

特集「グリーン AI」

生態系研究におけるビッグデータの動向と学際研究の可能性

“Big-Data” in Ecological Science and Seeds for Interdisciplinary Researches

大場 真
Makoto Ooba名古屋大学エコトピア科学研究所[†]
EcoTopia Science Institute, Nagoya University.
ooba@esi.nagoya-u.ac.jp

Keywords: ecoinformatics, ecological database, ecosystem modeling, monitoring network, seeds for interdisciplinary researches.

1. はじめに

Even a perfect and complete map..., like the “Marauder’s Map” of Hogwart’s Castle in the Harry Potter book series by J. K. Rowling - a magical, real-time, animated map where every individual in an area is (if you know the spell) - would not allow predictions ... in the face of environmental change such as global warming or land use cover. [Franklin 04]

エコインフォマティクス (ecoinformatics) は 2000 年代より注目され始めた分野で, “eco” と情報学 informatics の造語である。解釈によるが, eco は, ecology (生態学) や, ecosystem (生態系) を指している。あえて日本語化すると生態系情報学となるだろうか。

生態系や生物多様性に関する科学 (以下, 生態系科学と略す) は, 他分野と同様に, 電子デバイス, コンピュータ, ICT が不可欠な技術となった。それに伴い, 大量データ・計算についての情報科学, 統計学, 人工知能学のアプローチが徐々にではあるが適用されている。専門とする国際学会や雑誌*1 が創刊され, 学会大会では関連したセッション*2 が開催されている。

本稿では, 大量データを生態系科学へもたらした技術について概観した後で, それに関連して発展中であるデータベースとそのネットワークについて説明する。これ

らの大量データの解析には, 同様にコンピュータなどを駆使することを前提とした手法が必要とされている。エコインフォマティクスの範疇となるそれらの方法論と萌芽的分野について説明する。

さらに, 2010 年に愛知県名古屋市で開催された COP10 (生物多様性条約国会議) に代表されるように, 生態系や生物多様性に関する情報は, 専門とする研究者以外, より広く一般からも興味を集めている。生物多様性の状況をレポートした GBO (Global Biodiversity Outlook) や生物多様性総合評価報告書 [生物多様性総合評価検討委員会 10] では生態系などに関する基本的情報が不足していることがたびたび指摘されている。[日本学術会議 10] は「現状評価と提言」の中でモニタリング, 解析, およびその社会への発信という一連のプロセスの重要性とそのキャパシティビルディングニーズを指摘している。気候変動, 越境汚染, エネルギー問題の解決など, 持続可能な社会への関心と相関し, 生態系・生物多様性と人間社会とにおける関係にも一層の研究が求められている。

この社会的背景を踏まえ, エコインフォマティクスには諸自然科学や工学, 農学, 社会科学などの一層の連携が求められており, かつ既存の手法のみならずエコインフォマティクスならではの新しい情報学的, 知識工学的手法の研究・開発が求められている。今後必要となると考えられるより深い学際的研究についても提案する。本稿は現行の主な情報源を記載したが, この分野も進展が速く, 本文も含めすぐに歴史的記載となってしまうことを了解していただきたい。

2. 生態系・生物多様性のデータ

2.1 観測・観察

§1 困難性

生物, 生態系の対象は野外に存在し観察・観測のためには, 地形などアクセス性だけでなく, 日長や天候, 季節,

*1 国際会議としては隔年で行われる International Conference on Ecological Informatics, 国際雑誌は *Ecological Informatics*, *Journal of Environmental Informatics* など。

*2 日本生態学会第 60 回全国大会自由集会「エコインフォマティクスと生態系評価: 散らばった生態データを集め, 整え, 活用する」, 同第 58 回全国大会自由集会「Ecoinformatics: 情報科学でやる生態学」, 同第 56 回全国大会フォーラム「生態系機能の広域的理解のための情報基盤整備」。

[†] 現在, 東京農業大学地域環境科学部。

国外であれば政情に至るまで細かい配慮とそれに基づく準備をしなければならない。また希少性、移動性のある生物を対象とするならばそれらを「発見」する必要もある。

これら困難性を克服するためには、多くの人材と時間と資金が必要であり、生態系科学研究における大きな問題の一つであった。しかし、電子デバイスを活用した測定機器の発達によって、この問題は機器の設置撤収、メンテナンス時へと限定されつつあり、同時に大量データの時代が到来しつつある。

現在では多く環境要素をモニタリングするセンサがそろっている(表1)。半導体などでできたソリッドステートな部品であり、耐久性があり維持管理も比較的容易である。センサやそれを組み込んだ製品も比較的安価に入手できる。

さらにデータロガーと呼ばれるセンサや機器の電気出力を記録する機器も珍しいものではなくなった。省電力消費機器を大容量化された電池で長期間動作させ、データは近年飛躍的に進歩したフラッシュメモリに記録させることが可能となった。これらは有線や無線のネットワークを利用してリアルタイムにデータを収集することもできる。

