

2.7.4 生態系・生物多様性の観測・評価・予測

(1) 研究開発領域の定義

本研究開発領域では、陸域、陸水域、海域における生態系や生物多様性の地理的・空間的な分布、時間的な変動を複合的なスケールから観測、評価、予測するための研究開発を対象とする。具体的には衛星観測や航空機観測等から得られた画像データの解析、データロガーや音声データ等を使った行動追跡、環境DNAを用いた分子生物学的分析等が含まれる。また実地での大規模・長期観測や、データ蓄積・配信システムとしてのデータベース構築等の動向も扱う。さらにそれらを駆使しての生態系や生物多様性の形成・維持機構の解明や将来予測モデルの開発、気候変動や土地改変による影響の予測・評価も対象に含む。

(2) キーワード

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

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

気候変動等の社会と環境双方に関わる諸課題の解決に生態系や生物多様性の活用等を通じて取り組む「自然を活用した解決策 (NbS)」「自然を基盤とした解決策」や「自然に根ざした解決策」などと訳される場合もある) が、近年、国内外で推進されている。NbSは費用対効果が高いアプローチと言われることも多く、政策や経済の枠組みでも重視されつつある。NbSの実現 (立案や実施、進捗把握など) には生態系および生物多様性の観測が不可欠となるが、研究者自身が行う地上観測から国による衛星観測などリモートセンシングまで、あるいはそれらから得られるデータの統合や公開が、産学官をまたいだ国際的な連携によって進められている。

生態系や生物多様性に関する研究開発は野生生物や自然環境の保護、保全の観点だけではなく、システムとしての生態系の仕組みの理解や、システムの安定性および生物多様性が維持される要因の解明も目的となっている。研究成果は学術的理解の深化だけではなく、環境悪化の予測や防止、生態系の保全、環境の修復や再生、気候変動の緩和・適応などにも貢献する。ゆえに本領域は単に生物多様性の現状を知りその将来を予測することに留まらず、多様な領域の研究課題、社会課題に波及する学際的な意義を持つ領域である。最近では生物多様性に関する研究開発に対して国際社会や経済セクターからの関心が急速に高まっており、更なる発展が期待されている。生物多様性の危機は気候危機と並ぶ大きな環境問題であるとともに感染症の問題とも深く関わる。

[研究開発の動向]

(研究開発を取り巻く社会の動向)

国連の持続可能な開発目標 (SDGs) や生物多様性条約 (CBD) に代表されるように、生物多様性の保全と持続可能な利用の必要性は国際社会に広く浸透しつつある。2022年8月のNatureでは生態学の重要性を再強調する特集号が公表された¹⁾。その巻頭では「気候変動の課題を克服できるチャンスはそれほど大きくはないが、自然環境の観測モニタリングを怠るとその可能性はさらに小さくなる」と強調されている¹⁾。国内外の政策や経済の枠組みで近年重視されている「自然を活用した解決策 (NbS)」も観測なしには実施困難である^{2), 3), 4)}。国家管轄権外区域の海洋生物多様性、遺伝資源の取得の機会及びその利用から生ずる利益の公正かつ衡平な配分、越境汚染などに関する外交や国家間交渉においても生物多様性に関する科学的知見は重要な要素となっている。2021～2030年は「国連生態系修復の10年」と位置付けられ、国連環境計画 (UNEP) と国連食糧農業機関 (FAO) が主体となり、劣化または破壊された生態系を回復する取組みの促

進に取り組んでいる。

生物多様性の課題は金融界や産業界でも一層注目されている。近年特筆すべきは2021年にケンブリッジ大学のダスグプタ名誉教授がとりまとめ、英国財務省が発表した「生物多様性の経済学（ダスグプタ・レビュー）」である⁵⁾。この報告書は2021年のG7サミットなど国際的な政策議論でも繰り返し引用されており、「2030年までに生物多様性の減少傾向を食い止め、回復に向かわせる」との「ネイチャーポジティブ宣言」の発出につながった。また、同時期には「自然関連財務情報開示タスクフォース（TNFD）」が気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）に続く枠組みとして発足した。TNFDは、企業や金融機関が自然資本および生物多様性に関するリスクや機会を適切に評価し、開示するための枠組みの構築の必要性を求めるイニシアチブである。自然関連リスクに関する情報開示枠組みを基にネイチャーポジティブの実現を目指している。2022年にはTNFD枠組みのベータ版が公開され、多様なステークホルダーとの開かれた議論プロセスが進められている。これらを踏まえたバージョン1.0は2023年9月に公開予定である。この他、カーボンクレジットに準拠した生物多様性クレジットの議論も以前から行われている。こうした動きを受けて今後は科学的側面からの生態系・生物多様性の観測と実証へのニーズはますます高まると見られている。

CBDの第15回締約国会議（COP15）は世界的なパンデミックにより度々延期されてきたものの、2022年12月にカナダ・モントリオールにて開催された会合にて、2030年までの目標を定める「昆明・モントリオール生物多様性枠組」等が採択された。同枠組では、2030年までに陸と海の30%以上を生物多様性の観点から保護・保全する「30by30」等の主要目標が定められた。一般的に目標設定の国際的議論では単一数値目標が求められるがちだが、生物多様性の議論は包括的なものが必要とされる⁶⁾。課題を単純化させすぎず、同時に、社会や経済の枠組みでより分かりやすく、伝わりやすい国際的な目標の掲示が求められている⁷⁾。定量的な生態系・生物多様性の観測・評価・予測は、今回定められた2030年ターゲットの状況評価や2050年ゴールに向けての軌道修正などに必須とされている⁷⁾。

（近年の研究開発動向）

生物多様性の現状把握と将来予測に関わる研究開発は地域から国際レベルまで活発に進められている。DNAデータの活用や3次元スキャニングなど地上観測の手法やツールがより多様化するとともに、衛星やドローンなどの無人航空機（UAV）などによるリモートセンシングの発展も著しい⁸⁾。これらを用いて遺伝子から生態系レベルまでの生態系・生物多様性のモニタリングが進められている。生物種の分布と変動を予測するための統計モデルや機械学習などのツールも発展しており、種分化や進化を含めた生物多様性の形成や維持に関わるプロセスを探る理論と実証研究も着実に進展している。具体事例を以下に挙げる。

地上観測の技術ではドローン活用が広がっている。国家安全保障上の問題もあり航空法の改定など利用制限の枠組みも普及と同時に進められているが、それにも関わらず、ドローンによる調査手法の確立等によって活用が進んでいる。水中では無人水中探査機（ROV）の活用に加えて音響を使った観測技術の向上も見られる。バイオロギング・テレメトリー技術も進展しており、生物の個体群動態追跡や炭素等の物質循環への影響評価などにますます活用されている⁹⁾。また、生物に関するウェブ上の百科事典である「Encyclopedia of Life (EoL)」の拡充や、DNAバーコーディング技術のためのライブラリ構築を行う「International Barcode of Life Project (iBOL)」も進んでいる。近年のゲノム科学の進展に伴い、それらを活用した生物間の相互作用や環境変化の影響把握、あるいは生物分布の把握も進められている¹⁰⁾。

