

2.20 生物多様性・生態系の把握

（1）研究開発領域の定義

生物多様性や生態系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、予測するための科学的知見の集積、技術の開発、手法の開発等を行う領域である。

ここでは、陸域、陸水域、海域を中心に、観測のための各種技術（例えば追跡技術としてロガー・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、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）、及び生物多様性や生態系の形成・維持機構の解明や将来予測を目的としたモデル開発（機構的・統計学的）等を対象とする。気候変動による影響の予測と評価も含む。

（2）キーワード

生物多様性、生態系機能、生態系サービス、社会生態システム、大規模化、自動化、計測技術、分布推定、意思決定、自然再生、不確実性、環境変動、気候変動

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

生物多様性や生態系に関する研究開発は、野生生物や自然環境の保護の観点だけではなく、生態系の仕組みの理解、及びその安定性や多様性が維持される要因の解明を目的とする。その結果、学術的理解を深めるだけではなく、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。しかし、多様で複雑な生態系の理解は未だ限定的であり、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。技術躍進は目覚ましく、情報技術、センシング技術、遺伝情報の解析技術、機械学習を用いた解析や各種統計モデル、生物や物理プロセスを網羅したモデル等、様々な技術的解決によって応用の方向性を強化した研究の推進が可能になりつつある。更に近年は、食料や水、気候の安定化、文化、景観等、生物多様性を基盤として人間が享受する機能（サービス）が再認識され、それらの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。

社会的には、2010 年の生物多様性条約第 10 回締約国会合（CBD・COP10）で採択された 2020 年までの世界的な目標「愛知目標（愛知ターゲット）」や、SDGs の目標 14（海洋と海洋資源の保全、持続可能な利用）と目標 15（陸上生態系の保護、回復および持続可能な利用等）等の各種目標が国連と関連組織によって示され、これらに対応するプロジェクト研究の推進が求められている。また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、あるいは越境汚染などに関する外交や国家間交渉においては、生物多様性に関する科学的知見が重要な要素ともなっている。パリ協定に関連した気候変動・温暖化適応に関しても研究開発の実施が求められている。国内では 2015 年 8 月の「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）において生態系・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 1 月に閣議決定された第 5 期科学技術基本計画においても人間社会の存立基盤をもたらす自然資本としての生物多様性と生態系が強調されている。

[研究開発の動向]

● 生態系観測に関する国際的な枠組み

近年の生態系観測に関する国際的な流れは 1986 年の国際科学会議で決定した「地球圏・生物圏国際共同研究計画（IGBP）」に始まる。その後、1992 年の「地球サミット」で「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）」が提起されたことで IGBP に基づく一連の活動は UNFCCC に関連した「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」、「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）」に統合され、現在は「フューチャーアース」に継承されている。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・検出し、持続可能な社会の発展に寄与することを目的とした「地球観測に関する政府間会合（GEO）」が発足している。2012 年には CBD などの関連条約を受けて「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）」が形成され、生態系や生物多様性の現状や将来に関する動向が議論されている。

● 国際的な研究プログラム

1993 年に設立された長期生態系観測ネットワークである「国際長期生態学研究ネットワーク（ILTER）」には 44 ヶ国、700 サイト以上が登録しており、それぞれ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い、その共有を図ることで大陸規模あるいは地球規模の研究課題への取組みを促進している。その他にも生物多様性に関するデータ収集と全世界的な利用を目的とする国際プロジェクト「地球規模生物多様性情報機構（GBIF）」（2001 年発足）や「海洋生物のセンサス（CoML）」（2000～2010 年）等を通じて実際の観測データに基づく生物多様性の位置情報や空間情報のデータ収集・公開が行われるようになった。海洋では、これまでに蓄積された世界の博物館標本情報や海洋生態系を構成する各種生物の観測情報を全球規模で集約することにより、過去 100 年超の期間の海洋生物の動態をモニターする「海洋生物地理情報システム（OBIS）」（2000～2010 年）も構築された。なお OBIS プロジェクトは CoML の下で実施されていたが、2010 年の CoML 計画終了に伴って「国際海洋データ情報交換システム（IODE）」に統合された。

● 遺伝子レベルの観測

種や個体群、群集レベルの観測が進んでいるだけでなく、生物に関する Web 上の百科事典である「Encyclopedia of Life（EoL）」や、DNA 塩基配列から生物種を調べる系統学的な手法である DNA バーコーディング技術のためのライブラリを構築する「International Barcode of Life Project（iBOL）」等の蓄積が進んでおり、相互に関連しながら巨大なデータ基盤を構築している。その他にも近年のゲノム科学の進展を背景に、生物間の相互作用や環境変化の影響の把握や、環境 DNA による効率的な生物種の生息状況の把握なども急速に進められている。

● リモートセンシング技術との融合

生態系レベルの広範な時空間スケールを横断する観測にはリモートセンシングが有用な技術であり、近年特にフィールドでの生態系・生物多様性の研究とリモートセンシングの融合が促進されている。2008年に「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ている。2009年には日本がイニシアチブをとる研究ネットワーク「DIWPA（Diversity in the Western Pacific and Asia）」を基礎に「アジア太平洋生物多様性観測ネットワーク（AP-BON）」が発足し、生物多様性に関する生物学的調査が進められるとともに、いち早くリモートセンシング観測の利用に向けた提案がなされた¹⁾。

● 衛星データ活用

地球環境に関する衛星観測データの無償公開が近年急速に進み、地域スケールから全球スケールまでの生態系の変化の把握に貢献しつつある。例えば2013年のランドサット衛星（1972年より運用）のデータ無料公開を受け、森林の変化等の全球レベルでの定量的評価が進められている。可視・赤外域の放射計測ではMODISが運用されている。Google Earth Engine等のクラウド上で一括で解析するツールも出現している。これにより例えば季節ごとの正規化植生指数（NDVI）を全球一括で毎年計算することも可能となっている。

● その他の観測技術

局所的な観測にはドローンなどのUnmanned Aerial Vehicle（UAV）の活用も進められている。水中の生物多様性の把握にはRemotely Operated Vehicle（ROV）や音響を使った観測技術も活用されている。生物のバイオ・トラッキング技術も進展しており、様々なロガーが開発され、個体群動態の追跡に利用されている。

● モデル開発

生物多様性・生態系の評価のためのモデル開発では、GBIFなどの生物分布情報と環境データを用い、機械学習等により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」の進展が注目されている。数多くのモデルが存在するが、主要なモデルとしてはMaxEntやBiomod2、Random Forestが挙げられる。またこれらとは別に、海洋においては海洋生態系モデルが多数存在する。例えばオーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）によるAtlantis等が知られる。

● 生態系サービス研究

生態系サービスの統合的な評価は「ミレニアム生態系評価（MA）」、「生態系と生物多様性の経済学（TEEB）」、「生態系価値評価パートナーシップ（WAVES）」、IPBES等での様々な国際プロジェクトにおいて行われてきた。国や自治体、民間企業、研究機関においても同様の評価が実施されており、国・地域規模から全球・大陸規模までの現状評価および将来予測が幅広く報告されている。

● 国内動向

遺伝子情報の活用が進んでおり、2018年には環境DNAの普及に応じる形で環境DNA学会が発足した。またデータベースの整理も急速に進んでいる。例えば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として「MicrobeDB.jp」がある。国立遺伝学研究所が管理するDNA塩基配列の配列データベース「DNA Data Bank of Japan (DDBJ)」ではデータが無料公開されている。

より一般的なデータ整備関連動向としては、日本生態学会のEcological ResearchでData Paperというデータの提供と公開に特化した学術論文のセクションが追加されたことが挙げられる。国際的な情報蓄積・集約の取り組みであるGBIF、OBIS、GEO-BON、ILTER、iBOLに応じる形で、それぞれに対応する日本ノードも設立されている（JBIF、BISMaL、J-BON、JaILTER、JBOLI）。

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等）の開発が進み、観測だけではなく予測の分野でも応用されつつある。また、状態空間モデルを含む階層ベイズモデル等の確率分布や非線形性、不確実性を高度に取り入れた統計方法の利用も進みつつある。

生態系サービスに関する行政ニーズの高まりに反し、生態系サービスの定量的評価や広域的評価の研究は停滞気味である。最近の動きとしては生物多様性と生態系サービスの状況と傾向、それらが人間の福利にもたらす効果の評価が2014年から2015年にかけて行われ、2016年に「生物多様性及び生態系サービスの総合評価報告書」（環境省 生物多様性及び生態系サービスの総合評価に関する検討会）として公表された事例が挙げられる。海外では仮想的市場評価法（CVM）等を用いた経済学的アプローチや、米・スタンフォード大学を中心とした自然資本プロジェクト（Natural Capital Project）が提供するInVESTの活用事例等が散見されるものの、国内での評価研究の事例は少ない。なおこの生態系サービスの現状評価や将来予測のモデリングについては方法論が確立されていない点が国際的にも大きな課題として認識されている。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

● 環境DNAの活用拡大

環境DNAを活用した生物分布情報の収集に関する研究が急増した。メタバーコーディング解析も更に普及し、微生物群集の定量化がさらに容易となっている。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。

● 生物の生態特性に関するデータベースの整備進展

機能形質データベースの整備と利用が植物を中心に進んでいる。近年は節足動物やサンゴ、その他の海生生物等、他の分類群にも拡充しつつある。

● 生物多様性・生態系の機能的側面の解明

生物多様性と生態系機能の関係性について、植物群集だけでなく、バクテリアや魚類などの分類群の群集についても理解が深まりつつある。例えば多様性が一次生産をどのよう

にして高めるのかといった基礎的理解だけでなく、数多の生態系機能への貢献も明らかになりつつある。これにより、植物に加えて微生物や動物群集に関しても生物多様性—多機能性の関係性が明らかになりつつある。また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値も評価され始めている。

生態系どうしの繋がりや生息場所の繋がりといった景観や空間的な要素が生態系や生物多様性の維持において重要であることも認識されつつある。森と川・海、島と海、集水域と湖沼等、従来独立に捉えられてきた各生態系が相互の生態系内の生物多様性を支える上で重要であることが示されつつあり、理論だけでなく、実証的な研究や市民を巻き込んだ取り組みも進められている。

生物多様性と生態系の安定性に関する理解も深まりつつある。特に気候変動等の環境変動下でどのように生物多様性がバッファとなり生態系の頑健性を担保し得るのかという課題に注目が集まっている²⁾。

● フィールドセンシング、リモートセンシング技術の発達

地球環境変動の衛星観測ミッションが展開されており、高頻度、高解像度、多バンドの衛星リモートセンシングが計画されている。2017年には気候変動観測衛星「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)は大気中の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を観測している研究プロジェクト(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とデータ統合、取得情報の高度化・高品質化の検討が進められている。

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様々な生物と環境に関する局所スケールでのトラッキングやデータロギングが進展している。今後、従来困難であった小型動物や海洋生物についての行動データ、植物や陸上植生の季節性(フェノロジー)の年変動や地理的分布に関する画像データ、生物・非生物を問わず長期の連続観測データ、移動や分布データの収集が進むと期待されている。海洋に関しては魚群探知機をはじめとする音響モニタリングの普及が著しい。

局所リモートセンシング技術では無人機(UAV)に代表されるように従来の衛星や航空機よりも小型かつ自律的なプラットフォームが急速に普及している。Structure from Motion(SfM)による画像の結合技術をはじめとするデータ解析技術も急速に普及している。海洋分野においても技術的にはUAVに相当する無人探査機(AUV)、無人洋上機(ASV)は存在し、海洋保護区でのモニタリングに活用するなどの検討が進められている。2017年頃から中国をはじめとするドローン系の企業による安価なROVが水中ドローンとして販売され始めた。水中での観測は音響技術の蓄積があり、音響データ合成開口技術、地層データの自動合成などが試みられている。

● クラウド上の解析ツールの充実

画像解析をはじめとしてクラウド上での解析ツールが充実してきている。特にリモートセンシングではドローンの画像の結合をオンライン上で行うツールが普及している他、衛星画像の活用についてもGoogle Earth Engine上にランドサット等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ようになっている。生物の分類にはまだ使えないものの、画像認識についても既に Google や Microsoft のクラウドでラベル化された情報を抽出できるようになっている。ただし、こうした民間のクラウド上の解析は、その便利さの反面、提供企業に偏った情報集積を招く懸念もあると考えられている。

- 高度な解析手法の開発

状態空間モデル等のベイズ統計、機械学習や深層学習、Empirical Dynamic Modelling (EDM) による因果関係推定法等が注目されている。R ソフトウェアの諸々のパッケージ導入により、各手法が容易に利用できるようになっている。EDM は R パッケージが 2016 年に公開された。

環境閾値（臨界点）の予測に関しては理論研究や微生物を用いた単純な系の実験だけでなく、リモートセンシング画像を用いた大陸スケールでの解析なども進みつつある³⁾。

- 生態系サービス評価モデル

主な生態系サービス評価手法としては、モデル、実地調査、統計情報、アンケートが挙げられる。これらのうち生態系サービス評価モデルについて精力的な研究・開発が行われている。気温や降水量などの環境情報と植生図などの生物情報を初期条件として入力することで、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 等）。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。具体的には、生態系サービスのホットスポットの特定や生物多様性保全優先区との重ね合わせ、生態系サービス間のトレードオフの検証等である。

- 生物多様性保全に関する経済的評価

生物多様性保全に関して、機会費用を含むさまざまな費用の算出が進んでいる。2017 年には、保全費用を払っている国や地域ほど生物多様性保全が効果的に進んでいることが示された⁴⁾。生物多様性に要する経済的支出だけではなく、生物多様性保全により生まれる経済的価値についても評価が始まっている。自然資本連合（Natural Capital Coalition）は、企業の意思決定に対し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。2016 年に自然資本プロトコルの初版が公開されており、自然資本への直接的・間接的影響や依存度を特定・計測・価値評価するための手順が示されている。

- 市民科学への注目

市民科学がさらに注目され重視されている⁵⁾。他分野では情報メディアの利用の一環としてユーザにそれほど意識させずに情報を収集活用している事例もある。特にゲーミフィケーションや依存性等の心理的手法は注目されており、環境情報収集のための社会実装技術の 1 つのアプローチとして研究対象と捉えられている。例えば屋外で見つけた花や動物の名前を教えてくれたりその情報を共有したりすることができるアプリである「iNaturalist」は、市民科学のプロジェクトであり、かつナチュラリスト、市民、そして

研究者を対象としたソーシャルネットワーキングサービス（SNS）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、地図上に残すこと等を目指しているという。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

<海外のプロジェクト>

● 長期・広域の観測に基づく生物多様性の評価と予測に関する国際的な研究枠組み

近年最も成果を上げつつあるデータベースとして「PREDICTS」⁶⁾と「BIOTIME」⁷⁾がある。PREDICTSは、英国の大学等研究機関が中心となり、世界中から陸域の生物多様性の分布情報を集約しており、それらビッグデータに基づく統合研究を目指している。2018年7月現在、38,000種以上を含む250万件以上の生物多様性情報が記載されている。PREDICTSの主要な成果としては土地改変が陸域の生物多様性に与える影響評価や、それを基にした臨界点（閾値）の評価研究等がある。

BIOTIMEは、英国・セントアンドリュース大学のグループが牽引する国際プロジェクトであり、生物多様性の時系列変化の実データを収集している。主要な成果としては、世界中の陸域・海域の生物群集を対象に、種数と種構成の時間変化を定量化した研究や、熱帯の淡水群集を対象にした種構成の時間変化の定量化等がある。

● 実証研究や実験研究のデータ統合や理論研究の統合のための研究スキーム

米・National Center for Ecological Analysis and Synthesis (NCEAS) や独・German Centre for Integrative Biodiversity Research (iDiv) では、世界中の実証研究や実験研究のデータの統合、理論研究等の統合のためのワークショップを頻繁に開催している。世界中からの参加者の旅費を開催者側が負担する代わりに、統合研究としてNatureやScienceなどの影響力が大きい学術雑誌に結果を公表するといった仕組みが出来上がっている。

またドイツでは「Biodiversity Exploratories」と呼ばれる、土地改変が生物多様性と生態系サービスに与える影響評価のための大型研究プロジェクトが進行している。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。250名以上の研究者やスタッフが関わっており、個別に50以上のプロジェクトが進行している。土地改変が生物相の均質化をもたらすことや栄養段階の異なる生物群集の多様性が生態系の多機能性を支えること等、近年多数の成果を公表している。

● 生物多様性と生態系機能の関係性に関する研究プロジェクト

従来知られているものとしては米・ミネソタ州のシーダークリーク実験区における草本群集の操作実験がある。当該実験区のLTERサイトとしての研究資金は、例えば2013～2018年の5年間で得た資金のうちの一つは612.6万USドル（約7億円）だった（このときのPIは5名）。

近年では木本（樹木）群集の操作実験も行われ始めている。草原とは異なり、操作的に森林を作ることは労力も予算も要する。「IDENT」と呼ばれるプロジェクトでは、北米（米、加）と欧州（独、伊）の各地に同一の樹種の組み合わせで（北米及び欧州の在来樹種を双

方に植栽）1,640 箇所の樹木多様性試験地を設けている。実験はまだ初期段階だが、既に樹木多様性と生態系機能の関係性に関する成果が公表されている⁸⁾。

その他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くのプロジェクトが進行している。15 カ国 24 機関の参画により、「FunDivEurope」と呼ばれる大型フィールド観測が 2010 年から実施され、多くの成果を公表している。FunDivEurope では、森林樹木群集の各国インベントリと複数の実験を組み合わせることで、草本群集を対象とした実験と同様なスキームを生み出している。また主に欧州の予算により「BEF-China」と呼ばれる大規模な樹木多様性の操作試験が中国で行われている。

気候変動などの環境変動下において、どのように生物多様性がバッファとなり、生態系の頑健性を担保し得るのかという課題に注目が集まっている。これに対し、コロラド州立大学等が中心となった「Drought Net」では、統一プロトコルに基づく野外の降水量操作実験を世界中で行っている。同様に、ミネソタ大学が中心となった窒素負荷の影響に関する野外試験も世界中で実施されている（「Nutrient Network」）⁹⁾。Nutrient Network は既に多数の成果を公表している。これらの成果には、植物多様性と生産性との関係性の評価や植物多様性と多機能性の関係性等がある。

● プラネタリーバウンダリーズ

一部には定量性に欠けるとの指摘もあるが、一般的にはストックホルム・レジリアンスセンターを中心とする地球システムの臨界点を探るプラネタリーバウンダリーズの枠組みが引き続き重視されている。2018 年には、地球が温暖化領域に入り込み抜け出せなくなるという「Hothouse earth」という仮説が新たに提唱された。

生態系変動についての理論研究と実証研究を連動させたレジームシフトや臨界点（閾値）の予測に関する研究が精力的に展開されている。研究を先導してきたオランダの研究グループは、理論からリモートセンシングでの実証まで幅広く研究を展開している。また海域を対象とした検証も進んでおり、「Ocean Tipping Points」というプロジェクトが進行している。

