

3.3 生物多様性・生態系区分

生物多様性・生態系区分では、下記の2つの研究開発領域を設定した。

3.3.1 生物多様性・生態系の把握・予測

3.3.2 生態系サービスの評価・管理

区分の概要を以下にまとめる。

生物多様性・生態系の把握・予測では、追跡技術や衛星・航空機観測技術、画像解析技術、生物学的情報の取得等で大きな進展があり、高度な統計学的解析手法の開発も実施されている。欧米のレベルが高く、カナダや豪州の取り組みも注目に値する。米国はモニタリングとデータ整備の国際的な発信源であり衛星観測研究もリードしている。応用研究では工学的な環境再生に関する仕組みや指標づくりが目立つ。欧州では、従来の生態学的課題のほか、特に英国をはじめとして市民調査によるデータ蓄積や観光統計による生態系サービス情報収集などが進んでいる。GBIF, OBIS など世界規模のデータベースを維持している。カナダはFishBaseなどのデータベース構築、国際ネットワーク構築などで世界をリードし、Ecopath/Ecosimのような広く使われている生態系モデルも開発している。豪州では特に海洋生態系分野でデータ収集、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群を抜く研究グループがある。日本も進展しているが特に体制面で課題がある。

生態系サービスの評価・管理では、効率的で持続可能な生態系サービス利用の評価やバイオバンキングなど、様々な指標の検討や評価の実施が行われている。いずれの国・地域においても研究開発の動向は上昇傾向にあるが、欧州は研究開発の歴史が長く景観とそれがもたらす生態系サービス研究が進んでいる。評価指標の提案からその標準化が進められ、さらなる進展が予想される。米国は評価ツールの開発でリードし、そのツールを用いた成果をあげている。日本では、2010年以降生物多様性と生態系機能、生態系サービスの関係の研究が急速に進められているが、欧米に比べて基礎データを活用した実用化や政策支援などの実践ツールのレベルで立ち遅れている。

3.3.1 生物多様性・生態系の把握・予測

（1）研究開発領域の簡潔な説明

生物多様性や生態系の保全・利用および、生物多様性の形成・維持機構の解明を目的とする研究開発領域である。データの取得や、生態系の分布と変動を予測するモデルの作成、進化を含めたその原理を検討する調査や実験、モデルの開発が遺伝子から景観までの幅広い時空間スケールで進められている。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[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とその安定性や多様性が維持される要因を解明することを目的とする。その結果、学術的興味を深めるだけではなく、環境悪化の予測や防止、さらには生態系の保全や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いまだごく限られており、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機能（サービス）が再認識され、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。

[動向（歴史）]

生物多様性の研究は生物の個体群や群集を対象とした生態学的な研究に由来する。20世紀前半には個体群の動態についての数理的な基盤が生まれ、それ以前の自然史研究や主に昆虫や害獣を対象とした生物の動態と種間関係の研究をもとに生態系への理解を部分的に深めていく科学的な研究が進展したが、1960年代までは社会的な関心は高くなかった。

ところが、増大する人口と土地改変、農薬や汚染物質による自然環境の破壊によって社会的な関心が国際的に高まった。日本においても高度経済成長期と重なり、現在で言うところの生物多様性分野よりもさらに幅広い分野を巻き込んで環境問題化した。これらは生物多様性研究の基盤づくりを後押しし、日本においてはこの当時に全国的に取得の検討を開始したデータが現在も基礎となっている例が多い。

1992年の地球サミット以降、生物の多様性の保全と持続可能な利用を促進することが共通の課題として広く認識され、生物多様性という用語が急速に広まった。その結果多様なモニタリングの国際プロジェクトや、データベースの促進、評価手法の検討が進められることになる。

観測については、全球地球観測システム（GEOSS : Global Earth Observation System of Systems）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 : Group on Earth Observation - Biodiversity Observation Network）が2008年に発足し、生物多様性を間接的に推定する指標群が提案された¹⁾。また、長期生態系観測ネットワークとしてILTER（International Long Term Ecological Research、国際長期生態学研究）が1993年に設立された。リモートセンシングでは、MODIS（MODerate resolution Imaging

Spectroradiometer)、Landsat 衛星を用いた森林分布の把握等全球規模の観測研究が進展している。また、地域においては衛星のみならず、ドローンなどの UAV（Unmanned Aerial Vehicle）の活用も進められている。水中の生物多様性の把握が難しい海洋では、ROV（Remotely Operated Vehicle）の活用とともに音響を使った観測技術も存在する。生物の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、衛星データを用いて個体群動態を追跡する計器がある。ゲノム科学の進展に伴う生物間の相互作用や環境変化の影響の把握や、環境 DNA（eDNA）による効率的な生息状況の把握なども進められている。生物多様性の指標開発、実測を補う分布推定モデル技術や、過去・将来の予測技術も他分野との連携の中で発展している²⁾。

生物多様性・生態系の評価のためのモデル開発も着実に進んできている。2000 年前後から、Ecopath/Ecosim（ブリティッシュ・コロンビア大学、カナダ）や Atlantis（オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO））という海洋生態系評価モデルが使用されるようになり、広い応用を見ることができるようになる。一方で、予測力を重視した統計手法の活用も図られ、機械学習手法を活用した生物多様性の新しい予測技術の開発にも大きな進展が見られている。

情報に関する動向として、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的なプロジェクトである地球規模生物多様性情報機構（GBIF：Global Biodiversity Information Facility）および海洋生物のセンサス（CoML：The Census of Marine Life）が開始された（2001 年）。また、生物に関する Web 上の百科事典である Encyclopedia of Life（EoL）や、短い DNA 塩基配列より生物種を調べる手法に使われる DNA バーコーディングのライブラリを構築する International Barcode of Life Project（iBOL）などが始まり、相互に関連しながら巨大なデータ基盤を構築している。国際的な取り組みである GBIF、海洋生物地理情報システム（OBIS：Ocean Biogeographic Information System）、GEO-BON、ILTER、iBOL では、それぞれに対応する日本ノードが設立されている（JBIF、BISMaL、J-BON、JaILTER、JBOLI）。こうした生物分布情報の収集による生物多様性の広域分布の推定が進展し、現状把握とともに世界的な保護区の戦略や保全政策の提言に活用されてきた³⁾。さらに、生物多様性がどのように形成されたか、高緯度地域で高い傾向にある分類群が多いのはなぜかというマクロ生態学的課題に挑むベースデータとして活用された。国際的な協力や生物の分布情報のデータベース化の促進により生物多様性の広域パターンの形成や進化、人間活動（温暖化）とのかかわりに関する事例が散見される。陸上の大型生物についてのパターン研究では一定の結果が上がっており、一般的な緯度勾配と異なる分布をもつ対象や⁴⁾、機能などと対応させ分布変動のプロセスを検討できる対象を選定した研究が望まれる⁵⁾。なお、計画された実験データ以外の統計データの解析は容易ではなく、様々な手法が検討されてきた。特に時系列データについては近年の計算機の発達とともに階層ベイズモデルなどの高度に確率分布や非線形性を取り入れた方法が普及し、例えば発見率を考慮した時空間動態解析の取り扱いが容易かつより正確になった。今後も普及のための技術的・教育的な支援が必要である。

近年、情報技術や、センシング技術、遺伝情報の解析技術をはじめとするさまざまな技術的解決によって、応用の方向性を強化した研究が推進される⁶⁾と同時に、愛知ターゲット、持続可能な開発目標（SDGs）などの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も進展している。また、国家管轄権外区域の海洋生物多様性（BBNJ：

marine Biological diversity of areas Beyond National Jurisdiction)・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 (ABS: Access and Benefit-Sharing)・越境汚染など、外交や国家間交渉においての重要な要素ともなっている。温暖化の適応に関する多数の計画も実施されている。

また、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、海洋研究開発機構) や、炭素や窒素など、陸域植生の光合成・呼吸や温室効果ガスの収支に関連する物質の挙動を解明する生態系モデル (VISIT、国立環境研究所) などが開発され、気候変動予測分野でも貢献している。

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

- フィールドセンシング技術の発達と大量データの解析技術における課題

小型安価なデータロガー、マイコン、カメラ、レコーダー、測位・情報通信技術 (GPS、RFID、WiFi、Wi-SUN 等) 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急速に進展している。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や生物・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。一方で、大量のデータの解析技術がまだまだ成熟しておらず、機械学習手法を活用した特徴抽出や自動認識、分類が求められている。また、特に海洋分野においては現場計測・連続サンプリングのためのセンサ・機器の開発や小型化や安価な観測プラットフォームの作成が進展しており (例えば CO₂・H₂S センサ、江戸っ子 1 号)、今後の応用が期待される。

- 局所リモートセンシング技術の発展

衛星・航空機観測技術と画像解析技術が進展している。特に、無人機 (UAV; Drone) 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た⁷⁾。SfM (Structure from Motion) による画像の結合技術をはじめとするデータの解析技術も急速に普及しており、活用事例の増加が見込まれる。今後は赤外線カメラによる植生指数 (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index) の算出等、可視光カメラ以外のセンシング手法や UAV 自体の自動での離発着を活用した実測、水部での補正技術の開発などが課題である。

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: Autonomous Underwater Vehicle)、無人洋上機 (ASV: Autonomous Surface Vehicle) 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⁸⁾。また、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⁹⁾。特に魚群探知機をはじめとする音響によるセンシングには海洋分野で古くから活用されているが、近年国外の民生品においてそのコストダウンが著しい。今後、開発した技術者でなくとも運用可能なシステムづくりとコストダウンが課題である。

- 長期 3 次元の環境 (気象・海洋・地形) データの作成とデータベース化の進展

観測について、日本の周辺においても気候変動観測ミッション (GCOM: Global Change

Observation Mission) などで高頻度、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おり、野外においては森林におけるフラックス研究の進展や、海洋の全球観測を行う世界気象機関 (WMO) による Argo 計画での観測密度の増加、音響・光学センサなどの取得情報の高度化の検討が進められている。これらのデータを活用することで従来の長期の推定だけでなく、短期の基盤情報の蓄積による環境と生物の変動要因の解明や予測の進展が期待される。

- 環境 DNA、メタバーコーディング、現場シーケンス、機能遺伝子の特定

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。また、従来の LAMP 法による現場での種同定技術以外にも USB 電源で動く卓上のシーケンサーなども試作されている¹⁰⁾。特に近縁種の多い植物やベントス (底生生物) などの現場での種同定に活用され、保全政策や外来種対策に応用できるものと考えられる。また、生物機能や機能的な遺伝子についての探索やデータベース化も進み、今後環境 DNA などと合わせて、地域の群集の特性や多様性維持機構の検討が一変する可能性がある。