表1 生態系科学研究におけるセンサの利用例

種類	利用例
ポイントデータ	
光(可視光, 赤外線)	照度, 日射量
音(可聴域, 超音波域)	鳴き声, エコーロケーション
大気(気温, 湿度, 風速など)	微気象
大気質(CO ₂ 濃度など)	光合成速度, 汚染物質
水文(土壌水分, 河川流量など)	蒸発散, 魚類行動
水質(TN, TP, COD, BODなど)	富栄養化
距離	樹高
ライン, 面データ	
位置(GPS), 加速度	観察, 行動記録
静止画カメラ(可視光, 赤外光)	出現記録, 種同定
動画カメラ	行動記録
レーザ, マイクロ波, 音波	樹形, バイオマス量

§2 より複雑なデータ

上述のような単純なデータだけではなく、より複雑な構造をもったデータも生態系・生物多様性研究で欠かせなくなってきた。以下に簡単に三つの例をあげる。

DNA や RNA 配列を使って簡単に種の同定ができるようになった。後述するようなデータベース(GBIF などの Barcode of Life など)で配列の検索を行うことができる(JBOLI)^{*3}。その生物種に詳しくない研究者でも種が判別できるだけでなく、亜種や個体群など、種レベルより詳細な属性の情報も入手できる。分析サンプル

は毛や糞などでもよく、その生物種を捕獲・固定する必要がない。また種同定だけでなく、遺伝子の発現状況など機能を測定することもできる。

分析機器は高価であるが、サンプルの窒素や酸素などの成分だけでなく、同位体比を分析することも多くなった。さまざまな場所や生物における同位体比を質量分析器によって測定することより、生態系における物質循環フローを推定することができる(例えば[富永 08])。

また地球温暖化問題と関連して陸域生態系における二酸化炭素の吸収量は、超音波風速計と高速なガス分析装置を組み込んだシステムによって長期に観測することができるようになった。これらのデータを単にフラックスデータと呼ばれる(後述 JapanFlux を参照)。

2.2 データベース

§1 アナログ資料のアーカイブ化

前節で列挙したようなデバイス・手法が開発される前においても、さまざまな種類の生物学・生態学に関わるデータが収集されてきた。例えば集計表やチャートに記録された環境条件や生物学的属性、印刷された種名リスト、地形図に手書きされた観察地点、あるいは標本そのものなどである。

これらのデジタル化もまた、過去の生態系・生物多様性を理解するためには欠かせないデータといえる。

スキナなどが安価になったためと、現資料が劣化してデータが失われる可能性があるため(感熱・感光紙などに記録されたデータ)、こういったアナログな資料のデジタル化が進んでいる。また標本などを図書館の蔵書検索と同じようにカタログ化するというプロジェクトもある(例えば[吉武 11])。

§2 観測ネットワークとデータベース

大規模なデータを格納し、検索によって必要データを提供する直接的なデータベースはもちろん、存在するさまざまなデータベースを示すカタログ、メタデータベースのプロジェクトが急速に重要性を増し、大規模化が進んでいる[鎌内 08, 小宮 09, 小川 07]。研究や観測のネットワークプロジェクトが同時にデータベースなどを整備している場合が多い。国内国外で著名なものを表2にリストアップした。これは主なものであり、大小さまざまなサイトが存在し、相互にリンクされている。

国際的な研究ネットワーク、データベースとしては OECD のメガサイエンスフォーラムの提言で 2002 年に設立された Global Biodiversity Information Facility (GBIF) のシステムが著名である。また、米国長期生態学研究ネットワーク (US-LTER) などが始まりとなった。データの交換だけでなく関連したソフトウェアの開発などを行っている National Center for Ecological Analyses and Synthesis (NCEAS) などによる Knowledge Network for Biocomplexity (KNB)、その後継プロジェクト SEEK (Science Environment

*3 日本バーコードオブライフ・イニシアチブ, <http://www.jboli.org/>

表2 国内外の観測ネットワーク、データベースの例

略称	種類	URL
GBIF	生物多様性	http://www.gbif.org
KNB	観測, 実験 データ	https://knb.ecoinformatics.org/ index.jsp
ILTER*1	生態系観測 ネットワーク	http://www.ilternet.edu
JaLTER	//	http://db.cger.nies.go.jp/JaLTER/ R/
NEON*2	//	http://www.neoninc.org/
DataONE	環境データ も含む	http://www.dataone.org/
OBIS*3	海洋生物	http://www.iobis.org
GEO*4	地球観測	http://www.geoportal.org/web/ guest/geo_home
Potal		
FluxNET	フラックスサ イトデータ	http://fluxnet.ornl.gov/obtain- data
JapanFlux	//	http:// www.japanflux.org
J-IBIS*5	生物多様性	http://www.biodic.go.jp/J-IBIS. html
DIAS	地球環境情 報統合融合プ ログラムによ る成果	http://www.editoria.u-tokyo.ac. jp/projects/dias/tools.php?locale =ja_JP
PEN*6	フェノロジー 観測ネットワ ーク	http://pen.agbi.tsukuba.ac.jp/

*1 International Long Term Ecological Research

*2 National Ecological Observatory Network

*3 Ocean Biogeography Information System

*4 Group of Earth Observations

*5 生物多様性情報システム

*6 Phenological Eyes Network

for Ecological Knowledge) などが有名である。北米大陸スケールの生態系データを収集しオープンアクセスで提供しようとする NEON や、環境関連のデータも含めたデータも提供しようとする DataOne などが最近の動きとしてある。なお、ILTER の上位に国際的な観測協力体制として ILTER があり、そのデータベース構想は [Vandelbilt 10] が詳しい。GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) の中では GEO BON (Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network) が生物圏 (biosphere) データを扱っている。

