機、微量元素の分析、動態も対象に含まれる。環境化学の観点から特に関心の強い水銀、ヒ素など数元素の研究開発動向も記述する。その他、分析技術開発の動向、環境動態研究の動向、無機元素の動態において重要な役割を持つ微粒子分析などについて記述する。

(2) キーワード

物質循環、フラックス、微量元素多元素分析、重元素安定同位体比分析、個別粒子成分分析、粒子形成、化学的生物誘引作用、有害ガス状物質、微量ガス分析、水銀、ヒ素、大気粒子、発生源解析、多環芳香族炭化水素類、残留性有機汚染物質 (POPs)、誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS)、誘導結合プラズマ飛行時間型質量分析法 (ICP-TOFMS)、同位体、化学形態分析、加速器質量分析、PM_{2.5}、新型コロナウイルス

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

無機元素と無機化学物質の物質動態研究は、生物の生存可能性を支えている現在の地球システムの理解、地球の歴史の解明、および人間活動が将来の環境へ及ぼす影響の評価に欠くことができない。これらの研究を進展させる鍵となるのは、新しい情報を与える分析技術の開発である。化学物質や元素の地球規模での循環や化学形態の変化は、環境中でのさまざまな化学反応や物質移動をともなう。大気・水・土壌で新たに生成する化合物も多く、また環境中でその形態がさまざまに変化する。その状態によっては私たちの健康に影響を及ぼすものも少なくない。大気・水・土壌の間を循環する間に気象に大きな影響を与えたり生態系に関わったりもする。

環境中の化学物質や地球規模での物質循環の理解は、私たちの健康への影響や将来の地球環境を把握する上で意義が大きい。無機元素、微量元素の適切な活用と管理を進めるために、環境中での存在状況、ばく露量や蓄積量、生体や生態系への影響、また、環境中での輸送や動態を解明することに広範な社会・経済的および科学的意義がある。これらのため、環境に存在する化合物や元素の状態や形態、さらにはその変遷を把握するための分析技術が必要となる。また実験室での試料前処理・測定だけでなく、現場で逐次モニターすることも必要になる。

分析技術に関しては、特に近年は誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) を軸とする分析手法が発達し、過去には無かった高感度の分析が達成され微量元素の存在と動態が明らかになってきた。また、これを基礎として、複数手法を結合した分析がより実用的となり、例えば化学形態分析の知見の拡大に寄与してきた。安定同位体分析の高度化は水銀の分析をも可能とし、環境中の同位体組成から得られる多くの情報を基にして生物蓄積の機構などの理解を進展させた。粒子分析ではSingle Cell ICP-MS分析やエアロゾル質量分析法などにより細胞やナノ粒子の分析までが視野に入り、従来は得られなかった存在状況や動態の解明や、これらを基礎にした環境管理の進展が見られる。国・地域の観点では中国の技術的進歩が注目されている。

[研究開発の動向]

(研究開発の方向性)

依然として有害金属を中心とした微量元素の生体影響への関心が高い。一般的に、微量元素の生体影響メカニズムの研究が毒性学の分野で行われ、野生生物やヒト由来の試料（血液、尿、臓器、組織など）中の微量元素分析に基づくばく露量や蓄積量の研究が環境化学や分析化学の分野で行われる。それら生体内の量と各種影響指標との関連を探ることを通じて、実際の環境汚染がヒトや野生生物に影響を及ぼしているかを見極めることが行われる。したがってここでは生体試料の分析が主となるが、こうした目的で行われる生体分析は現在はICP-MSをベースとする分析法でほぼ占められている。

無機化合物の環境化学として古くから産業利用価値の高さと有害性のトレードオフで問題視されてきた水銀、ヒ素、鉛、カドミウムなどについては、継続的な研究報告がなされており、一部の新規有害元素（アンチモンなど）も研究が進んでいる。水銀に関しては水俣条約が地球規模の水銀の動態や影響に関する研究の強い背景となっている。国連環境計画の取組みと関連した新たな課題としては工業製品中の鉛やカドミウムが研究対象となっている。その他にはハイテク産業での使用量が多い希土類元素も研究対象となっている。更に福島第一原子力発電所事故以来、放射性物質の環境動態に関する研究報告が増加している。生体内の微量元素分析に関しては、多様な化合物に対応する分析手法の高度化が求められており、薬学分野などで大型のプロジェクトが進んでいる。ナノ粒子の研究なども手法開発が活発である。

無機元素の環境動態や生態系のメカニズムとの関係性に関しては、大気・水・土壌環境試料中の定量分析と同位体分析を組み合わせた観測的な研究の他、環境中あるいは生態系の中での元素の分配や形態変化速度、取込・排泄速度などに関する実験的研究が推進されている。またそうして得られた研究結果を考慮したモデル計算による現状再現および将来予測に関する研究も実施されている。これらに加えて、気候変動による無機元素の環境動態への影響や海底資源開発に伴う無機元素の動態変化、それらに伴う生物蓄積機構への影響を明らかにする研究も推進されている。

大気中の微小粒子状物質（PM_{2.5}）に関しては、まず大気汚染および気候影響の側面から問題視されていた硫酸エアロゾルに起因する大気粒子PM_{2.5}の発生量は、大気への硫黄放出量が制限されたことで減少傾向にある。その一方で、植物を起源とする揮発性有機化合物（BVOCs : Biogenic volatile organic compounds）が広大な森林から大量に発生していることが分かってきており、大雨や洪水など自然災害の頻度や規模の増大に間接的に寄与している可能性があることから、化石燃料の燃焼にともなう人為的な有機化合物に加えて注目されている。燃焼由来のPM_{2.5}に関しては、発がんなどに関わる有害物質が多く含有されることから、呼吸器系や循環器系の疾病との関連性を説明する原因物質や作用機序の特定が世界的な関心事項になっている。

一般的にウイルスはPM_{2.5}粒子よりも小さく、粒子状物質（PM）に吸着して大気中を輸送されやすくなることから、これらの複合体の大気内挙動と新型コロナウイルスの感染拡大との関連について、関心が高まっている。

(分析技術の概観)

分析技術に関しては、無機元素の分析技術の進歩により、微量元素化学量論、重元素安定同位体比、極微小領域情報という新しいパラメータが利用できるようになり、物質動態のより深い理解が進んでいる。重元素安定同位体研究は、地球環境科学の一大潮流となった¹⁾。この発展を導いたのは、2000年代に普及した多重検出型誘導結合プラズマ質量分析法（MC-ICP-MS）である。

従来、安定同位体比分析は、水素、炭素、窒素、硫黄などの軽元素に限られていた。しかし、MC-ICP-

MSによりほぼすべての元素のイオン化と同位体比精密測定が可能となった。安定同位体比は、その元素の起源により有意に異なる場合があり、また状態変化、化学反応、および生物代謝により有意に変動する場合がある。そのため濃度に加えて同位体比を測定すれば元素の動態をより詳しく調べることができる。微量元素の多元素分析もICP-MSなどの分析機器の進歩に基づいている。他方、多くの場合、主要成分が測定を妨害するため、目的成分の分離濃縮が必要となる。しかしその分離濃縮のための前処理技術も最近大きく進歩し、高選択的かつ簡便迅速となった。結果として多くの微量元素のビッグデータとそれに基づく化学量論的解析が利用可能となった。極微小領域の分析には、加速器-蛍光X線法、二次イオン質量分析法 (SIMS)、レーザーアブレーション (LA)-誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) などが可能な先端的な装置が用いられる。この分野の装置開発もめざましく、感度 (1 pptレベルまで) と空間分解能 (数nmまで) の向上、イメージングや時間変化の観測技術の進歩が進んでいる。さらにナノ粒子の分析と計数、個々の細胞の分析を可能とする普及型 ICP-MS 装置も現れた。

個別の分野ごとで見ると、ppt (10^{-12}) ~ ppq (10^{-15}) レベルの濃度で環境中に存在している無機元素の化学形態別の分析を可能にするための試料前処理技術の開発が進められている。例えば、スチルレンジビニルベンゼンポリマーを用いて、海水や排水などのマトリックスが複雑な試料から分析対象元素を選択的に濃縮したり、海水中に極微量でしか存在していない有機金属を濃縮したりする分析前処理技術がある。また、ゲル薄膜中の元素の拡散移動を利用した薄膜拡散勾配 (Diffusive Gradients in Thin-films) 法を用いることによって、水や底質中に存在する無機元素の中で、生物が利用可能な化学形態であったり、反応性が高い無機元素の化学形態だけを、現場で採取することが可能となっている。これまでの薄膜拡散勾配法は、亜鉛や銅、ニッケル、カドミウム、そして鉛の分析が中心であったが、近年、ヒ素やリンなどの半金属元素の現場サンプリングや、水銀の分析方法も確立されており、現在は海水中のほとんどの微量金属や希土類元素の同位体分析が可能となっている²⁾。またこうした分析により明らかとなった動態を考慮したモデルの開発も進んでいる。それによって局所スケールや地域スケールでの動態予測が可能になってきている。

生態系機構の把握・予測を目指す分野においては、軽元素安定同位体分析技術によって食物網を数値化することが可能になり、栄養段階を介した無機元素の蓄積動態を予測することが可能になってきた。現在は、生物蓄積の予測では排出速度などの考慮が必要との認識が高まっている。そこで生物による有害元素などの取込・排出の速度や成長速度を考慮して蓄積濃度を予測するような生物エネルギーモデルの開発が進められている。ただし生物エネルギーモデルの開発を進める上では生物種ごとの各種速度を実験や観測を通じて明らかにする必要があるため、分析技術の高度化とモデルの精緻化の両方の推進が必要とされている。

また複雑な化学反応や過渡的な状態を含めて環境動態を把握するには、時間的・空間的に連続した現場観測が必要であり、より高感度で小型高性能な分析デバイスや形態分析法の開発が進められている。広域での化合物の分布を調べるには、衛星観測機器の利用も進み、経年トレンドの把握に活用されている。

粒子分析装置の開発では可測下限粒径が下がってきており、ガスと粒子の境界に近い粒径 1 nm 以上からの粒径分布が計測可能な装置が近年市販された^{3), 4)}。今後、大気中の二次生成粒子や燃焼排気ガス中の超微小粒子の研究などに活用される見込みである。

近年、質量濃度基準に加えて個数濃度基準の規制が増えてきている。これは粒径 100 nm 以下の超微小粒子の健康リスクが懸念されていることが重要な背景となっている。欧州標準化委員会 CEN で大気環境中の個数濃度の測定標準法が制定されたことから、欧州においては、屋内・屋外の環境で、より小さい粒子も規制対象としていく趨勢である。

PMは多種多様な化学成分で構成されているが、個数、粒径などの物理計測に比べると化学成分測定に関

する科学的知見の蓄積は弱い。そのような中、エアロゾル質量分析法や、先駆的なPM捕集・導入部と化学イオン化質量分析法とを組み合わせた装置の開発などにより、高時間分解能化、高感度化を達成し、時間変化する現象に対しても技術的に追えるようになってきている。

なお粒子分析では、個数計測装置の開発における粒径の可測範囲の小粒径化は海外メーカーにおよばないが、日本は装置の小型化を達成している⁵⁾。化学成分測定の実オンライン化に関しては主要なPM成分についてのセミアンライン装置の開発⁶⁾が進み、粒子を含んだ試料空気をアルゴンガスに置換するガス交換器の開発⁷⁾や、それとICP-MSあるいはICP-TOFMSを組み合わせた元素の実オンライン測定の実験⁸⁾がされており、研究や行政調査で活用されている。海外メーカー製の市販の実オンライン測定装置は高価なため日本国内では他国と比べてユーザが増えていない。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• 微小試料の分析

生成した原子蒸気を誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) に導入して元素濃度・同位体比を測定するレーザーアブレーション (LA) -誘導結合プラズマ飛行時間型質量分析法 (ICP-TOFMS) は、レーザーアブレーションにともなって発生する原子発光や分子発光を同時に観測できる装置との併用により、その場の元素濃度や分子状態についての情報が得られるようになった。具体的にはレーザー径を絞って位置分解能を上げ、TOFMSを使用して微小試料からの過渡的信号を効率よく取り込むことで、個別細胞レベルの微量元素分析が可能となっている。193 nm ArF レーザーでビーム径4 μ mに絞り、1~1.5Jcm⁻¹のエネルギー照射により、細胞一つ一つから元素シグナルを得ることが行われている⁹⁾。微小領域の高分解能な微量元素マッピングも可能になっている。

Single Cell ICP-MSはナノ粒子など環境微粒子の分析法であるSingle Particle (sp) ICP-MSを生体試料に応用したものといえる。細胞一つ一つをネブライザー経由でアルゴンプラズマに順次導入し、得られる過渡的なシグナルを検出する。Single Cellとして細菌や藻類などへの適用がある。

高分解能型マルチコレクター誘導結合プラズマ質量分析法 (MC-ICP-MS) は、質量分解能5,000以上において、感度を損なうことなく、フラットトップピークでの高精度同位体比測定を可能にしている。またナノスケール領域の成分分析が可能で二次イオン質量分析法 (Nano-SIMS) は、空間分解能50 nm以下かつ高感度 (ppbまで) で二次イオン像観察を実現している。安定同位体比測定は、数十ppmの再現性で可能となっている。

• 加速器質量分析 (AMS) によるトレーサー研究

AMSによる放射性炭素同位体 (¹⁴C) 測定は、年代測定や環境汚染物質の起源推定だけでなく、¹⁴Cでラベルしたさまざまな物質の体内動態の解明や毒性メカニズムの探索にも使用されてきた。液体クロマトグラフィー質量分析法 (LC-MS) とAMSを組み合わせたParallel Accelerator and Molecular Mass Spectrometry (PAMMS) が提唱され、実験動物だけでなくヒトへの投与によって、がんの転移、薬物や有害化学物質の体内動態などの研究に使用されるようになってきている。一方、近年キャビティリングダウン分光法 (CRDS) が、AMSより安価で、より簡便な¹⁴C検出法として注目を浴びるようになり、生物の代謝研究に適用されるようになってきている。

• 低コスト粒子状物質 (PM) センサとAIの活用

1,000ドル以下でPM濃度を測定できる低コストPMセンサが国際的に注目されており、各国で開発が行われている¹⁰⁾⁻¹²⁾。この低コストPMセンサを活用した市民参加型活動¹³⁾やICT活用による多地点・高時間分解能のビッグデータをAI技術と組み合わせることで、従来と全く異なる原理によってPM濃度予測ができる可能性があるとして、期待が高まりつつある。

• 化学形態別分析の進展 (水銀、ヒ素)

水銀は化学形態で毒性や動態が変化するため、形態別分析法の開発が重要な課題である。クロマトグラフィーを用いた分離法や、大気・水のサンプリング技術で改良が進んでいる¹⁴⁾。X線を用いた非破壊分析も発展してきている。放射光X線を用いたX線吸収微細構造法 (XAFS) は、環境中微量元素の強力な化学形態分析法として国内外で広く用いられてきたが、水銀への応用は限定的だった。近年、蛍光X線を検出する際のエネルギー分解能を高めることで、X線吸収端近傍 (XANES) 領域から従来よりも詳細な化学形態を得られる手法が開発された。現在この手法による分析はEUの放射光施設 (ESRF) の独壇場だが、国内でも一部のグループが技術開発を進めている。

ヒ素については、自然由来の揮発性化学種が生成され、大気を介した地球化学的循環に寄与することが、2000年代終盤以降報告されてきた。その後も観測研究が進み、海洋生物において様々な有機ヒ素化合物が同定され、その動態や化学形態変換の機構などが明らかになってきている。

• 水銀の環境動態に係る研究

水銀の主要な蓄積者と考えられている外洋の回遊魚を対象とした、水銀濃度の規制要因に着目した研究が、地球化学者・海洋学者・生態学者の共同により進められている。Argo計画などで得られた大規模海洋観測データやバイオリギング技術の発展が、この分野の研究の進歩に寄与している¹⁵⁾。また、多媒体モデルの進化によって、気候変動によって海産物中の有害金属濃度がどの程度変動するか予測した結果¹⁶⁾や、全球の多媒体輸送を解析するモデル開発の成果¹⁷⁾が報告されている。その他、これまでヒトのメチル水銀の摂取源は主に魚介類の摂食だと考えられていたが、一部の地域においては水田米からも摂取していることが明らかになってきた。

光酸化反応によって引き起こされる偶数同位体の非質量依存同位体分別効果を用いて、大気由来水銀を起源とした生態系への水銀蓄積を明らかにする研究が進められている。なお鉄、銅、亜鉛などの生体にとっての必須微量元素については、生体内の代謝過程での分別に基づく同位体比の変動が見いだされており、栄養状態や疾患などによる代謝の変動を同位体比から把握する試みが続けられている。

• アンモニア (NH₃) の大気中濃度の増大

中国におけるNH₃とNO_xの発生量が年々増えていることが明らかになってきた¹⁸⁾。1980年以降の30年間で、NH₃は6kg N ha⁻¹ y⁻¹から12kg N ha⁻¹ y⁻¹になり、NO_xは1.5 kg N ha⁻¹ y⁻¹から5 kg N ha⁻¹ y⁻¹に増大した。米国でのNH₃の発生は30%が肥料、54%が畜産関係からとされているが、こちらも年々増大している¹⁹⁾。

NH₃の大気濃度の増大は農業が主たる原因とされているが、日本における大気中NH₃濃度の上昇の原因はよく分かっていない。一方、NO_xは燃焼由来である。日本における窒素の沈着量は上昇傾向にあり²⁰⁾、湖沼や閉鎖性海域の富栄養化にもつながると懸念されている。

pptオーダーのNH₃とHNO₃による新粒子形成が発見された²¹⁾。NH₃とともにアミン類も大気に放出され

るが、アミン類は NH_3 以上に粒子形成への寄与が大きいことがわかってきており²²⁾、これらの大気化学に関する研究や観測がさらに展開されると期待されている。

• 生物起源有機化合物 (BVOCs : Biogenic volatile organic compounds) の分析

BVOCsは、オゾンなどのオキシダントを増幅するとともに、後段で示すように大気化学反応により酸素官能基や窒素官能基を含む化合物となり、粒子形成やその二次粒子への変遷に寄与していることが理解されてきた。また温暖化と降水量の増加により、BVOCsのほか NH_3 や還元性硫黄化合物の発生量も増大している。これらBVOCsや揮発性無機化合物の発生量の増大が雲の発生を促し、大雨や洪水など自然災害の頻度や規模の増大に間接的に寄与している可能性があるとされている。こうした状況を受け、BVOCsのフラックスの分布の把握が進められつつある。またBVOCsや無機系気体成分から二次生成する極性低分子有機化合物の粒子形成能について、大気粒子を模したバルク液体を用いるフラスコ実験、および粒子と反応ガスを導入して生成物や粒子を計測するチャンバー実験などが行われている。計算化学による研究も進められている。しかし、このような模擬実験やシミュレーションに比べて、実際の大気の実態の報告は途上段階にある。大気中の濃度が極微量であることに加え、多くの物質が過渡的に生成する化学種であること、捕集濃縮が難しいことなど、克服すべき課題が複数存在する。

BVOCsから二次的に生成するホルムアルデヒド、グリオキザール、メチルグリオキザールなどのカルボニル類は吸湿性粒子に取り込まれてオリゴマー化する。また NH_3 などの窒素成分と反応してイミダゾール化合物となり、ブラウンカーボン大気粒子 (光吸収性有機エアロゾル) の成分となる。これらO原子やN原子を含む有機化合物は二次生成粒子 (ナノ粒子) の形成にも寄与している。

広葉樹から発生するBVOCsの代表といえるイソプレンは、大気化学反応によりIEPOXと呼ばれるエポキシジオール化合物になり、吸湿性大気粒子に取り込まれて有機二次生成粒子 (SOA) の形成に寄与する。世界各地での観測から、IEPOXに基づくSOAは全SOAの30%を占めるといわれ、IEPOX関連化合物の化学とその影響が注目されている。

• 燃烧由来PM_{2.5}、人為起源有機化合物 (AVOCs) および凝縮性粒子の排出量推計、エイジング (変質) 過程の解明および発生源解析法開発

PM_{2.5}の主要成分である有機エアロゾルなどに対応するオンライン測定法が開発されたことにより、燃烧発生源から排出されるVOCだけでなく凝縮性粒子 (IVOC、SVOC) や粒子 (LVOC、ELVOC) は、大気中から除去されるまでの間に、大気中のオキシダントなどと反応して変質することが明らかになった²³⁾。なかでも凝縮性粒子は、従来把握されていなかった一次粒子の発生源であるとともに、二次粒子の重要な前駆物質であることが明らかになった。この発見により、発生源におけるPM排出係数を変更することによる排出インベントリの改善、大気質モデルによる濃度予測の新たな考慮などの課題が新たに生じるようになった。また従来は大気中二次生成粒子を扱う実験は主に光化学チャンバを用いて行われてきたが、フロー式反応器が米国と欧州でそれぞれ開発され、それを用いた実験的研究やモデル研究が近年大きく進展している^{24)、25)}。

大気中の有害物質の発生源解析法としてレセプターモデルと呼ばれる手法が知られているが、施設毎に多くの無機・有機物質の発生情報 (インベントリ) を必要とし、燃烧由来PM_{2.5}の情報も限られている。またPM_{2.5}に含まれる代表的発がん物質である多環芳香族炭化水素 (PAH) 類の発生源解析にはPAH組成の違いに基づく方法が汎用されているが精度は高くなく、寄与率も求めることができていない。そこで最近では、PAHとそのニトロ体 (NPAH) の比が燃烧温度に基づいて大きく変化する原理に基づいて燃烧由来粒子

(煤)の発生源とその寄与率を求める方法が開発された。従来法よりも簡便で精度も高いことから注目されている²⁶⁾。またこの原理を燃料由来PM_{2.5}以外の発生源解析にも展開しようとする動きもある。

• PM_{2.5}と疾患との関連性解明

大気中PM_{2.5}濃度は死亡者数との関連性が明らかとなっており、多くの国の大気環境基準に含まれている。日本ではPM_{2.5}と呼吸器系疾患との関連性が早くから疫学研究で確認されていたが、最近では黄砂と循環器系疾患との関連について裏付けが報告され、大気粒子に含有される化学物質と咳症状との関連も報告されている。

現行の環境基準に定められているPM_{2.5}の測定は粒子の大きさ(直径2.5μm以下)のみに基づいて質量を計測しているため、有害性を発現する本体を計測していないという点が課題とされている。PM_{2.5}は自然由来粒子(黄砂は代表的)と人為由来粒子(主に燃焼粒子)に大別され、発がんなどに関わる有害物質の多くは後者に含有される。PM_{2.5}に含まれる代表的な発がん物質としては多環芳香族炭化水素(PAH)類とそのニトロ体(NPAH)が知られているが、PAHの水酸化体(OHPAH)やキノン体(QPAH)類にも内分泌かく乱性や活性酸素種産生作用などが見出されて以来、動物だけでなくヒトの健康に及ぼす影響についても研究が行われるようになってきた。

こうした大気中の有害有機化合物のうち、WHOが参考値を定め、いくつかの国も環境基準や参考値を定めているのはベンゾ[a]ピレン(BaP)のみである。発がん性が確認されている他のPAH類とその他の酸化誘導体については基準などが定められておらず、発生源規制や疾病対策の観点からは大きな課題と認識されている。我が国では以前からBaPが中央環境審議会の優先的に取り組むべき有害化学物質の一つに定められているものの大気環境基準/指針は定められていない。最近、BaPに加えて関連化合物をどこまで対象にするか、またその測定法の検討が開始された。これらの有害化学物質についてはどこからどれだけ出ているかを把握し発生源規制や疾病対策へ活用すること、またそのための手法開発も課題となっている。

• 硫黄化合物ジメチルスルフィド(DMS)による硫黄、鉄、炭素の循環への寄与

海洋で生成する硫黄化合物ジメチルスルフィド(DMS)は大気に放出され海洋上空での大気粒子形成や雲凝結核として海洋気象に大きく影響する。またDMSが誘引する海洋動物の捕食活動が、高緯度海洋での大気・表層水・深層水にまたがる「硫黄、鉄、炭素」の循環に寄与している可能性が指摘されている²⁷⁾。海洋生物がマイクロプラスチックを捕食するのはプラスチック表面を覆った藻がDMSを生じるためであるという指摘もあり^{28), 29)}、DMSの高感度なモニタリングに関心が向けられている。

• 粗大粒子の再注目(大気中マイクロプラスチック・タイヤ粉じん・ブレーキ粉じん)

大気中にもマイクロプラスチックが存在するという報告例^{30), 31)}が出始め、タイヤ・ブレーキ粉じんもマイクロプラスチックの文脈で議論されている³²⁾。大気中マイクロプラスチックは従来のPM研究対象からすると大きな粒子で呼吸器経由のばく露量は体内沈着効率を考慮するとそれほど多くないと考えられているが、マイクロプラスチックよりも小さな微小プラスチックも存在しうるため、動向が注目されている。

• 新型コロナウイルスの拡散と大気の関連性解明

2020年から世界的に流行した新型コロナウイルス感染症に関して、地域間での感染率の大きな差が注目されている。感染経路としては飛沫感染が中心と考えられているが、ウイルス自体あるいはその関連タンパク質はPM_{2.5}粒子よりはるかに小さく、これらが粒子に吸着して複合体となれば大気中を輸送され易くなる。実際

に大気中のエアロゾルには様々な微生物が存在しているが、大気環境と感染症との関連性には未解明な部分が多い。そのため大気中を運ばれた複合体の挙動や、それら複合体と感染との関連性に対する関心が、本研究開発領域でも高まっている。感染症学や疫学と大気環境学との融合が新たな展開として期待されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

• GEOTRACES 計画

国際共同研究計画 GEOTRACES は 2000 年代後半に始動した。この計画は、世界中の研究者が協力して重要な微量元素・同位体 (TEIs : Trace Elements and Isotopes) (キーパラメータは Al、Mn、Fe、Cu、Zn、Cd) の全海洋における分布を明らかにし、TEIs の分布を支配する過程やフラックスを評価し、環境変化に対する TEIs の応答を解明することを目的としている。GEOTRACES 計画によって、外洋海水を用いる TEIs 分析法の国際相互較正が初めて実現し、世界の海洋で海盆規模の詳細な鉛直断面観測が始まった。2018 年には、これまでの成果をまとめた二つめの Intermediate Data Product (IDP2017) が公表された。現在、化学海洋学は一大変革期にあり、GEOTRACES 計画は今後 3 年ごとに 2 回 IDP を公表し、その 3 年後に最終とりまとめを行う予定としている。1970 年代に実施された国際共同研究計画 GEOSECS は、放射性核種や栄養塩元素などの全海洋における分布を明らかにし、地球の生存可能性を支えている海洋大循環と海洋生物地球化学サイクルの基本的理解を導いた。GEOTRACES 計画は残りの期間で重元素安定同位体比、微量元素化学量論などの新しいビッグデータを生みだし、地球システムの理解を飛躍的に深めると期待されている。

• EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme)、AMAP (Arctic Monitoring & Assessment Programme)

国際越境大気汚染条約 (LRTAP 条約) また北極協議会 (Arctic Council) により実施されている研究、モニタリングプログラムであり、大気および極域の観測において重要な役割を果たしている。

• エアロゾル質量分析計などを利用したオンライン観測網 Chemical On-Line cOmpoSition and Source Apportionment of fine aerosol (COLOSSAL) プロジェクト

欧州科学技術研究協力機構 (COST) の支援で行われているプロジェクトの一つ。欧州全体のエアロゾル化学成分の空間的・時間的変動から発生源を一貫して評価することを目的としており、欧州をはじめ世界の多くの研究グループが、近年開発されたオンライン測定装置で大気観測を行っている。成果はモデル研究者や政策立案者に提供され大気中濃度予測の精緻化などに活用される。

• 欧州原子核研究機構 (CERN)

スイス・ジュネーブの欧州原子核研究機構 (CERN) では大型実験設備 (Cosmics Leaving Outdoor Droplets : CLOUD) でさまざまな実験が行われ、二次生成粒子や大気化学反応に関する物理的・化学的な研究が推進されている²¹⁾。

• 富士山測候所における継続的な観測

高層大気・自由対流圏における化学物質の推移をはかるために、年間延べ 400 名の研究者が標高 3,776 m にある気象庁の富士山測候所を利用し観測を行なっている。本観測に関連する論文や学会発表もデータベース化されている³³⁾。しかし 2020 年度は新型コロナウイルス感染症の影響で富士山自体が入山禁止となっ

て観測が滞り、施設の維持にも困窮している。

- 細胞外粒子に起因する生命現象の解明とその制御に向けた技術基盤の創出 (CREST)(2017年度～)

JSTのCREST「細胞外粒子に起因する生命現象の解明とその制御に向けた技術基盤の創出」領域の採択課題の1つにおいてPM_{2.5}および含有PAHなどのばく露と疾病との関連に関する研究が進められている。なおNPAH、PAH酸化体に関しては別途研究が行われており、わが国の研究グループが世界をリードしている^{34), 35)}。

(5) 科学技術的課題

- エアロゾル分析におけるオンライン測定のための課題

オンライン測定法の一つであるエアロゾル質量分析計では化学成分別の粒径分布の測定が可能だが、PMの導入口である空気力学レンズにおける粒子拡散の影響により粒径50 nm以下の粒子の測定は現状では困難となっている。また反対に粒径2.5 μm以上も臨界オリフィスのピンホールの制約上、通過しない。これらを克服するための可測粒径幅の広域化が課題となっている。また、フラグメンテーションが起こりにくい化学イオン化質量分析法によりPM測定をするためには前処理(捕集・イオン化)が必要であったため、セミオンライン止まりだったが、PMも1Hz程度の時間分解能で計測可能となる装置が2019年に開発された。ただし現状では、測定対象に合わせて溶媒を使い分け、溶解する成分に限った測定である。究極的には乾式でソフトイオン化して測定できるオンライン測定装置の開発が望まれている。

- PM_{2.5}の測定・分析技術

PM_{2.5}/エアロゾル抽出物についての遺伝子解析などから微生物の存在は確認されているが、由来を推定することはできていない。感染症原因微生物や関連タンパク質の存在とそれらの大気輸送との関連性が明らかになれば、PM_{2.5}/エアロゾル抽出物の迅速分析装置開発へのニーズが高まる可能性がある。

PM_{2.5}の捕集・計測とPAH、NPAH測定を結合した装置は発生源解析に有効であるものの、その開発は進んでいない。

- ナノ粒子やマイクロプラスチックなどの新たな課題

金属ナノ粒子やマイクロプラスチックの環境中での動態解明のためには、ピコからナノスケールの懸濁物質近傍の無機元素の環境動態を研究する必要性が認識されている。また大気中マイクロプラスチックを測定するためには、前処理が煩雑であるため、簡便な新手法の開発が急務と考えられている。更にPMのオンライン化学成分測定法が応用できれば有用と見られている。

- 水銀に関する課題

大気中水銀の形態別分析システムの精緻化が一つの重要な課題となっている。Tekran社やPS Analytical社製の連続自動分析装置が普及しているが、反応性の高いガス状水銀(RGM)の定量性については疑問が呈されている。RGMはガス状水銀の中ではマイナーな成分だが大気からの沈着フラックスを推定するうえで重要な成分とされている。

海洋では、海水中メチル水銀の高精度データを出すことのできる機関を増やしていくことが課題となっている。GEOTRACES計画のような信頼性の高いデータを取得する仕組みがさらに必要とされている。

X線吸収近傍構造 (High energy resolution (HER-) XANES) 分析については、他の分析では得られない貴重な知見が得られるという評価がある一方で、その定性性について疑問が呈されるケースもある^{36), 37)}。同手法の解析法について客観的な評価ができる専門家の育成を北米やアジアの研究者コミュニティで進めることが課題となっている。

水銀安定同位体比は、高度な分析技術を必要とすること、濃度情報と比較して直感的な解釈が困難であることから大規模なモニタリングの測定に組み込まれることは少ない。しかしばく露源解析、将来の気候変動の影響の予測、現在の環境動態や生態系機構の理解・モデル化などに有用である可能性があり、更なる実験的・観測的研究が必要とされている。

• ヒ素に関する課題

地下水のヒ素汚染は全世界的な課題であり、汚染地域の報告例も年々増加している。全容を把握するためには、その機構や空間分布についてのモデル化が必要となる。スイスETHのグループは2000年代後半以降に統計モデルを用いたリスクマップの作成に取り組んでいるが、モニタリングデータの充実を受けて、より成熟したモデルが構築されつつある。ヒ素汚染地下水は分布の空間的不均質性が大きな特徴であり、ヒ素の統計モデルのエキスパートが文化圏ごとに育成されることが好ましいと考えられている³⁸⁾。

飲料基準値の低減に関する議論があるが、ヒ素の飲料基準はコストベネフィット分析に基づき設定されており、今後さらに1 $\mu\text{g}/\text{L}$ レベルのヒ素の検出が求められた場合には簡易な計測法では困難であり、高感度分析法へのニーズが高まる可能性がある。

近年では、家畜の飼料として海藻の活用が進んでいるが、海藻が高濃度のヒ素を含むため、家畜への影響が懸念され、関連する研究が進められている³⁹⁾。日本が世界有数の海藻産国であることから、重要な研究動向として注視する必要がある。

• 大気中アンモニアの観測

大気中窒素の代表的化合物であるアンモニア (NH_3) の濃度増大傾向が世界的に指摘されている。人工衛星による赤外線吸収画像から NH_3 濃度の地理的分布が得られ、以前のデータと比較が可能だが、その報告数は現在のところ極めて少ない。地上レベルでの NH_3 の観測もほとんど行われていない。畜産場など NH_3 が高濃度に存在する特殊な場所の空気の測定には光音響法やキャビティリングダウン分光法 (CRDS)、あるいはプロトン移動反応質量分析計 (PTR-MS) などの化学イオン化質量分析計が用いられる。しかし、大気レベルでの観測には、酸含侵フィルターへの捕集などの従来法によるバッチ測定が一部の研究者で行われている程度という状況にある。大気中の硫黄化合物のうちで最も高濃度で存在する硫化カルボニル (COS) は光合成のトレーサーとしても着目されているが、ほとんど観測されていない。 NH_3 や COS の大気連続モニタリングを可能にする手法の開発が期待されている。

なお無機成分のガスを測定する際に PTR-MS などの質量分析が用いられるようになりつつある。しかし PTR は水蒸気によるプロトン交換反応を利用するため、測定対象は水蒸気よりもプロトン化エネルギーが小さい化合物に限られる。 Hg 、 Xe 、 Kr 、 I_2 などをイオン化源とするソフトイオン化も普及しつつあるが、サブ ppbv (percentage per billion in volume) や pptv (percentage per trillion in volume) オーダーを測定するには感度が不十分であり、大気レベルの観測への応用は現在のところ限定的である。

• イソプレン由来エポキシジオール (IEPOX) 関連化合物の分析

生物起源有機化合物 (BVOCs) を起源とするエポキシ関連物質、特にイソプレンから生成する IEPOX と呼ばれるエポキシジオール化合物、および IEPOX がさらに酸化やスルホ化を経て得られる IEPOX テトラール類や IEPOX 硫酸エステル類が粒子形成物質として注目されている。これら IEPOX 関連化合物の分析には高効率液体クロマトグラフィー (HPLC) - 電子スプレー飛行時間型質量分析法 (ESI-TOFMS) が用いられつつあるが、標準物質がほとんど市販されておらず、普及していない。タンデム型質量分析法 (MS/MS) などによるより高感度な分析も期待されているが、その開発においても必要な標準物質が無いことがボトルネックとなっている。

• 気体の有機化合物の分析

気体の無機化合物と同様に、気体の有機化合物、なかでも酸素官能基や窒素官能基を持つ低分子化合物は粒子形成能を有し、反応性も高く、大気粒子中にも存在する。これらの動態や粒子形成における働きを理解するには、大気中での気相と粒子相それぞれの濃度の把握が必要となる。特に二次生成粒子の形成に関わる化合物が新たにできた粒子にどれほど含まれているかを確認する手法は未だ確立されていない。

• 大気や海洋における微量無機化学物質の空間分布を把握するための分析手法・システム

動態解析を進めるための化学分析では、空間分布の把握や時間変動の追跡が必須となる。現在のところ無機化学物質、特に微量成分に対してこのような要件を満たす分析法はほとんど実用化されていない。

海洋や湖沼では、電気伝導度 (塩分)、温度、圧力 (深度) を測定する電気伝導度水温水深計用センサ (CTD センサ) が観測の基本装備となっている。通常研究船での測点では、停船中に CTD センサをアーマードケーブルに取り付けて海中を下降・上昇させて、一次元の観測を行う。このとき CTD センサと同時に動作する無機化学物質の現場自動分析機器はいくつか開発されている。これらの機器は、海底熱水活動起源のマンガンや鉄のように海水濃度より数桁高い濃度を検出できるが、外洋のバックグラウンド濃度の測定は難しい。ボートや自律型無人潜水機などに現場自動分析機器を搭載し、小回りの利いた観測が行われているが、この場合も分析対象が限られる。

現在進行中の Argo 計画では、全球の水温・塩分プロファイルを即時的に観測するために、水深 2,000 m から海面までの水温・塩分を約 10 日毎に観測するアルゴフロート 3,000 本を全世界の海洋に展開し、その観測データをリアルタイムに配信することを目指している。アルゴフロートは漂流深度 (通常 1000 m) で約 10 日間漂流した後、設定された最高圧力深度 (通常 2000 m) まで沈み、水温と塩分を観測しながら浮上する。フロートは海面でデータを人工衛星に送信し、再び漂流深度に沈む。このような観測を行える無機化学物質の現場自動分析機器は存在しない。大気ではドローンへの観測機器の搭載が実施されているが、現在のところ簡易なセンサに限られ、大気化学を司る成分への適用は未着手な状況にある。

(6) その他の課題

• 大規模データを集約、解析するツールや仕組みの整備

先端的な環境・生体分析の結果として算出されるマッピングや多元素データなどの大容量データを効率よく集約、解析するツールの普及や仕組みの整備が十分に進んでいない。結果として先端的な計測により得られたデータを生態毒性学やヒト臨床の課題解決に繋げることができていない。

• 標準物質の開発および供給体制の強化

レーザーによる固体分析や個別細胞分析など、さまざまなサンプル導入法ごとに適切な標準物質が必要になる。同位体比測定における同位体標準は、現在米国国立標準技術研究所 (NIST) の供給する標準を基準にしているが、作成ロットの枯渇などで入手困難なものもある。またこうした純物質だけでなく、分析の信頼性評価のためのマトリックス標準物質も必要になる。わが国では産業技術総合研究所がこうした標準物質を開発・頒布しているが、多様なアプリケーションすべてをカバーすることはできていない。先端計測を支える基本的な標準物質の開発及び供給が、焦点の課題となっている。

• 人材不足・人材育成

分析化学、地球化学、環境化学分野の基礎研究を指向する国内の研究室が減少している。そのような研究に進もうとする学生も減少しつつある。分析化学会、海洋学会、地球化学会などのさまざまな学会で学生の減少、特に次世代を担うべき博士課程学生の減少が大きな問題となっている。結果として標準物質の開発のような最もベーシックな分析化学を担う人材も不足している。

アジア規模でも大気化学について基礎的な観点から取り組んでいる研究者が少ない。アジアでは汚染物質の計測や追跡を主眼に置いた研究が主流で、基礎研究については欧米からの論文発表が多い。ただし中国では基礎研究の成果が増加しつつある。

日本においてこれからの研究や技術開発を推進するには、基礎的な部分を理解した上で俯瞰的に物事を捉え、考えることのできる人材を育成していく必要があると認識されている。無機元素の環境動態や生態系機構に関する分野では、モデル研究と観測研究を融合させた研究課題に継続的に取り組む研究者の育成が必要と考えられている。

• 先導的なプログラムの不在

日本は水俣病をはじめとする各種公害病や環境汚染を経験してきた中で生物モニタリングや血液などのヒト試料を用いた長期的なモニタリング (Human Biomonitoring) における基盤的ノウハウを有しているが、現状、それらを活かした先導的なプログラムは企画・遂行されていない。

• ヘリウムガスの不足

世界的に需要と供給のバランスが崩れている He ガスが入手困難となっており研究上のネックとなっている。

• 研究機器・設備に関する課題

海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の学術研究船・白鳳丸は日本の海洋学における基礎的研究を支えてきた基盤的研究船である。竣工後30年が経過し、研究船本体および採水システムなどの基本装備の更新が急務となっていた。ところが新船の建造は国の財政上困難な状況で、代わりに改修による延命が図られることとなった。また陸水や沿岸域の研究には各大学の臨湖・臨海研究施設とその研究船が大きな役割を果たしてきたが、大学の運営交付金の削減が続くなか、これらの施設や研究船の維持・更新も極めて困難な状況になっている。このようにして日本の海洋学の基盤が危うくなっており、地球科学・環境科学の発展のためにも、水圏観測技術の維持・拡充が必要とされている。

先端的な無機分析機器はほぼすべて欧米製である。欧米では、先端的な装置を大学や研究所と共同開発し、販売数は少なくとも、世界展開によって成功している企業がある。しかし、このような戦略は日本の企業では

ほとんど見られない。ある日本企業が開発した無機元素の自動濃縮装置は優れた性能をもち、価格も手ごろであったが、国内だけでは販売数が少なかったことから製造中止になった。