- 機能・形質データベースの発展

形質データ・機能データベースによる生物多様性と機能の関係の理解の促進がバクテリアスケールから魚類のスケールまで進展している¹¹⁾¹²⁾。生物多様性が高まると生態系の機能や安定性が高まるかという疑問をはじめとするこれまでの局所の検討の進展も含めて、単に多様性だけではなく形質や機能の視点から、生態系の形成の理解や長期変動の予測を試みている。

- クラウドによる解析システムの開発

データベース上での解析ツールの提供や画像モザイク・データの描画のための有料・無料の解析環境を提供する動きが見られる^{3), 13)15)}。データの増大とともに解析の演算にかかる時間が伸びており、今後、大規模な解析を行う計算機資源を集中させ、効率的に解析を行う動きが広がる可能性がある。ただし、技術・コストなどの観点から可能な主体は限られていると考えられる。

- 時系列変動データをはじめとする高度な統計学的解析手法の開発

S-map、CCM、CMS などを用いた因果解析が近年話題を集めておりその適用可能な範囲についての検討が進む¹⁶⁾。決定論的な変動や Tipping Point 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が先行するが¹⁷⁾、乾燥地などの単純な系では景観スケールでの検証がすすめられている¹⁸⁾。一方で、現実の生態系はその系自体の時間変化が起こるものであり、ネットワークの時間発展についての研究をはじめとするより動的なもの取り扱いが求められる。また、角度データや非線形の相関など時系列以外のデータ解析についても近年議論が見られ¹⁹⁾、より複雑なデータタイプの扱いが計算機のライブラリ等の出現により容易になる可能性がある。

- 意思決定支援システム、保護区選定技術

保全に必要な生物や多様性の分布データや推定手法が増加するにつれて、その結果の取り扱いを活用して、実際の提言や管理に応用する事例が増加している。そのためのツールが複数登場しており、活用事例も増加している²⁰⁾。応用の側面から論じられることが多いが、手法そのものの特性や新たな手法の開発など技術的な側面からの検討も十分に行う必要がある。また、保護区の分布そのものの検討が進んだ近年は設置面積そのものよりも、

その有効性や管理体制の評価を行う必要が高いと考えられており、保護区のキュレーション、管理のレビュー、複合指標の比較など、異なるレベルの事象や価値観を統合する作業が強く求められており²¹⁾、関連する意思決定ツールの開発が求められる。

• 市民科学への注目

特に欧州や北米において市民科学が注目されている²²⁾。情報メディアの利用の一環としてユーザにあまり意識させずに情報を収集活用している他分野もあり、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として取り組むべき課題である。

[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 S9「アジア規模での生物多様性観測・予測・評価に関する総合的研究」（2011～2015 年度）において、陸域・海域における生物分布のデータ収集と、それに基づく生物多様性の評価と将来予測が行われた。バーバリウム（植物標本）にあるラベル情報から分布モデルを作り、東南アジアの樹木の主の多様性を推定した。収集した膨大なすべての標本の画像をデータベース化し、DNA 配列決定を進め、多くの新種を判定するなど、様々な多数の成果が得られている²³⁾。現在は、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。
- JST 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」研究領域（小池勲夫研究総括）では、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。
- 文部科学省ナショナルバイオリソースプロジェクトでは、ライフサイエンス研究の基礎・基盤となるバイオリソース（動物、植物等）について収集・保存・提供を行うとともに、バイオリソースの質の向上を目指し、ゲノム情報等の解析、保存技術等の開発によるバイオリソースの付加価値向上により時代の要請に応えたバイオリソースの整備を行っている。また、バイオリソースの所在情報等を提供する情報センター機能を強化している。
- 衛星から森林炭素蓄積（バイオマス）を推定するため、国際宇宙ステーション（ISS）からの観測を想定した衛星 LiDAR の開発が進んでいる。米国航空宇宙局（NASA）は、2019年の打ち上げを目標として、GEDI ミッションを推進している。宇宙から地球にレーザを照射し、レーザ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。また、日本の宇宙航空研究開発機構（JAXA）でも ISS に搭載する植生 LiDAR の開発（MOLI ミッション）に取り組んでおり、2021年の打ち上げを目指している。
- 全米生態観測ネットワーク（NEON: National Ecological Observatory Network）の構築が10年間で4.3億ドルの巨額を投じて2012年に開始された。気候変動や土地利用変化、外来種の侵入などのデータがリアルタイムで一般公開される予定であり、2017年頃に本格稼働予定である。
- RAM Legacy Stock Assessment Database と呼ばれる世界の海洋生物資源の評価結果の

データベースが一般に公開されている（ワシントン大学等が中心）。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と考えられ、日本でも上記 CREST 課題の中で、このデータベースを使った生態系評価研究が進められている。

- 観測データからサービスの変動までの一連の研究プロジェクトとして、オーストラリアでは The Capturing Coral Reef & Related Ecosystem Services (CCRES) が、米国西海岸を中心としたメンバーでは Ocean Tipping Points が行われている。
- 世界各地で生物多様性の推定や保全策の検討に関する計画が動いており、海洋についてオーストラリアにおいて CISRO NERP BiodiversityHUB が実施されている。
- 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の予測が欧州にて CASCADE をはじめとして実施されている。
- カナダ・ブリティッシュコロンビア大学では、世界の海洋生物資源の基礎情報に関するデータベースが作成され、公開されている²⁴⁾。同大学では日本財団が出資し、ネレウス (NF-UBC Nereus Program) と呼ばれる国際ネットワークが構築されている（プリンストン大学、デューク大学、世界自然保護監視センター (UNEP)、ケンブリッジ大学、ストックホルム大学、ユトレヒト大学などが参画)。大規模な気候変動と海洋資源の関係の探索などが進められている。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

- データ基盤に関する課題として、データの流通の促進とキュレーション、データの前処理の共通化による効率化が望まれる。データは種の存在、現存量、DNA 情報など多種多様であるが、それらの品質管理が必ずしもなされていると言いがたい状況である（特に市民参加型調査データ）。データの流通や共通化、解析技術の共有などプラットフォームの部分が全体に情報科学と比べて遅れている。
- データの取得についての自動化・効率化や、全ゲノム情報等大量のゲノム情報を収集・解析するインフォマティクス技術の普及をはじめとして、分野横断的研究の促進（特に工学、情報学、社会科学）が要請されている。
- 様々な情報の不足が課題である。生物分布情報、DNA バーコーディング情報ともに不足している。特に DNA バーコーディング情報は取得の歴史が浅いため既知の種を網羅するには遠い状況にあり、これが環境 DNA 解析の大きなボトルネックとなっている。土壌圏の生物など、極度に情報が不足している対象も存在し、水中や土壌あるいは樹木や生体の中など、観測が容易でない部分の物質の循環や生物の動態の検討が課題である。生物の機能と関連する形質情報に関しては、一部で進展が見られる（例：サンゴの形質データベース²⁵⁾）ものの、全般的には不足しており、さらに、機能や形質についてのデータは配列だけや種の分布だけのデータベースでは不足がある。地域的には特に東南アジアの情報不足している。
- 長期的な時系列データが研究開発の進展に重要であり、継続的なモニタリングとデータの整備、その解析技術開発が必要である。統計的解析技術開発とともに、因果関係を解明する技術開発が求められる。

[今後取組むべき研究テーマ]

- 生物多様性の分布情報や現存量、遺伝配列情報のみならず、機能（または機能を反映する形質情報）やサービスを含めた情報収集と共有の促進。
- 生物多様性を間接的に推定でき、リモートセンシング等の計測技術により計測可能な指標群（森林面積等）の開発、指標群による生物多様性の推定の高度化。
- モニタリング・計測の高効率化や自動化、データ取得が困難であった領域を開拓する新たな計測技術の開発。
- データの不足を補う分布推定等の手法開発。
- ゲノム情報の解析技術、特に大量データの処理技術開発。
- 多様なデータを集約し気候変動データ等関連する情報と統合化するデータベースやユーザインタフェースの開発。
- 生物種間関係、食物網や地域内での動態、地域間の連結性を視野に入れたマクロ生態学の進展とその活用。
- 世界的に共有されつつある情報を活用した地域特性（生物多様性ホットスポット等）や保全優先地域の検出。
- 気候、人口、土地利用、サプライチェーン等の自然科学・社会科学シナリオとの統合による将来予測研究。
- 生物多様性と生態系機能・サービスの定量的評価。さらには、生態系サービスの予測・評価にもとづき社会科学分野と協力した意思決定支援。
- 市民への PR やコミュニティづくりの検討を含めた、市民によるデータ収集とキャパシティビルディングに関する検討。

(5) 政策的課題

- 基盤データの整備について、陸域では地理空間情報活用推進基本法（NDSI 法）や測量法に基づく基盤地図情報等の円滑な流通等を促進の精神がある程度成果をあげている。一方、海洋のほか、河川、沿岸、湖沼の周辺域（いわゆる水辺）においてはこれらの適用範囲もあいまいであり情報整備の遅れが目立つ。生物多様性の保全において移行帯はホットスポットになりやすく、海洋環境は島嶼が多く漁業も盛んな日本において重要と考えられ、このような地域の基盤情報整備への行政側の主導が求められる。
- データの流通や共通化について、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、日本ほど分野間の垣根は高くない。学生時代から複数分野を習得する仕組みの促進が望まれるとともに、情報科学のような就職率の高い分野でも積極的に兼業などによって多分野で活躍できる社会的な支援や仕組みづくりが求められる。
- データの取得について、環境影響評価、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死蔵されており、今後データのリポジトリ（一元的な保管場所）などを作成し、利活用することが望まれる。また、研究が広域にひろがるにつれ、データ取得における許認可等手続き、国外でのデータ収集などに事務手続き上のハードルが大きい。その他、税金を使った研究で得たデータ提供の義務化、データ取得重複の回避、データ不足地域でのデータ収集といった戦略的なデータの取得、品質管理とデータベース化、オープン

