

Environment Research and Technology Development Fund

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

生態学的ビッグデータを基盤とした生物多様性パターンの予測と自然公園の  
実効力評価

(4-1501)

平成27年度～平成29年度

Spatial prioritization of protected areas in East Asian biodiversity hotspots: assessment of conservation bias  
and long-term effectiveness based on ecological big data

(英文パンフレット等[http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/english/gaiyou/pdf/2017\\_pamphlet\\_eng.pdf](http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/english/gaiyou/pdf/2017_pamphlet_eng.pdf))

〈研究代表機関〉

琉球大学

〈研究分担機関〉

情報・システム研究機構 統計数理研究所

〈研究協力機関〉

ヘルシンキ大学

平成30年5月

## 目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 生物多様性情報のプラットフォーム構築と保護区配置分析 (国立大学法人琉球大学)	12
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 生物分布情報の多様性を考慮した生態ニッチモデルの開発 (大学共同利用機関法人情報・システム研究機構統計数理研究所)	31
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
III. 英文Abstract	40

## 1. 成果の概要

課題名 4-1501 生態学的ビッグデータを基盤とした生物多様性パターンの予測と自然公園の実効力評価  
 課題代表者名 久保田 康裕（国立大学法人琉球大学・理学部 教授）

研究実施期間 平成27～29年度

累計予算額 38,378千円（うち平成29年度：12,988千円）  
 予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 生物多様性、生態系管理・保全、生態系影響解析、空間的な保全優先地域の分析、生物地理学、保護区ネットワーク、マクロ生態学、Maxent法

### 研究体制

- (1) 生物多様性情報のプラットフォーム構築と保護区配置分析（国立大学法人琉球大学）
- (2) 生物分布情報の多様性を考慮した生態ニッチモデルの開発（大学共同利用機関法人情報・システム研究機構統計数理研究所）

### 研究協力機関

ヘルシンキ大学

## 1. はじめに（研究背景等）

地球規模での生物多様性の損失に歯止めをかけるべく、194の国と地域が生物多様性条約に批准し、様々な戦略目標を定めている。その中でも、自然保護区の設置による生物多様性保全は中心的課題の一つであり、第10回締約国会議（名古屋COP10）では、2020年までに陸域の少なくとも17%を実効力のある保護区でカバーする、という具体的な数値目標（愛知目標）が設定された。このため、生物多様性を効果的に捕捉する保護区ネットワークの構築に向けた学際的かつ実務的な取り組みが各国で進められている。特に日本は、世界的な生物多様性ホットスポットの一つとして、早急な保全対策が求められる地域である。しかしながら、現在の日本の自然保護区（国立公園や国定公園など）の多くは、景観の美しさや社会経済的要因を理由に設置されてきた歴史的背景があり、既存の自然保護区ネットワークの生物多様性保全における実効性については十分に検証されていない（図1）。また、自然保護区の設置は、社会経済活動への法的規制を伴うことから、保護区の設置計画においては、生物多様性の保全効果と社会経済活動のトレードオフやそれに伴う利害関係も考慮する必要がある。したがって、愛知目標を達成するためには、社会的実行性を兼ね備えた保全計画の分析が緊急の課題であり、それを支援するための概念的・方法論的枠組であるシステム化保全計画に基づいた実務的な生物多様性保全政策の開発研究が欧米諸国を中心に進んでいる。

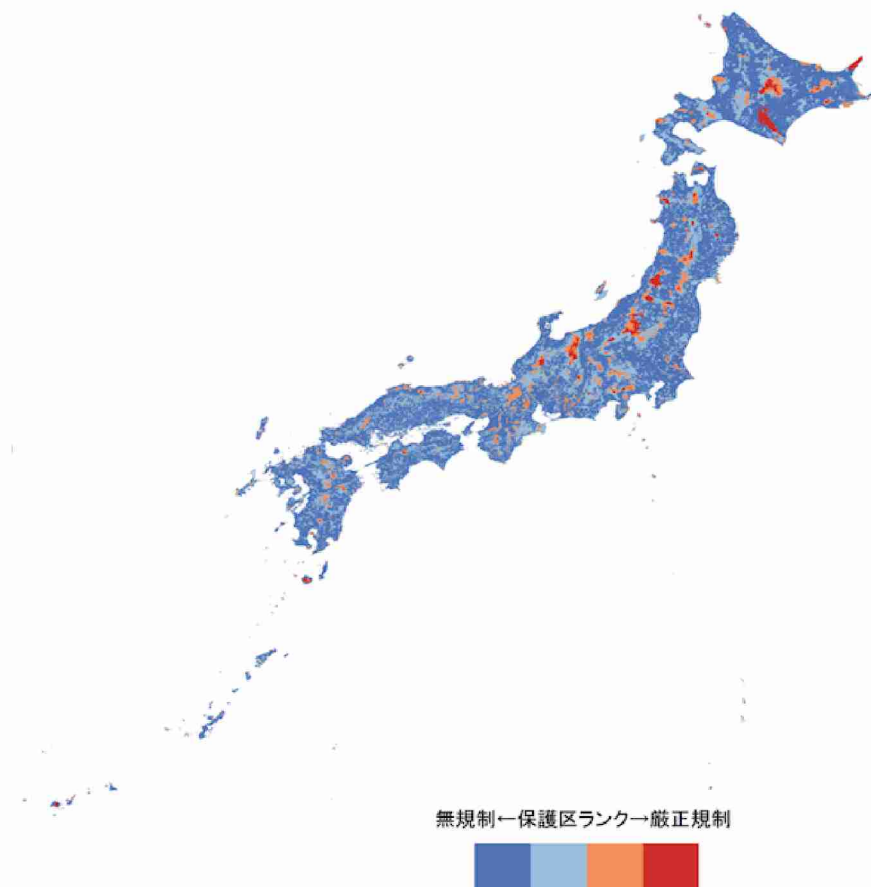


図1 現在の自然保護区の空間分布

保全政策の意思決定プロセスには、地域の専門家・有識者の経験則が大きく影響する。さらに、生物多様性の全体的な情報は不足することが一般的なので、特定の地域での科学的知見や特異的な生物種（研究対象となりやすい種や象徴的な種）が生物多様性の指標として主観的に用いられる傾向がある。一方、地域レベルの科学的知見や経験則は、その他の地域の保全計画を検討する場合には必ずしも汎用性がない。したがって、現状の生物多様性保全に関する学際的な取り組みは、国家レベルでの保全計画の検討や、保全計画の効果と社会経済的トレードオフの分析には遠く及ばない。科学的根拠に乏しい保全政策は合意形成が困難になり、結果として「保全か開発か」の二者択一的な論争に陥りやすい。このような現状の背景として、1)生物多様性の空間情報のデータベース化が決定的に遅れており、マクロ的かつ生物分類群を網羅した客観的な分析を行うための基盤がないこと、2)システム化保全計画法の空間的保全優先地域の順位付け分析が日本の保全生態学分野に定着していないことが挙げられる。

しかしながら、これまでの膨大な自然史研究や環境省による基礎調査によって生物多様性の空間分布に関する情報は豊富に蓄積されており、潜在的なビッグデータをなしている。このような生態学的ビッグデータは、種ごとの分布域を把握するための情報源として利用できる。さらに、統計的機械学習法に基づいた種分布モデル（Maxent法）は生物種の環境ニッチを仮定することにより、集積された分布データから種の潜在的な分布域を高精度で予測することを可能にしつつある。Maxent法では、特定の地域における対象種の存在を網羅的に調べる必要がなく、調査手法に関係なく、野外での種の生息が確認された地点とその他のランダムに選んだ地点（バックグラウンド）の環境情報を用いて種分布を推定できる。一方、Maxent法では、観察努力量の空間的偏り（サンプリングバイアス）に起因する誤推定にも配慮する必要がある。例えば、アクセスが容易な場所では、調査データが集中しやすい。このように、個別研究によって蓄積された情報は様々なバイアスを含んでおり、特に空間的なデータの偏りは、生物多様性の空間パターンを予測し、それに基づいて保全計画を検討する上で重要な問題となる。したがって、保全計画の立案における生態学的ビッグデータの利用価値を高めるために、空間バイアスを考慮した種分布モデリング手法の開発も、同時に求められている。

これらの課題に取り組むことで、生物多様性データの量と質が向上することが期待され、データベース化として可視化された生態学的ビッグデータは、様々な時空間スケールでの生物多様性の起源と維持のメカニズムに関する研究を可能にする。広域的な生物相の進化的形成プロセス、地域的な生物群集の生態学的形成プロセスの統合的な理解を促進する(図2)。これらは、気候環境変動下の複雑な生物群集の応答に適応した多面的な生物多様性保全を検討する上での基盤として不可欠なものである。

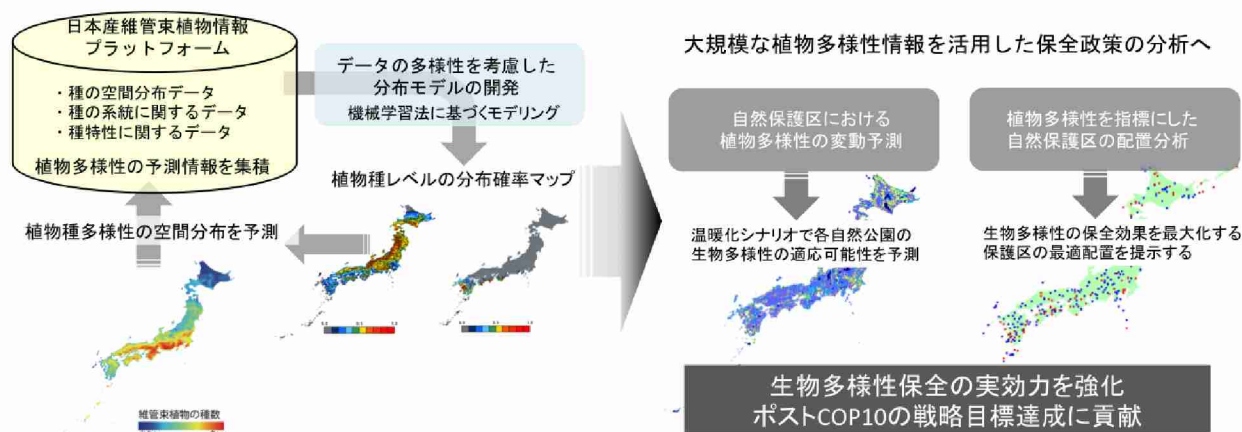


図2 生態学的ビッグデータを基盤とした生物多様性パターンの予測と自然公園の実効力評価の研究フロー。

## 2. 研究開発目的

日本における生態学的ビッグデータの利用可能化と、生物多様性パターン分析および保全生物地理学的研究により、実効性のある保全政策の立案に寄与する。本研究では、これらの課題に対して5つの目的を設定し、琉球大学(サブテーマ1)と統計数理研究所(サブテーマ2)で分担した:1)地理座標に対応した種リストを自動生成するシステムを開発する(サブテーマ1)、2)生物多様性の空間分布を可視化し、行政、研究者、環境アセスメント業者、教育関係者が利用可能な、生物多様性情報データベースを構築する(サブテーマ1)、3)統計的機械学習の枠組みで、データの空間的偏りを考慮したモデリング手法を開発する(サブテーマ2);4)維管束植物種と脊椎動物種の分布パターンを高精度(1 km x 1 km)で予測する分布モデリングを行う(サブテーマ2);5)空間的保全優先地域を特定し、保全と社会経済的活動のトレードオフ関係を考慮した保護区ネットワークの地理的配置を、最適化分析で解明する(サブテーマ1)。さらに、サブテーマ2では、目的2を4つに課題に細分化した:i)従来の分布モデリング(Maxent法や最尤法など)の利点と問題点を把握する、ii)経験的に高精度で分布域が把握されている種を用いて、実分布と分布予測の乖離を分析することで、調査サンプリング手法やデータの空間的偏りが、分布予測に及ぼす影響を解明する、iii)サンプリングバイアスを考慮して、生物種の分布予測の精度を向上させるため理論の再検討および新規的なモデリング手法の検討を行う、iv)実データを用いて、従来のモデリング手法と開発した手法の推定精度の違いを明らかにする。プロジェクト全体を通して、サブテーマ間で相互に研究成果をフィードバックすることで、さらなる課題設定と成果の充実を図る。

## 3. 研究開発の方法

### (1) 生物多様性情報のプラットフォーム構築と保護区配置分析

日本に分布する維管束植物と脊椎動物の種レベルの地理分布情報を1 km x 1 kmメッシュスケールの空間解像度で収集しデータベース化した。準備研究において得られた地点情報(250万点)を解析して情報不足地域を特定し、該当地域における分布情報を野外調査などによって補完的に収集した。紙媒体情報の電子化は、データ入力者を雇用して行った。各メッシュに対応した地理座標(緯度・経度)毎に、種リストを自動生成するプログラムを開発し、地点毎、地域毎、自然公園毎に、維管束植物種と脊椎動物種の多様性を可視化する環境を整えた。さらに、日本の生物多様性の形成機構を理解することを目的として、日本産維管束植物(シダ・草本・木本)の系統情報を既存研究から収集して系統樹を作成した。系統樹データと各種の地理分布データを統合して、植物群集の系統構造を地図化した。

次に、現状の自然保護区の地理分布をデータ化し、現状の保護区配置の空間バイアスを明らかにした。さら

に、生物多様性の空間パターン、および生物多様性の起源と維持に関わる環境要因の空間パターンを保護区ネットワークがどの程度捕捉できているかについてギャップ分析を行った。

さらに、生物多様性保全の政策に関する保護区ネットワークの設計において、概念的理論的な基盤となるシステム化保全計画法の総説を国内誌で発表した。この総説は、保全研究者や保全行政関係者に向けた内容とし、システム化保全計画法の日本における認知度の向上を図った。

維管束植物ならびに脊椎動物の分類群間での保全上重要地域の空間相関を解析し、分類群間ギャップを把握した。さらに、複数の分類群を包括した空間的優先保全地域の順位づけ分析を行った。最後に、自然保護区面積を国土の17%へと拡張すること、すなわち愛知目標の達成するための保護区ネットワークの設計を想定した分析を行った。具体的には、愛知目標を達成するための理想的な保護区ネットワークと現行の自然保護区の生物多様性の捕捉効率を明らかにし、各都道府県レベルの生物多様性保全の地域戦略の課題としてまとめた。