地球環境に関する衛星観測データの公開・活用に関しては、以前から活用されているものとしてランドサット衛星のデータ（1972年より運用）の無料公開がある。より解像度の高いものにはセンチネル-2の衛星画像データがある。可視・赤外域の放射計測については米国航空宇宙局（NASA）の地球観測衛星Terra/Aquaに搭載されている光学センサMODIS（中分解能撮像分光放射計）が2001年から運用されている。近年の特筆すべき動向はNASAとメリーランド大学による生態系観測ミッション（GEDI）である。国際宇宙ステーションからレーザー測量（LiDAR）を行うことで森林による炭素隔離と蓄積の推定精度を向上させるこ

とを目的としており、2020年1月に最初のデータが公開された。またこうした衛星観測データを一括してクラウド上で解析するツールの普及も進んでいる。Google Earth Engineが顕著だが、国内ではTellusなど国産のクラウドも推進されている。そこでは例えば毎年の季節ごとの正規化植生指数（NDVI）を全球で一括して計算することが可能になっており、地域から全球スケールまでの生態系の変化の把握に貢献している。マイクロソフト社も2017年からAI for Earthプロジェクトを推進し、深層学習を活用した衛星画像データからの土地利用変化の評価・予測、写真データからの生物種同定、カメラトラップデータの解析など、生態系と生物多様性の観測・評価に関するクラウドサービスを提供してきた。

生態系・生物多様性の予測のためのモデルに関しては、GBIFなどの生物分布情報と環境データを用いて各生物種の地理的分布予測を行う「生態ニッチモデリング（あるいは種分布モデリング）」では統計モデルが幅広く使われているが、ランダムフォレストやニューラルネットワークなどの機械学習を利用したモデルも利用されている。機械学習ツールの普及は著しく、観測、モニタリングを通じて蓄積されてきたビッグデータの活用を生かされている。海洋では陸域と同様の分布モデリングの結果が魚類情報データベースFishBaseや魚群探知機Aquamap等で取り上げられている他、海洋生態系モデルとして良く知られているEcopathやAtlantisでも利用されつつある。統計モデルについては状態空間モデルを含む階層ベイズモデルなど確率分布や非線形性、不確実性を高度に取り入れた手法の利用が進んできている。この他、近年は地球システム科学分野においても全球スケールの炭素・水循環や気候変動予測の精度向上のために生態系に関する知見がこれまで以上に重視されている。将来予測モデルとシナリオの解析研究に生物多様性の情報がより明示的に組み込まれるようになってきている^{11)・12)・13)}。

社会的側面の強い研究としては、食料や水、気候の安定、文化・景観などの社会基盤は生物多様性によって支えられることで生態系サービスとして社会に便益をもたらしているという、生物多様性と生態系サービスと人間社会の相互の関係性を実証した事例などが知られている¹⁴⁾。

（国際的な研究枠組みの状況）

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

国際的な生態系モニタリングとしては、1993年に「国際長期生態学研究ネットワーク（ILTER）」が設立され、参加各国・地域（2023年2月時点で39ヶ国、750サイト以上が登録）が長期観測に基づく生態系や生物多様性の変化に関するデータの収集と公開を行うとともに、データ・知見の共有を通じて大陸や地球規模の研究課題への取り組みを促進している。1999年には、生物種に関するデータ収集の国際プロジェクトである「地球規模生物多様性情報機構（GBIF）」が発足した。海洋生物については「国際海洋データ情報交換システム（IODE）」や「海洋生物多様性情報システム（OBIS）」が整備されてきた。これらを通じて観測データや博物館標本情報に基づく生物多様性の空間情報のデータ収集と公開が着実に拡充されてきた。2005年には、気候や気象、生態系等の地球環境の変化を多角的に監視・検出することで持続可能な社会の発展への寄与を目指す「地球観測に関する政府間会合（GEO）」が発足した。GEOは「全球地球観測シス

テム (GEOSS)」を推進し、そ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)」を2008年に発足させ、更に生物多様性を間接的に推定する指標群を提案した¹⁵⁾。2022年現在、GEO-BONは生態系の変化の「探知」とその「帰属」(駆動要因)の精査を積極的に推奨している。自然環境の変化の探知とその駆動要因の特定はIPCCにおいて頻出するアプローチである。今後の政策や経済の議論を支える上でも必要であり、その実現のために生態系モニタリングの維持とさらなる拡充が必須であるとしている。

(国内動向)

国際的な取組みへの日本の参加について、先述のIGBPに関しては1990年に日本学術会議が実施勧告を行った。これを受けてIGBPのコアプロジェクトとして「地球変化と陸域生態系研究計画 (GCTE)」が計画され、極東から東南アジアにかけた生態系観測の基礎が築かれた。この枠組みは現在も「西太平洋アジア生物多様性研究ネットワーク (DIWPA)」として引き継がれている。また、地球環境問題の解決には大陸・地域レベルの観測および意思決定が重要であるとの認識からGEOの下に地域GEOSSイニシアチブが2017年に構成され、日本はAsia-Oceania GEOSSイニシアチブ (2017~2019年)に参加し主導的な役割を果たした。その後、同イニシアチブはAsia-Oceania GEO (AOGEO、2020年~)となった。その他、国際的な取り組みであるGBIF、OBIS、GEO-BON、ILTER、iBOLに貢献するための日本ノードもそれぞれ設立されている (JBIF、BISMaL、JBON、JaLTER、JBOLI)。GEO-BONに関しては2009年に「アジア太平洋生物多様性観測ネットワーク (APBON)」も設立され、域内の各国研究者や機関、およびGEO-BONとの連携の下に推進されている¹⁶⁾。なおAPBONはAOGEOのタスクグループの1つでもある。

観測データの収集・蓄積に関しては、環境省の「モニタリングサイト1000」や「日本長期生態学研究ネットワーク (JaLTER)」等の枠組みを通じた生態系・生物多様性モニタリングおよびそのデータ公開や、林野庁実施の「森林生態系多様性基礎調査」などを通じて進められている。個別の研究機関や学会による取り組みもある。遺伝子情報のデータベースの整理も進んでいる。例えば国立遺伝学研究所が管理およびデータ公開を行っているDNA塩基配列のデータベース「DNA Data Bank of Japan (DDBJ)」や、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「MicrobeDB.jp」等がある。環境DNAの活用も急速に普及しており、世界的にも日本は先導的な立ち位置にある¹⁷⁾。観測データの収集・蓄積を科学的な活動として評価する動きも加速している。例えば日本生態学会の英文誌Ecological ResearchではData Paperというデータ提供に特化した学術論文のセクションが追加されている。

評価や予測の分野の研究では、気候変動による陸面植生の変化や、その結果起こる大気・陸との相互作用の変化などをシミュレーションする動的全球植生モデル (SEIB-DGVM)の開発が進みつつある。状態空間モデルや機械学習を利用した生態系評価も行われており、既存データの拡充と利用の双方が望まれている。気候分野におけるモデリングやシナリオ解析に比して生物多様性分野は日本は主導的な立場をとっているとは言いがたい。しかしモデルの生理生態学的側面、理論的側面を支えてきた基礎科学における長年にわたる日本の功績は無視できず、今後の基礎と応用での研究開発の発展が望まれている。