データの促進も求められる。

- 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、根本要因を追及する実験や基礎研究、技術開発への努力量が減っている。また、長期的な視野をもったモニタリングやデータベースの継続的な運用にプロジェクト終了ごとに財政的な不安がある点は課題である。
- 遺伝情報の抽出や海洋観測技術を初めとして、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ないものが多い。コストダウンするための技術や特許の共有や商品化による普及を促す仕組みへの支援が求められる。
- 国内施策（生態系管理、保護区設計、自然再生等）への反映や、国際的なプレゼンスの維持や国際的な枠組み（CBD, IPBES, GEOSS 等）への貢献を視野に入れた取り組みが期待される。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。
- 基礎的研究については、技術そのものよりも新規人材の不足と限られた人材での努力量の配分が課題である。また、要素技術はあるものの、その統合や、実用化や低価格化が不得手であるという評価もある。

（6）キーワード

生物多様性、生態系、機能、生態系サービス、大規模化、自動化、計測技術、分布推定、意思決定、自然再生、変動データ

（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"> ● 生物分布データの蓄積について 1970年代から90年代前半の生物の分布データの蓄積が様々な分野で見られ、その蓄積の活用と 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があって、近年の広域におよぶ空間研究のトレンドにも一定の対応ができています。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と公開、および、新規の情報収集について課題がある分野がほとんどである。モニタリングデータの必要性への異分野への理解、予算、個人情報、著作権、人手の不足などが主な要因。 ● 生物学的情報の蓄積について 近年形質や遺伝情報など、生物の個体そのものの情報を活用した研究が国内外で増加しているが、データベースへの登録が必須ともいえる遺伝情報を除くと、生物そのものの特性に関する情報の集約はいまだに行われていない。 ● 環境データの蓄積について 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にも活用されるようになった。今後も技術的な解決による広域のデータ収集と蓄積が重要である。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 近年プロジェクトなどの外部資金によって急速に進展しており、広域の生物多様性の情報の集約や推定などが実施されている。

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。近年の大規模な会議としては隣国のカナダを含めて DNA バーコーディングの国際的な計画などに進展がみられる。また、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。 ●衛星観測研究をリードしている。²⁶⁾
	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。応用的な研究のうち、工学的な環境の再生に関連する仕組みや指標づくりが目立つ。 ●分布推定モデル Maxent²⁷⁾が開発され全世界で広く使われている。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●GBIF, OBIS などの世界規模のデータベースを維持している。 ●環境 DNA 技術を提唱した。²⁸⁾ ●従来の生態学的な課題への取り組みのほかに、特に英国をはじめとして、市民調査によるデータの蓄積や、観光統計による生態系サービス情報の収集などが進んでいる。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●特に資源管理などについては NGO の圧力または協力によって、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が実施されている。また、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。 ●(国際機関の取り組みであるが) 世界自然保全モニタリングセンター (UNEP-WCMC) が全球の生物多様性保全に関わるデータベースと解析をリードしている。
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●近年急速に研究者人口が急増しており、データベースも組織的に進めている。また、遺伝データの抽出等においても安価に実施できる民間企業などもあり、官民ともに突然生物多様性研究を推進する体制を整えた様子が見られる。一方で、個別に発表されるデータや論文はまだ表面的なものも見られ、過去のデータ蓄積や時間変動などを含めてデータそのものの厚みがないものも見られるが、今後も量・質ともに向上していくものと考えられる。 ●鳥類ゲノム解読プロジェクト²⁹⁾や生物多様性のデータベース化³⁰⁾が進行中。 ●海洋に関して、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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●国際会議の誘致や支援などによって、積極的に主要な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して評価した例を作成した例も複数見られる。
韓国	基礎研究	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●あまり情報が見られない。海洋については近年生物多様性の研究センターとなる「National Marine Biodiversity Institute of Korea (MABIK)」を舒川郡に設立している。 ●K-BON (Korean Biodiversity Observation Network) が設立されている。 ●海洋に関して、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	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●あまり情報が見られないが、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であるが、研究や他の生態系調査とのシナジーについては不明である。 ●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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●特に海洋生態系に関する研究分野については、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、群を抜いている研究グループが見られる。一方で国内での横の連携がどのくらいあるのかや、現状のモニタリングや基礎研究の増減についての詳細は不明である。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●保全の管理手法に関する研究、温暖化による予測評価に関する研究、生物多様性の評価に関する研究、海洋のリモートセンシング技術に関する研究など、大学ごとに特色のある研究が大型予算を使って進められている。著名な国際雑誌に大学院生やポスドクが欧州や米国の研究者と協力して作成した論文が掲載される例も多く見られる。また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。CCAMLR (南極海洋生物資源保存委員会) では、オキアミとその捕食者を考慮したオキアミ予測モデル開発を主導している。
カナダ	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●FishBase などのデータベースの構築、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。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●Ecopath/Ecosim のような世界中で広く使われている生態系モデルを開発し、応用研究を進めている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル

(註2) 現状 ※わ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。

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑: 上昇傾向、→: 現状維持、↓: 下降傾向

(8) 参考文献

- 1) H. M. Pereira, H.M. et al. (2013) Essential biodiversity variables. *Science*, 339, 277-278.
- 2) Turner (2014) Sensing biodiversity. *Science*, 346, 301-302.
- 3) 神保宇嗣. 2016; "生物多様性情報データベースの構築と公開の実践: 種名および標本情報を例に". *日本生態学会誌*. 66(1):221-7.
- 4) Woolley SNC, Tittensor DP, Dunstan PK, Guillera-Arroita G, Lahoz-Monfort JJ, Wintle BA, et al. 2016; "Deep-sea diversity patterns are shaped by energy availability". *Nature*. 533(7603):393-6.
- 5) Stuart-Smith RD, Bates AE, Lefcheck JS, Duffy JE, Baker SC, Thomson RJ, et al. 2013; "Integrating abundance and functional traits reveals new global hotspots of fish diversity". *Nature*. 501(7468):539-42.
- 6) Sutherland WJ, Aveling R, Bennun L, Chapman E, Clout M, Côté IM, et al. 2012; "A horizon scan of global conservation issues for 2012". *Trends Ecol Evol*. 27(1):12-7.
- 7) Gregory TS, Tse ZTH, Lewis D. 2015; "Drones: Balancing risk and potential". *Science* (80-). 347(6228):1323.
- 8) Bewley M, Friedman A, Ferrari R, Hill N, Hovey R, Barrett N, et al. 2015; "Australian sea-floor survey data, with images and expert annotations". *Sci data*. 2.
- 9) Hansen RE, Callow HJ, Sabo TO, Synnes SAV. 2011; "Challenges in seafloor imaging and mapping with synthetic aperture sonar". *IEEE Trans Geosci Remote Sens*. 49(10):3677-87.
- 10) Ashton PM, Nair S, Dallman T, Rubino S, Rabsch W, Mwaigwisya S, et al. 2015; "MinION nanopore sequencing identifies the position and structure of a bacterial antibiotic resistance island". *Nat Biotechnol*. 33(3):296-300.
- 11) Roger F, Bertilsson S, Langenheder S, Ahmed Osman O, Gamfeldt L. 2016; "Effects of multiple dimensions of bacterial diversity on functioning, stability and multifunctionality". *Ecology*.
- 12) Bellwood DR, Goatley CHR, Bellwood O. 2016; "The evolution of fishes and corals on reefs: form, function and interdependence". *Biol Rev*.
- 13) Williams N, Stewart A, Papadopoulos P. 2015; "Virtualizing Lifemapper Software Infrastructure for Biodiversity Expedition". *arXiv Prepr arXiv150906695*.
- 14) Hiroo Imaki. "Geopacific.org". Available from: <http://www.geopacific.org/>
- 15) 田中克彦, 新井隆弘, 岸良武文, 山内東, 齋藤秀亮, 華房康憲, et al. 2014; "海洋生物情報の公開と応用展開". *JAMSTEC Rep Res Dev*. 18(0):81-8.

- 16) Sugihara G, May R, Ye H, Hsieh C, Deyle E, Fogarty M, et al. 2012; "Detecting causality in complex ecosystems". *Science* (80-). 338(6106):496–500.
- 17) Hajishengallis G, Lamont RJ. 2016; "Dancing with the stars: how choreographed bacterial interactions dictate nososymbiocity and give rise to keystone pathogens, accessory pathogens, and pathobionts". *Trends Microbiol.* 24(6):477–89.
- 18) "CASCADE(catastrophic shifts in drylands)". Available from: <http://www.cascade-project.eu/>
- 19) Speed T. 2011; "A correlation for the 21st century". *Science* (80-). 334(6062):1502–3.
- 20) Domínguez-Tejo E, Metternicht G, Johnston E, Hedge L. 2016; "Marine Spatial Planning advancing the Ecosystem-Based Approach to coastal zone management: A review". *Mar Policy.* 72:115–30.
- 21) Yamakita T, Yamamoto H, Nakaoka M, Yamano H, Fujikura K, Hidaka K, et al. 2015; "Identification of important marine areas around the Japanese Archipelago: Establishment of a protocol for evaluating a broad area using ecologically and biologically significant areas selection criteria". *Mar Policy* [Internet]. 51:136–47. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2014.07.009>
- 22) Bonney R, Shirk JL, Phillips TB, Wiggins A, Ballard HL, Miller-Rushing AJ, et al. 2014; "Next steps for citizen science". *Science* (80-). 343(6178):1436–7.
- 23) JST-CRDS, 俯瞰ワークショップ報告書 環境分野の研究開発の概況
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2016/WR/CRDS-FY2016-WR-06.pdf>
- 24) <http://www.fishbase.us/>
- 25) <https://coraltraits.org/>
- 26) Hansen, M.C. et al. (2013) High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342, 850-853.
- 27) Phillips, S.J. et al. (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259.
- 28) Ficetola, G.F. et al. (2008) Species detection using environmental DNA from water samples. *Biology Letters*, 4, 423-425.
- 29) <http://avian.genomics.cn/en/index.html>
- 30) Asia Biodiversity Conservation and Database Network (ABCDNet)
<http://www.abcdn.org/>

3.3.2 生態系サービスの評価・管理

（１）研究開発領域の簡潔な説明

生態系サービスとは、生物多様性を基盤とする生態系から得られる恵みのことをいう。食料や水の供給、気候の調整や水質浄化、生息・生育環境の提供や遺伝的多様性の維持、レクリエーションや観光の場と機会の提供などが該当する。生態系サービスの維持や活用のために、生態系サービスが発揮されるプロセスを明らかにし、生態系サービスの評価や管理を行うための研究開発領域である。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