● 海洋生物資源の把握

米・ワシントン大学が中心となり作成管理をしている「RAM Legacy Stock Assessment Database」が一般に公開されている。このデータベースにより、世界の海洋生物の状態をより良く把握することが可能になると期待されている。加・ブリティッシュコロンビア大学も、世界の海洋生物資源の基礎情報に関するデータベースを公開している。なお同大学では、日本財団による 9 年間で約 15 億円の拠出により、「ネレウス（NF - UBC Nereus Program）」と呼ばれる国際ネットワークが 2011 年より構築されている。The Link Between People And The Sea の標語の下、海洋資源について科学的知見と政策的視点を広く共有し、研究者と利害関係者による新たな国際海洋ネットワークの構築を推進している。

● 生態系観測

米・航空宇宙局とメリーランド大学は生態系観測のミッション（GEDI）を推進している。

宇宙から地球にレーザーを照射し、レーザーが森林の表面で反射して戻ってくる時間と、その一部が林冠を透過して地面で反射して戻ってくる時間の差から、森林の高さを計測し、森林炭素蓄積の推定精度を向上させることを目的としている（レーザー測量、LiDAR）。また、日本の JAXA では国際宇宙ステーション・日本実験棟「きぼう」に搭載する地球観測 LiDAR の開発（MOLI ミッション）に取り組んでおり、2021 年頃の打ち上げを目指している。

米・生態観測ネットワーク（NEON）が 10 年間で 4.3 億ドル（約 500 億円）という予算規模で 2012 年に開始している。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で収集され公開されるとしている。しかし当初は 2017 年頃に本格稼働予定であったが、予算調達等の問題により遅延しており、2019 年の稼働を目指している。

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、国内外のユーザ研究者を対象に、既存実験施設の利用促進を進めている。例えば EU 圏内には水圏生物を対象に操作実験が行える海洋・湖沼の隔離水界施設が多数建設されているが、施設をネットワーク化し、「Aquacosm」プロジェクトとして一括した利用公募を行っている。全体の 2 割を EU 圏外の研究者の利用に定めることで、研究者間の機会公平と国際的な研究推進に貢献しようとしている。

<国内のプロジェクト>

● 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」（2016～2020 年度）においてアジア地域も視野に入れ、社会・生態システムの統合モデルを構築し、シナリオ分析に基づく複数の政策オプションを検討する研究が行われている。S14「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究」（2015～2019 年度）では気候変動への緩和と適応における生態系保全の重要性についての研究が進められている。

● CREST「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出」（2011～2018 年）

海洋の生物多様性および生態系を把握するための先進的な計測技術と将来予測に資するモデルの研究開発が行われている。

● 北極域研究推進プロジェクト（ArCS、2015～2019 年）

北極圏の陸海域の生態系を対象とした様々な観察が行われている。

(5) 科学技術的課題

● データ基盤の未整備

データキュレーションやデータ前処理の共通化、データの流通促進等による利用の効率化が課題として指摘されている。本領域のデータは種の存在、現存量、DNA 情報など多種多様だが、種同定の精度や現存量の測定精度等、基本的な品質管理は必ずしも十分とは言えない状況にある。データの流通や共通化、解析技術の共有等、データシェアの基盤

となるプラットフォームが他分野と比べて遅れている。データの取得や整理の自動化、あるいは種分布やゲノム情報等のビッグデータの収集・解析といった各種インフォマティクス技術の普及および技術者育成も社会的な期待やニーズの高まりに追いついていない。また既存の公開データベースでも、品質管理やインターフェースの不備によって利用が十分に進んでいないものや、日本語のみで整備されたデータベースがあり、国内外での利用を促進していくための取組みが必要とされている。

● 生物分布情報と DNA バーコーディング情報

膨大に蓄積されつつあるものの、研究を進展させていく上ではまだ十分とは言えない状況にある。特に DNA バーコーディング解析のための情報は取得の歴史が浅いため、DNA 情報をもとに既知の種を網羅するにはまだ遠い状況にあると言われる。特定のプライマーでは DNA バーコーディングが困難な分類群が多いこと、種同定のための情報が不足していること等により他分類群への拡張に課題がある。土壌圏の生物は国際レベルでの進捗も見られるが情報が多分に不足していると言われている。また種の存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量などをも把握できる技術へと昇華させることも課題と認識されている。更に生物の機能と関連する形質や DNA 情報に関しては、細菌など、ごく一部の分類群で進展が見られるものの、動植物に関しては全般的には大きく不足していると言われる。地域的には特に東南アジアやアフリカの情報が不足している。

[今後取り組むべき研究テーマ]

● ビッグデータの収集・解析

情報やデータの不確実さ、複雑系、非線形性への対応のための数理統計手法の開発。

● リモートセンシング

受動的あるいは能動的なリモートセンシングの計測技術などによる、生物多様性や生態系の状態を広域に推定する技術の一層の高度化。

● モニタリング

安定同位体や DNA 情報や画像解析技術等を組み合わせた新たなモニタリング技術の開発。これによ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を含めた網羅的な把握。

● モデル開発

環境変動に対する生物多様性と生態系機能の応答性を推定するための実測データに基づいたプロセスベースモデルの開発と利用の促進。

● 生物多様性の分布評価

種数以外の指標に基づく生物多様性の分布評価。GEO-BON の枠組みでは **Essential Biodiversity Variables** が提唱されているが、これら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、機能的多様性や系統的多様性といっ

た生物多様性形成プロセスや生態系機能の提供に関わる指標は必ずしも種数の傾向と一致しない等の課題が指摘されている。そのためこれら指標の時空間的分布に関してバイオームをまたいだ網羅的な把握が必要とされている。

● 社会－生態系システムの研究

自然資本としての生態系の生態学的かつ経済学的評価の実施。いくつかの生態系サービスの貨幣換算はすでに行われているが、システムとしての生態系そのものが社会的需要を踏まえてどれだけの経済価値を持つのかは定量的に評価されていない。特に資本としての自然がどれだけあるかだけではなく、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必要と考えられている。

生物多様性に加えて生態系サービスを考慮したホットスポットや保全優先地域の検出。従来の生態系サービス評価では生態系が供給しうるサービスの潜在値に焦点が当てられてきたが、最近では人間の福利等の考慮も必要と認識されている。しかし単一指標での評価は難しく、社会学・経済学的な要因も大きな影響を与える。そのため学際的なアプローチを用いた小規模スケールでの研究を促進させ、知見を蓄積させる必要があると考えられている。

気候、人口、土地利用、経済の将来シナリオを考慮した社会・生態システムの挙動に関する予測研究も重要視されている。特に気候変動や土地変化に対する生態系の非線形変化や閾値を考慮した上での環境変動に対する適応策の構築がより重要とされている。

様々な地域やサービスに応用可能な広範かつ一般化されたレディメイド型の生態系サービスモデルの開発が求められている。生態系サービス評価に対する行政ニーズは一層高まっているが、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利用されておらず、観測データを政策決定に利用できる透明性の高いモデルの構築が必要と考えられている。

（6）その他の課題

● 研究関連データの流通や共通化

環境影響評価や水産資源調査等の公的な取組みを通じて取得されたデータの有効活用が進んでいない。データのリポジトリ（一元的な保管場所）の作成やデータ公表の検討が望まれている。またデータ取得のための許認可等手続きや国外でのデータ収集のための事務手続きに広域研究ほど手間がかかり研究を始めるにあたってのハードルになっている。

データ公開や学術論文のオープンアクセス化といった国際動向に対応した支援システムの構築が急務となっている。現在、日本では研究者個人の研究資金に依存しており、研究費削減の中、オープンアクセスのオプションに予算使用を分配する余裕がなく、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公開が圧倒的に少ない状況となっている。

その他には公的資金に基づく研究で得られたデータの提供義務化、データ取得重複の回避、データ不足地域でのデータ収集等の戦略的なデータの取得、品質管理、データベース化、オープンデータの促進等が求められており、それらへの対応も課題となっている。

● 人材不足

新規人材の不足と限られた人材でのエフォート配分が深刻な課題となりつつある。研究者の流動化や研究資金のプロジェクト化によって情報交流の促進や目的の共有が図られた反面、根本的な原理等を追及する基礎実験や基礎研究、技術開発への取組みが低減しているとの指摘もある。また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が、日本では依然として分野間の垣根が高い。

● 長期的な観測インフラの維持困難

長期的視野をもったモニタリングやデータベースの継続的運用の多くが未だに研究者個人による資金調達に依存しており、それゆえプロジェクト終了のたびに財政的不安を抱えざるを得ない状況は早急に解決すべき課題となっている。

● 研究にかかるコスト

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、第一線の研究に必要な情報を得るためのコストがかかる点は従前と変わらず、研究実施にあたっての課題となっている。

● 社会との関わり

生態系サービスに対する様々な考え方や分類体系が提唱されてきたが、最近になって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がある¹⁰⁾。生態系サービスの定義に関する議論は現在でも続いているが、欧米の一部の研究者・グループのみで行われており、アジア諸国からの意見が期待されている。

国内施策（生態系管理、自然再生、災害対応等）への反映や、国際的なプレゼンスの維持あるいは国際的な枠組み（CBD、IPBES、GEOSS 等）への貢献を視野に入れた取組みが期待されている。気候変動対策をはじめとする各種施策とのトレードオフやシナジーの検討（再生可能エネルギー適地と多様性保全地域のバランス等）、民間企業や市民を巻き込んだ研究開発の実施や意識の醸成も必要とされている。

生物多様性に関しては IPBES によるグローバルアセスメント（2016 年より順次）、環境省による生物多様性及び生態系サービスの総合評価（2016 年、JBO2）、日本学術振興会・生態科学分科会による報告（2017 年、生態学の展望）など多数出ているものの、これらの知見を政策や新たな研究につなげる仕組みは構築されていない。豪・CSIRO では、2015 年から「NESP Biodiversity HUB」と呼ばれる環境と気候変動に関するコンソーシアムが運営されており、科学的知見を効率的に政策決定や資源管理に反映させることを目標としている。

(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	○	→	●個人レベルで実施される理論研究は以前より本分野の日本の強みとなっている。一方、大規模かつ広域なデータ統合に基づく実証研究は、それらをリードする欧米諸国に対してデータを提供するに留まり、イニシアティブは取れていない。 ●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り、生物分布データの蓄積が進む。一方、予算確保、適切なデータ取扱い体制の整備、人手確保等の問題から、在データ以外の形式の情報の収集や、過去の情報の電子化と公開、新規の情報収集は必ずしも十分に進んでいない。 ●広域のデータ収集・蓄積では衛星データによる環境モニタリングが以前から実施されており、最近は国土数値情報などの容易に使えるデータベースにも活用されるようになっている。
	応用研究・開発	○	→	●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。応用研究へのニーズの高まりを背景にして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。一方、国内外の政策に影響するような研究成果は限定的。
米国	基礎研究	◎	↗	●多様な研究が国際的な連携の下で行われており、多くのプロジェクトでイニシアティブを取っている。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。その中には長期間維持されている大規模野外操作試験も含まれる。 ●物質循環、種分布、生態系プロセスモデル、土地被覆モデルなど多くのモデル開発を行っている。 ●衛星観測研究もリードしている。
	応用研究・開発	◎	↗	●多様な研究が国際的な連携の下で行われており、多くのプロジェクトでイニシアティブを取っている。 ●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。
欧州	基礎研究	◎	↗	●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で行われており、多くのプロジェクトでイニシアティブを取っている。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。PREDCITS や BIOTIME のようなプロジェクトも英国主導である。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。
欧州	応用研究・開発	◎	↗	●多様な研究が国際的な連携の下で行われており、多くのプロジェクトでイニシアティブを取っている。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。GEO-BON や IPBES などの事務局もドイツにある。 ●資源管理関連では NGO からの働きかけも背景にして積極的に国際会議を開催し、その成果をとりまとめ、国際規格の作成や管理プログラムの検討等が実施されている。 ●研究者の層が厚く、基礎から応用まで多くの人材がそろっている。
中国	基礎研究	◎	↗	●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等の人材確保を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で安価に実施できる民間企業もあり、官民ともに生物多様性研究を推進する体制が充実化している。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、国際競争力を高めている傾向も強まっている。
	応用研究・開発	○	↗	●多様な研究が国際的な連携の下で行われている。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	△	→	●情報が限定的だが K-BON が日本の J-BON とともにアジア太平洋地域の生物多様性観測ネットワーク（BON）を構成している。海洋分野では生物多様性の研究センターである「National Marine Biodiversity Institute of Korea (MABIK)」がある。また北西太平洋地域海行動計画（NOWPAP）や北太平洋海洋科学機構（PICES）等において取り組みを進めている。
	応用研究・開発	△	→	●情報が限定的だが渡り鳥については East Asian – Australasian Flyway Partnership (EAAFP) の事務局を設置するなど以前から一部の地域と分野で積極的。しかし研究や他の生態系調査とのシナジーについては不明。 ●2013 年に National Institute of Ecology が設立され基礎生態研究と生態系の問題解決のための生態系情報の提供を行っている。
豪州	基礎研究	◎	↗	●海洋生態系に関する分野ではデータ収集、データベース作成、データ解析、保全への応用のいずれにおいても精力的に活動する研究グループがある。陸域生態系に関する分野でも着実に成果が公表されている。研究者は欧米の高インパクト誌に着実に成果を公表している。
	応用研究・開発	◎	↗	●保全の管理手法に関する研究、温暖化による予測評価に関する研究、生物多様性の評価に関する研究、海洋のリモートセンシング技術に関する研究など、大学ごとに特色のある研究が大型予算を使って進められている。欧米には日本以上に遠路にも関わらず、世界各地の学会でのセッションの設定やワークショップの開催などを積極的に行う様子も見られている。 ●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	○	→	●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最も精力的に展開している。
	応用研究・開発	◎	→	●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。 ●ネレウスのようなデータベースと人的ネットワーク構築などを踏まえ枠組みを推進している。

（註1）「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

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

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

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）参考・引用文献

- 1) H. Muraoka *et al.*, "Linking Remote Sensing and In Situ Ecosystem/Biodiversity Observations by "Satellite Ecology" ." *The Biodiversity Observation Network in the Asia-Pacific Region Ecological Research Monographs*, 277-308, 2012.
- 2) F. Isbell *et al.*, "Biodiversity Increases the Resistance of Ecosystem Productivity to Climate Extremes," *Nature* 526, no.7574: 574-577, 2015.
- 3) J. Verbesselt *et al.*, "Remotely Sensed Resilience of Tropical Forests," *Nature Climate Change* 6, no.11: 1028-1031, 2016.
- 4) A. Waldron *et al.*, "Reductions in Global Biodiversity Loss Predicted from Conservation

- Spending," *Nature* 551, no.7680: 364-367, 2017.
- 5) R. Bonney *et al.*, "Next Steps for Citizen Science," *Science* 343, no.6178: 1436-1437, 2014.
 - 6) L.N. Hudson *et al.*, "The PREDICTS Database: A Global Database of How Local Terrestrial Biodiversity Responds to Human Impacts," *Ecology and Evolution* 4, no.24: 4701-4735, 2014.
 - 7) M. Dornelas *et al.*, "BioTIME: A Database of Biodiversity Time Series for the Anthropocene," *Global Ecology and Biogeography* 27, no.7: 760-786, 2018.
 - 8) L.J. Williams *et al.*, "Spatial Complementarity in Tree Crowns Explains Overyielding in Species Mixtures," *Nature Ecology & Evolution* 1, no.4: 0063, 2017.
 - 9) E.T. Borer *et al.*, "A Decade of Insights into Grassland Ecosystem Responses to Global Environmental Change," *Nature Ecology & Evolution* 1, no.5, 2017.
 - 10) U. Pascual *et al.*, "Valuing Nature' s Contributions to People: The IPBES Approach," *Current Opinion in Environmental Sustainability* 26-27: 7-16, 2017.

2.2.1 生物多様性・生態系の管理・活用

（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」の持続的な利用のため、複数の生態系サービス間の連関や人間社会と生物多様性・生態系との相互作用等、社会—生態系（social-ecological system）における生態系サービスの供給および需要の解明、またそれらに立脚した自然資本と生態系サービスの管理技術やガバナンスを発展させるための科学的知見の集積、技術の開発、手法の開発等を行う領域である。

ここでは、自然資本や生態系サービスの価値評価や、それらを活用した生物多様性や生態系の保全、持続可能な形での活用方策の検討、ならびに気候変動への適応や防災・減災への活用等に係る動向を対象とする。

（2）キーワード

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、社会—生態系、グリーンインフラ、生態系インフラ

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

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、様々な生態系サービス（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捉えられている。

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、SDGsにおいても生態系と生物多様性の保全・再生は目標に掲げられている。その他にも、生物多様性条約（CBD）における戦略計画 2011-2020、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が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）等において重要性が認識されている。

こうした社会的な認識の広がり一方で、「個々の生態系サービスの間の関連性」や「人間社会と生物多様性や生態系との相互作用」等、社会—生態系における生態系サービスの持続的供給と利用に関する科学的理解は未だ十分ではない。またこれらの科学的理解に立脚した生態系サービスの管理技術の開発やより良いガバナンスの探索も、国内外で掲げられた各種の目標を実現するのに十分でない状況にある。

[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。また各地でサブ・グローバル評価が実施され、日本でも「生物多様性総合評価報告書（JBO : Japan Biodiversity Outlook）」（2010年）がとりまとめられた。加えて日本では、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。

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は、2018年3月までに以下に示す複数の評価報告書を公表している：生物多様性及び生態系サービスのシナリオとモデルの方法論に関する評価報告書；花粉媒介者・花粉媒介及び食料生産に関するテーマ別評価報告書；土地劣化と再生に関するテーマ別評価報告書；生物多様性及び生態系サービスに関する地域・準地域別評価報告書（アジア・オセアニア、アフリカ、南北アメリカ、ヨーロッパ・中央アジアの世界4地域）¹⁾。また現在は地球規模の生物多様性及び生態系サービスに関する評価報告書が2019年公表に向けて作成中となっている。同様の時期に日本では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）」が公表されている（2016年）²⁾。これら一連の報告書では、総じて生物多様性が喪失し、生態系が劣化している状況が示されている。

生態系サービスや自然資本に関する研究は、過去15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関係分析（トレードオフやシナジー関係）等が可能になった他、土地利用・気候・他の影響要因の分析や、生態系や生態系サービスの空間モデリングも発展している。一方で、社会—生態系における複雑な相互作用やダイナミクス、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。

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。最近では人の健康や福利への生態系の影響を評価する研究が現れ始めている。調整サービスや文化的サービスに関する研究はまだ少ない。

生物多様性や生態系は、さまざま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、自然資本として認識されている。この自然資本の収支を計算するための研究が進んでおり、そのうち、「包括的な富（Inclusive Wealth）」では、自然資本を含むさまざまな資本の価値が評価されている³⁾。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する国際的な枠組みも検討が進みつつある。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⁴⁾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⁵⁾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未だ例外的であり、広く普及するには至っていない。

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）、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に複雑な相互作用やダイナミクスをもつ社会—生態系の理解は進んでおらず、関係する生態的要素と社会的要素のモニタリングも十分ではないと認識されている。その主な原因は、生態系機能が生態系サービスを生み出す空間スケールと、ガバナンスの空間スケールにずれがあることである。そのずれによって社会—生態系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に関する学際的研究が発展しつつある⁷⁾。

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。また最近では、自然の働きによっ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^{8) 9) 10) 11)}。NbSの複合的な効果を評価するのは挑戦的な試みだが、経済・文化・環境・生物多様性・生態系・気候変動を考慮にいれた研究が進んでいる¹²⁾。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¹³⁾、Horizon 2020にも反映されている。