国内では環境省の生物多様性センターなどが関連データを公開しているが、環境省環境研究総合推進費の研究課題「温暖化影響評価・適応対策に関する総合的研究」と関連し GEO BON の下位組織 J-BON (Japanese Biodiversity Observation Network) や AP-BON (Asia-Pacific BON) がデータ共有・公開に向けての取組みを進めている [Nakano 12]。また文部科学省などが推進していた DIAS プロジェクトでも積極的に生態系データ収集を行っていたが、現在グリーンイノベーションと関連した後継プロジェクト DIAS-GRENE (グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス) が活動している [大手

12]。

従来、観察・観測データの交換は、生態学内でも閉じた専門分野 (特定の生物種や生態系) の中でのみ交換が行われていたが、異なった背景をもった研究者間での交換の必要性から、データやメタデータについての形式が提案されている。Darwin Core は古くから利用されている記載方法であり、GBIF で標準として採用されている [GBIF 日本ノード 13]。Ecological Metadata Language (EML) は KNB で開発されたメタデータ言語である。関連した EML エディタ Morpho やデータベースサーバの Metacat のほか、Metacat も開発した。これらを横断利用可能にする EcoGrid というインタフェースプロトコルなども開発され、多くの研究グループに利用されている。これらについて日本長期生態系観測ネットワーク (JaLTER) が日本語化を担当した [JaLTER 情報管理委員会 13]。

生態系研究には地形や気候などの環境や社会などのデータが欠かせない。GIS (Geographical Information System, 後述) の普及に伴い、有償だったデータが無償化され、磁気テープに記録された固定長データがシェープファイル化 (GIS ファイルの一方式) されたりと利用しやすくなっている。国内の主なデータ源を表3にまとめた。

表3 国内の環境情報データ源の例

名称	提供源
無償	
基盤地図情報	国土地理院
電子国土基本図	
国土数値情報	国土交通省国政策局
水文水質データ	国土交通省水管理・国土保全局
ベース	
地図で見る統計	独立行政法人統計センター
(統計GIS)*	
有償	
最密数値情報	日本地図センター
(10mメッシュ)	
各種メッシュ統計	統計情報研究開発センター, 経済産業調査会経済統計情報センターなど

* 町丁目, 基準メッシュ等の境界情報も提供している。

3. 解 析

3.1 GIS

従来手作業で行っていた地図作製とそれをもとにした解析を、コンピュータで行うものが GIS である [橋本 12, Johnston 98]。地図の移動, 拡大縮小, レイヤの選択が自由な, Google maps, earth に代表されるような, 地図ソフト・アプリも GIS の一種である。

GIS は, さまざまな座標や主題をもつビットマップ (ラスターと呼ばれる) やベクトルマップを表示, 編集するソフトである。地図データに付随したテーブル (属性テ

ープル)を可視化できるのに加え、データベース管理ソフトウェアも兼ねているのでテーブルデータに位置情報を付加し地図化することもできる。また、空間的集計機能(境界やメッシュごと集計)や空間演算機能(ベクトル計算やトポロジー演算)ももつ。プログラミングすることが可能な場合もある。商業ベースのアプリケーションソフトとしてはArcGIS, Mapinfoなど、フリーウェアでは、GRASS GIS, QGIS, MANDARA, カシミアール3Dなどがある。

GISは生態系科学においても、単なる観測地・地域を地図にするソフトではなく、生物や生態の地理情報を高速に表示解析できるフィールド研究に欠かせないツールとなっている。例えば[庄山12]は生息空間の指標化を行ったが、広域にわたる複雑な計算はGISなしには行えないと指摘できるだろう。

3.2 リモートセンシング (RS)

GISと同様RS (Remote Sensing)による解析も生態系科学分野では現在当たり前の技術になりつつある。RSは、遠隔測定という意味であるので非接触測定すべてを含むが、一般的に地表面画像の解析を指している。

衛星画像データの低価格化が進み、有名なLandsat衛星シリーズの画像は複数サイトから無料で入手できるようになった*4。また航空機から撮影した空中写真もカタログを閲覧しながらデータを入手できるようになった*5。

衛星センサの種類も可視光線、近赤外線、赤外線をカバーしたパッシブ画像だけでなく、マイクロ波や音波を衛星が発信してエコーを受信するLIDAR, RADARも広く利用されている。

商業ベースのアプリケーションソフトとしてはENVI, ERDAS IMAGINEなどがある。なお、衛星画像処理ソフトは、衛星画像と空中写真の取扱いに特有な機能(衛星ごとのファイルヘッダや分類機能、写真測量)が強化されているが、本質的にはラスタデータ処理であるため、GISと処理範囲が重なる。現在は両者が融合している印象を受ける。RSによる分析は、画像分類による被覆分類、植生判別だけでなく、生理活性やバイオマスの量を推定することも可能になってきている。例えば[鈴木13]は温暖化に影響されやすい寒冷地域における植生モニタリングのためのRSをレビューしている。