生物多様性や生態系に関する研究開発は、従来の自然保護の観点のみならず、食料や水の供給、気候の調整、観光の場などの生物多様性を基盤とする生態系から得られる有益な恵み（サービス）である生態系サービスを持続可能な形で利用するという観点からも必要性が認識され、重要視されている。近年、生物多様性条約 COP10 で愛知目標が制定され、生物多様性の評価や生態系サービスの保持が謳われ、さらに、気候変動や、防災・減災、持続可能な開発に関する国際的な枠組みにおいても生態系サービスの維持や活用が重視されている。そうした社会的ニーズに応えるためには、生態系サービスを実現するプロセスの解明と定量的な評価や、生態系サービスを維持しながら利用していくための社会システム、管理技術、ガバナンスの検討が必要となる。

[動向（歴史）]

生態系のもつ生態系サービスは「公益的機能」と呼ばれ、日本では古くから注目されてきた。特に森林生態系のもつ水源涵養や土砂流出防備などの機能については、国としては 1972 年の林野庁による公益的機能の計量・評価を始めとして戦後多くの研究業績がある¹⁾。政策的にも、明治 30 年の森林法制定時から保安林制度として導入され、伐採規制をしながら水土保全機能を維持する政策がとられている。

生物多様性に関する研究開発については、90 年代までは生物学・生態学で、90 年代からは地球環境問題として、2010 年以降は社会学や経済学との統合の中で行われてきた。1991 年には DIVERSITAS という国際的な生物多様性の研究枠組みが発足した。1992 年にはエコロジカル・フットプリントの概念が提唱され、1993 年には生物多様性条約（CBD）が発効した。また、生態系と人間活動との相互関係を把握する実験的生態系勘定は、国連が 1993 年の国民生態系計算の改定に際し、そのサテライト勘定として導入した「環境・経済統合勘定」（SEEA : Satellite System for Integrated Environmental and Economic Accounting）の中に導入されたものである。1997 年の Costanza の論文では、生態系サービスの経済評価を初めて世界中で行った²⁾。1998 年には、生態系がどの程度安定しているかを検証した研究（Resilience Alliance）がある。

2000 年代に入ると、地球規模生物多様性情報機構（GBIF : Global Biodiversity Information Facility）という、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

際的なプロジェクトが開始された。前述の DIVERSITAS はセカンドフェーズに入り、人間活動に目を向け始めた。全球地球観測システム (GEOSS : Global Earth Observation System of Systems) も始動した。そして、大きな動きとして国連が主導した MA 報告書 (Millennium Ecosystem Assessment) という世界の生態系サービス評価がある。同じ時期に、今まで無料と思われてきた生態系サービスに対して支払うシステム (PES : Payment for Ecosystem Services) を考えようという論文が発表された。PES は、生態系保全の財源を確保する方法として各地で研究開発と制度の導入がされている。ただし、PES の有効性が指摘されつつも、そのみでは問題を解決できず、その他の手法も組み合わせる必要性が指摘されている³⁾。PES 以外の手法として生物多様性オフセットが注目されており、欧米を中心に研究開発と社会実装が進んでいる。生物多様性オフセットとは、自然地の開発を行う際に、その開発の後に開発前よりも生態系を劣化させないことを目的として、開発の影響を開発地やそれ以外の地域において代償する手法である。実施する際の考え方として、米国で誕生したミティゲーション順位 (mitigation hierarchy、回避、最小化、代償の順に考えること) がある⁴⁾。また、生物多様性オフセットの達成基準としては、トータルとしての生物多様性の消失を発生させないというノーネットロス (no net loss) が必要最低限のものとなっている。さらに、トータルとしての生物多様性の向上を目指すネットゲイン (net gain) を要求している国もある。実施方法として、開発事業者自らがオフセットを行う場合の他に、バンキングを使う方法が発達し、米国やドイツで運用されている。特に豪州では、生物多様性クレジットを市場で売買する半官半民のシステムが導入され、注目されている。⁵⁾

前述の 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 : Group on Earth Observation - Biodiversity Observation Network) が発足した。2010 年には Tipping Point (重大な変化が起きる転換点) の概念が提唱され、生態系サービスや生物多様性を経済評価するレポート (「生態系と生物多様性の経済学」 (TEEB : The Economics of Ecosystem and Biodiversity) や、世界中の生物多様性の概況に関する「地球規模生物多様性概況第 3 版 (GBO3 : Global Biodiversity Outlook 3) 」が公表された。

日本では 2010 年に「生物多様性総合評価 (JBO1 : Japan Biodiversity Outlook 1) 」が実施された (環境省)⁶⁾。生態系を森林、農地、都市、陸水、沿岸・海洋、島嶼に区分し、様々な指標を用いながら定性的に評価され、特に陸水、島嶼生態系の劣化が著しいことが示された。同時期に日本の里山・里海評価 (JSSA : Japan Satoyama Satoumi Assessment) が公表され (国連大学サステナビリティ高等研究所 UNU-IAS) 、人為の加わった日本の伝統的な二次的自然について、その生態系サービスや人間への福利が評価された。2011 年には、全国を対象とした生物多様性評価の地図化が実施され (環境省) 、地形地域区分ごとおよび市町村ごとに評価が示され、GIS ベースで公表されている。2013 年には、千葉県をモデル流域とした様々な生態系サービスの定量評価が実施され地図化されている (環境省) 。また、同年、日本の湿地が有する経済的な価値の評価が試行的に実施されている (環境省) 。

国際的にも 2010 年以降、生物多様性と生態系サービス評価の流れがいつそう加速し、生物多様性条約の中で世界中の生態系や生物多様性を評価する組織である「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 : Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services) 」が 2012 年に設立した。気候変動という IPCC に相当する組織であり、2018 年に最初のレポートを出すこととなって

いる。

社会・経済的には、これまで無料であった生態系サービスを会計システムの中に組み込もうという動きが出てくる。先に述べた SEEA は、2003 年、2012 年と改定が続き、2012 年国連統計委員会にて中核的枠組み（SEEA-CF：SEEA Central Framework）が国際基準として策定され、2013 年には SEEA 実験的生態系勘定が国際ガイドラインとして採択された⁷⁾。2012 年には、GDP ではなく、自然資本と生産資本、人的資本の 3 つを富の指標として考え、世界中の経済成長を図るという、Inclusive Wealth に関する最初のレポートが公表された⁸⁾。2013 年には、ステークホルダーを巻き込んだ領域横断的な研究が必要だということで、Future Earth が活動を開始した。2015 年には持続可能な開発目標（SDGs）が掲げられた。また、REDD+（Reduction of Emission from Deforestation and forest Degradation plus）という、持続可能な森林経営のために経済的支援を国際的に行う仕組みが 2020 年の実施に向けて準備が進められている。このような流れの中で研究開発が進んでいる。

産業界における関心も高まり、様々な取り組みが進められている。全世界 250 社を超える会員企業をもつ非営利組織である BSR（Business for Social Responsibility）が 2013 年に公表した生態系サービス評価ツール群⁹⁾には、企業の生態系サービスへの依存や影響を評価し、意思決定や報告書作成に活用可能なツールが掲載されている。自然資本連合内の NCP（Natural Capital Protocol）は、企業における自然資本評価の標準化に向け 2014 年 6 月に立ち上げられ、2016 年 5 月にガイドラインを公開した¹⁰⁾。現状は食料・飲料業界とアパレル業界が対象のガイドラインであるが、今後、対象の業界を拡大する計画である。国連大学サステナビリティ高等研究所（UNU-IAS）等は社会生態学的生産ランドスケープ・シースケープにおけるレジリエンス指標に関するツールキットを取りまとめ 2014 年 11 月に発表した¹¹⁾。指標を用いた評価から生まれた資金提供のメカニズムは、主に開発途上国において実用化が進んでいる。

生物多様性条約事務局が 2014 年に公表した Ecosystem Natural Capital Accounting: A Quick Start Package¹²⁾は、国際基準の SEEA-CF¹³⁾を基に、生態系サービスと生態系資産の評価方法を提案している。ここで示されている評価項目やフレームワークは、国だけでなく、企業や自治体での評価にも活用されることが期待されている。一方、米国スタンフォード大学が中心に取り組む Natural Capital Project が開発した、保全活動を測るツール OPAL¹⁴⁾や、費用対効果最適化ツール RIOS¹⁵⁾等は、世界的に活用が拡大している。

企業の生態系サービスの評価や管理は、CSR 側面のほか近年では、事業の持続性の側面として重視されている。国際統合報告評議会が公開を要求¹⁶⁾している自然資本などの非財務情報は投資判断に活用されつつある。また、2010 年発行の国際規格 ISO26000¹⁷⁾は人権と多様性尊重の概念を包含し、2015 年改訂の ISO14001¹⁸⁾では生物多様性保全の項目が追加され、事業活動のサプライチェーンにおける生態系への影響を考慮することが環境経営の要件となった。ISO20400 では持続可能な調達を実現するガイドラインの作成が進む。ISO14008 では事業活動における環境負荷を経済価値評価で示す方法をスウェーデンが 2015 年 9 月に提案した¹⁹⁾。2015 年 8 月には SDGs²⁰⁾にも生物多様性の目標が掲げられるなど、生態系サービスの評価、管理の必要性がますます認知され、企業の関心は高くなっている。

（3）注目動向

[新たな技術動向]