生態系サービスや自然資本に関連した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などの国際的なイニシアチブに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ている。

（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トレードオフやシナジー分析、生態系サービスの駆動要因の理解と予測モデリング等において研究が進展している。生態系サービスの源泉となる生態系機能は、その生態系に存在する分類群・種・遺伝子型等によって決まるため、一つの種がもたらす生態系機能は限られている。よって

全ての生態系サービスを最大化するためには、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ことが必要であり、近年その理解が進みつつある。

森林伐採による生物多様性や炭素貯蔵量への影響について空間明示的なモデリングが可能になっている他、生物多様性・生態系の保全と、食料生産、水資源、温室効果ガス排出源、再生エネルギー等との関係を、土地利用と関係づけて分析し可視化する研究が行われている¹⁴⁾。

生態系サービスのうち文化的サービスについては評価が遅れているが、ソーシャルメディアの情報を用いることで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。また個々の生態系サービスの関連性（複数の生態系サービス間の相関）とその時空間ダイナミクスを評価することで、農業政策の影響や地域間の環境の違いの影響を解明しようとする検討がなされている¹⁵⁾。沿岸生態系における生態系サービスの管理において現状評価とシナリオ分析による予測評価もなされている。

生態系サービスとそれを生み出す自然資本の価値評価では、例えば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において経済学の資本理論に基づいた新しい手法も提案されている。また、複数種の相互作用がある状況での生態系管理を、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。

人間の福利の一面である健康に関して、生態系や生物多様性が、精神的な健康・アレルギー疾患・感染症に良い影響を及ぼすことが指摘されている。こうした生態系サービスと福利の関係については、社会の全体的な傾向と社会のマイノリティーにおける傾向では異なる点がある可能性（タブー・トレードオフ）が指摘されている。

また生態系サービスの価値評価が、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使われることが少ないことが課題として指摘されている。現在は生態系サービスに対する支払い制度（PES）の設計、環境の便益についての理解、政策決定の優先順位づけやトレードオフ分析等で主として用いられている。

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。例えばESG投資が挙げられるが、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¹⁶⁾。それに応えるものとして欧州ではNextGEOSS¹⁷⁾において生態系や生物多様性の観測がビジネスでも活用される仕組みが作られつつある。

生態系サービスと自然資本に関する政策や管理の効果評価についての研究も進められている。例えば生態系サービスに対する支払い制度（PES）の効果に関する研究では、経済的支援によって社会関係資本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、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。また、PESの科学的な正当性を担保するためのガイドラインも提案されている。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が報告されている。さらに、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が指摘されている。

- 用語変更

IPBES では、科学的な視点が比較的強い「生態系サービス」という用語ではなく、多様な価値観を包含する「NCP (Nature's Contributions to People)」に用語使用が変更されている^{18) 19)}。

- 社会—生態系の枠組みでの研究

生態系サービスと自然資本を社会—生態系の枠組みで理解する研究や、社会—生態系のガバナンスに関する研究が進展している。例えば、人間による管理と生態系がもたらす生態系サービスとの非線形なフィードバック関係によって森林と草地と農地のモザイク状の景観が維持されていることが示された研究報告がある。また、アルプスの社会—生態系において自然資源管理が成功している社会のサイズ（人口）が示された研究もある。生態系サービスの管理やそのための多様な関係者の協力のためには順応的ガバナンスが有効であることも示されている。

社会—生態系のダイナミクスに関する研究も進展しており、社会—生態系におけるレジームシフトや、社会—生態系における人間社会のロバストネスについて、数理モデルを用いて分析する研究等が行われている。

- 防災・減災への応用

気候変動への適応や自然災害からの防災・減災等に対して果たす生態系や生物多様性の役割の重要性が認識されている。例えば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）の重要性が IUCN や生物多様性条約事務局により指摘されている²⁰⁾。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）、ヨーロッパ委員会による自然を基盤とした解決策（NbS : Nature-based Solutions）の推進等がある。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 などの政策や事業から見られる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- 環境省環境研究総合推進費「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、東京大学、2016 年度～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が検討されている。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。環境研究総合推進費では、他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。

- フューチャー・アース

地球環境研究の国際研究プログラムの再編・統合がなされ、2015年からFuture Earth（フューチャー・アース）に関連づけた活動が始まっている。フューチャー・アースでは自然科学と人文・社会科学が強く連携することと、社会の多様なステークホルダーと共に行う超学際研究（transdisciplinary research）が重視されており、社会問題解決型の研究推進が行われている。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）が推進されている。

日本は5ヵ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イ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JST社会技術研究開発センターにおいてFuture Earth構想の推進事業の一環として2014年度から研究が実施されている。2018年度現在は、「貧困条件下の自然資源管理のための社会的弱者との協働によるトランスディシプリナリー研究」（代表：佐藤哲、愛媛大学）が本格研究として実施されている。2014～2016年度に実施された「フューチャー・アース：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」（代表：谷口真人、総合地球環境学研究所）では、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²¹⁾。

- ホライズン 2020 における自然を基盤とした解決策（NbS）に関する研究プログラム

EUでは、Horizon 2020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設定され、複数の研究プロジェクトが推進されている。NAIAD（NATure Insurance value: Assessment and Demonstration）プロジェクトでは、洪水や干ばつ等、水に関する災害に対しての社会的・経済的コストを抑制するため、生態系のもつ保険的価値を評価し社会実装することを目的とした共同研究が自治体や保険会社等により行われている。ThinkNature（Development of a multi-stakeholder dialogue platform and Think tank to promote innovation with Nature based solutions）プロジェクトでは、多様なステークホルダーが参加するプラットフォームを構築し、EU域や国際レベルだけでなく、地域や地方でのNbSの理解や促進を支援する研究が行なわれている。また、EKLIPSE（Establishing a European Knowledge and Learning Mechanism to Improve the Policy-Science-Society Interface on Biodiversity and Ecosystem Services）プロジェクトでは、生物多様性と生態系サービスに関する科学に基づくEU域の政策を支援する新しい仕組みを構築することを目指している。これらの他にも複数のプロジェクトが関連するテーマで推進されている。

- 米中連携による Natural Capital Project

米・スタンフォード大学が中心となり中国科学院や米・ミネソタ大学が連携して進めているNatural Capital Projectは、様々な社会的問題に対する自然を活用した解決策の実施に意思決定者と共同して取り組んでいる。実際の課題解決の過程において、既に新しいツールの開発や科学的知見が生まれている。特に、生態系サービスの地図化ツールであるInVESTは、世界的に利用されている。Natural Capital Projectの取組みは、世界各国

に広がっており、海洋沿岸域での気候変動に対する適応、生態系サービスに対する支払い制度（PES）の設計、森林生態系の再生への投資計画の策定、多国籍企業のサプライチェーンの影響評価など、多方面にわたっている。

- スtockホルム・レジリエンス・センターにおける超学際研究

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—生態系のレジリエンスや持続性科学に関して、幅広い学際的・超学際的な研究が実施されている。自然科学と人文・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—生態系に注目し、分野横断的なテーマとして、複雑適応系・人類世におけるパターン・スチュワードシップ・社会の転換の分野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

- 生態系サービスの評価

供給サービスや調整サービスの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。例えば生態系サービス評価の空間スケールを地域の政策決定や管理に合致するような詳細な水準とすることには技術的な課題が残っている。また、評価された生態系サービスの妥当性や確実性の検証は十分に進んでいない。供給サービスと調整サービスの評価手法には、さらなる高度化や精細化が求められている。文化的サービスは、評価手法そのものの開発が発展段階にあり、供給サービスや調整サービスに関する研究に比べて十分な評価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見られている。

個々の生態系サービスの間の関連性については時空間的に限られた範囲でのスナップショット的な分析は散見されるが、歴史性や広域的な対象、すなわち時空間ダイナミクスの研究はまだ少ない。そのため、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現状では難しいと見られている。

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、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ドライバー（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・モデルなどの数理モデルを用いた人間社会と生態系のフィードバック研究、などが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

近年目覚ましい発展が見られるものの、評価方法自体が発展途上である。生態系サービスと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。自然資本の勘定には、まだ反映されていない多くの自然資本があり、それらの抽出と主流化及び評価手法の開発が必要となっ

ている。

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、経済学的な分析だけでなく倫理的な分析が不足している。

- 人間の健康や福利

人間の健康や福利に与える生態系サービスとその効果については、一部の研究成果があるものの十分な評価が進んでいない現状であり、さらなる研究開発が求められている。

- 自然資本や生態系サービス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。また、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-生態系の理解は進んでおらず、効果評価に必要な社会-生態系の諸要素のモニタリングも十分ではない状況。そのため、管理や投資の指標開発も十分でない現状にある。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、更に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。

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研究により、よりよい管理やガバナンス、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管理、順応的協働管理、生態系スチュワードシップに関する学際的研究が必要とされ、その学術的発展は、社会-生態系の持続性に貢献すると期待されている。

(6) その他の課題

- 超学際研究に携わる人材の不足懸念と育成の必要性

生態系サービスと自然資本の活用と管理に関する研究は、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-生態系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、生態系サービスと自然資本の活用と管理に関する科学的基盤を知識生産する研究人材が現在不足しており、将来的にも人材不足が懸念されている²²⁾。

- 研究成果に対する評価基準の開発

社会-生態系の研究は学際的・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-生態系の研究に当てはめることには困難があると考えられている。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-生態系の研究の評価を担当できる評価人材も少なく、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という状況にある²²⁾。社会が求める社会-生態系の学際的・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

諸外国には社会-生態系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（例えば、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）。しかし、日本には、京都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-生態系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²²⁾。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	●環境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的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。 ●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-生態系の評価や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遅れている。
	応用研究・開発	○	→	●IPBESやIUCNなどの国際的なイニシアチブに研究者が参加し、国際的な取り組みに貢献している。 ●全国レベルでの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）として公表されている。しかし国際的発信は十分でない。 ●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研究体制は整備されていない。
米国	基礎研究	◎	↗	●生態系サービスや自然資本に係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	◎	→	●前政権では、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²³⁾が、その後継続していない。 ●「デザインによる復興（Rebuild by Design）」による先進的な取り組みとして、生態系のレジリエンスを活用した市街地のデザインなどを実践している。 ●長期観測データをもちいて、チェサピーク湾の水質浄化が進み、水草が再生することで生物多様性が再生しつつあることが報告されている。

欧州	基礎研究	◎	↑	●生態系サービスや自然資本に関する研究は世界的にトップ水準にあり、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おり、多くのプロジェクトが実施されている。その中には、気候変動にともなう自然災害への適応研究、多様なステークホルダーが参加し NbS の社会実装を進める研究、生物多様性と生態系サービスに関する科学と政策の連携研究など、学際的・超学際的研究が多く見られ、多くの研究成果が得られている。 ●EU 全域を合わせると、生態系サービスや自然資本に関する研究は、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。 ●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-生態系に関する研究を活発に行なっている。 ●スウェーデンのストックホルム・レジリエンス・センターでは、生態系サービスの管理や社会-生態系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	◎	↑	●NbS 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。 ●英国では全国スケールで生態系と生態系サービスの評価および影響要因の評価がなされている。
欧州	応用研究・開発	◎	↑	●英国では 2012 年に、自然資本委員会 (Natural Capital Committee) が経済問題委員会のもとに組織され、自然資本の勘定に関する年次報告書を公表している。後述の 25 Year Environmental Plan (今後 25 年間の環境計画) に対する提言なども行なっている。 ●英国では 2018 年に今後 25 年間に進める環境計画 (25 Year 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	○	↑	●生態系サービスの現状評価と地図化や、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、都市と地区生態国家重点実験室が設けられ、社会-生態系の研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	●初めての全国スケールでの生態系サービス評価が行われ、2000 年から 2010 年にかけて、保全政策の結果として生態系サービスが向上していること等が明らかにされている²⁴⁾。 ●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。 ●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^{25) 26)}。 ●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²⁷⁾。 ●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²⁸⁾。 ●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が、その効果は全体的にはポジティブであるものの、課題も残っていることが分析されている²⁹⁾。 ●森林生態系の再生などの取り組みが、二酸化炭素の吸収源の機能を向上させていることが明らかになっている³⁰⁾。 ●中国国内の保護区設定において、その効果が期待される分類群に偏りがあるほか、重要な調整サービスの保護への効果が十分でないことなどが明らかにされている²⁷⁾。
韓国	基礎研究	△	↑	●2013 年に国立生態学研究所が設立され、生態系サービスに関する研究も一部進んでいる。 ●生態系サービスや自然資本に関する研究は、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	△	→	●全国レベルでの生態系評価や生態系サービスの評価は、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レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

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

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

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）「トレンド」

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）参考・引用文献

- 1) M. Karki *et al.* (eds.), "Summary for policymakers of the regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Asia and the Pacific of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services," IPBES secretariat, 2018.
- 2) 環境省, 「生物多様性及び生態系サービスの総合評価報告書（JBO2: Japan Biodiversity Outlook 2）」, 2016.
- 3) S. Managi & P. Kumar, "Inclusive Wealth Report 2018: Measuring Progress Towards Sustainability," CRC Press, 2018.
- 4) A. Ruijs *et al.* "Natural Capital Accounting for the Sustainable Development Goals: Current and potential uses and steps forward," PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2018.
- 5) UN, EC, FAO, IMF, OECD and The World Bank, "System of Environmental-Economic Accounting 2012: Central Framework," 2014.
- 6) P.M. Kareiva *et al.*, "Improving Global Environmental Management with Standard Corporate Reporting," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, no.24: 7375-7382, 2015.
- 7) D. Armitage *et al.* (eds.), "Adaptive Co-Management: Collaboration, Learning, and Multi-Level Governance," UBC Press, 2010.
- 8) E. Cohen-Shacham *et al.* (eds.), "Nature-based Solutions to Address Global Societal Challenges," 2016.
- 9) European Commission, "Nature-Based Solutions,"
<https://ec.europa.eu/research/environment/index.cfm?pg=nbs> (2019年2月1日アクセス).
- 10) C. Nesshöver *et al.*, "The Science, Policy and Practice of Nature-based Solutions: An Interdisciplinary Perspective," *Science of The Total Environment* 579: 1215-1227, 2017.
- 11) WWAP (United Nations World Water Assessment Programme)/UN-Water, "The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water," UNESCO, 2018.
- 12) C.M. Raymond *et al.*, "A Framework for Assessing and Implementing the Co-benefits of Nature-based Solutions in Urban Areas," *Environmental Science & Policy* 77: 15-24, 2017.
- 13) Directorate-General for Research and Innovation, European Commission, "Nature-

- Based Solutions & Re-Naturing Cities," 2015.
- 14) L. Gao & B.A. Bryan, "Finding Pathways to National-scale Land-sector Sustainability," *Nature* 544, no.7649: 217-222, 2017.
 - 15) D. Renard *et al.*, "Historical Dynamics in Ecosystem Service Bundles," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, no.43: 13411-13416, 2015.
 - 16) C.J. Vörösmarty *et al.*, "Scientifically Assess Impacts of Sustainable Investments," *Science* 359, no.6375: 523-525, 2018.
 - 17) NextGEOSS: "The European Data Hub and Platform,"
<https://nextgeoss.eu> (2019年2月1日アクセス) .
 - 18) IPBES, "Report of the Plenary of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on the work of its fifth session," 2017.
 - 19) S. Díaz *et al.*, "Assessing Nature's Contributions to People," *Science* 359, no.6373: 270-272, 2018.
 - 20) A. Andrade Pérez *et al.* (eds.), "Building Resilience to Climate Change: Ecosystem-based adaptation and lessons from the field," IUCN, 2010.
 - 21) 人間文化研究機構 総合地球環境学研究所「フューチャー・アース構想の推進事業：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」,
<http://www.chikyu.ac.jp/activities/related/etc/fe.html> (2019年2月1日アクセス) .
 - 22) 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」, 2017.
 - 23) M. Schaefer *et al.*, "Nature as Capital: Advancing and Incorporating Ecosystem Services in United States Federal Policies and Programs: Table 1," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, no.24: 7383-7389, 2015.
 - 24) Z. Ouyang *et al.*, "Improvements in Ecosystem Services from Investments in Natural Capital," *Science* 352, no.6292: 1455-1459, 2016.
 - 25) Z. Liu & J. Lan, "The Sloping Land Conversion Program in China: Effect on the Livelihood Diversification of Rural Households," *World Development* 70: 147-161, 2015.
 - 26) J. Leshan *et al.*, "Sloping Lands Conversion Programme, People's Republic of China," IIED, 2017.
 - 27) W. Xu *et al.*, "Strengthening Protected Areas for Biodiversity and Ecosystem Services in China," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114, no.7: 1601-1606, 2017.
 - 28) Ministry of Ecology and Environment, China, "2017 State of the Ecology and Environment in China," 2018.
 - 29) B.A. Bryan *et al.*, "China's Response to a National Land-system Sustainability Emergency," *Nature* 559, no.7713: 193-204, 2018.
 - 30) F. Lu *et al.*, "Effects of National Ecological Restoration Projects on Carbon Sequestration in China from 2001 to 2010," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, no.16: 4039-4044, 2018.