日本の大学では高価な最先端装置を維持するための経費および技術支援員を持続的に確保することが極めて難しい状況にあり、持続性の点で根本的な課題がある。

(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"> ●PM_{2.5}とPAH類などの含有有害化学物質の動態と健康影響についての研究が世界のトップレベルにある。現在はCREST「細胞外微粒子により惹起される生体応答の機序解明と制御」領域において関連プロジェクトが採択され進められている。その他には科研費や環境省の環境研究総合推進費などで個別に研究が実施されている。 ●トリプル四重極 ICP-MSを用いた金属ナノ粒子分析手法開発が継続して実施されている。 ●ヒ素に関してイネを対象としたプロジェクトが農水省で継続されており、移行過程についての報告が多数出ている。水銀に関しては研究者数は欧米に比べるとまだ少ないが広域的な水銀動態研究に取り組む研究グループが出てきている。 ●若手人材の不足や基盤的研究機器・設備の衰退が深刻化している。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●環境化学分野は分析機器関連企業にとってはニーズはあるがニッチな場合があり、開発費と売り上げ予想とのバランスから必ずしも積極的でないケースがある。一般的に、環境基準が設けられ公定法に取り上げられる可能性があるると、開発は進みやすくなる。 ●全海洋の微量元素の挙動・動態解明を目指すGEOTRACES計画において、太平洋などでの観測を継続している。 ●オンライン測定装置の開発とその応用が進められているが、国際的な広がりはまだこれからという状況。 ●燃焼由来PM_{2.5}とPAH、NPAH類の発生源解析法を世界に先駆けて開発するなど先導的な研究を実施している。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●高度な分析機器を使用した論文が多数出ている。 ●水銀に関しては、大気・海洋・安定同位体の各分野に有力な科学者を有して基礎研究を牽引。 ●NSF、NASA、EPA STARプログラム、SBIRプログラム、エネルギー省Atmospheric System Research Programなどの予算の支援により、オンライン測定装置の開発、それを適用した二次生成に関する実験的研究やモデル研究が盛んにおこなわれている。これらにより国内研究機関や大学、民間企業（Aerodyne Researchなど）が、欧州の大学や企業とも連携して、世界の研究トレンドを生み出している。 ●NASAやNSFの火星探査や南極（海）調査のための資金の中で分析法の開発にかかるプロジェクトが含まれている。 ●トランプ政権の科学技術軽視はアメリカ地球物理学連合でも大きな問題と認識されていた⁴⁰⁾。環境関連研究、とりわけPM_{2.5}関連の基礎研究は停滞している。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●GEOTRACES計画、北極研究（ブラックカーボンなど）、地下水調査（USGSなど）、National Atmospheric Deposition Program（降水中元素、大気水銀、降水中水銀）などのプログラムやプロジェクトが継続して実施されている。

				<ul style="list-style-type: none"> ●トップレベルの分析機器メーカーが北米に本拠地を持つなど、高い技術水準を有している。また大学研究室と密接な関わりを持つメーカ(例: TSI社)が世界的な市場を席巻している。ミネソタ大学などの研究成果を素早く製品に反映させており、個数計測などの物理的計測の最先端技術を持っている。
欧州	基礎研究	◎	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●常にEU領域内の国間分析法の調和が図られている。各種モニタリングプログラムが走っており、GEOTRACESのような国際共同観測計画も堅実にリードしている。高度な分析機器を使用した論文が多数出ている。 ●欧州科学技術研究協力機構(COST)の支援でエアロゾル質量分析計などを利用したオンライン観測網プロジェクト(COLOSSAL)が推進されている。蓄積されるデータだけでなく、国際的な人的交流を促進させる場としても大きな意味合いがある。 <p>【スイス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●Swiss National Science Foundationの支援などの下、スイス連邦工科大学(ETH)のチューリッヒ校やポール・シェラー研究所が中心的な役割を果たしている。ポール・シェラー研究所は研究機関であるのみならず、多くの企業との連携も行っている。なかでもTofwerkとの連携は飛行時間型質量分析計とイオン移動度分光計の開発で大きな成功を収めている。同研究所は、大気化学の分野におけるノウハウと、テストおよびパフォーマンス評価のためのインフラストラクチャを提供することで、メーカーとWin-Winの関係を保っている。 <p>【その他】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●水銀に関してはフランスの複数機関(ポー大学、トゥールーズ環境地球科学研究所、フランス海洋開発研究所)が世界トップレベルの研究を展開。ヒ素に関しては英国が歴史的に研究実績が豊富。特にクイーンズ大は揮発性ヒ素の動態研究で世界をリードしている。スイスの連邦水科学技術研究所はアジアのヒ素汚染研究についてベトナムを中心に幅広い研究を展開し分野をリードしている。
	応用研究・開発	◎	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●トップレベルの分析機器メーカーが欧州に本拠地を持つなど、高い技術水準を有している。 ●英独仏を中心にGEOTRACESを継続している。またGlobal Observation System for Mercury(GOS4M)で地球規模大気水銀の観測を継続している。 <p>【北欧諸国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●北極における水銀観測を継続的に行っている(AMAP)。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●論文の数が急増しており質も向上している。地球化学や海洋学分野では研究者数、発表数の増加は顕著であり、発表数についてはすでに日本を超えている。大規模な研究所や大学の学部・学科の整備、基盤的な機器・設備の導入・拡充が国の重要施策として進められていることを背景に、多くの研究が実施されている。ただし基礎的な考察やデータのち密さにおいては未だ改善余地のあるものが散見される。 ●北京米国大使館でモニタリングされたPM_{2.5}濃度のデータが公表されたことに端を発した2013年の騒動をきっかけに、PM排出低減対策とともに、モニタリングも重視され、欧米メーカーの高価なオンライン測定装置が数多く導入された。 ●国際誌に発表されるPM_{2.5}とPAH類のモニタリング関連の論文数は、国内に題材が多いこともあり、今や中国が世界で最も多い状況となっている。こうした研究では、中国科学院(PM分野では地球環境研究所と大気物理研究所など)に在籍する研究者の活躍がめざましい。多くは欧米で学位を取得した若手研究者である。

				<ul style="list-style-type: none"> ●PM排出低減対策が進んでいる国と汚染レベルが異なることから、フィールドとしての魅力もあり、欧米研究機関との共同研究や人的交流が盛ん。 ●水銀に関する研究でも、貴陽の地球化学研究所が卓越した研究成果を産生している。欧米から戻ってきた優秀な若手研究者が各地に赴任しており、人材育成も堅調である。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●欧米製や日本製分析装置のパーツや装置の同等品を試作し販売するまでに至っている。大学研究者自らによる商品化も珍しくない。 ●PM_{2.5}とPAH類に関する基礎研究を受け、国内企業と連携して装置開発を活発に行っている。 ●水銀に関しては水圏や大気環境動態に関する研究を精力的に実施している。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●研究コミュニティが日本に比べてまだ小さい。研究発表も少ない。ただし欧米でトレーニングを受けた研究者が韓国国内の大学ポストに着任し、同位体などの無機元素に関する研究を行っている。 ●2020年から大気汚染対策予算が拡充し、PM_{2.5}越境輸送の影響を最も強く受ける中国との協力を進めることとしている。日本との共同研究に積極的であるようには見えない ●ヒ素については、光州科学技術院のグループが地下水のヒ素汚染に関する研究を幅広く展開している。また水銀については、光州科学技術院のグループが海洋の水銀動態研究の拠点として力をつけている
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●研究コミュニティが日本に比べてまだ小さい。研究発表も少ない。
その他の国・地域	基礎研究	△	↗	<p>【アジア】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●Asia Oceania Geosciences Society、Western Pacific Geophysics Meeting、Asia-Pacific Winter Conference on Plasma Spectrochemistryなどのアジアを中心とする国際会議が増加し、国際交流が強化されてきた。 <p>【インド】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●海洋環境中の微量元素の動態を明らかにするための高感度な分析装置の整備が進められている。
	応用研究・開発	△	↗	<p>【シンガポール】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●水に特化したプロジェクトが盛ん。南洋理工大学に隣接した研究開発区のClean Tech Oneに各国の企業がサテライトラボを持っている。 <p>【インド】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●全海洋の微量元素の挙動・動態を明らかにしようとしているGEOTRACESにおいて、インド洋での海洋観測を近年活発化させている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

関連する他の研究開発領域

- ・有機化学物質分析・毒性評価 (環境・エネ分野 2.2.6)
- ・ナノ・マイクロマテリアルのELSI/EHS、国際標準 (ナノテク・材料分野 2.7.1)

参考・引用文献

- 1) F-Z. Teng, J. M. Watkins and N. Dauphas, Non-Traditional Stable Isotopes, J. J. Rosso ed., *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 82 (Washington : Mineralog-ical Society of America, 2017), <http://www.minsocam.org/msa/RIM/Rim82.html> (2021年1月18日アクセス)
- 2) Y. Fujiwara et al., “Determination of the tungsten isotope composition in seawater : The first vertical profile from the western North Pacific Ocean”, *Chem. Geol.* 555 (2020) : 119835, doi : 10.1016/j.chemgeo.2020.119835
- 3) J. Kangasluoma et al., “Overview of measurements and current instrumentation for 1–10 nm aerosol particle number size distributions”, *Journal of Aerosol Science* 148 (2020) : 105584, doi : 10.1016/j.jaerosci.2020.105584
- 4) A. Tiwari et al., “Sub-10 nm Particle Emissions from Industrial 3D Printers”, 36th AAAR Annual Conference Abstracts (2017) : Session#5, <http://aaarabstracts.com/2017/AbstractBook.pdf> (2021年1月18日アクセス)
- 5) 日本カノマックス, 「ポータブルパーティクルカウンター Model 3910」『KANOMAX』, http://www.kanomax.co.jp/product/index_0042.html (2021年1月18日アクセス)
- 6) 紀本電子, 「大気エアロゾル化学成分連続自動分析装置」『KIMOTO』, <https://www.kimoto-electric.co.jp/product/air/ACSA14.html> (2021年1月18日アクセス)
- 7) K. Nishiguchi, K. Utani and E. Fukimori, “Real-time multielement monitoring of airborne particulate matter using ICP-MS instrument equipped with gas converter apparatus”, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 23 (2008) : 1125-1129, doi : 10.1039/b802302f
- 8) 萩野浩之, 「7. エアロゾルの無機成分分析」『エアロゾル研究』 33巻1号 (2018) : 40-49, doi : 10.11203/jar.33.40
- 9) S. Theiner et al., “Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma Time-of-Flight Mass Spectrometry Imaging of Trace Elements at the Single-Cell Level for Clinical Prac-tice”, *Anal. Chem.* 91, no. 13 (2019) : 8207-8212, doi : 10.1021/acs.analchem.9b00698
- 10) T. Nakayama et al., “Development and evaluation of a palm-sized optical PM2.5 sensor”, *Aerosol Science and Technology* 52, no. 1 (2017) : 2-12, doi : 10.1080/02786826.2017.1375078
- 11) T. Zheng et al., “Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments”, *Atmospheric Measurement Techniques* 11, no. 8 (2018) : 4823-4846, doi : 10.5194/amt-11-4823-2018
- 12) M. Levy Zamora et al., “Field and Laboratory Evaluations of the Low-Cost Plan-tower Particulate Matter Sensor”, *Environ. Sci. Technol.* 53, no. 2 (2019) : 838-849, doi : 10.1021/acs.est.8b05174
- 13) United States Environmental Proection Agency (EPA) , “Air Sensor Toolbox”, EPA, <https://>

www.epa.gov/air-sensor-toolbox (2021年1月18日アクセス)

- 14) 板井啓明, 「進歩総説 環境中の水銀分析に関する研究の動向」『ぶんせき』11巻 (2018) : 492-496, <https://ci.nii.ac.jp/naid/40021741363>
- 15) P. Houssard et al., “A Model of Mercury Distribution in Tuna from the Western and Central Pacific Ocean : Influence of Physiology, Ecology and Environmental Factors”, *Environ. Sci. Technol.* 53, no. 3 (2019) : 1422-1431, doi : 10.1021/acs.est.8b06058
- 16) A. T. Schartup et al., “Climate change and overfishing increase neurotoxicant in marine predators”, *Nature* 572 (2019) : 648-650, doi : 10.1038/s41586-019-1468-9
- 17) T. Kawai, T. Sakurai and N. Suzuki, “Application of a new dynamic 3-D model to investigate human impacts on the fate of mercury in the global ocean”, *Environmental Modelling and Software* 124 (2020) : 104599, doi : 10.1016/j.envsoft.2019.104599
- 18) L. Liu et al., “Temporal characteristics of atmospheric ammonia and nitrogen di-oxide over China based on emission data, satellite observations and atmospheric transport modeling since 1980”, *Atmos. Chem. Phys.* 17, no. 5 (2017) : 9365-9378, doi : 10.5194/acp-17-9365-2017
- 19) J. X. Warner et al., “Increased atmospheric ammonia over the world's major agri-cultural areas detected from space”, *Geophysical Research Letters* 44, no. 6 (2017) : 2875-2884, doi : 10.1002/2016GL072305
- 20) M. Takahashi et al., “Air pollution monitoring and tree and forest decline in East Asia: A review”, *Science of The Total Environment* 742 (2020) : 140288, doi : 10.1016/j.scitotenv.2020.140288
- 21) M. Wang et al., “Rapid growth of new atmospheric particles by nitric acid and ammonia condensation”, *Nature* 581, no. 7807 (2020) : 184-189, doi : 10.1038/s41586-020-2270-4
- 22) M. Kumar et al., “Molecular insights into organic particulate formation”, *Communications Chemistry* 2, no. 1 (2019) : 87, doi : 10.1038/s42004-019-0183-7
- 23) A. L. Robinson et al., “Rethinking Organic Aerosols: Semivolatile Emissions and Photochemical Aging”, *Science* 315, no. 5816 (2007) : 1259-1262, doi : 10.1126/science.1133061
- 24) A. T. Lambe et al., “Nitrate radical generation via continuous generation of dini-trogen pentoxide in a laminar flow reactor coupled to an oxidation flow reactor”, *Atmospheric Measurement Techniques* 13, no. 5 (2020) : 2397-2411, doi : 10.5194/amt-13-2397-2020
- 25) Z. Peng and J. L. Jimenez, “Radical chemistry in oxidation flow reactors for atmospheric chemistry research”, *Chem. Soc. Rev.* 49, no. 9 (2020) : 2570-2616, doi : 10.1039/c9cs00766k
- 26) K. Hayakawa et al., “Calculating sources of combustion-derived particulates using 1-nitropyrene and pyrene as markers”, *Environ. Pollut.* 265, Part B (2020) : 114730, doi : 10.1016/j.envpol.2020.114730
- 27) M. S. Savoca, “Chemoattraction to dimethyl sulfide links the sulfur, iron, and carbon cycles in high-latitude oceans”, *Biogeochemistry* 138, no. 1 (2018) : 1-21, doi : 10.1007/s10533-018-0433-2
- 28) J. Procter et al., “Smells good enough to eat : Dimethyl sulfide (DMS) enhances copepod

- ingestion of microplastics”, *Marine Pollution Bulletin* 138 (2019) : 1-6, doi : 10.1016/j.marpolbul.2018.11.014
- 29) M. S. Savoca et al., “Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds”, *Sci. Adv.* 2, no. 11 (2016) : e1600395, doi : 10.1126/sciadv.1600395
- 30) S. Allen et al., “Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics”, *PLoS One* 15, no. 5 (2020) : e0232746, doi : 10.1371/journal.pone.0232746
- 31) J. Brahney et al., “Plastic rain in protected areas of the United States”, *Science* 368, no. 6496 (2020) : 1257-1260, doi : 10.1126/science.aaz5819
- 32) N. Evangelidou et al., “Atmospheric transport is a major pathway of microplastics to remote regions”, *Nature Communications* 11 (2020) : 3381, doi : 10.1038/s41467-020-17201-9
- 33) 富士山測候所を活用する会, <https://npofuji3776.org> (2021年1月18日アクセス)
- 34) K. Hayakawa, ed., *Polycyclic aromatic hydrocarbons : Behavior and toxicity in East Asia* (Singapore : Springer Nature, 2018) , <https://www.springer.com/gp/book/9789811067747>
- 35) K. Hayakawa and N. Suzuki, eds., Special Issue “Recent Advances in polycyclic aromatic hydrocarbons research : Occurrence, fate, analysis and risk assessment” (Basel, Switzerland : Int. J. Environ. Public Health, 2020) , https://www.mdpi.com/journal/ijerph/special_issues/PAHs (2021年1月18日アクセス)
- 36) A. K. James et al., “Rethinking the Minamata Tragedy : What Mercury Species Was Really Responsible?”, *Environ. Sci. Technol.* 54, no. 5 (2020) : 2726-2733, doi : 10.1021/acs.est.9b06253
- 37) C. Tohyama, “Comment on “Rethinking the Minamata Tragedy : What Mercury Species Was Really Responsible?”, *Sci. Technol.* 54, no. 13 (2020) : 8486–8487, doi : 10.1021/acs.est.0c01971
- 38) J. Podgorski and M. Berg, “Global threat of arsenic in groundwater”, *Science* 368, no. 6493 (2020) : 845-850, doi : 10.1126/science.aba1510
- 39) M. Mac Monagail et al., “Quantification and feed to food transfer of total and in-organic arsenic from a commercial seaweed feed”, *Environ. Int.* 118 (2018) : 314-324, doi : 10.1016/j.envint.2018.05.032
- 40) R. Showstack, “Climate Research Funding Still Under Threat, Report Warns”, *Eos* 99 (2018) , doi : 10.1029/2018EO101407

2.2.8 生態系・生物多様性の観測・評価・予測

(1) 研究開発領域の定義

生態系や生物多様性の空間的な分布や時間的な変動を様々なスケールや切り口から観測、評価、予測するための研究開発に係る領域である。陸域、陸水域、海域の観測のための各種技術を対象に含む。例えば追跡技術としてロガーや音声等、衛星・航空機観測技術として衛星やその他のリモートセンシング、画像解析技術として衛星データ等、生物学的情報の取得として環境DNA等、その他にIoT・センサネットワーク、大規模・長期観測、データ基盤・配信システムとしてデータベース構築等が含まれる。また生態系や生物多様性の形成・維持機構の解明や将来予測を目的としたモデル開発、気候変動による影響の予測・評価を対象に含む。

(2) キーワード

生物多様性、生態系機能、生態系サービス、生態系モニタリング、自然を基盤とした解決策 (NbS: Nature-based Solutions)、機械学習、統計モデル、リモートセンシング、オープンデータ、ビッグデータ

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

国際連合の「生物多様性条約 (CBD)」、「持続可能な開発目標 (SDGs)」などに見られるように、生物多様性の保全と持続可能な利用の必要性は国際社会において広く認識されている。関連条約を受けて2012年に設置された「生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学-政策プラットフォーム (IPBES)」では、生物多様性や生態系の現状や変化の科学的評価、政策立案支援などが行われ、科学的見地から効果的・効率的な取組みの推進を支えている。

生物多様性や生態系に関する研究開発は、野生生物や自然環境の保全や保護の観点だけではなく、システムとしての生態系の仕組みの理解、システムの安定性や生物多様性が維持される要因の解明を目的とする。その結果、学術的興味を深化させるだけではなく、環境悪化の予測や防止、生態系の保全、環境の修復や再生について検討することが可能になる。また近年では地球システム科学分野において、全球スケールの炭素・水循環や気候変動予測の精度向上のためにも、生態系に関する知見がこれまで以上に重視されている。しかし、多様で複雑な自然界の理解はいまだ限定的であり、個々の種や群集の動態を追う地道な研究の他にも、新たな技術や手法と施策が融合した対応が求められている。近年は、食料や水、気候の安定、文化、景観などの生物多様性を基盤として人間が享受する生態系サービスの重要性が認識され、持続的な利用のための評価や仕組みづくりも重要な課題とされている¹⁾。現在の生態系観測と予測評価の技術躍進は目覚ましい。情報技術、センシング技術、遺伝情報の解析技術、機械学習等の統計モデル、生物や物理プロセスを網羅したモデルなどさまざまな技術的解決が見られる。

生物多様性の保全と利用は、「気候変動に関する国際連合枠組条約 (UNFCCC)」のパリ協定をはじめとした、気候変動の緩和と適応に関わる研究領域でもであると認識されつつある。国家管轄権外区域の海洋生物多様性、遺伝資源の取得の機会及びその利用から生ずる利益の公正かつ衡平な配分、越境汚染などに関する外交や国家間交渉においても生物多様性に関する科学的知見が重要な要素となっている。国連は、2019年に、2021～2030年を生態系修復の10年と位置付け、国連環境計画 (UNEP) と国連食糧農業機関 (FAO) 主導の下で、劣化または破壊された生態系を回復する取組みを行い、大規模に展開することを目指している。これらを背景として、現在、2030年までの生物多様性条約の新たな目標を定めるための議論が進みつつあ

り²⁾、より定量的な生態系・生物多様性の観測・評価・予測が求められている。

なお生物多様性条約 (CBD) 事務局は、愛知目標 (2010年のCBD第10回締約国会議で採択された2020年までの20の目標) に関する最終評価文書「地球規模生物多様性概況第5版 (GBO5: Global Biodiversity Outlook5) を、2020年9月に公表した。これによると、愛知目標の達成状況は、部分的な達成が見られた目標が全20のうち6目標あったのみとなった (外来種侵入経路把握、陸・海の保護地域の拡充、遺伝資源利用の利益配分の仕組み構築 (名古屋議定書発効)、国家戦略の策定、科学技術の推進、資源の倍増)。条約加盟国 (196か国) のうち生物多様性に関する国家戦略を策定した国は86% (168か国) にのぼるが、大半は2016年頃に策定されたという状況であり、今後、その取組みが活発化することが期待されている。

[研究開発の動向]

(国際的取組みの変遷)

生物多様性の研究は生物の個体群や群集を対象とした自然史研究に由来する。20世紀前半には個体群動態についての数理的な基盤が生まれ、その後も個体群や群集の安定性に関する理論研究や、島嶼生物地理学にみられるようなマクロな視点からの研究などが行われてきた。1960年代以降、経済発展と人口増加に伴う環境破壊や汚染、土地改変が進展するにつれ、自然環境を理解することに対する社会的な関心が国内外を問わず高まってきた。1986年、国際科学会議は、「地球圏-生物圏国際協同研究計画 (IGBP)」の実施を決定した。IGBPの目標は、「今後100年間における地球の状況を知るに必要な情報を集めること」であった。その後、1992年の環境と開発に関する国際連合会議 (いわゆる地球サミット) では、「気候変動に関する国際連合枠組条約 (UNFCCC)」と「生物多様性条約 (CBD)」が提起され署名が開始された。その後、IGBPの一連の活動は、UNFCCCに関連した「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」や、「地球環境変化の人間の側面国際研究計画 (IHDP)」、「生物多様性科学国際協同計画 (DIVERSITAS)」、「世界気候研究計画 (WCRP)」と統合され、現在の「フューチャー・アース」に継承されている。

1993年に「長期生態学研究ネットワーク (ILTER)」が設立され、参加各国・地域 (現在2020年8月時点で44ヶ国、800サイト以上が登録) が長期観測に基づく生態系や生物多様性の変化に関するデータの収集と公開を行うとともに、データ・知見の共有を図って大陸や地球規模の研究課題への取り組みを促進している³⁾。1999年には、生物種に関するデータ収集の国際プロジェクトである「地球規模生物多様性情報機構 (GBIF)」が発足した。その後、海洋生物についても、「国際海洋データ情報交換システム (IODE)」や「海洋生物多様性情報システム (OBIS)」が発足し整備されてきた。これらのように、博物館標本情報や観測データに基づく生物多様性の空間情報のデータ収集と公開が着実に拡充されてきた。2005年には、気候や気象、生態系・生物多様性を含む地球環境の変化を多角的に監視・検出することを通じて持続可能な社会の発展に寄与することを目指す「地球観測に関する政府間会合 (GEO)」が発足した。2008年には、「全球地球観測システム (GEOSS)」の一環として生物多様性を観測する「生物多様性観測ネットワーク (GEO-BON)」が発足し、生物多様性を間接的に推定する指標群が提案されてきた⁴⁾。気候変動を含む地球環境問題の解決には全球での取組に加えて大陸・地域レベルでの観測および意思決定に有用な知見と情報の創出が重要という認識から、2017年には地域GEOSSイニシアティブがGEOの下に構成され、日本はAsia Oceania GEOSSイニシアティブ (2017~2019年) に参加した。その後、AOGEO (2020~2022年) となり、「国から地域へ」、「グローバルな地球観測と知見の創出・共有」、ならびに「人材・能力開発」が掲げられている。2020年、GEO-BONの事務局はカナダ・モントリオールに移行し、産官学の協働をもとにした生態系観測とモニタリングが継続されている。

(近年の研究開発動向)

第6の大量絶滅の時代とも評される現在、生物多様性の現状と将来予測を把握するための取り組みが地域レベルから国際レベルまで実施されている。衛星やドローンなどによるリモートセンシング、観測機器や環境DNAなどを用いた地上観測ネットワークの発展が著しい。これらにより、遺伝子から生態系レベルまでの生態系・生物多様性のモニタリングが進められている。さらには、生物種の分布と変動を予測するための統計モデルや機械学習などのツールも発展しており、種分化や進化を含めた生物多様性の形成や維持に関わるプロセスを探る理論と実証研究も着実に進展している。具体事例を以下に挙げる。

地球環境に関する衛星観測データの公開が近年ますます進んでいる。代表的なものにランドサット衛星のデータ（1972年より運用）の無料公開がある。これを利用することで全球の森林の変化など⁵⁾の定量評価が進んでいる。より解像度の高いものにはセンチネル-2の衛星画像データがある。可視・赤外域の放射計測については、NASAの地球観測衛星Terra/Aquaに搭載されている光学センサMODIS（中分解能撮像分光放射計）が2001年から運用されている。またこれらのデータを一括してクラウド上で解析するツールの普及も進んでおり、Google Earth Engineが良く知られている。これにより、例えば毎年の季節ごとの正規化植生指数（NDVI）を全球で一括して計算することも可能になり、地域から全球スケールまでの生態系の変化の把握に貢献している。マイクロソフト社も、「AI for Earth」というプロジェクトを始め、深層学習を活用して衛星画像データから土地利用変化の評価・予測を行ったり、写真データで生物種を同定したり、カメラトラップデータの解析を行うなどの、生態系と生物多様性の観測・評価のクラウドサービスを通じた支援を推進している。

地上観測のための技術では、ドローンなどの無人航空機（UAV）の活用が普及している。水中では無人水中探査機（ROV）の活用に加えて音響を使った観測技術の向上も見られる。バイオロギング・テレメトリー技術も進展しており、生物の個体群動態追跡などに活用されている。また、生物に関するウェブ上の百科事典である「Encyclopedia of Life (EoL)」の拡充や、DNAバーコーディング技術のためのライブラリ構築を行う「International Barcode of Life Project (iBOL)」も進んでいる。近年のゲノム科学の進展に伴い、生物間の相互作用や環境変化の影響把握、あるいは環境DNAによる効率的な生物分布の把握も急速に進んでいる⁶⁾。

観測およびデータ公開だけでなく、生物多様性・生態系の予測のためのモデル開発も進んでいる。機械学習ツールの普及も著しく、観測、モニタリングを通じて蓄積されてきたビッグデータの活用に生かされている。例えばGBIFなどの生物分布情報と環境データを用いて各生物種の地理的分布予測を行うモデリング手法「生態ニッチモデリング」ではMaxentなどのモデルが幅広く使われているが、ランダムフォレストやニューラルネットワークなどの機械学習を利用したモデルも利用されている。海洋では海洋生態系モデルのAtlantisが良く知られている。更に統計モデルについては、状態空間モデルを含む階層ベイズモデルなどの確率分布や非線形性、不確実性を高度に取り入れた手法の利用が進んできている。

以上のような技術的進展と同時に、生物多様性が生態系機能を如何に支え、その結果として「自然の恵み」としての生態系サービスをどのように支えているのかについての実証研究も進んでいる¹⁾。現在、さまざまな政策レベルで自然環境の再生と保全が社会・経済・環境に関わる様々な問題解決に必須と捉えられつつあり⁷⁾⁻⁹⁾、生態系・生物多様性の観測・評価・予測の必要性が一層高まっている。

(国内動向)

1990年に日本学術会議が国際的な流れを踏まえてIGBPの実施勧告を行った。これを受けてIGBPのコアプロジェクトとして「地球変化と陸域生態系研究計画（GCTE）」が計画され、極東から東南アジアに

かけた生態系観測の基礎が築かれた。この枠組みは現在も「西太平洋アジア生物多様性研究ネットワーク (DIWPA)」として引き継がれている。

政策的な動きとしては、2015年に公開された「今後10年の我が国における地球観測の実施方針」(科学技術・学術審議会 第6期地球観測推進部会)で生態系・生物多様性を含む地球環境の保全と利活用の両立を実現する地球環境観測の重要性が議論された。2016年に閣議決定された科学技術基本計画では、生物多様性と生態系を人間社会の存立基盤をもたらす自然資本と位置付けている。生態系のモニタリングや維持・回復技術等の研究開発を推進し、生物多様性の保全を進めること、生態系機能の活用技術の開発を進めることが喫緊の課題とされている。2020年には「今後10年の我が国の地球観測の実施方針フォローアップ報告書」が第8期地球観測推進部会によって議論され、2010年に愛知目標とともに採択された「生物多様性戦略計画2011-2020」への貢献は、SDGs、パリ協定、仙台防災枠組等とともに重要な課題であると明示されている⁹⁾。

観測データの収集・蓄積に関しては、国内では環境省の「モニタリングサイト1000」や「日本長期生態学研究ネットワーク (JaLTER)」等の枠組みを通じた生態系モニタリングおよびそのデータ公開が進んでいる。国際的な取り組みであるGBIF、OBIS、GEO-BON、ILTER、iBOLに貢献するための日本ノードもそれぞれ設立されている (JBIF、BISMaL、J-BON、JaLTER、JBOLI)。GEO-BONに関しては2009年に「アジア太平洋生物多様性観測ネットワーク (APBON)」も設立された。APBONは上述のAOGEOのタスクグループの1つである。微生物に関する多種多様な情報を遺伝子・系統・環境の3つの軸に沿って整理統合したデータベースである「MicrobeDB.jp」といった、遺伝子情報のデータベースの整理も進んでいる。また国立遺伝学研究所が管理とデータ公開をしているDNA塩基配列のデータベースとして、「DNA Data Bank of Japan (DDBJ)」もある。環境DNAの活用も急速に普及しており、2018年に環境DNA学会が発足している。観測データの収集・蓄積を科学的な活動として評価する動きもある。日本生態学会の英文誌 Ecological Research で Data Paper というデータ提供に特化した学術論文のセクションが追加されている。

観察や観測だけではなく、評価や予測の分野でも研究が進捗している。気候変動による陸面植生の変化や、その結果起こる大気・陸との相互作用の変化などをシミュレーションする動的全球植生モデル (SEIB-DGVM) の開発が進みつつある。状態空間モデルや機械学習を利用した生態系評価も行われており、既存データの拡充と利用の双方が望まれている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

- ・ 米国航空宇宙局とメリーランド大学が、生態系観測のミッション (GEDI) を推進している。国際宇宙ステーションからレーザー測量 (LiDAR) を行うことで森林による炭素隔離と蓄積の推定精度を向上させることを目的としており、2020年1月に最初のデータが公開された。
- ・ 2017年に気候変動観測衛星「しきさい (GCOM-C)」が打ち上げられ、海洋や陸域環境の観測が強化された。温室効果ガス観測技術衛星「いぶき (GOSAT)」は大気中CO₂、CH₄観測を継続している。陸上植生ではCO₂、CH₄や水蒸気フラックス研究 (FLUXNET) の進展が見られる。海洋では世界気象機関 (WMO) によるArgo計画で全球海洋の水温や酸性度の観測密度の増加およびデータ統合、取得情報の高度化・高品質化が進められている。
- ・ 局所的なりモートセンシングで無人航空機 (UAV) に代表されるような小型かつ自律的な観測・計測技術が普及している。地理的に複雑な場所や火山現場など接近困難な場所等における観測など、幅広い用途が検討されている。海洋分野においては技術的にはUAVに相当する無人探査機 (AUV)、無人洋上機 (ASV)

が開発され、海洋保護区でのモニタリングに活用するなどの検討も進められている。水中音響技術の蓄積も進み、音響データ合成開口技術や地層データの自動合成などが試みられている。得られたデータの解析では機械学習の活用が広がっている。関連する画像処理技術、例えばStructure from Motion (SfM)のような画像結合技術を研究に取り入れる試みもある。こうした新しいデータ取得ツールの台頭は政策的な動きにも影響を与えている。米・海洋大気庁 (NOAA) は (1) Uncrewed Systems (UxS)、(2) Artificial Intelligence (AI)、(3) Cloud Computing、(4) Omics、(5) Data、(6) Citizen Scienceの6つの戦略を策定し、公開した。各種研究や実務への応用を見越して積極的に研究開発に取り組む姿勢を見せている。

- ・ データロガー、マイコン、カメラ、レコーダー、測位・情報通信技術の普及により、生物と環境に関する局所スケールでのトラッキングやデータロギングが可能となっている。小型動物や海洋生物についての行動データ、陸上植生の季節性の年変動や地理的分布に関する画像データ、生物・非生物を問わない長期観測データ、移動や分布データの収集が進んでいる。
- ・ 市民科学の展開も注目されている¹⁰⁾。iNaturalist は市民科学のプロジェクトであり、ナチュラリスト、市民、そして研究者を対象としたソーシャルネットワークサービスである。地球上の生物多様性に関する観察記録を共有し、種同定を助け合い、地図上に残すことなどを目指している。近年は、画像データについて、深層学習向けにラベリングされたデータセットの共有や作成、アプリケーションの開発などが行われている。
- ・ 機能形質データベースの整備と利用が進んでいる^{11), 12)}。植物のデータベースが最もよく知られており活用されている。節足動物、サンゴやその他の海生生物などの分類群についても拡充しつつある。
- ・ 環境DNAを活用した生物分布情報の収集に関する研究がますます進展している。メタバーコーディングもさらに普及しつつあり、微生物群集の定量化がさらに容易となった。また、機能遺伝子についての探索やデータベース化も進んでいる。
- ・ マイクロソフト社は、AI for Earthというプロジェクトを始めた。衛星画像、写真、動画、現地観察などのデータを機械学習、深層学習などにより解析するクラウドサービスである。また同プロジェクトでは地球上の自然体系の監視、モデル化、管理の方法を変革するためにAIを活用する個人や組織によるプロジェクトへの助成金の提供も行っている。
- ・ 画像解析をはじめとするクラウド上での解析ツールが充実してきている。衛星画像の活用ではグーグル社のGoogle Earth Engine上に衛星画像データが一括してアーカイブされており、高速な処理が全球で一括して実施できる。マイクロソフト社もGEO-BONと協働してAI技術活用を進めており、生態系の管理と予測に技術応用され始めている。
- ・ 機械学習や深層学習、状態空間モデル等のベイズ統計、Empirical Dynamic Modelling (EDM)による因果関係推定法などの統計・計算ツールが普及している。Rソフトウェアのパッケージ導入により、これらが容易に利用可能になっている。
- ・ 生態系サービスの評価モデルについても、精力的な研究・開発が行われている。生態系サービスの潜在的な供給量の数値化・地図化が可能なモデルが数多く提案されており、GUI操作が可能なソフトウェアも整備されている (InVEST、TESSA、ARIES、LUCIなど)。陸域・海域ともにモデル開発は進展しており、世界各地での多様な使用例が報告されている。
- ・ 生物多様性と生態系機能/生態系サービスとの間の関係性が、動植物や微生物を含む形で明らかにされつつある^{13), 14)}。生物多様性が生態系機能とサービスを支えることによる、生物多様性の資本としての経済価

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

値の評価がなされ始めている¹⁵⁾。こうした研究では、1990年代から進められてきた大規模な野外操作実験の結果が利用され、世界中でさらに拡充しつつある。

- ・「自然資本連合（NCC：Natural Capital Coalition）」とは、2014年に開始された国際的なイニシアチブであり、ビジネスにおける環境の外部不経済の評価、管理、報告に関する統一的な方法の研究などを行う非営利組織である。NCCは、企業の意思決定に自然資本の考え方を組み入れることを目的として、自然資本会計の世界標準となる枠組み（自然資本プロトコル）を策定している。2020年7月には、「自然のためのキャンペーン（Campaign for Nature）」という国際パートナーシップにおいて、陸海の保護区を地球表面積の30%まで増やすことで、経済発展が見込まれるとの定量評価結果が公表された¹⁶⁾。生態系保全は経済を犠牲にするのではなく、経済を育むとの報告であり、こうした生物多様性と生態系の保全を経済発展と両立させ発展させることについては、世界経済フォーラムをはじめ経済セクターでの関心が高まっている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

(長期・広域観測)

・国際長期生態学研究ネットワーク（ILTER）

44の国と地域が加盟する国際ネットワークであり、我が国は2006年にJaILTERを設立以降、ILTER東アジア太平洋地域ネットワーク（ILTER-EAP）に重要な貢献を続けている¹⁷⁾。JaILTERには約30の大学や研究機関等による森林、草原、湖沼・河川、農地、沿岸・海洋など50を超える研究調査地（サイト）が参画している。ここでの取組みを通じ、国内外にある長期生態系研究サイトのネットワークを活用した生物多様性や生態系機能に関する多地点メタ解析、長期トレンド解析、全球比較研究が行われており、優れた研究成果が得られ始めている¹⁸⁾⁻²⁰⁾。

・長期広域の観測に基づく生物多様性の評価と予測（PREDICTSおよびBIOTIME）

いずれも長期広域の観測に基づく生物多様性の評価と予測のための国際プロジェクトで、英国の大学等研究機関が中心となって実施されている。NatureやScienceといった影響力の大きい学術誌に成果が出されている。PREDICTSは世界中の陸域生物の分布情報を集約している。土地改変が生物多様性に及ぼす影響についての研究などが行われている^{21), 22)}。BIOTIMEは世界中から生物多様性の時系列変化のデータを集め、解析を行っている^{23), 24)}。なおPREDICTSやBIOTIMEは種レベルでのデータ蓄積を行っているが、現在のところ地域や分類群にまだ偏りがある。

・標準化された方法論に基づく全球規模での生物多様性観測（LIFEPLAN）

ヘルシンキ大学を中心とした生物多様性観測の全球プロジェクト。完全に統一した同一プロトコルに基づいて土壌採取、カメラ設置、昆虫トラップ、雨量計などを2020年からの5年間、全世界で同時観測を行うとしている。

・生物多様性と生態系サービスへの土地改変による影響評価（Biodiversity Exploratories、FunDivEurope）

Biodiversity Exploratoriesはドイツで進行中の大型研究プロジェクトであり、土地改変が生物多様性と生態系サービスに与える影響の評価に取り組んでいる。ドイツ3地域を対象に、1,000以上の調査区を設け、

動植物や微生物についてのデータを収集している。300名以上の研究者やスタッフが関わっており、個別に40以上のプロジェクトが進行している。

ドイツ以外にも欧州では生物多様性と生態系機能の関係性に関わる多数のプロジェクトが進行している。FunDivEuropeは15カ国24機関が参画する大型フィールド観測プロジェクトであり2010年から実施されている。研究成果が影響力の高い学術誌に続々公表されている^{25) -27)}。

• 海洋生態系観測のための国際ネットワーク (Reef Life Survey)

海洋生態系においても、サンゴ礁や藻場、プランクトン生態系などを対象に、広域にわたる国際ネットワーク研究が複数展開されている。例えば、Reef Life Surveyは熱帯のサンゴ礁域から温帯の岩礁域の大型動物の種多様性や生物量を市民ダイバーによる科学的調査によりモニタリングするプログラムとしてオーストラリアを中心に始まったプログラムである。現在までに40カ国以上で行われた7,000回以上の膨大な調査結果が集積され、その成果はNature、Science誌を含む多数の国際誌に発表されるとともに、海洋保護区の設定などに応用されている。そのような国際ネットワーク研究の連携を図るため、GEO-BON傘下でMBON (Marine Biodiversity Observation Network) が組織され、さまざまな研究推進活動を実施している。

(大規模操作実験)

• 大規模な生物多様性操作試験 (BEF-China : Biodiversity-Ecosystem Functioning Experiment China)

主に欧州の予算により、BEF-Chinaと呼ばれる大規模な生物多様性の操作試験が2008年に中国で開始され、成果が影響力の高い学術誌で複数公表されている²⁸⁾⁻³⁰⁾。

• 大陸をまたいだ生物多様性操作実験 (IDENT、Drought Net、Nutrient Network)

大陸をまたいだ生物多様性の野外操作実験も盛んに行われている。IDENTと呼ばれるプロジェクトでは、同一の樹種の組み合わせで、北米と欧州の各地に1,640箇所の樹木多様性試験地を設けている。コロラド州立大学が先導するDrought Netでは、統一プロトコルに基づく降水量操作実験が世界中で行われている。ミネソタ大学を中心とするNutrient Networkでは、統一プロトコルに基づく栄養塩添加実験が世界中で実施されている。

(統合的なデータ解析)

• データ統合・理論研究

米国の国立生態学解析統合センター (NCEAS) やドイツの統合生物多様性研究センター (iDiv) では、世界中の実証や実験研究のデータを統合し解析する理論研究のためのワークショップを頻繁に開催している。世界中から集まる参加者の旅費を開催者側が負担する代わりに、その成果を統合研究としてNatureやScienceなどの影響力が大きい学術誌に公表する仕組みを構築している。

(研究基盤)

• 研究施設のネットワーク化

欧州では、生態系や生物多様性への温暖化影響研究を一層推進するため、既存実験施設の利用を、資金とともに国内外のユーザ研究者に提供している。例えばEU内にある水圏生物を対象とした操作実験が可能

な海洋・湖沼の隔離水界施設をネットワーク化し、一括した利用公募を行っている。またこの「Aquacosm」プロジェクトでは、20%をEU圏外の研究者による利用とすることで研究者間の機会公平と国際的な研究推進も促している。

• 生態系研究インフラ

主要国では国の支援による生態系研究インフラがある。生態系研究インフラとは、陸上生態系の機能と動態、あるいは気候変動による影響などに関して、地上 (in-situ) での観測からデータ品質管理、一次分析、知見供出やデータ公開までを担う研究開発・情報公開機関である。現時点では米国NEON、中国CERN、豪州TERN、欧州ICOSが知られている。加えて欧州ではHorizon2020の一貫として欧州LTER (eLTER) 開発プロジェクトも2020年に開始した。

米国のNEONは10年間で4.3億ドル (約460億円) という巨額の予算がNSFを通じて投じられることが2011年に承認された。その後、予算調達等の問題により停滞していたが、2016年から観測インフラの建設が始まり、2019年に全米81か所に観測サイトが設置された。2019年夏から運用開始し、気候変動や土地利用変化、生物季節、生物多様性の変化などのデータがリアルタイム収集され公開されている。

(5) 科学技術的課題

(データ蓄積、データ基盤整備)

公開データの利用拡大を進めるためにデータベースの更なる量的・質的向上が課題である。既存のデータベースには衛星画像、生物種の在不在、現存量、DNA情報など多様な情報が蓄積されているが、種同定の精度や現存量の測定精度など基本的な品質管理が十分ではない。DNA情報等が得られても種同定に誤りがあれば誤情報を持つデータベースが構築されてしまうという点が懸念されている。また種同定の情報不足に加えて特定のプライマーではDNAバーコーディングが困難な生物分類群も多く、他分類群への拡張にも課題がある。