3.3 メタ解析, モデリング

生態系科学の中では統計諸分野、特に空間統計解析という分野も大きな進展を遂げている[Franklin 04]。商業ベースの統計ソフトだけでなく、フリーソフトである

Rが生態系科学では多く利用されている。またデータの大規模化に伴い、解析手法も必然的に急変した。メタ解析と呼ばれる植物や動物のさまざまな属性、特徴量を広く収集し、統計解析を行う研究がある。従来は出版された文献を相当な労力で収集しデータを入力する必要があった。しかし、観察・観測データベースが充実し、それがメタデータベースなどで接続されているため、メタ解析が容易となった。実例としては葉の形質[Bello 10]、アジアフラックスのサイト間比較[Saigusa 10]、安定同位体窒素を用いた窒素循環[Templer 12]、US-LTERでの森林河川水質[Argerich 13]などのメタ解析がある。

また従来、ある現象に対し微分方程式や統計のモデルを開発したうえで、実測データを使ってモデルの正当性が評価されることが多かった。しかし最近ではパラメータフィッティングに代表されるようにデータありきの解析(Data-driven, Data-oriented)が主流となりつつある。大量データの存在は予測や補間などの精度を高めるモデルの応用へと研究のテーマをシフトさせている。

気候変動、温暖化対策の基礎的な資料として、陸域生態系における炭素循環の理解は欠かせない。前述のフラックス観測は天候などの影響で欠測などが生じやすい。例えばその補間に[Ooba 06]はニューラルネットワークと遺伝的アルゴリズムを組み合わせた方法を提案した。また[Yang 07]は、生態系の二酸化炭素交換量をリモートセンシングデータからSVM (Support Vector Machine)によって予測し、広域での炭素循環を推定している。これらはモデルそのものの研究というよりは、推定精度の高さに力点が置かれている。

気候変動や森林伐採、大規模開発事業などによって生物への影響を知り、生物種の地理的分布変化を予測したり、適切な保全やオフセットを行ったりする必要がある。生物種分布予測には従来、一般線形モデルやルールベースモデルが用いられてきたが、近年最大エントロピー法を用いたMaxentというモデルが注目を集めている。ある生物種の調査を行ったとき、ある位置における生物の存在は目撃などの手段で確認できるが、その場所に存在しないというデータには不確かさが伴う。Maxentは存在するデータのみで環境要因から生物種の分布を予測することができ、精度の高い結果を得ている[Phillips 06]。この分布モデルは比較的簡単に入手できる環境データによって空間外挿で予測できるので、広い範囲での生態系の保全管理の計画に役立つことが期待されている。

Metacatなどと連携可能なモデリングツールも現れている。SEEKプロジェクトが開発したフリーウェアKeplerは、商用モデリングツールのようにビジュアルにフロー図を作成して生態系モデルを構築することがある*6。この際

*4 例えばGlobal Visualization Viewer (USGS), <http://glovis.usgs.gov/>

*5 電子国土基本図(オルソ画像), http://portal.cyberjapan.jp/denshi/index3_ortho.html

*6 <https://kepler-project.org/>

なお、著者は共同でKeplerのマニュアルを日本語化している。
<http://www.eco-informatics.jp/aboutKepler.html>

に、データベースやメタデータベースを直接アクセスすることによって必要なデータを得ることができる。表2や表3に示したように、ややもすれば分散的な生態系、生物多様性データを、事前にローカルなデータベース整備をせずに、アドホックにモデリングと解析を行うことが可能となる。ただし、この分野は萌芽的であり、従前のモデリング研究と比較できる研究はまだ現れていない。

4. エコインフォマティクス

4.1 広義と狭義

データ量と解析の複雑化に伴い、生態系科学における研究テーマがどのように広がっているかについて図1に示した。この図は、[真板 11] をもとに著者が改変した。大きく分けて4ニッチを示したが、そのうち右上以外の3ニッチはすでに従来から研究されている分野といえる。エコインフォマティクスという分野は広い意味では、図1全体の進展を指すことになるが、本稿では狭い意味で捉え右上のニッチを指している。

左下のポジション(1)は、フィールド研究とそこから導かれる速報的解析研究で伝統的に生態学や博物学が得意としてきた分野である。このポジションはすっかり時代遅れとなったわけではなく、生態系科学の根幹を支え、今後ますます必要とされる研究の源泉といえる。

左中(2)に、ダイナミクス理論やゲーム理論などを応用した、いわゆる数理生態学の研究である。このポジションも伝統的なニッチといえ、かつて生態系研究のデスクワークといえちを指した。

右側のエリアが大規模データの進展によって広がった研究ニッチである。右側の中間(3)は、メタ解析や生物種分布研究である。従来もちろんこういった研究が行われてきたが、大量データの出現によって質の転換が見

られる。前述のように現在のメタ解析は扱うデータ量がデータベースによって指数的に増加した。種分布研究も、生物種の在不在データから手書きで境界線を引くものから、前述したMaxentなどを利用し、在データと環境データを同時に解析する統計的予測モデルへと変化した。

最後の右上(4)が完全に新しい分野であり、大量のデータを複雑な解析方法を使って分析する研究である。データの大量化・解析の複雑化は進展中であり、このニッチはまさに右肩上がりの可能性を秘めているといえる。前述のすべての技術が結び合わされたときの、その相乗効果は予測することすら難しい。以下に、なるべく控えめな予想を行ってみた(図2)。