2.2.2 環境分析・物質動態

（1）研究開発領域の定義

環境分析・物質動態に関する科学、技術、研究開発を記述する。

環境媒体（大気、水、底質、土壌、生物）における汚染物質や微量元素・同位体の分析、環境中の物質の動態把握等を行う領域である。

ここでは、エアロゾル（PM2.5 含む）や、微量分析、一斉・網羅分析、窒素・リン、同位体、ナノ物質・マイクロプラスチック等の計測技術、それらの採取、前処理、精度管理、インフォマティクス、モデル作成の他、環境中で形を変えて移動する物質の動態把握技術を対象とする。また毒性を把握するためのバイオアッセイや AOP、構造解析等のリスク評価技術も対象とする。

温室効果ガスの動態については研究開発領域「気候変動観測」や「気候変動予測」で取り扱う。

（2）キーワード

化学物質有害性評価、影響指向分析、分野横断・統合、ノンターゲットモニタリング、多情報解析、マイクロプラスチック、化学繊維、極微小状態・構造分析、個別粒子・成分分析、重元素安定同位体比分析、微量元素・多元素分析、分離・複合分析、核内受容体・CERAPP、バイオアッセイ、AOP、バイオ計測、人工知能

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

最近の環境汚染は人為的な原因によって発生する場合が多い。経済発展等に伴う爆発的な化学物質利用の拡大の一方で、これらの適正管理と人の健康や生態系への悪影響の未然防止が益々重要となっている。

大気汚染では、化石燃料などの燃焼に伴って発生する二酸化炭素は地球温暖化、燃焼粉塵（煤）、PM2.5、多環芳香族炭化水素（Polycyclic Aromatic Hydrocarbon: PAH）類¹⁾などは肺がんやぜん息、心不全などの疾病を誘発する。海洋汚染では、とりわけマイクロプラスチック（5 mm 以下の微小なプラスチック粒子）が国際的な問題になっている。農薬等による土壌や河川の汚染も依然問題である。汚染防止対策には汚染物質の測定、動態や毒性の解明に対応できる分析技術が基盤となる。

化学物質適正管理は、ばく露と毒性情報に基づくリスク評価が基本である。各種環境媒体中の化学物質（代謝物、分解物を含む）の分析と人や野生生物への毒性評価からリスクの高低を判断し、適切な管理を進める。人間活動に伴う化学物質の環境放出と環境動態の的確な把握も重要となる。分析による実態把握の一方、環境挙動を的確に表現し対策効果を予測可能なモデルの作成並びに発生源インベントリの整備も必要となる。化学物質は主に人間の社会経済活動（社会ドメイン）において使用され、環境中（環境ドメイン）に出た後は、物質循環の流れにのって拡散し、人を含む生物、生態系（生物ドメイン）に取り込まれて影響が顕在化する。社会ドメインにおいては、主要な環境放出過程の解明、排出量の把握と基準の遵守状況の評価、対策の効果の確認などの分析が必要である。環境ドメインでは、化学物質は光分解や酸化、生物代謝等をうけつつ、その化学的性質に応じて環境媒体間に分配され、大気や水の流れに乗って移動しながら食物網を通じて生物に取り込まれる。化学物質の環境動態モデルは、発生源インベントリとあわせて将来予測や対策立案等に利用される。生物ドメインでは人や生物への毒性評

価が課題となり、対象生物、評価軸や評価のエンドポイントの選定等が重要となる。化学物質と標的生体成分（受容体、酵素など）との相互作用の理解や構造活性相関に基づく毒性発現機構の解明、有害性発現経路（Adverse Outcome Pathway: AOP）の整備と毒性評価手法の作成等が行われる。毒性評価は、生物ドメインでの影響評価、社会ドメインでの新規化学物質の製造認可や管理の必要性の判断に不可欠で、高リスクと判断された物質の管理は主に社会ドメインで進められる。たとえばナノ物質は私たちの生活や産業に不可欠な物質となっている一方、小さいがゆえ有害性が発現される可能性が懸念されており、安全性評価に向けた計測技術開発が重要な課題である。

本領域はSDGsの3：人の健康、6：安全な水、13：気候変動、14：海の豊かさ、15：陸の豊かさ、の追及と達成に向けて重要な意義を持つ。

〔研究開発の動向〕

環境分析は、公害の原因物質の探索や、有害物質の排出規制、環境レベルの監視などを目的として行われてきた。化学物質利用の拡大に伴う規制項目、監視項目の増加に対応に加え、未規制物質への規制や監視を判断するため、様々な分析法が整備されてきた。急性毒性の評価と対策が進む一方、地球規模の汚染の拡大、低濃度長期ばく露影響等が懸念されるようになり、ダイオキシン類を含む残留性有機汚染物質（Persistent Organic Pollutants: POPs）や水銀など有害元素の分析・監視手法、環境動態モデルが開発され、ストックホルム条約や水俣条約などの国際的な規制の整備が進んだ。極微量分析技術に加え、最近は多種類の化学物質の同時監視や複合ばく露の実態把握を目的として、より包括的、網羅的な化学物質分析手法並びにデータ解析・情報抽出（インフォマティクス）手法の開発が進められている。

無機元素の物質動態研究は、生物の生存可能性を支えている地球システムの理解、地球の歴史の解明、および人類活動が将来の環境へ及ぼす影響の評価に欠かせない。研究を発展させる鍵は、新しい情報を与える分析技術である。重元素安定同位体比、微量元素化学量論、極微小領域情報という新しいパラメータの利用により、無機元素の物質動態の理解が深まっている。とくに重元素安定同位体の研究は、地球環境科学の一大潮流となっている²⁾。この発展は多重検出型誘導結合プラズマ質量分析法（Multiple Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: MC-ICP-MS）の普及が導いた。MC-ICP-MS以前の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が、MC-ICP-MSではほぼ全ての核種のイオン化と精密同位体比が測定可能となり、分析可能な元素が数10倍に増加した。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、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。濃度に加えて同位体比を測定すれば、同位体比についても質量保存式がたてられ、元素の動態をより詳細に調べられる。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が、多くの場合、主要成分が測定を妨害するので、目的成分の分離濃縮も必要となる。分離濃縮技術も顕著に進歩し、高選択的かつ簡便迅速となった結果、多くの微量元素のビッグデータ、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（Secondary Ion MS: SIMS）、LA-ICP-MS（レーザーアブレーションICP-MS、Laser Ablation: LA）などのより大型で先端的な装置が用いられる。この分野も、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が顕著に進歩し、ナノ粒子の分析、計

数も可能となっている。

粒子状物質については、東アジア地域の経済成長とともに、燃焼起源の PM2.5 等の大気微粒子の越境移動や健康影響研究が盛んになってきた。銀やシリコンなどのナノ物質の開発と製品利用も進み、人や水圏生態系への影響が関心を集めている。プラスチックごみやレジンペレットによる海洋汚染の実態解明や生態系への影響の研究が進み、意図して作られたマイクロプラスチックに加え、環境中で風化・細分化されて生成されたマイクロプラスチックによる汚染の進行も明らかとなった。マイクロプラスチックが海洋表層水中を漂い外洋の環流に集積すること³⁾、沿岸の堆積物中に存在し、それらが多毛類や蔓脚類に取り込まれ、生態系に侵入する可能性が報告された⁴⁾。吸着実験や観測から有害化学物質の海洋生態系での運び屋になることが示され、含有される有害化学物質が摂食した生物組織に移行することも明らかにされた⁵⁾。北極から南極にいたる全海洋表層に広がるばかりでなく、深海堆積物にいたる海洋底にも広がるということが明らかにされた。プラスチック廃棄物の海洋流入量が今後も爆発的に増加すると予想⁶⁾され、使い捨てプラスチックの削減対策が世界的に進められている。環境水中のマイクロプラスチックの計測は手作業中心で効率が悪く、採集に用いるふるいの粗さのため、正確な粒径情報が得られない課題がある。多くの場合、粗分離した環境試料を 350 μm のふるいにかけて、残った試料を目視と手作業で分類し、顕微鏡と画像解析ソフトで個数とサイズを測定し、フーリエ変換赤外分光光度法（Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR）により有機成分が同定されているが、これら全ての手順の飛躍的な改善が求められる。

大気環境基準に定められている汚染物質の中で、粒子状物質、特に PM2.5 の測定法には、①フィルタ法と②自動測定法：振動素子を用いるフィルタ振動法、 β 線吸収法、光散乱法がある。これらはいずれも粒子の大きさに基づく計測法である。PM2.5 が黄砂由来か燃焼粉塵（煤）由来か、また毒性本体の化学物質の同定・定量は重要である。捕集した PM に含まれる無機陽・陰イオン成分についてはイオンクロマトグラフィーや ICP-MS が用いられる。一方、PAH やニトロ多環芳香族炭化水素（Nitro-PAH、NPAH）は、発がん性や内分泌かく乱作用、活性酸素種産生作用などの毒性があるために、WHO や諸外国では既に環境基準や指針値が定められており、わが国でもその設定が急がれている。大気中の PAH や NPAH には高速液体クロマトグラフィー・蛍光検出法（High Performance Liquid Chromatography: HPLC）、HPLC・化学発光検出法、ガスクロマトグラフィー MS（Gas Chromatography: GC）などが用いられているが、PM 量の測定とはオフラインで別に分析しなくてはならない。一方、土壌、水、食品の有害化学物質の中で主要対象は農薬である。未規制を含む約 800 種類のポジティブリストの分析が必要で、多成分の同時分析が可能な GC-MS、LC-MS、HPLC などが用いられている。感度的に残留基準値の分析はほぼ満足できるが、広範な対象物質に対応できる前処理を含め、簡便・迅速な一斉分析法の確立が課題である。更に、有害化学物質は一般に環境中で酸化反応を受け、また微生物やヒト体内で代謝反応を受ける。PAH 代謝物の一つである PAH 水酸化体が元の PAH より強い毒性を持つ例もあり、毒性研究面では生成した毒性本体の同定と体内動態の追跡は、国際的にも殆ど手掛けられていない。

ナノ粒子の計測については、走査型電子顕微鏡、透過型電子顕微鏡（Transmission Electron Microscope: TEM）が、個別粒子の粒子径測定、および粒子の凝集状態の観察の有力な手法である。TEM の装置分解能は 0.01 nm オーダーに到達し⁷⁾、環境や生体試料への適用も期待される。細胞など湿潤した試料では、極低温で周囲の水を急速凍結させて観察する Cryo-

TEM が有効である。液中のナノ粒子の粒子径測定ではレーザー回折・散乱法の分解能が向上し、10 nm オーダーの粒子径分布を測定可能となった。1 nm オーダーの測定では動的光散乱 (Dynamic Light Scattering: DLS) が主流だが、散乱強度が低いと性能が低下する問題がある。この解決のため、ナノ粒子トラッキング解析や整調抵抗パルスセンシング法⁸⁾ が注目されている。超遠心沈降法と分光法の組み合わせ法は、遠心力により沈降した粒子をフラッシュ光照射による吸光度測定で 1 nm オーダーの粒子濃度を測定する方法で測定精度、分解能、再現性が DLS よりも良いことから、再び見直されている。単一粒子誘導結合プラズマ質量分析計 (Single Particle ICP-MS: sp-ICP-MS) では、導入された溶液中のナノ粒子はプラズマで原子化・イオン化し、通常の ICP-MS 測定より非常に短い時間 (0.1 ミリ秒) でナノ粒子含有元素を測定することで、最小 1 nm オーダーの粒子径の推定およびナノ粒子中の元素分析が可能になりつつある。

化学物質リスク管理において環境分析と並ぶもう一つの柱である毒性評価では、人への影響評価を動物実験で調べるため、急性／亜急性／慢性毒性、発がん性、神経／免疫／内分泌毒性、行動試験、次世代影響など、様々な試験法が開発された。さらに、生態系への影響評価を目指して、植物や無脊椎動物など各種生物に対する試験法の確立と応用も進められている。毒性発現機序に関する知見の集積を背景に、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) の開発も進められた。2007 年には、毒性物質との最初の相互作用から個体レベルの毒性発現にいたる Toxicity Pathway の解明と、これに沿った一連のバイオアッセイ系による、実験動物を使わない毒性試験法の確立が提唱された⁹⁾。さらに集団や生態系への影響の Pathway を加え、AOP として概念が整理されている¹⁰⁾。

バイオアッセイをはじめとするバイオ計測については、生体影響の原因物質である個別の物質の検出や同定に留まらず、これらの物質群の総合的な生体影響を一括して評価するのに有効である。多数の化学物質が日々生み出され、世界最大級の化学物質 DB の米国化学会 CAS Registry 登録数は 2015 年に 1 億種類を超えた¹¹⁾。これら化学物質の生態系やヒト健康への影響は、個々による影響評価だけでなく、複数の化学物質の複合影響も評価する必要がある。バイオ計測は、これらの生体影響を評価する強力な手段となる。バイオアッセイは、微生物や実験動物などを利用して、その応答性から、化学物質が生体に及ぼす影響を調査する方法である¹²⁾。例えば、(1) 生態系への影響評価では、いわゆる OECD 生体毒性試験 3 点セットの藻類・甲殻類・魚類が使用され、食物連鎖のピラミッドを擬似的に構築した生態系モデルにより評価する。(2) ヒト健康への影響評価では、特に単一化学物質の生理活性評価を目的として、マウスやラットなどの哺乳動物が使用される。また、(3) 生体活性評価では、化学物質の毒性発現メカニズムに基づいた手法として、酵母などの微生物を利用した yeast-two hybrid 法や、酵素や抗原・抗体反応を利用した酵素免疫化学測定法 (Enzyme-linked immunosorbent assay: ELISA) などが使用されている。生体材料を用いたこのような手法も、広義のバイオアッセイと捉えられる。これらの手法は、環境評価やヒト健康評価に大きく貢献してきているが、化学物質から影響を受けるはずの生態系や生体系等のシステム全体のうちごく一部を切り取ったものを対象としているため、化学物質の影響すべてを評価できるわけではない。また、評価対象のさらなる拡大に対応するため、スループット能の向上に加え、費用の低減や実験期間の短縮も求められている。併せて、河川や海洋などの水環境の生体影響評価では、現場での計測が求められている。現在バイオアッセイに求められる性能は、簡便、迅速、低コスト、高精度・高

スループット、環境現場計測、複数のバイオアッセイの統合化と考えられる^{12),13)}。これらの要求に対して、バイオチップを活用したバイオアッセイが注目されている。マイクロ流路を有する Lab-on-a-chip 内で細胞や微生物などを培養し、光学イメージング・蛍光イメージング・ゲノム解析・電気化学分析などにより、エンドポイントを観測する。チップ内では、試料調製・定量 PCR（ポリメラーゼ連鎖反応、Polymerase Chain Reaction）・DNA マイクロアレイやタンパク質マイクロアレイ・結晶構造解析・ELISA・フローサイトメトリーなども可能である。チップ上でバイオアッセイを自動化し高スループットで連続・並行実施することで、複数の分析工程を短時間に行う広範囲のスクリーニングが可能となると期待される¹⁴⁾。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

（有機分析）

生物蓄積性の高い毒性物質の POPs 関連では、ストックホルム条約の有効性評価に資する長期モニタリング¹⁵⁾のほか、新規追加物質の評価、代替物質の実態把握など多くの研究が進められている。特に短鎖塩素化パラフィン（Short - Chained Chlorinated Paraffins: SCCP）は膨大な数の異性体の混合物であり、妨害も多く、その正確な定量法の開発は環境分析にとって新たなチャレンジとなっている¹⁶⁾。農薬、医薬品など生物毒性を利用する化学物質の環境監視研究も多い。特にネオニコチノイド系並びにフィプロニル等の浸透性殺虫剤による受粉昆虫などへの悪影響が懸念され、環境モニタリング、環境動態研究などが、生態毒性試験や実際の野生生物の増減等に関する研究とともに推進されて膨大な論文が報告された。近年これらをまとめた総説集¹⁷⁾や報告書¹⁸⁾が公表され、欧州では一部使用禁止などの措置がとられている。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¹⁹⁾、塩素化パラフィンのような理論同族異性体が極めて多いなどの理由でこれまで分析が困難であった物質への対応¹⁶⁾が進められていることが世界的な潮流といえる。ノンターゲット分析の開発と普及にあわせて、実際の河川水などに含まれる化学物質とその分解物、代謝物の網羅分析結果も報告が増えてきた²⁰⁾。有害物質の優先順位付けや水処理技術へのフィードバックが期待される。

連続した精密質量の測定が可能な質量分解能 1 ～ 4 万程度の飛行時間型質量分析計（Time of Flight MS: ToF-MS）の普及と世代交代が進んだことが、多成分の一斉定量と未知物質推定の同時実現を後押ししている。未知物質の組成式の推定確度は質量分解能と測定精度に比例することから、未知物質推定に特化した研究では、フーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴質量分析計（FT-ICR-MS）やオービトラップ型質量分析計など質量分解能が十万以上の質量分析計の環境分野への応用も見られる²¹⁾。さらに、精密質量測定データを利用し、質量欠損情報から共通の元素比率や構造をもつ化学物質群を選択的かつ包括的に抜き出すなどのスクリーニング解析も進められている²²⁾。

広範囲かつ長期の環境モニタリングのための省力・簡便・低コストのサンプリング技術として、水や大気のパッシブサンプリング法の開発・改良が進められている^{23),24)}。水質パッシブサンプリングでは、2016 年にカナダ、アメリカ、中国を中心とする国際的なネットワークが立ち上がり、比較検証が行われている²⁵⁾。

（無機・同位体・放射性核種）

同位体利用技術の展開が環境研究における大きなトレンドとなっている。発生源による同位体組成の違いを利用した発生源探索、物理化学／生物プロセスによる同位体比の変化を利用した環境動態、食物網構造解析などに加え、宇宙線や太陽光による同位体比の特異的变化（ ^{14}C 等の宇宙線起源長寿命同位体生成、あるいは水銀における質量非依存性同位体分別（Mass Independent Fractionation: MIF）の生成など）や原子力関連で放出された同位体の利用など、様々な環境同位体研究が進められている。また、生物蓄積性を有する元素・化学物質の環境動態の解析に関して、アミノ酸の代謝の違いを利用した化学形態別安定同位体分析により、信頼性の高い栄養段階の解明が実用的に利用されるようになった²⁶⁾。海洋表層での太陽光による水銀の正の MIF の生成と海洋生態系への蓄積を示唆する結果が報告され²⁷⁾、これと整合するように海洋表層大気中水銀にはわずかな負の MIF が観測された²⁸⁾。自動連続測定装置により、全球レベルで大気中水銀の化学形態別濃度や変動の様子が明らかになり、特異的な酸化と地表への沈着プロセスが次第に明らかになっている。その一方で、酸化体の測定法に疑念が生じ、検討と新たな手法開発も進んでいる。原発事故由来の放射性核種の追跡研究も進む中で ^{131}I へのばく露評価指標としての ^{129}I の環境測定²⁹⁾、或いは長寿命放射性核種の ^{14}C 等による環境中炭素循環、物質循環の研究も加速器質量分析法（Accelerator MS: AMS）により研究が展開されている。さらに、過去の核実験や核燃料再処理等の影響で海域によって ^{129}I やウランなどの放射性同位体比が異なることを利用し、海水の3次元的な流れや海洋生物の回遊の解析などの研究が進められている。AMSは小型化が進み、価格もSIMSなどと同レベルの装置が普及し始めており、LCやGCとの結合も研究されている³⁰⁾。

質量分析に基づく元素濃度や同位体組成の精密測定技術をベースに、元素や同位体の化学形態あるいは存在状態別の分布、局所的な分布、微小粒子中の濃度の解明などが研究されている。

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た。MC-ICP-MSによる安定同位体比高精度測定により、様々な元素の環境中での同位体分別プロセスが検出できるようになったばかりでなく、MIFと呼ばれる特異的な同位体分別が水銀などいくつかの元素で見出され、環境中での元素動態解明や発生源特定などの目的で近年研究が活性化している^{31),32)}。LA-ICP-MSはレーザー照射により生成した原子蒸気をICP-MSに導入して元素濃度・同位体比を測定するが、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新装置により、その場の元素濃度や分子状態についての情報を得ることが可能となった。ナノSIMSは、空間分解能50 nm以下かつ高感度（ppbまで）で2次イオン像観察を実現した。安定同位体比測定は、数10 ppmの再現性で可能であり、環境試料の微小局所元素／同位体分析が進められている。GCやLCとMC-ICP-MSをつないだ化学形態別の同位体分析、LA-ICP-MSとMC-ICP-MSの結合や、LC/ICP-MSとLC/MS/MSを組み合わせた数十種類に及ぶ環境中／生体中ヒ素化合物の化学形態分析等も進められている³³⁾。

原発事故により飛散した放射性核種の空間分布を連続的、リアルタイムに計測可能な各種可搬型計測器の開発、 γ 線カメラの開発やその応用、タンデムMSベースのICP-MSによる放射性同位体の測定技術の開発などが精力的に進められてきた。Liquid-cell TEMは、溶液中の化学成分からの粒子の結晶形成を精密にTEM観察できる方法で、“炭酸カルシウムの結晶化前の非晶質粒子の出現”³⁴⁾が示されるなど世界的に盛んに行われている。