量的にも、機能形質や機能遺伝子などのデータベースの一層の拡充が期待されているが、現在、国内外で蓄積されているデータベースの多くは分類群や地域に偏りがある。例えば細菌などごく一部の分類群では蓄積が進みつつあるが、動植物では全般的に不足している。機能形質に関するデータが塩基配列や種分布のデータだけという状況も不十分とされている。これらを踏まえた形で生物種の分布情報や現存量、遺伝配列情報のさらなる蓄積を時間的にも空間的にも幅広く進める必要がある。

データの流通や共通化、解析技術の共有などデータシェアの基盤となるプラットフォームが情報科学分野と比べて遅れている。また、データの取得や整理、品質管理についての自動化、種分布やゲノム情報のビッグデータを収集・解析するインフォマティクス技術の普及や技術者育成などが、ビッグデータサイエンスへの期待やニーズの高まりに追い付いていない。

(DNA情報や安定同位体を用いた解析技術)

環境DNAの普及は目覚ましいものの、種の在不在を確認するだけでなく、存在する種の個体数やバイオマスなども把握できる技術へと進化させることが課題である。異なる栄養段階にある分類群の、食う・食われるの関係性やネットワーク構造も含めた網羅的把握に向けた、安定同位体やDNA情報や画像解析等を組み

合わせた技術の開発も課題である。

(生物多様性を評価する新指標の開発)

種数以外の指標に基づいて生物多様性の時間的・空間的な分布を評価するための新たな指標の開発が求められている。GEO-BONではEssential Biodiversity Variablesが提唱されている³¹⁾。海洋分野では全球海洋観測システム(GOOS)からEssential Ocean Variablesが提唱されており、この中には海洋生物多様性にかかる変数も含まれる³²⁾。気候変動分野では全球気候観測システム(GCOS)からEssential Climate Variablesが提唱されている。これには生態系の構造・機能に関する変数が含まれており、地上観測コミュニティとの連携が課題とされている³³⁾。これらの国際レベルで提唱されている指標は、必ずしも地域をまたいで網羅的に評価されていない。また機能的・系統的多様性といった別の異なる指標は必ずしも種数の傾向と一致せず^{34), 35)}、それゆえ各種指標の時空間的分布に関してバイオームをまたいで網羅的に把握する必要があると考えられている。

(生態系サービスの評価・予測)

生態系サービスの定義、ならびに現状評価や将来予測のモデリング方法に関する研究開発も必要である。「仮想的市場評価法(CVM)」などの経済学的アプローチや「自然資本プロジェクト(Natural Capital Project)」が提供するInVESTの活用事例が知られているものの、正式に統一化した手法は未だ確立されていない。資本としての自然がどれだけあるかだけでなく、生物による環境変化や生物間相互作用などの生態系プロセスを含めて、それらから生じる生態系機能とサービスの経済評価が求められている。現在のところ花粉媒介のような栄養段階をまたぐ生態系サービスや、社会的な状況に大きく影響を受ける文化的サービスなどの変動を予測することは技術的に難しいとされている。また生物種の分布予測モデル(ニッチモデリング)のような確立した手法が生態系サービスの地図化や広域評価には存在しないため、観測データを政策決定に利用できるモデルの開発が必要とされている。

生態系サービスという言葉の解釈が研究者や機関、国によって異なる状況が続いている^{36), 37)}。生態系サービスという概念を、「自然がもたらすもの(Nature's contributions to people)」という概念へ移行させる動きもある。このような定義の多様化は生態系サービスの評価指標の混在をもたらしている。生態系サービスの概念に関わる議論は欧米の一部の研究者・グループ主導で行われており、今後はアジア諸国の研究者らの更なる貢献が期待されている。

(大規模野外操作実験)

湖沼や流域といった空間スケールで、システムをまるごと操作対象とする大規模長期試験は、海外では先行事例が多く見られる。例えばBEF-Chinaは流域スケールで樹木多様性操作を行い、生態系機能への帰結を評価している。Aquacomのような環境操作実験施設は生態系モデルの検証や複雑な相互作用の抽出など、観察だけでは得られない情報を担保する。このような生態系や生物多様性を対象とした操作試験は短期的な成果を得られるものではないが、動的かつ非平衡システムとしての生態系の挙動を予測するために極めて有効な手段として重要視されている。

(政策のための科学)

2018年に「遺伝子組換え生物等の使用等の規制による生物の多様性の確保に関する法律(カルタヘナ法)」

の一部を改正する法律等が施行された。遺伝子組換え生物等により生物多様性への損害が生じた際に、その回復を図る措置の命令が追加された。しかし法律は改訂されたが、生物多様性への損害等を評価する科学的枠組みは未だ確立されていない。

2019年に「森林経営管理法」が施行された。同法は、林業に適さない森林は生物多様性等に富む森林へと誘導することを念頭に置いている。しかしながら放置され管理不十分の人工林を自然化する方法には現時点で科学的不確実性が高い。

科学的知見や各種技術を国内施策（生態系管理、自然再生、災害対応等）への反映、国際的なプレゼンスの維持、国際的な枠組み（CBD、IPBES、IPCC、GEO、Future Earth等）への貢献などに繋げていく持続的な仕組みを構築することが必要と認識されている。そのためには気候変動対策をはじめとする各種施策とのトレードオフやシナジーの検討（再生可能エネルギー適地と多様性保全地域のバランス等）や、民間企業や市民を巻き込んだ研究開発の実施や意識の醸成等も必要となる。

（ウィズコロナ・ポストコロナ時代の生態系研究インフラ）

気候変動や生物多様性の損失など複雑化する環境問題への対処のため、および環境データの品質管理と迅速な社会発信のために、衛星観測による「診断」と、地上での長期観測や大規模野外操作実験による「実証的研究」を学際的・統合的に組み合わせることを通じたオペレーショナルな観測・分析・評価の推進、およびそのための生態系研究インフラの構築が必要である。この実現に向けては、JaLTERやJapanFluxが定点観測サイトで行う観測の強化、および相互のネットワーク化やデータ集約システムの構築が主要課題であると認識されている³⁸⁾。

Withコロナ・postコロナ時代の生態系・生物多様性観測、ならびに日本国土全域での気候変動影響監視のための、フィールドでの環境観測・フェノロジー観測のセンサーネットワークの拡充やデータ回収のための通信環境の整備、データ集約・公開を担う情報センターの確立も課題である。これらは特に山地や高山帯などの遠隔地で必要性が高いと考えられている。

生態系・生物多様性の損失や森林の分断化などと新たな感染症の起きやすさとの間の関係性について、科学的データや知見の充実が必要である。特に東アジア・東南アジアの研究コミュニティ（例えばAPBON、ILTER-EAP）との連携が必須であり、国際共同研究の枠組みが必要となる。生物多様性条約事務局が2020年に公表した「地球規模生物多様性概況第5版（GBO5）」は、生物多様性の損失を低減し回復させるために鍵となる分野として8つの分野を挙げたが、そのうちの1つが「生物多様性を含んだワン・ヘルス」である。近年の感染症は動物由来感染症であり、自然の損失や劣化がもたらす人と自然の関係変化が、人への感染の発生と感染拡大に影響していると指摘している。

（6）その他の課題

JaLTERをはじめとした観測・研究ネットワークから得られる観測データの整備や拡充、オープンサイエンスの推進にデータベースが必須である。しかし、いまだに多くが研究者個人レベルでの資金調達に依存しており、中長期的観点に立った維持運営が困難な状況である。

日本語のみで整備されたデータベースもあり、利用者拡大の障壁となっているため、国際化の推進も必要である。日本を含む国際共同研究を促進するためには英語等によるデータ公開が必要となる。また、世界的なデータ公開や学術論文のオープンアクセス化に応じた支援システムの構築も急務となっている。基金を整備するなどオープンアクセス費用を支援する仕組みが必要とされている。日本の現状では、研究費削減の中、

オープンアクセスのオプションに予算を配分する余裕がない研究室も多く、欧米諸国に比してオープンアクセス化した論文やデータの公開が圧倒的に少ない。またデータの流通や共通化などを進めようとした場合、海外では情報科学を専攻したテクニシャンが分類学者の研究室で働く例などが見られる。しかし、日本では分野間の垣根が高く、そうした事例は見られない。

環境影響評価や水産資源調査などの公的仕組みで取得された公表資料のデータが生態系・生物多様性研究に活用されないまま埋没している。データのリポジトリ（一元的な保管場所）作成やデータ公表の在り方などを再考し、データ利活用を最大化することが望まれている。また、自らデータを取得する際にも、研究が広域になるにつれ、データ取得における許認可等手続きや、国外でのデータ収集などに必要な事務手続きの負担が大きくなり、研究実施のハードルとなっている。その他、公的資金により取得したデータの提供義務化やデータ取得重複の回避といった戦略的なデータの取得、品質管理、データベース化なども重要と考えられている。

遺伝情報の抽出や海洋観測技術をはじめとして、技術的には容易に大量の情報が得られるようになったが、コストがかかる点は従前と変わらないというケースも多い。観測・計測を支援する研究助成のほか、機器や技術の低コスト化を実現するための技術開発など方策検討も必要とされている。

(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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●個人レベルで実施される理論研究は依然として日本の強みとなっている。大規模かつ広域なデータ統合に基づく実証研究などについては、欧米諸国に対するデータ提供者という立場に甘んじており、イニシアティブは取れていない。日本の研究者や大学・研究機関を中心とするような国際的な枠組みの構築は進んでいない。 ●BISMaL、JBIF、J-BONをはじめとする国内のデータノードと博物館や大学をはじめとする協力機関の活動による生物分布データの蓄積がある。一方で、在データ以外の形式の情報の収集や、過去の情報の電子化・公開、新規の情報収集については十分には進んでいない。 ●衛星データによる環境モニタリングは以前から実施されているが、国土数値情報などの容易に使えるデータベースも活用されるようになった。 ●気候変動が生態系・生物多様性にもたらす影響の詳細な解明と広域診断を推進するためには地上観測と衛星観測の連携体制が必要となる。しかし、地上観測およびそのデータ品質管理とデータベース化が十分に進んでいない。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●応用研究へのニーズの高まりを受けて、広域の生物多様性情報の集約や推定などが実施されている。生態系の環境変動や自然再生に関する研究論文も着実に公表されている。 ●国際政策に影響するような研究成果が限られている。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●多様な研究が国際的な連携の下に行われている。多くのプロジェクトにおいてイニシアティブをとっている。 ●LTERなどモニタリングとそのデータ整備の国際的な発信源にもなっている。その中には長期にわたり維持され続けている大規模野外操作試験も含まれる。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●多様な研究が国際的な連携の下に行われている。多くのプロジェクトにおいてイニシアティブをとっている。 ●モニタリングデータの活用から各種モデルの応用まで、幅広く応用研究も実施され成果を公表している。

				<ul style="list-style-type: none"> ●マイクロソフト社やグーグル社などの民間企業によるクラウドサービス支援がさらに拡充している。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●GBIF、OBIS、TRYなどの世界規模のデータベースを維持している。 ●多様な研究が国際的な連携の下に行われている。多くのプロジェクトにおいてイニシアティブをとっている。特にドイツと英国が生物多様性の世界的な統合研究のイニシアティブを取っている。PREDICTSやBIOTIMEが英国主導である。ドイツは国際共同研究と国内での共同研究プロジェクトの拡充の双方に注力している。 ●Horizon2020の一環として欧州 LTER (eLTER) のための Ecosystem Research Infrastructure の開発プロジェクトが進行中。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●多様な研究が国際的な連携の下に行われている。多くのプロジェクトにおいてイニシアティブをとっている。 ●スウェーデンには、レジリアンス・アライアンスの中核を担うストックホルム・レジリアンスセンターがあり、精力的に活動している。 ●資源管理などではNGOの協力もあり積極的に国際会議を開催し、その成果をとりまとめることや国際規格の作成、管理プログラムの検討を実施している。研究者層も厚く、基礎から応用まで多くの人材が揃っている。
中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●近年急速に研究者人口が増加している。海外に流出した人材の呼び戻しなども積極的に進めている。データベース拡充や観測なども大型プロジェクトとして、国内外と連携して組織的に進めている。化学分析や遺伝データのシーケンシング等においても安価に実施できる民間企業があり、官民ともに生物多様性研究を推進する体制が充実した。結果として学術論文の出版数も急増している。 ●国際プロジェクトの誘致、フィールドの提供、国際会議の支援などによって積極的に主要な海外研究者との結びつきを強めている。また国際誌で発表された指標をその著者らのグループと協力して早期に適応する例も見られる。国外にいる中国人研究者と連携を強めることで国際競争力を高める傾向も強まっている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●多様な研究が国際的な連携の下に行われている。海外の主要研究者や中国人研究者との共同研究もさらに推進されており、国際競争力を高めている。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●国立生態院がEcoBankという生物多様性の地理情報をデータベース化・公開する取り組みを実施。 ●East Asian-Australasian Flyway Partnershipの事務局や南極海についての国際会議の検討、その他の国連条約の事務局誘致などの活発な活動が見られる。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●国立生態院を中心に生物多様性・生態系の研究および社会へのアウトリーチ活動が進められている。
豪州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●海洋生態系に関する研究分野ではデータの収集、データベースの作成、データの解析、保全への応用のいずれの分野においても精力的な研究活動が見られる。陸域生態系の生物多様性を対象とした基礎研究においても着実に成果を挙げている。生態学系の国内雑誌は国際的なインパクトは高くないが、各研究者が欧米の高インパクト誌に着実に成果を公表している。 ●豪州 TERN (陸上生態系観測ネットワーク) は地上での詳細な生態系・生物多様性観測、衛星による広域観測診断を効果的に組み合わせて科学的・社会的目的に応じた環境データ取得と公開のシステムを構築している。

	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 保全の管理手法に関する研究、温暖化による予測評価に関する研究、生物多様性の評価に関する研究、海洋のリモートセンシング技術に関する研究など、大学ごとに特色のある研究が大型予算で進められている。欧米とは日本以上に遠隔にも関わらず、世界各地の学会でのセッションの設定やワークショップの開催などを積極的に行う様子も見られている。 ● Atlantisのような世界的に使用されている生態系評価モデルを開発している。NESP Biodiversity HUBのような科学と政策を結びつける仕組みも着実に構築されている。
カナダ	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● データベースの構築や国際ネットワークの構築などで世界の研究をリードしている。 ● 北極圏の国として、北極圏の資源や生態系に関する観測研究をもっとも精力的に展開している。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● Ecopath/Ecosimのような世界中で広く使われている生態系モデルを開発し、応用研究を進めている。 ● 国際的な海洋研究プログラムである日本財団のNereusプログラムの運営・推進で日本との連携がある。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ 気候変動観測（環境・エネ分野 2.2.1）
- ・ 社会-生態システムの評価・予測（環境・エネ分野 2.2.9）

参考・引用文献

- 1) F. Isbell et al., "Linking the influence and dependence of people on biodiversity across scales", *Nature* 546, no. 7656 (2017) : 65-72, doi : 10.1038/nature22899
- 2) A. Purvis, "A single apex target for biodiversity would be bad news for both nature and people", *Nat. Ecol. Evol.* 4, no. 6 (2020) : 1-2, doi : 10.1038/s41559-020-1181-y
- 3) M. Mirtl et al., "Genesis, goals and achievements of Long-Term Ecological Research at the global scale : A critical review of ILTER and future directions", *Science of the total environment* 626 (2018) : 1439-1462, doi : 10.1016/j.scitotenv.2017.12.001
- 4) H. M. Pereira et al., "Essential biodiversity variables", *Science* 339, no. 6117 (2013) : 277-278, doi : 10.1126/science.1229931
- 5) M. C. Hansen et al., "High-resolution global maps of 21st-century forest cover change", *Science* 342, no. 6160 (2013) : 850-853, doi : 10.1126/science.1244693

- 6) G. F. Ficetola et al., “Species detection using environmental DNA from water samples”, *Biol. Lett.* 4, no. 4 (2008) : 423-425, doi : 10.1098/rsbl.2008.0118
- 7) E. Cohen-Shacham et al., Nature-based solutions to address global societal challenges (Gland, Switzerland : International Union for Conservation of Nature, 2016) , https://www.researchgate.net/publication/307608144_Nature-based_Solutions_to_address_global_societal_challenges (2021年1月18日アクセス)
- 8) N. Seddon et al., “Global recognition of the importance of nature-based solutions to the impacts of climate change”, *Global Sustainability* 3 (2020) : 1-12, doi : 10.1017/sus.2020.8
- 9) 科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会地球観測推進部会, 「今後10年の我が国の地球観測の実施方針のフォローアップ報告書 (中間とりまとめ)」, https://www.mext.go.jp/content/20200409-mxt_kankyoku-000007097_1.pdf (2021年1月18日アクセス)
- 10) R. Bonney et al., “Next steps for citizen science”, *Science* 343, no. 6178 (2014) : 1436-1437, doi : 10.1126/science.1251554
- 11) J. Kattge et al., “TRY plant trait database - enhanced coverage and open access”, *Glob. Chang Biol.* 26, no. 1 (2020) : 119-188, doi : 10.1111/gcb.14904
- 12) J. Kattge et al., “TRY - a global database of plant traits”, *Glob. Change Biol.* 17, no. 9 (2011) : 2905-2935, doi : 10.1111/j.1365-2486.2011.02451.x
- 13) A. S. Mori et al., “Low multifunctional redundancy of soil fungal diversity at multiple scales”, *Ecol. Lett.* 19, no. 3 (2016) 249-259, doi : 10.1111/ele.12560
- 14) S. Soliveres et al., “Biodiversity at multiple trophic levels is needed for ecosystem multifunctionality”, *Nature* 536, no. 7617 (2016) : 456-459, doi : 10.1038/nature19092
- 15) F. Isbell et al., “The biodiversity-dependent ecosystem service debt”, *Ecol. Lett.* 18, no. 2 (2015) : 119-134, doi : 10.1111/ele.12393
- 16) A. Waldron et al., Protecting 30% of the planet for nature : costs, benefits and economic implications, Campaign for Nature (Cambridge : ANT, 2020) , <https://ranjani-krishnan.com/protecting-30-of-the-planet-for-nature-costs-benefits-and-economic-implications/> (2021年1月18日アクセス)
- 17) E-S. Kim et al., “The International Long-Term Ecological Research–East Asia–Pacific Regional Network (ILTER-EAP) : history, development, and perspectives”, *Eco. Res.* 33, no. 1 (2017) : 19-34, doi : 10.1007/s11284-017-1523-7
- 18) K. Tsuchiya et al. “Decrease in bacterial production over the past three decades in the north basin of Lake Biwa, Japan”, *Limnology* 21, no. 1 (2019) : 87-96, doi : 10.1007/s10201-019-00582-2
- 19) T. Hiura T, G. Sato and H. Iijima, “Long-term forest dynamics in response to climate change in northern mixed forests in Japan : A 38-year individual-based approach”, *For. Ecol. Manage.* 449 (2019) : 117469, doi : 10.1016/j.foreco.2019.117469
- 20) A. S. Mori, “Environmental controls on the causes and functional consequences of tree species diversity”, *J. Ecol.* 106, no. 1 (2018) : 113-125, doi : 10.1111/1365-2745.12851
- 21) T. Newbold et al., “Global effects of land use on local terrestrial biodiversity”, *Nature* 520,

- no. 7545 (2015) : 45-50, doi : 10.1038/nature14324
- 22) T. Newbold et al., “Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment”, *Science* 353, no. 6296 (2016) : 288-291, doi : 10.1126/science.aaf2201
- 23) S. A. Blowes et al., “The geography of biodiversity change in marine and terrestrial assemblages”, *Science* 366, no. 6463 (2019) 339-345, doi : 10.1126/science.aaw1620
- 24) M. Dornelas et al., “Assemblage time series reveal biodiversity change but not systematic loss”, *Science* 344, no. 6181 (2014) : 296-299, doi : 10.1126/science.1248484
- 25) S. Ratcliffe et al., “Biodiversity and ecosystem functioning relations in European forests depend on environmental context”, *Ecol. Lett.* 20, no. 11 (2017) : 1414-1426, doi : 10.1111/ele.12849
- 26) F. van der Plas et al., “Biotic homogenization can decrease landscape-scale forest multifunctionality”, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113, no. 13 (2016) : 3557-3562, doi : 10.1073/pnas.1517903113
- 27) F. van der Plas et al., “Continental mapping of forest ecosystem functions reveals a high but unrealised potential for forest multifunctionality”, *Ecol. Lett.* 21, no. 1 (2018) : 31-42, doi : 10.1111/ele.12868
- 28) H. Bruelheide et al., “Designing forest biodiversity experiments : general considerations illustrated by a new large experiment in subtropical China”, *Method Ecol. Evol.* 5, no. 1 (2014) : 74-89, doi : 10.1111/2041-210X.12126
- 29) A. Fichtner et al., “From competition to facilitation : how tree species respond to neighbourhood diversity”, *Ecol. Lett.* 20, no. 7 (2017) : 892-900, doi : 10.1111/ele.12786
- 30) Y. Huang et al., “Impacts of species richness on productivity in a large-scale subtropical forest experiment”, *Science* 362, no. 6410 (2018) : 80-83, doi : 10.1126/science.aat6405
- 31) H. M. Pereira et al., “Essential biodiversity variables”, *Science* 339, no.6117 (2013) : 277-278, doi : 10.1126/science.1229931
- 32) P. Miloslavich et al., “Essential ocean variables for global sustained observations of biodiversity and ecosystem changes”, *Glob. Chang. Biol.* 24, no. 6 (2018) : 2416-2433, doi : 10.1111/gcb.14108
- 33) The GCOS Steering Committee, “The Global Observing System for Climate: Implementation Needs”, Global Climate Observing System (GCOS) , https://unfccc.int/sites/default/files/gcos_ip_10oct2016.pdf (2021年1月18日アクセス)
- 34) V. Devictor et al., “Spatial mismatch and congruence between taxonomic, phylogenetic and functional diversity : the need for integrative conservation strategies in a changing world”, *Ecology Letters* 13, no. 8 (2010) : 1030-1040, doi : 10.1111/j.1461-0248.2010.01493.x
- 35) R. D. Stuart-Smith et al., “Integrating abundance and functional traits reveals new global hotspots of fish diversity”, *Nature* 501, no. 7468 (2013) : 539-542, doi : 10.1038/nature12529
- 36) A. La Notte et al., “Ecosystem services classification : A systems ecology perspective of the

- cascade framework”, *Ecol. Indic.* 74 (2017): 392-402, doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.030
- 37) G. Daily et al., *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems* (Washington D.C.: Island Press, 1997), https://www.researchgate.net/publication/37717461_Nature's_Services_Societal_Dependence_On_Natural_Ecosystems (2021年1月18日アクセス)
- 38) 市井和仁, 柴田英昭, 村岡裕由, 「国内の大学等における陸域生態系観測ネットワークの現状と課題」, https://www.mext.go.jp/kaigisiryoy/2019/09/_icsFiles/afieldfile/2019/09/06/1421036_016.pdf (2021年1月18日アクセス)

2.2

環境区分
俯瞰区分と
研究開発領域

2.2.9 社会-生態システムの評価・予測

(1) 研究開発領域の定義

生物多様性や生態系から構成される「自然資本」がもたらす「生態系サービス」¹の持続的な利用を目的とした、人間社会と生態系が相互に関連する「社会-生態システム (socio-ecological system)」の評価・予測に係る研究開発領域である。複数の生態系サービス間の連関や将来予測、生態系サービスがもたらす多様な価値の評価、社会-生態システムの統合的理解など、学際的な研究開発が含まれる。また、自然資本の活用や社会-生態システムのガバナンス、気候変動適応や防災・減災への活用など、社会の多様な主体が参加する超学際的研究を含む、持続可能性を実現するための社会経済や政策に関連した研究開発を対象とする。

(2) キーワード

社会-生態システム、生態系サービス、自然資本、生態系を活用した適応策 (EbA: Ecosystem-based Adaptation)、生態系を活用した防災減災 (Eco-DRR: Ecosystem-based Disaster Risk Reduction)、自然を基盤とした解決策 (NbS: Nature-based Solutions)、生態系管理、グリーンインフラ、生態系インフラ、生態系サービスに対する支払い制度 (PES)

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

社会-生態システムは、人間社会と生態系が相互に密接に関連するという認識に立った概念であり、持続可能な社会の実現に必須と考えられている。人間社会が生物多様性や生態系に正負のさまざまな影響を与える一方、生物多様性や生態系といった自然資本が生み出す多様な生態系サービスは人間の福利を支えている。このような社会-生態システムを統合的に捉えるための科学技術が求められている。

生物多様性や生態系は、食料や水の供給、気候や災害の調整や水質浄化、観光や芸術文化の源泉等、多様な生態系サービス (自然の恵み) を提供することで人間社会の生存基盤・経済・福利を支えている。また、生物多様性や生態系は、様々な生態系サービスを生み出す有限の環境資産であることから自然資本とも言われる。

生態系サービスや自然資本の持続性は人類の持続可能性に直接関係しているため、生態系と生物多様性の保全・再生はSDGsの目標としても掲げられている。その他にも生物多様性条約 (CBD) における「戦略計画2011-2020」や愛知目標 (2010年)、気候変動枠組条約 (UNFCCC) における「パリ協定」(2015年)、国連防災世界会議による「仙台防災枠組2015-2030」(2015年)、ラムサール条約での決議 (2015年) 等において生態系と生物多様性のもつ社会的役割の重要性が国際的に認識されている。また国内でも、「第5期科学技術基本計画」(2016年)、「生物多様性国家戦略2012-2020」(2012年)、「国土強靱化基本法」(2013年)、「第4次社会資本整備重点計画」(2015年)、「気候変動の影響への適応計画」(2015年)、「第五次環

1 生物多様性や生態系に関する政府間プラットフォームである「生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学-政策プラットフォーム (IPBES)」では、科学的視点が強い「生態系サービス」という用語を、多様な価値観を包含する「NCP、Nature's Contributions to People」へと変更しつつあり^{1), 2)}、国内では「自然の寄与」との訳語があげられている³⁾。ただしここでは科学研究で従来から主に用いられてきた「生態系サービス」を使うこととする。

境基本計画」(2018年)、「グリーンインフラ推進戦略」(2019年)等において重要性が認識されている。なお、CBDのポスト2020生物多様性枠組みや日本の次期生物多様性国家戦略は検討が進行中であり、2021年から新しい計画や戦略が開始される見通しである。

しかしながら、こうした社会的な認識の広がり一方で、生態系サービスの持続的な供給と利用を実現するための社会-生態システムの統合的理解は十分に進んでいない。またこれらの科学的理解に立脚した自然資本や生態系サービスの管理技術の開発、および社会-生態システムのより良いガバナンスの探索も国内外で掲げられた各種目標を実現するのに十分でない状況にあり、更なる研究が望まれている。

[研究開発の動向]

国連主導で2001～2005年に行われた「ミレニアム生態系評価 (MA: Millennium Ecosystem Assessment)」では、地球規模で生物多様性や生態系の評価が行われた。MAでは生物多様性や生態系がもたらす生態系サービスが人間の福利を支えているという概念が示されたほか、評価された生態系サービスの60%が劣化傾向にあると報告された。2012年には生物多様性と生態系サービスに関する科学的知見の統合、並びに科学と政策のつながりの強化を目的にした政府間プラットフォームである「生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学-政策プラットフォーム (IPBES)」が設立された。IPBESからはこれまでに複数の評価報告書が公表されていたが、2019年に「生物多様性と生態系サービスに関する地球規模評価報告書」が公表され、MA以来の地球規模評価報告書となった³⁾。同報告書では、生物多様性と生態系サービスの劣化は今なお継続しており、自然の保全と持続可能な利用のためには、社会変革が必要であると報告している。

日本では、2010年に「生物多様性総合評価報告書 (JBO: Japan Biodiversity Outlook)」がとりまとめられた。同じ2010年に国際連合大学高等研究所 (UNU-IAS) 等によって日本の里山と里海を対象とした生態系サービスの変化も評価され、「里山・里海の生態系と人間の福利: 日本の社会生態学的生産ランドスケープ」(JSSA: Japan Satoyama Satoumi Assessment)として公表された。その後、生物多様性国家戦略2012-2020に関する総合評価として「生物多様性及び生態系サービスの総合評価 (JBO2)」が2016年に公表され、現在は「生物多様性及び生態系サービスの総合評価2020 (JBO3)」の作成が進められている。これら一連の報告書では、日本においても、総じて生物多様性が喪失し生態系が劣化しており、人間社会への影響が懸念される状況が示されている。

以上のような取組みを通じて進められてきたこれまでの研究は、人間社会が生物多様性や生態系に与える影響や、人間の福利をもたらす生態系サービスを定性的・定量的に明らかにしてきた。しかし社会-生態システムの統合的な理解は十分に進んでおらず、特に人間社会と生態系間のフィードバック作用やその時空間的ダイナミクスについては研究が始まったばかりの状況である。

まず生態系サービスや自然資本に関する研究は、過去20年ほどの間に大きく発展してきた。生態系サービスの定量的評価と地図化、複数の生態系サービス間のトレードオフやシナジー関係といった連関 (ネクサス) の分析、土地利用・気候・その他の影響要因の分析、生態系や生態系サービスの空間モデリングなどが行われている。一方で、気候変動やその他の影響要因が将来の生態系サービスに与える影響等、生態系サービスや自然資本の時空間的ダイナミクスの理解については、なお多くの研究課題が残されている。また生態系サービスのうち文化的サービスに関する研究は依然少ない。

生態系サービスの価値評価については、市場的価値と非市場的価値の両方が経済学的に分析されてきた。近年では人の健康や福利に対する生態系の影響を評価する研究が進められている。自然資本の収支を計算す

るための研究も進んでいる。自然資本を含むさまざまな資本の価値が包括的に評価されている^{4), 5)}。しかし、自然資本の収支計算の方法は発展途上であり、勘定に入れられていない多くの自然資本がある他、自然資本の将来価値を現在価値に換算する割引率の設定など、多くの課題が残されている。

生態系サービスと自然資本の価値評価に関して、国際的な枠組みにも進展が見られる。2010年には「生態系と生物多様性の経済 (TEEB: The Economics of Ecosystems and Biodiversity)」の取り組みから報告書が公表された。世界銀行が主導する「富の勘定と生態系サービスの価値評価 (WAVES: Wealth Accounting and the Valuation of Ecosystem Services)」からはSDGsと関連した自然資本の勘定に関する報告書等が公表されている。国連統計委員会による環境経済勘定 (SEEA: System of Environmental-Economic Accounting) は自然資本の勘定に関する知見をまとめた報告書等を公表している。また多国籍企業などの大企業においても、自然環境の価値をビジネスに反映させる取り組みが進みつつある⁶⁾。このように生態系サービスや自然資本の勘定の取り組みには進展があるものの、生態系サービスと自然資本に関する情報が多様な意思決定の場で使われることは十分でなく、広く普及するには未だ至っていない。

生態系サービスや自然資本のガバナンスに関する研究も近年進んでいる。生態系サービスに対する支払い制度 (PES: Payment for Ecosystem Services)、環境税、キャップ・アンド・トレード制度、環境に関する法律や規制、製品認証制度、市民意識の啓蒙等、様々な取り組みがある。しかしながら、これらの取り組みの効果影響を十分に評価できるほど社会一生態システムの統合的な理解は進んでおらず、評価のために必要な生態系および人間社会のモニタリングは十分でないと認識されている。その原因の一つは、生態系サービスが生み出される空間スケールとそのガバナンスの空間スケールの間にずれがあることと認識されている。このずれによって社会一生態システムの適切なガバナンスと政策決定がしばしば困難になっている。こうした中、行動経済学、社会学、心理学等の社会科学の参加によってより良い管理策や政策決定が生み出されるとの期待から、社会の多様な関係者が協力して進める順応的管理、順応的協働管理、生態系スチュワードシップなどの学際的・超学際的研究が発展しつつある。

生態系サービスや自然資本は、気候変動適応、防災・減災、水質悪化等の生態系機能の劣化を伴う様々な社会的課題の解決に貢献すると期待されている。そのため、「生態系を活用した適応策 (EbA: Ecosystem-based Adaptation)」、「生態系を活用した防災・減災 (Eco-DRR: Ecosystem-based Disaster Risk Reduction)」、「グリーンインフラ」、「生態系インフラ」等、関係する多くの概念が提示されてきた。また最近は、自然の働きを利用して低いコストで環境・社会・経済に便益をもたらす、社会にレジリエンスをもたらすこれらの解決策を、「自然を基盤とした解決策 (NbS: Nature-based Solutions)」としてまとめることが提案されている⁷⁾⁻⁹⁾。経済・文化・環境・生物多様性・生態系・気候変動を考慮に入れてNbSの複合的な効果を評価しようとする挑戦的な試みも進んでいる。またEUでは専門家グループによってNbSに関する研究のレビューが行われており¹⁰⁾、Horizon 2020にも反映されている。

社会一生態システムに関する研究における日本の研究開発力は、他国と比較して中位レベルにある。国際的に評価される研究成果が出始めているものの、全体として研究成果の国際的発信は十分でない状況にある。一方、IPBESやIUCNなどによる国際的なイニシアチブに日本からの研究者が参加することで、国際的な貢献は拡大しつつある。日本の研究開発力や国際的貢献を高めていくためには、研究体制をより充実させていくことが必要と考えられる。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• 生態系サービス研究

生態系サービスの定量評価と可視化(地図化)、生態系サービス間の連関(ネクサス)分析、駆動要因の解明、シナリオ構築とモデリング等の研究が進展している。

まず定量評価に関しては、生態系サービスの源泉となる生態系機能について、その生態系に存在するそれぞれの種や遺伝子型がもつ複数の機能の関係性を理解するための研究が進められている。また生態系サービスのうち文化的サービス(例:レクリエーションや観光の場と機会、自然景観の保全)の評価が、供給サービス(例:食料、水、原材料、遺伝資源)や調節サービス(例:炭素固定などの気候調整、水質浄化、水量調整、花粉媒介、病害虫の生物学的コントロール)に比較して遅れているが、ソーシャルメディアの情報を用いて景観がもつ文化的なサービスを評価する等の研究が進められている。

生態系サービスの可視化(地図化)では機械学習を用いた取組みが最近のトレンドの一つである¹¹⁾。生物多様性と生態系サービスのシナリオ分析(シナリオとモデリング)は政策決定において重要なツールになると期待されている一方、時間スケールと空間スケールの両方を考慮したダイナミクスの評価はできておらず、今後の課題となっている¹²⁾。

生態系サービスの連関分析では中国の北京周辺地域を対象とした研究例がある。供給・調節・文化的サービスの連結(バンドル)を評価し、地域によってバンドルの状況が大きく異なっていることや、生態系サービス間の関係が空間的に複雑に変化している状況が明らかにされている¹³⁾。スペインの研究事例では、生態系サービスのバンドル評価にもとづき、生態系サービス間でのシナジーが発揮されるような土地利用のあり方が提案されている¹⁴⁾。また、食生活の改善、農業生産の向上、気候変動への対策などを組み合わせた将来シナリオについて、水・エネルギー・食料生産・生態系の連関が、地球規模でどのように変化するかがモデリングされており、現状維持のシナリオと比較することで、国際的な政策決定に対する示唆を与えている¹⁵⁾、¹⁶⁾。さらには、より具体的な生物多様性や気候変動に関する国際目標を達成するのに必要な生態系の保全再生のあり方を、地球規模の土地利用に関するシナリオ分析によって評価する研究もされている¹⁷⁾。

• 生態系サービスの価値評価とその活用

生態系サービスの「価値」の評価に関する研究では、生態系サービスの市場的価値および非市場的価値を経済学的に評価することで経済活動と生態系保全を両立させる方策が提案されている。自然資本の価値評価で経済学の資本理論に基づいた新しい手法が提案されているという事例もある。複数種の間で相互作用がある状況における生態系管理を、生態系の経済的評価に組み入れる新しい方法も提案されている。またGDPと同様の枠組みで生態系サービスを貨幣換算する尺度として、GEP(Gross Ecosystem Product:生態系総生産)が提案され、さまざまな意思決定の場で利用することが期待されている。ある研究では、中国青海省にある複数の生態系サービス(供給、調節、文化的サービス)を生み出す生態系のGEPが、その地域のGDPに匹敵する規模であったこと、2010年からの5年間に2.3倍に成長したことなどが報告された¹⁸⁾。このように経済的評価の観点からの検討が進む一方、生態系や生態系サービスには多様な価値があり、人間中心的な利用価値に加え、関係価値や人間中心でない固有の価値が含まれるとして、これらを考慮した包括的な価値評価をどう行うかが今後の課題にもなっている¹⁹⁾。

生態系サービスの価値評価を用いた「生態系サービスに対する支払い制度(PES)」が各地で実施されている。世界的に拡大傾向にあり既に550を超える取組みが総額360億米ドルを超える規模で行われている²⁰⁾。PES

の効果に関する研究では、経済的支援によってコミュニティにおける社会関係資本（人間関係や協力的な行動）が減少することが懸念されているものの、そのような副次影響を伴わずにPESが生態系管理の取り組みを向上させる事例が報告されている。PESの具体的な設計に関する研究では、実際に政策オプションを実施するための社会的、生態学的限界を考慮した、生態系サービスの便益とそれを実現するためのコストをより現実的な視点に立って評価する研究がなされている²¹⁾。様々な国で実施されている異なるタイプのPESを比較するメタ分析も行われており、生態系サービスの供給源やそれに影響するステークホルダーの範囲の決定、負担の状況に応じた支払額の段階的調節などに依然として課題があることが分析結果から指摘されている²²⁾。

PES以外にも、様々な経済活動に対して生態系サービスや自然資本を反映させる試みが進んでいる。一例としてESG投資が挙げられるが、ESG投資にはグリーンウォッシュなどの懸念も示されており、科学的に裏付けのある確かな投資指標（ビジネスの環境への影響評価など）の開発が求められている²³⁾。また、生態系サービスを損なうことに対する法的責任の根拠に、生態系サービスの価値評価が使われることが少ない点は、今後の課題であるとの指摘もある。

• 社会—生態システムの学際的な統合評価

生態系サービスと自然資本を社会—生態システムの枠組みで理解しようとする研究が進められており、生態系サービスや自然資本に影響する直接的な要因だけでなく、直接的要因に影響する人間社会の間接的な要因も明らかにされつつある²⁴⁾。例えば、アルプス地方の社会—生態システムを対象とした研究で、数百年にわたって自然資源の管理が持続しているコミュニティのサイズ（人口）がどの程度の規模であるかが示された²⁵⁾。生態系サービスの管理や生態系の変化への対応には順応的ガバナンスが有効であることを示した事例もある。

人間社会と生態系間のフィードバック作用を組み入れた統合的なダイナミクスの検討は発展途上段階にある²⁴⁾、²⁶⁾。理論的研究から、ブラジルの高地などに見られる森林と草地と農地のモザイク状景観の形成には人間による管理と生態系の応答の間でのフィードバック作用が重要であることが示された²⁷⁾。社会—生態システムの枠組みで湖沼生態系の自然再生を分析したモデル研究では、管理政策の決定や政策実行の遅れが水草の急激な減少による生態系の急激な変化（レジームシフト）に影響を及ぼすとの評価結果が示された²⁸⁾。これらの先導的な研究は社会—生態システムを統合的に理解することの重要性を示しているが、「生態系」や「経済」に比べると「社会」の要素は十分に考慮できていないのが現状であり、課題と認識されている²⁹⁾。

社会—生態システムのダイナミクスを長期モニタリングすることにより明らかになる事柄もある。パプアニューギニアの漁村集落の社会—生態システムを16年間にわたって調査した研究では、自然資源の状態と資源管理のガバナンスの関係が分析された結果、ルール遵守、社会の結束、参加型意思決定メカニズムなどといったコミュニティ特性が自然資源の持続可能性に重要な役割を果たすことが明らかにされている³⁰⁾。

• 社会—生態システムのガバナンス研究

保護区の設定に関する研究では、森林伐採の抑止に成功している保護区ほど保護区の解除がされにくいという、保護区のガバナンスの強化がそれらの存続にとって重要であることを示す報告がなされている。このような制度に関する研究や、経済、空間計画に関する研究は比較的進んでいるものの、意思決定や政治に関する研究は十分ではない³¹⁾。

多様なステークホルダーの参加による影響についても研究が行われている。社会—生態システムの複雑な実態を理解しようとする際、科学的知識が十分でない状況では異なるステークホルダーの集合知を利用する

ことが重要となるが、その集合知は結果として科学的知識と同等の知識をもたらし得ることを示した事例がある³²⁾。スイスのある山岳地帯の社会-生態システムについての研究では、生態系や人間社会に関する実際のデータを考慮したエージェント・ベースド・モデルを用いたところ、ステークホルダーの多様性が高いほど、社会経済や生態系の攪乱に対して社会-生態システムのレジリエンスが高いことが示された³³⁾。生態系サービスの知識の正当性が確保されていること（偏りがなく多くの視点が反映されていること）が、政策への科学的知見の活用に重要であることも指摘されている。社会-生態システムの枠組みを用いた社会実験によって共有資源（コモンズ）の管理について調べた研究では、共有資源の持続的な利用にとって、資源に関する認知と社会に関する認知のいずれかではなく両方が重要であると指摘している³⁴⁾。

生態系サービスを生み出す伝統的な知識体系の重要性も認識されつつある。植物民俗学の調査とネットワーク解析を組み合わせた研究では、植物種が絶滅するだけでなく、植物利用の伝統的知識が消失することが、地域社会における生態系サービスの急激な減少につながることを示されている³⁵⁾。