## (2) 生物分布情報の多様性を考慮した生態ニッチモデルの開発

生態学的ビッグデータを集積し、それを利用可能な形へ体系化する上で、生物分布データの空間的偏りを考慮した生態ニッチモデルの開発が不可欠となる。このサブテーマでは、空間バイアスを含む在データから、生物種分布を高精度(10 x 10 km)で推定する生態ニッチモデルを開発し、種レベルとそれを積み上げた種多様性の分布予測を行った。なお、種分布と群集組成情報は、サブテーマ1)で整備したデータを用いた。まず、生物種の潜在分布の予測に用いられるMaxent法の利点と問題点を整理した。そこから空間バイアスに関する課題を明らかにし、バイアスを観測誤差として明示的に扱うモデリング手法を開発した。具体的には、調査努力量の空間バイアスを、サンプリング法の特異性に帰着させた分布モデルを分析した。さらに、準線形モデリングに基づくポアソン点過程を拡張したモデルを提案し、その予測精度を従来のモデルとの比較から明らかにした。

## 4. 結果及び考察

### (1) 生物多様性情報のプラットフォーム構築と保護区配置分析

はじめに、日本の維管束植物および脊椎動物(全6,365種)について、分布情報を収集した。維管束植物に関する基盤データは、本プロジェクトの準備段階でほぼ完了していたので、そこから得られた情報不足地域を中心にさらに分布情報を収集した。さらに、研究の進捗が予想を上回ったため、生物分類群を脊椎動物(哺乳類:爬虫類・両生類・淡水魚類・鳥類)にまで拡張し、生物多様性の分布データの完全性を向上させた。これらより、日本産維管束植物および脊椎動物の種多様性地図を完成させた(成果の詳細参照)。さらに、維管束植物および脊椎動物の各種の系統情報を網羅的に収集して各生物分類群の系統樹を作成し、それを種の分布情報と統合した。これにより、日本各地の維管束植物種や脊椎動物の群集系統構造を地図化した。最初に、研究当初のモデル分類群である維管束植物を生物多様性サロゲート(surrogate: 代替指標)にした分析を行い、日本の生物多様性の進化的ホットスポットを特定し、生態系の基盤分類群である植物多様性の歴史的形成機構を解明した(成果の詳細参照)。さらに、日本産維管束植物種・脊椎動物種の地理分布を緯度・経度グリッド毎に計算・確認するためのプログラムを構築し、生物の種多様性をGoogle Earth上で可視化する環境を構築した。これにより、生物多様性の観点からの保全優先地域を特定するデータ基盤が完成した(成果の詳細参照)。これらの成果により、保全研究のみならず、生物多様性に関わる様々な利害関係者との共同研究・開発・利用が可能になった。

日本の自然保護区の生物多様性保全における実効性を評価するために、日本産維管束植物と脊椎動物を生物多様性サロゲートとして、現状の保護区配置と生物多様性および生息環境の空間的分布相関を分析した。最初に、現状の自然保護区の地理分布をデータ化し、保護区配置の地理的バイアスを把握した(図1)。各保護区の地理的配置を規定している要因を分析した結果、現状の保護区配置は、海岸からの距離、国有林率、標高、緯度、社会経済要因などで主に説明された(図3)。一方、進化生態学的に重要な指標である種多様性や進化的固有度などは、保護区配置の説明因子ではなかった。この結果から、現状の保護区ネットワークは、生物多様性の進化生態学的パターンを捕捉できていないことが明らかとなり、保全上の実効性が乏しいことが判明した。

システム化保全計画法は、このような生物地理情報と社会地理情報を統合的に活用する事で最適な保全計画を提示することができる。実効性のある自然保護区の空間配置を検討する上では、生物多様性保全と社会経済

活動のトレードオフ関係を前提に、費用対効果の綿密な検証が不可欠である(図4)。しかし、日本においてはシステム化保全計画法の認知度は非常に低く、本プロジェクトでの成果を実際の保全行政に活かす上で大きなハードルとなっている。そこで、日本国内の保全研究者や保全行政関係者に向けた総説を作成し、国内誌に論文発表する事で、システム化保全計画によるアプローチを提唱した。

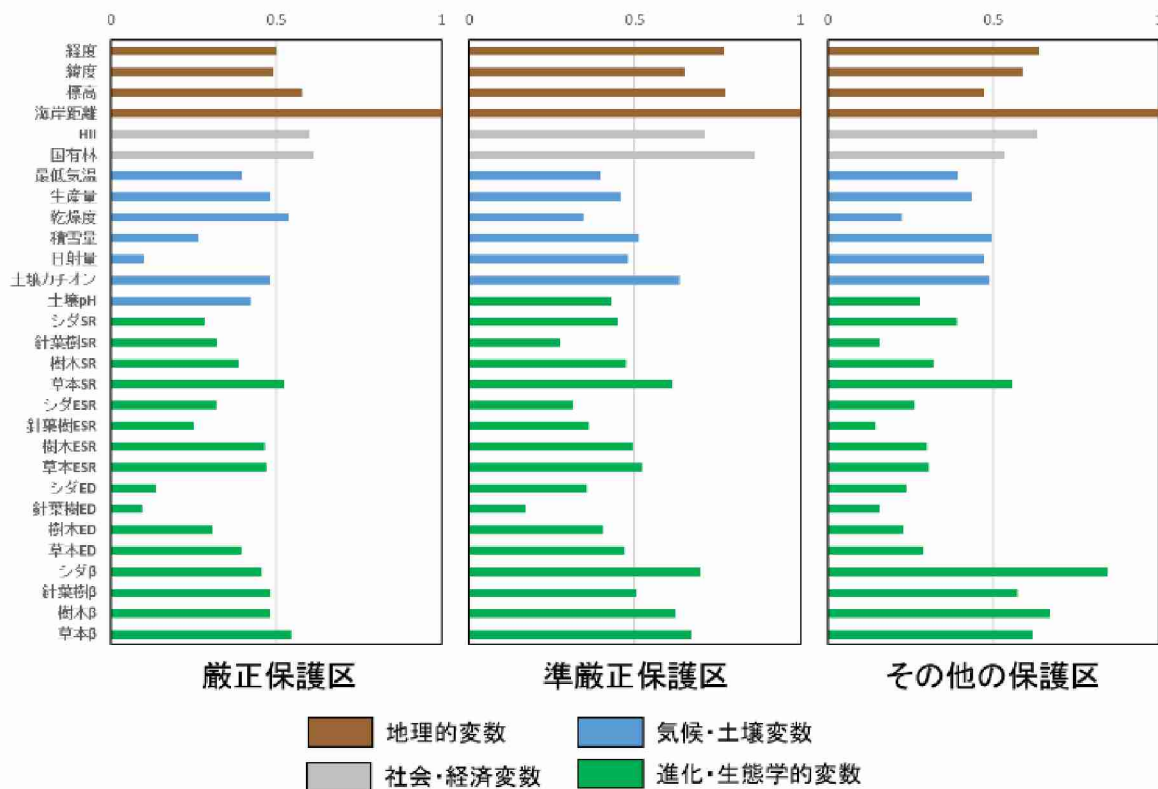


図3 保護の空間配置を説明する要因とその重要度

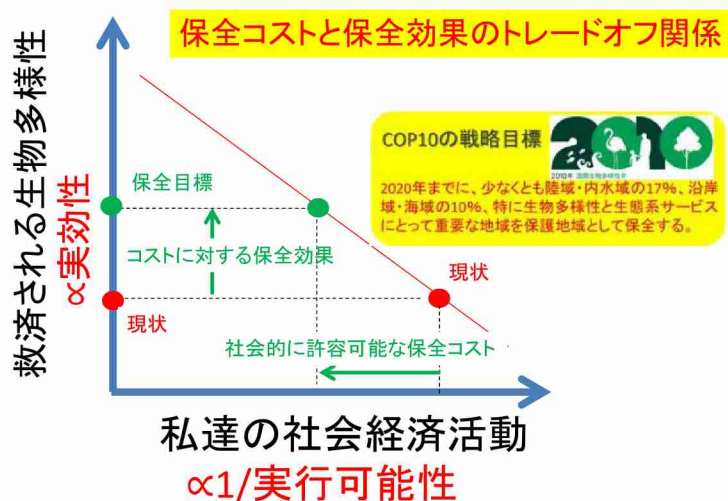


図4 生物多様性保全の効果と社会活動への制約の関係

本研究で構築した高精度の生物多様性データを用いて、日本の潜在的な生物多様性を効果的に保全するための保護区ネットワークの最適な空間配置を、様々な視点に基づいて分析した。ここでは、保全上重要地域を特定するための空間的保全優先地域の優先順位付けのアルゴリズムを用いた。維管束植物(5,565種)、淡水魚類(213種)、両生類(72種)、爬虫類(74種)、鳥類(337種)、哺乳類(104種)の個々の生物分類群を対象として、空間的保全優先地域の優先順位付け分析を行った(図5)。重要地域の空間パターン分類群間での相違を検証し

た結果、分類群の組み合わせによっては、重要地域と非重要地域が逆転することも確認された(図6)。さらに、複数の分類群を包括した分析を行い、現在保護区ではない地域における優先保全地域、既存保護区内での優先保全地域を、体系立ててスコア化した。その結果を用いて、生物多様性保全の実効力を強化する保護区の新設計画として、愛知目標で設定された国土面積の17%に含むべき地域を明らかにした。ここでは、既存の保護区に新たな保護区を拡張するシナリオと、既存保護区の配置に関係なく保護区ネットワークを再設計するシナリオ、それぞれ基づいて自然保護区の空間配置計画を示した(図7)。これにより、各都道府県レベルでの保全計画を改善する上での課題を明らかにした(表1)。

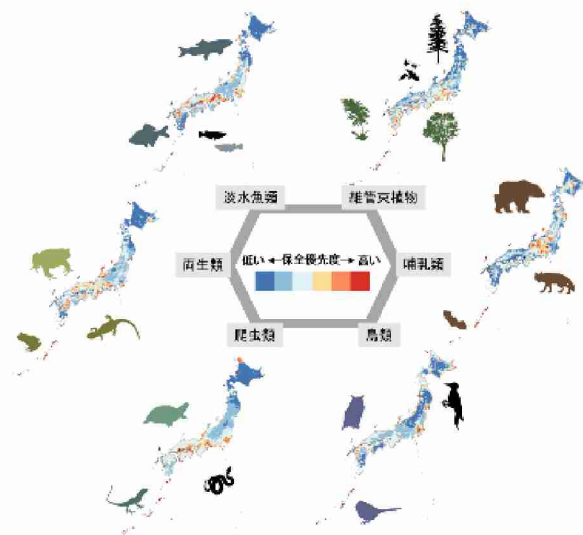


図5 保全上重要地域の地理分布。

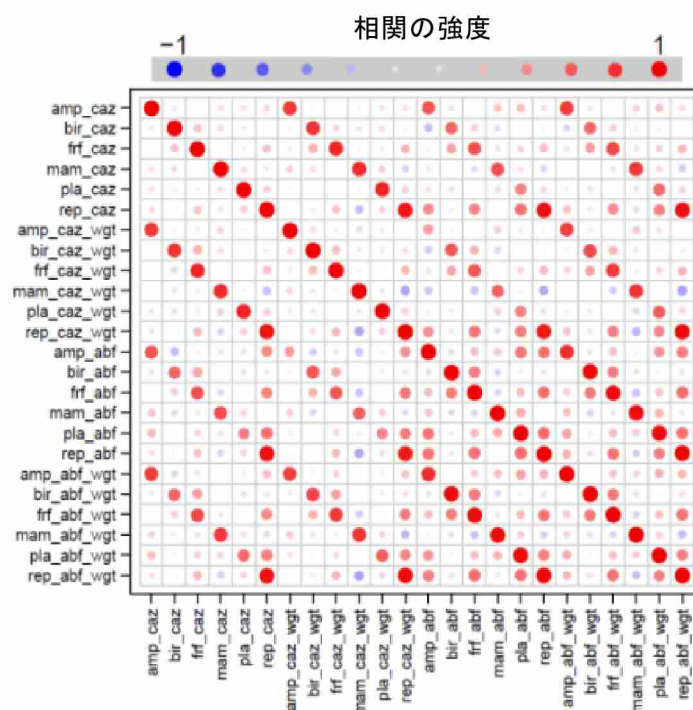
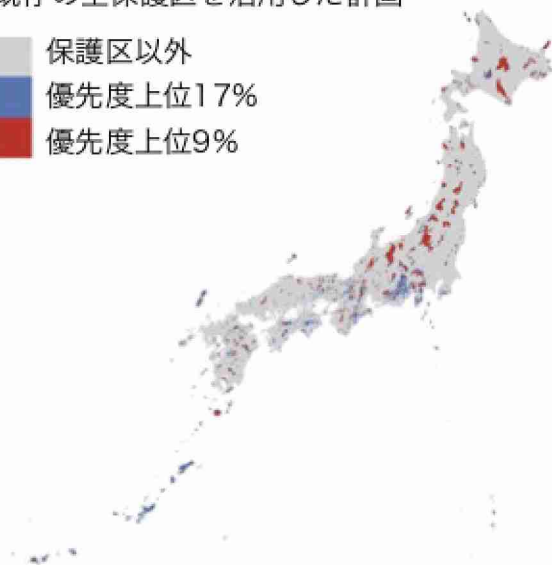


図6 6つの分類群の各スコア間での相関の強度と正負。相関が強いほど大きなシンボルで、相関が正の場合ほど赤色。スコアの略称は分類群(amp両生類、bir鳥類、frf淡水魚類、mam哺乳類、pla維管束植物、rep爬虫類)とアルゴリズム(caz希少種重視、caz\_wgt希少種重視+種の重み付け、abf多様性重視、abf\_wgt多様性重視+種の重み付け)の違いを示す。