（マイクロプラスチック、ナノ粒子、PM）

マイクロプラスチックについては環境水中、水生生物中の存在が多く報告され³⁵⁾、日本沿岸の魚でも見つかっている。直径 100 nm 未満の蛍光標識ポリスチレン (Polystyrene: PS) のビーズを淡水藻類に付着させた水槽実験により、PS ビーズが食物連鎖（ミジンコ→メダカ→カワムツ）を経由して上位生物に移行することが示され、また PS 摂餌魚の活性に負の影響を与えることが報告された³⁶⁾。マイクロプラスチックは多様な高分子材料からなり、環境中で破断・細分化され、形状も定まらない。Lusher ら³⁷⁾ はこれまで報告された生物に取り込まれたマイクロプラスチックの測定条件を検討し、また見掛けで判断せずプラスチックの同定まで行うべき、と報告している。プラスチックの同定には、全反射 FTIR、顕微 FTIR、顕微ラマン、熱分解 GCMS などが使われる³⁷⁾。定量は難しく、通常、環境試料の体積や個体あたりの個数で表示される³⁸⁾。PS の蛍光特性を利用し、セルソーターを使って微生物バイオフィルム中のマイクロプラスチックを計測した事例が報告されている³⁹⁾。ナノ粒子やマイクロプラスチックの毒性研究はまだ研究途上だが、添加剤を含む組成や形状のほか、表面の状態、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⁴⁰⁾、分析項目の精密化、細分化の進展が予想される。

ナノ粒子／材料については、電極材料、コンポジット材料などの産業利用、農業、化粧品、医療分野など様々な分野での技術開発と応用が進み、利用情報の整備と環境放出量の推定も行われているが、実際の環境レベルや動態について不明点が多い。毒性研究も盛んに行われているが、結果は必ずしも調和的とはいえず、また毒性評価法の標準化の必要性も指摘されるなど、さらなる研究が必要な段階と考えられる^{41), 42)}。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る⁴³⁾ なかで、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た⁴⁴⁾ ことが注目される。銀など金属ナノ粒子の検出には、ICP-MS による一粒子分析や LA-ICP-MS、ナノ SIMS、分析電顕等の利用が進んでいる。実際に利用が進むナノ粒子／材料にはケイ素や炭素など様々な元素が含まれ、サイズ、形状もきわめて多様で、さらにナノコンポジット材料の開発・利用も進む中⁴⁰⁾、環境／生体試料のナノ粒子／材料の分析と存在実態解明にはまだ多くの課題が残されている。sp-ICP-MS において、水中金属ナノ粒子の球形近似計算による粒径推定と粒子個数測定が可能となり、40 種類以上の元素が測定可能となった⁴⁵⁾。また、測定法の標準化も進んでおり ISO/TC 229 ナノテクノロジーにて水中無機ナノ粒子の粒径分布と濃度測定の規格化 (ISO/TS 19590) がなされている。偏光散乱強度差計測 (Polarization Intensity Differential Scattering: PIDS) は、複数波長による偏光散乱測定に基づき複数の粒子が混在したサンプルでも 10 nm から 3 mm の広範囲の粒度測定が可能で、2018 年に市販装置も販売開始された。環境試料のように多様な粒子の同時測定が期待される。

PM に対して、最近 1 個の粒子で成分分析が可能な超微量分析の技術改革が進んだ⁴⁶⁾。その結果、例えば、①レーザー光散乱による粒子の数と大きさの測定と②レーザー誘起白熱法・質量分析法によるブラックカーボン、硝酸塩、硫酸塩の同時測定を行う装置が開発され、市販された。食品・生体について、①顕微鏡像に、②その極微小部分の質量分析法で得た有機物情報を画像上重ねて示す MS・イメージング法の開発が進められ、PM 中に存在する PAH 類の検出も試みられている⁴⁷⁾。金属ナノ粒子の内部構造について、X 線自由電子レーザー施設「SACLA」を光源とした X 線回折イメージング法⁴⁸⁾ によって観察した研究が行われており、PM2.5 など

環境残留・生成粒子の新たなキャラクタライゼーション法として期待される。ドローン技術は大気領域でも大きな関心を集めている。従来、飛行機や気球、あるいは高層建築物や山岳など限られた条件で実施していた上空の物理化学分析が極めて容易に実施可能になると期待される。

（バイオアッセイ・AOP・構造解析）

バイオチップを活用したバイオアッセイ法は、手作業、長時間、低い再現性などの欠点があった従来の微生物や実験動物を用いたバイオアッセイと比べ、自動化、高スループット、連続・並行実施可能で、複数の分析工程を短時間で低コスト、高精度のバイオ分析スクリーニングを可能にした。1万種以上の独立したバイオアッセイ用反応室を有し、生化学的あるいは細胞ベースのアッセイを数分以内に終わらせるチップも開発されている⁴⁹⁾。化学物質のヒト健康への影響評価では、EUを中心として、動物愛護などの倫理的な観点から、実験動物の使用に対する規制が広がっていることから、代替法の研究開発が進んでいる。バイオチップを活用したバイオアッセイ法に加え、AIや計算科学によるシミュレーションによる毒性発現メカニズムの解明や毒性予測技術の開発も進められている。特に、AOPは、高スループットな *in vitro* 細胞試験やコンピュータによる *in silico* 解析など膨大な化学物質評価データや知見を統合した毒性評価概念として、急速に注目を集めている⁵⁰⁾。

化学物質の使用・管理に関する法規制の整備が進み多くの化学物質について毒性試験・データの必要性が劇的に増加している中で、費用や設備、時間、動物愛護など様々な観点から、動物実験をやめてハイスループット技術による化学物質の新たな毒性試験・評価システムを構築する動きが進んでいる⁵¹⁾。AOPの考え方に沿って、OECDなどでも大きなプロジェクトが実施されている⁵²⁾。DNAマイクロアレイなどの遺伝子発現解析を伴うゲノミクス、次世代シーケンサーなどで転写因子を調べるトランスクリプトミクス、代謝物を質量分析装置などで網羅分析するメタボロミクスなどで得られた膨大なデータを解析するバイオインフォマティクスを活用して各種AOPを整理して、Integrated Approach for Testing and Assessment (IATA)の観点から、行政の化学物質のリスク評価・管理に適切なバイオアッセイを効率的に選定・実施することも期待されている。さらには、対象化学物質の構造からバイオアッセイ結果である各種毒性値を予測する定量的構造活性相関 (Quantitative Structure-Activity Relationship: QSAR) や、類似した化学構造、物理化学的性質を有する化学物質の毒性値を類推するリードアクロスなどの考え方も急速に普及してきている。AOP-Knowledge Base (AOP-KB)⁵³⁾ や AOP wiki⁵⁴⁾ などのポータルサイトを通じてAOPの横断的な検索ツール、AOPXplorerやEffectopediaなどの解析ツールが整備されつつあり、AOPネットワークの解析が試みられている。

タンパク質立体構造データベース (Protein Data Bank: PDB) への情報の蓄積、計算機性能の向上、高度なプログラムの開発などにより、タンパク質を標的とした *in silico* 解析による医薬品の設計が具現化されつつある。この手法を応用し、環境汚染物質の構造的特徴 (分子記述子) から有害な物質を迅速にスクリーニングする方法が開発されてきた。特に核内受容体を対象に、PDB内のタンパク質の結晶構造データを利用して、リガンド候補物質との相互作用を解析 (ドッキングシミュレーション) し、環境汚染物質の有害性を核内受容体との相互作用から評価する研究が増加している。また、核内受容体のオーソログ・パラログ遺伝子の立体構造をPDB内の結晶構造データから予測 (ホモロジーモデリング) することにより、モデル生

物ばかりでなく、非モデル生物を対象にした研究も出現している。

細胞内の各受容体結合や転写活性とホタルルシフェラーゼの発光を利用した技術の研究利用や公定法への利用、国際標準化に向けた準備などが進められている。抗原抗体反応を利用したELISAも簡易測定法として利用され、従来からの天然女性ホルモンや女性ホルモン様作用物質のほか、ネオニコチノイド系殺虫剤などの近年注目されている新規環境汚染化学物質へも適用が進んでいる。生物丸ごとの応答を試験系として用いる事例では、無脊椎動物の代表種であるオオミジンコの生殖試験を二世世代影響試験に拡大して、適用性の評価が行われた⁵⁵⁾。一方、ネオニコチノイド系殺虫剤で感受性の大きな種間差が認められ、生態毒性試験系にオオミジンコ以外に感受性の高いユスリカ幼虫を加えることとなった⁵⁶⁾。どのように試験系を構築すれば的確な評価が行えるかは、引き続き大きな課題と考えられる。

Cryo-TEMによって、液中の分子量200 kDa以下の小さいタンパク質複合体の構造解析（2015年）⁵⁷⁾や、0.2 nmの分解能での構造解析（2016年）⁵⁸⁾が可能となった。

原料となる化学物質の製造・利用等に対する法整備は古くから進められていたが、化粧品やシャンプーなど消費者が利用する製品中に含まれる化学物質について、近年注目を集めている。パーソナルケア製品中に含まれる紫外線フィルタ剤や保存料などの環境汚染実態や水生生物への影響評価については、米国環境保護庁(EPA)などが検討を開始している⁵⁹⁾。これに関連して、個人が生涯にわたって曝露する化学物質総量としてのエクスポソーム研究も盛んである⁶⁰⁾。

（モデル研究）

化学物質の物質循環や動態を扱うモデル研究として、物質循環の科学的解明の技術としてのモデル研究と、実用的な化学物質管理のためのモデル研究と大きく二つの方向性がある。前者として、全球規模でのPOPsあるいは水銀の輸送を記述する大気および海洋のモデル、半球から領域スケールのモデルなどを用いた研究が進められている。近年は全く新しいモデル開発よりも、既存モデルの改良と応用研究が多い。水俣条約の締結に伴い、水銀の全球あるいは領域スケールのモデル、形態変化や大気-海洋プロセスを統合するモデルの研究がやや活発化した。広域のモデルでは、計算機能力の向上に応じて、従来は緯度・経度2.5度程度であった空間分解能を0.5度程度まで細分化する努力が行われている。化学物質管理のための実用モデルとして、スクリーニング的なリスク評価に適用する簡易モデルが活用されている。この中で、例えば従来は不十分であったイオン解離する物質や水溶性の高い物質、また、ナノマテリアルなど微粒子の動態などに注目するモデル研究が行われた。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・欧州のSOLUTIONS、MercOx、Human Biomonitoring、MARSなどのプロジェクト

欧州で進められているSOLUTIONSプロジェクトでは、Effect-directed Analysis（影響指向型分析）手法を用い、様々なバイオアッセイを並べてその影響を指標としながら環境中化学物質を分画して、ノンターゲット分析で網羅的に（未知物質の構造決定を含めて）調べながら有害な化学物質を同定し、汚染化学物質のランク付けや、特徴付け、新規物質の同定などを行うことを目指している⁶¹⁾。欧州各国の機関に加えブラジル、中国及びオーストラリアから39機関が参加し、ライン川やドナウ川流域の河川における化学物質の有害性評価を、汚染原因物質の化学分析から生態系への影響評価まで広範な範囲にわたって実施し

ている⁶²⁾。2018年に終了し、成果公開が注目されている。水銀については観測ネットワーク構築に関わる GMOS、水銀全球動態に関する Metra 等の欧州大規模プロジェクトが終了し、環境動態に関して残る大きな課題である水銀の酸化プロセスに関する新たな MercOx プロジェクトが 2017 年秋から開始した。化学物質全体のヒトばく露状況を把握するため欧州 Human Biomonitoring プログラムも開始されている。また、MARS プロジェクトは、河川流域の生態系に対して化学物質が与える影響の解明を目指している⁶³⁾。

- ・米国の Tox21、ToxCast、CERAPP などのプロジェクト

毒性評価について、米国では NIH や EPA などの複数の政府機関が共同で Toxicology Testing in the 21st Century collaboration (Tox21) を実施している。本プロジェクトは毒性評価方法の開発や迅速試験法の開発などを目的としたプロジェクトである⁶⁴⁾。また EPA の Toxicity ForeCaster (ToxCastTM) では、多数の化学物質の高スループットスクリーニングによるデータを収集して、理論毒性学的な毒性予測を行う Toxicity forecaster として公開している⁶⁵⁾。これら 2 つのプロジェクトでは核内受容体に対するハイスループットな in vitro アッセイで数千種類の化学物質をスクリーニングし、エストロゲン受容体 (Estrogen Receptor: ER) に関連した 18 のアッセイで、約 1,800 種類の共通の化学物質を試験した。EPA の National Center for Computational Toxicology によって企画された共同エストロゲン受容体活性予測プロジェクト (Collaborative Estrogen Receptor Activity Prediction Project: CERAPP) は Tox21 および ToxCastTMによって報告された ER ハイスループットスクリーニングアッセイのデータを使用し、活性予測計算モデルを開発すること、追加試験のために 32,464 種の化学物質に優先順位を付けることを目標とした国際プロジェクトである⁶⁶⁾。CERAPP には、米国とヨーロッパの 17 の研究グループが参加した。これらのグループは、それぞれ異なる QSAR および化学構造ベースの手法により、40 のカテゴリーモデルおよび 8 つの連続モデルを開発した。さらに、すべてのモデルを、化学物質の ER 結合能およびアゴニスト・アンタゴニスト活性に基づいて分類する単一のコンセンサスモデルに統合し、レファレンス物質に対する相対効力値を推定している。

- ・日本のマイクロプラスチックのモニタリング手法の調和化事業

環境省の主導で、相互比較を主な目的として、世界 10 カ国の研究機関が人工的に調整したマイクロプラスチック試料を分析し、分析値を相互比較、議論している。

- ・日米欧のナノ物質安全性評価研究

ナノ材料計測の開発は、ナノ材料自身の物性評価の目的だけでなく、ナノ材料を製造・利用する上で不可欠な安全性評価の研究と連携して行われることもある。安全性評価の研究プロジェクトは、OECD の枠組みで協力しつつ、日本、米国、EU にて 2000 年後半以降から現在まで対象物を拡大しながら各々実施されている。例えば、産業技術総合研究所は NEDO の支援でフラーレン、カーボンナノチューブ、グラフェンなどの炭素ナノ材料の安全性評価を実施している。この中で炭素ナノ材料の動物組織中定量法などが開発され、組織への残留挙動の解明に繋げている⁶⁰⁾。欧州委員会共同研究センターは、Nanocomput プロジェクトで、毒性動態挙動、ナノ材料の暴露量データ、環境運命モデル、定量的構造・物性関係

(Quantitative Structure-Property Relationship: QSPR)、および QSAR モデルなどを用いたナノ材料リスクを予測する計算手法の現状を評価している⁶⁷⁾。さらに、開発されたナノ材料の計測法の一部、例えば、sp-ICP-MS によるナノ粒子中の元素分析法は ISO の国際標準化されている。得られた研究結果から、EU では化粧品などのナノ材料を含む製品の規制が 2013 年に施行している一方、ナノ材料自身の法規制化については、EPA の使用量報告制、日本のナノ材料製造者向けの対応通達など暫定的措置、もしくは検討中とする国も多い。マイクロプラスチックについては、深刻な環境汚染の実態が報告されていることから、環境動態解明のための研究プロジェクトが各国で本格化しつつあり、高度な計測法の開発もプロジェクト内外で増えてくると予想される。

・ GEOTRACES

2000 年代後半、国際共同研究計画 GEOTRACES が始動した。本計画は、世界の研究者が協力して、重要な微量元素・同位体 (Trace Elements and Isotopes: TEIs。キーパラメータは Al、Mn、Fe、Cu、Zn、Cd) の全球的な分布を解明し、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 の応答を明らかにすることを目的とする。GEOTRACES 計画によって、外洋海水を用いる TEIs 分析法の国際相互校正が初めて実現し、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、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⁵⁹⁾。現在、化学海洋学は一大変革期にある。GEOTRACES 計画は、今後 3 年ごとに 2 回 IDP を公表し、その 3 年後に最終のとりまとめを行う予定である。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球的な分布をあきらかにし、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、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る。

(5) 科学技術的課題

- ・ 環境分析のための先導的、先端的な装置の国内での開発、データの解析ツールの開発と整備、国際連携に基づくバイオアッセイの推進、バイオアッセイと化学分析との連携強化、などの研究テーマが基盤として重要である。これらについて、国内に拠点を構築し、産学官連携で研究を推進することが望まれる。特にマイクロプラスチックやナノ粒子／材料については、毒性評価も環境分析も世界各国とも開発が遅れている。
- ・ 化学物質の環境動態モデルは、多くが微量成分であるため迅速な分析や実験、また観測値による検証等において困難が多い。大気汚染物質などと比較すると、動態モデルに必要なパラメータ等がまったく不十分で、依然として課題である。これらの状況から、モデル予測の精度がなかなか向上せず、実験的・理論的研究双方によるブレークスルーが望まれる。国内では化学物質のモデル研究と、大気モデル、海洋モデルなど分野間の連携が弱いことも課題である。モデル予測に必要な排出インベントリの整備も依然として課題である。化学物質については PRTR 制度のより多くの国への展開が一つの可能性となりえるが、まだ不十分である。このほか、GIS との統合・連携、IT 技術としての展開など将来の可能性はある。
- ・ PM については二つの課題があげられる。第一に、大気中の粒子の数や濃度の測定とブラッ

クカーボンや硝酸塩、硫酸塩の同時測定は可能になりつつあるが、燃焼 PM の特性を知るための有機化合物との同時測定はまだ実用の域に達していない。PM_{2.5} と共に、その発生源や毒性と強く関連する PAH や NPAH などの情報を同時に得られる方法の開発が課題である。第二に、ドローン技術の進歩は、上空での捕集・測定を大きく変革することが期待される。そのための複数測定器が搭載できる装置の軽量化と測定データ情報の複合解析などが課題である。一方、細胞毒性関連では、PAH 類のみならず農薬類も含めて、毒性発現に代謝等が大きく関わっているにも拘わらず、その詳細な機序は殆ど解明できていない。どんな毒性本体が生体・細胞内のどこで生成し、何の作用に関わっているかを明らかにできる細胞画像と化学物質（反応）の情報を同時に提供できる方法の開発が一つの課題である。