リアルタイムデータ、完備されたアーカイブデータはメタデータ付きでデータベースに格納されている。研究者は自分の興味や社会的要請によって、大量データを処理する。例えば外来種の分布や温暖化による植生の変化などのモデルをビジュアルに開発し、二、三の操作によってモデルに必要なデータがメタデータベースで検索され、パラメータがチューニングされる。その際に、生態学オントロジー[Bowers 10]などによって、適切に種名や環境条件が再解釈され、必要に応じて適切な変換や補間が行われる(例えば単位変換や空間外挿)。結果は自動的にされた不確定性評価とともにGIS上に表示され、スライダをつまむと10年後、100年後の変化が表示される。これらの結果はすぐに論文化できるだけでなく、視覚的な資料が多いので政策決定者から環境教育まで、社会へアウトリーチも容易である。これらの結果は必要な調査や研究も示唆されており、研究者だけでなく、研究資金や調査資金を配分する意思決定者にも有益な情報である。

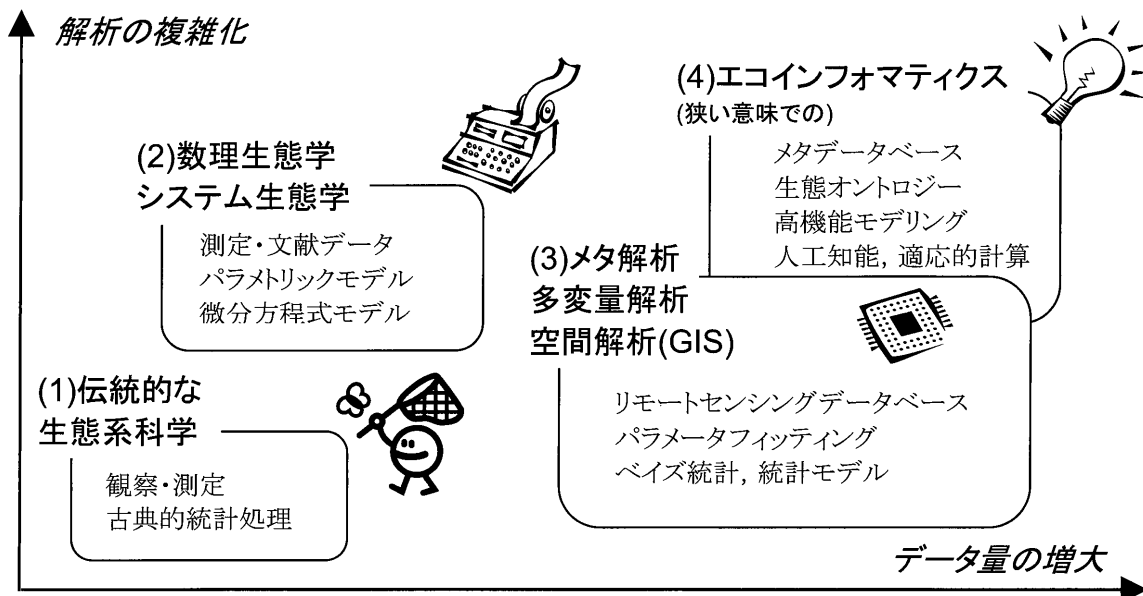


図1 生態系科学とエコインフォマティクスの関係 ([真板 11] をもとに著者改変)