## 既存の全保護区を活用した計画

- 保護区以外
- 優先度上位17%
- 優先度上位9%



## 新規計画

- 保護区以外
- 優先度上位17%
- 優先度上位9%

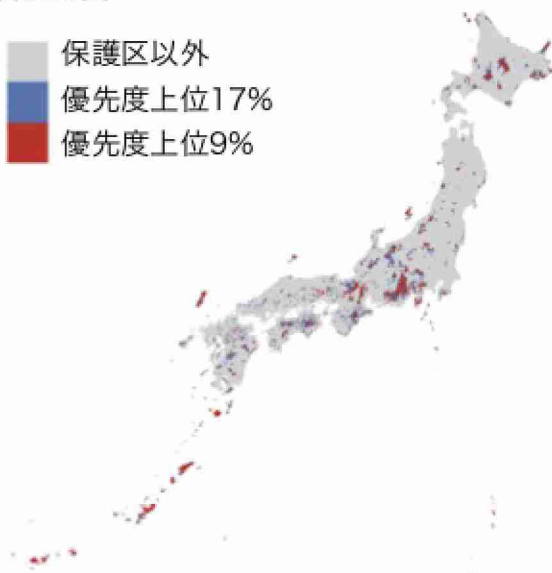


図7 生物多様性保全の実効力を強化する保護区の新設計画図(国土17%カバー案)。上図:既存保護区に新たな保護区を拡張するシナリオ、下図:全ての保護区を新設するシナリオ。灰色:保護区以外、青色:新設する保護区、赤色:既存の保護区

都道府県	優先地域上位17% 面積(km <sup>2</sup> )	厳正保護区面積 (km <sup>2</sup> )	準厳正保護区面積 (km <sup>2</sup> )	保護区での捕捉率 合計	保護区外の優先地 域(km <sup>2</sup> )
鹿児島	3366	190	419	18%	2757
北海道	11020	3325	5166	77%	2529
静岡	2876	48	493	19%	2335
沖縄	2429	106	216	13%	2107
三重	1716	36	486	30%	1194
兵庫	1852	19	714	40%	1119
高知	1273	10	174	14%	1089
長崎	1461	10	412	29%	1039
長野	2749	432	1324	64%	993
徳島	1039	1	79	8%	959

新潟	3305	580	1793	72%	932
熊本	1498	10	617	42%	871
山梨	1518	54	633	45%	831
京都	986	0	195	20%	791
滋賀	1435	7	728	51%	700
大分	1262	41	590	50%	631
岡山	823	4	244	30%	575
愛知	1140	2	594	52%	544
愛媛	814	41	239	34%	534

表1 都道府県別の保護区新設計画案における各種保護区面積の統計値。

## (2) 生物分布情報の多様性を考慮した生態ニッチモデルの開発

生物種の分布情報には様々な特性やバイアスがあり、生データとしての生態学的ビッグデータを利用困難にしている。例えば、ある地域には分布データがたくさんあるが、別の地域では分布データがほとんどない等の問題があり、分布データの空間バイアスは、地域に応じたアクセスや、調査努力量と関係している。また、分布情報には地理的な座標値(緯度・経度)のポイントで表されたものや、分布域といったレンジやエリアで表されたものがある。いずれにしても、生物の分布情報を生データとして扱って、生物種の分布地図を作成することは多くの課題が伴い、データの特徴を、種の分布予測にどのように組込むかが、重要である。

そこで、従来の種分布モデリングの理論的な検証を行い、調査サンプリング手法やデータの空間的偏りを考慮した統計的機械学習法(Maxent法)を考案し、分布予測を向上させる手法を検討した。なお、これら一連の研究では、サブテーマ1で得られた日本産維管束植物種を材料にした。まず最初に一般的なMaxent法によって、植物種の潜在的分布パターンを予測した。図8のように、分布予測値に基づいて種毎の分布地図を作成した。そして、種毎のモデリングを行った後、予測の信頼度をAUC指標によって評価した。この結果から、日本産維管束植物の場合、分布予測の精度は概して高いことが判明した。これは、分布ポイントのデータにバイアスはあるものの、分布データの空間的網羅性が概して高いことを示唆している(成果の詳細を参照)。

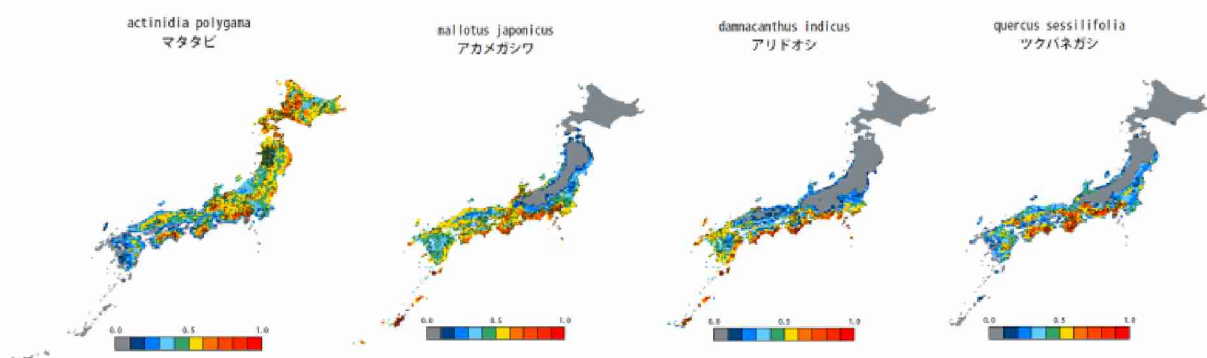


図8 一般的なMaxent法を用いた植物種の潜在分布地域の予測図の例。●: 分布情報が得られた地点。背景色: 赤色ほど分布の可能性が高い

さらに、植物研究者が経験的に描いた種のレンジマップデータと、分布地点を記録したポイントデータを統合的に用い、かつ、ポイントデータの地域バイアス(調査努力量と定義)を明示的に解析するMaxent法の改良モデルを検討した。具体的には、準線形モデリングに基づくポアソン点過程を拡張することで、分布推定精度の向上を図った。形状パラメータ $\tau$ を導入し、環境変数とバイアス変数のモデル化をより柔軟にした。新旧モデルの予測能力の比較検証では、新規モデルが従来のものよりもその有効性が示された。また新規モデルは、副次的に空間バイアスの程度を種ごとに数値化できるため、種の分布情報を補完する場合に効率的にバイアスを緩和する地域を特定できる(図9)。

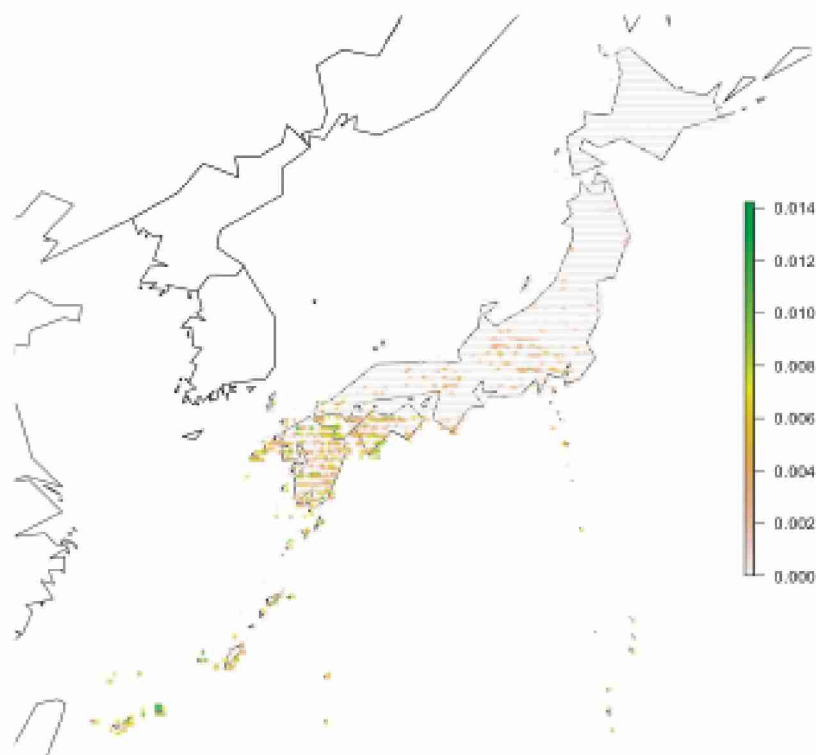


図9 新規モデルにより推定された空間バイアスの分布(シロダモ *Neolitsea sericea* の例)

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

本プロジェクトでは、今まで蓄積された自然史情報をビッグデータと捉えて研究基盤として整備し、それを活用して、日本の生物多様性の起源と維持のメカニズムを解明することを目的とした。本プロジェクトで開発された高精度の生物多様性データベースとその解析から得られた成果は、生物地理学や進化生態学分野における新規的成果を含み、学術的意義が大きい。また種分布モデリングにおける新規的手法の提案は、様々なバイアスを含む自然史情報の利用価値の向上に寄与する。同時に、高解像度の生物多様性空間情報に基いた自然保護区ネットワークの配置分析は、応用的に重要な成果をもたらす。日本における維管束植物と脊椎動物の種多様性の可視化により、生態系の基盤群集とアンブレラ群集をサロゲート(surrogate: 代替指標)にした生物多様性ホットスポットを定量的に把握することが可能になった。これにより、生物分類群の網羅度の高い、生物多様性パターンの分析および生物多様性保全の政策立案が可能になり、国際的な学術コミュニティでも高く評価されつつある(実際、本研究の成果論文の一つは、Ecological Research Awardを受賞した)。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

本プロジェクトにより構築した生物多様性データを用いて、奄美・琉球地域における地点毎ごとの保全上重要度を計算・地図化し、「奄美・琉球世界自然遺産登録に関する推薦書作成」への情報提供を行った。ここで用いた保全上重要度は、IUCNが定義しているIrreplaceability(かけがえのなさ度)に従った。

また、本プロジェクトにより構築した生物多様性データとその集積システムをもとに、沖縄県では生物多様性情報の整備とその活用を検討している。具体的には、1) 県レベルでのより詳細な生物分布情報を、陸域と沿岸海域の藻類・維管束植物・脊椎動物・無脊椎動物に関して整備し、2) 県内での生物多様性パターンに基づいた保全と利用に関する指針を策定し、さらに3) 生物多様性の価値と保全の希求性を一般社会へ提唱することを目的として、大規模な野外調査と文献・標本情報の収集を行なっている。このような科学的データ構築を含む包括的な保全政策プロジェクトは、県レベルの規模としては世界的にも稀で、同様の保全政策が国内のみならず世界的に波及すると確信している。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

COP10の愛知目標に明示されているように、生物多様性保全は国際的な重要課題である。特に、東アジア島嶼の日本は、固有種が多く分布し、かつ、人為インパクトの脅威が大きな“生物多様性ホットスポット”の一つとして国際的に注目されている。よって、生物多様性保全にとって実効力のある政策の立案が急務となっている。日本の自然公園は、風致・景観の観点から指定が行われてきた経緯もあり、生物多様性保全の実効性は高くはない。しかし、本プロジェクトの成果により、保護区の新設配置や自然公園の地種区分の見直し、あるいは世界自然遺産地域の管理計画を、システム化保全計画の枠組みで検討する科学的基盤ができた。これらの研究成果は、環境省の関連部署（生物多様性センターや自然公園課、環境省那覇事務所など）に定期的に情報提供しており、本研究の成果は生物多様性の保全行政の実行力に貢献すると確信している。具体的成果として、以下がある：1）空間バイアスを含む生物分布情報から高い精度で種分布推定を行う新規的手法の提案；2）日本の維管束植物と脊椎動物の種多様性分布データを用いた空間的優先保全地域のスコアリング；3）様々な生物分類群を包括した情報に基づいた優先保全地域のスコアリング。これらより、生物多様性保全の実効力を強化する観点から「新たな保護区をどこに設置すべきか」が明らかとなった。また、愛知目標で設定された「保護区を世界の陸域の少なくとも17%まで広げるという戦略目標」を国内的に達成するための具体策も明らかにした。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

#### <査読付き論文>

- 1) Y. KUBOTA, B. KUSUMOTO, T. SHIONO and W. ULRICH: *Oecologia*, (2018)  
Multiple filters affect tree species assembly in mid-latitude forest communities (in press)
- 2) T. SHIONO, B. KUSUMOTO, M. YASUHARA & Y. KUBOTA: *Global Ecology and Biogeography*, (2018)  
Roles of climate niche conservatism and range dynamics in woody plants diversity patterns through the Cenozoic (in press)
- 3) Y. KUBOTA, B. KUSUMOTO, T. SHIONO and T. TANAKA: *Ecography*, 40, 3 (vol, issue), 436–447 (2017)  
Phylogenetic properties of Tertiary relict flora in the East Asian continental islands: imprint of climatic niche conservatism and in situ diversification
- 4) B. KUSUMOTO, T. SHIONO, M. KONOSHIMA, A. YOSHIMOTO, T. TANAKA and Y. KUBOTA: *Ecological Research*, 32, 3 (vol, issue), 299–311 (2017)  
How well are biodiversity drivers reflected in protected areas? A representativeness assessment of the geohistorical gradients that shaped endemic flora in Japan

### (2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) B. KUSUMOTO: Conservation prioritization of the Ryukyu archipelago: a multi-scale analysis demonstrates the nation-level importance and intra-regional priority areas. 国際シンポジウム “生物多様性保全科学の最前線：マクロ生態学とシステム化保全計画をつなぐ” 2017年3月，那覇市。
- 2) B. KUSUMOTO: Capturing macro-ecological patterns in conservation prioritization. シンポジウム S02 “Biodiversity conservation: bridging macro-ecology and prioritization scheme” 日本生態学会第 64 回全国大会，2017年3月，東京。
- 3) B. KUSUMOTO, T. SHIONO and Y. KUBOTA: Combining trait-based ecology and ethnobotany: impacts of biodiversity loss on timber provisioning service. The 60th IAVS Annual Symposium, June 2017, Palermo, Italy.
- 4) 楠本間太郎: 種の共存パターンに基づくマクロ生態プロセスの分析. 動物植物生態三学会合同沖縄例会，2017年11月. 沖縄。
- 5) 小森理, 三枝祐輔, 江口真透: 生態データのためのポアソン点過程モデル—準線形モデリング. 統計関連学会連合大会，2017年9月，南山大学