- ・ マイクロプラスチックおよび付随する有害化学物質の生物影響の定量的評価手法の開発、特に、マイクロプラスチック濃度や有害化学物質濃度を現場のレベルに近いレベルで行うこと、あるいは将来起こりうるレベルでの検討が重要である。マイクロプラスチック計測法では、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。マイクロプラスチック付着化学物質の正確な有害性評価のためにプラスチックからの分離方法の確立も必要である。より微小な、ナノ領域までの測定手法の開発、また化学的手法とマスバランス的手法を組み合わせた起源推定方法、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なども重要である。特にナノ粒子・材料分野は応用を目指した研究が急速に展開されている一方で毒性評価や環境測定手法の開発が遅れている。化学物質関連も同様だが、産業開発のスピードに環境側が追いついていけない状況が常態化してきている。
- ・ 個々のバイオアッセイは、化学物質の影響を受ける生態系や生体系のごく一部を取り出したものであることから、より実態に近い評価を行うためには、バイオチップのように各種バイオアッセイを適切に組み合わせた高スループットの評価を行う必要がある¹⁴⁾。計測技術の発展とともに、化学物質の毒性に対してより鋭敏なバイオマーカーの探索も重要となってくる。アッセイに利用される生物の死や生殖異常に至る前の高感度指標として、生体内部の反応を得られる可能性がある¹³⁾。また、バイオチップとバイオマーカーの組み合わせにより、化学物質の生体影響評価が効率化・高精度化されることも期待される。ヒトへの影響評価では、他の哺乳動物に基づく動物実験データや細胞を用いた *in vitro* 試験データに基づいて評価を行うことになるが、その際の種間あるいは *in vitro*-*in vivo* 間の評価結果の差を十分に検討する必要がある。AOP は、これらのデータを統合的に解析することで、種間外挿の妥当性の検討手段となることも期待される。同様に、毒性予測や複合毒性についても予測手段としての検討も期待される⁵⁰⁾。個人暴露評価用のバイオアッセイの研究開発も必要と考える。消費者製品中の化学物質による個人暴露については、日本では法規制の対象外となっているが、国際的には注目が高まっている⁶⁰⁾。例えば、米国ハワイ州においては、2018年7月、日焼け止めクリームなどのサンスクリーン剤の成分が使用規制対象となった。化学物質の生物への影響において環境への排出を経由した場合は、出発物質が変化し有害性が変動することも想定される。よって、バイオアッセイでは出発物質の変化に応じた暴露方法、モニタリング技術、および生体影響評価方法の統一的な試験・評価系の構築が必要となると考えられる。
- ・ 電子顕微鏡観察においては、一方向からの観察であるため大きな粒子の下に小さな粒子が隠れてしまい、小さな粒子を認識できない欠点がある。DLS などの光散乱法は大粒子による

散乱光が、小粒子の微小な散乱光測定を妨害する。これらの問題を解決するために、国内のコンソーシアム「COMS-NANO」では、分級法を用いてナノ材料をサイズごとに大まかに区分したのちに各種計測方法により粒子数分布を求める手法を提案している。

- ・sp-ICP-MSでは、ネブライズ法によって溶液をプラズマに導入する際、単一粒子ではなく多重粒子が発生する場合があります、正確な粒度分布測定が困難となる場合があります。また、高精度の粒度測定および元素定量分析のための単一粒子分散標準液の整備がされていない。
- ・CERAPPにみられるように、化学物質との核内受容体リガンド結合領域の構造を解析することにより、リガンド候補物質のスクリーニング・QSARモデル構築が可能になりつつある。一方、リガンド・種特異的な相互作用に関与するアミノ酸残基を特定することや、核内受容体-タンパク質および核内受容体-DNAなどの分子間の相互作用を予測することについては依然として精度的に問題がボトルネック課題である。

（6）その他の課題

- ・科学技術に基づく持続可能で安心安全な社会構築を目指す我が国において、二度と公害問題を起こさないため、産業界における新規化学物質や新素材開発のスピードに負けない毒性評価と環境分析技術の基盤整備が重要である。分析技術のコスト削減とスピード向上にも十分留意する必要がある。環境分析のグリーンケミストリー化も重要な課題であり、地道に、かつ着実に取り組む必要がある。
- ・環境分析や化学物質リスク管理に係わる大学等の研究活動が枯渇しつつあり、基礎力と応用展開力をともにそなえた人材育成と多様なキャリアパスの確立が強く求められる。国内の短期的視点のみでなく国際的な動向の中で政策を構成することも重要となっている。日本では分析化学や地球化学などの基礎学問を指向する研究室が縮小し、基礎学問を指向する学生も減少しつつある。そのときどきの流行や華やかな研究だけに注目するのではなく、科学技術全体の調和的発展を図る施策が必要である。国内研究機関では、高価な最先端装置を維持するための経費およびテクニカルスタッフ技術支援員の持続的な確保がきわめて難しい。科研費などの競争的資金は持続性の点で大きな問題がある。運営交付金の削減、止めどない制度改革と新規事業への対応により、研究・教育現場の疲弊が進んでいる。たとえば、水圏観測を先導してきたJAMSTECの学術研究船白鳳丸や陸水・沿岸域研究に必要な各大学保有の臨湖・臨界研究施設・研究船は老朽化が進んでいるが予算が厳しく更新が困難となっている。基盤的経費の維持・拡充が欠かせない。
- ・個別の物質のばく露経路は空気や水からだけではなく食品、家庭用品、ペット経由など多岐にわたる。環境中にある様々な物質への複合ばく露影響の総合的な評価の必要性が認識されてきており、政策的課題として野横断の枠組みの必要性が改めて指摘される。国内では経産省、環境省、農林水産省、厚労省、内閣府食品安全委員会などが含まれ、省庁の枠組みを超えた研究体制やファンディング制度の拡充が求められる。地方自治体との連携強化も重要となる。
- ・ナノ材料やマイクロプラスチックなどのサイズと同時に含有成分を明らかにするために微小領域および微量の計測を行う際、電子顕微鏡、光散乱、質量分析といった高価な機器群を駆使する必要がある。市販の機器性能では不十分で、分析装置を改良する必要もある。国内ではこれらの計測や開発を十分実施できる研究環境がほとんどない。

- ・計測法の開発の成果が論文発表で留まっているケースが多く、実際に計測を必要とする人々が望む実試料への適用可能性が担保されていないケースが散見される。優れた計測法を社会実装するためには、計測法の開発者が実用性の確保のために関わるべきであり、企業等と連携した市販装置化や国際標準化の検討を推進が求められる。
- ・化学物質の環境動態および生体影響の解明を行うためには、計測法の整備も重要だが、得られた計測データの解析と意味づけも重要であり、特に種々の計測データのビックデータ解析が不可欠になりつつある。これらに精通した人材の育成が望まれる。
- ・*in silico* 解析法の発展により、膨大なデータセットを生み出すことが可能となった。毒性学的エンドポイントを効率的に予測できれば、多くの費用・時間・実験動物を必要とする *in vivo* 試験数を低減できる。ヒトの健康および生態のリスク評価や化学物質規制・管理の意思決定を迅速化するためには、新しい評価法に由来するデータを活用するための行政的な仕組みの整備が必要である。
- ・毒性評価については、ハイスループット (*in vitro*) バイオアッセイの開発や *in silico* の解析に基づく毒性予測手法開発などの基礎研究の推進が重要である。一方で、現在の知見の不十分さにかんがみると、研究開発において動物実験など丸ごとの生物を使った試験は最も重要な実験手法であり、既知の毒性発現機序に基づくバイオアッセイの組み合わせで置き換えることは当面実現できないと見通される。生物の維持・管理が伴う *in vivo* 試験については動物愛護や煩雑さから、医学薬学を除く環境生物に関連する分野では国内での研究者は極端に少なく、海外に大きく後れをとっている。ヒト健康の影響評価のためのバイオアッセイ法を新規に研究開発する場合、一般の研究者はヒトサンプルを取り扱うことが困難なため、医療従事者等とのスムーズな連携が重要となる。研究開発における連携を上手に取り持つ仕組みが必要だと考えられる。バイオアッセイの研究成果を化学物質における法規制に反映させるべきだが、省庁など各種機関で規定されるバイオアッセイが旧来のままで実際の環境に即していなかったり、十分な評価データがなかったりする背景から、安全側にかなり偏った規制が掛けられ我が国の産業振興が阻害される可能性がある。いくつかの有望な技術の規制を定めるアッセイ法として検証する必要がある。
- ・有機分析では、高分離・高精細・高頻度な分析により収集される情報量が膨大になる傾向にあり、情報の保管、解析、共有が課題である。特に、情報解析については、未知物質を含む混合物からなる試料解析が必要なことから、メタボローム解析やゲノム解析技術の単純な応用では済まない可能性が大きい。そのため、全く新しい発想による解析手法の開発が求められるが、当該分野におけるソフトウェア開発における人材不足は顕著である。また、先端的な分析機器開発が海外中心に進んでいて、国内での装置導入費用や維持単価が上昇しがちであることに加え、装置仕様の改良やソフトウェア開発などが困難な状況である。当該分野に取り組む大学の研究室が限定されており、慢性的な人的資源不足であることもボトルネックである。
- ・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販売を全世界展開することで成功している企業がある。日本の企業ではこのような戦略はほとんどみられない。例えば、日本の平沼産業が開発した無機元素の自動濃縮装置はたいへん優れた性能をもち、価格も手ごろであったが、国内だけでは販売数が少なく、製造中止になった事例などがあげられる。

・温暖化などの地球環境問題について、IPCCのほか、従来から地球環境問題に国連環境計画（United Nations Environment Programme: UNEP）と世界気象機関（World Meteorological Organization: WMO）が取り組んでいる。最近、開発途上国の課題解決に向けて、10の国連機関が集まって地球環境ファシリティ（Global Environment Facility: GEF）を結成した。有害化学物質は大気も海洋も汚染が越境するために、その研究は政治的な影響を受けやすい側面があるが、日中韓大気環境学会で協定が締結されるなど研究者レベルでの連携協力は確実に進んでいる。計測技術の開発は独自に進めることは可能であろうが、フィールドにおける国際共同研究には科研費やJICAなどの外部資金関連事業のより積極的な運用が望まれる。

（7）国際比較

対象技術、分野が広範で個別状況が異なっているため、全体としての概況を記載する。

-	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	○	→	・ 基盤的研究費、若手人材、基盤的装備の衰退が続いている。産学官コンソーシアム Consortium for Measurement Solutions for Industrial Use of Nanomaterials: COMS-NANO）が設立されており、ナノ材料計測の開発と利用が盛ん。ナノ計測を含むナノテクノロジー関連の論文数は、直近5年1000件、前5年のほぼ同倍。バイオアッセイ、バイオ計測技術においては、高い技術的水準を有している。また、これら技術を組み込んだバイオチップについても、チップ上でのバイオ計測やチップ化技術について、内閣府等の大型研究費支援により、多くの研究グループが取り組んでいる。 ・ 個別には世界をリードする優れた研究もあるが、全体的に基礎研究は不十分。特に環境分析で先端的な機器導入例が少なく、世界的なレベルの研究がなかなか進まない。
	応用研究・開発	○	→	・ 日中間の政治的障壁が研究者レベルの共同研究に及ばぬ配慮が必要。NEDOプロジェクトのナノ材料の安全性評価研究など企業ニーズに基づく研究・開発が盛ん。毒性データベースや毒性予測ソフトウェアは、整備に遅れが見られる。 ・ 手法の応用と実態解明、ならびに政策的な応用は徐々に広がっている
米国	基礎研究	◎	→	・ トランプ政権の科学技術軽視は全米地球物理学連合でも大きな問題となっている⁶⁸⁾。毒性研究の後退も見られる。ナノ計測を含むナノテクノロジー関連の論文数は、直近5年4000件、前5年の1.5倍。一方、環境分野のEPAの2018予算は他分野機関が増額の中、増額無し。(Nature (2018-03-29) doi: 10.1038/d41586-018-03700-9)。米国NIHやEPAを中心とするTox21などのプログラムにより、高スループットなバイオ計測スクリーニングを可能とする環境毒性スクリーニング技術の研究開発が推進している。個人曝露評価であるエクスポゾーム研究が進んでいる。 ・ 先端的な分析機器開発、CERAPP等の大規模研究が推進され、世界をリードしている。モデル研究コミュニティの多くは米国にあるが先行きの不透明感が増している。
	応用研究・開発	◎	→	・ PITTCONが計測機器の世界動向を把握できる世界一大イベントになっている。従来から地球全体の地球環境問題に対する関心は高いが、アジアの大気環境問題に対する関心が増している。EPAなどでナノ材料の計測とリスク評価研究を行っており、有害物質規制法(TSCA)におけるナノ材料の取り決めを定めている。毒性予測では、EPAのToxCastプログラムが進められており、化学物質の毒性評価方法や迅速試験法などの研究開発の他、インフォマティクスによる理論毒性学的な研究も進んでいる。 ・ 商用モデルの多くは米国企業が開発したもので、優位性が継続。

欧州	基礎研究	◎	↑	・GEOTRACESのような国際共同観測計画を堅実にリードしている⁵⁹⁾。ナノ材料開発およびその安全利用のための法規制の検討のため、AOPモデルや計算科学によるリスク予想方法の研究などを含むナノ材料計測法の基礎研究が盛ん。バイオ計測においては、光学機器メーカーや微細加工メーカーなど、トップレベルの企業が欧州に本拠地を持つなど、高い技術的水準を有している。 ・環境分野でSOLUTIONS、水銀プロジェクト、ナノ粒子やマイクロプラスチック研究など、焦点を絞って先端的な研究を推進している。 ・英国では環境ホルモン、水処理研究などが活発に行われている。 ・ドイツがSOLUTIONSプロジェクトを主導している。 ・フランスに先端的な研究拠点が形成されている。 ・環境ホルモンやPOPsの分野ではスウェーデン、スペインの主導的な研究者が世界の研究をリードしている。
	応用研究・開発	◎	↑	・ディーゼル自動車の排ガス粉塵施策の失敗感が強い。Nanocomputプロジェクトなどナノ材料の安全利用に関する検討が進んでおり、計測法の国際標準化も行っている。SolutionsおよびMARSプロジェクトなど、世界に先駆けた国際的な取り組みを実施することで、河川流域の化学物質とその生態系への影響評価を進めている。 ・化学物質管理の応用モデル開発は継続して活発。政策的にはPrecautionary approachを大胆に振りかざす。 ・ドイツが定常的な環境モニタリング、環境試料保存を推進している。Human Biomonitoringについても主導的立場にある。 ・ネオニコチノイド規制ではフランスが世界をリードしている。
中国	基礎研究	○	↑	・基盤的装備の導入・拡充が国の重要施策として進められている。地球化学や海洋学のような基礎分野でも研究者数、発表数の増加が顕著で、数量的に日本を超えた印象がある。全国の大学で大気環境関連の学部・学科・講座が急速に増加し、中国で開催される大気環境関連の国際会議が増加し、中国人若手研究者の参加者も急増して、熱気がある。ナノ計測を含むナノテク関連の論文数は直近5年で8000件、前5年の約2倍に増え、予算、特許出願数も大きく伸びている。 http://www.nihs.go.jp/mhlw/chemical/nano/nanopdf/H29houkoku/honbun/all.pdf ・機器整備も進み、素材開発の推進に歩調をあわせるかのように、先端的な環境研究も増えている。広域モデル、プロセスモデルとも多くの研究が発表されている
	応用研究・開発	○	↑	・2009年にナノ計測法の標準化を進めている（ナノ材料の不純物元素測定法） ・裾野の広がり在今后の課題。モデル応用も進んでいるが不十分な印象
韓国	基礎研究	△	→	・大気環境学会では日中韓の連携協定を締結など国際的な取り組みがみられる。 ・分析関連は分野により基礎研究を推進しているが総合的に弱い。
	応用研究・開発	△	→	・環境モニタリングの実施やモデル応用の試みは進められているようだが、データが発表されていない。

(註1) 「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

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

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

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) 「トレンド」

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）参考・引用文献

- 1) K. Hayakawa ed., *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Environmental Behavior and Toxicity in East Asia*, (Springer Singapore, 2018).
- 2) F.-Z. Teng, J. Watkins and N. Dauphas, *Non-Traditional Stable Isotopes*, (Mineralogical Society of America, 2017).
- 3) C.J. Moore *et al.*, “A comparison of plastic and plankton in the north Pacific central gyre,” *Marine Pollution Bulletin* 42 (2001): 1297-1300.
- 4) R. C. Thompson, “Lost at Sea: Where Is All the Plastic?” *Science* 304, no. 5672 (2004): 838.
- 5) K. Tanaka *et al.*, “Facilitated Leaching of Additive-Derived PBDEs from Plastic by Seabirds’ Stomach Oil and Accumulation in Tissues,” *Environmental Science & Technology* 49, no. 19 (2015): 11799-11807.
- 6) J. R. Jambeck *et al.*, “Plastic Waste Inputs from Land into the Ocean,” *Science* 347, no. 6223 (2015): 768-771.
- 7) Y. Jiang *et al.*, “Electron Ptychography of 2D Materials to Deep Sub-ångström Resolution,” *Nature* 559, no. 7714 (2018): 343-349.
- 8) Anoop K. Pal *et al.*, “High Resolution Characterization of Engineered Nanomaterial Dispersions in Complex Media Using Tunable Resistive Pulse Sensing Technology,” *ACS Nano* 8, no. 9 (2014): 9003-9015.
- 9) National Research Council, *Toxicity testing in the 21st century: A Vision and a Strategy* (Washington, DC: The National Academies Press, 2007).
- 10) Gerald T. Ankley *et al.*, “Adverse Outcome Pathways: A Conceptual Framework to Support Ecotoxicology Research and Risk Assessment,” *Environmental Toxicology and Chemistry* 29, no. 3 (2010): 730-741.
- 11) CAS_Registry, “CAS Assigns the 100 Millionth CAS Registry Number® to a Substance Designed to Treat Acute Myeloid Leukemia.”
<https://www.prnewswire.com/news-releases/cas-assigns-the-100-millionth-cas-registry-number-to-a-substance-designed-to-treat-acute-myeloid-leukemia-300106332.html>
- 12) 庄司良、迫田章義「バイオアッセイを用いた環境分析・計測の動向」『EICA』9巻1号(2004):2-7.
- 13) 楠井隆史「バイオアッセイと海洋環境管理」『安全工学』45巻6号(2006):408-414.
- 14) O. Campana and D. Wlodkowic, “Ecotoxicology Goes on a Chip: Embracing Miniaturized Bioanalysis in Aquatic Risk Assessment,” *Environmental Science & Technology* 52, no. 3 (2018): 932-946.
- 15) H. Hung *et al.* ed., “Persistent Organic Pollutants (POPs): trends, sources and transport modelling” *Environmental Pollution*. 217 (2016): 1-158.
- 16) J. Glüge *et al.*, “Environmental Risks of Medium-Chain Chlorinated Paraffins (MCCPs): A Review,” *Environmental Science & Technology* 52, no. 12 (2018): 6743-6760.
- 17) “Special issue: Worldwide Integrated Assessment of the Impact of Systemic Pesticides on Biodiversity and Ecosystem,” *Environmental Science and Pollution Research* 22 (2015):