研究を取り巻く政策的な動きとしては、第6期科学技術・イノベーション基本計画において生物多様性の劣化は気候変動やパンデミックと並んだ全世界的課題 (グローバル・アジェンダ)であると強調されている。特に気候変動は生物多様性劣化の要因である一方、生物多様性の基盤となる森林生態系等はCO₂吸収源となるなど、相互に緊密に関係していると指摘している。そのため生物多様性保全と気候変動対策のシナジーによるカーボンニュートラルの実現に向けた研究開発を行うことで、吸収源や気候変動への適応における生態系機能の活用等を図ることの重要性が明記された。こうした観点からの研究は実施され始めており、すでに定量的な成果も公開されている¹³⁾。我が国の地球観測の推進においても生態系・生物多様性分野の観測動向がますます注目されている¹⁸⁾。

2021年に公表された「生物多様性及び生態系サービスの総合評価 (JBO3)」では、日本の生物多様性の「4

「つの危機」は依然として深刻で、生態系サービスも劣化傾向にあるとされた。これまでの取組により生物多様性の損失速度は緩和の傾向が見られるが、まだ回復の軌道には乗っていないとの結論である。生物多様性の損失を止めて回復軌道に乗せる「ネイチャーポジティブ」に向けた行動として、日本は2030年までに陸域・海域の少なくとも30%を保全・保護することを「G7 2030年自然協約」において宣言した（2021年6月英国開催G7サミット）。この目標達成のため、法制度に基づく保護区ではないが生物多様性保全上重要な地域（Other Effective area-based Conservation Measures：OECM）に対する関心が世界的に高まっており、実効性のあるOECMの管理と設定に取り組む必要があると指摘されている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

- ・米NASAとメリーランド大学が生態系観測のミッション（GEDI）を推進している。本ミッションは国際宇宙ステーションからレーザー測量（LiDAR）を行うことで森林による炭素隔離と蓄積の推定精度を向上させることを目的としており、2020年1月に最初のデータが公開された。解像度は粗いものの、データを活用する研究機関や民間企業は年々増加している。
- ・局所的なりモートセンシングで、無人航空機（UAV）に代表される小型かつ自律的な観測・計測技術が普及している¹⁹⁾。地理的に複雑な場所や火山現場など接近困難な場所等における観測など、幅広い用途が検討されている。
- ・海洋分野においては技術的にはUAVに相当する無人探査機（AUV）、無人洋上機（ASV）が開発され、海洋保護区でのモニタリング活用も進められている。水中音響技術の蓄積も進み、音響データ合成開口技術や地層データの自動合成などが試みられている。得られたデータの解析では機械学習の活用が広がっている。関連する画像処理技術、例えばStructure from Motion（SfM）のような画像結合技術を研究に取り入れる試みもある。
- ・データロガー、マイコン、カメラ、レコーダー、測位・情報通信技術の普及により、生物と環境に関する局所スケールでのトラッキングやデータロギングが可能となっている。小型動物や海洋生物についての行動データ、陸上植生の季節性の年変動や地理的分布に関する画像データ、生物・非生物を問わない長期観測データ、移動や分布データ等の収集が進んでいる。
- ・機能形質データベースの整備と利用が進んでいる。植物のデータベース「TRY」がよく知られており活用されている²⁰⁾。節足動物、サンゴやその他の海生生物などの分類群についても拡充しつつある。
- ・画像解析をはじめとするクラウド上での解析ツール・サービスが充実しつつある。グーグル社のGoogle Earth Engine上には衛星画像データが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ことから研究活動にも利用されている。なおグーグル社はフィランソロピー事業としてスイスのチューリッヒ工科大学のチームが進める生態系復元活動データベース「Restor」の運用を技術提供のみならず資金的にも支援している（初期支援額は100万米ドル）。またマイクロソフト社はAI for Earthプロジェクトを通じて衛星画像、写真、動画、現地観察などのデータを機械学習、深層学習などにより解析するクラウドサービスを提供している。同社はGEO-BONと協働して生態系の管理と予測へのAI技術活用も進めている。さらに同社は地球上の自然体系の監視、モデル化、管理の方法を変革するためにAIを活用する個人および組織のプロジェクトに対して助成金の提供も行っている。
- ・機械学習や深層学習、状態空間モデル等のベイズ統計、Empirical Dynamic Modelling（EDM）による因果関係推定法などの統計・計算ツールが普及している。Rソフトウェアのパッケージ導入により、これらが容易に利用可能になっている。
- ・生態系サービスの評価モデルについても精力的な研究・開発が行われている。生態系サービスの潜在的な供給量の数値化・地図化が可能なモデルが数多く提案されており、GUI操作が可能なソフトウェアも整備されている（InVEST、TESSA、ARIES、LUCIなど）。陸域・海域ともにモデル開発は進展してお

- り、世界各地での多様な使用例が報告されている。
- 生態系機能あるいは生態系サービスと生物多様性との間の関係性が、動植物や微生物を含む形で明らかにされつつある¹⁴⁾・²¹⁾・²²⁾。生物多様性が生態系機能とサービスを支えることによる、生物多様性の資本としての経済価値の評価がなされ始めている¹³⁾・²³⁾。こうした研究では1990年代から進められてきた大規模な野外操作実験の結果が利用されており、世界中でさらに拡充しつつある²⁴⁾。
 - 市民科学の展開も注目されている²⁵⁾。eBirdやiNaturalistは市民科学のプロジェクトであり、ナチュラリスト、市民、そして研究者を対象としたソーシャルネットワーキングサービスである。国内でもBiomeなどのアプリケーションが普及しはじめている。地球上の生物多様性に関する観察記録を共有し、種同定を助け合い、地図上に残すことなどを目指している。近年は、画像データについて、深層学習向けにラベリングされたデータセットの共有や作成、アプリケーションの開発などが行われている。
 - 国内では第24期日本学術会議若手アカデミーがシチズンサイエンスに関する「提言」を发出しており²⁶⁾、それを受けて日本放送協会（NHK）がシチズンラボを2021年から開始するなど市民科学に関する社会の関心が高まっている。内閣府が主導するムーンショット型研究開発事業の「資源循環の最適化による農地由来の温室効果ガスの排出削減」プロジェクトでも市民科学プロジェクト「地球冷却微生物を探せ」が進められている。産学連携による取組みも進んでおり、例えばモンベル社と京都大学などによる、河川の水を調べる「森の健康診断」調査がある。大学等研究機関と市民科学の連携としては環境DNAを活用した生物分布情報の収集がますます進んでいる¹⁷⁾。環境DNAを利用した生物調査プラットフォームANEMONEなど全国規模の観測体制の構築とデータベース化、データの共有化の動きも見られる。
 - 環境DNAデータについてはGBIF/OBISでも登録できるよう拡張がなされ、世界遺産地域での観測や侵入種検知などのプロジェクトが推進されている。メタバーコーディングもさらに普及しつつあり、微生物群集の定量化がさらに容易となった²⁷⁾。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。
 - ビジネスにおける環境の外部不経済の評価、管理、報告に関する統一的方法の研究などを行う非営利組織「自然資本連合（Natural Capital Coalition）」は2014年に開始した国際的なイニシアチブである。企業の意思決定に自然資本の考え方を組み入れることを目的とし、自然資本会計の世界標準となる枠組み（自然資本プロトコル）を策定している。2020年7月には「自然のためのキャンペーン（Campaign for Nature）」という国際パートナーシップにおいて陸海の保護区を地球表面積の30%まで増やすことで経済発展が見込まれるとの定量評価結果を公表した²⁸⁾。生物多様性と生態系の保全を経済発展と両立させることについては世界経済フォーラムをはじめ経済セクターでの関心が高まっている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■国内

