2.2.8 生態系・生物多様性の観測・評価・予測

（1）研究開発領域の定義

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

（2）キーワード

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

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

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

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

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

り[2)]、より定量的な生態系・生物多様性の観測・評価・予測が求められている。

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

［研究開発の動向］

（国際的取組みの変遷）

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

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

（近年の研究開発動向）

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

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

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

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

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

（国内動向）

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

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

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

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

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

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

・米国航空宇宙局とメリーランド大学が、生態系観測のミッション（GEDI）を推進している。国際宇宙ステーションからレーザー測量（LiDAR）を行うことで森林による炭素隔離と蓄積の推定精度を向上させることを目的としており、2020年1月に最初のデータが公開された。

・2017年に気候変動観測衛星「しきさい（GCOM-C）」が打ち上げられ、海洋や陸域環境の観測が強化された。温室効果ガス観測技術衛星「いぶき（GOSAT）」は大気中CO_2、CH_4観測を継続している。陸上植生ではCO_2、CH_4や水蒸気フラックス研究（FLUXNET）の進展が見られる。海洋では世界気象機関（WMO）によるArgo計画で全球海洋の水温や酸性度の観測密度の増加およびデータ統合、取得情報の高度化・高品質化が進められている。

・局所的なリモートセンシングで無人航空機（UAV）に代表されるような小型かつ自律的な観測・計測技術が普及している。地理的に複雑な場所や火山現場など接近困難な場所等における観測など、幅広い用途が検討されている。海洋分野においては技術的にはUAVに相当する無人探査機（AUV）、無人洋上機（ASV）

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

・データロガー、マイコン、カメラ、レコーダー、測位・情報通信技術の普及により、生物と環境に関する局所スケールでのトラッキングやデータロギングが可能となっている。小型動物や海洋生物についての行動データ、陸上植生の季節性の年変動や地理的分布に関する画像データ、生物・非生物を問わない長期観測データ、移動や分布データの収集が進んでいる。

・市民科学の展開も注目されている[10)]。 iNaturalist は市民科学のプロジェクトであり、ナチュラリスト、市民、そして研究者を対象としたソーシャルネットワーキングサービスである。地球上の生物多様性に関する観察記録を共有し、種同定を助け合い、地図上に残すことなどを目指している。近年は、画像データについて、深層学習向けにラベリングされたデータセットの共有や作成、アプリケーションの開発などが行われている。

・機能形質データベースの整備と利用が進んでいる[11), 12)]。植物のデータベースが最もよく知られており活用されている。節足動物、サンゴやその他の海生生物などの分類群についても拡充しつつある。

・環境DNAを活用した生物分布情報の収集に関する研究がますます進展している。メタバーコーディングもさらに普及しつつあり、微生物群集の定量化がさらに容易となった。また、機能遺伝子についての探索やデータベース化も進んでいる。

・マイクロソフト社は、AI for Earthというプロジェクトを始めた。衛星画像、写真、動画、現地観察などのデータを機械学習、深層学習などにより解析するクラウドサービスである。また同プロジェクトでは地球上の自然体系の監視、モデル化、管理の方法を変革するためにAI を活用する個人や組織によるプロジェクトへの助成金の提供も行っている。

・画像解析をはじめとするクラウド上での解析ツールが充実してきている。衛星画像の活用ではグーグル社のGoogle Earth Engine上に衛星画像データが一括してアーカイブされており、高速な処理が全球で一括して実施できる。マイクロソフト社もGEO-BONと協働してAI技術活用を進めており、生態系の管理と予測に技術応用され始めている。

・機械学習や深層学習、状態空間モデル等のベイズ統計、Empirical Dynamic Modelling（EDM）による因果関係推定法などの統計・計算ツールが普及している。 Rソフトウェアのパッケージ導入により、これらが容易に利用可能になっている。

・生態系サービスの評価モデルについても、精力的な研究・開発が行われている。生態系サービスの潜在的な供給量の数値化・地図化が可能なモデルが数多く提案されており、GUI操作が可能なソフトウェアも整備されている（InVEST、TESSA、ARIES、LUCIなど）。陸域・海域ともにモデル開発は進展しており、世界各地での多様な使用例が報告されている。

・生物多様性と生態系機能/生態系サービスとの間の関係性が、動植物や微生物を含む形で明らかにされつつある[13), 14)]。生物多様性が生態系機能とサービスを支えることによる、生物多様性の資本としての経済価