・気候変動適応や防災・減災への応用（EbA、Eco-DRR）

気候変動への適応や自然災害からの防災・減災等に対して生態系や生物多様性が果たす役割の重要性が認識されている。気候変動適応において、「生態系を活用した適応策（EbA：Ecosystem-based Adaptation）」の重要性をIUCNや生物多様性条約事務局が指摘している。2016年にはEbAと「生態系を活用した防災・減災（Eco-DRR：Ecosystem-based Disaster Risk Reduction）」の主流化に向けた報告書が生物多様性条約事務局から公表されている。またそれに続くものとして、同事務局が、気候変動枠組条約事務局や国連国際防災戦略事務局と協力して、EbAとEco-DRRの設計や社会実装に関するガイドラインを2018年に公表している。EbAとEco-DRRを実装するための多様なツールや多くの事例を紹介した学術図書も出版されている。その他にも国連防災世界会議による「仙台防災枠組2015-2030」（2015年）、ラムサール条約での決議（2015年）、欧州委員会やIUCNによる「自然を基盤とした解決策（NbS：Nature-based Solutions）」の推進（IUCN 2020）等がある。国内でもEco-DRRやEbAの重要性に関する認識は環境省、国土交通省、JICAなどの政策や事業に見られる。

こうしたEbAやEco-DRRに関する研究は近年大きく進展している。例えば、洪水による浸水災害を避けるような土地利用を実現するために、米国本土スケールで、浸水が起こりうる氾濫原生態系を保全する目的で政府が土地を購入するコストと、それにより回避できる浸水災害被害額の便益の比較が行われた。結果は、5万km²を超える場所では便益がコストを上回るというものだった³⁶⁾。一方、欧州での事例からはEco-DRRの社会実装にとってステークホルダーの参加が重要であるものの、現在のところステークホルダーにとっての具体的な生態系サービスや環境経済的なメリットの評価を行うだけの科学的知見や技術が十分に整っていないとの指摘がある³⁷⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・環境省環境研究総合推進費「S15：社会・生態システムの統合化による自然資本・生態系サービスの予測評価」（代表：武内和彦、地球環境戦略研究機関、2016～2020年度）

日本を中心に、アジア地域も視野に入れながら、自然資本・生態系サービスの自然的・社会経済的価値の予測評価を行い、シナリオ分析に基づく複数の政策オプションの検討を行っている。最終的には、包括的な福利を維持・向上させるためのガバナンスのあるべき姿を提示することを目指している。環境省の環境研究総合推進費では、本課題以外にも環境問題対応型研究として複数の研究プロジェクトが生態系サービスや自然

資本に関係する研究を実施している。

• 総合地球環境学研究所における超学際研究

大学共同利用機関である総合地球環境学研究所では、国内外の社会—生態システムに関するさまざまな学際的・超学際的研究プロジェクトが実施されている。大学共同利用機関として国内外の研究者が提案する研究プロジェクトを実施しており、プロジェクトには自然科学・人文・社会科学の多様な研究者のほか、企業や行政などの実務者も参加している。例えば流域の栄養循環、水・エネルギー・食料ネクサス、熱帯泥炭地の社会—生態システム、生態系を活用した防災減災など、さまざまな視点から社会—生態システムに関する学際的・超学際的研究に取り組んでいる。

• フューチャー・アース (2015年～)

地球環境研究の国際研究プログラムの再編・統合後、2015年からはFuture Earth (フューチャー・アース) というプログラムが進められている。フューチャー・アースは自然科学と人文・社会科学が強く連携すること、社会の多様なステークホルダーと共に研究を行うことを重視しており、社会問題解決型の超学際研究を推進している。2014年に62の優先研究課題からなる戦略的研究アジェンダが作られ、その下で国際的な研究プロジェクトや「知と実践のネットワーク (KANs: Knowledge-Action Networks)」の構築が推進されている。

日本は5カ国に分散して置かれた国際本部事務局の一翼を担っており、日本学術会議と東京大学サステナビリティ学連携研究機構が共に日本ハブの運営を担っている。またアジア地域センターが総合地球環境学研究所内に置かれている。JST 社会技術研究開発センターがFuture Earth 構想の推進事業の一環として2014年度から支援を開始した。そこでは「課題解決に向けたトランスディシプリナリー研究」として本格研究が2件実施されたほか、「日本が取り組むべき国際的優先テーマの抽出及び研究開発のデザインに関する調査研究」が実施され、107の研究課題からなる「日本における戦略的研究アジェンダ」が作られている。

• ホライズン2020における社会—生態システムに関する研究プロジェクト

EUでは、Horizon 2020の下で「自然を基盤とした解決策 (NbS)」に関する研究プログラムが実施されているほか、社会—生態システムに関する複数の研究プロジェクトが推進されている。「MUSES (Towards middle-range theories of the co-evolutionary dynamics of multi-level social-ecological systems)」プロジェクト (2017～2022年)では、社会—生態システムのダイナミクスを評価するため、自然科学と社会科学の理論を組み合わせた学際的なアプローチにより、複雑適応系としての社会—生態システムの数理モデル開発が行われている。「eLTER H2020 (European Long-Term Ecosystem and Socio-Ecological Research Infrastructure)」プロジェクト (2015～2019年)では、社会-生態システムの研究プラットフォームとなるべく22カ国162地点の長期生態系モニタリングデータの収集・共有を進めるとともに、研究等での利活用支援を行ってきた。同プロジェクトは2015～2019年に行われ、その後2020～2025年に新たな2プロジェクトが立ち上がった。1つはeLTER研究インフラの技術的な高度化や法的・経済的な成熟を進めるための調整・支援を行うeLTER PPPで、もう1つはeLETR研究インフラで収集されたデータやサービスの利活用促進に取り組むeLTER Plusである。

• Natural Capital Project (2006年～)

米・スタンフォード大学が中心となり中国科学院や米・ミネソタ大学などが国際連携して進めている

Natural Capital Project は、自然資本の可視化と実際の意思決定への反映に取り組んでいる。これらの取り組みを通じて科学的知見の蓄積や新しいツールの開発を進めている。特に本プロジェクトで開発された生態系サービスの地図化ツールである InVEST は今や世界中で利用されている。Natural Capital Project の取り組みは世界各国に広がっており、心身の健康に関連した生態系サービスの評価、生態系サービスへのアクセス公平性の評価、社会-生態システムのレジリエンス、地球規模での生態系サービス評価、AI を活用したデータ分析など、多方面にわたった研究が行われている。

• ストックホルム・レジリエンス・センターにおける超学際研究 (2007年～)

スウェーデンにあるストックホルム・レジリエンス・センターでは、社会-生態システムのレジリエンスや持続性科学に関して、学際的・超学際的な研究が幅広く実施されている。自然科学や人文・社会科学の多様な研究者が所属しており、陸上・海洋・都市における社会-生態システムに注目し、「複雑適応系」、「人類世におけるダイナミクス」、「スチュワードシップ」、「社会の転換」といった分野横断的なテーマの研究に取り組んでいる。研究対象は世界各国に広がっているほか、2007年に設立されて以降、論文の出版数や引用数は上昇傾向を維持している。

(5) 科学技術的課題

• 生態系サービス評価

供給サービスや調整サービスに関する科学的基盤は比較的整っており国内外で評価研究が実施されているが、未解決の課題も多く残されている。例えば供給サービスと調整サービスの評価手法に関しては、評価結果の妥当性や確実性の検証などが必要と指摘されており、更なる高度化が求められている。文化的サービスや一部の調整サービス（災害の緩和、精神的健康への寄与など）の評価は十分に研究が進んでおらず、手法開発をさらに進める必要があるとされている^{24), 38)}。

生態系サービス間のトレードオフ関係と生態系・生物多様性との関連性の理解も今後の課題である。生態系サービス間の関連性についての研究の多くは時間的・空間的に限られた範囲でのスナップショット的な分析であり、歴史性を考慮したり広域を対象にしたりするなど、時空間ダイナミクスを考慮した研究はまだ少ない。そのため現状では環境変化・気候変動・その他の影響要因の変化が将来の自然資本や生態系サービスに与える影響を高い確度で予測評価することはまだ難しいと考えられている。生態系サービスの時空間ダイナミクスをその駆動要因とともに理解して将来予測につなげるためには、生態系サービスの構成要素である生態系や生物多様性のモニタリングに加え、多数の事例研究を用いた直接要因と間接要因（自然的、文化的、社会・経済的要因）に関するメタ分析、モデル地域での実証研究、複雑適応系やエージェント・ベースド・モデルなどの数理モデルを用いた社会-生態システムの研究、などが今後必要と考えられている。

• 自然資本や生態系サービスの価値評価

精力的に研究が行われているが、評価手法自体がまだ発展途上にある。そのため生態系サービスや自然資本の収支に関する情報が社会のさまざまな意思決定の場で使われることは現状では例外的であり、広く普及するには至っていない。まだ勘定に反映されていない自然資本の抽出や評価手法の開発が必要な状況にある^{24), 38)}。

自然資本の現在価値と将来価値を統合的に評価することが自然資本の持続的な管理に必要となるが、将来価値を現在価値に換算する割引率の設定などについては、経済学的な分析に加えて倫理的な観点からの検討

も不足している。

• 社会－生態システムの学際的な統合評価

社会－生態システムの統合的な評価のためには、人々の選好や生活の質の影響、社会と生態系の間でのフィードバック作用、伝統的・地域的な知識や技術の役割など、社会が生物多様性や生態系サービスに与える影響に関する理解が進んでいない。また、社会－生態システムの時空間ダイナミクスを評価するためには、社会と生態系の重要な構成要素に関する長期的なモニタリングが必要となるが、体系的な社会－生態システムのモニタリング体制は世界的にも未構築な状況にある^{24), 38)}。

• 社会－生態システムの管理政策やガバナンスに関する研究

地域レベル・国レベル・国際レベルで様々な取組みが進みつつある。環境に配慮したビジネスや資本投資も近年急速に拡大している。しかしこれらの管理政策・ビジネス・投資などが自然資本や生態系サービスの持続性に与える効果を十分に評価できるほどに社会－生態システムの理解は進んでおらず、効果評価に必要な社会－生態システムのモニタリングも十分な状況にはない。結果として管理や投資の指標開発が進んでいない。

より効果的な管理政策やビジネス・投資における意思決定を促すためには、自然資本や生態系サービスに関する基準の設定、基準の評価に必要なデータと方法論の整備、基準達成の報告に関する仕組みなどの開発が必要になる^{24), 38)}。

行動経済学、社会学、心理学などの社会科学が参加する学際的研究により、より良い管理政策やガバナンス、政策決定に必要な科学的知見の創出が期待されている。科学者や行政担当者だけでなく、社会の多様なステークホルダーが協力して進める順応的協働管理、生態系スチュワードシップなどの超学際的研究が必要とされ、その学術的発展は、社会－生態システムの持続性に貢献すると期待されている。

(6) その他の課題

• 学際的・超学際的研究に携わる人材の不足懸念と育成の必要性

社会－生態システムに関する研究は、それらの基盤となっている生態系や生物多様性に関する生態学的な研究のみならず、農学や工学などの応用分野の自然科学に加えて、社会学・経済学・歴史学・倫理学などの人文・社会科学分野の研究参加も必要になる。そのような社会－生態システムの全体を俯瞰するような教育プログラムや、社会の多様なステークホルダーと協働する超学際的研究に関する教育プログラムは、一部の大学（東北大学や九州大学など）での取り組みがあるものの、十分な人材育成ができていない状況にある。そのため、社会－生態システムに関する科学的基盤の知識生産を担う研究人材が不足しており、将来的にも人材不足が懸念されている³⁹⁾。

• 研究成果に対する評価基準の開発

社会－生態システムの研究は学際的・超学際的であり、さまざまな学問分野や社会の多様なステークホルダーとの横断的な連携が求められる。そのため、既存の学問分野で発展してきた研究成果に対する評価基準をそのまま社会－生態システムの研究に当てはめることには困難があると言われている。学際的・超学際的研究に対する評価のあり方は既存の学問分野に比べて十分に成熟しておらず、既存の分野に固執せず幅広い視点で社会－生態システムの研究評価を担当できる評価人材も少ない。また学際的・超学際的研究を推進する研究助成制度も十分に整備されていない³⁹⁾。社会が求める社会－生態システムの学際的・超学際的研究をこ

れまで以上に推進していくためには、研究成果に対する評価基準の開発が必要とされている。

・国内中核機関の必要性

スウェーデンのストックホルム・レジリエンス・センターやドイツの生物多様性研究センターのように諸外国には社会-生態システムのレジリエンスや持続可能性に関する専門の研究機関が存在する。一方、日本では京大大学生態学研究センターや総合地球環境学研究所など関連する研究機関があるものの、諸外国の研究機関と比較すると研究人材・研究施設・研究費のいずれにおいても十分とは言えない現状にある。学際的・超学際的な社会-生態システムの研究を一段と発展させるためには、研究を中心的に先導していく中核的研究機関の拡充が必要とされている³⁹⁾。

(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"> ●環境省環境研究総合推進費による大型研究プロジェクト（S9、S15など）により、生態系サービスや自然資本に関する基礎・応用研究が進みつつあり、プロジェクトの進行にともない国際的に評価される研究成果が公表されつつある。 ●自然資本の経済評価については、環境経済学的な分析や包括的な富（Inclusive Wealth）の研究などで進展が見られる。 ●社会-生態システムのガバナンスに関する基礎的研究も進みつつあるが、他国に比較して研究の進展は十分ではない。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●環境省環境研究総合推進費による大型研究プロジェクト（S9、S15など）により、生態系サービスや自然資本に関する基礎・応用研究が進みつつあり、世界を先導するような研究成果が出始めている。しかし国際的発信は必ずしも十分ではない。 ●IPBES やIUCN などの国際的なイニシアチブに研究者が参加し、国際的な取り組みへの貢献が拡大している。 ●全国レベルで生態系サービスの評価が実施され、JSSA（里山・里海の生態系と人間の福利：日本の社会生態学的生産ランドスケープ）やJBO2（生物多様性及び生態系サービスの総合評価報告書第2版）として公表され、社会-生態システム概念を新たに取り入れたJBO3（同第3版）の作成が進んでいる。 ●生態系サービスや自然資本に関係する概念が科学技術、環境政策、国土政策などに取り入れられているものの、政策を十分に支援するだけの情報基盤や研究体制は整備されていない。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●社会-生態システムに関する研究は世界で最も活発になされており、この分野を先導している。 ●スタンフォード大学を中心に進められているNatural Capital Projectでは、生態系サービスの地図化で最もよく使用されるソフトウェア（InVEST）などを提供しているほか、さまざまな国における自然資本と生態系サービスの管理に貢献している。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●オバマ政権では、全ての連邦機関に生態系サービスや自然インフラ（Natural Infrastructure）を考慮した計画や意思決定を行うように指示が出る等、生態系サービスが政策に積極的に取り入れられようとしたが、その後継続していない。 ●「デザインによる復興（Rebuild by Design）」やグリーンインフラによる先進的な取り組みが州や市レベルで進んでおり、生態系のレジリエンスを活用した自然災害に強い街づくりや雨水管理などを実践している。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

欧州	基礎研究	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●EU 全域を合わせると、社会-生態システムに関する研究は米国とともに世界で最も活発になされており、この分野を先導している。 ●Horizon 2020 には、自然を基盤とした解決策 (NbS) に関する研究プログラムが設定されているほか、社会-生態システムに関する数多くの研究プロジェクトが推進されている。自然科学と社会科学の理論を組み合わせた学際的なアプローチによる社会-生態システムのダイナミクスの研究など、多くの研究成果が得られている。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ドイツ生物多様性研究センター (iDiv: German Centre for Integrative Biodiversity Research) が2012年に設立され、生態系サービスや社会-生態システムに関する研究を活発に行なっている。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●フランス国立科学研究センター (CNRS) では、海洋における社会-生態システムの持続的管理に関する学際的研究プロジェクトなどが進められている。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●自然環境研究会議 (NERC) では、生物多様性と生態系サービスの関連、水・食料・エネルギー・生態系サービスのネクサス、自然資本や生態系サービスの価値評価などに関する研究プロジェクトが進められている。 <p>【スウェーデン】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ストックホルム・レジリエンス・センターでは、生態系サービスや社会-生態システムのガバナンスに関する研究を活発に行なっている。
	応用研究・開発	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●自然を基盤とした解決策に関する研究開発分野のレビューが専門家グループにより行われている⁷⁾。 ●Horizon 2020に基づき推進されている研究には、社会-生態システムに関する政策決定を長期モニタリングの視点から支援する研究インフラの整備などがあり、超学際的アプローチによる実践的な研究が数多く進められている。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ハンブルグ市などでの都市再生に生態系機能を活用するための研究プロジェクトや、気候変動に影響を受ける海洋生態系の自然資本と生態系サービスに関する研究プロジェクトなどが進められている。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●都市における多様なステークホルダーが協働する自然再生の仕組みづくりや、乾燥化する河川生態系の自然資本や生態系サービスの評価に関する研究プロジェクトなどが進められている。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●都市における自然資本の活用に関する超学際的研究プロジェクト、ビジネスにおける自然資本の価値化や勘定に関する研究プロジェクトなどが進められている。 ●2018年に、「今後25年間に進める環境計画(25Year Environmental Plan)」が政府により公表され、環境を第一とする農林水産業の推進や自然資本の保護と成長の政策に反映させることなどが盛り込まれている。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●生態系サービスの現状評価や地図化、生態系管理の効果に関する研究など、国際的に顕著な研究成果を近年急速に増やしつつある。 ●生態系サービスや自然資本に関する研究は、近年急速に拡大しつつあり、世界のトップグループに入っている。 ●中国科学院生態環境研究センターには、都市と地域生態国家重点実験室が設けられ、社会-生態システムの研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●環境と経済の発展を調和させる生態文明 (Ecological Civilization) の概念を中国共産党中央委員会が2015年に提示し、生態系保全や再生の取り組みを進めている。

				<ul style="list-style-type: none"> ●世界最大のPESであるSloping Land Conversion Programを1999年から進めており、広大な面積で森林再生、浸食防止、炭素貯蔵などを進めている。 ●重要な生態系サービスを保全するために、Ecosystem Function Conservation Areasを指定している。 ●生態と環境に関する年次報告書が、生態環境省から公表されている。 ●森林保全、土壌保全、砂漠化防止などの取り組みが大規模に中国全体で実施されてきた。その効果は全体的にはポジティブであるものの、課題も残っていると分析されている⁴⁰⁾。
韓国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●2013年に国立生態院が設立され、生態系サービスに関する研究も一部進んでいる。 ●生態系サービスや社会-生態システムに関係する研究は、個別の優れた研究はあるものの、全体として他国と比較すると多い方ではない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●一部の地域における生態系サービスの評価がなされているが、全国レベルでの評価はまだ実施されていない。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・生態系・生物多様性の観測・評価・予測（環境・エネ分野 2.2.8）
- ・都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）（環境・エネ分野 2.2.11）
- ・農林水産業における気候変動適応・緩和（環境・エネ分野 2.2.12）

参考・引用文献

- 1) IPBES, "Report of the Plenary of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on the work of its fifth session", System of Environmental Economic Accounting, <https://seea.un.org/content/report-plenary-intergovernmental-science-policy-platform-biodiversity-and-ecosystem-services> (2021年1月18日アクセス)
- 2) S. Díaz et al., "Assessing Nature's Contributions to People", *Science* 359, no. 6373 (2018) : 270-272, doi : 10.1126/science.aap8826
- 3) IPBES, 『生物多様性と生態系サービスに関する地球規模評価報告書 政策決定者向け要約』 S. Hashimoto et al. (trans.) (東京：環境省, 2019), <https://www.iges.or.jp/en/pub/ipbes-global-assessment-spm-j/ja> (2021年1月18日アクセス)
- 4) S. Managi and P. Kumar, Inclusive Wealth Report 2018 : Measuring Progress Towards Sustainability (Boca Raton. Florida : Routledge & CRC Press, 2018), <https://www.>

routledge.com/Inclusive-Wealth-Report-2018-Measuring-Progress-Towards-Sustainability/Managi-Kumar/p/book/9780367588083 (2021年1月18日アクセス)

- 5) G. -M. Lange, Q. Wodon and K. Carey, *The Changing Wealth of Nations 2018 : Building a Sustainable Future* (Washington : World Bank, 2018) , <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29001> (2021年1月18日アクセス)
- 6) P. M. Kareiva et al., "Improving Global Environmental Management with Standard Corporate Reporting", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, no. 24 (2015) : 7375-7382, doi : 10.1073/pnas.1408120111
- 7) European Commission, "Nature-Based Solutions : Nature-based solutions and how the Commission defines them, funding, collaboration and jobs, projects, results and publications", European Comission, <https://ec.europa.eu/research/environment/index.cfm?pg=nbs> (2021年1月18日アクセス)
- 8) WWAP (United Nations World Water Assessment Programme) /UN-Water, "The United Nations World Water Development Report 2018 : Nature-Based Solutions for Water", UNESCO, <https://www.unwater.org/world-water-development-report-2018-nature-based-solutions-for-water/> (2021年1月18日アクセス)
- 9) IUCN, "Global Standard for Nature-based Solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS", IUCN, <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2020-020-En.pdf> (2021年1月18日アクセス)
- 10) C. Cecchi et al., "Nature-based Solutions & Re-Naturing Cities : Towards an EU Research and Innovation policy agenda", European Commission, https://www.academia.edu/22849939/Nature_Based_Solutions_and_Re_Naturing_Cities_Towards_an_EU_Research_and_Innovation_policy_agenda (2021年1月18日アクセス)
- 11) S. Willcock et al., "Machine learning for ecosystem services", *Ecosystem Services* 33 (2018) : 165–174, doi : 10.1016/j.ecoser.2018.04.004
- 12) G. O. Ndong, O. Therond and I. Cousin, "Analysis of relationships between ecosystem services: A generic classification and review of the literature", *Ecosystem Services* 43 (2020) : 101120, doi : 10.1016/j.ecoser.2020.101120
- 13) J. Shen et al., "Exploring the heterogeneity and nonlinearity of trade-offs and synergies among ecosystem services bundles in the Bei-jing-Tianjin-Hebei urban agglomeration", *Ecosystem Services* 43 (2020) : 101103, doi : 10.1016/j.ecoser.2020.101103
- 14) A. M. García et al., "Green infrastructure spatial planning considering ecosystem services assessment and trade-off analysis. Application at landscape scale in Galicia region (NW Spain) ", *Ecosystem Services* 43 (2020) : 101115, doi : 10.1016/j.ecoser.2020.101115
- 15) D. P. Van Vuuren et al., "Integrated scenarios to support analysis of the food–energy–water nexus", *Nature Sustainability* 2, no. 11 (2019) : 1132–1141, doi : 10.1038/s41893-019-0418-8
- 16) A. V. Pastor et al., "The global nexus of food–trade–water sustaining environmental flows by

2.2

俯瞰区分と研究開発領域

- 2050”, *Nature Sustainability* 2, no. 6 (2019) : 499–507, doi : 10.1038/s41893-019-0287-1
- 17) S. Wolff et al., “Meeting global land restoration and protection targets : What would the world look like in 2050?”, *Global Environmental Change* 52 (2018) : 259–272, doi : 10.1016/j.gloenvcha.2018.08.002
- 18) Z. Ouyang et al., “Using gross ecosystem product (GEP) to value nature in decision making”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117, no. 25 (2020) : 14593–14601, doi : 10.1073/pnas.1911439117
- 19) U. Pascual et al., “Valuing nature’s contributions to people : the IPBES approach”, *Current Opinion in Environmental Sustainability* 26 (2017) : 7–16, doi: 10.1016/j.cosust.2016.12.006
- 20) J. Salzman et al., “The global status and trends of Payments for Ecosystem Services”, *Nature Sustainability* 1, no. 3 (2018) : 136–144, doi : 10.1038/s41893-018-0033-0
- 21) W. Adamowics et al., “Assessing ecological infrastructure investments”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, no. 12 (2019) : 5254–5261, doi; 10.1073/pnas.1802883116
- 22) S. Wunder et al., “From principles to practice in paying for nature’s services”, *Nature Sustainability* 1, no. 3 (2018) : 145–150, doi : 10.1038/s41893-018-0036-x
- 23) C. J. Vörösmarty et al., “Scientifically Assess Impacts of Sustainable Investments”, *Science* 359, no. 6375 (2018) : 523–525, doi : 10.1126/science.aao3895
- 24) S. Brondizio et al., Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (Bonn, Germany : IPBES, 2019) , <https://ipbes.net/global-assessment> (2021年1月18日アクセス)
- 25) M. Casaria and C. Tagliapietra, “Group size in social-ecological systems”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, no. 11 (2018) : 2728–2733, doi : 10.1073/pnas.1713496115
- 26) J. Kabubo-Mariara, The methodological assessment report on scenarios and models of biodiversity and ecosystem services, S. Ferrier et al. (eds.) (Bonn, Germany : IPBES, 2016) , https://www.efdnitiative.org/sites/default/files/publications/2016.methodological_assessment_report_scenarios_models.pdf (2021年1月18日アクセス)
- 27) K. A. Henderson, C. T. Bauch and M. Anand, “Alternative stable states and the sustainability of forests, grasslands, and agriculture”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, no. 51 (2016) : 14552–14559, doi : 10.1073/pnas.1604987113
- 28) R. Martin, M. Schluter and T. Blenckner, “The importance of transient social dynamics for restoring ecosystems beyond ecological tipping points”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117, no. 5 (2020) : 2717–2722, doi : 10.1073/pnas.1817154117
- 29) B. W. Kolosz et al., “Conceptual advancement of socio-ecological modelling of ecosystem services for re-evaluating Brownfield land”, *Ecosystem Services* 33 (2018) : 29–39, doi : 10.1016/j.ecoser.2018.08.003
- 30) J. E. Cinner et al., “Sixteen years of social and ecological dynamics reveal challenges

and opportunities for adaptive management in sustaining the commons”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, no. 52 (2019) : 26474–26483, doi : 10.1073/pnas.1914812116

- 31) A. Triyanti and E. Chu, “A survey of governance approaches to ecosystem-based disaster risk reduction : Current gaps and future directions”, *International Journal of Disaster Risk Reduction* 32 (2018) : 11–21, doi : 10.1016/j.ijdr.2017.11.005
- 32) P. Aminpour et al., “Wisdom of stakeholder crowds in complex social–ecological systems”, *Nature Sustainability* 3 (2020) : 191–199, doi : 10.1038/s41893-019-0467-z
- 33) A. Grêt-Regamey, S. H. Huber and R. Huber, “Actors’ diversity and the resilience of social–ecological systems to global change”, *Nature Sustainability* 2, no. 4 (2019) : 290–297, doi : 10.1038/s41893-019-0236-z
- 34) J. Freeman, J. A. Baggio and T. R. Coyle, “Social and general intelligence improves collective action in a common pool resource system,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117, no. 14 (2020) : 7712–7718, doi : 10.1073/pnas.1915824117
- 35) R. Camara-Leret, M. A. Fortuna and J. Bascompte, “Indigenous knowledge networks in the face of global change”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, no. 20 (2019) : 9913–9918, doi : 10.1073/pnas.1821843116
- 36) K. A. Johnson et al., “A benefit–cost analysis of floodplain land acquisition for US flood damage reduction”, *Nature Sustainability* 3 (2020) : 56–62, doi : 10.1038/s41893-019-0437-5
- 37) A. McVittie et al., “Ecosystem-based solutions for disaster risk reduction : Lessons from European applications of ecosystem-based adaptation measures”, *International Journal of Disaster Risk Reduction* 32 (2018) : 42–54, doi : 10.1016/j.ijdr.2017.12.014
- 38) M. E. Mastrángelo et al., “Key knowledge gaps to achieve global sustainability goals”, *Nature Sustainability* 2 (2019) : 1115–1121, doi : 10.1038/s41893-019-0412-1
- 39) 日本学術会議 統合生物委員会 生態科学分科会, 「報告 生態学の展望」, <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-h170727-2.pdf> (2021年1月18日アクセス)
- 40) B. A. Bryan et al., “China’s Response to a National Land-system Sustainability Emergency”, *Nature* 559, no. 7713 (2018) : 193–204, doi : 10.1038/s41586-018-0280-2

2.2.10 循環利用とライフサイクル評価

(1) 研究開発領域の定義

本領域は、製品やサービスの全ライフサイクルについての環境負荷や影響を定量的に把握し低減するための評価・管理技術と、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、リサイクル技術等に関する新しい切り口からの研究アプローチや、新しい社会実装手法・技術の導入等に係る動向を含む領域である。様々な資源の物理的、化学的、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、ライフサイクルアセスメント、物質ストック・フロー分析などを対象とする。また、主として土地改変やそれに由来する天然資源利用の環境影響評価の進展や、鉱山開発における技術的変化も併せて検討することとする。

(2) キーワード

ライフサイクルアセスメント、マテリアルフロー分析、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、天然資源開発の環境影響、鉱山開発技術、資源循環、プラスチックリサイクル、分離・選別技術

(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、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、結果の共有に関する方法論を開発、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。

この分析手法のひとつとして、例えば、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）がある。これは、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、LCAは、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を可能とする。

本節では、主として素材系資源に関する話題を扱う。こうした資源の効率的利用が叫ばれるようになってしばらく経つが、大きな方向性に変化はない。しかし、鉱山現場での大規模な尾鉱ダムの決壊が大きなニュースとなったように、鉱山開発などの土地改変を通じた環境影響や、資源そのものの枯渇など、天然資源利用

を可能な限り抑える、そして使うのであれば可能な限り環境影響を少なく使おうという、経済成長と環境影響や天然資源利用を切り離すいわゆるデカップリングへ向けた動きがますます進んでいる。この点はSDGsのゴール12.2「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」としても設定されている。また欧州発のいわゆるサーキュラーエコノミー（CE; Circular Economy）については、昨今のプラスチック問題などもあり、その促進の動きがますます進んだ。その結果、これまでの技術開発の継続だけではなく、天然資源消費量の削減、循環利用の促進につながるような新しい技術の開発とその社会実装は、極めて社会・経済的意義の高いものになっている。

[研究開発の動向]

世界的・学術的な研究開発の動向を客観的に把握するために、Web of Scienceにおいてタイトル、要旨、キーワードに“Circular Economy”（CE）を含んだ5,374件の論文と、2010年～2020年7月までに登録された文献のうち“Life Cycle Assessment”もしくは“Life Cycle Analysis”（LCA）を含んだ22,896件の文献に対し、書誌情報をテキストマイニングとネットワーク分析により自動分析することができる学術俯瞰システム¹⁾を用いて、計量書誌分析を行った。その結果、CEを含む文献については、引用関係からのクラスタリングにより、上記の論文は3,468件の文献で構成される18のクラスターに分割された。また、LCAに関する文献については、引用関係からのクラスタリングにより、上記の論文は20,740件の文献で構成される18のクラスターに分割された。

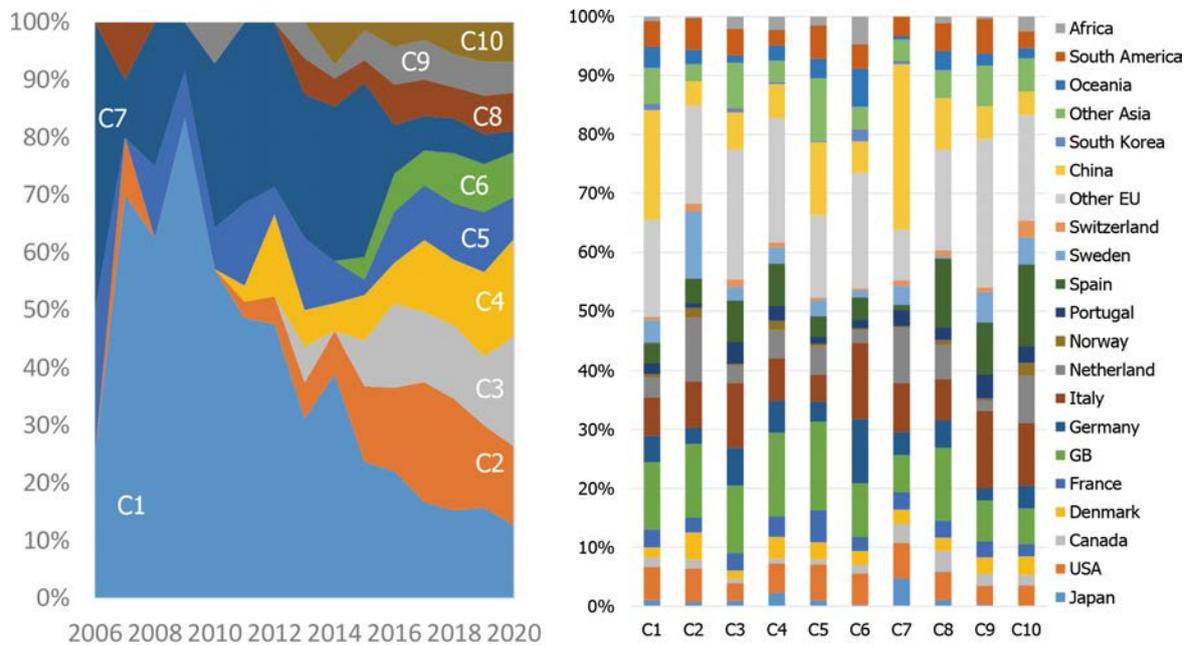
CEおよびLCAのいずれにおいても、年々文献数は増加しており、引用関係からのクラスタリングにより、CE・LCAともに18のクラスターに分割された。本稿では分類される文献数が多い上位10のクラスターに関して議論する。トップ10クラスターで、CEを含む論文群では約90%、LCAを含む論文群では約76%がカバーされる。この10の主クラスター内で共通して利用されている主なキーワードは図表2.2.10-1、図表2.2.10-3の通りである。

図表2.2.10-1にCEを含む文献群のクラスター別キーワード、ノード数、被引用回数をまとめる。“Circular Economy”という用語自体は比較的新しい言葉であることもあり、文献数は必ずしも多くないが、議論されている分野は多岐に渡っていることがわかる。図表2.2.10-2 (a) に示す通り、クラスターの分岐は近年になり文献数の増加とともに顕著にみられるようになってきているが、図表2.2.10-2 (b) に示されている通り、いずれのクラスターにおいても欧州が占める割合は比較的大きく、トップ10クラスター平均で約67%の著者が欧州の所属となっている。これに対し、中国が約10%程度、米国が約5%程度、日本はわずか約1%程度にとどまっている。国別にみると、イギリスが最も文献数が多く、ここに、中国、イタリア、スペイン、オランダ、米国、ドイツ、スウェーデンが続き、日本は22位であった。

各クラスターを概観すると、まず、C1は廃棄物管理に関するクラスターであり、いわゆる5R（remanufacturing, refurbishment, repair, reuse, recycle）に関する文献が多く分類されている。トップ10クラスターの中では著者所属に中国が含まれている割合が比較的高く、約19%となっている。C2はビジネスモデルに関する文献が含まれており、CEによって形成される新しいシステムの価値や、指標に関する研究がなされている。C3は廃棄物管理の中でもバイオマスに関する研究が含まれており、バイオエコノミーに関する研究も含まれていた。C4はC3同様にバイオマスに関する研究であるが、バイオリファイナリーや産業共生など、生産技術に関する研究が含まれており、LCAに関する研究も多く含まれていた。C5はサプライチェーン管理や生産技術について、特に、情報技術を用いた研究が含まれており、3Dプリンティングや人工知能に関する研究が含まれていた。C6は電気電子廃棄物やリチウムイオン電池などを対象とし、含有してい

図表 2.2.10-1 CEを含む文献群のクラスター別キーワード、ノード数、被引用回数

クラスター	キーワード	ノード数、平均被引用回数
C1	maintenance, metal trade, scrap, GSCM (green supply chain management) , value retention option, refurbish, remanufacturing, repair, China	578, 3.93
C2	business model innovation, value proposition, smart service, lifetime extension	500, 4.83
C3	Waste management, digestion, bioeconomy, fermentation	415, 1.61
C4	biorefinery, industrial symbiosis, stock, LCA (life cycle assessment) , adaptive reuse, service system	413, 2.55
C5	GSCM (green supply chain management) , additive manufacturing, cyber physical system, blockchain, 3D printing, artificial intelligence	300, 2.74
C6	WEEE (waste electrical and electronic equipment) , indium, LiB (lithium ion battery) , printed circuit board, battery, Lithium, Cobalt, copper, silver, rhenium, silicon, mobile, urban mining, criticality	238, 1.59
C7	eco industrial park, industrial symbiosis, chemical industrial park, urban industrial park	227, 3.62
C8	construction, adaptive reuse, material stock, building, circular building	195, 1.97
C9	food, landfilling, fish, biomethane, MSWI (municipal solid waste incineration)	182, 1.43
C10	Circular city, tourism, food contact, luminaires	175, 1.47



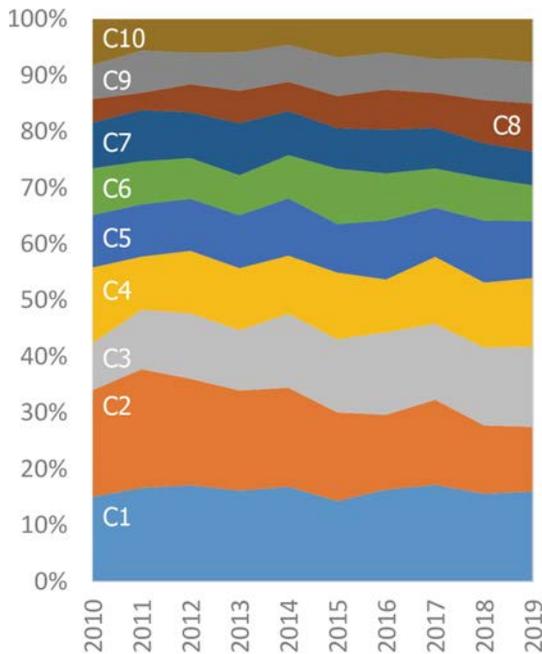
(a) 年別の発刊割合 (b) 著者所属の国別割合
図表 2.2.10-2 2010年～2020年7月に発刊されたCEを含む論文の概況

る金属資源の回収、都市鉱山としての管理方法などに関する研究がなされている。C7は産業共生やエコインダストリアルパークに関する研究であり、都市計画や地域設計に関する研究が含まれていた。トップ10クラスターの中で最も著者所属に中国が多く含まれており約28%であった。C8では建築物に関する資源循環が議論されており、C9では食料や一般廃棄物に関する循環の可能性が研究されている。C10では都市の機能としての循環が議論されており、ツーリズムなどとの関係性なども示されていた。

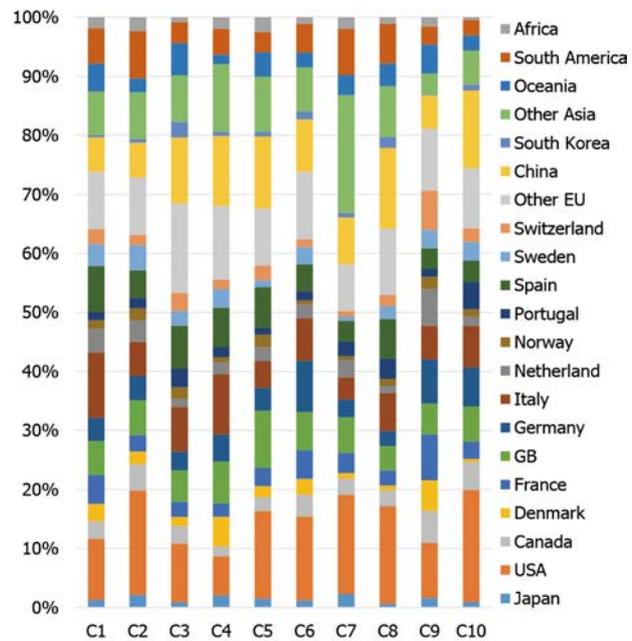
図表 2.2.10-3 LCAを含む文献群のクラスター別キーワード、ノード数、被引用回数

クラスター	キーワード	ノード数、平均被引用回数
C1	-1 urban agriculture, tomato, lettuce, rooftop greenhouse, cropping system, organic farming, hydroponic, farming system,	409, 4.82
	-2 milk production, dairy farm, cheese, fat and protein,	328, 5.27
	-3 rice production, cropping system, data envelopment analysis, energy use efficiency, paddy production,	315, 4.87
	-4 seafood, fishery, aquaculture, aquaponics,	281, 6.65
	-5 dietary pattern, nutritional quality, food consumption, dietary guideline, dietary choice,	213, 3.96
C2	-1 ethanol, switchgrass, giant reed, miscanthus, sorghum, stover, lignocellulosic ethanol,	559, 3.95
	-2 logging residue, forest carbon, energy biomass, HWP (harvested wood product) ,	322, 4.94
	-3 forest operation, pellet, torrefaction, logging, short rotation,	309, 3.86
	-4 biochar, pyrolysis, bio oil, hydroprocessing, charcoal production,	249, 4.12
	-5 PHA (polyhydroxyalkanoates) , PLA (polylactic acid) , biopolymers, bioplastics, phb (polyhydroxybutyrate) , biodegradable plastic	247, 3.33
C3	-1 embodied carbon, prefabricated, building construction, low carbon building,	408, 4.64
	-2 passive house, zero energy building, building stock, renovation, building retrofit, new building, family house,	378, 3.77
	-3 cork, brick, thermal insulation, insulation material, insulation thickness, fired clay,	330, 3.13
	-4 building information modeling, digital fabrication, zero energy building, parametric design, energy building,	237, 4.05
	-5 Nzeb (net zero energy building) , solar heating and cooling, ground source heat pump, new residential, office building,	167, 2.15
C4	-1 digestate, biogas plant, biogas production, biomethane, anaerobic,	413, 5.22
	-2 MSW (municipal solid waste) management, mechanical biological treatment, leachate, composting, landfill gas,	386, 4.37
	-3 MSW (municipal solid waste) management, integrated municipal solid, separate collection, source segregation, selective collection,	243, 2.72

	-4	deposit refund system, mechanical recycling, glass packaging, recycled plastic,	185, 2.54
	-5	restaurant food waste, animal feed, food surplus, food loss,	174, 4.03
C5	-1	energy payback time, crystalline silicon, building integrated photovoltaic, concentrator, cadmium telluride, microgrid, CIGS (Copper indium gallium selenide) ,	354, 4.53
	-2	power loss, transformer, power transmission, energy system modelling, network asset,	284, 3.57
	-3	wind farm, axis wind turbine, gearbox, blade, onshore wind, offshore wind,	152, 3.68
	-4	perovskite solar cell, polymer solar, power conversion efficiency, organic photovoltaics,	133, 4.77
	-5	concentrating solar power, cooling heating and power, combined cooling, thermal energy storage,	131, 2.72
C6		machining, remanufacturing, pallet, hotspot database, metal arc, distributed recycling, criticality,	1181, 4.51
C7		microalgae, biodiesel, hydrothermal liquefaction, nannochloropsis, chlorella, seaweed, jatropha curcas, jet fuel,	1161, 5.65
C8		pavement, asphalt pavement, aggregate concrete, reclaimed asphalt,	1083, 4.99
C9		cropping system, specie richness, water scarcity, biodiversity impact, land use impact, organizational life cycle assessment, planetary boundary,	1081, 5.02
C10		electric vehicle, charging, vehicle, lithium ion battery, powertrain, high speed rail, fuel cell vehicle, charging infrastructure, carbon fibre, cathode, criticality,	1062, 4.93