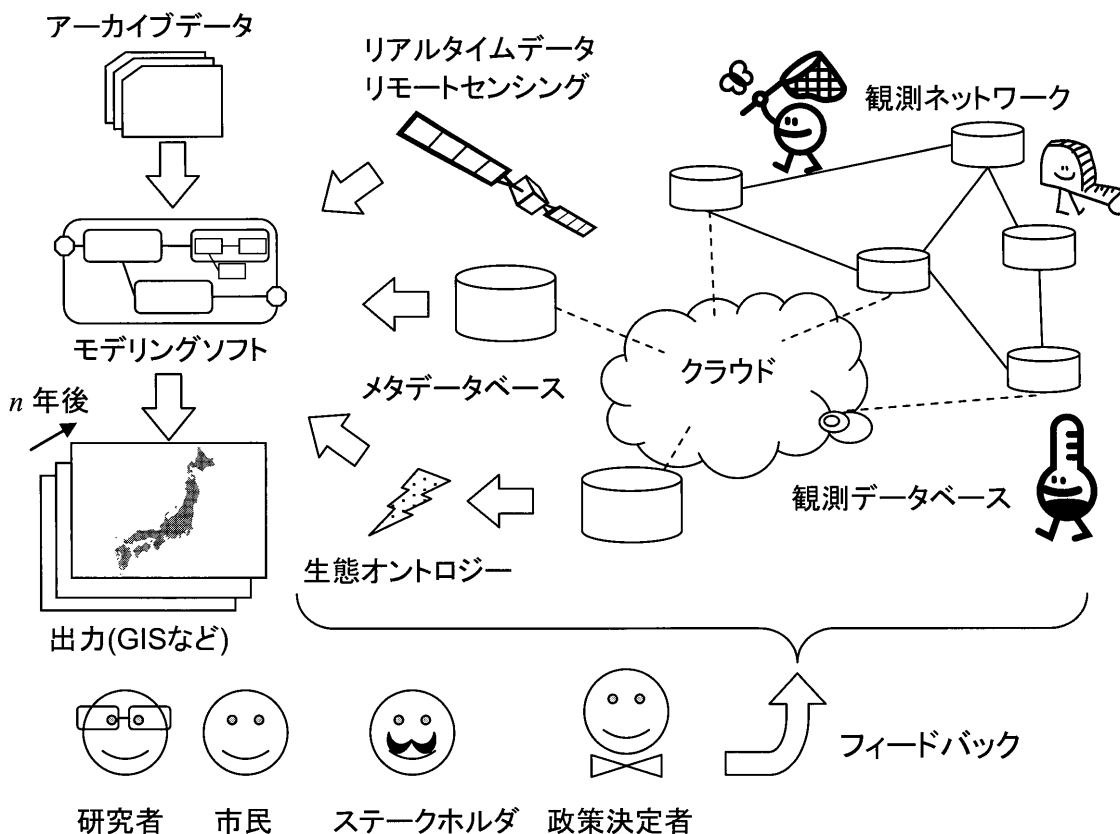


図2 エコインフォマティクスによる生態系研究の近未来像

4・2 課題

§1 データに関する困難性

最初にあげられるのが「多様性」の問題である。長さや重さは物理学的に厳密に定義されており世界共通であるが、生物種や生態系の定義にはさまざまなバージョンがある。それだけでなく、関連した同定方法、測定方法もプロトコル化の試みがあるものの、すべての研究者がそれに従っているわけではない。これは、データ（生物種や数値）がどのような方法で観測されたかということも必要である、という単純な問題ではない。よほど大きな観測キャンペーンでも行わない限り同質なデータは望めない。玉石混濁なデータを、何らかの方法で補正したりフィルタをかけるなどして分析する必要がある。

続く問題として「非平衡・非線形性」があげられる。生命現象が非平衡であることは指摘されて久しいが、流転する環境で流転する生物を計ることは容易ではない。しかも非線形応答をすることも多い（例えばヒステリシス応答）。これらは大量データの流通で、統計的な手法によるバイアスの確認や補正によって以前ほど問題ではなくなったかもしれないが、精度の高い予測を行ううえでは障害となっている。

また「観測・観察の制約」の問題もある。野外観測を行うときは、特定の目的で行われ、さまざまな制約もあるので記載される項目は限られている。また測定できる地点、数も限られている。例えば森林のバイオマス量を測定したいとき、木の高さや幹回り（樹高、胸高直径）

は計るかもしれないが、根を掘削してその重さを測定するということはあまりない。また森林の管理履歴などは記録されていないことが多い。もちろん観測点数や場所も限られてくる。限られた研究資源の中でどのように測定するかということは、研究目的の中で自ずと決定される。そういったコンテキストに埋め込まれたデータを、エコインフォマティクスにより収集・整理・統合された二次データとして利用する場合、この文脈を配慮しながら統計的にどの程度の単純化、また空間的・時間的補間が許されるかを見極め研究しなければならない。

以上、問題はこれら3点だけではなく、むしろ無数にある。これらの解決策を情報科学や人工知能学から待つのではなく、エコインフォマティクスが積極的に解決策を提案することもまた必要とされている。

§2 データの公共性

前述したデータベースから多くのデータを引き出すことができるが、これらが観測・観察されたすべてのデータを収録しているわけではない。わざわざ印刷する、公開するほどではないと思われていた資料が多数存在する。希少種保護のため、また研究機関の競争のため、公的機関が行った観測でもデータが秘匿される場合もある。

生態系や生物多様性の研究において、観測・観察だけでも少なくとも1年の時間が必要な場合が多い。解析を終えて、その論文を出版するには少なくとも2〜3年、場合によっては10年単位の時間が必要といえる。その観測・観察が他の研究者にとっても有益であり、早期の

公開が望まれる場合でも、フィールドワークを行った研究者やグループが出版を終えるまで待たなければならない。

しかし、すべての観測が論文化されるわけではなく、出版の見込みが立たない（新規性や独自性がない）場合は、データは日の目を見ない。また論文化されたとしても、卒業論文などといったいわゆるグレー文献となることも多い。こういったデータは、現在だけでなく、過去に遡り膨大な量で存在していると考えられる。

これに対してさまざまな解決策が試みられている。フェアユースなどの条項を定めているデータベースがある。また、論文ではなく、「データペーパー」（例えば日本生態学会における議論、[矢原 09]）という基準で、観測業績を認めただけで、二次利用を促進する動きもある。

5. 学際研究の方向性

5.1 生物学, 生命科学内

生態系を扱う分野は生物学の枠組みの中では比較的新しい分野であるが、その中にさらに細分化された分野が存在していた。しかし、上述のような技術革新からフィールド科学者も地理座標や DNA, あるいは秒間隔などの大量データを採取・観測し、またデータベースに登録することを前提に観測計画やシステムを組み立てることが多くなった。

これまで生物学は、生命現象をおおのこの専門化されたマップ上で見ていた。分類学者であれば系統図であり、生理学者であれば化学反応図であり、生態学者であればニッチ（マップ）であった。これはある種、三次元の地球を二次元の地図に変換していることと似ている。これは座標変換であれば、地球という物体をどのようなモデルで捉えるか（地球楕円体）、座標の取り方（緯度経度、絶対座標）に似ている。またどの主題で捉えるかということも重要である。地球儀でも、国境で捉えるか、地形や植生で捉えるかで見え方がまるで変わってくることも似ている。