- 学術変革領域研究（A）「デジタルバイオスフェア：地球環境を守るための統合生物圏科学」（2021年度～2025年度）

生物圏の主要機能（森林機能、土壌微生物機能、大気-森林生態系の物質交換機能など）の詳細解明に取り組むとともに、数km規模の高空間分解能かつ日単位以下の時間分解能で生物圏によるCO₂固定量とバイオマス供給量を全球規模で予測する生物圏モデルの構築を目指す。またモデルを使った分析に基づき大気CO₂の吸収固定（緩和）等に関する対策提案も行う。

■国外

- 国際長期生態学研究ネットワーク（ILTER）

44の国と地域が加盟する国際ネットワーク²⁹⁾。日本は2006年にJaLTERを設立以降、ILTER東アジア太平洋地域ネットワーク（ILTER-EAP）に貢献し続けている。JaLTERには約30の大学や研究機関等による森林、草原、湖沼・河川、農地、沿岸・海洋などの約60の研究調査サイトが参画している。こうした長期

生態系研究サイトのネットワークを活用した生物多様性や生態系機能に関する多地点メタ解析、長期トレンド解析、全球比較研究が行われており、優れた研究成果が集積してきている^{30), 31), 32), 33), 34)}。

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

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

• 湖沼生態系観測のための国際ネットワーク (Global Lake Ecological Observatory Network : GLEON)

湖沼の物理環境、水質、生物群集等を対象に、観測ネットワークの構築と湖沼間比較研究を行う国際的なネットワーク。長期モニタリングデータに加えて、センサーで取得された高頻度観測データの共有・比較解析等を行っている。多様性を重視したネットワークであり、学生や若手研究者の支援、観測技術や解析技術の共有等を通じた湖沼研究の底上げを図っている。数多くの研究プロジェクトが同時に進められており、それらの成果はNature³⁵⁾を含む国際誌にて数多く発表されている。

• 研究施設のネットワーク化と活用促進 (Aquacosm プロジェクト)

欧州では生態系や生物多様性に対する温暖化の影響に関する研究を一層推進するために、EU圏内のみならず圏外のユーザ研究者に対しても既存実験施設を利用可能にし、研究資金も支援している。「Aquacosm」プロジェクトではEU圏内にある水圏生物を対象とした操作実験可能な海洋・湖沼の隔離水界施設をネットワーク化し、一括した利用公募を行っている。そこでは20%をEU圏外の研究者による利用とすることで研究者間の機会公平と国際的な研究推進も促している。

• 生態系研究インフラの構築・活用による観測およびデータ供出

主要国では国の支援による生態系研究インフラがある。生態系研究インフラとは、陸上生態系の機能と動態、あるいは気候変動による影響などに関して、地上での観測からデータ品質管理、一次分析、知見供出やデータ公開までを担う研究開発・情報公開機関を指す。現時点では米国NEON、中国CERN、豪州TERN、欧州ICOSが知られている。加えて欧州ではHorizon2020の一貫として欧州LTER (eLTER) 開発プロジェクトも2020年に開始した。また2020年にはこれらの生態系研究インフラが連携して協調的に観測・データ供出を推進することを目的にGlobal Ecosystem Research Infrastructure (GERI) が締結された³⁶⁾。

米国のNEONに対しては10年間で4.3億ドル (約460億円) という巨額の予算がNSFを通じて投じられることが2011年に承認された。その後、予算調達等の問題により一時的に停滞していたが、2019年に全米81か所に観測サイトが設置された。現在、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収集されリアルタイムで公開されている。

気候変動や人間活動による環境変化が生態系・生物多様性に及ぼす影響の的確な監視と、データや知見のタイムリーな供出のニーズが高まっている。これに応えるため生態系研究インフラを拠点とした地上観測と衛星観測の結合、データの一元的集約からの知見創出、予測モデルへの連結を実現する体制構築が喫緊の課題とされている。

• データ統合・理論研究のためのワークショップ

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

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

PREDICTS と BIOTIME はいずれも長期広域の観測に基づく生物多様性の評価と予測のための国際プロジェクトで、英国の大学等研究機関が中心となって実施されている。Nature や Science をはじめとする学術誌に定期的に成果が出されている^{37), 38)}。PREDICTS は世界中の陸域生物の分布情報を集約している。土地改変が生物多様性に及ぼす影響についての研究などが行われている³⁸⁾。BIOTIME は世界中から生物多様性の時系列変化のデータを集め、解析を行っている³⁷⁾。なお PREDICTS や BIOTIME は種レベルでのデータ蓄積を行っているが地域や分類群には依然として偏りがある。

• 生態系修復のプラットフォーム (Restor)

スイスのチューリッヒ工科大学のグループが 2019 年に Science で公表した研究は、後に計算間違い、過剰評価、社会的不合理性などにより大幅な誤りを著者らが認めたものの、世界中の植林可能地域で樹木植栽を行うことによる炭素吸収が、大気中の温室効果ガスを大幅削減する可能性を指摘した³⁹⁾。この研究には多くの批判が寄せられた^{40), 41), 42), 43)} が、世界経済フォーラム主導の 1 兆本の植樹キャンペーンにつながるなど科学だけではなく政策やビジネスにも大きな影響を与えた。またその後、グーグル社が同グループに技術と資金提供をし、地域の生物多様性、潜在的な植生と土壌の炭素量、土地被覆などのデータが表示されるプラットフォーム「Restor」のウェブ上での公開を支援した (Google Map 上にデータが表示公開される)。2022 年 9 月現在、世界中の約 13 万か所の情報が掲載されており、5 言語でアクセス可能となっている。このプロジェクトは国連の「生態系修復の 10 年」の実現に向け、科学研究だけではなく実務者支援も目的としている。

• 土地改変による生物多様性と生態系サービスへの影響評価 (Biodiversity Exploratories)

Biodiversity Exploratories はドイツで進行中の大型研究プロジェクトであり、土地改変が生物多様性と生態系サービスに与える影響の評価に取り組んでいる。ドイツ 3 地域を対象に、1,000 以上の調査区を設け、動植物や微生物についてのデータを収集している。300 名以上の研究者やスタッフが関わっており、個別に 40 以上のプロジェクトが進行している。Nature^{44), 45)} をはじめ、研究成果が影響力の高い学術誌に続々公表されている。

• 大規模操作実験

大規模な生物多様性操作試験からインパクトの大きい研究成果が報告されている。例えば中国において BEF-China (Biodiversity-Ecosystem Functioning Experiment China) という研究プラットフォームが 2008 年から設置されている。BEF-China には 30m × 30m の比較研究プロットが 27 と、約 20 ha の広さの試験地が 2 つある (試験地の中には合計 566 の試験プロット)。これらを使って非常に大規模な樹木多様性の操作試験が行われ、森林の樹木多様性がどのように一次生産性や炭素隔離の機能を支えているかの理論的解釈が進んできた。これらの成果は Science をはじめ影響力の高い学術誌で成果公表が続いている^{46), 47), 48)}。なお BEF-China には欧州 (ドイツ研究振興協会、スイス国立科学財団) からの資金援助もあるが、中国国家自然科学基金や中国科学院からも助成を受けており現在は独立しつつある。