## 7. 研究者略歴

### 研究代表者

久保田 康裕

東京都立大学理学部単位取得退学、理学博士、京都大学生態学研究センター日本学術振興会PD、鹿児島大学教育学部講師、同学部助教授、同大学多島圏研究センター及び同大学総合博物館の兼務教官、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター客員研究員、現在、琉球大学理学部教授

### 研究分担者

#### 1) 楠本 聞太郎

九州大学大学院生物資源環境科学府修了、琉球大学理学部日本学術振興会特別研究員PD、同大学大学教育センター非常勤講師、同学理学部科研費研究員、情報・システム研究機構統計数理研究所リスク解析戦略研究センター特任助教、琉球大学理学部博士研究員、現在、同大学戦略的研究プロジェクトセンター特命助教

#### 2) 江口 真透

広島大学理学部助手、島根大学理学部講師・助教授、現在、統計数理研究所 数理・推論研究系学習推論グループ教授

#### 3) 小森 理

総合研究大学複合科学研究科修了、統計数理研究所・統計思考院・特任助教、福井大学・工学部・講師、現在、成蹊大学理工学部情報科学科・准教授および統計数理研究所・統計思考院・客員准教授

#### 4) 深谷肇一

北海道大学環境科学院修了、統計数理研究所・データ科学研究系・日本学術振興会特別研究員、現在、国立環境研究所 生物・生態系環境研究センター 特別研究員

## II. 成果の詳細

### II-1 生物多様性情報のプラットフォーム構築と保護区配置分析

国立大学法人琉球大学・理学部

研究推進機構・戦略的研究プロジェクトセンター

久保田 康裕

楠本 聞太郎

平成27～29年度累計予算額：35,582千円（うち平成29年度：12,793千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

生物多様性の消失に対して有効な保護区設定に向けた学際的な取り組みが国際的に広く求められている。特に、日本は生物多様性ホットスポットの一つとして、早急な保全対策が要求されている地域である。近年、様々な生物多様性情報が急速に蓄積されつつあり、様々な時空間スケールでの生物多様性の起源と維持に関する分析が可能になった。そこで、本研究では以下の3点を目的とした：i) 維管束植物と脊椎動物の分布に関する情報を集積するためのデータプラットフォームの構築；ii) 維管束植物種と脊椎動物種の分布パターンを高精度で可視化；iii) 日本の自然保護区における高精度の生物多様性地図の作成および生物多様性の保全効果を最大化する保護区ネットワークの空間配置の検討。本研究では、まず第一に情報不足地域を中心に分布情報を収集し、各メッシュに対応した地理座標（緯度・経度）毎に、種リストを自動生成するプログラムを開発した。これにより、地点毎、地域毎、自然公園毎に、維管束植物と脊椎動物の種多様性を可視化する環境を整えた。さらに、電子化した生物多様性データを用いて、日本の生物多様性に関する空間的保全優先保全地域をスコアリングした。生物多様性サロゲートとして、様々な生物地理学的特徴を有する複数の分類群（生態系の基盤分類群からアンブレラ分類群まで）を用いた。具体的には、日本に分布する維管束植物5,565種、両生類72種、爬虫類74種、淡水魚213種、鳥類337種、哺乳類104種である。この解析では、第一に分類群毎の空間的保全優先保全地域の順位付け分析、第二に多分類群を包括した空間的保全優先保全地域の順位付け分析を、それぞれ階層的に行った。その結果、保全優先地域の空間パターンは、分類群間で大きく異なり、分類群間の保全優先度スコアの相関はとても弱く、一部の分類群間では、負の相関が見られた。つまり、ある分類群では保全優先度の低い地域でも、他の分類群では保全優先度が高くなった。なお、逐次的なメッシュの除去は、保護区でない地域から始めて、既存保護区で法的な開発規制が中程度の地域（国土面積の9%相当）、最終的に、既存保護区で法的な開発規制が強い地域（国土面積の9%相当）にかけて、体系的に行った。これにより、現在保護区ではない地域における優先保全地域、既存保護区内での優先保全地域を、順序立ててスコア化し、新たに保護区を設置すべき地域、既存保護区内で法的規制を強化すべき地域を特定した。以上に基づいて、生物多様性保全の実効力を強化する保護区の新設計画として、愛知目標で設定された国土面積の17%に含まれる地域を明らかにした。本プロジェクトから得られた成果は、日本の維管束植物と脊椎動物の種多様性の可視化、生態系の基盤群集とアンブレラ群集をサロゲートにした生物多様性ホットスポットの定量的把握を可能にした。これにより、生物分類群の網羅度の高い生物多様性パターン分析が可能となった。これらの成果は、日本の生物多様性に関する“ビッグデータ”を発展させていく上で不可欠な基盤となり、国際的な学術コミュニティでも高く評価されつつある。

#### [キーワード]

生物多様性、生態系管理・保全、空間的な保全優先地域の分析、生物地理学、マクロ生態学

## 1. はじめに

日本で開催された第10回生物多様性条約締約国会議(COP10)では、2020年までに保護区を世界の陸域の少なくとも17%まで広げるという戦略目標が設定され、生物多様性保全に有効な保護区設定に向けた学際的な取り組みが国際的に広く求められている。特に、日本は生物多様性ホットスポットの一つとして、早急な保全対策が要求されている地域である。近年、様々な生物多様性情報が急に蓄積されつつあり、それは生態学的ビッグデータとなりつつある。生態学的ビッグデータは、様々な時空間スケールでの生物多様性の起源と維持に関する分析を可能にする。したがって、広域的な生物相の進化的形成プロセス、地域的な生物群集の生態学的形成プロセスを統合的に理解した上で、システム化保全計画法の枠組みにおいて実効性のある生物多様性の保全策を提案できる状況にある。

## 2. 研究開発目的

本サブテーマでは以下の3点を目的とした：i) 維管束植物と脊椎動物の分布に関する情報を集積するためのデータプラットフォームを構築する；ii) 維管束植物種と脊椎動物種の分布パターンを高精度で可視化する；iii) 日本の自然保護区における高精度の生物多様性地図を作成し、生物多様性の保全効果を最大化する保護区ネットワークの空間配置を検討する。本プロジェクト全体を通して、これら3つの課題に平行して取り組み様々な成果を得た。具体的には、琉球大学グループを中心として、生物多様性データのプラットフォームを整備し、生物多様性ホットスポット分析、および、空間的保全優先地域の特定分析を行った。

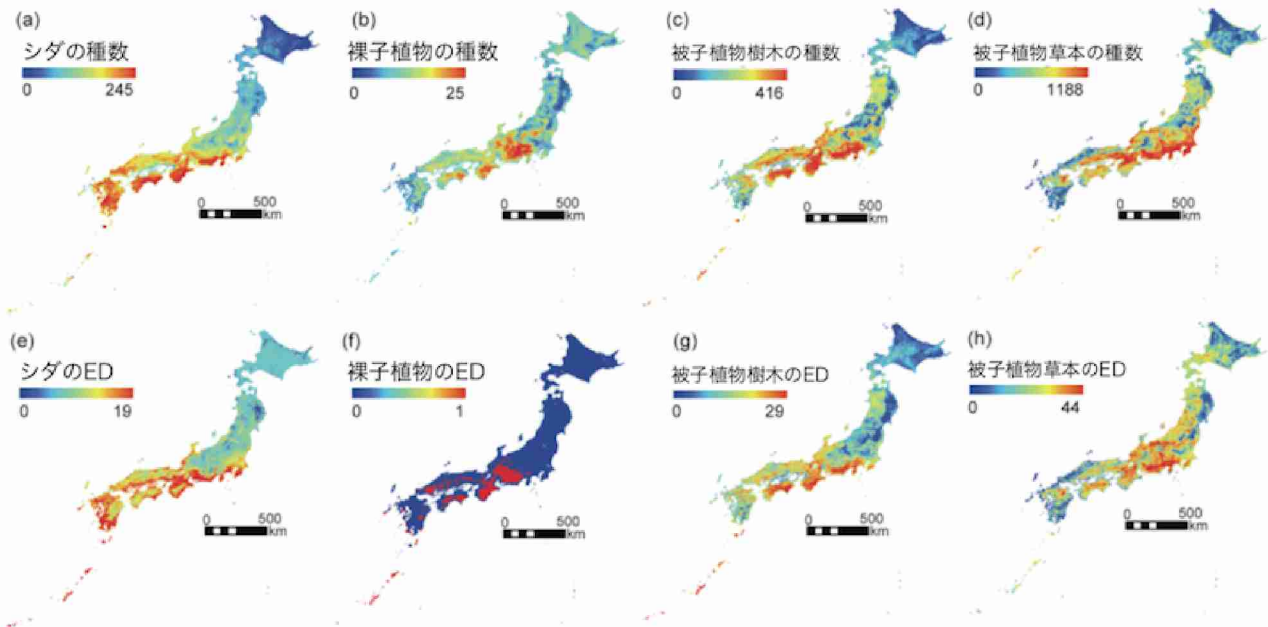
## 3. 研究開発方法

日本に分布する維管束植物と脊椎動物の種レベルの地理分布情報を1 km x 1 kmメッシュスケールの空間解像度で整理した。準備研究において250万点の地点情報を収集したが、情報不足地域を中心に、さらに分布情報を補完し電子化した。紙媒体情報の電子化は、データ入力者を雇用して行った。そして、各メッシュに対応した地理座標（緯度・経度）毎に、種リストを自動生成するプログラムを開発した。これにより、地点毎、地域毎、自然公園毎に、維管束植物種と脊椎動物種の多様性を可視化する環境を整えた。

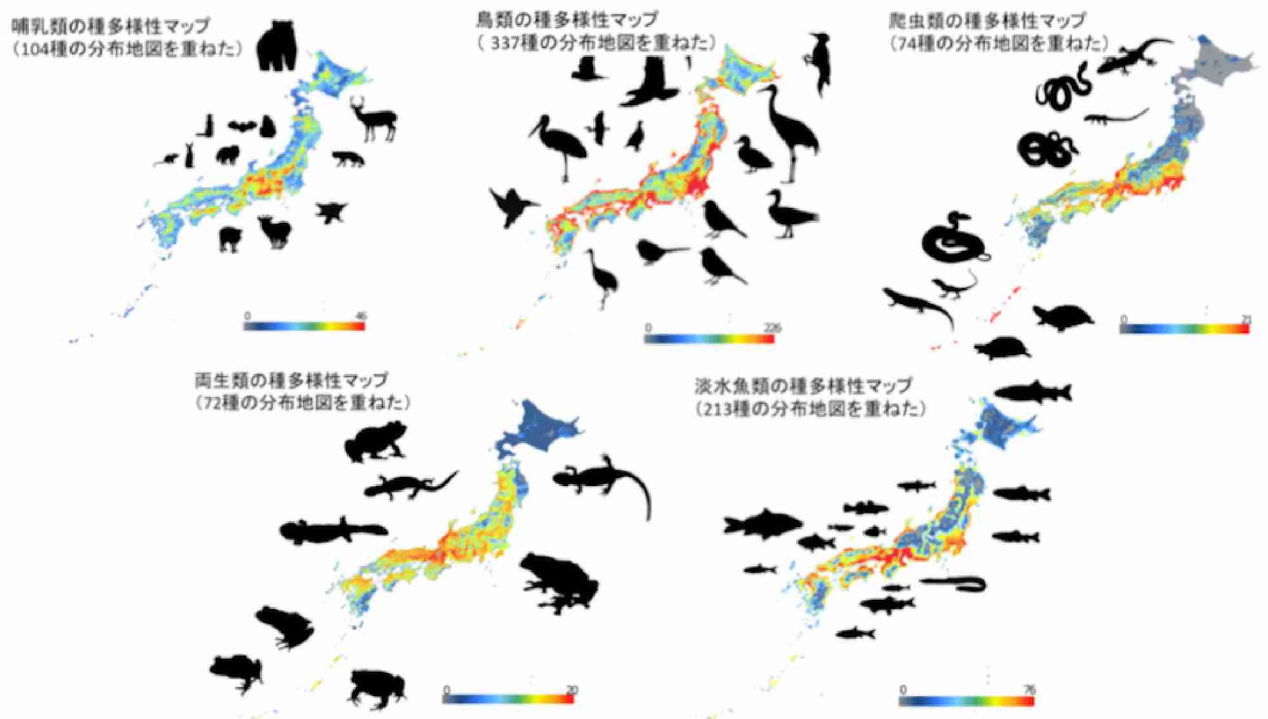
## 4. 結果及び考察

はじめに、日本の維管束植物および脊椎動物（全6365種）について、分布情報を収集した。基盤データは、本プロジェクトの準備段階で完了していたので、そこから得られた情報不足地域を中心にさらに分布情報を収集した。これにより種分布データの完全性を向上させ、日本産維管束植物および脊椎動物の種多様性地図（図(1)-1, 2）を完成させた。

さらに、各植物種の系統情報を収集して日本産維管束植物（シダ・草本・木本）の系統樹を作成し、それを種の分布情報と統合した。これにより、日本各地の維管束植物種の群集系統構造を地図化した（図(1)-3）。維管束植物を生物多様性サロゲートにすることで、日本の生物多様性の進化的ホットスポットが特定でき、歴史的形成機構が解明された。この成果は、生物多様性分野の国際誌*Ecography*に掲載され、高く評価された。