- 2013年に国際ガイドラインとして採択された **SEEA** 実験的生態系勘定では、生態系は生物群集と非生物的環境によって構成される地域（空間エリア）として定義され、生態系サービス（フロー）とそれを供給する生態系資産（自然資本＝ストック）によって捉えられている。他の会計も同様であるが、**SEEA**でも生態系勘定をストックとフローの概念でとらえている。資産はストックで表されるが、フローは生態系サービスと資産の変化の2つの意味があり、人間への便益に直接寄与するもののみ、生態系サービスとして位置付けられている。したがって、生態系内や生態系間のフローならびに、ミレニアム生態系評価（**MEA**）で定義された基盤サービスも生態系サービスには含まれていない。また、生態系サービスを生み出すポテンシャルを示す「生態系容量」と、ある利用パターンを前提とした場合に期待できる「生態系サービスの期待フロー」との両面から計測され、利用の持続可能性を評価しようとしている点が興味深い。この考え方によって地域における生態系サービスの資産のみならず効率的な利用とそれを難しくしている社会システムについても検討することが可能になる。
- 包括的な豊かさの指標（**Inclusive Wealth Index**）は、2012年国連持続可能な開発会議（リオ+20サミット）において、**The Inclusive Wealth Project**によって発表された指標である。この指標は、国民総生産（**GDP**）や人間開発指数（**HDI**）などの従来の短期的な経済発展を基準とせず、自然資本、人工資本、人的資本の合計を富の指標として捉え、これらの資本が直接、間接的に人間の福利に結びついていると考えている。自然資本の中には、化学燃料、鉱物、森林資源、農耕地があげられており、生態系サービスについては2014年の**Inclusive Wealth Report**の「**New insights**」の中で取り上げられている。古典的な経済学では、人間の福利は、主として所得と効用の増大として捉えてきたが、それらが必ずしも人間の福利の増加に結び付いていないことは先進国の事例からも明らかであり、これらの指標は、生態系サービスの持続的な発揮を考えるうえでも重要な視点を提示している。
- オーストラリアは、バイオバンキングなどの生物多様性の価値改良と維持政策に結びつける定量評価²¹⁾や、海岸線のサンゴの価値を定量化して保全と観光を繋げた生態系アプローチに成功²²⁾した。オーストラリア国立大学は、スーパーコンピュータを用いた地球規模の気候シミュレーションにより、生物多様性の損失を科学的に予測して警鐘を鳴らした²³⁾。英国では自然環境研究会議等による**UK NEAFO**²⁴⁾の公開、生態系サービス評価のツールと事例集**"NEAT Tree"**²⁵⁾の提供がある。日本では、社有林の生態系サービス定量化²⁶⁾や自治体の森林や農地に関わる生態系サービスの経済価値を算出するツールの公開²⁷⁾などがある。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- 地球環境研究の国際プログラムの再編が進み、**Future Earth**が誕生した。その特徴として、自然科学と人文・社会科学が強く連携すること、またトランスディシプリナリティを強調し、社会問題解決型の研究推進が謳われている。**JST**社会技術研究開発センターでは、**Future Earth**構想の推進事業の一環として、2014年度から、「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」と「トランスディシプリナリー研

究として推進すべき研究開発の可能性調査」を実施しており、生物多様性や生態系サービス、また生態系を生かした防災・減災についてのフィージビリティ研究が幾つか実施されている。いまだ、フィージビリティ研究が始まったばかりであり、トランスディシプリナリティを可能にする研究計画や実施についての方法論は確立しておらず、今後の地域研究成果が注目される。

- 「アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合研究」（環境省環境研究総合推進費 S9）（2011～2015年度）では、生物多様性条約（CBD・COP10）で採択された愛知目標への貢献、特に保全優先度を明示した地図を作製することを目標とした。結果的に森林、陸水、海洋生態系におけるアジアを含む生物多様性情報の集積、それを解析する新たな手法の開発が進み、多くの研究成果が国際誌ならびに国内学会誌に発表された。
- 「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」（環境省環境研究総合推進費 S15）（2016～2020年度）では、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を検討している。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、自然・社会科学ならびに陸域・海域の研究者が集まり、大規模プロジェクト研究が進行中である。
- 世銀が主導するWAVESも注目に値する。国連機関、各国政府、NGO、学術研究機関などが参画する「富の勘定と生態系サービスの価値評価」についてのパートナーシップである。WAVESは英国、日本、オーストラリア、カナダ、フランス、ノルウェーが出資しており、環境勘定の方法を確立し、国の政策分析や開発計画に組み込むこと、さらに生態系勘定のための国際的ガイドラインを策定することを目的としている。
- ブラジルでは、2009年設立のNGO LIFE Instituteが生物多様性保全活動の効果の定量評価方法を公開し、企業の生物多様性保全の取組を認証する制度“LIFE Certification”²⁸⁾の管理・運営を行っている。

（4）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

フローとしての生態系サービス評価は、すでに多くの研究事例もあり、InVESTなど汎用性のある生態系サービス評価ツール（オープンツール）も公開されている。しかし、それらを精度よく計算するための基礎データが揃っていない。評価や管理には、環境、社会、経済に関わるデータが必要だが、環境、特に生態に関するデータが不足している。国や都道府県レベルの算定については統計データもある程度公開されており、粗い計算が可能であるが、自然資本を管理し生態系サービスの恩恵を受ける主体である流域レベル、市町村などの地方自治体レベルでは基礎データがほとんど公開されていないのが実情である。自治体レベルで統計データと地理空間情報とを地理情報システム（GIS）により連結するなど、綿密なデータ整備、そして定期的なデータ更新が求められる。

自然資本や生態系サービス、その利用を評価するためには質的、量的指標が必要になる。多くの場合、生態系サービスそのものを表す指標を既存統計データから見つけることは難しく、これまでの研究事例から代表値を定めたり、関連する統計データによって代替したりすることが多い。したがって、これらが本当に自然資本や生態系サービスを表す指標として適

当かどうかにあつての科学的検証が必要になる。SEEA 実験的生態系勘定でも、サービスの需要、供給、配分の計測方法に関するさらなる検討が求められている。そして、自然資本や生態系サービスを貨幣勘定する場合は、評価手法の適切な選択や設定根拠の検証など課題は多く、今後の研究が要請される。

生態系勘定を作成する際には、生態系サービスの恩恵を受ける受益対象範囲の適切な選定が必要である。これは、範囲如何によつて生態系サービスの受益量や劣化コストの配分が変わるためである。そのためには、生態系間および生態系内の物的フローと生態系サービスとの関連性を検証し、その計測手法を確立する必要がある。自然資本と生態系サービスの関係性は複雑であり、どんな規模とどんな状態の生態系から、どの程度の生態系サービスが生み出されるのか、いまだ不明な点が多く、今後の研究開発が求められる。

さらに、生態系サービスについてはダブルカウントに気をつけなければならない。様々な生態系サービスはお互いに独立した機能ではなく、関係性が強いものも多い。例えば河川の水質浄化機能と栄養塩循環機能とは相互に関係するものであり、換算価値が計算できたとしてもそれを単純に足し合わせることはできない。この点についても検討が必要とされる。このように、複数の生態系サービス間には、シナジー効果（相乗効果）とトレードオフ効果（相反効果）が存在する。例えば森林を保全することは、二酸化炭素の吸収と野生生物の生息場提供など、複数の生態系サービスの向上につながるのに対して、森林を伐採することは、木材の供給として利益をもたらすが二酸化炭素の吸収の低下につながる。こうした生態系サービス間のシナジーとトレードオフの関係は、複雑でまだ解明されていない部分も多く、今後の検証が必要となる。

国外の生態系サービスへの依存は、貿易により多くの国外自然資源に依存している日本において重要であるが、研究は進んでいない。エコロジカル・フットプリントという土地生産力等に着眼した持続可能性につながる土地利用指標を用いて検討している例はあるが、生物多様性や様々な生態系サービスとの関連は不明である。英国ではマテリアルフロー分析により、海外からの輸入量を整理している。

ガバナンスも課題である。Future Earth においても地域社会やステークホルダーが強く意識され、IPBES の概念的枠組みでも生態系サービスを發揮するための制度やガバナンスが中心に据えられている。自然資本や生態系サービスを評価するだけでは不十分で、これらを持続的に利用する社会システムとしてのガバナンス研究が必要であるが、いまだ社会実装できるような研究は進んでいない。ここでも都道府県より小さい自治体や流域レベルでのガバナンス研究が求められる。

生態系サービスと自然資本は、定量化から経済に取り込む実践の段階に移行し、それに向けた課題解決の時期となった²⁹⁾。生態系サービスをどの程度利用し、また環境への負荷をどの程度与えているのかを単に定量化するだけでなく、経済活動へ内部化することが可能になるように、金銭換算する技術を開発し、経済システムに組み込むことが課題である。例えば、内部化に向けての課題は、「生態系サービスの直接的利用価値をもつ供給サービス³⁰⁾は、物量で定量化できるが、サプライチェーンを含めて生産工程で投入された価値（負荷）が考慮されない³¹⁾。」「CO₂等は GHG プロトコルの Scope3 基準³²⁾、水はウォーターフットプリント指標で評価³³⁾されるが、供給サービスの対象物全般での考慮は不十分。」「生産工程を含むライフサイクルで投入される価値を供給物の価値に反映する必要がある。」ことである。

経済価値換算においては、間接的利用価値³⁴⁾の定量化が課題である。間接的利用価値の調

整、生息・生育地、文化の各サービスは、機能の能力と処理量から定量化されるため、機能の抽出、選定と定量化の精度向上が課題である。また、間接的利用価値に適用される顕示選好法のうち、代替法では、生態系サービスを市場財である人工物の費用などで代替するが、人工物は特定の機能にフォーカスされていることが多いため、生態系サービスのもつ多様な価値を認識して代替することが課題である。

一方、非利用価値の遺産価値や存在価値は、利用価値に繋がる生物多様性の基盤として注目され、時間軸を用いて定量化することや、生態系への人間の介入や管理の度合いが生態系の質に与える度合の定量化が課題と考えられる。また、非利用価値に適用される表明選好法は、アンケート調査の対象者の価値観や社会情勢、地域、歴史などのバイアスの影響、実施に際しての調査期間や費用等が課題である。

供給サービスの経済価値換算では、供給物に市場価格があり、供給量と取引単価で換算する市場価格法が理解しやすいが、市場価格にはライフサイクルでの投資額のほか需給バランスの影響が大きく、精度高く換算できない側面もある。間接的利用価値や非利用価値の寄与を供給サービスの価値に反映させることが課題と考えられる。

日本国内の生態系サービスは減少か横ばいで³⁵⁾、サプライチェーンにおいてもその源泉の自然資本自体が量的、質的に大幅に低下している。その一因として、現在の経済システムに基づく経済価値換算では本質的に生態系サービスの価値を評価できておらず、過小評価していることが考えられる。フローである生態系サービスのみならず、源泉としてのストックである自然資本を質と量の観点から適正に評価することが課題といえる。生きている地球指数³⁶⁾やエコロジカル・フットプリント³⁷⁾の評価からも、国、地域などで差異はあるが自然の再生機能の回復以上に生態系に負荷を与えていることは明らかであり、生態系サービスの持続的利用には、負荷低減のほか自然資本を維持、管理することが必要である。特に生物多様性の根幹をなす動植物等の生物資本は再生可能かつ枯渇性であるため³⁸⁾、再生可能な負荷で枯渇しないように、質と量の両面で管理することが課題である³⁹⁾⁴⁰⁾。

[今後取り組むべき研究テーマ]