(a) 年別の発刊割合



(b) 著者所属の国別割合

図表 2.2.10-4 2010年～2020年7月に発刊されたLCAを含む論文の概況

図表2.2.10-3にLCAを含む文献群のクラスター別キーワード、ノード数、被引用回数をまとめる。図表2.2.10-4 (a) に示される通り、各クラスターの割合は比較的安定しており、全体数が増えていることから、どのクラスターも過去10年で文献数を同等程度増やしていることがわかる。図表2.2.10-4 (b) によると、トップ10クラスターの中で著者の所属となっている割合は、欧州で約53%、米国で約13%、中国で約9%、日本が約2%であった。国別にみると、米国が最も文献が多く、次いで中国となった。その後はイタリア、スペイン、イギリス、ドイツ、フランスと続き、日本は19位であった。

各クラスターを概観すると、まず、C1では食料生産、食品などに関する研究が含まれており、農業や酪農、漁業といったプロセスを対象としたLCA研究のクラスターであった。C2はバイオマスを用いた生産技術や製品、制度に関する研究が行われており、バイオプラスチックに関する研究もC2-5として含まれていた。C3では建築物や建築用材料に関する研究クラスターとなっており、ネットゼロ建物に関する研究もあった。C4は廃棄物に関するクラスターとなっており、廃棄物から燃料やエネルギーを得る技術などが含まれていた。C5は、エネルギー関連技術が含まれており、太陽光や風力、変動性再生可能エネルギーを用いるためのネットワークシステムなどの研究が含まれていた。C6は機械製品やそのリサイクルに関する研究が含まれており、金属資源のリサイクルについても含まれていた。C7は藻類バイオマスに関する研究となっており、そこから得られるバイオディーゼル燃料や航空機用燃料に関する研究が含まれていた。C8ではコンクリートや舗装、アスファルトといったインフラの構造材に関して研究がなされていた。C9では水の消費や土地の利用に関する環境影響や、生物多様性など影響項目に関する研究が含まれていた。C10は主に自動車に関する技術や製品についての研究が含まれており、バッテリーやそのリサイクルについても研究がなされている。

CEは、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年までに廃棄物の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、などを挙げている²⁾。世界経済フォーラムによる報告書では、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³⁾。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。さらにCEの規格化へ向けISO（国際標準機構）においてTC（Technical Committee: 技術委員会）が立ち上がるなどしており、欧州外へ向けての展開が進みつつある。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に関しては、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⁴⁾。ここで、昨今の変遷として、LCAは、社会の中で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ことが指摘できる。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きており、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。

天然資源・循環資源の双方において重要になる技術開発の一つは分離・選別である。それはこれまでの技術では使いこなせなかった低品位の資源やスクラップを有効利用するためには当然必要な技術である。ここで

はAI、IoT技術の援用や、物理的な処理による回収対象成分の濃縮と、的確な乾式・湿式製錬などの従来技術の組み合わせの最適化が検討されてきている。新しい分離・選別の対象は次々と現れており、低品位鉱石からの忌避物質の除去、混合プラスチックスクラップからの難燃剤含有プラスチックの除去など、より細かいものを分けていく技術の開発が引き続きターゲットである。

また、鉱山現場における無人化へ向けた動きは急速に進みつつある。鉱山採掘現場においては低品位化、大深部化などが進んでおり、それを受けての大規模坑内掘技術の利用が進むなどしているが、これと平行して事故の危険は上がっている。この点、国際金属・鉱業評議会（ICMM）、国連環境計画（UNEP）、国連責任投資原則（PRI）は、2019年に発生した廃滓ダム決壊事故を機に、翌2020年に初めて廃滓管理に関する国際業界基準を策定・公表しており、改めて個別の事象に目を向ける動きがあったといえる⁵⁾。また、コロナ禍の影響もあってそもそも現場への人員配置を最低限に抑えようとする動きがある。その中で、鉱山機械業界で言えば世界のトップに位置する小松製作所を始め、日系企業が世界的に見て優位性を持つ資源開発関連では数少ない分野であり、引き続きこれをリードしていく必要がある。

資源循環の観点から、情報技術の援用も含め全体の効率化によるコスト削減は急務であり、特に物流の高効率化は避けられない課題である。静脈物流に関する研究は動脈に比べれば非常に少なく、急ぎ進める必要がある。動脈物流の知見を援用する取り組みも必要であろう。

最後に、資源のサプライチェーン全体を通したトレーサビリティの強化は社会的要請であって、そのための情報技術の援用も大きな研究課題である。例えば天然資源における紛争鉱物問題、循環資源においては例えば社会システムとして循環利用の進んだ製品に補助を出そうとしたときに、そのエビデンスとしての原料側のトレーサビリティ情報の利用などが考えられる。こうした動きは世界的に進みつつあり、またこうした動きと関連して、先述のCEのISO化の動きなどにも目を向ける必要がある。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• プラスチック関連の技術開発と評価

従来から存在していたプラスチックリサイクルに関する技術・システム開発に加え、生分解性プラスチック、バイオプラスチックに関する研究開発が増えている。再生可能資源や廃棄物からの化成品製造という観点で、以前から存在していたが、近年のプラスチックに関する社会からの関心の高まりを受け、多くの研究開発が加速推進されている。合わせて、LCAをはじめとする評価に関するニーズも高まっている。各種国家プロジェクトにおいてもLCAプロジェクト期間中にLCAを実施することが要件となっていることもあり、技術開発に合わせた方法論の開発とケーススタディの実施が必要となっている。

• Nexus Analysis：多様な観点の依存性解析

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（Food-Energy-Water Nexus Analysis）をはじめとし、多様な評価の観点の依存性を解析する研究が増えている。例えば、Energy-Nutrients-Water、Nutrition-Environment、Climate-Renewable energy-Resource management-Bioeconomy、Energy material-Buildings-Mobility-Energy systemsなどがある。これらは国や地域ごとに行うものであり、統計データや技術・システムに関する情報を組み合わせ、現在の依存性を明らかにするものから、何らかの変化が起きたときに将来的にどのような依存性へと波及するかなど、主に可視化して議論することを目的とした研究が多く存在する。特に農業や食料に関する研究は、元々Food-Energy-Water nexusが2011

年頃から議論されはじめ⁶⁾、FAOからもガイドラインが発行⁷⁾されるなど、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などにおいて特集号が組まれるなど、研究報告も増えてきている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

• カーボンリサイクル

CO₂を炭素資源と捉えてこれを回収し、多様な炭素化合物として再利用（リサイクル）するカーボンリサイクルが推進されている⁸⁾。カーボンリサイクル技術のロードマップが策定され、多くの産学官連携のプロジェクトが開始されている。

• プラスチック資源循環

プラスチック資源循環戦略に基づき、Plastics Smart⁹⁾や関連技術開発のプロジェクト¹⁰⁾が推進されている。特にバイオプラスチックについては、導入ロードマップが2020年度に検討されており、2030年までに最大限の導入を目指した技術開発の方針を策定する試みがなされている¹¹⁾。

• Horizon 2020における関連プロジェクト

Horizon2020とは、欧州全体で行われる研究・イノベーションの枠組み計画であり、様々なプロジェクトを包含している。その中で社会的課題解決を志向する枠組みの中に環境に関するものもあり、その中で資源効率にかかる研究のための枠がそれなりに用意されている。技術寄りのものから社会システム全体を扱うようなものまで幅広く支援されている。

(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ことも多く、将来の技術システムを評価することが重要となる。この点、社会における技術の評価として、社会技術的（Sociotechnical）な分析が必要とされてきている¹²⁾。自然科学的なシステムの解析に加え、人文社会的な人の行動や政策、経済といった観点の分析が技術の社会導入に不可欠であり、こうした学際的な取組が当該分野ではますます必要となってくる。

(6) その他の課題

• データの更新による過去の研究の再評価と、技術・システムの将来性の評価

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過去の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。例えば、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、アップデート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、こうした過去の研究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。

また、再生可能資源を用いる技術は2030年/2050年などに導入されることを狙って開発されているが、多くの技術評価は現在（もしくは過去）のインベントリデータに基づいた評価になっている。他の技術の研究開発や、インフラの変化、主流となっているマテリアルフローなどが現在からどの程度変化しているのかを視野に入れた評価を行い、真に2030年/2050年などに導入されているべき技術・システムを探索することができる方法論が必要である。

• 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である。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。LCAに関しては徐々にではあるが、確実に要素技術開発プロジェクトにおいても考慮すべき観点とされるようになってきた。一方、考慮されている事項が温室効果ガス排出など、LCAが評価できる範囲のうち限られた部分のみとなっている。また、マテリアルフロー分析や産業連関分析など、他の方法論についてはまだ検討範囲として含まれていないものも多い。技術評価手法としての定着をより一層進めていく必要がある。

(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、下表において基礎的な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。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。

2.2 俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

	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。 リサイクルに関する技術的な側面について言えば、LIBSソーターの実用化や電気パルス破碎など技術の社会実装は進みつつあるが、諸外国と比べて圧倒的に進んでいると言える状況ではない。また体系的な側面は圧倒的に遅れている。他方で、本稿の整理の対象外ではあるが、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、それを見据えての分離・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。
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。 リサイクルに関する技術的な側面は、DOEが設立したCMI (Critical Material Institute) などにおいて、応用研究・開発が進められている。またアップルコンピューターの解体ロボットLiamやDaisyのように、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が進む可能性がある。
欧州	基礎研究	◎	↗	【EU】 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。 【ドイツ】 Social Life Cycle Assessmentに関する研究が多く報告されている。 【英国】 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、生産システムの持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。
	応用研究・開発	◎	↗	【EU】 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。

				<p>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。</p> <p>【ドイツ】 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。</p> <p>【英国】 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。</p> <p>リサイクルの技術的な側面について言えば、Horizon2020からの財政的な支援もあり、そもそも分離・選別技術のレベルの高さと相まって一歩先を進んでいる印象もある。またシステム的な研究・実際の社会システム設計などこうした技術開発がより密接にリンクした形で進んでいるような所もあるようにみられる。</p>
中国	基礎研究	×	↘	<p>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。</p>
	応用研究・開発	◎	↗	<p>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。</p> <p>レベルが高いとは言えないものの、社会実装を試みる現場は多く、また動脈側の産業の急激な成長が静脈産業の技術的な進展を促しているような側面もある。例えば電気自動車関係の急速な発展はバッテリーリサイクルに関する技術開発を推し進めているようなところは、技術、社会システム双方に見られる。</p> <p>また、鉱山開発現場を多く持つことから、広い意味で資源関連の技術が進むことはありえる。</p>
韓国	基礎研究	△	↘	<p>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。</p>
	応用研究・開発	△	↘	<p>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。</p> <p>技術的な側面について言えば、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と言える。</p>
その他の国・地域	基礎研究	△	→	<p>インベントリデータベース、ならびにライフサイクル影響評価手法のいずれにおいても、アジア各国における研究報告ではecoinventや日本のLIMEなど、他国の手法が用いられている。</p>
	応用研究・開発	○	↗	<p>衣料品やパームなど、東南アジアを中心に生産され、世界に輸出されている製品に関し、LCAなどを用いた評価が盛んになっている。実際に評価を実施しているのは、欧州の研究者などが多いが、アジア諸国の研究者が共著者として参画しているものが多い。</p>

				リサイクル関係の技術について言えば、台湾をはじめとする一部地域はアジアの中では非常に高いレベルにあり、そこに実装される技術も比較的高いものがある。その他ではタイなどで徐々に技術が実装されるように見られるが、これは先進国が工場を移転した結果、そこで発生する廃棄物の処理技術もあわせて移転させているような場合も見られる。また、近年豪州において資源循環に焦点を当てた研究が急激に増えている印象があるが、まだ突出した成果があるようには見受けられない。
--	--	--	--	---

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

<ul style="list-style-type: none"> ・分離技術（ナノテク・材料分野 2.1.5） ・植物由来材料（ライフ・臨床医学分野 2.2.3）

参考・引用文献

- 1) 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」『学術俯瞰』, <https://academic-landscape.com/> (2020年12月30日アクセス)
- 2) European Commission, “Closing the loop : Commission adopts ambitious new Circular Economy Package to boost competitiveness, create jobs and generate sustainable growth”, European Commission, http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-6203_en.htm (2020年12月30日アクセス)
- 3) World Economic Forum and Ellen MacArthur Foundation, “Intelligent Assets : Unlocking the Circular Economy Potential”, Ellen MacArthur Foundation, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/intelligent-assets> (2020年12月30日アクセス)
- 4) S. Hellweg and L. M. Canals, “Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment”, *Science* 344, no. 6188 (2014) : 1109-1113, doi : 10.1126/science.1248361
- 5) UNEP (The United Nations Environment Programme) , “New Global Industry Standard on Tailings Management aims to improve the safety of tailings facilities in the mining industry”, UNEP, <https://www.unenvironment.org/news-and-stories/press-release/new-global-industry-standard-tailings-management-aims-improve-safety> (2020年12月30日アクセス)
- 6) M. Bazilian et al., “Considering the energy, water and food nexus : Towards an integrated

- modelling approach”, *Energy Policy* 39, no. 12 (2011) : 7896-7906, doi : 10.1016/j.enpol.2011.09.039
- 7) FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) , “The Water-Energy-Food Nexus A new approach in support of food security and sustainable agriculture”, FAO, <http://www.fao.org/3/a-bl496e.pdf> (2020年12月30日アクセス)
 - 8) 経済産業省資源エネルギー庁長官官房資源エネルギー室, 「カーボンリサイクルについて」『経済産業省資源エネルギー庁』, https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/carbon_recycling/ (2020年12月30日アクセス)
 - 9) 環境省, 「プラスチック・スマートにご賛同いただける皆様」『環境省』, <http://plastics-smart.env.go.jp/> (2020年12月30日アクセス)
 - 10) 環境省水・大気環境局水環境課海洋環境室, 「令和2年度脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業 (マイクロプラスチックによる汚染防止のための化石資源由来からの代替) (委託) 募集について」『環境省』, <http://www.env.go.jp/press/107791.html> (2020年12月30日アクセス)
 - 11) 環境省, 「バイオプラスチック導入ロードマップ検討会」『環境省』, http://www.env.go.jp/recycle/post_58.html (2020年12月30日アクセス)
 - 12) F. W. Geels et al., “Sociotechnical transitions for deep decarbonization”, *Science* 357, no. 6357 (2017) : 1242–1244, doi : 10.1126/science.aao3760

2.2.11 都市環境サステナビリティ (気候変動適応、感染症、健康)

(1) 研究開発領域の定義

都市環境のサステナビリティに関する領域である。気候変動や感染症、自然災害などが都市環境に与える影響の予測と評価、それらを基盤にした都市レジリエンスの向上策や適応シナリオ構築を扱う。加えて、都市住民の健康、QOL、ウェルビーイングに関する研究開発や社会実装の取り組みを扱う。

気候変動への適応に向けて、気候変動が及ぼす影響を空間詳細化する解析手法や、地域住民協働に資する視覚化手法などを対象とする。それらを基盤とした暑熱や極端気象に備える都市計画シナリオ構築、自然災害への防災行動計画等も含める。感染症への環境防御については、都市環境学、都市工学的知見を生かした健康への影響予測、評価、対策を扱う。(医療そのものは扱わないが、公衆衛生は一部含む。)都市住民の身体、精神、社会的といった多面的健康について、都市ヒートアイランド現象と地球温暖化がもたらす暑熱や都市環境に対する研究を扱う。暑熱対策技術に加え、都市の自然が都市住民に与える影響の解析手法や影響の評価、予測を含む。

(2) キーワード

■気候変動への適応 (都市防災を含む)

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、自然災害 (洪水、台風、干ばつなど)、防災、グリーンインフラ、都市緑地

■都市環境における感染症への防御 (医学を除く都市工学、都市環境学的側面)

公衆衛生、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19)、感染経路、換気、空調、建築環境、感染性エアロゾル、気流計画、ろ過、紫外線照射殺菌 (UVGI)、テレワーク (在宅勤務)、中央商業地区、ベッドタウン

■都市環境における健康、暑熱対策等

健康、都市ヒートアイランド現象、熱中症、熱関連超過死亡 (熱波、熱中症)、暑さ対策、自然体験、環境心理学、予防医学、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)、ライフスタイル転換、超高齢社会、SDGs、地方自治体

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

■気候変動への適応 (都市防災を含む)

IPCC第4次評価報告書、第5次評価報告書で述べられている通り、気候システムの温暖化には疑う余地がない。2021～22年公表予定の第6次評価報告書でも、この見解は踏襲される見通しである。太古から続く気候変動の中で、現在は「温暖化」のフェーズにある。世界の平均気温は、最近100年間で0.74℃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℃上昇するという最悪ケース予測シナリオも提示されている。温室効果ガス (GHGs) の大気中平均存在寿命は長期に渡ると推定され、温暖化が不可避の状況下に既にある。GHGs排出量が即座には減少せず、ますます深刻化する将来に向け、エネルギー高効率化、エネルギー転換等の「緩和」努力に加え、温暖化を前提とした「適応」も欠かせない^{適応1)}。2015年に採択されたパリ協定の第7条でも、気候変動「適応策」の強化が明確に位置付けられた。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 (損害の受けやすさ) 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。

GHGs増大が気候変動に影響する結果として、地球温暖化が進行し、社会的・経済的な影響が顕在化している。とりわけ、中緯度地域では豪雨の頻発化や熱帯低気圧（台風、ハリケーン等）の激甚化などをもたらす確信度は高いと考察されてきた。実際、我が国では台風や豪雨による洪水災害の頻発化、激甚化などが身近に現れている。生命への危険に加え、経済的損失も甚大化している。持続可能な都市環境のためには、「適応策」の能力向上として、気候変動の影響に対する強靱化と脆弱性の減少が求められる。「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、対策技術、社会実装など、多岐に渡る研究と活動が求められる^{適応2)}。自然災害に対する防災対策は、既存の防災策に、適応策をあわせたものとせざるを得ない。個別、単体での技術開発はこれまでに進められているが、システムとしての社会実装はあまり進んでおらず、課題がある。さらに台風による停電中の熱波の襲来、感染症蔓延下での酷暑や洪水災害といった複合災害への対策は、これまでは現実起こるものとして、十分ではなかった。今後、早急に研究と行政的対応を進めていく必要がある。

■都市環境における感染症への防御（医学を除く都市工学、都市環境学的側面）

2019年末、中華人民共和国の武漢から新型コロナウイルス感染症（COVID-19）が広がり、パンデミック（世界大流行）となり、欧州各国では医療崩壊も起こった。COVID-19を引き起こす病原体は新型コロナウイルス（SARS-CoV-2）である。2020年11月現在、米国をはじめ各国で感染者・死亡者が増加し続けている（2020年11月18日時点のジョンズ・ホプキンス大学集計データで感染者数5500万人以上、死亡者数130万人以上）。これは気候変動の健康影響を考慮する上でも大きな課題となっている。COVID-19による社会的・経済的への影響も深刻で、日本の2020年4～6月期GDP年率は-27.8%と戦後最悪のマイナス成長になった。感染症を防止するための対策は社会的・経済的において極めて大きな意義を持つ。

ここで、この100年間で感染症によるパンデミックは継続的に発生している事実を直視しなければならない。1918～1919年のスペイン風邪（死者約4000万人）、1957～1958年のアジア風邪（死者数200万人）、1968～1969年の香港風邪（死者数100万人）、2009～2010年の新型インフルエンザ（死亡者数約28万人）は、いずれもインフルエンザウイルスによるパンデミックだった^{感染1)・2)}。

近年の都市計画、建築環境学での都市レジリエンスは地震や気候変動で激甚化が予想される自然災害リスクへの対策を専ら検討してきた。COVID-19パンデミックは感染症リスクに対するレジリエンスも向上させなければならないという使命を、都市環境サステナビリティに対して突き付けたものと受け止められる^{感染3)}。中世、近代の西欧の都市計画では、当時原因がわからなかったペストやコレラといった感染症に対して、都市中核の公衆衛生を高める都市大改造が行われた。その正の側面と対となる負の側面として、富裕層がグリーンベルトに囲まれた田園郊外住宅を形成し、低所得層が密集したスラム街が形成されるといった格差の構造が固定化される問題が現実として起こった。また、気候変動の影響を世界的に見ると、下痢性疾患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^{感染4)}。COVID-19や気候変動の影響を踏まえた今後の都市計画はそのような過去の歴史を踏まえつつ、より良い長期展望を元にした検討が求められる。一部のみが利益を享受する社会ではなく、包摂性（インクルーシブ）や冗長性（リダンダンシー）、多様性（ダイバーシティ）を一層高めた都市機能の構築に貢献していく必要がある。

■都市環境における健康、暑熱対策等

2015年の国連サミットにて、「我々の世界を変革する：持続可能な開発のための2030アジェンダ」が採択された。その中核が17のゴール、169のターゲットで構成された持続可能な開発目標（SDGs）である。SDGs達成に向けて産官学民をあげた取り組みが行われる中で、研究開発の世界でもSDGsの達成に貢献し得る研究が増加している。都市環境サステナビリティにかかわる領域においてもSDGsは注目を集めている。

SDGsでは都市に直接的に関わるゴール11「住み続けられるまちづくりを」が存在する。ただし、SDGsのゴールは互いに連関しているため、ゴール11単独での解決のみ模索するのは不十分で、トレードオフを抑制し、シナジーを最大化する統合的な解決方法の検討が必要不可欠である。例えばCOVID-19のパンデミックは都市の過密化と集住が被害を大きくしている側面があり、都市問題（ゴール11）と住民の健康問題（ゴール3）を同時に考慮しなければならない。近年、我が国では熱中症搬送者数が急増しているが、これも地球温暖化（ゴール13）とヒートアイランド現象（ゴール11）と住民の健康問題（ゴール3）を同時に検討しなければ有効な解決策は見出せない。気候変動に起因する災害も脆弱な都市で被害が大きくなる傾向があることから、統合的に都市のレジリエンス性を向上させることが求められている（ゴール9・11・13）。また、都市緑化は都市問題（ゴール11）と住民の健康（ゴール3）と陸域生態系の保護（ゴール15）に直接的に効果をもたらす、他にも間接的に関連する目標が含まれる。このように、SDGsの17のゴールを用いて都市環境を俯瞰することで様々な課題とその連関が明確化される。都市環境に関わる課題を統合的に解決し得る研究開発が進めば、結果としてSDGsの達成にも大きく貢献し得る。

ここで、一般に混同される傾向があるため強調する必要がある事実として、全球的な気候変動の影響が表れるよりも以前から、都市気候においてはヒートアイランド現象による暑熱が課題として顕在化しており、現在も課題であり続けているという点がある。都市ヒートアイランド現象の緩和策としてクールルーフ、屋上緑化、人工排熱削減などの技術が開発されている。都市ヒートアイランドへの適応策として日射遮蔽、ミスト噴霧などによる暑さ対策に関する研究や実践がこれまでに蓄積されている。なお、気候変動の影響は多岐にわたるが、地球温暖化がもたらす熱ストレスによる影響は特に重要である。つまり、都市ヒートアイランド現象の影響に、さらに気候変動の影響が加わっている。それにより、世界的に熱ストレスによる死亡数の増加が予測されている。日本のような超高齢社会では特に、熱的快適性の議論にとどまらず、健康維持と生命維持のために暑熱対策が不可欠となる。適応策として世界の人口の半分以上が「都市」に居住している現在^{健康1)}、ライフスタイルの転換は多くの場合、都市生活に注目して考える必要がある。ライフスタイルの転換は、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。その際、従来の慣行や現時点の観点に縛られることなく、温暖化した将来の都市気候を前提として、より良い都市計画に貢献していく必要がある。

近年、COVID-19以外でも、世界的にがん・糖尿病・循環器疾患・呼吸器疾患等の生活習慣の改善により予防可能な疾患である非感染性疾患の患者数が増加している。また、うつ病や不安症状等の精神疾患の患者数も増加している。特にうつ病の人は世界で推計3億人以上に上るとみられている。こうした非感染性疾患・精神疾患の蔓延は、人々の寿命や生活、生涯の質（QOL: Quality of Life）を低下させるだけでなく、社会に対して甚大な経済的・社会的コストをもたらす。そのため、これらの疾患を減少させることが大きな社会的課題となっている。近年、都市の自然（都市近郊林や緑地、里地里山、街路樹、屋上緑化等）は上記の疾患の拡大防止に貢献し得ることが指摘されている。実際に、身近な自然との関わり合い（緑地の訪問や街路樹を眺めること等）は人々に様々な健康便益（身体、精神、社会的健康便益）をもたらすことが明らかになってきている。現代社会に蔓延する非感染性疾患や精神疾患の減少に対しても、都市の自然がもたらす多面的効果を明らかにして、より良い活用方策を講じる必要がある。

[研究開発の動向]

■気候変動への適応（都市防災を含む）

• 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）、「統合的気候モデル高度化研究プログラム」（2017年度～）の成果もIPCC第6次評価報告書（2021～22年公表予定）への貢献が期待されている。

全球気候モデルの空間解像度は通常100 km～数100 km程度の空間平均値であり、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・統計的関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³⁾。「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^{4), 5)}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。これは建物3次元情報などの街区ビル構造などもモデルに取り込んでおり、都市計画の相違による将来影響も予測できる。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。このように温暖化ダウンスケーリングモデルは、深刻化するこれからの温暖化時代において特に有効な環境影響予測・評価ツールである。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⁶⁾や、暑熱環境に適応する都市・街区計画の検討⁷⁾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。

■都市環境における感染症への防御（医学を除く都市工学、都市環境学的側面）

• COVID-19の感染経路に関する多角的な調査研究

感染症は感染源、感受性宿主、及び感染経路の3つの要素が揃えば成立する。COVID-19の主な感染経路は飛沫感染と接触感染であるとみられているが、人が密集するレストランなどの集団感染事例から、WHO（世界保健機関）は感染経路として飛沫感染と相まって屋内エアロゾル感染の可能性が否定できないことを認めている⁵⁾。室内におけるSARS-CoV-2などの感染性エアロゾルの挙動の解明や、その感染症リスクの予測はその対策において極めて重要である。

現在SARS-CoV-2の感染経路の解明やその感染リスクの評価について、世界各国で疫学調査・環境調査など多くの側面から研究が行われている。その成果が猛スピードで公開され、2020年11月18日現在medRxivとbioRxivで公開されているCOVID-19関連のpreprint論文数は1万件を超え、そのうちの一部

は既にトップジャーナルなどに採用され公開されている。

• COVID-19拡大防止のための移動抑制策が与える多面的な影響

COVID-19の拡大防止のために、これまでのように自由なグローバルレベルでの往来が不可能になっている。ワクチン開発などの予防体制がある程度奏功すれば元に近い状態に戻せる可能性も考えられるが、類似の感染症が出現する可能性を念頭に置いた対応を長期化させざるを得ない。そうすると、航空機や鉄道による移動の大幅な減少、在宅勤務の増加などのため、温室効果ガス排出総量は緩やかになるものとみられる。気候変動緩和策としては有利となる一方、大都市への人口集中から地方分散へと舵も切られていく。そのような多角的な観点を検討に入れ、将来シナリオを構築する必要があるが生じている。

また、密閉空間での密集勤務、満員電車での集団感染を避けるべく、ICTの普及を背景にテレワーク（在宅勤務）が世界各都市で一挙に取り入れられた。大都市の中心業務地区（CBD：central business district）とその郊外のベッドタウン、地方都市それぞれで空間の使い方が大きく変容している。特にベッドタウンは密集度が高く、高齢化も進展している中で、テレワーク勤務者と居住者が混在する新しい状況が生まれている。今後の都市再生方策を考えるうえで、既存のポテンシャルを生かしながら、単一機能ではなく冗長性を持たせた都市計画を検討、実装していく必要に迫られている^{感染6)}。

• COVID-19が都市計画に与える多面的な影響

都市計画においても、COVID-19は近年専ら関心を持たれてきた自然災害リスクと異なる感染症リスクを世界中に突き付けた。感染症に絶えずさらされてきた熱帯地域と異なり、日米欧は1918～1919年のスペイン風邪以来の最悪のパンデミックであり、都市に対する固定観念や価値観の変容を与えている。感染症は人間が密集し、多く交流する都市の脆弱性をつくことは自明であった。COVID-19に晒されるwithコロナ、COVID-19抑制後の将来のpostコロナ時代においても、COVID-19以前の都市の在り方への回帰は難しい。むしろより良い復興（BBB：Build Back Better）を検討し、提示していく必要がある。

• 気候変動の影響に伴う再興感染症への懸念

温暖化によりツンドラ地帯の永久凍土が溶解することで、凍結していた過去の病原体が再び自然界に放出され、感染症を引き起こす可能性が懸念されている。COVID-19類似の感染症によるパンデミックを防ぐべく、生態系保全やツンドラ地帯での慎重な研究が必要である。

• 超過死亡推定法のさらに精緻な解析

COVID-19の影響を評価するにあたり、従来の超過死亡推定法を用いた推定がなされている。しかし、インフルエンザや気温の影響によっても死亡状況は変動するため、これまで行われてきた熱関連超過死亡の応用を含む、より精緻な解析が求められる。

■ 都市環境における健康、暑熱対策等

• SDGsを活用した分野横断的な研究

解決することが容易なsimple problemsでも、解決することが困難なcomplex problemsでもない、問題を定義することすら困難なwicked problemsが増えている。都市環境サステナビリティに関わる諸課題もまさにwicked problemであり、唯一解は存在せず、分野の垣根を超えた関係者による協働が重要である。

このようなwicked problemに立ち向かうためにSDGsを活用した分野横断的な研究が広がりを見せている。

科学技術振興機構（JST）と日本医療研究開発機構（AMED）、国際協力機構（JICA）の「地球規模課題対応国際科学技術協カプログラム（SATREPS）」では、各プロジェクトがSDGsの達成にどのように貢献するかを明確化するよう求めている。これに続き、2019年、JST 社会技術研究開発センター（RISTEX）が開始した「SDGsの達成に向けた共創的研究開発プログラム（SOLVE for SDGs）」でも、国内の地域課題の解決を通してSDGs達成に資する研究開発が求められている。2020年、内閣府が、破壊的イノベーションの創出を目指し、より大胆な発想に基づく挑戦的な研究開発を推進する「ムーンショット型研究開発制度」を創設した。2050年までに達成すべき7つの目標を掲げているが、いずれの目標も都市環境やSDGsと密接な関係がある。以上のように、研究開発のプログラムや制度内にSDGsの理念を取り入れる機運が高まっており、都市環境サステナビリティに関わる諸課題を統合的に解決する研究開発が求められている。

• 都市暑熱化による健康被害、熱ストレス影響の予測及び評価

都市ヒートアイランド現象に加えて気候変動により都市暑熱化が進展しており、熱中症搬送者数が増加している。近年の日本の夏は、最高気温35度を超える猛暑が続いている。熱中症の搬送者数は毎年5万人を超えている。特に2018年は列島各地で連日の最高気温が40度を超え、「命が危険な暑さ」と警戒が呼びかけられた。熱中症搬送者数は9万5千人を超え、10万人に迫る勢いとなり、もはや「暑熱災害」の様相を呈している。2020年はCOVID-19蔓延への対策から、炎天下でのマスク着用による熱中症リスクがさらに増大した。今後も引き続き温暖化が進行することでハザードの勢いが増す一方、熱中症に対して脆弱性の高い高齢者の割合が増加することから、熱中症被害者数も当面増加の一途を辿ると警戒されている。こうした高温の常態化に備え、科学に基づく適応策を社会実装しなければならない。

特に日本の大都市はほとんどが、厳しい夏の暑さに晒される位置にあり、欧米の諸都市と比較すると明らかに高温多湿の熱中症に陥りやすい気候条件である。そのため、都市における暑さ対策について、欧米諸国から懸念が示されやすい。そのような背景のある中に、2019年9月に行われた世界陸上選手権のマラソンにおいて棄権者が続出した。開催地のカタールの首都ドーハは高温多湿で、日本の夏と同じ気候とみなされた。これを受け、2020年8月に開催予定であった東京オリンピックでのマラソンコースを東京都心から札幌に変更を決定したことが話題になった。COVID-19の影響により東京オリンピック・パラリンピックは延期となったが、酷暑が予想される季節、時間帯での会場および会場までのアクセス空間での様々な暑さ対策に関する議論と、健康科学として合理的な対策の検討が注目された。

このような背景を受けて、全球モデルからダウンスケールして都市の暑熱環境の予測をしようとする研究と建物内の温熱環境や人体の体温変化を予測しようとする研究を結びつけようとする試み^{健康2)}が開始されている。また、都市キャンपी内の暑熱環境の実態や暑熱影響を緩和するための緑陰形成の状況を把握するために、都市で撮影された動画や静止画を人工知能で分析する研究も開始されている。バイタルセンサー等を用いてパーソナルな熱中症発症リスクを予測して警告するためのデバイス開発なども進んでおり、高温化する現代、将来の都市環境下で人命を救うための研究が活発化している。

また、気候変動への関心が高まる以前より、都市ヒートアイランド現象が世界の各都市で課題であった。その中で、我が国ではクールルーフ、クールペイジメント、屋上緑化などのヒートアイランド緩和策に関する研究や実践が進められ、日除けや街路樹などによる日射遮蔽、ミスト噴霧、散水などによる暑さ対策がヒートアイランド適応策として加わってきた。最近では外部空間における人体の温熱生理、心理反応を考慮した暑熱適応に関する研究や実践に移行しつつある。日本では環境省がヒートアイランド対策で培われ、気候変動適

応策の見も加えて「まちなかの暑さ対策ガイドライン」^{健康3)}を公表している。地方自治体での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の状況である。複合災害を見据えた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を強化していく必要がある。適応策のメニューの充実、社会実装のための合意形成等、新たな連携と分野を横断した研究が望まれる。

海外においても、特に熱ストレスの高い都市での体系的な研究や実践の例は決して多くない状況であった。一方、最近では、熱ストレス影響のうち、死亡に関しては既に大規模な国際共同研究体制が構築されている^{健康4)}。従来は個々の研究チームが少数の地域データを用いて異なったモデルで解析を行っていたため、地域ごとの差異が、機構によるものか、解析手法によるものか判然としなかった。しかし、大規模な国際共同研究体制により、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^{健康5)}。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^{健康6)}。この詳細の機序は明らかではないが、熱ストレスによる死亡を増やすことなく、電力消費を削減できる可能性があることに期待を抱かせるものである。ただし、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。

• 都市における身近な自然環境と人の健康の関係に関する研究

現在、公衆衛生学や都市計画学や生態学等の分野で、都市における身近な自然環境と人の健康の関係に関する研究が進んでいる。これまでの研究から、身近な自然（主に都市緑地）との関わり合いは、ストレス減少、睡眠の質の向上、心理的健康の改善（鬱症状の減少、不安症状の減少、幸福度・人生満足度の向上、攻撃性の減少、ADHDの症状の減少）、社会的結合度の向上、血圧の低下、出生重量の増加、心不全の防止、幼児の発育の促進、肥満の防止、視力の向上、免疫機能の向上、糖尿病の防止、寿命の向上等の様々な健康指標と関連することが報告されている^{健康7)}。これらの健康指標は大きくは、(1) 身体的な運動促進（緑地の散策等）による健康効果、(2) 直接的な自然との接触から得られる精神的な健康効果、(3) 地域コミュニティに属する人との接触に伴う社会的健康効果、(4) 自然との接触で得られる認知機能の向上の四つの効果の結果として考えられている。また、これら健康指標の全てではないものの、上記の健康状態の向上と自然体験の間のメカニズムに関する理論もいくつか開発されている。例えば、自然体験と心理的健康の改善はStress Reduction Theory（自然環境と接することで心理的ストレスが減少するという考え）やAttention Restoration Theory（自然環境と接することで精神的な疲労が軽減するという考え）によって説明でき、免疫機能の向上はOld Friends Hypothesis（直訳は旧友仮説。近代までヒトの体に刺激を与えていた微生物や寄生虫が、現代、激減したことが自己免疫疾患の増加につながっているのではないかと仮説）^{健康8)}や

Biodiversity Hypothesis (直訳は生物多様性仮説。都市化進展により自然環境の微生物に接触する機会が減少したことが自己免疫疾患の増加につながっているのではないかという仮説)^{健康9)} 等により理論的な説明が試みられてきた。

当該分野における初期の研究は、都市の自然がもたらす短期的な健康効果(都市緑地の滞在で得られる一時的なストレス減少等)に注目してきたが、景観や健康データの整備、統計解析の手法発展に伴い、より長期的な健康にも影響することが明らかとなってきた(例えば、鬱症状の減少等)。加えて、近年では、主に生態学者らの参入により、これまで抽象的に扱われてきた「自然」を分割し、どの種類・要素の自然が特に人の健康促進に結びついているのかを明らかにする動きが高まっている。健康促進に資する自然の要素を特定することは、今後具体的な都市景観管理を行う上で必須である。

• 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。緩和のための化石燃料の削減は短寿命気候強制因子 (Short-Lived Climate Forcers: SLCFs) の減少を意味する。SLCFs 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米国などでも始められている。また、Co-benefit 研究としては、牛肉などを少なくする食生活改善による健康なども行われている。

• 極端気象による多様な影響評価

極端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。近年頻発化している洪水災害に際しても、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]

■ 気候変動への適応 (都市防災を含む)

• 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

ほとんどの温暖化ダウンスケーリングは空間解像度が最小でも数 km 程度までだが、近年、街区・建物ス

ケール (空間解像度 1 m 程度) に至る温暖化ダウンスケーリングのモデル開発^{適応4), 5)} が行われている。

• 気候変動の影響の予測手法の精緻化

気候変動による影響の予測は代表濃度経路シナリオ (Representative Concentration Pathways : RCPs) と共通社会経済経路シナリオ (Shared Socioeconomic Pathways : SSPs) を組み合わせて行う。その際、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况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。国立環境研究所を中心に、日本独自の社会経済的状况を考慮したシナリオ SSPj が開発されており、近い将来、日本の都道府県別の将来予測に使用される。

• グリーンインフラ

米国で発案された社会資本整備の手法で、自然が有する多様な機能や仕組みを活用したインフラストラクチャーや土地利用計画を指す。我が国が抱える社会的課題を解決し、持続的な地域を創出する取組みとして、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。環境問題や社会の変化に対応する手段の1つとして近年、国内外で注目されており、インフラ整備の在り方が抜本的に見直され始めている。グリーンインフラは、自然の機能を地域課題の解決に活用しようとするソフト・ハードを混ぜ合わせた考え方で、昨今においては自然の力を防災・減災に活用する“Ecosystem-based disaster risk reduction : Eco-DRR”という考え方が注目を集めている。

2019年7月、国土交通省はグリーンインフラ推進戦略を発表した。そして2020年3月、同省はグリーンインフラの社会実装推進を目的とした「グリーンインフラ官民連携プラットフォーム」を設立した。他にも、環境省と内閣府は2020年2月から気候変動を踏まえたインフラ整備に関する意見交換会を開催するなど、グリーンインフラの整備を重要な施策の一つに掲げ、関係府省庁の垣根を超えたパートナーシップを生かす動きが活発化している。今後、こうした動きを支援するためのグリーンインフラ整備に資する研究開発の推進が必要である。

• 都市農業^{適応8)}

近年、都市環境の向上・気候変動への適応という考え方だけではなく、都市住民の健康促進の観点から都市農業が注目を浴びている。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。実際に最近の研究から、都市における農体験は、都市住民に様々な健康便益をもたらすことが明らかになってきている^{適応9)}。

生産緑地の2022年問題が間近に迫る中、COVID-19の拡大を受けて、大都市近郊農地の宅地転用が一層増えることが予想されている。無秩序、無計画な宅地開発は都市景観、住環境保全の衰退につながる。長期的に魅力をもった新しい農住まちづくりの在り方を示していくためにも、都市農業の多面的な便益、機能を明らかにしていくことは重要である。

• 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。

• タイムライン^{通称10)}

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。我が国での洪水災害においても、河川水位の上昇などの指標に応じた避難行動などに取り入れられ始めている。

• 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、洪水のほかにも土砂災害、津波のハザードマップ情報も併せて提供している。先進的な自治体では、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。近年、我が国では、2次元の平面マップを3次元化の立体情報を含んだマップにする検討や、下水管きよからの内水氾濫予測を含めた避難ルートマップなどに高度化する検討が行われている。また、熊本市では、保険会社、気象予報会社、AI技術ベンチャー等と協力して、防災のための都市デジタルツインを構築する取り組みを始めたことが発表されている。

• 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。

■ 都市環境における感染症への防御（医学を除く都市工学、都市環境学的側面）

• 室内環境における感染リスクの予測

空調・換気による感染性エアロゾルの対策は、基本的に在室者の感染リスクを下げることである。その感染リスクを評価するために、病原体からの被曝量を評価する必要がある。現状では、感染リスクに関して様々な数理モデルが提案されている。都市スケールでは、SEIR（Susceptible：感染症の免疫を持たない者、Exposed：感染症が潜伏期間中の者、Infectious：発症者、Recovered：回復して免疫を獲得した者）モデルが用いられているが、実はこのモデルに感染のメカニズムが含まれていない。建物スケールレベルでは、区画したSEIRモデル、エージェントモデル、Wells-Rileyモデルが用いられている。この中で、感染リスクと換気量の関係を明確に表しているのはWells-Rileyモデルである。Wells-Rileyモデルを用いた感染リスクの予測には、最小感染量（quanta）を知る必要があり、それに関する研究が多く行われている。

• 感染と換気量の関係

換気量と環境中のSARS-CoV-2の実態や集団感染が起きた時の換気量に関する調査結果が幾つか報告されている。シンガポールのCOVID-19アウトブレイクセンターに収容されている3名の患者の隔離室を対象としたウイルス活性に関する調査の結果では、排気口表面からはSARS-CoV-2が検出されたが、空中からは検出されなかったことから、十分な換気（当時12回/h）を行うことで、空气中に浮くウイルス濃度は効果的に希釈されることが示唆された^{感染7), 8)}。89名の客中に感染者9名が出た広州レストランの集団感染時の換気量は2.7~3.7m³/(h・人)と極端に少なかったこと、かつ、感染者が出たエリアは空気が循環していただけであったことが集団感染につながったと推察されている^{感染9)}。