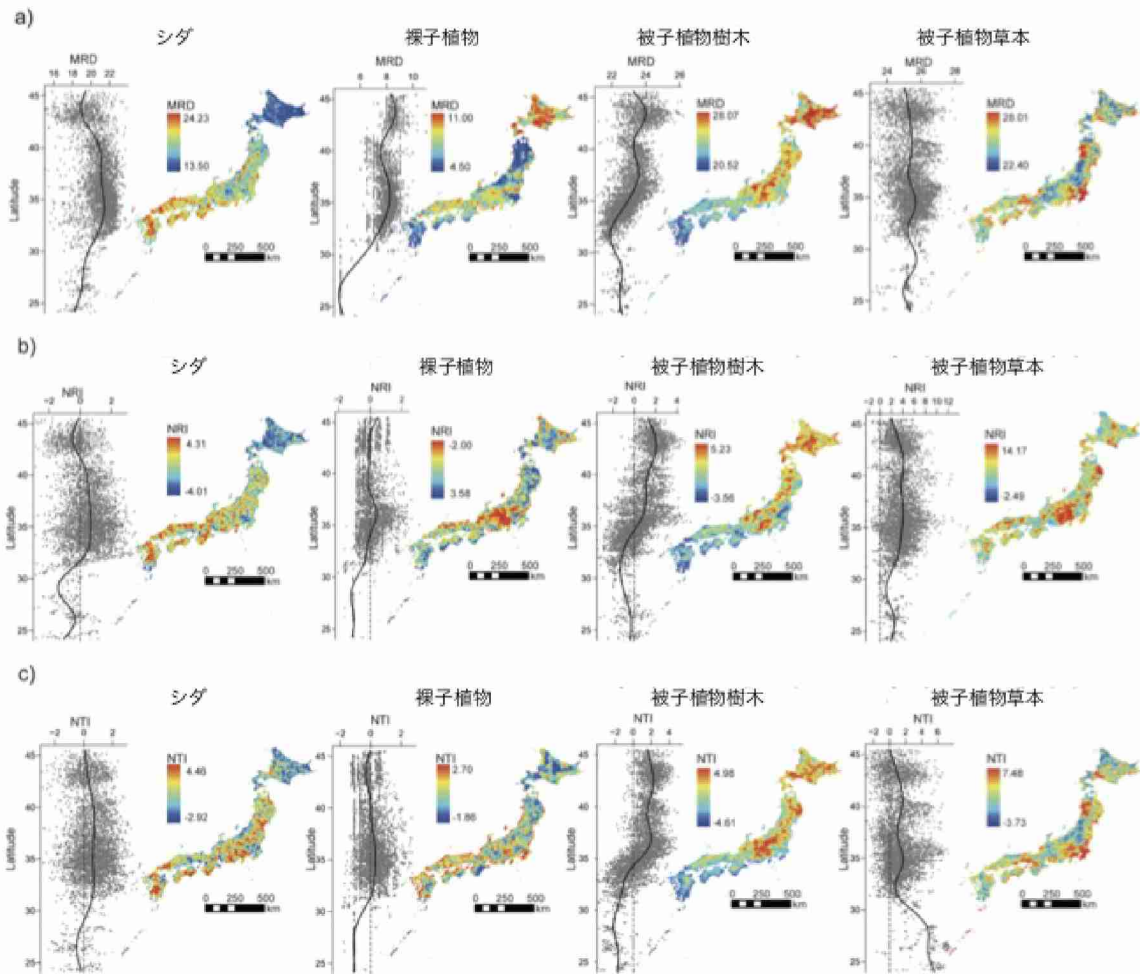


図(1)-1 日本の維管束植物の種数（種多様性）マップ。ED：進化的特異性



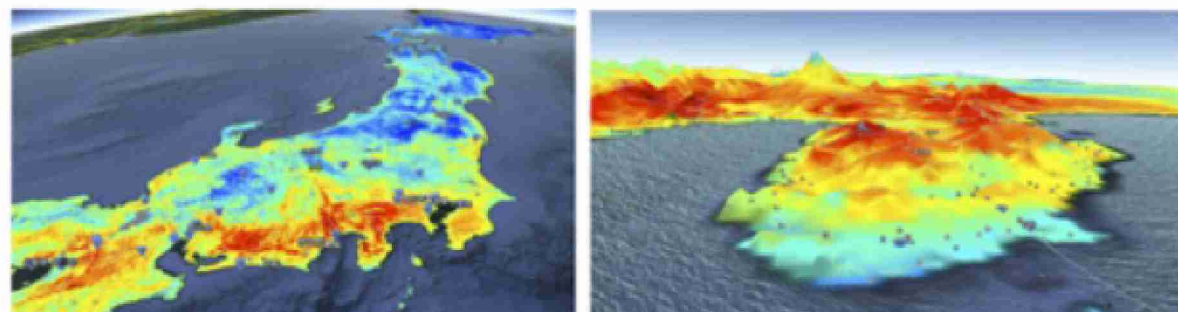
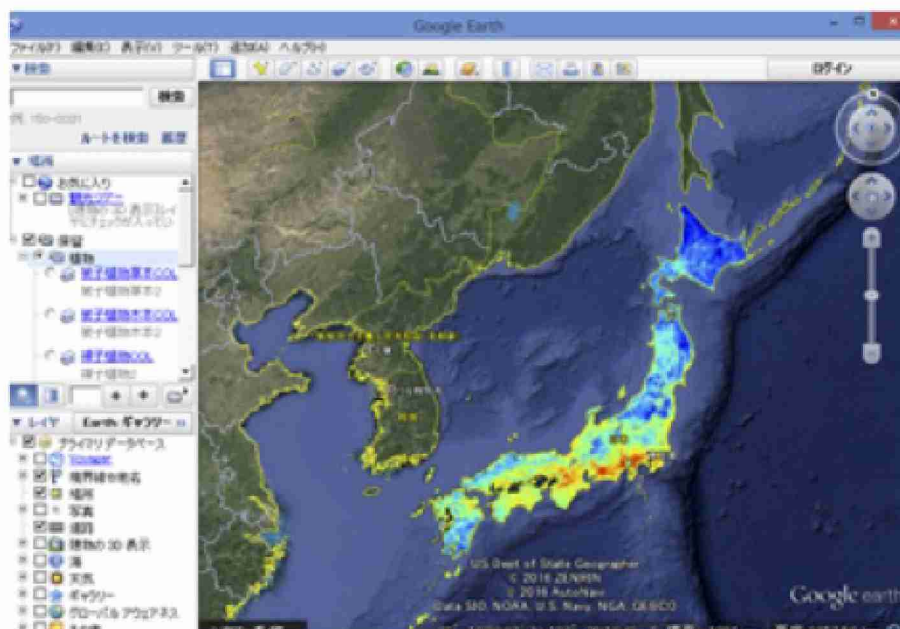
図(1)-2 日本の脊椎動物（哺乳類・鳥類・爬虫類・両生類・淡水魚類）の種多様性マップ。赤い地域ほど種数が多く、青い地域ほど種数が少ないことを示す。





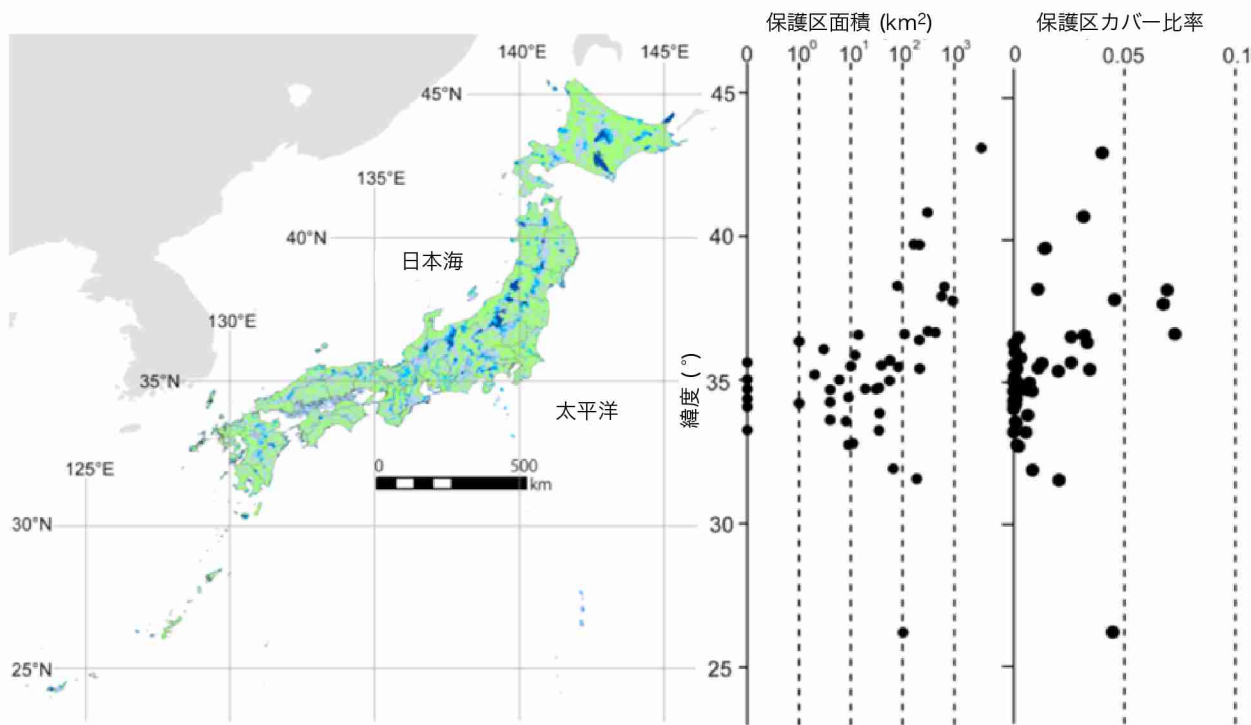
図(1)-3 日本の維管束植物の群集系統構造マップ。散布図の縦軸 (Latitude) は緯度を表し、1x1kmグリッドの群集系統指標を示す。MRDは群集構成種の進化的派生度で、この値が大きいほど進化的に若い種から構成される群集であることを示す。NRIは群集構成種の系統的平均距離で、この値が大きいほど特定の系統群が群集中で卓越していることを示す。NTIは群集構成種の系統的近縁度で、この値が大きいほど姉妹種が多く、種分化の活発な地域であることを示す。

また、日本産維管束植物種・脊椎動物種の地理分布を緯度・経度グリッド毎に計算・確認するためのプログラムを構築し、生物の種多様性をGoogle Earth上で可視化する環境を構築した (図(1)-4)。これにより、生物多様性の観点からの保全優先地域を特定することが可能となった。

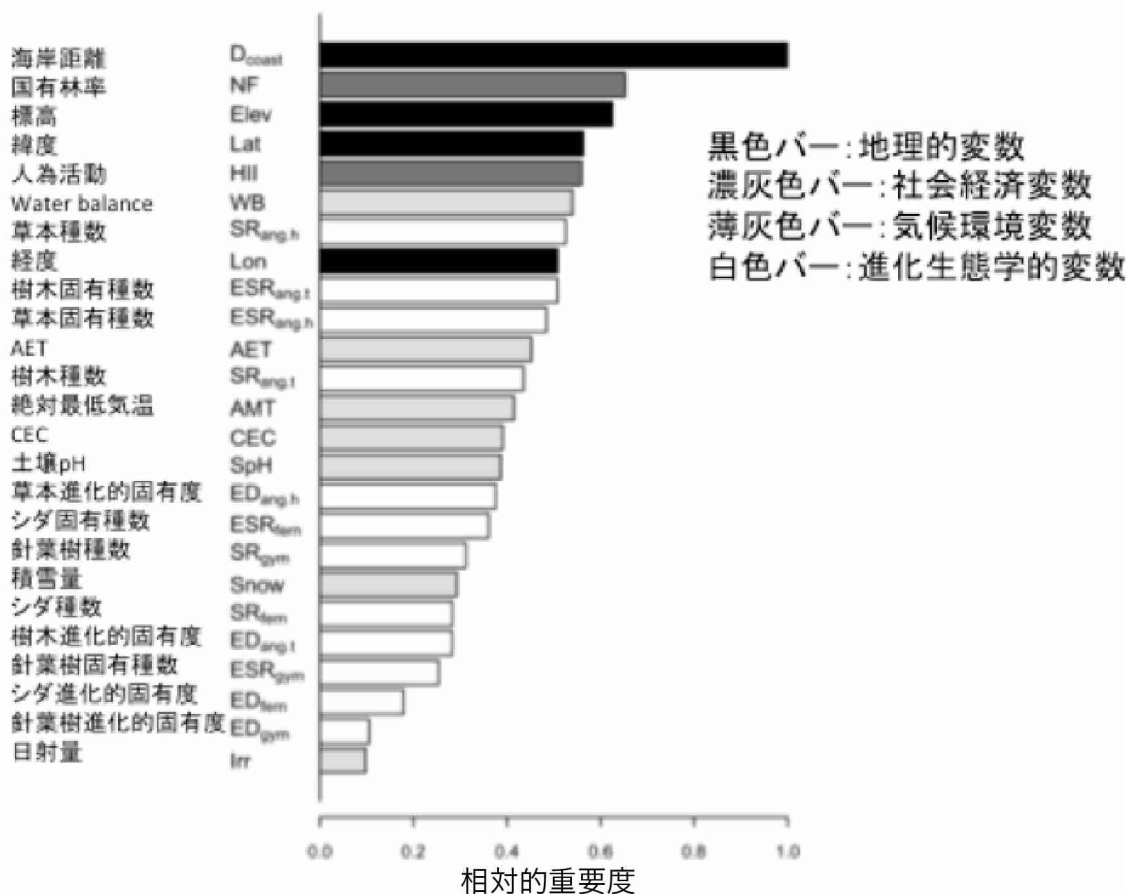


図(1)-4 Google Earth上で可視化した日本における維管束植物・脊椎動物種の種多様性地図（上図）。下左は、日本中央部を太平洋高高度から俯瞰した種多様性地図。下右は、紀伊半島上空から俯瞰した種多様性地図。赤色ほど種数が多く、青色ほど種数が少ないことを示す。種多様性の予測は1x1kmグリッドスケールで行った。

日本の自然保護区の生物多様性保全における実効性を評価・検討するために、日本産維管束植物と脊椎動物種を生物多様性サロゲートとして分析を行った。最初に、現状の自然保護区の地理分布をデータ化し、保護区配置の地理的バイアスを把握した（図(1)-5）。この結果から、現状の保護区は地域的に偏りがあることが判明した。次に、各保護区の地理的配置を規定している要因を特定した（図(1)-6）。その結果、現状の保護区配置は、海岸からの距離、国有林率、標高、緯度、社会経済要因などで主に説明された。一方、進化生態学的に重要な指標である種多様性や進化的固有度などは、保護区配置の説明因子ではなかった。この結果から、現状の保護区ネットワークは、生物多様性の進化生態学的パターンを捕捉できていないことが明らかとなり、保全効果が乏しいことが判明した。