総合的な生態系評価手法の確立（例えば生態系勘定）と、計算するための基礎データの整備、データを利活用するための、データ収集、変換、統合、解析技術が必要である。基礎データについてはまずは都道府県レベルで整備し、そして生態系サービスの受益者であり、生態系の実質的な維持管理者でもある市町村レベルでの整備により、最終的に生態系評価自体の精度を上げていくことが必要になる。生態系勘定を計算するための自然資本データと生態系サービスの特定、そのフローに関する指標の選定、さらにサービスの需要、供給、配分、空間的つながりなど、検討すべきテーマは多い。これまでも生態系サービスの地図化は研究的には実施されてきたが、多くはポテンシャル評価であり、それを利用するためにはどのような社会・経済、土地利用システムが必要かについて検討できていない。また、対象地域の需要や供給、配分関係を空間明示的に示したものはない。これが示されれば、自然資本のオーバーユーズやアンダーユーズ、それに伴う生態系サービスの変化を可視化することが可能になり、将来に向けて持続的に生態系サービスを活用するためには、どのような土地利用計画を進めていけばよいか、処方箋を描くことが可能になり波及効果は高い。また、生態学を考慮したサプライチェーンでの間接的利用価値等の評価技術の構築や、自然の回復力を考慮した生態系サービスの能力を定量評価する技術も求められる。

生態系サービス評価のマクロスケールの研究としては、シナリオ研究が必要になる。想定シナリオとしての大きな駆動要因は、気候変動と土地利用変化であろう。気候変動もしくは土地利用形態の変化に伴い、生物多様性や生態系サービスが変化することについては多くの研究業績があるが、これらを同時に扱った研究は少なく未知の領域である。一方で、現実社会は、温暖化適応策として土地利用対策も同時に考慮しながら進む以外に道はなく、シナリオ研究が有効になる。環境保全か経済活動優先かなど、幾つかの現実的なシナリオを準備し、それらのシナリオによって生物多様性や生態系サービスがいかに変化するかを予測することは自然共生型の持続可能な社会を実現するためにも重要である。また、こうした流れからは、気候変動と生態系資産、生態系フローの変化を結び付けた研究が求められる。

生物多様性と生態系サービスの関連性も古くて未解明な課題である。先に述べた通り、生態系サービス間にはトレードオフが存在し、ある生態系サービスに特化した土地利用政策は生物多様性を劣化させる。一方で、生物多様性を維持することによって発揮される生態系サービスは何か。またそれを高く発揮するためにはどのような管理が必要かなどについては未解明であり、検討すべきテーマは多い。多くの資源を輸入に頼る日本の現状を考えると、日本での輸入などによる海外の資源利用が海外の生物多様性や生態系サービスに及ぼす影響の評価も課題である。

生物多様性と生態系サービスを持続的に維持しながらその恩恵を享受するためには、地域社会が共同で自然資本を管理する社会システム（ガバナンス）が必要になる。こうした共同管理については、伝統知であるコモンズ論を発展させる必要があり、本当の意味での文理融合型研究が必要となる。かつて地域社会は、薪炭・用材・肥料用の落葉を採取したり、屋根に葺くカヤなどを採取したりする共同の山林、原野を持っていたが、経済発展とともにこうした仕組みは姿を消した。生態系サービスを管理するためにはこうした共同管理、応益分担などの考え方が再び必要になると考えられ、これが **Future Earth** のめざす **Co-Design**、**Co-Production**、**Co-Delivery** の考え方である。こうした文理融合研究は、生態系サービスの管理に関する成果が社会実装されるために必要である。

地殻変動、気候変動、人口減少、社会資本の老朽化など、多くの難題を抱える日本の将来を考えた時、生態系サービスの一つである防災・減災機能を活用することが肝要である。この点については、日本学術会議から「復興・国土強靱化における生態系インフラストラクチャー活用のすすめ」と題する提言書が出されており、ヨーロッパではグリーン・インフラストラクチャー、世界的には **Eco-DRR** (**Ecosystem-based Disaster Risk Reduction**、生態系を基盤とした防災・減災)として知られている。すでに生態系を活用した防災・減災研究は、インパクトファクターの高い世界のジャーナルに発表されているが、日本では環境省環境研究総合推進費として幾つかの課題が採択され、研究が始まったばかりである。実用的には、防災工学的なハードな構造物と自然生態系を生かした土地利用とのハイブリッド技術が必要であり、基礎的な研究開発が望まれる。また、自然生態系はハードな構造物と比べて高いレジリエンスをもつと言われている。しかし、こうしたレジリエンスがうまく生かされるためには、上に述べたガバナンス論に関連して、社会・経済的レジリエンスも検討しなくてはならない。こうした生態系がもつ減災・防災機能と環境（生態系）、社会、経済的レジリエンスをいかにつなげて分析し、政策に結び付けていくかも重要な研究開発分野といえる。

PES、オフセットを含む生物多様性保全のための財源確保の議論においては、経済的、環境的側面のみでは、スキームの持続可能性は評価できず、インセンティブの配分、貧困削減

等の社会的な側面が、持続的にスキームを運用するうえで無視できない³⁾。そのため、スキームの持続性を評価する社会・経済的な側面を含む指標体系の構築が課題となっている。また、PESの効果について、一般的に、環境の効果と経済の効率性の評価が不十分とされ、課題となっている⁴⁾。その効果、効率性の検証は、生物多様性オフセットにおいても課題である。PESの実用上の懸念事項として、追加性（addictivity）、リーケージ（leakage）、永続性（permanence）、負のインセンティブがあげられているが、その評価はほとんど進んでおらず、実地上の研究が必要とされている⁴⁾。科学的な評価手法の確立は、生物多様性オフセットにおいても必要とされている。今後、国境を越えたPESの取り組みが進展し、国際的なオフセットも一般的になる可能性を鑑みると、評価手法を発展させることは、国際的なイニシアティブを得るためにも課題といえる。

（5）政策的課題

生態系サービスの価値の重要性を人々に広く認知させることが急務となっている。このため、生態系サービスの価値を評価する方法の標準化に向けた評価技術の指針と評価した結果を基に行うべき施策の提示が求められる。さらに、実社会における活用方法を見据えたデータ収集、解析、問題把握、技術による解決を探るプロセスは、「情報」を軸に、産業界やNGOも巻き込んだ透明性のある実践的な研究や議論に基づくことが、新しい制度立案や積極的な投資の意思決定の実現と拡大に繋がると考えられる。

このような状況から、自然資本までも含めた生態系サービスの必要性和定量的価値の認知度向上の課題として4項目をあげることができる。①「生態系サービスの適正価値の評価支援」、施策としては評価技術開発者へのインセンティブ付与や評価に必要な基礎データ、関連データの完備が考えられる。②「生態系サービスの価値を経営指標に導入する企業数の拡大」、施策として企業の経営指標に生態系サービスの価値を導入することの義務化や、実施企業へのインセンティブ付与があげられる。③「生態系サービスの価値を経営指標に導入するための簡素な仕組みの構築」、施策として環境レポート、会計の枠組みの提供や、算出技術のガイダンス提供などが考えられる。④「上記取組の普及促進」、例えば、トップランナー企業へのインセンティブ付与により普及促進につながると考えられる。

また、生態系サービスの評価技術は様々であり、元となるデータの性質からも精度の議論は難しいと考えられる。したがって、グローバルな合意に基づくオーソドックスな評価技術が必要であり、IPBESなどの国際的枠組みから指針が出た後、日本としての指針や方向性を示す必要がある。評価技術に関しては、上述のように国際標準化機構でも議論されており、実施可能な枠組みの構築が期待される。技術の決定に際しては、生態学的な観点と経済学的な観点のどちらからも納得できる技術でなければならない。生態学の専門家と経済学の専門家、加えるならば実際に使用するユーザとして企業担当を加えた議論の場を設けて、議論を重ねて決定するプロセスとそのような場の設定が必要と考えられる。

ストック、フローを含めた総合的な生態系評価を行う上でのデータが整っていないことが課題である。特に、市町村レベルにおけるデータを収集することが難しい。さらに、日本版SEEAのような生態系勘定の枠組みを日本の現状に合わせて構築することが必要であり、研究者と行政機関の共同で行うべき課題であると思われる。

さらに、生態系サービスの発揮のためには土地利用政策が最も重要になる。残念ながら日

本の政策を俯瞰すると、人口減少や社会資本の老朽化などは国レベルでは示されているが、それが空間明示的になっておらず、また土地利用政策と結びついていない。例えば社会資本の老朽化問題では、いかに既存施設を維持するかのみが工学的に議論され、その施設を必要とする地域社会がどうなるかまで議論ができていない。場所によっては、そうした施設を廃止し自然に戻す国土政策も必要になってくるだろう。そうした自然への復帰は新たな生態系サービスを生む可能性もあり、決して負の面だけで語られるべきではない。こうした将来社会や経済の変化と結び付けた生態系サービスの復元、維持を、空間明示的に議論すべきであるが、うまく実現できていないのが現状である。

受益者負担原則を実際に徹底することは難しく、ステークホルダー参加型で PES を運営することの困難さも指摘されている。PES は本来、環境価値の市場取引も包含するスキームとして捉えられる。しかし、実際には、純粋に環境価値の市場取引のみで制度を運用する事例は極めて少数派であり、政府・国際機関等による支払いの事例が多い。加えて、全 PES スキームの 90% は公的機関による出資⁴²⁾ となっており、公的機関に依存した取り組みが主流となっている。

生態系サービスへの対価を、国境を越えて支払う仕組みとしても位置づけられる REDD+ は、2013 年の COP19（国連気候変動枠組条約 第 19 回締約国会議）にて基本的枠組みが決定されている。財源や技術的な側面の詳細は交渉中である。森林へのアクセスについては、欧州のなかでもスウェーデンのように万人権として森林の副産物へのアクセスが確立している場合もあれば、オランダのように森林資源へのアクセス権が自動的に確立されていないケースもある⁴³⁾。このように、生態系について、公共財としての価値を市場において取り引きすることの人間の要因が絡む困難さは常に存在し、生態系に対するアクセスの社会的通念は国や地域によって大きく異なることは、森林以外の生態系を対象とした国際的な取り組みの推進においても、ボトルネックとなる。また、REDD+ については、その制度趣旨が理解されず、少数民族への生活保障や従来への貧困対策との差が地方行政や住民の間で理解されていない実情があるとの指摘もある⁴⁴⁾。特に、発展途上国の分析事例では、土地の所有権、持続的な生計手段、REDD+ 制度の機能などが相互に関連している。特に森林については、アフリカ、南米、アジアでは、基本的に森林へのアクセス、所有権が制度導入、活用における主な論点となり⁴⁵⁾、ステークホルダーの参加の観点からも土地所有のあり方は、PES の立案、実施において、主要な要素として考慮すべき対象である。