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

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

［注目すべき国内外のプロジェクト］

（長期・広域観測）

• 国際長期生態学研究ネットワーク（ILTER）

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

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

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

• 標準化された方法論に基づく全球規模での生物多様性観測（LIFEPLAN）

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

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

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

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

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

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

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

（大規模操作実験）

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

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

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

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

（統合的なデータ解析）

• データ統合・理論研究

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

（研究基盤）

• 研究施設のネットワーク化

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

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

・生態系研究インフラ

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

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

（5）科学技術的課題

（データ蓄積、データ基盤整備）

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

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

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

（DNA情報や安定同位体を用いた解析技術）

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

合わせた技術の開発も課題である。

（生物多様性を評価する新指標の開発）

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

（生態系サービスの評価・予測）

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

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

（大規模野外操作実験）

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

（政策のための科学）

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

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

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

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

（ウィズコロナ・ポストコロナ時代の生態系研究インフラ）

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

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

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

（6）その他の課題

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

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

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

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

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

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	●個人レベルで実施される理論研究は依然として日本の強みとなっている。大規模かつ広域なデータ統合に基づく実証研究などについては、欧米諸国に対するデータ提供者という立場に甘んじており、イニシアティブは取れていない。日本の研究者や大学・研究機関を中心とするような国際的な枠組みの構築は進んでいない。 ●BISMaL、JBIF、J-BONをはじめとする国内のデータノードと博物館や大学をはじめとする協力機関の活動による生物分布データの蓄積がある。一方で、在データ以外の形式の情報の収集や、過去の情報の電子化・公開、新規の情報収集については十分には進んでいない。 ●衛星データによる環境モニタリングは以前から実施されているが、国土数値情報などの容易に使えるデータベースも活用されるようになった。 ●気候変動が生態系・生物多様性にもたらす影響の詳細な解明と広域診断を推進するためには地上観測と衛星観測の連携体制が必要となる。しかし、地上観測およびそのデータ品質管理とデータベース化が十分に進んでいない。
	応用研究・開発	○	→	●応用研究へのニーズの高まりを受けて、広域の生物多様性情報の集約や推定などが実施されている。生態系の環境変動や自然再生に関する研究論文も着実に公表されている。 ●国際政策に影響するような研究成果が限られている。
米国	基礎研究	◎	↗	●多様な研究が国際的な連携の下に行われている。多くのプロジェクトにおいてイニシアティブをとっている。 ●LTERなどモニタリングとそのデータ整備の国際的な発信源にもなっている。その中には長期にわたり維持され続けている大規模野外操作試験も含まれる。
	応用研究・開発	◎	↗	●多様な研究が国際的な連携の下に行われている。多くのプロジェクトにおいてイニシアティブをとっている。 ●モニタリングデータの活用から各種モデルの応用まで、幅広く応用研究も実施され成果を公表している。

				●マイクロソフト社やグーグル社などの民間企業によるクラウドサービス支援がさらに拡充している。
欧州	基礎研究	◎	↗	●GBIF、OBIS、TRYなどの世界規模のデータベースを維持している。 ●多様な研究が国際的な連携の下に行われている。多くのプロジェクトにおいてイニシアティブをとっている。特にドイツと英国が生物多様性の世界的な統合研究のイニシアティブを取っている。 PREDICTSやBIOTIMEが英国主導である。ドイツは国際共同研究と国内での共同研究プロジェクトの拡充の双方に注力している。 ●Horizon2020の一環として欧州LTER（eLTER）のためのEcosystem Research Infrastructureの開発プロジェクトが進行中。
	応用研究・開発	◎	↗	●多様な研究が国際的な連携の下に行われている。多くのプロジェクトにおいてイニシアティブをとっている。 ●スウェーデンには、レジリアンス・アライアンスの中核を担うストックホルム・レジリアンスセンターがあり、精力的に活動している。 ●資源管理などではNGOの協力もあり積極的に国際会議を開催し、その成果をとりまとめることや国際規格の作成、管理プログラムの検討を実施している。研究者層も厚く、基礎から応用まで多くの人材が揃っている。
中国	基礎研究	◎	↗	●近年急速に研究者人口が増加している。海外に流出した人材の呼び戻しなども積極的に進めている。データベース拡充や観測なども大型プロジェクトとして、国内外と連携して組織的に進めている。化学分析や遺伝データのシーケンシング等においても安価に実施できる民間企業があり、官民ともに生物多様性研究を推進する体制が充実した。結果として学術論文の出版数も急増している。 ●国際プロジェクトの誘致、フィールドの提供、国際会議の支援などによって積極的に主要な海外研究者との結びつきを強めている。また国際誌で発表された指標をその著者らのグループと協力して早期に適応する例も見られる。国外にいる中国人研究者と連携を強めることで国際競争力を高める傾向も強まっている。
	応用研究・開発	◎	↗	●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る。陸域生態系の生物多様性を対象とした基礎研究においても着実に成果を挙げている。生態学系の国内雑誌は国際的なインパクトは高くないが、各研究者が欧米の高インパクト誌に着実に成果を公表している。 ●豪州TERN（陸上生態系観測ネットワーク）は地上での詳細な生態系・生物多様性観測、衛星による広域観測診断を効果的に組み合わせて科学的・社会的目的に応じた環境データ取得と公開のシステムを構築している。

	応用研究・開発	◎	↗	●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の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

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

参考・引用文献

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

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

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

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