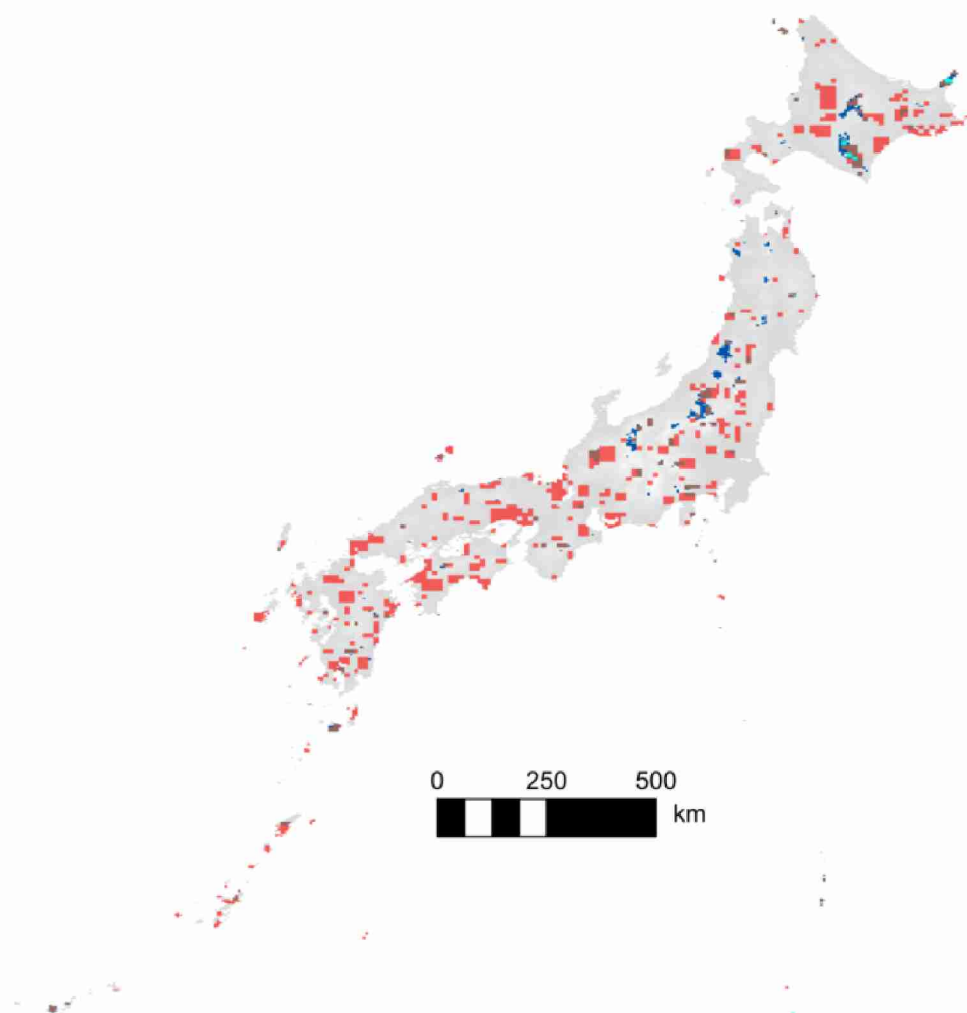
図(1)-5 自然保護区の地理分布。濃い青色ほど開発規制の強い（実効性のある）保護区であることを示す。中央の散布図の縦軸（Latitude）は都道府県の緯度、横軸は都道府県毎の保護区面積（km<sup>2</sup>）を示す。右の散布図の縦軸（Latitude）は都道府県の緯度、横軸は各都道府県の面積に対する保護区面積の割合を示す。



図(1)-6 日本の自然保護区配置の決定因子。現状の保護区の配置に影響を与えている因子を、地理的変数、社会

経済的変数、気候環境変数、進化生態学的変数にグループ化して検証した。各変数の重要度はランダムフォレスト法で定量した。横軸の重要度が大きい変数ほど、現状の保護区配置を決定している因子として重要であることを示す。

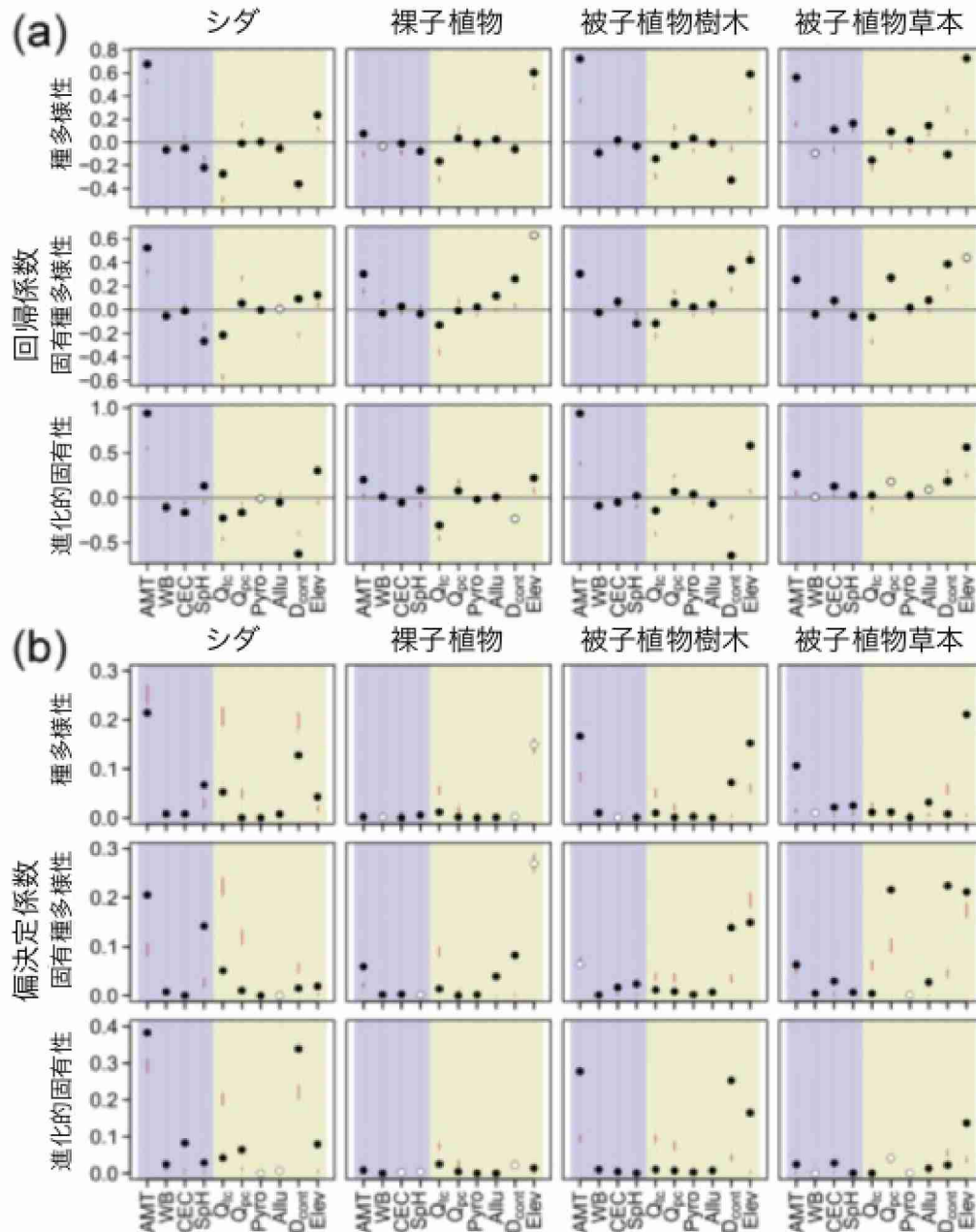
次に、日本の潜在的な生物多様性を効果的に保全するための保護区の最適配置を分析した。ここでは「日本の維管束植物の全種（ガンマ多様性）を保護区でカバーする」ことを保全目標と定義し、この目標を達成するために最低限必要な保護地域（MSA: minimum set area）を、最適化分析によって明らかにした。そして、MSAと現状の保護区の重複度を検証した。その結果、現状の保護区ネットワークは、日本産植物種のガンマ多様性を保全する上で最低限必要な地域を十分にカバーできていないこと、すなわち、保護区のギャップが明らかとなった（図(1)-7）。保護区のギャップは、今後、新規に保護区を設置する地域あるいは、保護の地種区分を見直すべき地域と捉えることができ、保護区ネットワークの改善プランを明示した。



図(1)-7 日本の維管束植物を全種カバーするために最低限必要な地域（MSA: minimum set area）。青色は現状の保護区を含むMSAグリッド。赤色は現状の保護区を含まないMSAグリッド。よって、赤色は、生物多様性保全の保護区ギャップを意味する。

さらに、現状の保護区ネットワークが、植物多様性の起源と維持に関する駆動因子をどの程度捕捉できているのかについても分析を行った。これは、生物多様性パターンを生み出すプロセスのギャップ分析とみなすことができる。日本全体で見た場合の、植物多様性の環境ドライバーと、保護区内部の植物多様性の環境ドライバーを比較し、説明因子の不一致性を検証した。この分析から、現状の保護区は、植物多様性パターンを生み出している環境因子を、現状保護区内で捕捉できていないことが明らかにな

った(図(1)-8)。すなわち、日本の植物多様性パターン形成に関わるプロセスを、うまく保全できていないことが判明した。これらの結果は、現状の保護区ネットワークを、進化生態学的観点から再設計すべきことを示唆している。



図(1)-8 生物多様性の環境ドライバーのギャップ分析。日本全体と保護区内それぞれで見た場合の、植物多様性パターンの説明因子の不一致性。(a)は回帰係数、(b)は各回帰係数の説明力をそれぞれ表す。説明変数は、各グリッドの絶対最低気温 (AMT)、水分バランス (WB)、土壌pH(SpH)、土壌陽イオン交換容量(CEC)、第四紀気温変動(Qtc)、第四紀降水量変動(Qpc)、火砕流被度面積(Pyro)、沖積地被度面積(Allu)、大陸最短距離 (Dcont)、標高(Elev)。保護区内と日本全体で有意に異なる説明変数の係数は、黒丸で示されている。赤線は係数の95%信頼区間。

システム化保全計画は、このような生物多様性データを活用する事で最適な保全計画を提示するための概念的・方法論的枠組みであり、欧米を中心として世界的に研究が進められている。しかし、日本の保全生態学分野における認知度は非常に低く、本プロジェクトでの成果を実際の保全行政に活かす上で大きなハードルとなっている。そこで、日本国内の保全研究者や保全行政関係者に向けた総説を国内誌に論文発表して、システム化保全計画法の提唱を図った。以下にその総説の概要を説明する。

近年、生物多様性の保全政策や行動計画は、システム化保全計画法（SCP: systematic conservation planning）の枠組みで議論されるようになった。この背景には、生物地理学や進化生態学において、生物の空間分布、系統、機能に関する情報が蓄積され、生物多様性に関する大規模データが利用可能になったこと、及び、それを解析する統計数理的手法（最適化のアルゴリズム）が整ったことがある。システム化保全計画法は、生物多様性データに加えて社会経済データを統合的に解析する枠組みを整え、意思決定の科学として発展している。しかし、日本では、システム化保全計画法はあまり認知されておらず、関連した研究も限定的である。一方、日本で開催された第10回生物多様性条約締約国会議（COP10）では、2020年までに保護区を世界の陸域の少なくとも17%まで広げるという戦略目標が設定され、生物多様性保全に有効な保護区設定に向けた学際的かつ実務的な取り組みが、日本の保全研究者や保全行政にも求められている。

システム化保全計画法の特徴は、生物多様性の保全効果を社会経済的な制約（コスト）も含めて検討する点にある。例えば、実際の保護区設置では土地利用に法的規制をかけるため、土地所有者やその土地で経済活動を行う人々との間で利害問題を発生させる。したがって「どこに、どのような保護区を配置するのか？」という問題を考える場合、保護区設置に伴う利害関係を調整し、かつ、その社会経済的コストを最小にする工夫が求められる。従来の自然保護の論争は保護と開発の二項対立だったが、システム化保全計画法では両者のトレードオフ関係を分析し、利害関係者に様々な選択肢を提供する。よって、システム化保全計画法のアプローチは価値論争を最少化し、科学的エビデンスに基づいた合理的な意思決定を促進する。例えば、COP10の戦略目標を達成するためには、多国間や国家レベルの保全政策と、地域レベルの保全戦略を一貫して実行する必要がある。マクロな視点で既存の保護区の生物多様性保全の実効性を評価し（保全政策の現状アセスメント）、地域的な視点で保全計画の経済的コストを考慮し、追加的保護区の新設や現状の保護区の再配置を検討する必要がある。

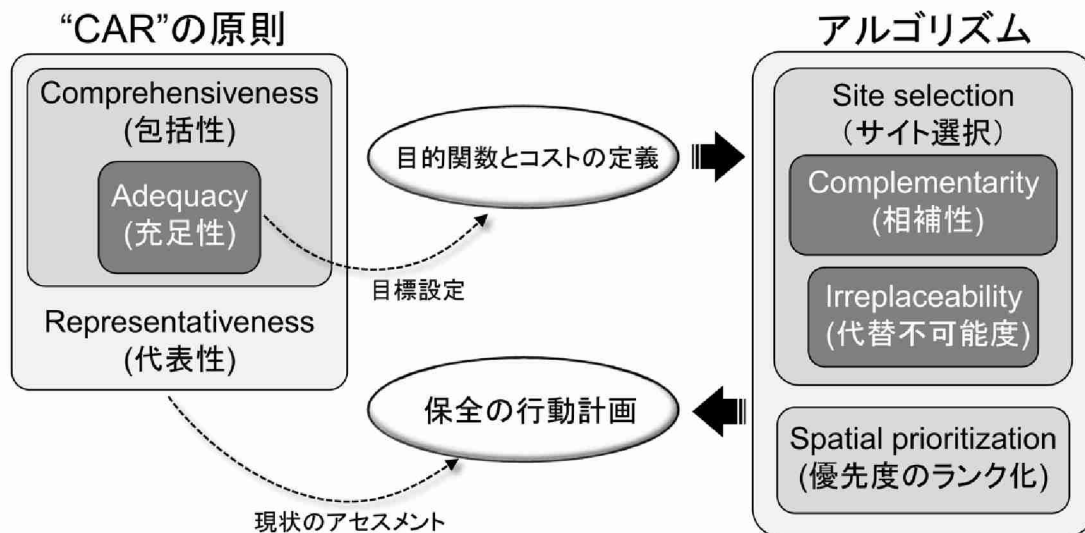
今後、日本でシステム化保全計画法の研究を推進するには、基本概念の理解が第一に重要である。よって、日本の生物多様性保全政策を改善する一助として、システム化保全計画法の概念と手法の概要について分析を行った。