（6）キーワード

生態系サービス、生物多様性、生態系勘定、経済価値換算技術、自然資本、利用・非利用価値、ガバナンス、グリーン・インフラ、Eco-DRR、気候変動、サプライチェーン、ライフサイクル、外部性、レジリエンス、SDGs、ISO、生態系サービス直接支払、生物多様性オフセット、REDD+、生物多様性バンク

（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"> ● 森林生態系がもつ水土保全機能については、多くの研究成果が発表されている。 ● 環境研究総合推進費 S9 や S15 を通じて、生態系機能や生態系サービスについての基礎的研究は進みつつある。 ● 生態系勘定については、独自の手法開発は遅れているが、環境経済学による支払意思額評価は実施されている。 ● 地域での生態系管理に活用できるデータ整備や、評価指標として、国立環境研究所が開発した里地里山指標などのデータが整備されている⁴⁶⁾。 ● 生物多様性と生態系機能、生態系サービスの関係の研究は 2010 年以降急速に進められているが、欧米に比べて基礎データを活用した実用化や政策支援などの実践ツールのレベルで立ち遅れている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 明治 30 年の森林法制定から保安林制度によって生態系サービスの保全が行われている。 ● 総合治水事業、自然再生事業や多自然川づくりなど、生態系サービスを高める事業とその評価が実施されている。 ● 全国レベルでの湿地の生態系サービス評価や JBO 2 による様々な生態系サービスの全国評価が実施されている。 ● 研究開発による産業化は特に進展していないが、産業界において企業が持つ敷地や周辺の生態系については、JBIB (Japan Business Initiative for Biodiversity、企業と生物多様性に関する研究及び実践を行う団体) では、生態系に配慮した事業所のあり方を「いきもの共生事業所」⁴⁷⁾の持続的生物多様性土地利用のツールを活用する企業が増加している。 ● 国連大学サステナビリティ高等研究所が中心となって、社会生態学的生産 ランドスケープ・シースケープにおけるレジリエンス指標に関するツールキットを公開した開発途上国の農村地域において地域の人が生態系管理に活用して、資金調達のプロダクト制度を実施中である。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 多くの研究成果があり、InVEST など、空間明示型で汎用性の高い生態系サービス評価ツールの開発も世界をリードした。 ● Eco-DRR など、気候変動と結び付けた生態系の活用について、すでに多くの基礎的研究が実施されている。 ● 生態系を人為的攪乱や自然攪乱の影響から、生態系サービスを捉え、トレードオフなど広域的な生態系機能の研究が進んでおり、生態系サービスの定量評価ツール (InVEST)⁴⁸⁾ を用いた計算モデルを公開することにより成果を上げている。 ● ハリケーンなど異常気象の後の回復力を示すレジリエンスの視点から異常気象に対応するための生態系アプローチに基づく都市デザインの研究も進んでいる⁴⁹⁾。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 応用研究として Restoration (自然再生分野) や雨水管理としての Eco-DRR など進んでいるが、生態系サービス全体を生かした国土や地域計画ははまだ試行段階にあると思われる。 ● スタンフォード大学などが開発した InVEST が自然資本連合などのビジネスにおける評価ツールとして推奨され始めた。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 歴史の長い欧州では、文化的景観も含めたランドスケープとしての景観とそれがもたらす生態系サービスについて研究が進んでいる。 ● 生態系サービスに関する様々な指標が提案され、研究論文としても発表されており、EU 全体で統合化されると思われる。 ● EU の SEEA 実験的生態系勘定や英国による実施、WAVES をリードするなど、活発に基礎研究が実施されている。 ● H2020 プロジェクトにおいて、生態系と生物多様性に関連するデータとシミュレーション研究について、e-infrastructures を構築して統合的に研究が進んでいる。

	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 英国では自然資本委員会が設置され、生態系サービスについても貨幣換算評価が行われている。 ● Birds Directive、Habitats Directive (Natura 2000) や LIFE プログラムの実施など、生物多様性とそのネットワークが形成されており、その機能としての生態系サービスについて検討がなされている。 ● 温暖化対策としての Eco-DRR 活用は早くから検討されており、デンマークでは、すべての自治体においてグリーン・インフラをツールとした気候変動適応計画を策定することを義務付けている。 ● 産業界においては、自らの事業がどのくらいの生態系サービスを楽しんで、生態系へ影響を与えているかを定量的に把握することが社会的責任の観点から関心が高く、生物多様性の配慮を考慮した ISO14001 の改良や、Natural Capital Coalition における Natural Capital Protocol が、自然資本に関連する評価の世界的標準化が進んでいる。特に、WBCSD (持続可能な開発のための世界経済人会議) も本プロトコルを推奨している。このように、研究開発による産業化は、標準化のための枠組みづくりにおいて開始され、今後、さらなる進展が予想される。
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 衛星画像解析を使った広域な土地利用変化と生態系サービスへの影響について研究が進んでいる。 ● 自然湿地や復元された湿地に関する生態系サービス評価が実施されている。 ● 中国科学院の Laboratory of Animal Ecology and Conservation Biology において、主要研究テーマとして、生物多様性に関する情報収集、評価、計画、実施の情報システムとデータベースの研究や、多様性と空間生態学の研究が進んでいる。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 過去の広範囲の森林伐採により、土壌流出による莫大な生態系サービスの損失を引き起こし、退耕環林プロジェクトに代表される大規模な植林事業が実施された。 ● 急激な経済発展により大気、水質、土壌汚染が顕在化しており、これを改善するための措置として、生態系サービス評価が実施されている。 ● 研究開発による産業化は特に進展していない。ただし、米国が開発した評価ツール (InVEST) を研究者レベルで事例研究として積極的に取り入れている⁵⁰⁾。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 国際誌に発表された研究事例も少なく、指標や評価方法の開発も進んでいるとは言い難い。東南アジア諸国へのネットワークの研究支援は実施している。 ● アジア生態系サービスの国際シンポジウムが 2016 年 6 月に韓国で開催され、基礎研究から実社会で活用するための応用研究への取組が増えてきている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 湿地の自然再生は、都市域も含めて実施されており、生態系サービス評価もある程度行われている。 ● 大統領府と環境省の傘下に研究所があり、生態系サービス等の制度を議論している。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わ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。

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献 (●は全体的に参考とした文献)

- JST-CRDS, 俯瞰ワークショップ報告書 環境分野の研究開発の概況
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2016/WR/CRDS-FY2016-WR-06.pdf>
- Maes J, Teller A, Erhard M, Liqueste C, Braat L, Berry P, Egoh B, Puydarrieux P, Fiorina C, Santos F, Paracchini ML, Keune H, Wittmer H, Hauck J, Fiala I, Verburg PH, Condé S, Schägner JP, San Miguel J, Estreguil C, Ostermann O, Barredo JI, Pereira HM, Stott A, Laporte V, Meiner A, Olah B, Royo Gelabert E, Spyropoulou R, Petersen JE, Maguire C, Zal N, Achilleos E, Rubin A, Ledoux L, Brown C, Raes C, Jacobs S, Vandewalle M, Connor D, Bidoglio G, Mapping and assessment of ecosystems and their services. An analytical framework for ecosystem assessments under action 5 of the EU biodiversity strategy to 2020. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2013
- Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services
Indicators for ecosystem assessments under Action 5 of the EU Biodiversity Strategy to 2020
2nd Report – Final, February 2014
- Adger, W.N., Hughes, T.P., Folke, C., Carpenter, S.R., Rockstrom, J., Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science* 309, 1036–1039, 2005.
- Egoh, B., Drakou E. G., Dunbar M. B., Maes J., and Willemsen L., “Indicators for mapping ecosystem services: a review.” Report. EUR 25456 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2012.
- Bagstad, K. J., Johnson, G. W., Voigt, B., and Villa, F., Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services. In Special issue: Mapping and modelling ecosystem services. *Ecosystem Services* 4:117–125, 2013.
- Bateman, I.J., Harwood, A.R., Mace, G.M., Watson, R.T., Abson, D.J., Andrews, B., Binner, A., Crowe, A., Day, B.H., Dugdale, S., Fezzi, C., Foden, J., Hadley, D., Haines-Young, R., Hulme, M., Kontoleon, A., Lovett, A.A., Munday, P., Pascual, U., Paterson, J., Perino, G., Sen, A., Siriwardena, G., van Soest, D., Termansen, M., Bringing ecosystem services into economic decision-making: land use in the United Kingdom. *Science* 341, 45–50, 2013.
- Nelson, E., Mondoza, G., Regetz, J., Polasky, S., Tallis, J., Cameron, D.R., Chan, K.M.A., Daily, G.C., Goldstein, J., Kareiva, P.M., Lonsdorf, E., Naidoo, R., Ricketts, T.H., Shaw, M.R., Modelling multiple ecosystems services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scale. *Frontiers Ecol. Environ.* 7 (1), 4–11, 2009.
- Mitchell, M., Suarez-Castro, A., F., Martinez-Harms, M., Maron, M., McAlpine, C., Gaston, K. J., Johansen, K., and Rhodes, J. R., Reframing landscape fragmentation’s effects on ecosystem services. *Trends Ecol. Evol.* 30 190–8, 2015
- Boerema, A., Rebelo, A. J., Bodi, M. B., Esler, K. J., and Meire, P., Are ecosystem services adequately quantified? *Journal of Applied Ecology*, 2016, doi: 10.1111/1365-2664.12696.
- Ouyang, Z., Zheng, H., Xiao, Y., Polasky, S., Liu, J., Xu, W., Wang, Q., Zhang, L., Xiao, Y., Rao, E., Jiang, L. Lu, F., Wang, X., Yang, G., Gong, S. Wu, B., Zeng, Y., Yang, W., Daily, G. C., Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science* 352, 1455-1459, 2016