- 1-154;
Updates, Part 1, *ibid.*, doi:10.1007/s11356-017-0394-3;
Part 2, *ibid.* doi:10.1007/s11356-017-0341-3;
Part 3, *ibid.*, doi:10.1007/s11356-017-1052-5
- 18) “Peer Review of the Pesticide Risk Assessment for Bees for the Active Substance Clothianidin considering the Uses as Seed Treatments and Granules,” *EFSA Journal* 16, no. 2 (2018). doi:10.2903/j.efsa.2018.5177;
“Peer Review of the Pesticide Risk Assessment for Bees for the Active Substance Imidacloprid considering the Uses as Seed Treatments and Granules,” *EFSA Journal* 16, no. 2 (2018). doi:10.2903/j.efsa.2018.5178;
“Peer Review of the Pesticide Risk Assessment for Bees for the Active Substance Thiamethoxam considering the Uses as Seed Treatments and Granules,” *EFSA Journal* 16, no. 2 (2018). doi:10.2903/j.efsa.2018.5179
- 19) E. L. Schymanski *et al.*, “Non-target Screening with High-resolution Mass Spectrometry: Critical Review Using a Collaborative Trial on Water Analysis,” *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 407, no. 21 (2015): 6237-6255.
- 20) J. Hollender *et al.*, “Nontarget Screening with High Resolution Mass Spectrometry in the Environment: Ready to Go?” *Environmental Science & Technology* 51, no. 20 (2017): 11505-11512.
- 21) A. A. Bletsou *et al.*, “Targeted and Non-targeted Liquid Chromatography-mass Spectrometric Workflows for Identification of Transformation Products of Emerging Pollutants in the Aquatic Environment,” *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 66 (2015): 32-44.
- 22) M. Ubukata *et al.*, “Non-targeted Analysis of Electronics Waste by Comprehensive Two-dimensional Gas Chromatography Combined with High-resolution Mass Spectrometry: Using Accurate Mass Information and Mass Defect Analysis to Explore the Data,” *Journal of Chromatography A* 1395 (2015): 152-159.
- 23) K. Vorkamp and P. Mayer, “Passive sampling of polychlorinated biphenyls (PCB) in indoor air: Towards a cost-effective screening tool,” *Scientific Report from DCE*, No.128 (2014).
- 24) N. J. Herkert *et al.*, “Calibration and Evaluation of PUF-PAS Sampling Rates across the Global Atmospheric Passive Sampling (GAPS) Network,” *Environmental Science: Processes & Impacts* 20, no. 1 (2018): 210-219.
- 25) R. Lohmann *et al.*, “Aquatic Global Passive Sampling (AQUA-GAPS) Revisited: First Steps toward a Network of Networks for Monitoring Organic Contaminants in the Aquatic Environment,” *Environmental Science & Technology* 51, no. 3 (2017): 1060-1067.
- 26) E-J. Won *et al.*, “Importance of Accurate Trophic Level Determination by Nitrogen Isotope of Amino Acids for Trophic Magnification Studies: A Review,” *Environmental Pollution* 238 (2018): 677-690.
- 27) J. D. Blum *et al.*, “Methylmercury Production below the Mixed Layer in the North

- Pacific Ocean,” *Nature Geoscience* 6, no. 10 (2013): 879-884.
- 28) A. Yamakawa, K. Moriya and J. Yoshinaga, “Determination of Isotopic Composition of Atmospheric Mercury in Urban-industrial and Coastal Regions of Chiba, Japan, Using Cold Vapor Multicollector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry,” *Chemical Geology* 448 (2017): 84-92.
- 29) G. Yang, H. Tazoe and M. Yamada, “Can ¹²⁹I Track ¹³⁵Cs, ²³⁶U, ²³⁹Pu, and ²⁴⁰Pu Apart from ¹³¹I in Soil Samples from Fukushima Prefecture, Japan?” *Scientific Reports* 7, no. 1 (2017).
- 30) W. Kutschera, “Accelerator Mass Spectrometry: State of the Art and Perspectives,” *Advances in Physics: X* 1, no. 4 (2016): 570-595.
- 31) J. G. Wiederhold, “Metal Stable Isotope Signatures as Tracers in Environmental Geochemistry,” *Environmental Science & Technology* 49, no. 5 (2015): 2606-2624.
- 32) D. Lu *et al.*, “Recent Advances in the Analysis of Non-traditional Stable Isotopes by Multi-collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry,” *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 32, no. 10 (2017): 1848-1861.
- 33) V. Taylor *et al.*, “Human Exposure to Organic Arsenic Species from Seafood,” *Science of The Total Environment* 580 (2017): 266-282.
- 34) M. H. Nielsen *et al.*, “In Situ TEM Imaging of CaCO₃ Nucleation Reveals Coexistence of Direct and Indirect Pathways,” *Science* 345, no. 6201 (2014): 1158-1162.
- 35) S. Rezaei *et al.*, “Microplastics Pollution in Different Aquatic Environments and Biota: A Review of Recent Studies,” *Marine Pollution Bulletin* 133 (2018): 191-208.
- 36) Y. Chae *et al.*, “Trophic Transfer and Individual Impact of Nano-sized Polystyrene in a Four-species Freshwater Food Chain,” *Scientific Reports* 8, no. 1 (2018).
- 37) A. L. Lusher *et al.*, “Sampling, Isolating and Identifying Microplastics Ingested by Fish and Invertebrates,” *Analytical Methods* 9, no. 9 (2017): 1346-1360.
- 38) L. Mai *et al.*, “A Review of Methods for Measuring Microplastics in Aquatic Environments,” *Environmental Science and Pollution Research* 25, no. 12 (2018): 11319-11332.
- 39) L. Sgier *et al.*, “Flow Cytometry Combined with ViSNE for the Analysis of Microbial Biofilms and Detection of Microplastics,” *Nature Communications* 7, no. 1 (2016).
- 40) テクノヒル株式会社「ナノマテリアル安全対策調査事業報告書」（2017年3月）
- 41) M. Bundschuh *et al.*, “Nanoparticles in the Environment: Where Do We Come From, Where Do We Go To?” *Environmental Sciences Europe* 30, no. 1 (2018).
- 42) M. A. Rather *et al.*, “Molecular and Cellular Toxicology of Nanomaterials with Related to Aquatic Organisms,” *Advances in Experimental Medicine and Biology Cellular and Molecular Toxicology of Nanoparticles* (2018): 263-284.
- 43) E. D. Kuempel *et al.*, “Evaluating the Mechanistic Evidence and Key Data Gaps in Assessing the Potential Carcinogenicity of Carbon Nanotubes and Nanofibers in Humans,” *Critical Reviews in Toxicology* 47, no. 1 (2016): 1-58.
- 44) T. Chernova *et al.*, “Long-Fiber Carbon Nanotubes Replicate Asbestos-Induced

- Mesothelioma with Disruption of the Tumor Suppressor Gene Cdkn2a (Ink4a/Arf),” *Current Biology* 27, no. 21 (2017).
- 45) S. Lee *et al.*, “Nanoparticle Size Detection Limits by Single Particle ICP-MS for 40 Elements,” *Environmental Science & Technology* 48, no. 17 (2014): 10291-10300.
- 46) F. Laborda *et al.*, “Single Particle Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: A Powerful Tool for Nanoanalysis,” *Analytical Chemistry* 86, no. 5 (2013): 2270-2278.
- 47) S. Taira *et al.*, “Mass Spectrometry Imaging: Applications to Food Science,” *Analytical Sciences* 30, no. 2 (2014): 197-203.
- 48) T. Oroguchi *et al.*, “Growth of Cuprous Oxide Particles in Liquid-Phase Synthesis Investigated by X-ray Laser Diffraction,” *Nano Letters* 18, no. 8 (2018): 5192-5197.
- 49) Adverse Outcome Pathway Knowledge Base (AOP-KB),
<https://aopkb.oecd.org/index.html> (2018年8月16日アクセス)
- 50) Adverse Outcome Pathway Wiki,
https://aopwiki.org/wiki/index.php/Main_Page (2018年8月16日アクセス)
- 51) M. Vinken *et al.*, “Adverse Outcome Pathways: A Concise Introduction for Toxicologists,” *Archives of Toxicology* 91, no. 11 (2017): 3697-3707.
- 52) Adverse Outcome Pathway Knowledge Base (AOP-KB),
<https://aopkb.oecd.org/index.html> (2018年8月16日アクセス)
- 53) S. Montesdeoca-Esponda *et al.*, “Analytical Approaches for the Determination of Personal Care Products and Evaluation of Their Occurrence in Marine Organisms,” *Science of The Total Environment* 633 (2018): 405-425.
- 54) The Human Exposome Project,
<https://humanexposomeproject.com> (2019年2月1日アクセス) .
- 55) C. Barata *et al.*, “Validation of a Two-generational Reproduction Test in *Daphnia Magna* : An Interlaboratory Exercise,” *Science of The Total Environment* 579 (2017): 1073-1083.
- 56) 環境省 中央環境審議会 土壌農薬部会農薬小委員会（第50回）資料4「環境大臣が定める水産動植物の被害防止に係る農薬登録保留基準の設定における種の感受性差の取扱いについて（案）」（2016年3月）.
- 57) R.Y-R. Wang *et al.*, “De Novo Protein Structure Determination from Near-atomic-resolution Cryo-EM Maps,” *Nature Methods* 12, no. 4 (2015): 335-338.
- 58) M. G. Campbell *et al.*, “2.8 Å Resolution Reconstruction of the Thermoplasma Acidophilum 20S Proteasome Using Cryo-electron Microscopy,” *eLife* 4 (2015).
- 59) R. Schlitzer *et al.*, “The GEOTRACES Intermediate Data Product 2017.” *Chemical Geology* 493 (2018): 210-23.
- 60) N. Shinohara *et al.*, “Long-term Retention of Pristine Multi-walled Carbon Nanotubes in Rat Lungs after Intratracheal Instillation,” *Journal of Applied Toxicology* 36, no. 4 (2015): 501-509.
- 61) W. Brack *et al.*, “The SOLUTIONS Project: Challenges and Responses for Present and Future Emerging Pollutants in Land and Water Resources Management,” *Science of*

- The Total Environment* 503-504 (2015): 22-31. ;ibid,544 (2016): 1073-118.
- 62) Solutions Project,
<https://www.solutions-project.eu> (2019年2月1日アクセス) .
- 63) MARS Project,
<http://mars-project.eu> (2019年2月1日アクセス) .
- 64) The Toxicity in the 21 Century (Tox21) program,
<https://ntp.niehs.nih.gov/results/tox21/index.html> (2019年2月1日アクセス) .
- 65) US Environmental Protection Agency, “Toxicity Forecasting,”
<https://www.epa.gov/chemical-research/toxicity-forecasting> (2019年2月1日アクセス) .
- 66) Kamel Mansouri *et al.*, “CERAPP: Collaborative Estrogen Receptor Activity Prediction Project,” *Environmental Health Perspectives* 124, no. 7 (2016): 1023-1033.
- 67) JFE テクノリサーチ株式会社「ナノマテリアル安全対策調査事業報告書」（2018年3月）、
<http://www.nihs.go.jp/mhlw/chemical/nano/nanopdf/H29houkoku/honbun/all.pdf>
- 68) Randy Showstack, “Climate Research Funding Still Under Threat, Report Warns,”
Eos 99 (2018).

2.2.3 汚染物質の除去・浄化

（1）研究開発領域の定義

汚染物質の除去・浄化に関する科学、技術、研究開発を記述する。

大気、水、土壌中の汚染物質等の除去・浄化に係る技術、研究開発を扱う領域である。

ここでは、環境や人体への影響が懸念される物質を、排出前または排出後に除去・浄化する技術を対象とする。大気汚染に関しては排ガス中の PM（排ガス中の PM の粒子個数濃度）や大型ディーゼル排ガスの対策技術、土壌・地下水汚染に関しては重金属類や揮発性有機化合物、放射性物質（放射性セシウム等）も対象に含める。

水処理技術については研究開発領域「水処理」で取り扱う。

（2）キーワード

自動車排出ガス、排気後処理、汚染物質、触媒、粒子捕集フィルター、規制開発、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

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

（大気）

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、窒素酸化物や粒子状物質などの有害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が施行されてきた。これらの規制が功を奏し、我が国の都市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。日米欧等の先進諸国を除くと、世界の各都市の大気環境は依然として深刻で¹⁾、排出ガス低減に対する要求は高い。

大気汚染源は自動車、船舶、航空等の移動汚染源と工場等の固定汚染源に大別される。都市の大気環境に大きな影響を及ぼす自動車排出ガスが特に注目される。排気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が適用されている。自動車の排出ガス抑制対策は、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ガス後処理から成り立っている。世界の自動車市場では、環境技術の優位性を保つことが産業競争力につながり、各国を代表する自動車メーカーが高度な技術をもとにしのぎを削っている。

（土壌・地下水）

土壌汚染は揮発性有機化合物（Volatile Organic Compounds : VOC）のように比重が水より重い物質は帯水層にまで深く浸透し、汚染が広域化してしまう問題があり、地下水汚染と一体的に考える必要がある。土壌・地下水汚染として、現在利用されている処理は掘削除去（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）が主体で、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。そこで、様々な手法を駆使して、特に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エーションが、大学や企業で研究されている。自然由来の重金属等による土壌・地下水汚染も国内外で引き続き課題である。さらに、我が国において 2011 年の福島第一原子力発電所事故に伴う放射性セシウムによる汚染土壌問題は継続して取り組まなければならない重要な課題で

ある²⁾。我が国では2014年から2017年にかけて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、土壌・地下水汚染が社会的に高い関心を集めたことが記憶に新しい³⁾。

[研究開発の動向]

（大気）

自動車排出ガス低減技術は、規制に対応する形で技術開発が高度化してきた⁴⁾。排出ガス低減システムとして、多くのガソリン車が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もので、現在、ハニカム状のコージェライトや金属などのモノリス基材が使用されている。2000年以降の規制ではコールドスタート時のエミッション低減に重点を置く規制が導入されてきた。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ことが必要で、この規制に対応するため。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きた。また、排ガスの酸化・還元雰囲気変動を利用して、貴金属が結晶から固溶・析出を繰り返す自己再生機能によって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た⁵⁾。近年では、燃費性能に優れた筒内直接噴射エンジンを採用したガソリン車が市場投入されたが、最新のディーゼル車を超える粒子排出があったことから⁶⁾、ガソリン車に対しても粒子に対する排出規制が導入されることになった。

ディーゼル車についても、都市部の大気環境改善に向け、特に2003年以降、厳しい排出規制が導入されてきた。国内においてディーゼル車にも酸化触媒、DPF、 NO_x 触媒などの排気後処理装置が採用されている。同時に、排気後処理装置の導入のための燃料開発も進み、触媒の被毒や劣化を防止するため、我が国のディーゼル燃料中の硫黄分は10ppm以下に低減化が進んだ⁷⁾。図2.23-1に日米欧の重量ディーゼル車の規制値の比較⁸⁾を示す。

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あり、上述のように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は問題視され、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⁹⁾。

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な技術であり、浄化性能としては、極めて高い水準に達している。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資源を有効に活用するための省資源化などがあげられる¹⁰⁾。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^{11)、12)}。

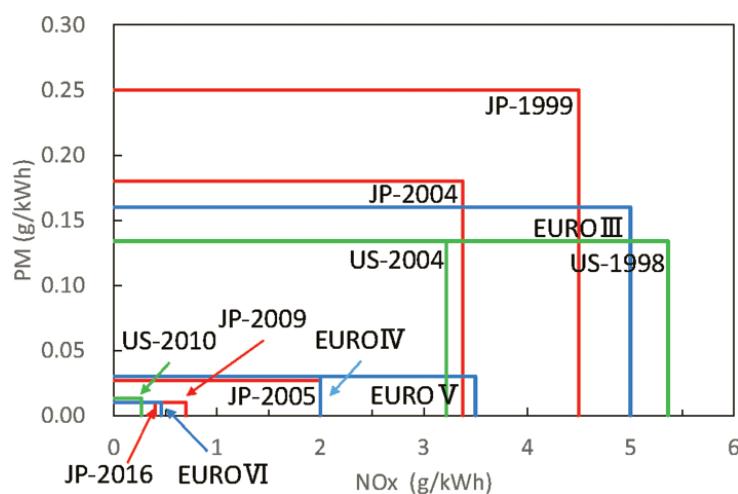


図2.23-1 ディーゼル重量車に対する日米欧の排出ガス規制値の比較

（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、我が国における土壌規制対策法の成立は 2003 年と他の公害と比べ遅かった。2010 年の法改正で自然由来の重金属含有土も規制対象に加わり、2017 年の改正で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・対策の一部緩和等が施行されている¹³⁾。

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。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がグリーンレメディエーションと総称されている。特に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、そのうち植物を用いる場合はファイトレメディエーションと呼ばれている。バイオレメディエーションは 2 種類に大別され、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バイオスティミュレーションと、汚染物質の分解菌を新たに導入するバイオオーグメンテーションがある。この処理は時間がかかるが、温和な条件のもと低コストで汚染を処理できるメリットがある。しかし、バイオオーグメンテーションは社会受容性の確保が必要となり、遺伝子組換え改良菌を利用する場合は一定の規制がかかる。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。現在、主に、ガソリン等の燃料油やその成分であるベンゼン、トルエン、その他の石油系炭化水素、トリクロロエチレン等の炭化水素系溶剤などの浄化に実用化されている。ダイオキシンや塩素系の残留農薬などへの応用研究も活発に行われている。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。薬剤や高いエネルギーを使用せずに、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 つで、国内外の鉱山跡地への適用が期待されている。自然力を活用してモニタリングしながら浄化の進行を科学的に判断するプロトコルである科学的自然減衰（Monitored Natural Attenuation : MNA）が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。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。企業や自治体は、操業中で資金に余裕のある段階からしっかりと土壤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。2016年には産業技術総合研究所において、サステナブル・レメディエーション・コンソーシアムが設立され、持続可能な土壤汚染対策への取り組みが進んでいる¹⁴⁾。

自然由来の重金属等による土壤環境への負荷の軽減は重要な課題である。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が、我が国では、砒素、鉛、カドミウムなどのバックグラウンドでの濃度が比較的多いとされ、また平均的な曝露量も欧米と比べて高くなっている。人為的な高濃度の汚染ではないため、低コストかつ周辺環境に配慮した環境対策を行うため、土砂から重金属等の溶出を低減する技術、吸着マットなどによる重金属等の除去技術などが活発に研究開発されている。

また新規化学物質に対しては、近年、1,4-ジオキサンや塩化ビニルモノマーなどの土壤・地下水汚染分野での評価や対策が進んでいる。

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。2011年度には内閣府・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壤等における放射性物質除去技術が開発された。また、同年度には「除染モデル実証事業」を日本原子力研究開発機構（JAEA）が受託して実施した。除染や廃炉に関連したセシウムやストロンチウム等の放射性物質を対象として、放射性物質の挙動の把握^{15)、16)}や、放射線遮蔽技術、吸着・洗浄に関する技術開発が行われている¹⁷⁾。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

（大気）

● 自動車用パワートレインの電動化

世界最大の自動車市場となった中国では、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。その背景には、エンジン技術では、世界の先端に迫っていくことが困難なことも大きな要因という認識がある。2019年から中国新エネルギー車規制（New Energy Vehicle : NEV）の導入が予定されている¹⁸⁾。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である。

欧州などでも、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なされている（表 2.23-1）¹⁹⁾。議論の段階であり、現在どの国も具体的な法規制には至っていないが、自動車業界にとって影響の大きな議論であり、注目を集めている。電気自動車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予測されている^{20)、21)}。EV と比較して内燃機関の技術優位性や価格競争力は高く、短中期に市場から消えないと推察されるが、各国の環境政策・産業政策

の動向に注視する必要がある。

表2.23-1 内燃機関自動車の販売禁止の議論や政治家発言など¹⁹⁾

国	内容	政治的状況	適用時期
オランダ	内燃機関を動力とする車の新たな販売の禁止	与党が提議し、下院通過	2025 年
英国	ガソリン車とディーゼル車の新たな販売を禁止	環境大臣による発言	2040 年
フランス	ガソリン車とディーゼル車の新たな販売を禁止	環境大臣による発言	2040 年
ドイツ	内燃機関自動車の販売禁止	連邦参議院が決議を採択	2030 年
インド	ガソリン車とディーゼル車の新たな販売を禁止、100%BEV 化	政府が表明	2030 年
中国	ガソリン車とディーゼル車の新たな生産・販売の禁止を検討	工業情報化部（MIIT）幹部が表明	