換気装置が備え付けられた建築物、集合施設等においても、設計値通りにしっかりと機能しているかが重要である。建築物の保全、運用に関して、我が国では「建築物における衛生的環境の確保に関する法律（建築物衛生法）」、「建築物環境衛生管理基準」が定められ、室内CO₂濃度は1000 ppm（0.1%）以下に維持管理に努力する義務が課されている。SARS-CoV-2をはじめとするウイルスに関しては未解明かつ計測が困難であり、基準値を設けるのは困難だが、CO₂濃度計と既知の知見によって換気が正常に行われていることは確認可能である。屋外大気におけるCO₂濃度は全球平均で約410 ppm（0.041%）、東京都心で約450 ppm（0.045%）である。一方、人間の呼気中のCO₂濃度は安静時、運動時で変動するが、平均すると3万～4万ppm程度である。人間が密閉した屋内空間に密集している際、換気装置の正常動作の確認や、換気量については、室内CO₂濃度を計測することで簡易に把握できることが既知であり、今後このような知見の応用が進展することが期待される^{感染10)}。

• 補助設備としてのポータブル式空気清浄機の活用

補助設備としての空気清浄機は局所の空気浄化に有効であることが知られている。感染リスクの低減策として、対象室容積に応じた風量で、HEPAフィルタ（High Efficiency Particulate Air Filter、高性能フィルタ）付の空気清浄機の活用が薦められている^{感染11), 12), 13)}。

• UVGIの活用

ウイルスに対するUVGI（Ultraviolet Germicidal Irradiation、紫外線による照射による殺菌）の有効性から、WHO^{感染14)}を始め、CDC（米国疾病予防管理センター）、REHVA（欧州空調・換気設備協会）、ASHRAE（米国暖房冷凍空調学会）などがその適応を推奨している。また、2020年4月に改訂されたWELL Building Standard®（建物利用者の健康・快適性に焦点を当てた建物・室内環境評価システム）において、COVID-19関連で空気の微生物対策の項目に紫外線による空気殺菌が追加されている^{感染15)}。UVランプの設置場所によって、アップルーム方式とインダクト方式に分類されている。前者は部屋の上部、後者は空調システム内（空調機内またはダクト内）にUVランプを設置することを指している。

COVID-19に関連した機器の実装においては、たとえば、米国コロンビア大学の特許のライセンスを受けたウシオ電機株式会社の米国子会社Ushio America, Inc.が、222 nm紫外線を用いた殺菌・ウイルス不活化装置などが注目されている。2020年11月時点でSARS-CoV-2に対する不活化の効果の確認と、人の目や皮膚への障害性が少ないという報告が幾つかなされている。科学的根拠の蓄積と安全な社会実装に向けた取り組みの広がりが期待される。

• 都市計画の動的レイヤーリング^{感染16)}

西欧の近代都市計画におけるゾーニングとは、空間を区分けし、個々の空間単位を均質な利用に特化させ、それらを集合化させて都市機能を満たそうという発想である。自然災害があまり発生せず、堅牢性（ロバストネス）を重視する西欧の近代型の発想と言える。ゾーニングの結果、土地利用が固定化され、相当な事象が無い限り変更しない計画の在り方が、現代社会に対応しきれなくなっていた中、さらにCOVID-19のパンデミックが発生し、抜本的な見直しが迫られている。一方、近代に西欧型都市計画を輸入する以前まで、もともと自然災害が多い日本では、都市は再建を繰り返すレジリエンス（復元力）の発想が必然的であった。そのような背景での動的レイヤーリングの発想とは、たとえば建築物においては間取りや用途変更が可能な柔軟性、都市構造においては単一機能に固定しない冗長性（リダンダンシー）が該当する。河川敷の洪水防止

機能と生態系保全と住民の余暇利用や、田んぼの食糧生産機能と暑熱緩和機能、洪水調節、地下水貯留機能といった、時間や危機発生に応じた多面的機能も動的レイヤーリングの発想である。今後、さらなる新興・再興感染症の襲来や、気候変動に伴う風水害等の激甚災害に備えるに際して、現代型さらには将来型都市計画にあたり、新しい動的レイヤーリングに関する研究や検討が注目される。

■都市環境における健康、暑熱対策等

• 熱関連超過死亡の推定

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、気温が高くても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報告されている^{健康10)}。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。

都市のヒートアイランド現象による影響について、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ことがようやく行われるようになってきた。現在はホーチミン市のみであるが、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。これに関連して、環境省S-14プロジェクトで研究された、3次元の建物情報を考慮に入れた都市気候シミュレーションの発展が重要である。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を予測することに用いられることから、将来の緩和策と適応策に関わる政策決定に大きく貢献することが期待される。

• 暑熱影響の予測 / 緩和 / 適応策

熱中症発症者数は増加傾向にあり、日本だけではなくアメリカやヨーロッパなど世界でも熱中症の被害者が増加しており、各国で熱中症リスクを評価する研究が実施されてきた。近年では、アメリカのローレンス・バークレイ国立研究所が「暑熱化する世の中の解決策としてのクールビルディング」^{健康11)}を打ち出し、全世界の暑熱環境に関わる研究者に国際共同研究を持ちかけている。人工被覆の縮小、緑地の増加、保水機能を有する建材の採用、建物躯体の性能強化などの効果を総合的に取りまとめている。日本でも、再帰反射を用いて余分な太陽エネルギーを吸収したり、蓄熱するのを抑制したりして都市ヒートアイランド現象を緩和する再帰反射システムが開発、実用化されている。

地域や場所の気象特性を建造物や道路、樹木などの影響も考慮した上で予測し、さらに詳細な人体モデルによって個人単位の熱ストレスを定量評価する技術が開発されている。また、熱中症高リスク群である高齢者や子供に焦点を当てて年齢別に熱中症発症者数を予測する手法も開発されている。

• 都市気候における暑さ対策の導入

都市における暑さ対策としては、工事現場での空調服の採用やセンサを用いたアラートシステムの導入などの取り組みが先行している。まちなかの暑さ対策として、環境省や自治体の支援によって、イベント会場などでの広場、ベンチ、バス停などでの導入事例がある。暑さ対策技術の開発と評価、適材適所の導入に向けた

シミュレーション、都市計画への反映のための仕組みづくりなどが注力されている^{健康12)}。

• ローカルSDGs

Think Globally, Act Locallyの理念に基づき、地球規模課題のSDGsを地域レベルに落とし込んで実践する「ローカルSDGs」が注目を集めている。環境省は2020年に「環境省ローカルSDGs - 地域循環共生圏づくり プラットフォーム-」を立ち上げ、地域レベルでのSDGsの実践を支援している。ローカルSDGsに関連した研究も進んでおり、「環境研究総合推進費1RF-1701：ポスト2015年開発アジェンダの地域実装に関する研究」(2017～2019年度)の研究成果である「ローカルSDGsプラットフォーム」が公開されている。これは自治体におけるSDGs取り組み状況を検索、共有することを支援するオンラインプラットフォームである。また、「環境研究総合推進費1-1801：SDGs目標達成に向けた統合的実施方法の包括的検討」(2018～2020年度)では、SDGsを政策ツール及び分析ツールと捉えこれを軸とし、多様な行為主体において、優先課題に応じた制度構築や政策推進モデルの形成を行い、SDGsの効果的推進に関する施策や行動の創出を支援するための政策指向の研究が進められている。

• SDGsスマートウェルネス住宅

我々の生活基盤である住宅性能の改善は、居住者の快適性や健康性の向上に資するほか、光熱費等の削減を通して地球環境保全にも貢献する。WHOもこのような点に注目して、2018年11月にSDGsのゴール3(全ての人に健康と福祉を)とゴール11(住み続けられるまちづくりを)の達成に資することを目的として「WHO Housing and health guidelines (住宅と健康に関するガイドライン)」^{健康13)}を公表している。昨今のCOVID-19感染拡大を受けて従来の生活様式の大きな変化が求められており、それを支えるハードとしての住宅のあり方も問われている。自宅で業務を行うテレワークも広がりを見せており、一部では生活空間としてだけでなく執務空間としての性能を併せ持つことが要求されるような状況となりつつある。こうした社会の要請に応える、SDGsスマートウェルネス住宅に関する研究が進められている。

• 用量反応モデル (dose-response model) の応用

用量反応モデルとは特定の病原体が特定の集団に引き起こす影響(感染発症、死亡等)の確率を、病原体の曝露量(用量=摂取量)の関数としてあらわしたものである。これまでは化学物質の健康影響に関する基準値等を設定する際に用いられてきたが、近年このモデルを都市の自然と健康の関係に当てはめる研究が行われている^{健康14)}。このモデルを用いることで、都市住民が健康効果を得る際に最低限必要な「自然の摂取量(nature dose)」を推定することが可能となり、応用的意義は高い。

• VRやCGの活用

都市の自然がもたらす健康効果を定量化するためのツールとして、VRやCGを用いた研究が行われている。具体的には、VRを利用して自然度が異なる都市景観を再現するために使われている。こうした研究ではあくまで短期的な健康効果(一時的なストレスの減少等)しか検証することができないが、都市の自然と健康促進の関係を実験的に評価できるため、エビデンスの構築には有用である。

• 経験の消失 (extinction of experience)

近年の都市化によって人々が自然と触れる機会が減少している傾向を示す。経験の消失は、人の健康状態

の劣化だけではなく、社会の環境保全意識・行動を衰退させる恐れがあることが指摘されている^{健康15)}。つまり、都市における自然再生を行い経験の消失を防ぐことが出来れば、人の健康促進と長期的な環境保全の両方が達成できる可能性がある。

• 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SLCFs (短寿命気候強制因子) に関する理解が深まり、緩和策に応じたSLCFs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ある。単純な仮定に基づいた将来予測は報告されたものの^{健康16)}、今後の数年でさらに大きな進展が期待されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■気候変動への適応 (都市防災を含む)

• 気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT) (2015 ~ 2019年度)

気候変動適応策の確実な社会実装に重点を置き、モデル自治体を設定して実施された。地方自治体のニーズを汲み取った気候変動適応方策の技術開発の実施と、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創出への貢献を目指し、様々な研究の成果などを発信した。地方自治体、地方大学や地域の研究機関との連携により、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る。本プログラムの研究成果の一環として、データ統合・解析システムDIAS (Data Integration and Analysis System) により、東北から九州までの5km空間解像度の力学的ダウンスケーリングデータ^{適応11)}や、全国1km空間解像度の統計的ダウンスケーリングデータ^{適応12)}(ともに将来予測のダウンスケーリングデータ)などが公開されている。

• 環境研究総合推進費S-18：気候変動影響予測・適応評価の総合的研究 (2020 ~ 2024年度)

「我が国の気候変動適応の取り組みを支援する総合的な科学的情報の創出」を目的としている。農林水産業、水資源・水環境、自然災害・沿岸域、健康、産業・経済活動、国民生活・都市生活など、複数分野において影響予測手法を開発し、共通の気候条件・社会経済条件で影響予測を行うとともに適応策の検討、評価が行われる予定である。人間の生活・健康に関しては、上下水道・建築物といったインフラや土地利用、地域の産業・文化に立脚した生活、人生の質 (Quality of Life: QOL) をもとに気候変動の影響や脆弱性を評価される予定である。今後の気候変動影響評価や適応計画の見直しへの貢献に加え、自治体における適応計画の立案・実施への貢献、IPCC評価報告書などへの国際貢献が期待される。

• ムーンショット型研究開発制度

「Human Well-being」(人々の幸福) が目指され、その基盤となる持続可能な3側面 (環境・社会・経済) の諸課題を解決すべく、7つのムーンショット目標 (長期的に達成すべき目標) が決定された (目標1~6: 令和2年1月23日 総合科学技術・イノベーション会議決定、目標7: 令和2年7月14日 健康・医療戦略推進本部決定)。特に、環境面においては「地球環境を回復させながら都市文明を発展させる」と掲げられており、都市環境サステナビリティの分野における重要な研究開発制度として注目を集めている。

• 気候変動適応情報プラットフォーム (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、地方自治体が一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。

• あまみず社会研究会

2009年の福岡県樋井川の洪水被害を契機に発足した、研究者と地域住民との流域治水研究活動グループ。雨水を活用した分散型水管理システムの構築を通じて持続可能な多世代共創社会を目指している。JST-RISTEX「持続可能な多世代共創社会のデザイン」研究開発領域において研究課題「分散型水管理を通じた、風かおり、緑かがやく、あまみず社会の構築」(2015年～2020年)を推進した。現在の集中型水管理システムを補完する分散型のサブシステムとして、雨水を貯留し、地下へ浸透させる取り組みを流域の多世代多様なステークホルダーとともに実施した。雨水を貯め、利用する過程で人々の水管理に対する意識を育み、地域コミュニティの再構築を促した。治水などのレジリエンス向上とともに、流域内の豊かな生態系の再生にも取り組んだ。

• ISI-MIP (The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project、分野横断的な気候影響モデルの相互比較プロジェクト)

• 米国ウェルカムトラスト財団による co-benefit 研究

■ 都市環境における感染症への防御 (医学を除く都市工学、都市環境学的側面)

• 日本医療研究開発機構 (AMED)「ウイルス等感染症対策技術開発事業 (実証・改良研究支援)」 「既に開発・上市されている機器等 (空気清浄機、UV 殺菌装置、素材等) によるウイルス等感染症対策への有効性の確認を行う研究支援」

• ロンドン大学衛生熱帯医学大学院が中心の MCC (Multi-City Multi-Country) 研究

■ 都市環境における健康、暑熱対策等

• 国立環境研究所 気候変動適応センター PJ2-1「水資源、陸域生態系、作物生産性、人間健康に関する全球気候変動影響評価及び気候シナリオの開発に関する研究」

• 国立環境研究所 気候変動適応センター PJ2-3「気候変動による日本およびアジア太平洋域の大気汚染の変化とその環境影響評価」

• 2020年東京オリンピック・パラリンピック暑さ対策に関連した様々なプロジェクト

- JST SDGsの達成に向けた共創的研究開発プログラム (Solution-Driven Co-creative R&D Program for SDGs : SOLVE for SDGs)

地域課題の解決にSDGsを活用する研究プログラムとして2019年に開始している。国内の地域における具体的な社会課題を対象として、ソリューションの創出までの研究開発が行われる。研究開発の進捗に応じて適切な支援を行うために、シナリオ創出とソリューション創出の2つのフェーズが設定されている。いずれのフェーズにおいても、目指すべき姿を描き、その姿から立ち戻って現時点から計画を立てるバックキャストイングの手法が要件とされており、既に複数のプロジェクトが採択され、SDGsの様々なゴールに貢献する研究が推進されている。

- 世界首長誓約 (Global Covenant of Mayors)^{適応13)}

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のに対し、パリ協定の枠組みでは、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と考えられている。特に米国では、トランプ大統領がパリ協定離脱を表明した後も、地方自治体や企業によるネットワークによる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、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、新たなインフラ設置または改修が必要である。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

■気候変動への適応 (都市防災を含む)

- 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。ただし、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。

■都市環境における感染症への防御 (医学を除く都市工学、都市環境学的側面)

- 室内環境における感染リスク予測の不確実性

建物スケールのWells-Rileyモデルでは、室内の空気が完全混合な状態で、患者から発生する病原体は室内で瞬時に一様に拡散することを前提にしているため、実態の非定常状態や人の呼吸域近傍のリスクを評価

できていない。したがって、室内の気流における数値解析による検討をさらに実態に近づけた評価を進める必要がある。人の呼吸域の気流特性と感染性エアロゾルの呼吸器系への沈着特性を定量的に解析し、非完全混合・非定常状態における被曝露量、とりわけ被曝リスクを検討する必要がある。

• 感染伝播を抑制するための必要換気量の検討

これまでの研究の蓄積によって、換気量の確保と気流制御を行えば、はしかや結核などの感染症の伝播を抑制できることを示す十分なエビデンスがある。しかしながら、感染症拡散を抑制するための必要換気量をサポートする十分なエビデンスはないと報告されている^{感染¹⁷⁾}。換気量を増やせば、室内空気中の感染性エアロゾル濃度が下がることは当然だが、感染性エアロゾルによる感染リスクを抑制するための必要最小限の換気量に関する知見の獲得が、感染症対策において重要である。感染リスクの低減に加えて、省エネの追及にもつながるため、検討する必要がある。

• ポータブル式空気清浄機の設置方法

空気清浄機は室内の空気を循環させながら空気中の浮遊粒子をろ過する仕組みとなっている。従って、フィルタろ過式空気清浄機の浄化性能はフィルタの捕集率とその風量に関係する。そのため、対象室の用途・容積に応じて空気清浄機の風量、設置台数、設置方法に関する指針の策定が必要である。REHVAでは相当換気回数2~5回/h(フィルタによって粒子が除去された後の空気を外気とみなした場合の換気回数)、厚生労働省では風量5 m³/hの空気清浄機で床面積10 m²以内に1台を推奨している(天井高が2.6 mの場合、相当換気回数は11.5回/h)。空気清浄機の設置場所と適応床面積の最適化に関する検討が必要である。

• UVGIの応用

紫外線による殺菌技術はほぼ確立されている。その応用として、海外ではUVGIによる殺菌が病院や教室などに広く使用されているが、国内ではその設置例が極めて少ない。紫外線ランプの消費電力は比較的少ないため、正しい方法で設置すれば、殺菌効果を発揮すると同時に、省エネも図られる。今後、我が国でもUVGIの適応に関する検討が必要である。

■ 都市環境における健康、暑熱対策等

• 都市ヒートアイランド対策

局所的な温暖化である都市ヒートアイランドへの対策技術は建築・都市環境工学分野などで数多くの研究実績・知見がある。緑化、高反射率建材・塗装や保水性建材・舗装などの導入効果は実証実験などを通じて多く検証されている。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。都市ヒートアイランドに対して蓄積された暑熱対策の役割がますます重要になる。日本は世界全体のCO₂排出量のうち3.4%の排出割合(2017年時点)だが、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対策の導入によって相殺することを目指すしかない。

個々の技術としてはクールルーフ、クールペイジメント、屋上緑化などによるヒートアイランド対策、日射遮蔽、ミスト噴霧、散水などによる暑さ対策技術は開発、評価がかなり進んでいる。残された研究課題は外部空間における人体の温熱生理、心理反応を考慮した暑熱適応などである。

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。

• 住宅内における熱中症リスク評価

人体モデルを用いたシミュレーションにより、暑熱環境下における体温上昇量や発汗量などの算出や熱中症発症要因の特定が行われ、熱中症リスクの評価が従前よりも精緻に行えるようになってきている。近年は、住宅内における熱中症の発症数が増加しており、屋外の熱中症発症者数と割合として変わらない程度になっていることから、その予防が急務である。住宅内の温熱環境の予測技術と人体の熱収支モデルを結び、年齢以外の個人属性を考慮した熱中症リスクのパーソナル評価が必要であると考えられる。また、推計した熱中症リスクの結果を個々人にリアルタイムでフィードバックする熱中症早期警戒情報システムの開発も求められている。

• 健康効果をもたらす自然の「種類」、「量」、「質」の特定

現在までに、身近な自然との接触は様々な健康指標の向上と関係があることが分かってきたが、まだ多くの学術的・応用的課題も存在する。例えば、これまでの研究では「自然」の中のどの要素（種類）が特に重要な健康効果をもたらすのかが分かっていない。これまで当該分野における研究の多くは「緑地」や「公園」がもたらす健康効果に注目してきたが、英国におけるいくつかの研究では、都市に生息する鳥の鳴き声が人の精神的健康を向上させる可能性が示唆されており^{健康17)}、野生生物がもたらす健康効果にも近年注目が集まっている。また、どれくらいの「量」や「質」の自然があれば都市住民が十分な量の健康効果を得ることが出来るのかが不明である。最近豪州で行われた研究によれば、都市緑地から得られる健康効果は「週に30分の利用」で十分に得られることが指摘されている（それ以上利用しても健康状態の改善は見られない^{健康18)}。こうした自然の「種類」、「量」、「質」と健康の関係を調べることで得られた知見は、今後の都市計画やグリーンインフラ整備に実際に活かすために必須の情報となる。

• 健康効果における地域差・個人差の評価

これまでの研究から、身近な自然との接触は様々な健康指標の向上と関係があることが分かってきたが、実際のところ両者の関係の間には大きな地域差・個人差があると考えられる。例えば、これまでヨーロッパなどの比較的寒冷な地域で行われてきた研究では、自然との接触は様々な健康便益をもたらすが、シンガポールなどの熱帯域の都市では明瞭な健康効果が得られていない^{健康19)}。また、自然体験がもたらす健康効果には個人差もあるだろう。例えば、自然に対して強い関心がある人は自然体験からより多くの精神的健康便益を得ることが報告されている^{健康20)}。今後は、都市の自然がもたらす健康効果に地域差や個人差が生じる原因を特定する必要がある。

• エビデンスレベルの向上

自然との触れ合いによる健康効果を扱う本分野におけるこれまでの研究の多くは、ランダム化比較試験ではなく、比較研究や横断的研究であるため、必ずしもエビデンスレベルが高くないものも含まれる点に注意が必要である。特に、横断的研究で得られた知見は「自然体験によって健康になる」のか「健康な人が自然体験をよくする」のかの区別がつかないという批判もある。そのため、今後はランダム化比較試験等の、よりエビデンスレベルが高い手法を用いた研究が必要である。

• 客観的な健康指標の活用

これまでの自然による健康効果に関する研究の大部分は、自己申告型のアンケートに基づく手法（自己申告による鬱症状の診断等）を用いていたが、この手法は様々なバイアスを含む可能性がある。そのため、より客観的な手法に立脚した研究が求められている。例えば、毛髪に含まれるコルチゾールの量（数か月の間に蓄積されたストレスホルモン量）を用いることで、より客観的なストレスレベルを評価できる。最近では、ウェアラブル型常時測定バイタルセンサーを用いた研究も行われ始めている。

• SDGs達成に向けたビッグデータ活用基盤の整備

SDGsに関連した研究は、様々な分野で広く行われており、SDGsに関する情報はビッグデータとなりつつある。これに伴い、SDGsのゴール間の関係性を分析するネットワーク解析が必要である。また、人間では処理しきれないビッグデータの分析にAI等の活用が期待される。オープンデータやオープンソースとの連携などをはじめ、SDGs関連ビッグデータの活用基盤を充実させる必要がある。さらにSDGsの達成度を誰にでも分かりやすく伝え得る可視化手法の開発も求められている。

• 共通社会経済経路（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、どのように進めるかも含め、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リスクが最低となる気温（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、SLCFs（短寿命気候強制因子）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今後の課題となっている。

• 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必要がある。

- 多岐にわたる分野での適応策に対して地域ステークホルダーの効果的な参加

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。仮に、その優先順位を決めていく際、どのような手法をとればよいのか一律定型的な最適解が存在しない。また、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。

- 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。

(6) その他の課題

■気候変動への適応（都市防災を含む）

- 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。これを受けて、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。

各国において、ゲリラ豪雨や台風による洪水災害、熱波、森林火災などの極端気象、感染症の発症拡大などで、住民への具体的な被害や社会的・経済的な損害がきっかけとなり、一般的な認識が深まり、適応策の研究や対策を進めざるを得ない状況になってきている。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中で、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課題である。

国における法整備として、日本では2015年11月に気候変動の影響への適応計画が閣議決定され、2018年6月に気候変動適応法が成立した。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ことと比較して、後れをとった。

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」は研究、社会実装の両面に蓄積がある。しかしながら、気候変動の進行により、これまで想定されていた基準値を超える極端気象の発生頻度が高まっている。さらに災害記録や対策を積極的に継承してきていない人的要素の被害も現れている。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につながり、実践されなければ、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。

- 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。

■都市環境における感染症への防御（医学を除く都市工学、都市環境学的側面）

- COVID-19などの感染症と自然災害などの複合災害への備え

2020年に我が国の熊本県では、COVID-19の脅威に晒された状況下で、さらに台風による洪水災害も襲うという複合災害が発生した。洪水避難場所の密集を避ける観点などこれまでの防災対策、感染症対策それぞれの検討では十分に考えてこられなかった。また、我が国では2020年の夏に、熱中症とCOVID-19の識別が困難といった課題も生じた。このような複合災害に対する対策は、実際に起こるものとしてとらえ、定常時において余力がある期間から、十分に検討しておく必要性を強く示している。

- 集団感染が発生した建築・空調環境に関する専門家への情報公開

研究開発の推進や成果の社会実装を進めるにあたって、情報公開が十分でない、情報へのアクセス性が低いことが障壁となっている。日本国内における初期のCOVID-19の拡大の特徴の一つとして集団感染による拡大様式が注目された。2020年6月11日の参院予算委員会において、医療機関でのCOVID-19集団感染が6月10日時点で102件発生し、医師や看護師の感染が5月29日時点で約550人の報告があったことを厚生労働大臣が述べている。2020年7月時点、国レベルでは、クラスター班が多くの調査を鋭意行っているが、その集団感染の発生した環境に関する情報が、空調・換気を専門とする研究者が情報を入手できない課題があった。疫学調査や機微な個人情報への配慮は当然重要だが、集団感染が起きた建物、設備における空調・換気運用状況の情報をその専門家が取得できれば、それを環境・設備の視点から解析できる。これは今後の設計・運用における集団感染対策の策定に対しても極めて重要である。また、集団感染が起きた病院（建物）における空調・換気の運転情報はBEMS（ビルエネルギーマネジメントシステム）データを活用することも有効である。

- 医学・工学連携

医学による病理的な解明、疫学調査による感染拡大や収束の解析、工学による感染経路の解明はそれぞれ重要である。しかし、感染拡大初期から2020年8月時点まで、それらの分野間の連携が社会期待に比べてほとんど行われていない状況だと言える。また、集団感染に関する様々な情報、例えば、発生時の感染者の位置情報や空調・換気運転情報などを一元化したビッグデータを、医学、公衆衛生学、工学のそれぞれの視

点から解析することは、現在だけでなく将来の感染症を予防するための具体的な提案の策定において重要である。

■都市環境における健康、暑熱対策等

• 暑熱と風水害などとの複合災害の発生確率の増加

これまでに可能性は論じられていたが、実際の対応は取られていなかった重要な問題に、複合災害の問題がある。たとえば、ニューヨーク市において、大規模停電が発生した際に熱波が襲い、そのことによる超過死亡発生が報告された^{健康21)}。その停電の原因は気候変動と無関係であったが、2019年にわが国の千葉県で台風19号による大規模停電が発生し、直後の熱波によって、大規模停電が発生しなかった東京都と比べて遙かに多くの熱中症救急搬送が報告された。我が国のみを観察しても、毎年のように洪水や台風による大規模な被害が発生する昨今、個別の適応策のみでは不十分で、このような複合災害を前提とした適応策に関する総合的な取り組みが必要である。それは行政対応にとどまらず、停電した場合にどのような熱中症予防策がとれるのかといった実際的な温熱生理学を含む研究の蓄積が求められる。

• 都市環境が住民の健康に及ぼす影響のエビデンスの不足

医学・公衆衛生学における研究成果の社会実装・浸透には高い信頼度が求められる。その信頼度の指標として医学・公衆衛生学分野ではエビデンスレベルが使用されている。エビデンスレベルは臨床試験や疫学研究による医学的根拠の高さによりI~VIの計6段階に分類されている。しかし、都市環境が住民の健康に及ぼす影響に関する研究の多くはケースレポートレベルにとどまっており、メタアナリシスやシステムティックレビュー、RCT (ランダム化比較試験)、コホート研究、ケースコントロール研究の実施例は多くない。今後、都市環境が住民の健康に及ぼす影響を明確化させるためにも、エビデンスレベルの高い研究手法の採用が求められている。

• 多分野連携の遅れ

都市の自然がもたらす健康効果を理解し社会実装するためには、公衆衛生学・疫学を専門とする医学系の研究者、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、人間の心理・行動を専門とする環境心理学の研究者、そして生物多様性や景観を専門とする生態学系の研究者を交えた幅広い学術分野の協働が必要である。また、自然体験と健康の関係性の因果関係を明らかにするためには、高度な統計学を専門とする研究者との協働も必要である。加えて、学術的知見を基に都市緑地やグリーンインフラの管理を行うためには、工学系の実務者とも協働して取り組む必要もある。このように当該テーマの研究を行うには極めて広い学際的研究や関係ステークホルダーとの連携が必要となるが、学術分野の垣根を超えた連携はそれほど進んでいないのが実情である。

• 社会実装の機会の拡大

社会実装においては、自治体単位での都市ヒートアイランド対策と気候変動適応の両面を踏まえた、都市計画へ反映のための仕組みづくりが課題である。産官学が連携した取り組みとして、例えば、大阪ヒートアイランド対策コンソーシアムは10年以上の活動実績を有しているが、ヒートアイランド対策では民間へのインセンティブが働きにくく、社会実装の十分な後押しにはなっていない課題がある。今後は、暑さ対策技術の導入に関して、オリンピック会場、万博会場などとともに、自治体が主導する再開発プロジェクトや駅前広場整備

の支援などによる社会実装の機会拡大が期待される。

● 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、さらには都市環境学全体にとって有益である。

(7) 国際比較

■ 気候変動への適応 (都市防災を含む)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	● 温暖化ダウンスケーリングなど世界的に特徴のある研究が行われている。
	応用研究・開発	○	→	● 気候変動適応やヒートアイランドの研究成果の蓄積がある。それらを長期的な災害対策に反映する必要がある。 ● 個別に先進的な研究がなされてきているが、法整備が欧州と比べ遅れ、社会実装も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国主導でモデル自治体でのプロジェクトが進められたが、終了している。一過性ではなく、広く波及するにはまだ乖離がある。乖離を具体的に埋めていく人材や検討が足りていない。
米国	基礎研究	○	↗	● US Cities Sustainable Development Reportが継続して発表されるなど、ローカルSDGsに関する研究が他地域と比較して進展している。
	応用研究・開発	○	↗	● 米国環境保護庁 (EPA)、米国国立科学財団 (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、その概念も根付いており、一定のポテンシャルがある。
欧州	基礎研究	◎	↗	● 伝統的に世界をリードしている。多くのプロジェクトが実施され、最新の知見を世界に発信し続けている。
	応用研究・開発	◎	↗	● 応用面でも伝統的に世界をリードし、最新の知見を世界に発信し続けている。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応用研究が実施されている。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。 ● 特に英国の一部の都市では、健康促進のためにグリーンインフラを活用する取り組みも実施されている。 ● 革新的研究開発を促進するHorizon 2020プログラムの支援を受け、各国で気候変動の影響予測や適応策に関する研究を行う仕組みが確立されている。現在、Horizon 2020の後継となるHorizon Europeの枠組みが検討されているが、本分野を継続、発展するものとみられる。 ● 気候変動適応に関してEU気候変動適応戦略の策定や適応策に関するオンラインプラットフォームであるClimate ADAPTを早期に開発し、本分野を世界的にリードしている。

中国	基礎研究	○	↗	●2016年に国連ハイレベル政治フォーラムの場で世界に先駆けて自発的 国家レビューを実施し、SDGsへの取り組みをアピールしている。9つ のキーエリアの中には都市と地方の調和の取れた開発が謳われ、基礎 研究が開始されている。
	応用研究・開発	○	↗	●キャッチアップ型で、強化が図られている様子である。しかし、大気汚 染や水質汚染などの中国内で関心の高い分野と比べて、目立った応用 研究の報告などが見えていない。 ●「国家イノベーション駆動発展戦略綱要（2016～2030年）」を掲げ、 国家的に研究を推進し総合的な国力の向上を目指している。データ駆 動型&エビデンスベースのSDGs Local Monitoringが開始されており、 都市環境サステナビリティの分野でも存在感が年々増している
韓国	基礎研究	○	↗	●極端気象による災害の増加に伴い、気候変動への適応を強化するた めに適応フォーラムや適応技術専門家会合等を開催し、気候変動適 応策に関する新たな技術を共有している。
	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、世界的にインパクトのある研究成果は見えていない。 ●サステナビリティを目指す自治体連合ICLEIのアジア拠点をソウルに 誘致し、都市環境サステナビリティに関する研究を積極的に進めてい る。2019年には政府や研究機関の支援の下で韓国の自治体はローカ ルSDGsの策定とその進捗状況を計測する指標の策定を進めている。

■都市環境における感染症への防御（医学を除く都市工学、都市環境学的側面）

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	△	↗	●空調・調和関連技術に関して既往研究のレビューが行われているが、 全体的にオリジナリティの高い研究成果は見えていない。
	応用研究・開発	○	↗	●空調・調和関連技術に関してSHASEなどから積極的に提言を発信し、 適時アップデートを行っている。
米国	基礎研究	○	↗	●空調・調和関連技術に関してASHARE、CDC、JAMA、NIOSHな どから最新の知見を世界に発信し続けている。
	応用研究・開発	◎	↗	●空調・調和関連技術に関してASHRAEから意見書などを発信し、適 時にアップデートを行っている。
欧州	基礎研究	○	↗	●空調・調和関連技術に関してREHVA、ECDCなど最新の知見を世界 に発信を続けている。
	応用研究・開発	○	↗	●空調・調和関連技術に関してREHVAからガイドラインを発信し、適 時アップデートを行っている。
中国	基礎研究	◎	↗	●空調・調和関連技術に関してmedRxivの投稿が急増し、その一部が 既に著名ジャーナルに採択され、掲載されている。
	応用研究・開発	△	-	●空調・調和関連技術に関してま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	-	-	●最新の研究動向が不明瞭であるため評価を避ける。

■都市環境における健康、暑熱対策等

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"> ●2018年の熱波が人為起源の気候変動に帰することを示すなど、大きな貢献を示している。 ●我が国では古くから「森林浴」に関して世界的にも高水準の研究が行われている。 ●ローカルSDGsに関する研究は、年々その数と種類が増加しており、世界的にもユニークで高水準の研究が行われている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●国際的な枠組みの中で、日本在住の研究者も一定の貢献を果たしている。 ●個別に先進的な研究がなされてきているが、社会実装の遅れが見られる。 ●地方自治体への暑熱適応策の社会実装などを加速するため、SI-CATやS-18などの国の大型研究プロジェクトによって、強化が図られている。 ●ヒートアイランド対策（緩和策、適応策）両面の技術は建築環境総合評価システムCASBEE-HIに反映されている。環境省環境技術実証事業における実証、大阪ヒートアイランド対策技術コンソーシアムにおける認証、日本ヒートアイランド対策協議会における認証、の制度が運用されている。認証の際に参照される日射反射率の測定方法などは、JISや他の団体の規格として制定されている。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●近年、米国スタンフォード大学のGretchen Daily博士らを筆頭に影響力の大きな最新の知見も世界に発信しており、基礎研究は大きく進展している。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●ローレンス・バークレー国立研究所のヒートアイランドグループが暑熱環境に関わる研究を精力的に展開している。また、国際的なワークショップを主催し、各国の研究動向・知見を共有するなど、同分野を牽引している。 ●クールルーフ（高反射率材料）技術はCool Roof Rating Councilにおいて認証され、自治体の省エネルギープログラムなどに採用されている^{健康22)}。認証の際に参照される測定方法などは、ASTMや他の団体の規格として制定されている。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●本分野を基礎、応用ともに伝統的に世界をリードしており、影響力の大きな最新の知見も世界に発信し続けている。また、多くの国際プロジェクトが実施されてきている。2017年にはドイツのボンにおいて「Biodiversity and Health in the Face of Climate Change」という非常に大きな会議が開かれる等、当該テーマに関する議論が盛んになされている。 ●クールルーフ（高反射率材料）技術はEuropean Cool Roofs Councilにおいて認証されている^{健康23)}。 ●欧州連合の統計局EurostatがEU加盟国のSDGs達成に向けた進捗状況を可視化するシステムを整備している。ISO TC268 - Sustainable cities and communities - でもSDGsを生かしたまちづくりに関する議論を欧州各国がリードする状況となっている。 ●英国は、SDGs内の各ゴールの相互作用を定量化する研究などを進めており、注目が集まっている。また、ロンドン大学衛生熱帯医学大学院が中心となってMulti-City Multi-Country (MCC) 研究^{健康4)}を進めている。 ●ドイツのポツダム気候影響研究所が本分野に大きく貢献している。

2.2 俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●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し続けている。特に英国の一部の都市では、健康促進のためにグリーンインフラを活用する取り組みも実施されている。 ●Green prescriptionやNature dose等の用語が提唱されるなど、一般社会に対する普及も積極的に行っている。 ●European Cities SDG Indexを公表してEU各国の各都市の状況を可視化するなど、新しい試みが始まっている。 ●国際的な枠組みでの研究をリードしている。
中国	基礎研究	○	↗	●潤沢な資金により、論文数は増大している。独創的な研究は多くない。
	応用研究・開発	○	↗	●潤沢な資金により、論文数は増大している。独創的な研究は多くない。
韓国	基礎研究	○	-	●水準の高い研究者が、国際研究の枠組みで一定の貢献を果たしている。
	応用研究・開発	○	-	●水準の高い研究者が、国際研究の枠組みで一定の貢献を果たしている。
その他	基礎研究	○	↗	●シンガポールはアーバンヒートアイランド (UHI) の影響により年々気温が上昇している。居住者の屋外における熱的快適性 (OTC) を高め、経済的にも、健康的にも大きな発展をもたらすことを目的として、都市の冷却効果の評価・測定や、意思決定支援システムの開発、気候適応ガイドラインの設計を行う「COOLING SINGAPORE」プロジェクトを発表している。
	応用研究・開発	○	-	<ul style="list-style-type: none"> ●シンガポールは、暑熱対策に関してSingapore Green Building Councilにおいて幾つかの技術が認証されている^(健康24)。 ●インドは2019年12月に第5回ヒートアイランド対策国際会議を開催し、クールルーフに関する実践的研究をアピールしている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・地域熱供給 (地域冷暖房) (環境・エネ分野 2.1.13)
- ・エネルギーシステム評価 (環境・エネ分野 2.1.14)
- ・気候変動観測 (環境・エネ分野 2.2.1)
- ・気候変動予測 (環境・エネ分野 2.2.2)
- ・水循環 (水資源・水防災) (環境・エネ分野 2.2.3)
- ・社会-生態システムの評価・予測 (環境・エネ分野 2.2.9)
- ・循環利用とライフサイクル評価 (環境・エネ分野 2.2.10)
- ・農林水産業における気候変動適応・緩和 (環境・エネ分野 2.2.12)
- ・デジタル変革 (システム・情報分野 2.3.1)
- ・社会システムアーキテクチャー (システム・情報分野 2.3.3)
- ・メカニズムデザイン (システム・情報分野 2.3.4)
- ・トラスト (システム・情報分野 2.4.4)
- ・感染症 (抗菌薬・抗ウイルス薬・ワクチン等) (ライフ・臨床医学分野 2.1.3)

2.2

参考・引用文献

■気候変動への適応 (都市防災を含む)

- 適応 1) 向井人史 他, 「ココが知りたい地球温暖化 気候変動適応編」『気候変動適応情報プラットフォーム』, https://adaptation-platform.nies.go.jp/climate_change_adapt/qa/index.html (2020年11月アクセス)
- 適応 2) 三村信男, 『気候変動適応策のデザイン』 太田俊二, 武若聡, 亀井雅敏 編 (東京: 共立出版, 2015)
- 適応 3) 稲津将, 佐藤有徳, 「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
- 適応 4) 文部科学省気候変動適応研究推進プログラム (RECCA), 「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」, <https://www.restec.or.jp/recca/staticpages/index/iizuka.html> (2020年11月アクセス)
- 適応 5) 文部科学省気候変動適応研究推進プログラム (RECCA), 「都市・臨海・港湾域の統合グリーンイノベーション」, <https://www.restec.or.jp/recca/staticpages/index/takahashi.html> (2020年11月アクセス)
- 適応 6) 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, doi: 10.3130/aije.78.873
- 適応 7) S. Iizuka et al., “Environmental impact assessment of introducing compact city models by downscaling simulations”, *Sustainable Cities and Society* 63 (2020): 102424, doi: 10.1016/j.scs.2020.102424
- 適応 8) 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」, <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-h170719.pdf> (2020年11月アクセス)

- 適応 9) M. Soga et al., “Health Benefits of Urban Allotment Gardening : Improved Physical and Psychological Well-Being and Social Integration”, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14, no. 1 (2017) : 71, doi : 10.3390/ijerph14010071
- 適応 10) 国土交通省, 「タイムライン」, <https://www.mlit.go.jp/river/bousai/timeline/> (2020年11月アクセス)
- 適応 11) データ統合・解析システムDIAS : 大気近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ (東北から九州) by SI-CAT, http://search.diasjp.net/ja/dataset/SICAT_DDS_5kmTK (2020年11月アクセス)
- 適応 12) データ統合・解析システムDIAS : 農研機構地域気候シナリオ2017, http://search.diasjp.net/ja/dataset/SICAT_SDS_1kmJP_NARO2017_V2_7r, (2021年11月アクセス)
- 適応 13) Covenant of Mayors for Climate & Energy, “Latest News”, Covenant of Mayors Office, <https://www.covenantofmayors.eu/en/> (2020年11月アクセス)

■都市環境における感染症への防御 (医学を除く都市工学、都市環境学的側面)