- 1) 林野庁「森林の公益的機能に関する費用分担および公益的機能の計量、評価並びに多面的機能の高度発揮の上から望ましい森林について (中間報告)」, 1972
- 2) Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R.S., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M., The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253–260, 1997.
- 3) Hein, L., Miller, D. C., & de Groot, R. "Payments for ecosystem services and the financing of global biodiversity conservation". *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(1) (2013): 87-93.
- 4) 田中章. "" 生物多様性オフセット" 制度の諸外国における現状と地球生態系銀行," アースバンク" の提言 (特集論説,< 特集> 生物多様性条約 COP10 と環境アセスメントの動向)." 環境アセスメント学会誌 7.2 (2009): 1-7.
- 5) Froger, G., Ménard, S., & Méral, P. "Towards a comparative and critical analysis of biodiversity banks". *Ecosystem Services*, 15(2015): 152-161.
- 6) 環境省・生物多様性総合評価検討委員会, 生物多様性総合評価報告書, 2010.
- 7) European Commission (EC), Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), United Nations (UN) and World Bank, "System of Environmental-Economic Accounting 2012, Experimental Ecosystem Accounting", White cover publication, 2013.
- 8) UNU-IHDP and UNEP "Inclusive Wealth Report 2014. Measuring progress toward sustainability. Summary for Decision-Makers", Delhi: UNU-IHDP, 2014.
- 9) Business for Social Responsibility (BSR). "Measuring and Managing Corporate Performance in an Era of Expanded Disclosure." January 2013.
http://www.bsr.org/reports/BSR_Ecosystem_Services_Tools.pdf. (2016年7月27日閲覧)
- 10) Natural Capital Coalition (NCC). "PROTOCOL."2016年5月.
<http://naturalcapitalcoalition.org/protocol/>. (2016年7月27日閲覧)
- 11) 国連大学サステイナビリティ高等研究所(UNU-IAS) and others."UNU-IAS、社会生態学的生産ランドスケープ・シースケープにおけるレジリエンス指標に関するツールキットを発表."ニュース.2014年12月1日.
<http://ias.unu.edu/jp/news/news/new-toolkit-provides-indicators-of-resilience-in-socio-ecological-production-landscapes-and-seascapes.html#info>. (2016年7月27日閲覧)
- 12) Secretariat of the Convention on Biological Diversity (SCBD). "ECOSYSTEM NATURAL CAPITAL ACCOUNTS :A Quick Start Package." CBD Technical Series No.77.
<https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-77-en.pdf>. (2016年7月27日閲覧)
- 13) United Nations and others. "System of Environmental-Economic Accounting Central Framework."2012. http://unstats.un.org/unsd/envaccounting/White_cover.pdf. (2016年7月27日閲覧)
- 14) Natural Capital Project." OPAL." Our software.
<http://www.naturalcapitalproject.org/software/#opal>. (2016年7月27日閲覧)
- 15) Natural Capital Project." RIOS." Our software.
<http://www.naturalcapitalproject.org/software/#rios>. (2016年7月27日閲覧)
- 16) The International Integrated Reporting Council (IIRC). "Integrated Reporting <IR>."

- <http://integratedreporting.org/>. (2016年7月27日閲覧)
- 17) International Organization for Standardization (ISO).”ISO 26000 - Social responsibility.”
<http://www.iso.org/iso/home/standards/iso26000.htm>. (2016年7月27日閲覧)
 - 18) International Organization for Standardization (ISO).” ISO 14000 - Environmental management.” <http://www.iso.org/iso/iso14000>. (2016年7月27日閲覧)
 - 19) International Organization for Standardization (ISO). ”ISO 14008 - Monetary valuation of environmental impacts from specific emissions and use of natural resources.” ISO/TC 207/SC 1 Environmental management systems.
<https://committee.iso.org/sites/tc207sc1/home/projects/ongoing/iso-14008.html>. (2016年7月28日閲覧)
 - 20) Division for Sustainable Development, Department of Economic and Social Affairs, United Nations. “Sustainable Development Goals.” SUSTAINABLE DEVELOPMENT KNOWLEDGE PLATFORM. <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>. (2016年7月27日閲覧)
 - 21) Office of Environment and Heritage for the NSW Government. “BioBanking Assessment Methodology.” Methodology. 27 April 2016.
<http://www.environment.nsw.gov.au/biobanking/assessmethodology.htm>. (2016年7月27日閲覧)
 - 22) Wealth Accounting and the Valuation of Ecosystem Services (WAVES). “Managing Coasts with Natural Solutions.” WAVES Technical Report. January 2016.
http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2016/02/17/090224b084187ca6/1_0/Rendered/PDF/Managing0coast0oves0and0coral0reefs.pdf. (2016年7月27日閲覧)
 - 23) Steffen, W., Richardson, K., Rockstrom, J., et al. “Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet”. Science vol.347.Issue 6223(2015).
 - 24) The Natural Environment Research Council (NERC).”UK National Ecosystem Assessment Follow-on.” http://www.nottingham.ac.uk/cem/pdf/RHY_et_el_2014_NEAFO_Scenarios.pdf. (2016年7月27日閲覧)
 - 25) The Natural Environment Research Council (NERC). ”National Ecosystem Approach Toolkit.” NAET Tree. <http://neat.ecosystemsknowledge.net/tree.html>. (2016年7月27日閲覧)
 - 26) 住友林業.”社有林が生み出す生態系サービスの評価.” 環境報告 国内社有林・海外植林地の生物多様性保全.
<http://sfc.jp/information/society/environment/performance/preservation/preservation02.html>. (2016年7月27日閲覧)
 - 27) 富士通研究所.”オープンデータによる地域特性の発見 EvaCva[エヴァシーヴァ].”
<http://evacva.net/>. (2016年7月27日閲覧)
 - 28) LIFE Institute.” LIFE CERTIFICATION STANDARDS.” NOVEMBER 2014.
<http://institutolife.org/wp-content/uploads/2015/07/LIFE-BR-CS-3-0-English.pdf>. (2016年7月27日閲覧)
 - 29) Anne D. Guerry, et al. ”Natural Capital and Ecosystem services informing decisions :from

- promise to practice.” PNAS Vol.12.No. 24(2016): 7348-7355
- 30) 環境省、”生物多様性と生態系サービス。“ 自然の恵みの価値を計る。
<http://www.biodic.go.jp/biodiversity/activity/policy/valuation/shuhou.html>. (2016年7月27日
閲覧)
- 31) UNU-IHDP and UNEP.” Inclusive Wealth Report 2012.”
http://www.worldacademy.org/files/Trieste_Forum/TF_BG2_A.Duraiappah.pdf. (2016年7月
27日閲覧)
- 32) World Resources Institute (WRI) and World Business Council on Sustainable Development
(WBCSD). ”Scope 3 Calculation Guidance.” Greenhouse Gas Protocol.
<http://www.ghgprotocol.org/feature/scope-3-calculation-guidance>.(2016年7月27日閲覧)
- 33) 環境省.”ウォーターフットプリント算出事例集.”平成26年8月。
<https://www.env.go.jp/water/wfp/attach/jireisyu.pdf>. (2016年7月27日閲覧)
- 34) 環境省.”自然の価値を評価する.“ 自然の恵みの価値を計る。
<http://www.biodic.go.jp/biodiversity/activity/policy/valuation/shuhou.html>. (2016年7月27日
閲覧)
- 35) 環境省.”生物多様性及び生態系サービスの統合評価報告書.”平成28年3月。
http://www.env.go.jp/nature/biodic/jbo2/pamph01_full.pdf. (2016年7月27日閲覧)
- 36) WWF and Global Footprint Network. ”Living Planet Report 2014.”
http://wwf.panda.org/about_our_earth/all_publications/living_planet_report/.(2016年7月27
日閲覧)
- 37) WWF and Global Footprint Network. ”Japan Ecological Footprint Report 2012.”
http://www.wwf.or.jp/activities/lib/lpr/WWF_EFJ_2012j.pdf. (2016年7月27日閲覧)
- 38) The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB). ”The Economics of Ecosystems and
Biodiversity Ecological and Economic Foundations.”
[http://www.teebweb.org/our-publications/teeb-study-reports/ecological-and-economic-founda
tions/](http://www.teebweb.org/our-publications/teeb-study-reports/ecological-and-economic-foundations/).(2016年7月27日閲覧)
- 39) Keith, H et al, 2014, 'Managing temperate forests for carbon storage: impacts of logging
versus forest protection on carbon stocks', *Ecosphere*, vol. 5, no. 6, pp. 1-34.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/ES14-00051.1/abstract> (2016年7月27日閲覧)
- 40) Lindenmayer, D et al,2012, 'A major shift to the retention approach for forestry can help
resolve global forest sustainability issues', *Conservation Letters*, vol. 5, pp. 421-431.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1755-263X.2012.00257.x/abstract> (2016年7月
27日閲覧)
- 41) Prokofieva, Irina. "Payments for Ecosystem Services—the Case of Forests." *Current For-
estry Reports* 2.2 (2016): 130-142.
- 42) Vatn A. “Markets in environmental governance. From theory to practice”. *Ecol Econ*. 117
(2015):225–33.
- 43) Mantau, U, et al. "Risks and chances to market recreational and environmental goods and
services—experience from 100 case studies." *Forest Policy and Economics* 3.1 (2001): 45-53.
- 44) Trædal, Leif Tore, Pål Olav Vedeld, and Jón Geir Pétursson. "Analyzing the transformations

- of forest PES in Vietnam: Implications for REDD+." *Forest Policy and Economics* 62 (2016): 109-117.
- 45) Lambini, C. K. & Nguyen, T. T. "A comparative analysis of the effects of institutional property rights on forest livelihoods and forest conditions: Evidence from Ghana and Vietnam." *Forest Policy and Economics* 38 (2014): 178-190.
- 46) 国立研究開発法人国立環境研究所 生物・生態系環境研究センター."環境研究の基盤整備."2017.7.21. <http://www.nies.go.jp/biology/kiban/index.html>. (2016年7月28日閲覧)
- 47) 企業と生物多様性イニシアティブ (JBIB:Japan Business Initiative for Biodiversity) ."いきもの共生事業所@推進 WEB."<http://www.blunc.org>. (2016年7月28日閲覧)
- 48) Natural Capital Project. "InVEST." <http://www.naturalcapitalproject.org/invest/>. (2016年7月27日閲覧)
- 49) THE NATIONAL ACADEMIES. *An Ecosystem Services Approach to Assessing the Impacts of the Deepwater Horizon Oil Spill in the Gulf of Mexico (3 Resilience and Ecosystem Services)*. Washington (DC). U National Academies Press (US), 2013.
- 50) Natural Capital Project. "Ecosystem Planning in China." <http://www.naturalcapitalproject.org/china-case-study/>. (2016年7月28日閲覧)