システム化保全計画の基本的な特徴と手順は以下6つである：1）保全計画で対象にする生物多様性のサロゲートを定義し（詳細は次節参照）、種分布や生態系機能などについて空間明示的データを収集する；2）明確で定量的な保全目標（ターゲット）を検討する；3）現状の保護区ネットワークが、保全目標をどの程度満たしているのかを検証する；4）保全目標を達成するために必要な、保護区の配置計画（保護区の新設や再配置）を空間明示的に分析する；5）優先的保全地域として特定されたサイトで、実際に適用する保全計画を検討する；6）保護区ネットワークにおける生物多様性の永続的な維持を促進するために、長期的モニタリングや適応的管理と併せて、保護区の管理メカニズムを整える。さらに最近では以上6つの手順に先立ち、保全計画の実行可能性に関して、特に社会経済的コストや合意形成の観点から、以下の手順も要求されている：保全計画の焦点と必要なコストの勘案；保全計画に関係する利害関係者の特定；保護区設定など保全計画に関する社会、経済、政策的な側面の検討；利害関係者の視点で保全目標を検討する；保全計画の決定に関係する社会経済的データを収集する。

様々な生物分類群の分布情報が蓄積されてきたとは言え、生物多様性の分布パターンに関する知見は未だ不十分である。よって、生物多様性の保全計画を検討する際、分布情報が比較的豊富な特定の分類群、保全上重要な分類群（絶滅危惧種やカリスマ種など）の空間分布を指標にする。このような分類群は、生物多様性のサロゲートと定義される。生物多様性サロゲートによる分析は、優先的保全地域の特定や、その結果に基づいた保護区ネットワークの設計に重要な役割を果たす。ここで注意すべきことは、サロゲート分類群は主観的に定義される点である。例えば、複数の分類群の種多様性パターン（維管束植物や脊椎動物）を比較し、分類群間の空間パターンが一致する場合、特定の分類群を生物多様性のサロゲートとして定義する有効性が支持されるだろう。しかし、種多様性パターンは分類群によって異なり、分類群特有の生物地理学的プロセス（分散、絶滅、進化的放散、種のソーティング）が指摘されている。したがって、サロゲート分類群の選択やその分布データの不完全性が、優先保全地域の分析のバイアスになる可能性がある。

サロゲートのバイアスを緩和する手法として多分類群の分析アプローチがある；より多くの分類群を対象にして、種の網羅性を高める。多分類群の種をサロゲートにすることで、幅広い栄養段階ニッチ、生態系機能、資源的価値を分析に取り込むことができ、生物多様性のパターンとプロセス、およびそれに関係するサービスを保全計画に反映させることが可能である。

システム化保全計画では、生物分布データを利用して評価関数（保全目標）を定義し、社会経済的コストを考慮し、サイト選択アルゴリズムで優先的保全地域を特定する。サイト選択アルゴリズムは、CARの原則を概念的な基盤にして発展してきた（図(1)-9）。



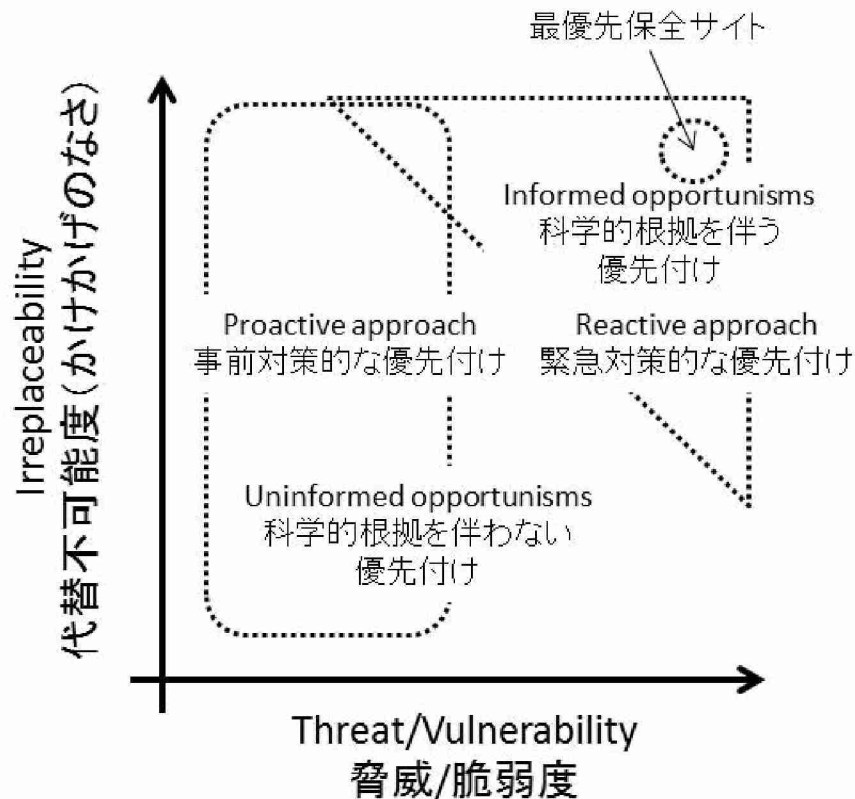
図(1)-9 システム化保全計画法の基本概念図。

システム化保全計画法において保全優先地域を特定して順位付け（スコアリング）するアルゴリズムは、地域（場所）間の生物多様性パターンの相補性（complementarity）に基づいている；すなわち、保全コスト（例えば保護区面積）の効率性の観点から、個々の保護区は、それぞれ異なる生物多様性の属性（例えば、種組成や固有性）を補完的に捕捉すべきで、保護区ネットワークとして全体の生物多様性をカバーする。相補性は、暗示的には群集生態学における種多様性研究（例えば、ホイッターカーの多様性分解）に起因する概念である。ある地域のガンマ多様性は、各サイトのアルファ多様性とサイト間のベータ多様性の関係式で表される（例えば、ガンマ多様性＝アルファ多様性×ベータ多様性）。ある地域のガンマ多様性（全種）を保全目標に設定した場合、各サイトの種組成（アルファ多様性）やサイト間の種の入替わり（ベータ多様性）が優先保全地域の分析で考慮され、保全上の重要な地域が特定される。従来、地域の属性（種数や希少種数）でスコアリングするアプローチが主流であった。例えば、ホットスポットやキーバイオダイバシティなどである。スコア化によるアプローチは、個々の地域を独立に評価する。したがって、保全上重要と特定された複数の地域（保護区）の生物多様性の特徴（種組成など）が類似することもある。この場合、保護区ネットワークは非効率になる。一方、相補性の概念は群集集合パターンを考慮し、潜在的な生物多様性パターンを効率的に捕捉できるので、近年のシステム化保全計画法の重要概念になっている。

相補性の概念が乱用されていることも指摘しておく。例えば、保全優先地域の特定やスコア化を相補性分析として一括りに呼称するのは、保全政策者や一般市民に誤解を与える危険がある。例えば、ある地域のガンマ多様性を保全目標にして優先保全地域を特定する場合、「最小の面積で全種を捕捉する」といった最小被覆問題（minimum set problem）で定式化される。この場合、最適化で全種をカバーする場所の組み合わせが解として得られる。この分析では、それぞれの種の生息地を最低1つ確保することが目標となり、種個体群を持続的に保全するための生態学的概念（例えばメタ個体群構造など）は一切考慮されない。生態学者にとっては自明かもしれないが、「相補性分析で得られる最小保護区ネットワークは、種の絶滅率を最大化する保全シナリオ」であることも理論的に示されている（Cabeza and

Moilanen 2003)。よって、相補性は、保全計画における包括性（全種を保全する目標）と効率性（保護区面積などコストの制約）を満たすためのアルゴリズムの属性（最小被覆問題の分析）と捉えるべきだろう。

かけがえなさ度（代替不可能度）は、保全目標の効率的達成における、ある場所の重要度を表す指標概念である：1）保全目標を達成する上での各場所の貢献度；2）ある場所が失われた場合の保全目標に与える影響度。つまり、完全に代替不可能な場所は、保全目標の達成に不可欠と考える。いずれにしても、かけがえなさ度（代替不可能度）は、ある場所の保全上の重要性を測定する指標で、保全地域の選択やスコア化のアルゴリズムの文脈で議論されてきた（図(1)-10）。代替不可能度を生態学的固有性で評価する試みもある。例えば、種の分布域に基づいた固有度スコアを定義し、各場所に分布している種の固有度スコアの総和によって代替不可能度を定義できる。この場合、ある地域の面積が種の生息地面積に占める割合が大きいくほど、その地域の代替不可能度は高くなる。実際、IUCNはこの指標を用いて世界自然遺産地域のかけがえのなさ度を評価している。



図(1)-10 “かけがえのなさ”を指標にした優先的保全地域の特定。保護区ネットワークを検討する場合、緊急に保全策を適用すべき地域や、事前的保全策を適用すべき地域を特定することが重要である。この図は、代替不可能度と脅威や脆弱性の概念を組み合わせたアプローチを示している。

システム化保全計画では、保全目標の設定（TBP: target-based planning）が不可欠である。また、保全目標は保全政策に反映される数値目標にも関係するので、極めて重要である。研究者が現状の保護区ネットワークの代表性を評価し、優先保全地域を分析する場合、何らかの保全目標を定義することで、現状の保全政策の充足性や問題点を定量する。例えば、ギャップ分析や優先保全地域の特定に関する最適化分析では、全種を保全することを保全目標に設定し、現状の保護区から漏れている種を特定し、あるいは、最小限必要な保護区の空間配置を求める。

保全目標を先験的に定義する分析アプローチには、問題点も指摘されている：1）保全目標に基づいた保全計画は充足性が十分でなく、柔軟性がない；2）保全目標は専門家の考えが優先される（保全政策の意思決定や利害関係者の合意形成のための選択肢として提示される前に、保全目標自体にバイアスがある）；3）保全目標は努力目標として認識される危険があり、そもそも達成されない可能性がある；

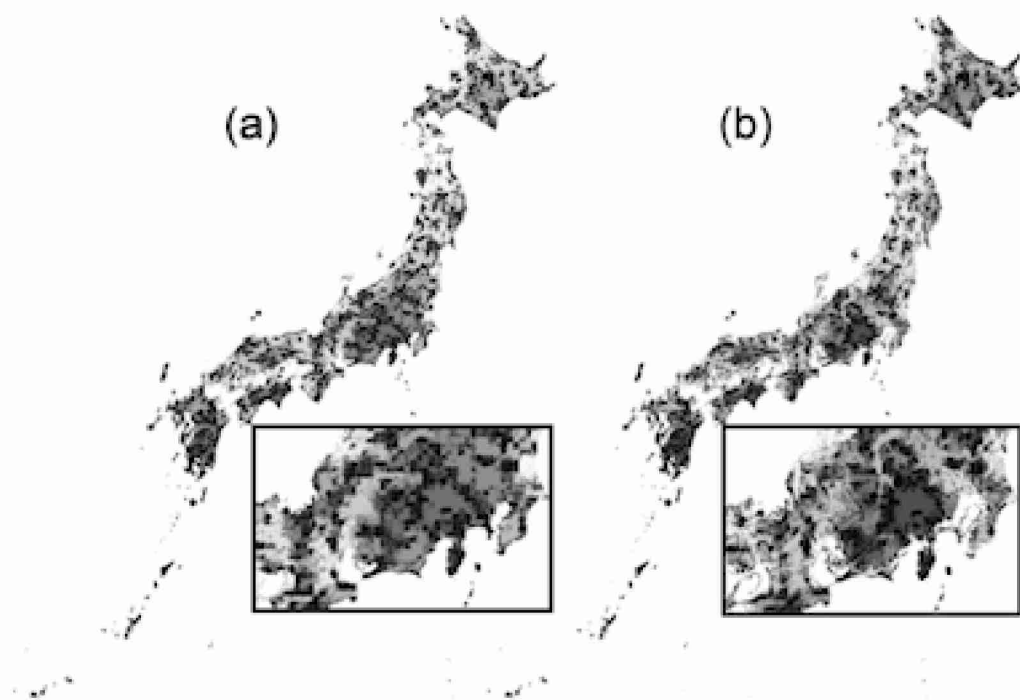


4) 保全の必要性が認知されていないサイトにおいて、保全目標が機能しない可能性がある（プロアクティブな保全計画が弱点になる）；5) 説明責任の観点から保全目標はわかりやすく単純である必要があり、そのため、複雑な要因（気候変動、進化生態学的プロセス、社会経済的要因）を十分に考慮できない。

システム化保全計画法が、意思決定を効率化し政策を推進するための科学である以上、保全目標を定義して分析を行うことは妥当であり、以上のような批判に対して反論もなされている。しかし、科学的な分析の過程では主観的な目標設定を避けて、生態学的基準、例えば、種の絶滅リスクを最小化する、あるいは生態系機能の保持などの基準で、保全計画の多様な選択肢を提供すべきであろう。例えば、保全の目標設定に関する5つの原則が挙げられている：1) 明確な目標であること；2) 測定可能な目標であること；3) 科学的分析と実行可能性を分けること；4) 科学的手法に従うこと；5) 目標が変化することも想定すること。これらの観点において、後述するZonationメタアルゴリズムによる優先的保全サイトのランク化（spatial prioritization）は有望である。