- 感染 1) 河岡義裕, 『猛威をふるう「ウイルス・感染症」にどう立ち向かうのか』 今井正樹 監修 (東京 : ミネルヴァ書房, 2018)
- 感染 2) Center for Infectious Disease Research and Policy (CIDRAP) , “CDC estimate of global H1N1 pandemic deaths : 284,000”, CIDRAP, <https://www.cidrap.umn.edu/news-perspective/2012/06/cdc-estimate-global-h1n1-pandemic-deaths-284000> (2020年11月アクセス)
- 感染 3) 竹脇出, 「種々のリスクに対して社会のレジリエンスを高めるための多様な視点」『建築学会』, <https://www.aij.or.jp/jpn/databox/2020/2007-hyoshi2.pdf> (2020年11月アクセス)
- 感染 4) S. Hales et al., “Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s”, World Health Organization, <http://apps.who.int/iris/handle/10665/134014> (2021年1月アクセス)
- 感染 5) World Health Organization (WHO) , “Transmission of SARS-CoV-2 : implications for infection prevention precautions”, <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions> (2021年1月アクセス)
- 感染 6) 横張真, 山崎嵩拓, 「With/Post Corona時代の新しい都市地域計画 ベッドタウンの再生によるインクルーシブ社会の実現」『都市計画』 346号 (2020) : 108-109
- 感染 7) S. W. Xiang et al., “Air, Surface Environmental, and Personal Protective Equipment Contamination by Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) From a Symptomatic Patient”, *JAMA Research Letter* 323, no. 16 (2020) : 1610-1612, doi : 10.1001/jama.2020.3227
- 感染 8) 倉淵隆 他, 「新型コロナウイルス感染対策としての空調設備を中心とした設備の運用について (改訂二版)」『公益社団法人空気調和・衛生工学会』, <http://www.shasej.org/recommendation/covid-19/2020.09.07%20covid19%20kaitei.pdf> (2020年11月アクセス)

- 感染 9) Y. Li et al., “Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant”, medRxiv, doi: 10.1101/2020.04.16.20067728 (2021年1月アクセス)
- 感染 10) 田島昌樹, 「建築の空気」『空衛』2011年7月号: 65-71,
- 感染 11) 厚生労働省, 「熱中症予防に留意した「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気の方法」, <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000640920.pdf> (2020年11月アクセス)
- 感染 12) RHEVA, “REHVA COVID-19 guidance document, August 3, 2020”, RHEVA, https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V3_03082020.pdf (2020年11月アクセス)
- 感染 13) ASHRAE, “ASHRAE Position Document on Infectious Aerosols”, ASHRAE, https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/pd_infectiousaerosols_2020.pdf (2020年11月アクセス)
- 感染 14) J. Atkinson et al., *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings* (Geneva: World Health Organization, 2009), https://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44167/1/9789241547857_eng.pdf (2020年11月アクセス)
- 感染 15) International WELL Building Institute, 2020 International WELL Building Institute pbc., “Strategies from the WELL Building Standard to Support in the Fight Against COVID-19”, <https://resources.wellcertified.com/tools/strategies-from-the-well-building-standard-to-support-in-the-fight-against-covid-19/> (2020年1月アクセス)
- 感染 16) 横張真, 「ヒトに引く線・土地に引く線-都市計画をめぐるレイヤーリングの可能性-」『社団法人日本都市計画学会』, <https://www.cpij.or.jp/com/50+100/docs/3rd03yokohari.pdf> (2020年11月アクセス)
- 感染 17) Yuguo Li et al., “Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment - A multidisciplinary systematic review”, *Indoor Air* 17, no. 1 (2007): 2-18, doi: 10.1111/j.1600-0668.2006.00445.x

■都市環境における健康、暑熱対策等

- 健康 1) United Nations, *2018 Revision of World Urbanization Prospects* (New York: United Nations Publications, 2018), <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html> (2020年11月アクセス)
- 健康 2) 科学技術振興機構 他, 「都市空間での詳細な熱中症リスク評価技術の開発に成功～より安心・安全な行動選択に向けて～」, <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20190723-2/index.html> (2020年11月アクセス)
- 健康 3) 環境省「まちなかの暑さ対策ガイドライン改訂版」, https://www.wbgt.env.go.jp/pdf/city_guideline/city_guideline_full.pdf (2020年11月アクセス)
- 健康 4) MCC Collaborative Research Network, “Home”, MCC Collaborative Research Network, <http://mccstudy.lshtm.ac.uk/> (2020年11月アクセス)
- 健康 5) 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, doi: 10.2105/AJPH.2017.304123

- 健康 6) 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, doi : 10.1289/EHP493
- 健康 7) T. Hartig et al., "Nature and Health", *Annual Review of Public Health* 35 (2014) : 207-228, doi : 10.1146/annurev-publhealth-032013-182443
- 健康 8) Rook, Graham A.W. et al., "Innate immune responses to mycobacteria and the downregulation of atopic responses", *Current Opinion in Allergy and Clinical Immunology*, vol. 3 (2003) : 337-342, doi : 10.1097/00130832-200310000-00003
- 健康 9) Leena von Hertzen et al., "Natural immunity : Biodiversity loss and inflammatory diseases are two global megatrends that might be related", *EMBO Reports*, 12 (2011) : 1089-1093, <https://doi.org/10.1038/embor.2011.195>
- 健康 10) F. Sera et al., "How urban characteristics affect vulnerability to heat and cold : a multi-country analysis", *Int. J. Epidemiol.* 48, no. 4 (2019) : 1101-1112, doi : 10.1093/ije/dyz008
- 健康 11) Heat Island Group at Lawrence Berkeley National Laboratory "Home", HEAT ISLAND GROUP : BERKELY LAB, <https://heatland.lbl.gov/> (2020年8月アクセス)
- 健康 12) H. Takebayashi and M. Moriyama, *Adaptation Measures for Urban Heat Islands 1st edition*, (Cambridge, MA : Academic Press, 2020)
- 健康 13) World Health Organization (WHO) , "WHO HOUSING AND HEALTH GUIDELINES", <https://www.who.int/publications/i/item/9789241550376> (2021年1月アクセス)
- 健康 14) D. F. Shanahan et al., "The Health Benefits of Urban Nature : How Much Do We Need?", *BioScience* 65, no. 5 (2015) : 476-485. doi : 10.1093/biosci/biv032
- 健康 15) M. Soga and K. J. Gaston, "Extinction of experience : the loss of human-nature interactions", *Frontiers in Ecology and the Environment* 14, no. 2 (2016) : 94-101, doi : 10.1002/fee.1225
- 健康 16) S. E. Kim et al., "Air quality co-benefits from climate mitigation for human health in South Korea", *Environ Int.* 136 (2020) : 105507, doi : 10.1016/j.envint.2020.105507
- 健康 17) D. T. C. Cox et al., "Doses of Neighborhood Nature : The Benefits for Mental Health of Living with Nature", *BioScience* 67, no. 2 (2017) : 147-155, <https://doi.org/10.1093/biosci/biw173>
- 健康 18) D. F. Shanahan et al., "Health Benefits from Nature Experiences Depend on Dose", *Scientific Reports* 6 (2016) : 28551, doi : 10.1038/srep28551
- 健康 19) L. E. Saw, F. K. S. Lim and L. R. Carrasco et al., "The Relationship between Natural Park Usage and Happiness Does Not Hold in a Tropical City-State", *PLoS ONE* 10, no. 7 (2015) : e0133781, doi : 10.1371/journal.pone.0133781
- 健康 20) C. C. Chang et al., "Life satisfaction linked to the diversity of nature experiences and nature views from the window", *Landscape and Urban Planning* 202 (2020) : 103874, doi : 10.1016/j.landurbplan.2020.103874
- 健康 21) G. B. Andersen and M. L. Bell, "Lights out : Impact of the August 2003 power outage on

mortality in New York, NY”, *Epidemiology* 23, no. 2 (2012) : 189–193, doi : 10.1097/EDE.0b013e318245c61c

健康22) Cool Roof Rating Council (CRRC) , “About the product rating program”, CRRC, <https://coolroofs.org/product-rating/overview> (2020年7月アクセス)

健康23) European Cool Roofs Council (ECRC) , “About Program Rating Programme”, ECRC, <https://coolroofcouncil.eu/rating-programme/> (2020年7月アクセス)

健康24) Singapore Green Building Council (SGBC) , “SGBC Green Certification”, SGBC, <https://www.sgbc.sg/sgbc-certifications> (2020年7月アクセス)

2.2

環境区分 俯瞰区分と研究開発領域

2.2.12 農林水産業における気候変動適応・緩和

(1) 研究開発領域の定義

農林水産業における気候変動対応、主として適応のための研究開発や技術開発を扱う領域である。農林業分野における対応は圃場・林地スケールの生産関連技術から流域スケールの水資源確保や豪雨・斜面災害対策まで幅広い。具体的には気象に基づく生育予測・栽培管理や病虫害対応、農林地や関連する施設の利用・整備に関する研究・技術開発が含まれる。水産業分野における対応は、ブルーカーボン生態系の利活用、漁船の電力化、品種改良、養殖技術、漁場整備、資源管理などあるが、ここでは主としてブルーカーボン生態系の利活用を通じた適応策に関する研究・技術開発を対象とする。

(2) キーワード

高温障害、水資源管理、気象予測、分布予測、機械学習、病虫害・獣害、豪雨、斜面災害、発生予測、広域複合災害、生態系を活用した適応策（EbA：Ecosystem-based adaptation）、自然を基盤とした解決策（NbS：Nature-based Solutions）、気候スマート農業、ブルーカーボン生態系、海藻・海草類、IPCCガイドライン、CO₂吸収係数、有機炭素残存率、難分解性有機炭素、大規模海藻養殖施設、産業化

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

(農林業)

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第5次報告書で、気温上昇と干ばつ、および水資源不足と農業生産減少が、確信度の高いリスクとして挙げられた。また、農業に間接的な被害をもたらす高潮・海面上昇や、洪水などを引き起こす極端な気象現象の増加も、確信度の高いリスクとして列挙された。これらは気候変動に対する農業の脆弱性の高さを表している。その一方、世界の人口は、今世紀中頃にはおよそ98億人、今世紀末には112億人に達すると予想されている。加えて新興国の経済発展もあり、世界の食料需要は今世紀半ばには現在の約2倍に達すると見込まれている。増大する世界的な食料需要に対応するためには、農業に関わる気候変動リスクに適応し、持続的な農業生産を確保することが必要となる。また農業生産に必要不可欠な水資源や、農業生産を不安定化させる豪雨・洪水リスクも気候変動により変化することが予測されており、流域一貫での水資源管理や防災システムの構築により、食料およびエネルギーの安定供給を確保することが大きな課題となっている。

森林生態系は炭素蓄積や気候調整などの緩和機能をはじめ、様々な生態系サービスを提供する機能を有するため、気候変動の緩和と適応にとって重要な位置づけとなっている。また多様な生物の生息地も提供しているため、生物多様性の保全にとっても不可欠である。こうした森林が持つ様々な機能やサービスの活用に基づく適応策は「生態系を活用した適応策（EbA：Ecosystem-based adaptation）」と呼ばれ、人間社会の持続可能性を向上させる重要な役割が期待されている。

他方、わが国はその地理的特性から自然災害の発生しやすい国である。その中でも斜面災害（斜面崩壊、地すべり、土石流）はわが国の農林水産業に大きな損害を与え得る災害の一つである。わが国は山地・丘陵地が国土の約7割を占め、土石流の発生限界勾配15度以上の溪流・斜面は国土の約4割に上る。過去20年間では年1,000件以上の斜面災害が発生している。農地や農村は豊かな水や土壌を求めて山麓の沖積地に立地し、森林の大部分は山地斜面に分布している。漁村や漁港も深い港を求めて海岸の崖直下に点在するこ

とが多い。これらをつなぐ道路・鉄道などのインフラや加工工場も多くは急傾斜地に接近して建設される。このようにわが国の農林水産業は斜面災害に対して脆弱な立地条件の下で営まれており、それゆえ斜面災害の予測精度向上とそのシステム開発、人口減少に耐えるインフラの配備計画、感染症のような社会危機下での避難警戒など喫緊の課題は多い。

(水産業)

水産分野における気候変動適応に向けた研究開発としては、水産分野への気候変動影響評価に関する既存結果などを踏まえ、(1) ブルーカーボンを用いた吸収源拡大、ブルーカーボン生態系の利活用による持続可能な漁業・養殖業の推進、(2) 排出源対策としての漁船電力化、(3) 気候変動に適応可能な養殖品種・養殖技術・漁場整備手法・資源管理手法の開発(有害生物・食害種・外来種対策、高水温波浪対策)の3点が主に検討されている。

とくにブルーカーボンは、海洋生物によってCO₂が取り込まれ、海域に貯留される炭素のことを指す用語として2009年に国連環境計画が提唱した。現在、ブルーカーボンはパリ協定の目標の達成に向けた海洋分野における主要な5つのアクションの1つとして注目されている。この5つのアクションは、(1) 再生可能エネルギーの導入・拡大、(2) 海上輸送での脱炭素化推進、(3) ブルーカーボン生態系を中心とした沿岸海洋生態系の保全と再生、(4) 漁業・養殖の振興、食料源の転換、(5) 海底への人工的な炭素貯留、である。2050年までに1.5°C上昇シナリオを達成するために必要な温室効果ガス排出削減量の最大21%を、これらのアクションによって達成できると試算されている¹⁾。またこのうち「(3) ブルーカーボン」と「(4) 漁業・養殖」は、他の項目と比べると迅速に実施可能なアクションとみなされ、2030年までの主要な取り組みとしてその即効性が期待されている。

ブルーカーボンを有効な温室効果ガス吸収源として活用していくために、IPCCによる排出・吸収に係るガイドライン²⁾に掲載されている海草藻場(アマモ場など)、マングローブ林、塩生湿地の3つのブルーカーボン生態系(以後、BCEと記載)の炭素貯留技術の確立を目指す研究とその成果の社会実装が重要視されている。また、これらに海藻藻場(大型藻類など)を加えるための検討も活発に行われている。

[研究開発の動向]

(農林業)

農業での気候変動適応研究は、高温や水不足が作物の生育や収量に及ぼす直接的な影響、もしくは作物生産に必要な水資源の減少や洪水・高潮などによる農地の浸水による減収などの間接的な影響に関する研究に大別される。前者に関する研究は、観測などにより作物栽培に対する気象要素の長期的変化の影響を素過程の解明を通して明らかにする基礎的な研究と、作物生育モデルの開発を通して気候変動の影響評価や減収・品質低下に対する警報を発するなどの応用的研究からなる。

気候変動は世界の穀物生産に直接的な影響を及ぼす。近年の世界的な主要穀物の収量の伸びの鈍化は、既に収量が高い先進国の収量を引き続き引き上げていくことが技術的に困難になっていることが主な要因だが³⁾、気候変動も要因の一つと考えられている。全球規模の解析によると、気候変動(特に気温の上昇)が生産量を2~6%低下させたと推計されている⁴⁾。今後、産業革命前と比べた今世紀末の世界平均気温の上昇が3度以上となった場合、米や小麦の世界平均収量の伸びが鈍化すると予測されている。また、気温上昇が1.8度未満でも、トウモロコシや大豆は収量の伸びが減少すると見込まれている⁵⁾。

日本においても気候変動による農業生産への影響が顕在化している。農林水産省が毎年公表している「地

「球温暖化調査レポート」では、日本全国での水稻、果樹、野菜、畜産などにおける温暖化による品質・収量低下の現状とともに、各地で取り組まれる対策が報告されている。

こうした作物への影響に対し、適応策としては播種日（コメの場合は移植日）の変更や気温が高い地域の品種への切り替えが検討されている。またこうした比較的簡単に導入できる適応策に加え、高温や乾燥に強い品種の開発、灌漑・排水設備の導入、高温や干ばつなどの極端気象の早期警戒システムの開発なども同時に検討されている。

一方、果樹は、気候に対する適応性の幅が狭く、果樹生産は地域によって栽培樹種が分かれている。水稻や野菜のような一年生の作物は、播種時期を調整することで気候への適応性の幅を広げることができるが、樹木である果樹は、人為的に昨期を調整することは難しく、気候変動への適応性が低い。

気温上昇が果樹や茶に影響を及ぼすメカニズムは、(1) 極端な高温に短期間さらされることによる高温障害、(2) 長期間の気温上昇による果樹の発育速度への影響、(3) 気温上昇により生産環境が変化することによる病害虫の変化などの間接的な影響の大きく3つに分けられる。これらの影響に対する適応技術として、被害を防ぐ対策だけでなく、温暖化の利点を活用する方策も進められている。現在は、栽培する樹種を生かしたまま、栽培方法の改善をする適応技術が最も広く適用されているが、今後は、同じ樹種の高温耐性品種への更新、他の樹種への更新により、これまでその土地で栽培されてこなかった樹種への変更が進むことが見通される。

林業に関連した研究では、2000年代以降は森林分布予測モデルの開発が活発に行われ、続いて病虫獣害に関する影響予測研究が盛んになった。元々、森林の広域分布と環境条件との対応関係を統計モデルによって説明する手法が1990年代から欧米を中心に発展した。この頃、日本ではバイオーム（生物群系）の全国的な分布を気温と降水量で説明するロジットモデルを構築し、平均気温が1～3℃上昇した場合の潜在生育域を予測した研究が行われていた。森林生態系に関する既存の情報を集約したデータベースの構築が開始したのもこの時期である。

2000年代に入ると気候変動問題が社会的に注目され、それ以降、温暖化影響研究は進展し、現在は機械学習を使った高精度の森林分布予測モデルが次々と開発されている。例えば日本では白神山地の世界遺産で有名なブナ林を対象とした分布予測モデルが構築された。現在と温暖化後の将来の潜在生育域を比較することを通じ、西日本のブナ林が脆弱であることなどが判明した。同様に、天然林の主要な構成種に関する分布予測モデルの構築が進み、各森林帯を代表する樹種（例：ハイマツ、シラビソ、アカガシ）や林床に広がるササ類などについての研究結果が公表された。欧米諸国は伝統的に植物や植生の分布データベースが充実しており、研究者人口も多いため、2000年代以降に温暖化影響研究が一気に進み、数千種類もの植物種の温暖化影響を予測できる段階に達していた。これと比べると日本を含む東アジア地域は研究者数で欧米との差は歴然としていた。

2010年代になると、森林の樹木だけではなく、ニホンジカ（シカ）やマツ材線虫病（マツ枯れ）といった森林生態系に被害をもたらす病虫獣害に関する影響予測研究も始まった。統計モデルに拠らないプロセスモデルによる林業への影響評価に関する研究も開始された。

農林業における病虫害に関しては、温暖化による気温の上昇が変温動物である昆虫などの発育や発生に大きな影響を及ぼすため、温暖化に伴って病虫害の発生やそれに伴う被害が大きく変化すると考えられている。具体的な対応策としては病虫害の発生を考慮して作物の栽培時期を変えるなどの手段はあるものの、基本的には、発生時期や発生量の変化を的確に予測して、予測された時期に農薬などを使って適切に防除するという対策が主流となっている。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域

気温上昇や気候変動は、病害虫の地理的分布の拡大や越冬限界地の北進、発生量の増加や発生期の早期化、発生世代数の増加などに影響すると考えられている。このため、これまでの研究の多くは、主要な病害虫で温暖化によるこれらの変化の実態解明や、その将来予測を行うものである。最近では、これらの温暖化による病害虫の直接の影響のみならず、病害虫と寄主植物とのフェノロジー（季節性）の同調性、寄主植物の抵抗性、植物-害虫-天敵三者系の関係、病害虫の薬剤抵抗性などに温暖化が間接的に影響することが明らかにされつつあり、これらを含めた影響評価と対応が求められている。

(水稲生産やその生産基盤における適応策)

水稲に関しては、大気中CO₂濃度の増加が収量に及ぼす影響を評価するための研究が進められてきた。将来のCO₂の上昇が水稲生産に及ぼす影響を明らかにするため、開放系大気CO₂増加実験（FACE：Free-Air CO₂ Enrichment）と呼ばれる環境操作実験が続けられ、気温とCO₂濃度の複合的な影響が明らかにされてきた。

またCO₂濃度と同様に明確な上昇トレンドが観測されている気温については、収量への影響に加え、米の品質への影響も重要な研究分野となっている。気候変動が米の品質に与える影響では、いずれも品質低下のリスクが高くなると予想されている。作物栽培に対して最も大きな影響を及ぼすのは夏季の高温である。7～9月の3ヶ月間の平均気温が1946年以降で最も高かった2010年には、一等米比率が全国的に低下し、北陸で43%、東海・近畿以西では40%を下回るなど、様々な被害が生じた。過去の一等米比率と気象条件の関係を経験式で表現し、九州を対象とした研究では、いずれの気候シナリオにおいても、将来の一等米比率は、1990年代に比べて、2046～2065年には28%、2081～2100年には41%も減少すると予測された^{6), 7)}。この他にも、気温の上昇によって作物の発育が高まることで発育期間が短縮し、積算日射量が減少し、結果的に収量減少や品質低下をもたらす可能性もある。

以上のような顕在化している日本の水稲生産に及ぼす影響に対し、様々な適応技術の開発が進められている。作付け前から出来る技術としては、高温耐性品種の開発、移植日の適切な設定、深耕などが挙げられる。

作付け後の適応策では施肥管理と水管理の効果が認められている。白未熟粒のタイプ別にみると、背白米や基部未熟粒は主に高温や窒素不足により発生する傾向がある。これらの発生率を低下させるためには、穂肥の増量が有効とされている。ただし穂肥の増量は食味の低下につながるため、極端な増量には注意する必要がある。また、掛け流し灌漑は、高温で暑くなった稲体を水で冷やす直接的な対策技術であり、乳白粒、腹白粒および胴割粒の発生が低減することが知られている。しかし、低温の用水が大量に必要となることが、導入上の課題である。水田の湛水を地表面付近で管理する飽水管理には、夜間の地温低下効果があることが確認されており、導入が容易な高温対策とされている。

作期の分散や移動、用水の掛け流し灌漑を行うには、その時期に必要な農業用水を河川などから取水する必要がある。IPCCの第5次評価報告書では、気候変動により洪水や渇水など極端な現象の影響が及ぶことが示唆されている。日本のように農業用水を利用するためのシステムが高度かつ広域にわたって整備されている場合には、渇水時の流況への人為的な影響が無視できない。そのため、気候変動の渇水への影響を評価するには、気候変動による自然条件の変化（降水量、気温、蒸発散量、積雪融雪量、河川の流れなど）に加え、農業用水の水利施設群（取水堰からの取水、用水路による水の配分、排水路を通した還元）が河川流況に与える影響を考慮する必要がある。農業水利の水循環と自然界の水循環（降雨、流出、蒸発や積雪・融雪）を一体的に解析する水文モデルが開発され、流域での渇水規模の評価や用水計画の策定に用いられている⁸⁾。また開発されたモデルを用いて現在や将来の気候シナリオに基づく水資源の予測計算を行い、気候

変動が灌漑主体流域における農業水利用に及ぼす影響を定量的に評価する研究なども行われている⁹⁾。水田地域の流域スケールの水循環の把握は、水利用の側面だけではなく、洪水緩和や被害予測の観点からも広く研究が行われている。特に主要な河川への流出源となる水田地帯での浸水は、内水氾濫によるものが多く発生しており、そのモデル化と水田地帯の排水施設整備計画への応用、下流域の洪水緩和を狙った田んぼダム（水田からの豪雨流出を人為的に抑制する技術）の現地実装、冠水による減収予測などの研究が進められている。

(斜面災害への対応)

災害大国である日本は、斜面災害の予測と軽減、国土利用を含めたインフラの整備、避難警戒体制の確立等の研究では米国と並び世界最先端レベルにある。斜面災害の研究は、(1) 災害発生の場所とタイミング（時間）の正確な予測方法、(2) 土砂や水のエネルギー減殺と一時的貯留のための工学的な方法、(3) 災害からの最適な避難方法やより安全な生活圏の設計方法などの開発を目的としている。

土石流や斜面崩壊の発生雨量、発生場所についてはこれまで理論的な検討がなされている。近年は、現在の地盤情報と過去の災害履歴から将来の発生位置や規模を予測する研究や、降雨量及び降雨パターンから斜面災害発生タイミングを予測する研究が多い。手法としては、現地での調査観測、衛星写真やレーザーデータを用いたGIS解析、およびこれらに基づく数値シミュレーションが用いられる。これらを用いることで例えば発生場所についてはレーザープロファイリングにより高精度の予測（効率 50%、解像度 数cm）が可能となっている¹⁰⁾。

わが国独特の研究として斜面森林災害がある。1990年代までは森林管理による樹木根系の斜面崩壊防止について多くの研究がなされ、現在はほぼ完了している。近年は森林斜面が樹木とともに崩壊した際の流木の災害が注目されている（たとえば九州の日田・朝倉地方で発生した災害）。単なる浮遊流木ではなく、斜面崩壊から土石流、流木流と連鎖的に発達する災害で、九州から北海道まで広い範囲で発生し、気候変動下での特徴的な災害として今後の研究展開が期待されている。

治山・砂防構造物の設計・配置の研究では数値計算や模型実験から新規な知見は得られず、既存技術の現地適用が主たる動きである。また避難や生活圏の設計には社会科学的知見や建築・土木技術も必要となるため文理融合型研究の成果が待たれるが、研究方法の模索がしばらく続くと見られている。

海外では、より広域かつ長期間での斜面災害が注目されている。米国では、気候変動によって山火事や大規模なサイクロンが頻発することから、これらによる斜面からの流出土砂量や洪水発生に焦点が当てられている。特にカリフォルニア地域は山火事後の斜面崩壊など、乾燥化による斜面災害が多発している。オセアニアでも同様だが、加えて長期にわたる斜面からの土砂流出や海洋まで流出する細粒土砂による海洋資源への影響なども研究課題となっている。欧州は比較的わが国の土地条件に近いが、自然現象の研究よりも対策技術の研究に軸足が置かれている。一方、中国は、様々な環境条件を有し、内陸部（四川省、甘粛省など）では近年豪雨災害が頻発している。しかしながら現在はまだ災害復旧に追われており、まとまった研究は見られていない。また最近では長期化する豪雨による洪水災害（三峡ダム決壊など）も問題となっている。

(農林業におけるEbA)

生物多様性および生態系サービスを活用した農林業技術の開発への期待が世界的に高まっている¹¹⁾。こうした農林業におけるEbAは、「気候スマート農業（climate-smart agriculture）」、「グリーンインフラ」、「生態系を活用した防災・減災（Eco-DRR）」などととも、より広い概念である「自然を基盤とした解決

策 (Nature-based Solutions)」の一部として位置づけられている^{12), 13)}。研究開発は発展途上だが、FAOにおいても気候変動の適応計画の一つとして重要視されている¹⁴⁾。具体策としてこれまで注目を集めてきたのはアグロフォレストリー、保全農業、非作付け地の確保、遺伝的多様性の保全や有機農業などであり、これらは「持続可能な集約化 (sustainable intensification)」などとも呼ばれる。また農林業は気候変動への緩和・適応に加えて生物多様性保全、生態系サービスの強化、生計や健康の改善、コミュニティの強化や食料安全保障など、様々なコベネフィットをもたらすと考えられており研究事例の蓄積が進んでいる¹⁵⁾。

樹木を植栽し、その樹間で家畜・農作物を飼育・栽培するアグロフォレストリーは、EbAの具体策の一つとして注目され、その意義や効果を報告する事例が増えている。例えば、樹木があることで、乾季には強い日差しや土壌の乾燥、強風から農地を守り、雨季には強い雨から農地を守る。土壌浸食や害虫の抑制、土壌水分や肥沃さの保持といった生態系サービスが向上することにより、通常の農林業と比較して生物多様性が高まる。収量はしばしば低下するが、低コスト・高販売単価を進めながら、作物の多様化や樹木の木材利用などからの収入を得ることで収益の維持・安定化を図ることができるとの報告もある。その他にも土壌炭素貯留量が多いことからCO₂吸収源として気候変動の緩和に貢献する可能性もあるなど、多面的な意義が見出されている。

保全農業は、原則として①不耕起など土壌のかく乱の最小化、②植物残渣など土壌被覆の維持、③輪作、の三つの要件を満たす農業のこととされている。保全農業は土壌の生物多様性（微生物やミミズなど）を増加させ、土壌有機物を増やし、保水能力の向上などを介して水の流出や少雨の影響を低減するため、EbAの一方策になり得ると考えられている。収量は不耕起単体では減少傾向にあるが、残渣保持と輪作を組みあわせることで減少をある程度抑えることができるとの報告もある。ただ、収益増は主にコスト削減（大規模機械化の設備投資など）によってもたらされることから小規模農家では実現が難しく、南アジアの稲作・麦作地帯など高投入・高収量条件では比較的容易だが、サブサハラ地域など低投入・低収量条件では残渣の確保の難しさなどの課題があるとされる。

農地や河川の周辺における森林、草地、生垣、湿地などの非作付け地の確保は、浸透能の増加、水質浄化、流出量や最大流量の緩和などの効果があると期待されている。また遺伝的多様性を保全し多様な品種を作り出すことで、霜、干ばつや病気などのストレスの影響を軽減させることもEbAの一つと認識されている。

他方、国内ではEbAの視点を取り入れた農林業技術の研究は少なく、発展途上段階にある。ただ気候変動が与える影響の将来予測や、緩和策・適応策の開発、農地における生物多様性保全や生態系サービスの活用のための研究は進められている。特に里山の耕作放棄水田などを活用したグリーンインフラは注目を集めており、気候変動への適応を含む様々なベネフィットが期待できると考えられている。今後に向けては、例えば水田の中干し延長はメタンなどの温室効果ガスの発生量を削減できるものの、水田を利用する生物の生息地が失われるという課題があるように、EbAや気候変動対策と生物多様性保全の間のトレードオフの解消など、より統合的な視点の研究開発が必要と考えられている。

(水産業におけるEbA：ブルーカーボン)

国連環境計画 (UNEP) が中心となって作成した「ブルーカーボン・レポート」が2009年に公開されて以降の10年間では、天然 (自然海岸) のブルーカーボン生態系における有機炭素貯留プロセスの解明に関する研究、および現場での有機炭素貯留量・貯留速度の評価に関する研究が、国内外で実施されてきた¹⁶⁾。特に、海草藻場・マングローブ林・塩生湿地の3つのBCEでは、各生態系での有機炭素貯留の主要プロセスである堆積作用を中心に、海底土壌 (堆積物) への有機炭素貯留をベースとした地球規模での試算が多く

なされた。

2013年にIPCCから排出・吸収源インベントリへの評価手法の追補版として湿地ガイドラインが公開されてからは、その手法（単位面積当たりのCO₂吸収量 = CO₂吸収係数 [ブルーカーボン生態系の一次生産速度の把握] × 残存率 [生産された有機炭素のうち長期貯留される割合]）に則り、各パラメータについて各国地域での比較整理が行われている。これらの研究で試算された値から、地球規模の炭素循環では、人類起源のCO₂年間排出量約94億tのうち、陸域生態系が隔離するCO₂量が23億t、海洋生態系が隔離するCO₂量が24億tあることが明らかとなった。またBCEを中心とする浅海域は、陸域生態系が隔離したCO₂量のうちの9億t、海洋生態系が隔離したCO₂量のうちの11億tの計20億tを隔離していることが分かってきた¹⁷⁾。

海外では、BCEのうち同じ生態系を対象とする研究者がIPCCの動きに合わせた比較研究を実施し、世界各地の値を整理する事例が多い¹⁸⁾。BCEを対象とする研究者数はさほど多くないため、各国が競って研究開発を進めるといよりは、グループを作った国際共同研究が進められている。その中心となっているのが欧米の研究者を中心とした「Blue carbon initiative」である。対象地域としては、自国のインベントリにBCEを含めている米国や豪州、広大なBCEを有するラテンアメリカ、東南アジア諸国が中心である。

海藻藻場（大型藻類など）については、従来のBCEに加えてIPCC準拠の吸収源としてガイドラインに正式掲載しようとする動きが活発である。特に海藻類が広域に分布する北欧域において、わが国での海藻類の評価と同様に、海藻類のCO₂吸収源としての有効性を示す研究成果が報告されている^{19)、20)}。その北欧グループがBlue carbon Initiativeでも中心になり、COP（気候変動枠組条約締約国会議）の補助機関会合であるSBSTA（科学上及び技術上の助言に関する補助機関）で、海藻藻場の追加に関する議論を行っている。更にUN Oceans関連のハイレベルパネルの報告書作成公開（2019年9月）にも関わっており、海藻養殖のCO₂吸収源としての試算値を示している¹⁾。なおこの報告書では、水産資源のタンパク源としての利用促進を緩和策に位置付けており、それを受けて海藻藻場の水産資源生産の場としての役割にも期待が持たれ始めた。CO₂吸収源としてだけでなく、様々な生態系サービスを包括したブルーエコノミーとして海藻藻場のコベネフィットを統合的に評価・活用する方向へ研究が進みつつある²¹⁾。

こうした盛り上がり一方で、海藻藻場の減少が世界的に問題視されている。わが国で普遍的にみられるようになった気候変動に起因する藻場の広範囲消失（磯焼け現象）は、今や世界各地の温帯域・亜熱帯域の境界域でも報告されるようになった。特に地中海では熱帯性魚類の出現による磯焼けの進行により、重要な海藻藻場の消失が深刻化している。そのため、世界各地で藻場の監視モニタリング、維持回復、新しい造成（養殖含む）に向けた動きが出始めている。特にIPCCガイドラインに基づくインベントリの算定では活動量（人の活動による吸収源面積の増減）に関する情報が必要であるため、藻場の監視モニタリング技術の確立が喫緊の課題になっている。

国内の研究動向としては、2009年度から2013年度にかけて実施された水産庁の研究事業「藻場・干拓の炭素吸収源評価と吸収機能向上技術の開発」において、IPCCガイドラインに記載のある海草藻場に加え、大型海藻藻場によるCO₂隔離量（吸収係数）に関する評価が実施された。隔離量のみでの評価だが、海藻類によるCO₂隔離量は陸域の森林をはるかに上回ったため、特に大型褐藻類のCO₂吸収源としての可能性が注目され始めるきっかけとなった。大型褐藻（ガラモ類）の残存率が予想より高かったという海外での報告とも相まって、以降は大型海藻類による隔離・貯留の評価とそのプロセス解明に研究がシフトした。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

(農林業)

• 水稲に対する温暖化影響の予測

冷涼な岩手県雫石市および温暖な茨城県つくばみらい市で行われたFACE実験では、高い大気CO₂濃度に対するコメ増収効果は、年によって0～21%と異なるが、平均で11%との結果が得られた。外観品質への影響も見られた。また水稲の多収品種は一般の穀物に比べてシンク容量（籾数×籾重）が大きく、大気CO₂濃度の上昇による収量の増加割合が大きいことが明らかとなった²²⁾。こうしたことを受けて、将来の多収化に向けてシンク容量を拡大することが重要な方向性として期待されている。

高温による影響については全国10km四方の解像度での推計が行われている。将来の気候条件では現在より全国平均のコメ収量は増加すると同時に、登熟期に高温に遭遇するコメの割合も増加し、品質の高いコメの割合及び量が減少する可能性が指摘されている。地域別にみた場合、品質の高いコメの収量は2031～2050年で関東・北陸以西の平野部で減少、21世紀末には東北のほぼ全域や中部以西の中山間地などでも減少に転じる可能性が示された²³⁾。

• 農業気象データの蓄積とその活用

変動する気候下で農業生産の安定を図るには、気象情報の活用が一つの鍵になる。気象庁のアメダスは約21km間隔で全国に配置されているが、土地起伏などを考慮するとそのデータをアメダスから離れた現場に適用するにはやや粗いとされ、約1km四方単位で日本全国に気象データを提供するメッシュ農業気象データおよびその配信システム「農研機構メッシュ農業気象データシステム」が農研機構によって開発された。またこのシステムを拡張した栽培管理支援システムでは、気象情報に加え、栽培技術、作物生育モデルを統合し、冷害・高温障害などの気象災害の警戒情報、病害警戒情報および様々な栽培管理支援コンテンツも配信されている。

• 季節予報の活用

気候変動の長期的トレンドの変化に比べて気象現象の年変動は大きい。効果的に季節予報を活用すれば気象災害の影響を最小化でき、気候変動への適応策となる。短期間の洪水の予測は広く行われており、近年は気象レーダーによる豪雨域の可視化や数値予測モデルの精度向上も目覚ましい。これらの予測と流出解析モデルを組み合わせることにより、数時間から数日先の洪水を予測し、警報を発出するシステムも広く整備されてきた。また気象庁の季節予報では、数値予測モデルによる力学的予測が採用され、現業運用も開始された。その開発における最も大きな技術的な進歩は、大気海洋結合モデルの導入と言われており、これによって気象モデルの季節予測の精度が大きく向上した²⁴⁾。

• 水資源の将来予測

農業用水の利用を考慮した分布型水循環モデル⁸⁾を日本全域の河川流域に適用し、11種類の気候シナリオを用いた将来の水資源予測が行われた。これによると水稲の生産に影響が大きい代かき期には東北、北陸地方で全ての気候シナリオにおいて水資源量が減少する傾向がみられた。気温上昇が積雪融雪に大きな影響を及ぼさない北海道では変化が小さかった。中四国、九州などの西日本では気候シナリオによって増加・減少が混在し、予測の不確実性が大きかった²⁵⁾。

• 水田域を対象とした汎用水文モデルの活用

流域スケールでの水文現象（水・溶質・濁質の動態）の解析においては、国際的に広く用いられている水文モデルが複数あり²⁶⁾、国内でもそれらをプラットフォームとした研究が多く行われている。水と水質成分の流域での挙動を表すモデルで国際的に広く用いられているものとして、SWAT（Soil and Water Assessment Tool）やHSPF（Hydrologica Simulation Program – Fortran）が挙げられる。水資源開発、農業開発が主要な国でSWATの適用が急増しており、流域水文解析モデルのデファクトスタンダードになりつつある。現在は水田等のアジア特有の土地利用を考慮したサブモデルや、不確実性解析等のツール開発の必要性が指摘されている。また、豪雨等による深刻化が懸念される土壌侵食については、WEPP（Water Erosion Prediction Project）が広く用いられており、わが国でも適用例が多くみられる。気候変動による農地表土の流亡やその水域汚染は深刻な影響をもたらすため、科学的な予測に基づく対策立案の重要性が高まっている。

• 気候変動と人口減少を考慮したニホンジカ（シカ）の生息域予測

著しく増加している国内のシカが、食害や踏圧によって森林生態系および生物多様性に甚大な被害を及ぼしていることが近年問題となっている。今後の人口減少と温暖化による少雪化はシカの生存にとって更に有利に働くと考えられている。これらを背景に、シカの分布予測モデルの構築と、過去から現在、将来にわたるシカの潜在生育域の推定が行われている。

• マツ枯れ被害リスク域に関する気候変動影響評価

マツ材線虫病によるマツ枯れ被害は北海道を除く46都府県の低地のマツ林を中心に広がっているが、今後の温暖化によって高標高地や寒冷地のマツ林も被害を受ける可能性があるとしており、現在および将来の気候条件下におけるマツ枯れの危険度マップが作成された。またマツ枯れの被害は日本のみならず韓国、中国、ポルトガル、スペインなどにも拡大している。そのためマツ材線虫病に罹患しやすい21種のマツ属森林を対象としたマツ枯れ危険域の予測モデルも構築されている。

• 人工林への気候変動影響評価

人工林では、台風による風倒害リスクの増加、水ストレスによる生長阻害、一次生産量の増加、素材生産量への影響、病虫獣害など、多岐にわたる気候変動影響が想定されている。例えばスギでは、年降水量が少ない地域で、将来、スギ人工林の脆弱性が増加する可能性が指摘されている。しかしスギの衰退と土壌の乾燥化との関連はいまだ明らかではないため、引き続き検討が必要とされている。また近年のプロセスモデルによるスギの一次生産量予測シミュレーションでは気候変動による純一次生産（NPP）の上昇は見込めないという予測もなされている。

• 人工林の造林適地と経営収支の予測

トドマツ人工林の造林に適した環境条件と、その地理的な分布を明らかにすることを目的とした、機械学習に基づく統計モデルが開発されている²⁷⁾。北海道のトドマツ人工林は多くが主伐期を迎えており、伐採後の再造林における最適な管理手法を特定することが重要な課題となっていたことが背景にある。モデルによる予測の結果、温暖かつ夏期降水量が多く、火山灰地や花崗岩地といった特定の地質以外の場所がトドマツの造林適地であることが判明した。また、モデルから予測された造林地としての好適度（地位）を対象に収穫予

測を行い、素材単価、育林費、素材生産費などと併せてトドマツ人工林の経営収支を予測するモデルも開発された。このモデルでは、トドマツ人工林の経営収支は、十勝や釧路中部で高く、日本海側や宗谷、根室などで低いと予測された。これらのモデルによる人工林の経営収支を予測する手法は今後、気候変動に対する影響評価研究への応用が期待されている。

• 害虫に対する温暖化の影響評価

数理生態学的な検討から、気温上昇と害虫発生量との関係など2つの要因の間の因果関係を調べる統計的な方法に対し、単純な見かけの相関ではなく因果関係の解析が温暖化影響の正しい評価には不可欠であることが指摘されている²⁸⁾。また害虫は温度に対する適応と殺虫剤抵抗性との間に進化的なトレードオフが存在するため、気温上昇の結果、殺虫剤抵抗性の程度が変化する可能性が指摘されている。単に害虫の発生時期や発生量の変化だけでなく、殺虫剤抵抗性の遺伝子頻度などの変化も注視していくことが重要とされている²⁹⁾。さらに気温上昇は病害虫の発生のみならず病害虫が加害する寄主植物の生育や季節消長、害虫に寄生する天敵などの発生にも影響するため、植物-害虫-天敵の3者系を考慮に入れたモデリングや実態解明の必要性も指摘されている³⁰⁾。

• EbAを推進する国際コミュニティ

EbAに関する情報発信や国際連携のためのコミュニティが複数立ち上がっている。「Friends of EbA (FEBA)」は、EbAに関する協力や知識共有に関心のある組織の非公式なネットワークとして知られている。「weADAPT」や「ABE (Adaptation Based on Ecosystems)」は気候変動適応問題に関する共同プラットフォームとしてEbAに関する研究事例の集約にも取り組んでいる。また「Ecosystem-based Adaptation through South-South Cooperation (EbA South)」は、アフリカ、アジア太平洋地域におけるEbAの検証や普及に取り組んでいる。「Natural Water Retention Measures (NWRM)」は欧州における水資源に関する諸問題の解決に取り組んでおり、EbA農林業の事例も含む。

(水産業)