過去の生物学は、中高校で使われる地図帳と似ている。さまざまな地図座標、さまざまな主題の地図が掲載されているが、それらを統合的に見ることは難しかった。GISが行ったように、今後エコインフォマティクスが、さまざまな情報を「オーバーレイ」することによって、かつより高度な解析を施すことによって、詳細な生命・生態系の全体像を示してくれるにちがいない。生命・生態系研究の分野間の融合が始まっているともいえる。

5.2 環境科学

生態系、生物多様性を専門とする以外の科学者との連携が求められている。特に求められているのは環境問題などに関わる環境科学の分野であるといえるだろう。例えば [Viheraara 13] は生態系モニタリングの国際ネットワークである ILTER が提供する生態系サービスや生物

多様性データは、気候変動対策に重要であることを論じている。

大規模な事業に際して、生物、生態系への影響を調査するアセスメントが義務付けられているが、エコインフォマティクスの進展は、環境影響評価にとどまらないデータをもたらし、より進んだ保全計画に役立つだろう。また生態系サービスや生物多様性の視点を入れることによって、都市計画や地域計画もよりグリーンなプランニングが可能となるだろう。

5.3 基礎科学, 情報科学, AI 技術

エコインフォマティクスではデータベースとそれを解析する統計学的ツールは広く認知され、整いつつある。しかし情報科学分野での先端的な技術の導入はまだ初期的段階である。情報科学関連の研究者がエコインフォマティクス技術の開発などへの参加が望まれている。

しかし、バイオインフォマティクスと比較して、エコインフォマティクスが対象とするデータは前章で指摘したようにさまざまな問題を抱えている。このことも含め、情報科学関連の研究者が生態系科学研究に参加しにくい状況であることもまた指摘できる。

生態系科学は、古典物理学などの若干「古く」なりつつある科学体系を範として成長し、一定の社会的地位を獲得した。しかし、生物や生態系など一種捉えどころのないシステムを情報学的対象として捉え直し、特に環境問題や社会の持続可能性問題と関連付けて、総合・統合的に研究することは学術的意義だけでなく、社会的意義もまた高いといえるだろう。近年、エコインフォマティクスを掲げた研究所や大学の専攻が出現し^{*7}、分野の専門研究者が育ちつつある状況はこれを裏付けている。そしてこのような場での生態系科学と情報科学、人工知能学との共同研究は、互いの基礎分野への貢献もまた十分期待できるだろう。

成長したエコインフォマティクスが描く生態系像は、冒頭の「動く地図」以上のものであることは間違いない。

謝辞

柴田英昭さん、野々村安紀子さんより原稿に貴重なコメントをいただいた。真板英一さんよりエコインフォマティクスマトリクス図の転載・改編許可をいただいた。

この原稿執筆にあたって、先端研究助成基金助成金（最先端・次世代研究開発支援プログラム）「生態系サービス・

*7 例えば以下のような高等教育プログラムが存在する。

Ecoinformatics and geographic information systems, Rochester Institute of Technology,

<http://www.rit.edu/cos/environmental/eco/>

Ecoinformatics & Biodiversity, Aarhus University,

<http://bios.au.dk/en/research/sections/integrative-ecology-and-evolution/ecoinformatics/PhD>