● 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⁸⁾。さらに、2014 年からガソリン車、LPG 車（液化石油ガス、Liquefied Petroleum Gas : LPG）に対しても PN 規制が実施されている。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）付きの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から、PN 規制の導入が検討しており²²⁾、今後 GPF への要求が高まるものと推察される。

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

自動車の排出ガスは、シャシダイナモを使った試験室での台上試験で測定されてきた。しかし、実路上での排出量と大きく乖離している問題から、欧州で 2017 年 9 月から RDE 試験が行われることとなった。RDE 試験は、公道上で車載排ガス測定装置（Portable Emission Measurement System : PEMS）を搭載した自動車を走らせ、実際の排出ガスを測定し、規制するものである。NOx と PN の規制上限値が設定されている⁸⁾。我が国でも、2022 年 10 月からの実施が決まっている。その他、国連の自動車基準調和世界フォーラム（UN-ECE/WP29）で、低温 / 高温における排出ガス試験を盛り込むことが検討されており、2019 年までに試験法を策定することで合意している。これにより、触媒等の排気後処理装置には、これまでより広範囲の運転条件下において、高い浄化性能が求められることとなる。

● 希薄燃焼ガソリンエンジンの開発

ガソリンエンジンの燃費向上には、希薄燃焼が有利であることは周知の事実だが、希薄燃焼範囲が限定的であることや排気中に酸素を含むため、三元触媒が適用できず、厳しい排出ガス規制への対応に対する困難さが実用化を阻んできた。最近、国内の自動車会社が、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販する意向を発表した²³⁾。排気後処理についての情報は公表されていないが、動向が注目される。

（土壌・地下水）

● 原位置浄化技術の新規開発

原位置浄化技術のうち化学的処理として、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および透過性浄化壁を用いた化学処理などがあげられる。これらは土壌汚染および土壌から溶出した重金属、VOC および鉱物油、さらには地下水の汚染に適用されている。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。

物理的処理としては、土壌洗浄やスパージングによる重金属や VOC の浄化・修復が行われている。土壌洗浄では、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っている。スパージングは主に地下水汚染に適用され、空気や蒸気、さらには反応性のガスなどを利用した種々のスパージング技術が開発され、土壌汚染現場で実践されている。最近では、マイクロバブルの長期にわたる機能性や選択性を用いた効率的な洗浄やスパージング技術も研究開発されている。

● 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²⁴⁾。

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。今後、法制度の中にリスク評価の枠組みを導入することにより、リスク低減とコスト軽減を同時に達成する合理的なサステナブル・レメディエーションを達成する基礎となることが期待される。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

（大気）

排気後処理装置については、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。これまでの技術開発は、主に企業で実施されてきたが、近年、触媒やディーゼル用粒子捕集フィルター（Diesel Particulate Filter : 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など、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国内でも始まっている。このような研究組織は、欧州、特にドイツにおいて数十年の歴史があるが、我が国でも、ようやく産学連携した研究組織で業界共通の基礎研究を行うようになってきた。以下に、主な研究組織やその動向を紹介する。

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

FVV、英語：Research Association for Combustion Engines）²⁵⁾

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で、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。

- 自動車用内燃機関技術研究組合（AICE）

ドイツの FVV などの研究組織を参考に組織された研究組合で、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。

- 戦略的イノベーションプログラム（SIP）「革新的燃焼技術」

内燃機関に関する基礎研究を行うプロジェクトで自動車会社と官学が連携して、AICE が実施支援している。排気後処理分野の研究においても、今後の研究成果が期待されている。

- 米国 US-DRIVE パートナシップ（United States Driving Research and Innovation for Vehicle efficiency and Energy Sustainability：USDRIVE）

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て、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まれている。

（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。

- 国家課題対応型研究開発事業「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」

平成 27 年度から「福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的新技术開発と人材育成プログラム」が実施され、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¹⁷⁾。

- 欧州 AquaConSoil

1995 年から数年ごとに土壌・地下水汚染問題がテーマの欧州「ConSoil」として開催され、2013 年からは水資源管理も含めて「AquaConSoil」と拡大した。2017 年の第 14 回・国際会議からは底質環境も加わっている。2019 年ベルギーで第 15 回・国際会議が開催予定だが、土壌と水資源の一体的な観点で持続可能な利用と管理がテーマとなっている。

（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。

● 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、低下傾向にあるが、一般環境大気に比べて高く、更なる低減が求められており、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。

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を維持することが要求される。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）が主流だが、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²⁶⁾。

● 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も開発されており、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

近年、燃費向上を目的として、アイドリングストップ機能搭載車や HEV、PHEV が市場投入され、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が、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²⁷⁾。RDE 規制対応にも有効な技術とみられ、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をさらに向上させるためには、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、産学連携の研究プロジェクトにおいて、このような取り組みが進行しているが、今後の進展が期待されている。

● 排気後処理システム全体の改良

現在の排気後処理システム、特に、ディーゼル車の処理システムは、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、複数の処理装置を直列に繋いだ、複雑で、それらを搭載するために大きなスペースを要するシステムとなっており、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。

（土壌・地下水）

- 1,4- ジオキサンや塩化ビニルモノマーは、それらの分配特性や環境中の挙動にも不明な点が多く、環境動態を考慮した簡易調査法の開発やシミュレーション技術の確立が求められる。新規化学物質による汚染は、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。

- 調査・分析技術

- ー安価で正確な公定法分析

土壌汚染の規制対象物質は 30 種類におよび、その分析コストは膨大である。効率的かつ低コストで実施できる一斉分析による公定法の手法や分析プロトコルの開発が求められる。

- ー現場で簡易に測定可能なオンサイト技術

公定法分析以外でも現場で簡易に汚染物質の判定や濃度レベルの検査はメリットが大きい。VOC や重金属等を対象とした現場型オンサイト測定・検査技術の開発が求められる。

- ー溶出試験を代替する試験法（カラム試験など）

重金属等の溶出試験法には多くの技術的な課題（再現性、ばらつき）があり、これを代替、補完する、ISO に準拠したカラム試験法などの公的試験法の開発が期待される。

- 浄化・修復対策技術

- ーバイオ（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完全な浄化といった技術的な課題が多い。地質や環境の諸条件の制約がきわめて大きく、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。別々に発展してきた、微生物の改変や耐性を中心とした基礎生物学や遺伝子情報の研究と、地質環境における微生物の生態や挙動に関する研究を融合させ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。

- ー複雑な汚染現場の状況と多様なエンジニアリング条件

汚染物質の溶出メカニズムには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）や地盤調査（地質）との連携による対策の効率化、建物直下における汚染の調査対策として水平ボーリング技術が求められる。効率性、コスト、土地の特徴や広さ、土地利用形態、社会的側面などの多様な制約条件があり、個々の技術で適用可能性が異なるため、それらの関連性を総合的に評価できる仕組みが存在しない。エンジニアリングマニュアルの整備が望まれる。

- リスク評価技術

- ー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。しかし、リスク評価に基づく合理的な対策が実現する可能性が高い。

ーモデリング技術の高度化

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

ー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求められる。

● 地圏環境情報の整備

ー地球化学図、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、もっと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。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および公開が求められる。

ー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正しく理解し、市民に伝えていく仕組みが存在しない。土壌汚染リスク情報の整備およびコミュニケーションツールの開発が望まれる。

● 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ンプラ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を構築して、大気、水質、地球環境（温暖化ガス）のトータルの環境保全を目標として、エネルギーの最小化、コストの軽減を図る技術体系である。汚染対策の資材を最小化し、廃棄物の循環を促進するため、公共事業や建設工事などと連携して総合的な設計を実現し、長期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することが可能である。

（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を除き、世界の大多数の都市の大気環境は、いまだ極めて厳しい状況である。原因の多くが自動車や発電所、工場、事業所等における燃料の燃焼に起因している。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、燃料の低硫黄化が達成されておらず、低排出ガスの車両が導入できない状況にある。経済的な事情から新型車への代替が進まず、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、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と考えら得るが、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

自動車排気ガスを中心に記載したが、船舶においても大気汚染物質の規制が進んでいる。マルポール条約（船舶による汚染の防止のための国際条約。世界 174 か国が加盟する世界海事機関が監督）の SO_x 規制を 2020 年に 3.5% から 0.5% に引き下げることが決定している。国土交通省から、世界各国で遵守されるためのガイドライン作成などの提案が行われている。

（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ものが多い。土壌汚染対策法での問題は、国際的に主流のリスクベースの対応をとっていないこと、溶出量と含有量の両者を採用していることなどである。これらは我が国独自の考え方なので、国内外で開発した新規の対策技術を導入する際に、技術と法制度のギャップが課題となる場合が多い。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制度の整備が期待される。

- 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な地域が多く、地域により重金属のバックグラウンド値の差異が大きい。このような地域特性は、居住する住民活動や農業活動、生態系を保全するための基盤となることから、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。土壌汚染野の専門的知識を有する人材がきわめて少なく、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が制定され始めている。中国では 2017 年度に「土壌污染防治法」が施行され、タイ国では地下水汚染対策を中心に法整備が進んでおり、いずれも予防措置を中心とした科学的なリスク管理の枠組みが提案されている。アジア諸国と連携して土壌汚染対策を共同で実践していくことは、国家や企業や環境対策のみならず、国際的なセキュリティの観点からも重要である。

（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	◎	→	●自動車の排気後処理技術に関する基礎研究は、主に、大学、国立研究機関、自動車会社や触媒メーカーの基礎研究所等において実施され、世界をリードする研究成果を生み出している。さらに、大学や国立研究機関と企業との共同研究も実施されており、これまでに、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。最近では、産業界が必要とする共通の基盤研究を産学官連携して実施する研究組織も設立され、自動車の排気ガス浄化技術についても、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。さらに、これらの成果をもとに、研究開発ツールとしてのモデル化の研究等を進めており、今後の発展が期待できる。
	応用研究・開発	◎	→	●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、市場でのシェアも大きく、世界をリードしている。世界の自動車技術者、研究者が参加する米国 SAE (Society of Automotive Engineers) においても、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いる。 ●ディーゼル車の分野については、欧州に比べて、産官学の連携研究の遅れなどから、後塵を拝していると言われた時期もあったが、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は、触媒や DPF などの後処理装置の性能に加えて、それらを有効に作動させるためのエンジン側の制御技術など、総合的な技術力が要求されるが、これらの分野についても、日米欧の厳しい排出ガス規制に対応できる高い技術力を有している。
米国	基礎研究	◎	→	●自動車排出ガス規制をリードしてきたことあり、広範囲の分野で、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、担体メーカーの基礎研究所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。
	応用研究・開発	◎	→	●長期間、自動車産業の中心地として、世界を牽引してきたこともあり、米国内の企業はもとより、世界有数の自動車会社や部品メーカー等が、開発や生産拠点を置いているため、研究開発水準は高い。特に、排出ガス規制については、日欧に比べて、厳しい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。
欧州	基礎研究	◎	→	●欧州では、以前から、研究コンソーシアムを組織して、企業における競争領域以外の基礎研究を産学連携して実施してきた。研究分野は、エンジンのみならず、排気触媒などの後処理分野含む広範囲に及んでいる。さらに、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が、自動車用触媒の材料や後処理装置内の挙動解明など、広範囲の分野において高い研究能力を有している。
	応用研究・開発	◎	→	●自動車用触媒をリードする主要企業があるに加えて、世界の自動車会社より、エンジンシステム開発の委託業務を行っている、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。 ●特に、欧州では、燃費の面で有利な、ディーゼル乗用車の普及が進み、この領域では世界をリードしていたが、最近、エンジンの排ガス制御ソフトウェアの不正が発覚したことから、ディーゼル離れが起こっており、今後の見通しは不透明である。 また、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、この分野では、一歩、先んじていると考えられる。

中国	基礎研究	○	↗	●環境触媒等の基礎研究においては、優秀な人材も多く、精力的な研究をしていると言われているが、自動車の排気浄化に関する分野では、近年、大学等から米国 SAE での報告も見られるが、注目すべき研究は、日米欧に比べて、少ない。
	応用研究・開発	○	↗	●今や、自動車、特に、乗用車では、米国を抜いて、世界一の自動車市場となった。そのため、世界の主要な自動車会社や排気ガスの後処理装置を含めた部品会社等が、現地企業との合弁等により、生産、開発拠点設けているため、応用研究や製品開発の領域では、世界的なレベルに達しているものと推察される。 しかしながら、中国政府は、エンジン車から電動車への転換を強力に推し進めており、今後の動向については、不透明感が高い。
韓国	基礎研究	△	→	●自動車の排気浄化に関する基礎研究においては、日米欧に比べて、学会（米国 SAE 等）での報告や注目すべき成果も少ない。
	応用研究・開発	○	→	●厳しい排出ガス規制がある欧米の市場に、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と考えられる。触媒等の後処理装置についても、世界の主要な触媒メーカー等の企業やそれらと提携した企業において、開発、生産が行われており、技術水準は高いと推察される。

（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	◎	→	●福島第一原子力発電所事故以降、放射性物質、特に放射性セシウムの吸・脱着やモニタリングなどに関する基礎研究が加速されたものの、土壌・地下水汚染研究領域において依然として非常に重要である重金属類や揮発性有機化合物などに係る研究は予算枠の相対的な減少などにより影響を受けており、国際的イニシアティブを確保するためには、今後更なる加速が必要である。また、揮発性化学物質の摂取リスクに関する研究は急務の課題である。
	応用研究・開発	◎	→	●基礎研究と同様、放射性物質による汚染の浄化や汚染水のモニタリング技術および処理技術などの応用研究開発が加速され、復興支援に貢献したものの、自然由来の重金属類や揮発性有機化合物による土壌汚染に係る低コスト・低環境負荷対策技術の開発は関連研究予算と提案数の減少に伴い減速傾向になり、今後加速する必要がある。また、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	◎	→	●アメリカ国立科学財団（NSF）や米国環境保護庁（US EPA）などのファンドによる土壌汚染に係る基礎研究が進められている。環境微生物や植物などを利用した浄化技術やリスク管理に基づく融合研究が進められている。
	応用研究・開発	◎	→	●米国 EPA や米国エネルギー省（DOE）などが管理されている実汚染サイトで、開発技術の検証や実証試験ができ、応用研究の環境としては非常に優れている。
欧州	基礎研究	◎	→	●欧州、特に英国においては、環境的側面のみならず、社会的側面および経済的側面も統合的に考慮したサステナブル・レメディエーションの研究開発が加速されている。
	応用研究・開発	◎	↗	●土壌・地下水汚染対策の新しい取り組みとして、英国を中心に提案されたサステナブル・レメディエーションに関する ISO 規格の提案が進められている。また、ドイツを中心に、PCB や多環芳香族炭化水素（PAH）およびダイオキシンなどの汚染物質に係る ISO 規格の提案も進められており、科学技術の国際的な競争は一段と激しくなっている。

中国	基礎研究	◎	↗	●環境に対する国民の関心が高まり、環境に対する投資も年々増加し、現時点では GDP の 2% 近くまで増加してきている。特に改正環境保護法の施行（2015 年 1 月 1 日より）や土壤污染防治法の公布（2017 年 1 月 1 日）に伴い、土壤・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	○	↗	●中国では、土地が 100% 国有であるため、現場または原位置実証研究が行われやすい。現在国内で開発技術した技術のほか、欧米などで開発した技術の検証やクロスチェックが複数の大型プロジェクトで行われている。
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が、留学生や研究者の海外派遣は目立つようになってきている。
	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レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

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

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

△：顕著な活動・成果が見えていない ×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）参考・引用文献

（大気）

- 1) World Health Organization (WHO), “Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease,” 2016.
- 4) トヨタ自動車 75 年史 第 2 部 第 2 章 第 3 節 第 1 項「排出ガス問題の発生」、
https://www.toyota.co.jp/jpn/company/history/75years/text/entering_the_automotive_business/chapter2/section3/item1.html（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 石油連盟「サルファーフリーについて」、
http://www.paj.gr.jp/eco/sulphur_free/（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 8) Diesel Net, “Emission Standards,”
<https://www.dieselnets.com/standards/>（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 9) 国土交通省「排出ガス不正事案を受けたディーゼル乗用車等検査方法見直し検討会 資料」、
http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_tk10_000035.html（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 10) 自動車技術会「技術ロードマップ」、
http://www.jsae.or.jp/roadmap/pdf/tec_01-6.pdf（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 11) 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.
- 12) 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.

- 18) DIAMOND online「巨龍・中国が世界覇権を狙って押し進める NEV 規制の中身」2018 年 6 月 4 日オンライン、
<https://diamond.jp/articles/-/171315>（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 19) 日本政策投資銀行「「EV 化」とは～各国の規制動向を踏まえて～」今月のトピックス No.281（2017 年 12 月 14 日）、
https://www.dbj.jp/ja/topics/report/2017/files/0000029348_file3.pdf（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 20) Shell, “Sky Scenario,”
<https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/shell-scenario-sky.html>（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 21) BP energy economics, “BP Energy Outlook 2018 edition,”
<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf>（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 22) 環境省 中央環境審議会「今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について（第十三次答申）」（2017 年 5 月 31 日）、
<http://www.env.go.jp/council/toshin/t07-2901.pdf>（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 23) マツダ株式会社「次世代ガソリンエンジン「SKYACTIV-X」」、
http://www.mazda.com/ja/csr/special/2017_01/（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 25) Dietmar Goericke 他「The Power of Joint Research - The FVV Innovation Network」『自動車技術会 2016 年春季大会 学術講演会 講演予稿集』（2016）: 2248-2250.
- 26) 株式会社キャタラー「NO_x 浄化用触媒システム HC-SCR」、
<https://www.cataler.co.jp/aee2018/diesel/hc-scr.php>（2019 年 2 月 1 日アクセス）.
- 27) 株式会社キャタラー「再始動 NO_x 排出抑制材料 (SRR-MIX)」、
<https://www.cataler.co.jp/aee2018/gasoline/srr-mix.php>（2019 年 2 月 1 日アクセス）.

（土壌・地下水）

- 2) 地盤工学会 第 8 小委員会 8-3 地下水地盤環境「アカデミックロードマップ」、
https://www.jiban.or.jp/images/file/AR_PDF/8-3AR.pdf（2019 年 2 月 1 日アクセス）
- 3) 豊洲市場土壌汚染対策専門家会議「豊洲市場における土壌汚染対策に関する専門家会議報告書」（2017 年 11 月）
- 13) 「土壌汚染対策法の一部を改正する法律」（平成 29 年法律第 33 号）
- 14) 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
- 15) T. Inui, *et al.*, “Cesium Sorption/desorption Characteristics of Sodium Bentonite Affected by Major Cations in Leachate from MSW Incinerator Ash,” *Japanese Geotechnical Society Special Publication* 2, no. 53 (2016): 1841-1844.
- 16) 池上麻衣子 他「土壌の熱処理による Cs, Sr の溶出特性の変化」『土木学会論文集 G（環境）』70 巻 7 号（2014）: III_203-III_208.
- 17) 国家課題対応型研究開発事業 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業「福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的新技術

開発と人材育成プログラム」（事業代表者：東畑郁夫）

- 24) 地圏環境インフォマティクスシステム（GENIUS）、
<http://geoserv.kankyo.tohoku.ac.jp/genius/>（2019年2月1日アクセス）