大陸をまたいだ生物多様性の野外操作実験も盛んに行われている。IDENT と呼ばれるプロジェクトでは同一の樹種の組み合わせで北米と欧州の各地に樹木多様性試験地を設けている⁴⁹⁾。ミネソタ大学を中心とする

Nutrient Networkでは、統一プロトコルに基づく栄養塩添加実験が世界中で実施されており、着実にNatureやScienceなどで論文公表が続いている^{50), 51), 52), 53), 54)}。

地球上の生態系-気候系の炭素動態を大きく規定する樹木枯死材の分解過程を精査するための大規模な実験が世界各国をまたいで実施され、その成果は近年Nature⁵⁵⁾やScience⁵⁶⁾などで公表されている。なおこれらの研究には日本からの参加も認められるものの主導的な立場ではない。

(5) 科学技術的課題

• データ蓄積、データ基盤整備

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

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

データの流通や共通化、解析技術の共有などデータシェアの基盤となるプラットフォームの整備が進んでいない。また、データの取得や整理、品質管理についての自動化、種分布やゲノム情報のビッグデータの収集・解析のためのインフォマティクス技術の普及や技術者育成などがビッグデータサイエンスへの期待やニーズの高まりに追いついていない。

• DNA情報や安定同位体を用いた解析技術

環境DNAの普及は目覚ましいものの、種の在不在を確認するだけでなく、存在する種の個体数やバイオマス、個体群の遺伝的特性なども把握できる技術へと進化させることが課題となっている。異なる栄養段階にある分類群の「食う・食われる」の関係性やネットワーク構造も含めた網羅的把握に向けた安定同位体やDNA情報や画像解析等を組み合わせた技術の開発も課題になっている。

• 生物多様性を評価する指標の開発

種数以外の指標に基づいて生物多様性の時間的・空間的な分布を評価するための新たな指標の開発が求められている。GEO-BONではEssential Biodiversity Variablesが提唱されている¹⁵⁾。また、これを応用したEssential Ecosystem Services Variablesの検討も進んでいる⁵⁷⁾。海洋分野では全球海洋観測システム(GOOS)からEssential Ocean Variablesが提唱されており、この中には海洋生物多様性にかかる変数も含まれる⁵⁸⁾。気候変動分野では全球気候観測システム(GCOS)からEssential Climate Variablesが提唱されている。これには生態系の構造・機能に関する変数が含まれており、地上観測コミュニティとの連携が課題とされている⁵⁹⁾。なお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ことが繰り返し強調されている。また機能的・系統的多様性といった別の指標は必ずしも種数の傾向と一致せず⁶⁰⁾、それゆえ各種指標の時空間分布に関してバイオームをまたいで網羅的に把握する必要があると考えられている。特に土壌や深海など、調査研究が困難な対象システムに関してはより実効性のある世界的な観測と予測の枠組みの構築が必要とされている⁶¹⁾。

世界的に最も活用されている指標としてRed List Index (RLI)とLiving Planet Index (LPI)がある。前者は、国際自然保護連合(IUCN)による生物種の絶滅危惧評価である。後者は、世界自然保護基金

(WWF) の評価による。LPIは国によっては対象種が少なく、限られたわずかな種の情報に依存しがちであり、不確かさを覚える研究者も多いが、その反面、世界的に影響のある評価論文の根拠となっていることも多い。たとえば2020年にNatureで公表された論文⁶²⁾には非常に多くの反対意見論文が追従した⁶³⁾。このように行政や産業界からのニーズが高まる一方で、生物多様性の状況評価の方法、指標化については研究の余地が残されている。

• 生態系サービスの評価・予測

生態系サービスの定義、ならびに現状評価や将来予測のモデリング方法に関する研究開発も必要とされている。「仮想的市場評価法」などの経済学的アプローチや「自然資本プロジェクト (Natural Capital Project)」が提供するInVESTの活用事例が知られているものの、統一化した手法は未だ確立されていない。資本としての自然がどれだけあるかだけでなく、生物による環境変化や生物間相互作用などの生態系プロセスを含めて、それらから生じる生態系機能とサービスの経済評価が求められている。

花粉媒介のような栄養段階をまたぐ生態系サービスや、社会的な状況に大きく影響を受ける文化的サービスなどの変動を予測することは技術的に難しいとされている。特にこれらのサービスに関する定量的な情報をアーカイブする共通のフォーマットやデータベースが存在しないことも国際比較を困難にしている。また生物種の分布予測モデル (ニッチモデリング) のような確立した手法が生態系サービスの地図化や広域評価には存在しないため、観測データを政策決定に利用できるモデルの開発が課題とされている。

• 大規模野外操作実験

湖沼や流域といった空間スケールで、システムをまるごと操作対象とする大規模長期試験は、海外では先行事例が多く見られる。例えばBEF-Chinaは流域スケールで樹木多様性操作を行い生態系機能への帰結を評価している⁴⁸⁾。Aquacosmのような環境操作実験施設は、生態系モデルの検証や複雑な相互作用の抽出など、観察だけでは得られない情報を担保する。このような生態系や生物多様性を対象とした操作試験は短期的な成果を得られるものではないが、動的かつ非平衡システムとしての生態系の挙動を予測するために極めて有効な手段と考えられている。環境変動が著しい昨今、複雑系を扱うための基礎情報を集める位置づけとしても大規模操作試験の役割は大きくなると考えられている。

• 政策のための科学

科学的知見や各種技術を国内施策 (生態系管理、自然再生、災害対応等) への反映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、IPCC、GEO、Future Earth等) への貢献などに繋げていくための持続的な仕組みの構築が必要と認識されている。そのためには気候変動対策をはじめとする各種施策とのトレードオフやシナジーの検討 (再生可能エネルギー適地と多様性保全地域のバランス等) や、多様な地球観測データを用いた課題解決のユースケースの蓄積と共有、さらに民間企業や市民を巻き込んだ研究開発の実施や意識の醸成等も必要となる。

• 生態系・生物多様性と感染症の関係性

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

環境保全の費用対効果の高さも認識されつつある^{64), 65)}。

(6) その他の課題

JaLTERをはじめとした観測・研究ネットワークから得られる観測データの整備や拡充、ならびにオープンサイエンスの推進にはデータベースが必須である。しかしいまだにその多くが研究者個人による資金調達に依存しており、中長期的観点に立った維持運営が困難な状況にある。

日本語のみで整備されたデータベースもあり、利用者拡大の障壁となっている。国際共同研究を促進するためには英語等によるデータ公開が必要となる。また世界的なデータ公開や学術論文のオープンアクセス化に応じた支援システムの構築も急務となっている。基金を整備するなどオープンアクセス費用を支援する仕組みが必要とされている。日本の現状では、研究費削減の流れの中、オープンアクセスのオプションに予算を配分する余裕がない研究室も多く、欧米諸国に比してオープンアクセス化した論文やデータの公開が圧倒的に少ない。またデータの流通や共通化などを進めようとした場合、海外では情報科学を専攻したテクニシャンが分類学者の研究室で働く例などが見られる。しかし日本では分野間の垣根が高くそうした事例はあまり見られない。これらの課題はオープンデータの基準であるFAIR原則（Findability, Accessibility, Interoperability and Usability）の実現にも関わると認識されている。