• 大型海藻類のバイオマス利用および新しい吸収源創生

農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究 (2020年度～) において、海藻類が成長に伴って排出する難分解性溶存有機炭素 (溶存態有機炭素、懸濁態有機炭素) の存在が明らかになり、ブルーカーボン生態系における有機炭素貯留 (残存率) の新しいプロセスとして注目され始めている³¹⁾。仮にこの新しい残存率プロセスが吸収源評価に加わると、食料生産として消費されてしまう海藻養殖もCO₂吸収源として機能する可能性が生じる。そのため、バイオマス利用への展開と相まって、大規模海藻養殖プラントや人工藻場など新しい吸収源の創生、化石燃料由来製品に代替する新素材開発や機能成分の探索などに関する技術開発が当面の喫緊課題とされている。なおこれらを発展させるには産業化に対応できるだけの原材料確保が必要となるが、熱帯雨林より早い速度で減少している自然海岸のBCEから原材料を採取することは回避すべきである。原材料の安定供給の観点から、海草・海藻養殖を大規模実施できる海上養殖プラントの構築およびその産業化のための研究開発も求められている。

• 大規模海藻養殖施設の構築

我が国の海藻養殖は静穏な内海性浅海域で実施され、その目的は食料生産であったため、食用海藻種の

みを対象として技術開発が行われていた。今後、CO₂吸収源対策として実施すべき海藻養殖は、食用対象種だけでなく、CO₂吸収源としての効果の高い海藻類を活用していくとともに、面積の限られた内海性浅海域ではなく、沿岸域や沖合域での海藻養殖を可能とする技術開発が必要となると考えられている。既に欧米では数年前から国主導で研究開発が開始しており、再生可能エネルギー施設（海上風力発電施設）との併用などが試験されている。

• ブルーカーボンの活用に向けた国内検討の活発化

国土交通省は令和元年6月に「地球温暖化防止に貢献するブルーカーボンの役割に関する検討会」を立ち上げ、ブルーカーボンの活用に向けた具体的な検討を開始した。また「ジャパンプルーエコノミー技術研究組合」が2020年に設立された（国土交通省認可）。ブルーカーボンを主軸とした技術研究組合であり、ブルーカーボン生態系の環境価値の定量的評価（科学的）、新たな資金メカニズム導入（経済的）、環境価値の創造と増殖（技術的）、社会的コンセンサス形成（社会的）とその連環構築を目標にした研究活動を推進している。更に、2025年に海藻藻場（大型藻類など）をIPCC準拠の吸収源として採用することを目指したUN Oceansほかの動きに合わせ、国内でも正式に日本国のインベントリに加えるべく、海藻藻場（大型藻類など）のCO₂吸収源評価手法の確立とその手法による国内初の全国評価が実施されようとしている³²⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

• 気候変動適応情報プラットフォーム（A-PLAT）

気候変動適応法の施行（平成30年12月）を受けて国立環境研究所気候変動適応センターが立ち上げたプラットフォームであり、気候変動影響や適応策に関する科学的知見や適応に向けた様々な取組みなどの情報を発信している。国内の主な研究プロジェクトもまとめられている。

• 環境研究総合推進費戦略的研究開発 S-18 「気候変動影響予測・適応評価の総合的研究」

我が国の気候変動適応を支援するため、影響予測・適応評価に関する最新の科学的情報の創出を目標として5年間（2020～2024年度）の予定で実施中。同プロジェクトにより（1）2025年に予定されている適応計画見直しへの貢献、（2）脆弱な地域の把握や適応計画の立案・実施など自治体の取組への寄与、（3）IPCC第7次評価報告書やパリ協定における国際的取組への貢献、（4）気候変動に対して強靱な社会の在り方に関する提言、といったアウトカムの実現を目指している。日本における農業生産や水資源・水利用への気候変動の影響予測に加え、適応策の検討に重点を置いた研究が実施されている。

• 文部科学省「統合的気候モデル高度化研究プログラム」（2017～2021年度）

気候変動メカニズムの解明、気候変動予測モデルの高度化や気候変動がもたらすハザードの研究などに取り組むとともに、高度化した気候変動予測データセットの整備に取り組むプログラム。このうち領域テーマD「統合的ハザード予測」（京都大学防災研究所）では、高精度化された気候変動予測情報を受け取るハザードモデルについて、モデルの高度化、高解像度化、日本全域へのハザードモデルの最適化などの研究開発を行うとしている。また開発されたハザードモデルをもとに、台風や豪雨などの極端現象などに関するハザードについての頻度や最大クラスの強度評価も含めた将来変化予測、あるいは自然災害や水資源を対象に、時系列を考慮して現在から徐々に進行していくハザードの将来変化の時系列についての研究を実施している。

- **AgMIP (Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project) (2010年～)**

世界の作物モデル（農作物の収量予測モデル）を統一基準で比較して予測精度の向上に結びつける国際プロジェクト。イネを対象とした研究チームは2011年に発足し、現在、9カ国（日本、中国、インド、フィリピン、アメリカ、イタリア、フランス、オーストラリア、オランダ）の計18機関が参加して研究を実施中。

- **国連開発計画（UNDP）の気候変動適応プロジェクト**

UNDPの気候変動適応プロジェクトでは気候スマート農業（雨水採取技術や作物の多様化など）の導入を通じた4,800万人の小規模農家支援と85万haの農地再生に取り組む。

- **CASCADE プログラム**

国際NGOのConservation Internationalは様々な研究機関などと連携して気候変動のリスク評価やEbAの実現に取り組んでいる。その一つに中米の小規模コーヒー農家を対象とした本プログラムがある。気候変動がもたらす送粉サービスへの影響や、生垣やシェードツリーを活用した適応策の有効性の評価が行われており、多数の学術的成果も報告されている。農家のトレーニングプログラムや政策資料も公開している。

- **令和2年度農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究「ブルーカーボンの評価手法及び効率的藻場形成・拡大技術の開発」(2020～2024年度)**

我が国の温室効果ガスインベントリ報告書にブルーカーボン生態系（特に藻場・干潟）を登録するための評価手法を確立させると同時に、藻場を維持・回復・形成拡大するための技術開発を実施している。

- **JST SATREPS「コーラルトライアングルにおけるブルーカーボン生態系とその多面的サービスの包括的評価と保全戦略」(2017～2021年度)**

フィリピン・インドネシア海域でのブルーカーボンの調査と活用に向けた研究・指導を実施している。

- **Blue Carbon Initiative**

BCEについての国際的な共同イニシアチブ。Blue carbon scientific working groupとBlue carbon policy working groupの2つのグループからなり、両者が連携して活動を行っている。活動事例にはインドネシア、ラテンアメリカ地域、米国、豪州でのBCEを対象としたCO₂吸収源機能の評価、BCEの保全活動、ブルーカーボン活用に向けた政策研究の実施、UNFCCC-SBSTAでのブルーカーボンワークショップの開催などがある。

- **Oceans 2050「Seaweed Carbon Farming」(2020年～)**

海洋の保全に取り組む国際的なプラットフォームであるOceans 2050が開始した世界各地の海藻養殖海域のブルーカーボン貯留量の計測と推定を行う研究プロジェクト。日本からは先述の農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究が連携する形で参加予定である。

- **DOE ARPA-E「MARINER: Macroalgae Research Inspiring Novel Energy Resources」(2017年～)**

バイオ燃料などに利用可能な大規模海藻養殖技術の開発を進める、米国エネルギー省傘下のARPA-Eによるプロジェクト。バイオ燃料による化石燃料削減を最終目的とする。

• EU FP7 「Wier & Wind Project」(2019～2022年)

2012年～2015年にバイオマス向けの大規模海藻養殖技術の開発を目指したプロジェクト「AT-SEA : Advanced Textiles for Open Sea Biomass Cultivation」が実施された。これに続き現在は沖合風力発電施設を利用した海藻養殖技術の構築が進められている。同プロジェクトでは2ha程度の海藻養殖面積を目指している。

(5) 科学技術的課題

(農林業)

気候変動が収量に及ぼす影響の予測は、社会シナリオとそれに基づく気候予測、および作物の収量予測モデルを組み合わせて行われるため、予測にはいくつもの不確実性が含まれる。これまでの影響予測の不確実性評価では、主に社会シナリオや気候予測による不確実性が取り上げられてきたが、作物の収量予測モデル自体は十分に検討されていなかった。そのため、異なる作物収量予測モデルによる予測結果を相互比較し、収量予測モデルの不確実性を評価するとともに、精度を向上させる国際的な取り組み(AgMIP)が始まった。今後に向けては、FACE実験などで得られた知見をこうしたモデルに取り入れ、精度を向上させることが課題となっている。

水稻の品質予測モデルは、これまで主に気象要因のみを指標として開発が進められてきた。しかし品質には栽培管理や品種といった気象以外の多くの要因が関係するため、気象条件に基づく経験式のみでその変動を予測するのは困難だった。近年、栽培管理などを取り入れたモデルも開発されており、今後、適応技術も考慮した予測に適用される見込みとされている。

圃場の水管理は、水稻栽培における労働時間の約3割を占める。大規模営農では複数品種の栽培で水管理が複雑になるとともに、気候変動による年々の栽培暦の変化も問題となる。水田の給排水の遠隔操作が可能になる自動水管理システムが開発され、ハード的な機能だけでなく、各生育期間での水管理方法を設定するなどのソフト的な機能も備わっている。生育期間の情報は現地圃場の気象データと作物生育モデルにより時々刻々と更新され、予測情報も取り入れるようになっていく。また、水田水温のシミュレーションモデルと結合することにより、最適な給水時刻に給水を行うことが可能となっている。こうした栽培管理支援システムは全国の圃場で実証試験が進められており、今後の発展が期待されている。

力学的な季節予報では大気・海洋のカオス的な振る舞いを確率論的に予測するため、同じ予測対象期間に対して複数の数値予報を行うアンサンブル予報が採用されている。現在は、そのようにして行われる季節予報を用いて、収穫の数ヶ月前に主要穀物の収量変動について予測情報を提供するための研究が進められている。また季節予報の渇水(水資源)予測への応用も今後の重要な課題となっている。確率的な渇水予測に基づき実際の貯水池の運用や水需要調整などの多岐にわたる渇水対策での最適な意思決定を行うことが適応策の検討として必要となっている。

極端な気象現象が森林生態系にどのような擾乱(じょうらん)を与えるかは十分に分かっておらず、様々な周辺分野との共同による解明が必要とされている。大きな擾乱によって植生や地形が変わり、蒸発散や流出の経路に大きな変化が生じたときに、生態系を形成している動植物の生息環境が変化し、蒸発散へのインパクトを通して水収支、水貯留への影響が生じる可能性があるとしてされている。これらのプロセスの理解には、農学のみならず動植物や微生物の生態学的知見も必要になる。また表層の浸食や崩壊など、基盤となる土壌に擾乱が生じる可能性を考えればより複雑な影響が生じるため、地球物理学的、砂防工学的な研究アプローチも必要になる。

病害虫に関する研究としては、気温上昇とCO₂濃度の上昇が植物を介して間接的に病害虫に及ぼす影響の解明、気温上昇などが病害虫の殺虫剤抵抗性の変化に及ぼす影響の具体的な事例の収集および分析、植物-害虫-天敵3者系を考慮に入れた気候変動の影響評価、越境性害虫の気温上昇に伴う越冬地域の拡大や侵入量増加の将来予測などが今後取り組むべき課題として認識されている。

森林分野では、気候変動緩和策の代表例である植林やバイオ作物栽培と、適応策ともいえる生物多様性の保全との間にはトレードオフが存在するため、最適な土地利用管理や配分の設計が求められる。シカ被害、マツ枯れ、ナラ枯れなどの病虫獣害や、人口減少による森林の維持管理機能の低下などの諸問題も同時に考慮した総合的な最適解を示すことが期待されており、問題解決型の研究開発が必要とされている。

ドローン画像によって樹木の種類を判定して森林モニタリングに活用する動きがあり、効率的かつ省力的な森林モニタリング技術として期待されている。しかし現時点では高精度なドローン画像であっても全ての樹木の判定は困難であるなど、AIによる完全な自動判読の実現にはまだ課題が残されている状況である。季節を変えてドローンを同じ場所で複数回飛ばし、同時に現地調査や目視判読と重ねることを繰り返して教師データとし、AIに学習させるといった方策が必要と考えられている。

ナラ枯れ（ブナ科樹木萎凋枯死被害）は、1980年代から日本海側の地域を中心に報告されていた。近年では、関東地方の多数地点や九州北部からも被害が報告されている。かつては里山林で薪炭が定期的に伐採されていたが、薪炭林が以前のように利用されなくなり、里山のブナ科樹木が高齢化、大径化したことが原因の一つと言われている。病原菌を運ぶカシノナガキムイムシの越冬後の生存には冬季の積雪や低温が影響を与えるとされているため、温暖化が進むと被害地域がより北方や高標高地域においても発生する可能性があるかと懸念されている。特に、ブナ科樹木の中でもナラ属のミズナラは被害を受けやすいとされ、ミズナラの天然林が広がる北海道にナラ枯れ被害が拡大しないように注意を払い、検討を進めるべきと認識されている。

国内向けでは台風や線状降水帯に伴う局地豪雨の継続による斜面災害が今後の課題となっている。これに対して短期的には流域面積100km²程度の狭い地域で地形的に危険な斜面を抽出する方法の開発が必要となる。中長期的には局地豪雨予測と豪雨時の斜面内ポテンシャル上昇による崩壊メカニズムの解明が課題となる。また地震と複数の豪雨の連鎖による複合型斜面災害も課題となっている。短期的には震動と地下水上昇に伴う斜面の脆弱性（劣化）の進行メカニズム解明が必要とされ、中長期的には複数豪雨の連鎖による斜面災害危険箇所の探索システム開発が必要と考えられている。

（農林業におけるEbA）

SDGsに関する複数の指標（気候変動の緩和、適応、生物多様性、生態系サービス、食料安全保障など）は個別に研究されることが多く、目標間のトレードオフやシナジーの実態把握、あるいは解決については、知見がまだ十分に蓄積されていない。例えば環境に配慮した農業は生物多様性およびそれに由来する生態系サービスを向上させるが、収量の低下につながりやすく、食料安全保障上の問題が残る。圃場スケールの解決策では限界があり、シナジーの創出には景観スケールの総合的な適応計画が必要となる。これに取り組むためにはあらゆる分野の科学者がこの問題に関与し、気候変動の解決策を見つけるために協力していくことが必要になる¹²⁾、¹³⁾。

（水産業）

CO₂吸収源を目的とする海藻養殖の実現のためには、食用外の種や産業利用が可能な種を対象とした大規模な養殖プラントの構築が必要になる。海草・海藻類を原料として産業利用していく上でも安定的な供給体

制の構築は不可欠となる。食料生産に関してはブルーミート（牛などのレッドミートと対比させて海由来の動物性たんぱく質をこのように呼ぶ）の食料利用がCO₂排出削減対策としても有力視されている。ただ現状では産業利用可能な種は選定されていない。また場所の問題に関し、内海性浅海域は航路や食料生産の場としてすでに多くの面積が占有されている。限られた浅海域を取り合うのではなく、広域な面積を確保できる沿岸沖合域での養殖展開が検討される必要があり、そのための技術開発が求められている。既に欧米では技術開発が始まりつつあるが、国内では未着手の状態である。

海藻・海草類が成育中に排出する溶存性有機炭素（DOC：Dissolved Organic Carbon）に難分解性有機炭素（RDOC：Refractory DOC）が含まれることが解明され³¹⁾、有機炭素貯留（残存率）の新しいプロセスとして期待されている。ただ現状はその存在が解明されたのみで、RDOCを構成する物質や成分については明らかにされていない。RDOCとして機能する成分の解明や残存率プロセスの強化に資する研究開発が必要とされている。また大規模養殖により増やした海藻を深海へと輸送するプロセスについても、技術開発や監視システムの開発など各種検討が必要と認識されている。

海草・海藻類のバイオマス利用に向けた新素材・機能成分の探索などは殆ど未着手に近い状況にある。加工過程の少ない（CO₂フットプリントのできるだけ小さい）ものが求められている。バイオエタノール生成に向けてグルコース含量の高い海藻類の探索・培養が実施されたこともあるが、実用化レベルには達していない。

CO₂吸収源の算定には活動量（人の活動による吸収源面積の増減）の把握が必須となるため、衛星などを用いた広域の藻場監視モニタリング体制を構築する必要がある。

海草・海藻藻場（海藻養殖含む）の減少を国内外で引き起こしている要因として、海水温上昇による海草・海藻類の生理活性の低下や、温暖化に伴い北上する植食性動物による食害がある。なかでも藻場消失のトリガーとなっているのが食害の多発であり、特に、南方から移入する植食性魚類に対しては、現時点で十分な対策手段がない。この植食性魚類の殆どは食用外であるため、漁獲されることがなく高密度状態が維持されている。そのためこれらの食害を防除し、藻場を確実に維持するための技術開発が早急の課題となっている。

ブルーカーボン生態系は内海・内湾浅海域に分布し、特にわが国ではその多くが漁場として漁業権管理されている。そのため漁業との統合化を可能にする政策や管理方策に関する研究（藻場管理・監視・漁業によるCO₂貯留プロセスの創出、CO₂緩和による漁業の創出など）も必要と認識されている。

（6）その他の課題

（農林業）

気候変動適応法（平成30年6月13日公布）では、現在すでに生じている、または将来予測される被害の回避・軽減などを図る方策について、自治体ごとに計画を策定することが謳われている。気候変動による食料生産環境への影響に対して、様々な適応策が分野ごとに検討されているものの、それらを統合し、地域での総合的な適応策へと落とし込むための検討は端緒についたところであり、今後の課題と認識されている。

水稻を例にとると、移植日の変更を行う場合には、河川からの取水を現在の期間から移植日・収穫期に応じて変更する必要がある。また、掛け流し灌漑などの高温障害への適応策をとる際にも、十分な水資源を確保する必要がある。一方で、降雪・積雪量の減少、融雪時期の変化、降水量の年変動の拡大、蒸発散量の増加はこれまでとは異なる河川流況を生じさせることから、これまで以上に水資源の適切な管理や効率的な水利施設の運用が求められる。農業生産・水資源の両者のバランスをとるには、圃場スケールでの作物的な適応策と流域スケールでの水資源の適応策を同時に考える枠組みを構築することが課題となる。さらに、洪水・渇水を引き起こす両極端な気象現象の増加が予測されるため、利水・治水のバランスをどのようにとるか、

水源地となる森林管理までを含めた、流域レベルでの構想が求められる。

国連食糧農業機関（FAO）をはじめとする国連の諸機関は、水資源、エネルギー、食料の安全を確保するためには、三者の相互関係とそのメカニズムを明らかにし、将来予測を立てる必要性を指摘している。我が国では、森林の公益的な機能のうち、土砂災害の抑制、水源涵養機能は、持続的な農業生産に大きく関わり、気候変動下で森林をどのような状態で維持するかが農林業の気候変動適応策としても課題となる。また、農地面積や農家戸数の減少や、作付けする作物や作付け時期の変化といった社会的な条件も変化している。持続的に農業生産を続けるためには、今後起きつつある変化を理解し、ダム放流量の調整や取水制限などの短期的措置に加え、水利施設の整備、改修などの長期的な適応策を講じていく必要もある。

若手人材の不足が問題視されている。森林・林業の分野でも研究分野が細分化されて多岐にわたっており、その中で森林・林業への気候変動影響研究に取り組む研究者の数は限られている。大学で当該分野を専攻とする教官も少ないため、若い世代が育ちにくい状況にある。加えて近年は、博士課程に進学する日本人学生数が少なく、将来を担う若手研究者の不足が明白な状況がある。森林科学全体の国際競争力を維持する観点からは、こうした課題の解決に向けた方策が必要とされている。

（農林業における EbA）

EbAの実践には、ファンドの獲得、土地利用におけるコンフリクト、地域コミュニティの理解や知識のギャップ（例：EbAの便益評価）などにおいて困難があるとされている¹⁵⁾。その他の工学的手法（グレイインフラ）などとの組合せが必要な場合も多い。現状では気候変動対策に関連するファンドの中でもEbAに関するものはごく一部に留まるという。

（水産業）

日本には海草・海藻利用文化と藻場の保全管理の歴史があり、数百年以上も続く漁場整備や漁業権範囲内での地域的な取り組みなどがある。食料生産としての海藻養殖技術も世界有数のレベルにある。そのためブルーカーボンの活用は国際的にイニシアチブを獲得しうる分野だが、藻場の産業活用は漁業の範囲内での議論が殆どで、産業としては小規模であり、食料生産以外の産業化への取り組みは国際的にみて遅延気味な状況にある。小規模産業であるがために他分野の産業による海岸開発により藻場が消失してきた経緯もある。今後はBCEの維持・拡大に向けた社会的コンセンサスを得るための活動が必要と認識されている。その一環としてBCEを対象とする産業（ブルーエコノミー）の推進機運も盛り上がっている。一方、BCEの多くが沿岸の漁業権海域内にあり、漁業権との調整による成長産業化への仕組み構築が課題となっている。

海外では、バイオマス利用に向けた大規模養殖など、産官学連携による産業化推進と気候変動対策の両立に向けた取り組みが始まっている。一方で我が国の養殖産業は食料生産の範囲内にとどまっている。しかしノリ・コンブ類も海外産が多くなり、ワカメは国内消費の8割が中国・韓国などの養殖生産物に占められている。国内養殖産業の維持・発展のためには、今後は食料としての利用だけでなく、気候変動対策としての海藻養殖産業を拡大していくことが必要な方策の一つと考えられている。またその推進に向けて、国主導での国内養殖資本の強化や技術開発への投資の増加が課題と考えられている。

(7) 国際比較

・農林業分野

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"> ● FACE実験に代表される作物への直接的な影響評価研究やモデル化研究が活発に行われている。 ● 農業水利用を考慮した流域スケールの水資源評価モデルの開発が進められ、アジアモンスーン諸国・日本の各河川流域での基礎的な影響の検討が進んでいる。 ● 樹木の気候応答のような樹木生理学的研究は多数の報告があるものの、成果を広域化・地図化した事例は限定的。 ● 分布予測モデルや生態ニッチモデルといった機械学習を取り入れた統計モデル研究がブナ林をはじめとした天然林を中心に行われてきた。これらにより天然林の主要樹木種の分布と環境条件との関係性を解明するモデル研究は基礎的な手法がほぼ確立し、成果が出始めている。 ● 病害虫研究でも着実な研究。 ● 農林業における気候変動の影響評価や将来予測が進んでいる。また生態系を活用した防災・減災 (Eco-DRR) やグリーンインフラの研究事例が蓄積しつつある。 ● 農林業における適応・緩和策の研究プロジェクトなどが進んでいるが、EbAの観点からの研究はまだ限定的。 ● 太平洋プレート周辺に位置する環太平洋諸国の一つとして、その地盤条件と気候条件から斜面災害が多発するため、米国と並び斜面災害についての研究が進んでいる。斜面災害の発生機構に関する研究が進んでいるが、近年は発生予測の研究に注力されている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● リアルタイム気象情報を用いた栽培管理支援システムの構築、ICTなどを活用した水利施設の制御などの実用化研究が全国的に実施されている。 ● 農業水利用への気候変動影響の予測に基づき、各流域の農業水利用・作付時期などの変化を反映した水資源予測や、季節予報を用いた貯水池運用の検討などの適応策が検討されている。 ● 機械学習を利用した生物多様性、気候変動緩和・適応、森林生態系サービスなどを出口とした研究が今後増えてくると見られている。 ● 近年、プロセスモデルであるBiome-BGCを用いたスギ人工林の純一次生産量のマップ化が試みられている。 ● 分布予測モデルをベースに、育林や林業経営収支予測などの応用的な出口を目指す研究の流れは今後も続くと思われる。 ● 気候変動適応法に基づき気候変動適応計画が策定されたことにより、EbA的な農林業の事例はまだ少ないものの、検討が進みつつある。保安林を活用した自然災害の緩和や、洪水などの水害対策としての田んぼダムなど、農林業におけるEco-DRRやグリーンインフラに対する注目も高まっている。気候変動適応情報プラットフォームでの情報公開も進んでいる。 ● 斜面災害に係る応用研究・技術開発では国と民間が協力して研究成果の社会実装を行っている。斜面災害の危険箇所 (ハザードマップ) や発生タイミングを住民や産業従事者などが自ら確認できるようなAIシステムも公表されている。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 農務省の農業研究所 (USDA-ARS) において詳細なチャンパー試験や現地実証試験に基づいた物理過程ベースの作物収量予測モデルの開発が行われている。土壌水分、炭素呼吸過程、土地利用などの変化による影響を考慮した作物成長の物理過程に基づくモデル解析など先進的な研究も進める。 ● USDA Forest Serviceの研究者らを中心として気候変動に伴う樹木の潜在生育域の変化予測に関する研究が90年代後半から行われ、論文や報告書などが多数公表されている。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

2.2 俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●気候変動に適応するための気候スマート農業などの農林業技術の研究開発が盛んに行われ、その成果がThe National Climate Assessment (NCA) やUSDAなどによって取りまとめられている。 ●USDA-ARSでは、農地灌漑量や地下水取水量の推定に用いられる熱波長の観測による蒸発散量推定法、衛星観測雨量の補正のためのマイクロ波による土壌水分観測、リモートセンシングによる広域の早期収量予測モデルの開発など幅広く研究を先導している。 ●病虫害に関連する研究も盛ん。アメリカマツノキクイムシが大発生してマツ林生態系に甚大な被害を与えており、気候変動影響や炭素循環、森林火災などとの関連が研究されている。温暖化に伴う害虫被害による地球規模での減収を予測し、特に温帯地域での収量減が増すことを指摘。温暖化の影響評価の際に植物-昆虫あるいは多栄養段階、群集レベルでの相互作用を考慮する重要性を指摘。 ●森林の温暖化リスクマネジメント、炭素循環や温暖化適応策についても研究が進んでいる。 ●環境保護庁が生態系の保護を含む気候変動適応計画・戦略を策定し、様々なツールを公開。 ●北米気候スマート農業アライアンス (NACSAA) が設立され、野生動物の保護や生態系サービスの活用を考慮した、持続可能な気候スマート農業の普及に取り組んでいる。
欧州	基礎研究	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●気候変動適応への対応の枠組みである「Copernicus Climate Change Service」では、気象災害に適応できる水管理を重点テーマの一つに挙げている。 ●伝統的に植物および気候に関するデータベースや研究成果が充実している。2000年代から森林に関する気候変動シミュレーション研究の成果を数多く公表してきた。現在でも分布予測モデルの著名な研究者はEU諸国の大学や研究所に多い。 ●Horizen2020でEbAを含む気候変動適応に関する研究プログラムが設定されており、多くの研究成果が得られつつある。EUのEbAプロジェクトを総合的に評価し、成功要因の解明や費用便益の分析などを行うなど先進的な取り組みを実施。農林業におけるEbAの包括的評価が実施され、レポートを公開。 <p>【各国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●フランス国立農業・食糧・環境研究所INRAE (National Research Institute for Agriculture, Food and Environment) が農地からの温暖化ガス放出の影響や緩和策の検討を本格化させている。作物収量の予測を目的として、ヨーロッパ・アフリカを対象とした作物モデルの開発による農作物の収量への影響予測も行っている。 ●英国では生態・水文研究所CEH (Centre for Ecology and Hydrology) が温暖化への統合的な影響予測を行うための基盤技術として、農地をはじめとする各フィールドでの観測に基づいたプロセスベースモデルJULES (Joint UK Land Environment Simulator) を開発し、収量予測や水資源予測を行っている。 ●ドイツ政府環境省 (IKI-BMUB) がEbAプロジェクトに130万ユーロを資金提供。フランスではアグロフォレストリーなどの研究が進む。英国では生物多様性や生態系サービス関連の研究が盛ん。 ●病虫害に関する研究でも植物-害虫-天敵の3者の相互作用の解析やモデリング、害虫の分布予測、害虫の温度反応の推定など多様な研究を実施。

	応用研究・開発	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 気候変動緩和を目指す土地利用シナリオと生物多様性保全とのシナジーなど、応用的な研究が進められている。 ● 「気候変動適応戦略」が採択され、その戦略の有効性評価を行うとともに、加盟国が包括的な適応のための行動をとるよう促している。「欧州気候適応プラットフォーム (Climate-ADAPT)」を設立し、各地域・セクターの適応計画を支援するための様々な情報・ツールを公開。 <p>【各国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● フランス国立農業・食糧・環境研究所INRAEが季節予報の渇水予測への活用に向けた応用研究において存在感を示し、国際的な研究イニシアティブHydrologic Ensemble Prediction Experiment (HEPEX) などを通して精力的に活動。 ● ドイツでは大学や連邦政府が連携しEbAのガイドブックなどを出版。フランスでは経済社会環境評議会が生物多様性や生態系サービスを考慮した気候変動適応への意見書を策定。 ● 英国は「25 Year Environmental Plan」に基づき生物多様性の保全や持続可能な利用、気候変動対策や緩和の総合的な取組みを推進。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 気候変動影響評価と森林生態系に関する研究成果は多数出ており、今後もその傾向が続くと予想されている。 ● アブラムシの発生に及ぼす温暖化の影響を長期データを用いて評価。その他にも害虫被害に対する温暖化の影響に係る研究を多数実施。 ● ゴム生産に間作を取り入れることによる生態系サービスの向上、収益増加、気候変動適応などの効果を検証する研究を、Natural Capital Projectの一環としてスタンフォード大らとの共同で実施。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 気候変動に対する森林生態系への適応策など、応用的な研究も進んでおり、今後も増加すると見られている。 ● International Institute for Environment and and Development (IIED) と共同で、EbAを利用した農業の干ばつ対策の研究を実施。政策提言も行う。 ● 米国に本部を置く自然保護団体であるThe Nature Conservancyが中国におけるEbA優先エリアを地図化し、生物多様性保全や気候変動緩和に取り組む。 ● 世界最大規模の生態系サービスへの支払いプログラムが創設され、森林や草原を回復し、自然災害のリスクを軽減しながら農村の貧困を緩和する取組みに1億2,000万世帯が参加。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 限定的だがモミ属や常緑広葉樹など韓国の天然林構成種に関する気候制限要因などに関する研究成果がある。 ● 病害虫の分布拡大予測に関する研究がある。 ● Korean Environmental Instituteによって農業における気候変動適応策の研究開発が進められているが、国際的な発信は多くない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 森林生態系に対する気候変動適応策の研究はあまり進んでいない。 ● 国連の方針に沿って生物多様性・生態系の保全を含む気候変動への適応策の策定と主流化を進めているが、国際的な発信は多くない。
豪州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 豪州科学研究機構 (CSIRO) では、作物の生長過程や収量予測モデルを用いて、作物の生産量と自然生物の関係や、地下水の上昇による塩害発生予測など、農業と周辺環境を連結した解析を進めている。 ● 病害虫の薬剤抵抗性の進化と気候変動の関連性についての研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● CSIROでは気候分野、水文水資源分野、作物分野の研究者が共同し、リモートセンシングを利用した土地利用の抽出および作物モデルの構築を行い、長期間の渇水に襲われたMurray川流域への気候変動の影響分析を進めている。

・水産業分野 (ブルーカーボン)

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"> ●水産庁を中心に漁場整備や磯焼け対策などで研究開発の蓄積がある。 ●利用する海藻の種類や藻場の生物学的知見は多い。ブルーカーボン生態系の現状把握を全国レベルで実施・評価した例は日本のみ。 ●インベントリ報告書への登録に向けたブルーカーボン評価手法の確立に向けた研究が始まっている。
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●NEDOや農林水産技術会議においてブルーカーボンの推進に向けた検討が始まっている。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●海藻のバイオ燃料開発を含む、海藻バイオマス産業の構築に向けた研究プロジェクトが進行中。 ●USGS・NASAによる塩性湿地とマングローブ林のモニタリングシステム構築の動きがある。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●海藻養殖産業への参入を本格化。 ●全米の海岸を対象にブルーカーボンの総合評価を省庁連携で実施。
欧州	基礎研究	◎	↗	<p>【北海～バルト海】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●英国・オランダ・ベルギー・スウェーデン・フィンランド・フランス・ドイツ・デンマークなどの共同で、海藻類(ホンダワラ類)がCO₂吸収源として機能することを初めて明らかにした。これ以降、海藻ブルーカーボン研究の中心的研究チームとして北海～バルト海を中心に成果を上げている。 <p>【地中海】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●イタリア・フランス・スペインでは日本と同様に温暖化による藻場減少(磯焼け)が顕在化するようになり、その対策に向けた藻場と植食性魚類の基礎研究が増加傾向。
	応用研究・開発	○	↗	<p>【北海～バルト海】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●Blue Carbon Initiativeにおいて、英国・オランダ・ベルギー・スウェーデン・フィンランド・フランス・ドイツ・デンマークなどからなるKrause-Jensen博士らの研究チームが中心となり、海藻類をIPCC湿地ガイドラインへ加入させる動きを展開中。 ●バイオ燃料としての利用に向けたブルーエコノミー関連研究を開始。
中国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●2018年に中国国家海洋局が協働への意思を示し、Blue Carbon Initiative会議を誘致。 ●中国国内のブルーカーボン生態系の評価、例えば中国の全沿岸の海底土壌中のブルーカーボン分布を調査。
	応用研究・開発	—	→	<ul style="list-style-type: none"> ●特段の情報なし。
韓国	基礎研究	—	→	<ul style="list-style-type: none"> ●特段の情報なし。しかし沿岸の海藻類の分布調査をBlue carbon研究と位置付けていたり、水産業の観点から海藻養殖は盛んであり磯焼け対策なども成功例が多いとの情報がある。
	応用研究・開発	—	→	<ul style="list-style-type: none"> ●特段の情報なし。
その他の国・地域	基礎研究	○	→	<p>【豪州】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ブルーカーボンをNDCの対象にすべく、各大学研究機関(特に西オーストラリア大、エディスコーワン大)がBlue Carbon Initiativeと協働で様々な基礎研究を実施。 <p>【インドネシア】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●欧米の研究者の多くが東南アジアに入り、研究を実施。

	応用研究・開発	○	↗	【豪州】 ●ブルーカーボンをNDCの対象とし算定を開始。 【インドネシア】 ●プラスチックに代わる海藻由来の包装紙など、バイオマス利用が民間主体で始まっている。
--	---------	---	---	---

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・気候変動観測（環境・エネ分野 2.2.1）
- ・気候変動予測（環境・エネ分野 2.2.2）
- ・生態系・生物多様性の観測・評価・予測（環境・エネ分野 2.2.8）
- ・社会-生態システムの評価・予測（環境・エネ分野 2.2.9）
- ・植物・農業（ライフ・臨床医学分野 2.2.4）
- ・水産（ライフ・臨床医学分野 2.2.6）
- ・畜産（ライフ・臨床医学分野 2.2.7）
- ・林業（ライフ・臨床医学分野 2.2.8）

参考・引用文献

- 1) O. Hoegh-Guldberg et al., “The ocean as a solution to climate change : five opportunities for action”, High Level Panel for a Sustainable Ocean Economy, http://oceanpanel.org/sites/default/files/2019-10/HLP_Report_Ocean_Solution_Climate_Change_final.pdf (2021年1月18日アクセス)
- 2) T. Hiraishi et al. (eds.) , “2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories : Wetlands”, IPCC, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/Wetlands_Supplement_Entire_Report.pdf (2021年1月18日アクセス)
- 3) N. Brisson et al., “Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France”, *Field Crops Research* 119, no. 1 (2010) : 201-212, doi: 10.1016/j.fcr.2010.07.012
- 4) D. B. Lobell, W. Schlenker and J. Costa-Roberts, “Climate trends and global crop production since 1980” *Science* 333, no. 6042 (2011) : 616-620, doi : 10.1126/science.1204531
- 5) T. Iizumi et al., “Responses of crop yield growth to global temperature and socio-economic changes”, *Scientific Reports* 7 (2017) : 7800, doi : 10.1038/s41598-017-08214-4
- 6) 横沢正幸, 飯泉仁之直, 岡田将誌, 「気候変化がわが国におけるコメ収量変動に及ぼす影響の広域評価」『地球環境』14巻 (2009) : 199-206, <http://www.airies.or.jp/attach.php/6a6f75726e616c5f3>

1342d326a706e/save/0/0/14_2-10.pdf (2021年1月18日アクセス)

- 7) 農林水産省「平成22年度高温適応技術レポート」, https://www.maff.go.jp/j/pr/annual/pdf/h22_tekiou_gijyutu_report.pdf (2021年1月18日アクセス)
- 8) 吉田武郎 他, 「広域水田灌漑地区の用水配分, 管理モデルの実装による流域水循環のモデル化」『農業農村工学会論文集』277巻 (2012) : 9-19, <https://ci.nii.ac.jp/naid/130004555182> (2021年1月18日アクセス)
- 9) 工藤亮治 他, 「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』80巻1号 (2012) : 31-42, doi : 10.11408/jsidre.80.31
- 10) M. Kasai and T. Yamada, "Topographic effects on frequency-size distribution of landslides triggered by the Hokkaido Eastern Iburu Earthquake in 2018", *Earth, Planets and Space* 71 (2019) : 89, doi : 10.1186/s40623-019-1069-8
- 11) C. Kremen and A. M. Merenlender, "Landscapes that work for biodiversity and people", *Science* 362, no. 6412 (2018) : eaau6020, doi : 10.1126/science.aau6020
- 12) N. Seddon et al., "Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges", *Philosophical Transactions of the Royal Society Lond. B* 375, no. 1794 (2020) : 20190120, doi : 10.1098/rstb.2019.0120
- 13) N. Seddon et al., "Global recognition of the importance of nature-based solutions to the impacts of climate change", *Global Sustainability* 3 (2020) : 1-12, doi : 10.1017/sus.2020.8
- 14) A. Juergenliemk-Avagyan, N. L. Nyman and T. Wong, "National Adaptation Plans-An entry point for ecosystem-based adaptation", *FAO briefing note* (2020) : 1-12, <http://www.fao.org/3/ca9541en/ca9541en.pdf> (2021年1月18日アクセス)
- 15) H. Reid et al., Is ecosystem-based adaptation effective? Perceptions and lessons learned from 13 project sites, *IIED Research Report* (London : IIED, 2019) , <https://pubs.iied.org/17651IIED/> (2021年1月18日アクセス)
- 16) 堀 正和, 桑江朝比呂 編, 『ブルーカーボン-浅海におけるCO₂隔離・貯留とその活用』(東京: 地人書館, 2017) , <http://www.chijinshokan.co.jp/Books/ISBN978-4-8052-0909-7.htm> (2021年1月18日アクセス)
- 17) T. Kuwae and M. Hori, "The future of Blue carbon : addressing global environmental issues", In Kuwae T, Hori M (eds) *Blue carbon in shallow coastal ecosystems : carbon dynamics, policy and implementation* (Singapore : Springer, 2019) : 347-373, doi : 10.1007/978-981-13-1295-3_13
- 18) J. Fourqurean et al., "Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock", *Nature Geosci.* 5, no. 7 (2012) : 505-509, doi : 10.1038/ngeo1477
- 19) D. Krause-Jensen and C. Duarte, "Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration", *Nature Geosci.* 9, no. 10 (2010) : 737-742, doi : 10.1038/ngeo2790
- 20) A. Ortega et al., "Important contribution of macroalgae to oceanic carbon sequestration", *Nature Geosci.* 12, no. 9 (2019) : 748-754, doi : 10.1038/s41561-019-0421-8
- 21) The European Commission's science and knowledge service (EU SCIENCE HUB) , "2020 Blue Economy Report : blue sectors contribute to the recovery and pave way for EU green

- deal”, EU, <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/2020-blue-economy-report-blue-sectors-contribute-recovery-and-pave-way-eu-green-deal> (2021年1月18日アクセス) .
- 22) H. Nakano et al., “Quantitative trait loci for large sink capacity enhance rice grain yield under free-air CO₂ enrichment conditions”, *Scientific Reports* 7, no. 1 (2017) : 1-10, doi : 10.1038/s41598-017-01690-8
- 23) Y. Ishigooka et al., “Large-scale evaluation of the effects of adaptation to climate change by shifting transplanting date on rice production and quality in Japan”, *Journal of Agricultural Meteorology* 73, no. 4 (2017) : 156-173, doi : 10.2480/agrmet.D-16-00024
- 24) Y. Takaya et al., “Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 1 (JMA/MRI-CPS1) for operational sea-sonal forecasting”, *Clim. Dyn.* 48 (2017) : 313–333, doi : 10.1007/s00382-016-3076-9
- 25) R. Kudo, T. Yoshida and T. Masumoto, “Nationwide assessment of the impact of climate change on agricultural water resources in Japan using multiple emission scenarios in CMIP5”, *Hydrological Research Letters* 11, no. 1 (2017) : 31–36, doi : 10.3178/hrl.11.31
- 26) B. Fua et al., “A review of catchment-scale water quality and erosion models and a synthesis of future prospects”, *Environmental Modelling and Software* 114 (2019) : 75–97, doi : 10.1016/j.envsoft.2018.12.008
- 27) 津山幾太郎, 嶋瀬拓也, 石橋聡, 「トドマツ人工林伐採後の施行選択」『北の森だより』21巻 (2019) : 10-11, https://www.ffpri.affrc.go.jp/hkd/research/documents/kitanomori_vol21_hp.pdf (2021年1月18日アクセス)
- 28) 山村光司, 「地球温暖化が我が国の病害虫発生にもたらす影響：因果関係を調べる方法について」『植物防疫』74巻6号 (2020) : 338-342, http://www.jpapa.or.jp/shuppan/images-txt/2020/2020_0605.pdf (2021年1月18日アクセス)
- 29) J. L. Maino, P. A. Umina and A. A. Hoffman “Climate contributes to the evolution of pesticide resistance”, *Global Ecology and Biogeography* 27, no. 2 (2018) : 223-232, doi : 10.1111/geb.12692
- 30) F. Chidawanyika, P. Mudavanhu and C. Nyamukondiwa, “Global Climate Change as a Driver of Bottom-Up and Top-Down Factors in Agricultural Landscapes and the Fate of Host-Parasitoid Interactions”, *Frontiers in Ecology and Evolution* 7 (2019) : 80, doi : 10.3389/fevo.2019.00080
- 31) K. Watanabe et al., “Macroalgal metabolism and lateral carbon flows can create significant carbon sinks”, *Biogeosciences* 17, no. 9 (2020) : 2425-2440, doi : 10.5194/bg-17-2425-2020
- 32) 農林水産技術会議 脱炭素・環境対応プロジェクト「農林水産分野における炭素吸収源対策技術の開発, ブルーカーボンの評価手法及び効率的藻場形成・拡大技術の開発 (R2～R6)」『農林水産省』, <https://www.affrc.maff.go.jp/docs/project/seika/2020/attach/pdf/seika2020-2.pdf> (2021年1月18日アクセス)