Programme for Environmental Informatics,

<http://www.uni-goettingen.de/en/30826.html>

社会経済影響を考慮した生物多様性オフセットの総合評価手法の研究」(研究代表者・林 希一郎, 名古屋大学エコトピア科学研究所) による支援を受けた。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Argerich 13] Argerich, A., Johnson, S. L., Sebestyen, S. D., Rhoades, C. C. and Greathouse, E., et al.: Trends in stream nitrogen concentrations for forested reference catchments across the USA, *Environ. Res. Lett.*, Vol. 8, 014039 (2013)
- [Bello 10] Bello, F., Lavorel, S., Diaz, S., Harrington, R. and Cornelissen, J. H. C., et al.: Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits, *Biodivers. Conserv.*, Vol. 19, pp. 2873-2893 (2010)
- [Bowers 10] Bowers, S., Madin, J. S. and Schildhauer, M. P.: Owlifier: Creating OWL-DL ontologies from simple spreadsheet-based knowledge descriptions, *Ecol. Informat.*, Vol. 5, pp. 19-25 (2010)
- [Franklin 04] Franklin, J.: *Mapping Species Distributions: Spatial Inference and Prediction*, Cambridge University Press (2004)
- [GBIF 日本ノード 13] GBIF 日本ノード: Darwin Core について, http://www.gbif.jp/gbif_search/darwincore.html (2012)
- [橋本 12] 橋本雄一: GISと地理空間情報: ArcGIS10とダウンロードデータの活用, 古今書院 (2012)
- [JaLTER 情報管理委員会 13] JaLTER 情報管理委員会: JaLTER Wiki, <http://jalter.forest.kyushu-u.ac.jp/wiki/index.php> (2013)
- [Johnston 98] Johnston, C. A.: *Geographic Information Systems in Ecology*, Wiley-Blackwell (1998)
- [鎌内 08] 鎌内宏光, 小川安紀子: ワークショップ「生態学関連データベースにおける最近の動向と今後の展望」の報告, 日本生態学会誌, Vol. 58, pp. 131-136 (2008)
- [小宮 09] 小宮圭示, 真板英一, 小川安紀子: 長期生態系モニタリングデータの蓄積と利用について: JaLTERの取り組み, 北方森林保全技術, Vol. 27, pp. 16-19 (2009)
- [真板 11] 真板英一: エコインフォマティクス概観, 日本生態学会第58回全国大会自由集会「Ecoinformatics: 情報科学でやる生態学」資料 (2011)
- [Nakano 12] Nakano, S., Yahara, T. and Nakashizuka, T., eds.: *The Biodiversity Observation Network in the Asia-Pacific Region, Ecological Research Monographs 2012*, Springer (2012)
- [日本学術会議 10] 日本学術会議: 提言: 生物多様性の保全と持続可能な利用, <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-t90-1.pdf> (2010)
- [小川 07] 小川安紀子, 藤原章雄: USLTERのエコロジカル・インフォマティクス技術の動向, 日本森林学会誌, Vol. 89, pp. 360-364 (2007)
- [大手 12] 大手信人: GRENE 生物多様性・生態情報の環境情報への統合化プロジェクトとJaLTERの役割, 京都大学生態学研究中心ニューズ, Vol. 118, p. 5 (2012)
- [Ooba 06] Ooba, M., Hirano, T., Mogami, J., Hirata, R. and Fujinuma, Y.: Comparisons of gap-filling methods for carbon flux data set: A combination of a genetic algorithm and an artificial neural network, *Ecol. Model.*, Vol. 198, pp. 473-486 (2006)
- [Phillips 06] Phillips, S. J., Anderson, R. P. and Schapire, R. E.: Maximum entropy modeling of species geographic distributions, *Ecol. Model.*, Vol. 190, pp. 231-259 (2006)
- [Saigusa 10] Saigusa, N., Ichii, K., Murakami, H., Hirata, R. and Asanuma, J., et al.: Impact of meteorological anomalies in the 2003 summer on Gross Primary Productivity in East Asia, *Biogeosciences*, Vol. 7, pp. 641-655 (2010)
- [生物多様性総合評価検討委員会 10] 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, 環境省 (2010)
- [鈴木 13] 鈴木力英: 北半球寒冷地域におけるリモートセンシングによる広域植生の最近の研究動向, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 33, pp. 48-55 (2013)
- [庄山 12] 庄山紀久子: 気候変動対策と生物多様性保全の連携を目指した生態系サービス評価: 空間評価ツール InVESTの利用, 日本生態学会第59回全国大会自由集会「IPBESと生態系サービス評価の国際動向」資料, http://www.see.eng.osaka-u.ac.jp/seege/seege/event/esj59_ws/ (2012)
- [Templer 12] Templer, P. H., Mack, M. C., Chapin, F. S., Christenson, L. M. and Compton, J. E., et al.: Sinks for nitrogen inputs in terrestrial ecosystems: A meta-analysis of 15N tracer field studies, *Ecology*, Vol. 93, pp. 1816-1829 (2012)
- [富永 08] 富永 修, 高井則之 編: 安定同位体スコープで覗く海洋生物の生態, 恒星社厚生閣 (2008)
- [Vandelbilt 10] Vanderbilt, K. L., Blankman, D., Guo, X., He, H. and Lin, C. C. et al.: A multilingual metadata catalog for the ILTER: Issues and approaches, *Ecol. Informat.*, Vol. 5, pp. 187-193 (2010)
- [Viheraara 13] Viheraara, P., D'Amato, D., Forsius, M., Angelstam, P. and Baessler, C., et al.: Using long-term ecosystem service and biodiversity data to study the impacts and adaptation options in response to climate change: Insights from the global ILTER sites network, *Current Opinion Environ. Sustainabil.*, Vol. 5, pp. 53-66 (2013)
- [矢原 09] 矢原徹一: 会長からのメッセージ: 法人化・データベース・生物多様性基本法, <http://www.esj.ne.jp/esj/message/archive/no0103.html> (2009)
- [Yang 07] Yang, F., Ichii, K., White, M. A., Hashimoto, H. and Michaelis, A. R., et al.: Developing a continental-scale measure of gross primary production by combining MODIS and AmeriFlux data through support vector machine approach, *Remote Sensing Environ.*, Vol. 110, pp. 109-122 (2007)
- [吉武 11] 吉武 啓, 栗原 隆, 吉松 慎一, 中谷 至伸, 安田 耕司: 農業環境技術研究所所蔵の土生視申コレクション (昆虫綱: コウチュウ目: オサムシ科) 標本目録, 農業環境技術研究所報告, Vol. 28, pp. 1-327 (2011)

2013年4月30日 受理

— 著 者 紹 介 —



大場 真

2001年北海道大学大学院地球環境科学研究科単位取得退学。大阪大学工学研究科特任研究員, 国立環境研究所 NIES フェロー, 名古屋大学エコトピア科学研究科特任助教を経て, 2013年から東京農業大学地域環境科学部准教授。博士(地球環境科学)。生態系モデルの開発と, その持続可能な社会への応用について研究。