気候変動下での生態系・生物多様性状況の分析・可視化・予測が今後ますます重要性を増すことから、地球システムや気候変動に関するデータベースとの連携も必要とされている。2011年度に実施された「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス（GRENE-ei）」において多様な地球観測分野のデータベースの連結が開始されており、その後の発展が期待されている。

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

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

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●個人レベルで実施される理論研究は依然として日本の強みとなっている。 ●一方で、欧米のような組織だった大規模データ取得と統合研究が進んでいるとは言い難い状況。大規模かつ広域なデータ統合に基づく実証研究などについても欧米諸国に対するデータ提供者という立場である傾向が強く主導的立場とは言い難い状況。 ●BISMaL、JBIF、J-BONをはじめとする国内のデータノードと博物館や大学をはじめとする協力機関の活動による生物分布データの蓄積がある。一方で、過去の情報の電子化・公開、新規の情報収集については十分には進んでいない。ただしJaLTERや環境省モニタリング1000など継続した取り組みがあり、生物種の在不在情報だけでなくその後の変化を追うデータが集積されていることは特筆すべき事項であり、生物モニタリングデータの充実度は世界屈指と言える状況。 ●IPBES、IUCN、Future Earthなどの国際的な取り組みへの貢献が続いている。 ●環境DNAをはじめ、音や画像の記録も含めた新規の観測技術の開発において日本は変わらず世界的にも主導的立場にあると言える状況。

	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●自然を活用した解決策 (NbS)、生物多様性やTNFD、グリーンインフラへの関心の高まり等を受けて、国内でも生態系・生物多様性の観測や応用研究へのニーズが高まっている。生物多様性条約下での2030年ターゲット (および2050年ゴール) を想定したOECDや30by30の議論に後押しされた応用研究ニーズも高まっている。 ●日本の状況についてJBO3 (生物多様性及び生態系サービスの総合評価報告書第3版) が2021年に公開され、知見が不十分な分野の存在など、国内の状況把握のために必要となる応用研究が顕在化してきている。 ●気候変動が生態系・生物多様性にもたらす影響の詳細な解明および広域診断の推進のためには地上観測と衛星観測の連携が必要となるが、地上観測とそのデータ品質管理およびデータベース化が十分に進んでいない。 ●応用研究へのニーズの高まりを受けて、広域の生物多様性情報の集約や推定などが実施されている。これに基づく生態系の環境変動や自然再生に関する研究論文も公表されている。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●多様な研究が国際的な連携の下に行われている。多くのプロジェクトにおいてイニシアチブをとっている。 ●LTERなどモニタリングとそのデータ整備の国際的な発信源にもなっている。その中には長期にわたり維持され続けている大規模野外操作試験も含まれる。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●多様な研究が国際的な連携の下に行われている。多くのプロジェクトにおいてイニシアチブをとっている。 ●モニタリングデータの活用から各種モデルの応用まで、幅広く応用研究も実施され成果を公表している。 ●マイクロソフト社やグーグル社などの民間企業による研究支援がさらに拡充している。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●多様な研究が国際的な連携の下に行われ、多くのプロジェクトにおいてイニシアチブをとっている。特にドイツと英国、スイスが生物多様性の世界的な統合研究のイニシアチブを取っている。PREDICTSやBIOTIMEが英国主導である。ドイツは国際共同研究と国内での共同研究プロジェクトの拡充の双方に注力している。Science等で成果発表が続いているBEF-Chinaも中国への資金援助と技術提供を行っているのは主にドイツ、スイスの政府および研究者である。 ●GBIF、OBIS、TRYなどの世界規模のデータベースを維持している。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●多様な研究が国際的な連携の下に行われている。多くのプロジェクトにおいてイニシアチブをとっている。 ●スウェーデンには、レジリアンス・アライアンスの中核を担うストックホルム・レジリアンスセンターがあり、精力的に活動している。 ●資源管理などではNGOの協力もあり積極的に国際会議を開催し、その成果のとりまとめや国際規格の作成、管理プログラムの検討を実施している。研究者層も厚く、基礎から応用まで多くの人材が揃っている。 ●ドイツ、スイス、オーストリアなどでは森林生態系に関する研究分野では、国際宇宙ステーションからのレーザー測量 (GEDI) や衛星写真などの衛星ベースの広範囲リモートセンシングデータを活用し、土地利用変化、森林のバイオマス、微気候などを欧州全体でマッピングする試みが活発化している。
中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●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。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應する例も見られる。 ●データベース拡充や観測なども大型プロジェクトとして国内外と連携して組織的に進めている。 ●化学分析や遺伝データのシーケンシング等においても安価に実施できる民間企業があり、官民ともに生物多様性研究を推進する体制が充実している。 ●海外に流出した人材の呼び戻しを積極的に進めている。国外にいる中国人研究者と連携を強めることで国際競争力を高める傾向も強まっている。 ●結果として学術論文の出版数も急増している。

	応用研究・開発	○	↗	●多様な研究が国際的な連携の下に行われている。海外の主要研究者や中国人研究者との共同研究もさらに推進されており、国際競争力を高めている。
韓国	基礎研究	○	→	●国立生態院がEcoBankという生物多様性の地理情報をデータベース化・公開する取り組みを実施。 ●East Asian-Australasian Flyway Partnershipの事務局や南極海についての国際会議の検討、その他の国連条約の事務局誘致などの活発な活動が見られる。
	応用研究・開発	△	↘	●国立生態院を中心に生物多様性・生態系の研究および社会へのアウトリーチ活動が進められている。
豪州	基礎研究	◎	↗	●海洋生態系に関する研究分野ではデータの収集、データベースの作成、データの解析、保全への応用のいずれの分野においても精力的な研究活動が見られている。陸域生態系の生物多様性を対象とした基礎研究においても着実に成果を挙げている。生態学系の国内雑誌は国際的なインパクトは高くないが、各研究者が欧米の高インパクト誌に着実に成果を公表している。 ●豪州TERN（陸上生態系観測ネットワーク）は地上での詳細な生態系・生物多様性観測、衛星による広域観測診断を効果的に組み合わせる科学的・社会的目的に応じた環境データ取得と公開のシステムを構築している。
	応用研究・開発	◎	↗	●保全の管理手法に関する研究、温暖化による予測評価に関する研究、生物多様性の評価に関する研究、海洋のリモートセンシング技術に関する研究など、大学ごとに特色のある研究が大型予算で進められている。欧米とは日本以上に遠隔にも関わらず、世界各地の学会でのセッションの設定やワークショップの開催などを積極的に行う様子も見られている。 ●Atlantisのような世界的に使用されている生態系評価モデルを開発している。NESP Biodiversity HUBのような科学と政策を結びつける仕組みも着実に構築されている。
カナダ	基礎研究	○	→	●データベースの構築や国際ネットワークの構築などで世界の研究をリードしている。 ●北極圏の国として、北極圏の資源や生態系に関する観測研究をもっとも精力的に展開している。
	応用研究・開発	◎	→	●Ecopath/Ecosimのような世界中で広く使われている生態系モデルを開発し、応用研究を進めている。 ●国際的な海洋研究プログラムである日本財団のNereusプログラムの運営・推進で日本との連携がある。

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「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。

◎：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

関連する他の研究開発領域

- ・ 気候変動観測 (環境・エネ分野 2.7.1)
- ・ 気候変動予測 (環境・エネ分野 2.7.2)
- ・ 社会-生態システムの評価・予測 (環境・エネ分野 2.8.1)
- ・ 農林水産業における気候変動影響評価・適応 (環境・エネ分野 2.8.2)
- ・ 地球環境リモートセンシング (環境・エネ分野 2.10.1)

参考・引用文献

- 1) Editorial, "We must get a grip on forest science - before it's too late," *Nature* 608, no. 7923 (2022) : 449., <https://doi.org/10.1038/d41586-022-02182-0>.
- 2) E. Cohen-Shacham, et al., eds., *Nature-based Solutions to address global societal challenges* (Gland: International Union for Conservation of Nature; 2016).
- 3) Akira S. Mori, "Advancing nature-based approaches to address the biodiversity and climate emergency," *Ecology Letters* 23, no. 12 (2020) : 1729-1732., <https://doi.org/10.1111/ele.13594>.
- 4) P. Daszak, et al., *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) (2020) Workshop Report on Biodiversity and Pandemics of the Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* (Bonn: IPBES secretariat, 2020).
- 5) Partha Dasgupta, "The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review," GOV.UK, <https://www.gov.uk/government/publications/final-report-the-economics-of-biodiversity-the-dasgupta-review>, (2022年12月29日アクセス) .
- 6) Andy Purvis, "A single apex target for biodiversity would be bad news for both nature and people," *Nature Ecology & Evolution* 4, no. 6 (2020) : 768-769., <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1181-y>.
- 7) Paul Leadley, et al., "Achieving global biodiversity goals by 2050 requires urgent and integrated actions," *One Earth* 5, no. 6 (2022) : 597-603., <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.05.009>.
- 8) Jeannine Cavender-Bares, et al., "Integrating remote sensing with ecology and evolution to advance biodiversity conservation," *Nature Ecology & Evolution* 6, no. 5 (2022) : 506-519., <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01702-5>.
- 9) Matthew S. Savoca, et al., "Baleen whale prey consumption based on high-resolution foraging measurements," *Nature* 599, no. 7883 (2021) : 85-90., <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03991-5>.
- 10) Gentile Francesco Ficetola, et al., "Species detection using environmental DNA from water samples," *Biology Letters* 4, no. 4 (2008) : 423-425., <https://doi.org/10.1098/rsbl.2008.0118>.
- 11) Haruka Ohashi, et al., "Biodiversity can benefit from climate stabilization despite adverse side effects of land-based mitigation," *Nature Communications* 10, no. 1 (2019) : 5240., <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13241-y>.
- 12) David Leclère, et al., "Bending the curve of terrestrial biodiversity needs an integrated strategy," *Nature* 585, no. 7826 (2020) : 551-556., <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2705-y>.

- 13) Akira S. Mori, et al., “Biodiversity-productivity relationships are key to nature-based climate solutions,” *Nature Climate Change* 11, no. 6 (2021) : 543-550., <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01062-1>.
- 14) Mary I. O’Connor, et al., “Grand challenges in biodiversity-ecosystem functioning research in the era of science-policy platforms require explicit consideration of feedbacks,” *Proceedings of The Royal Society Biological sciences* 288, no. 1960 (2021) : 20210783., <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.0783>.
- 15) H. M. Pereira, et al., “Ecology. Essential Biodiversity Variables,” *Science* 339, no. 6117 (2013) : 277-278., <https://doi.org/10.1126/science.1229931>.
- 16) Yayoi Takeuchi, et al., “The Asia-Pacific Biodiversity Observation Network: 10-year achievements and new strategies to 2030,” *Ecological Research* 36, no. 2 (2021) : 232-257., <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12212>.
- 17) Masaki Miya, “Environmental DNA Metabarcoding: A Novel Method for Biodiversity Monitoring of Marine Fish Communities,” *Annual Review of Marine Science* 14 (2022) : 161-185., <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-041421-082251>.
- 18) 科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会地球観測推進部会「今後10年の我が国の地球観測の実施方針のフォローアップ報告書 令和2年8月28日」, 文部科学省, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/097/houkoku/1422531_00003.htm, (2022年12月29日アクセス) .
- 19) Daniel R. Pérez, et al., “Evaluating success of various restorative interventions through drone - and field - collected data, using six putative framework species in Argentinian Patagonia,” *Restoration Ecology* 28, no. S1 (2020) : A44-A53., <https://doi.org/10.1111/rec.13025>.
- 20) Jens Kattge, et al., “TRY plant trait database - enhanced coverage and open access,” *Global Chang Biology* 26, no. 1 (2020) : 119-188., <https://doi.org/10.1111/gcb.14904>.
- 21) Andrew Gonzalez, et al., “Scaling-up biodiversity-ecosystem functioning research,” *Ecology Letters* 23, no. 4 (2020) : 757-776., <https://doi.org/10.1111/ele.13456>.
- 22) Michel Loreau, et al., “Biodiversity as insurance: from concept to measurement and application,” *Biological Reviews* 96, no. 5 (2021) : 2333-2354., <https://doi.org/10.1111/brv.12756>.
- 23) Forest Isbell, et al., “The biodiversity-dependent ecosystem service debt,” *Ecology Letters* 18, no. 2 (2015) : 119-134., <https://doi.org/10.1111/ele.12393>.
- 24) David Tilman, Forest Isbell and Jane M. Cowles, “Biodiversity and Ecosystem Functioning,” *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 45, no. 1 (2014) : 471-493., <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091917>.
- 25) Rick Bonney, et al. “Next Steps for Citizen Science,” *Science* 343, no. 6178 (2014) : 1436-1437., <https://doi.org/10.1126/science.1251554>.
- 26) 日本学術会議若手アカデミー「提言 シチズンサイエンスを推進する社会システムの構築を目指して 令和2年(2020年)9月14日」, 22, 日本学術会議, <https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t297-2.pdf>, (2022年12月29日アクセス) .
- 27) Fabian Burki, Miguel M. Sandin and Mahwash Jamy, “Diversity and ecology of protists revealed by metabarcoding,” *Current Biology* 31, no. 19 (2021) : R1267-R1280., <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.07.066>.
- 28) Anthony Waldron, et al., “Protecting 30% of the planet for nature: costs, benefits and economic

- implications,” University of Cambridge, https://www.conservation.cam.ac.uk/files/waldron_report_30_by_30_publish.pdf, (2022年12月29日アクセス) .
- 29) Eun-Shik Kim, et al., “The International Long-Term Ecological Research-East Asia-Pacific Regional Network (ILTER-EAP) : history, development, and perspectives,” *Ecological Research* 33, no. 1 (2018) : 19-34., <https://doi.org/10.1007/s11284-017-1523-7>.
- 30) Tsutomu Hiura, Sato Go and Hayato Iijima, “Long-term forest dynamics in response to climate change in northern mixed forests in Japan: A 38-year individual-based approach,” *Forest Ecology and Management* 449 (2019) : 117469., <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117469>.
- 31) Masahiro Nakamura, et al., “Evaluating the soil microbe community-level physiological profile using EcoPlate and soil properties at 33 forest sites across Japan,” *Ecological Research* 37, no. 3 (2022) : 432-445., <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12293>.
- 32) Akira S. Mori, “Local and biogeographic determinants and stochasticity of tree population demography,” *Journal of Ecology* 107, no. 3 (2019) : 1276-1287., <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13130>.
- 33) TaeOh Kwon, et al., “Effects of Climate and Atmospheric Nitrogen Deposition on Early to Mid-Term Stage Litter Decomposition Across Biomes,” *Frontiers in Forests and Global Change* 4 (2021) : 678480., <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.678480>.
- 34) P. H. Templer, et al., “Atmospheric deposition and precipitation are important predictors of inorganic nitrogen export to streams from forest and grassland watersheds: a large-scale data synthesis,” *Biogeochemistry* 160, no. 2 (2022) : 219-241., <https://doi.org/10.1007/s10533-022-00951-7>.
- 35) Stephen F. Jane, et al., “Widespread deoxygenation of temperate lakes,” *Nature* 594, no. 7861 (2021) : 66-70., <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03550-y>.
- 36) Henry W. Loescher, et al., “Building a Global Ecosystem Research Infrastructure to Address Global Grand Challenges for Macrosystem Ecology,” *Earth’s Future* 10, no. 5 (2022) : e2020EF001696., <https://doi.org/10.1029/2020EF001696>.
- 37) Shane A. Blowes, et al., “The geography of biodiversity change in marine and terrestrial assemblages,” *Science* 366, no. 6463 (2019) : 339-345., <https://doi.org/10.1126/science.aaw1620>.
- 38) Charlotte L. Outhwaite, Peter McCann and Tim Newbold, “Agriculture and climate change are reshaping insect biodiversity worldwide,” *Nature* 605, no. 7908 (2022) : 97-102., <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04644-x>.
- 39) Jean-Francois Bastin, et al., “The global tree restoration potential,” *Science* 365, no. 6448 (2019) : 76-79., <https://doi.org/10.1126/science.aax0848>.
- 40) Andrew K. Skidmore, et al., “Comment on “The global tree restoration potential”,” *Science* 366, no. 6469 (2019) : eaaz0111., <https://doi.org/10.1126/science.aaz0111>.
- 41) Simon L. Lewis, et al., “Comment on “The global tree restoration potential”,” *Science* 366, no. 6463 (2019) : eaaz0388., <https://doi.org/10.1126/science.aaz0388>.
- 42) Joseph W. Veldman, et al., “Comment on “The global tree restoration potential”,” *Science* 366, no. 6463 (2019) : eaay7976., <https://doi.org/10.1126/science.aay7976>.
- 43) Pierre Friedlingstein, et al., “Comment on “The global tree restoration potential”,” *Science* 366, no. 6463 (2019) : eaay8060., <https://doi.org/10.1126/science.aay8060>.

- 44) Sebastian Seibold, et al., “Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers,” *Nature* 574, no. 7780 (2019) : 671-674., <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1684-3>.
- 45) Martin M. Gossner, et al., “Land-use intensification causes multitrophic homogenization of grassland communities,” *Nature* 540, no. 7632 (2016) : 266-269., <https://doi.org/10.1038/nature20575>.
- 46) Florian Schnabel, et al., “Species richness stabilizes productivity via asynchrony and drought-tolerance diversity in a large-scale tree biodiversity experiment,” *Science Advances* 7, no. 51 (2021) : eabk1643., <https://doi.org/10.1126/sciadv.abk1643>.
- 47) Yuxin Chen, et al., “Directed species loss reduces community productivity in a subtropical forest biodiversity experiment,” *Nature Ecology & Evolution* 4, no. 4 (2020) : 550-559., <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1127-4>.
- 48) Yuanyuan Huang, et al., “Impacts of species richness on productivity in a large-scale subtropical forest experiment,” *Science* 362, no. 6410 (2018) : 80-83., <https://doi.org/10.1126/science.aat6405>.
- 49) Laura J. Williams, et al., “Remote spectral detection of biodiversity effects on forest biomass,” *Nature Ecology & Evolution* 5, no. 1 (2021) : 46-54., <https://doi.org/10.1038/s41559-020-01329-4>.
- 50) Yann Hautier, et al., “General destabilizing effects of eutrophication on grassland productivity at multiple spatial scales,” *Nature Communications* 11, no. 1 (2020) : 5375., <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19252-4>.
- 51) Yann Hautier, et al., “Eutrophication weakens stabilizing effects of diversity in natural grasslands,” *Nature* 508, no. 7497 (2014) : 521-525., <https://doi.org/10.1038/nature13014>
- 52) Yann Hautier, et al., “Anthropogenic environmental changes affect ecosystem stability via biodiversity,” *Science* 348, no. 6232 (2015) : 336-340., <https://doi.org/10.1126/science.aaa1788>.
- 53) James B. Grace, et al., “Integrative modelling reveals mechanisms linking productivity and plant species richness,” *Nature* 529, no. 7586 (2016) : 390-393., <https://doi.org/10.1038/nature16524>.
- 54) Yann Hautier, et al., “Local loss and spatial homogenization of plant diversity reduce ecosystem multifunctionality,” *Nature Ecology & Evolution* 2, no. 1 (2018) : 50-56., <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0395-0>.
- 55) Sebastian Seibold, et al., “The contribution of insects to global forest deadwood decomposition,” *Nature* 597, no. 7874 (2021) : 77-81., <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03740-8>.
- 56) Amy E. Zanne, et al., “Termite sensitivity to temperature affects global wood decay rates,” *Science* 377, no. 6613 (2022) : 1440-1444., <https://doi.org/10.1126/science.abo3856>.
- 57) Patricia Balvanera, et al., “Essential ecosystem service variables for monitoring progress towards sustainability,” *Current Opinion in Environmental Sustainability* 54 (2022) : 101152., <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101152>.
- 58) Patricia Miloslavich, et al., “Essential ocean variables for global sustained observations of biodiversity and ecosystem changes,” *Global Change Biology* 24, no. 6 (2018) : 2416-2433., <https://doi.org/10.1111/gcb.14108>.

- 59) Global Climate Observing System (GCOS), *The Global Observing System for Climate: Implementation Needs*, (World Meteorological Organization (WMO), 2016).
- 60) Rick D. Stuart-Smith, et al., “Integrating abundance and functional traits reveals new global hotspots of fish diversity,” *Nature* 501, no. 7468 (2013) : 539-542., <https://doi.org/10.1038/nature12529>.
- 61) Carlos A. Guerra, et al., “Tracking, targeting, and conserving soil biodiversity,” *Science* 371, no. 6526 (2021) : 239-241., <https://doi.org/10.1126/science.abd7926>.
- 62) Brian Leung, et al., “Clustered versus catastrophic global vertebrate declines,” *Nature* 588, no. 7837 (2020) : 267-271., <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2920-6>.
- 63) Michel Loreau, et al., “Do not downplay biodiversity loss,” *Nature* 601, no. 7894 (2022) : E27-E28., <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04179-7>.
- 64) E. Dinerstein, et al., “A “Global Safety Net” to reverse biodiversity loss and stabilize Earth’s climate,” *Science Advances* 6, no. 36 (2020) : eabb2824., <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb2824>.
- 65) Andrew P. Dobson, et al., “Ecology and economics for pandemic prevention,” *Science* 369, no. 6502 (2020) : 379-381., <https://doi.org/10.1126/science.abc3189>.