Zonationアルゴリズムは、社会経済的コストを考慮した上で、保全目標（評価関数）を満たすために重要度（貢献度）の低い場所（例えばメッシュ）を逐次的に除いていく計算方法を採用している。これにより、最大被覆問題および保全利益の最大化問題を分析できる。最適化による保全サイト選択アプローチでは、保全目標（評価関数）を満たす場所がバイナリー値として出力される。このため、各場所の優先度ランクが詳細に定量できない弱点もあった。一方、Zonationアルゴリズムは、保全上の重要度を相対的な連続値として得ることができ、保全計画を検討する上での情報量が多い（図(1)-11）。つまり、Zonationによる出力結果を分析することで、適切な保全目標を事後的にも検討できる。なお、Zonationは保全目標ベースの分析オプションも内包しているので、最少被覆問題の分析を並行して行うことも可能である：様々な評価アルゴリズムを包含しているので、Zonationメタアルゴリズムと呼ばれる。

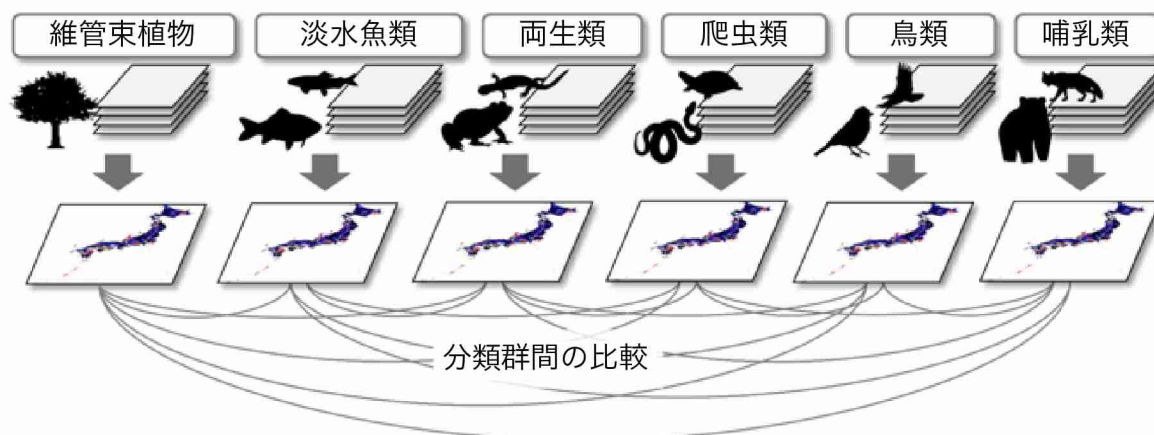
また、Zonationは、保全生態学や群集生態学の概念や理論を、ある程度、反映している点も興味深い。Core Area Zonation (CAZ) は、種の分布域の損失（特に地理的希少種の分布域縮小）を最小化するように場所を逐次的に除くアルゴリズムである。Additive Benefit Function (ABF) は、サイト（面積）当たりの種数の消失に関係した保全利益の損失を最小化するようにサイトを逐次的に除くアルゴリズムである。すなわち、CAZはメタ個体群の観点から種の地理的個体群サイズをなるべく大きく保つこと、ABFは種数-面積関係の観点から、種の絶滅率をなるべく小さくし、保全利益を最大化する保護区配置を考えている。このように、Zonationアルゴリズムは優先的保全サイトをランク化する際にメタ個体群や種数-面積関係の概念を組込むことで、より適切な保全計画を提案できることを示唆している。



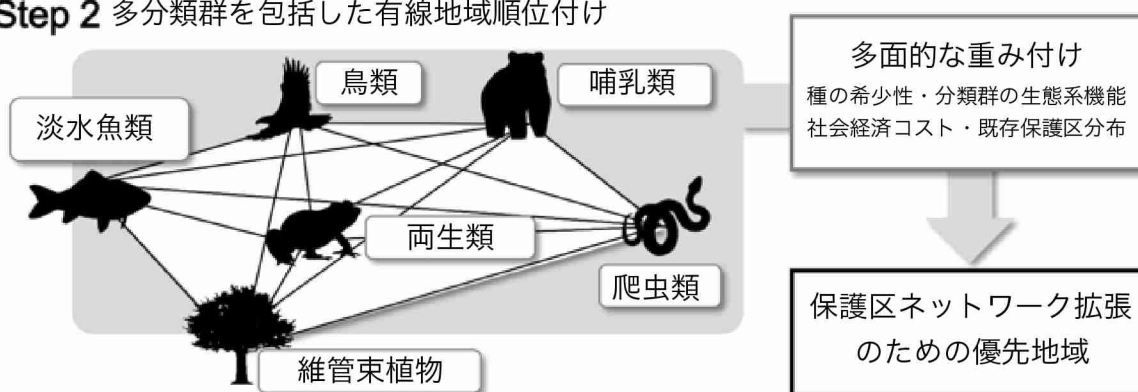
図(1)-11 Zonationによる優先的保全地域のランク化。(a) 黒色のサイトが、保全優先度の高い地域。(b) 社会経済的コストを考慮した場合、優先保全地域の空間パターンは大きく異なる。社会経済コストを考慮した分析では、各サイトのHuman Influence Index (HII) が目的関数に組み込まれている。これにより、社会経済的に重要なサイトほど保全優先度が低く見積もられる。なお、HIIはサイトの人口や農地面積などの人為活動に関わる統計値を基に指標化されている。

前述したZonationアルゴリズムを用いて、日本の生物多様性に関する空間的保全優先保全地域をスコアリングした。生物多様性サロゲートとして、日本に分布する維管束植物5,565種、両生類72種、爬虫類74種、淡水魚213種、鳥類337種、哺乳類104種を用いた。この解析では、第一に分類群毎の空間的保全優先地域、第二に複数分類群を包括した空間的保全優先地域を、それぞれ階層的に行った(図(1)-12)。その結果、保全優先地域の空間パターンは、分類群間で大きく異なっていた(図(1)-13)。この分類群間の不一致性は、Zonationの計算方法(CAZやABF)に関係なく共通していた。なお、ABFの保全優先地域は空間的に集中する傾向があった。維管束植物の保全優先地域は、パッチ状に集中する傾向があり、日本列島の中部と南部に偏っていた。淡水魚の保全優先地域は、主に、低地帯や大きな湖沼の周辺に集中していた。両生類の保全優先地域は、日本列島の中央部に偏っていた。爬虫類の保全優先地域は、日本列島の南西部に主に分布していた。鳥類の保全優先地域は、主に海岸部の低地帯に集中し、内陸部にも散在していた。哺乳類の保全優先地域は、日本列島中部の山岳地帯や列島の北部に偏っていた。なお、琉球諸島は全ての分類群で共通して、保全優先地域に特定された。分類群間の保全優先度スコアの相関はとても弱く、一部の分類群間では、負の相関が見られた。つまり、ある分類群で保全優先度の低い地域は、他の分類群では保全優先度が高くなった。このことは、分析に用いる多様性サロゲートによって、保全優先地域が全く異なることを示しており、分類群毎の保全計画が重要なことを示唆している。

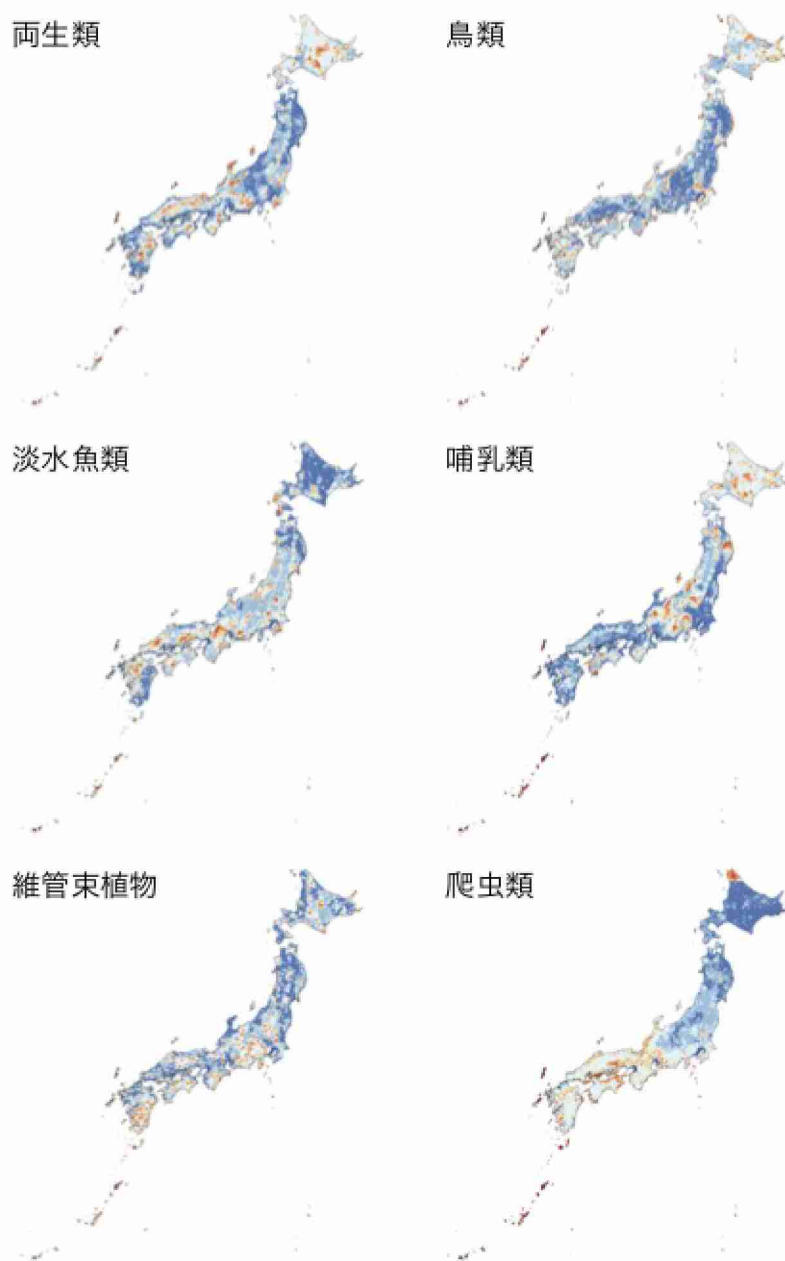
## Step 1 分類群ごとの優先地域順位づけ



## Step 2 多分類群を包括した有線地域順位付け



図(1)-12 空間的優先保全地域の階層的分析の概念図。第一に、異なる生物地理学的プロセスで種多様性パターンが決定されている個々の分類群毎に空間的優先保全地域のスコア化を行った。これに基づき、分類群毎の保全計画の重要性を明らかにした。第二に、複数分類群を包括的に分析し、分類群を横断した空間的優先保全地域のスコア化を行った。これにより、政策的に実現可能性の高い保護区配置（新規保護区の設置など）計画を明らかにした。

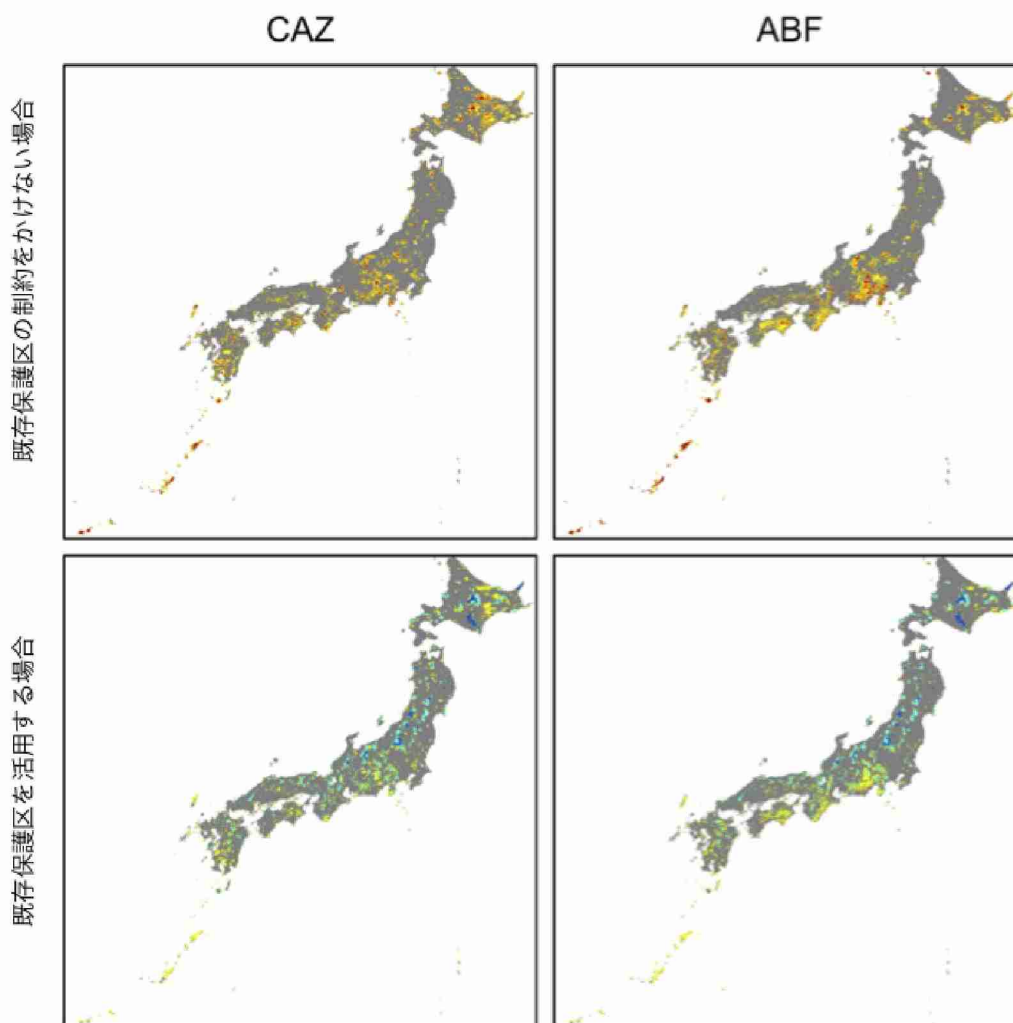


図(1)-13 Zonationアルゴリズム (CAZ) に基づいた優先保全ランクの地図化。CAZは種の損失を最小化する計算手法である。なお、この分析では各分類群の種はレッドリストのカテゴリーと進化的固有度で重み付けされた：絶滅リスクが高く進化的に固有な種ほど重要視した優先保全ランク化。

第二段階の解析として、複数分類群を包括して空間的保全優先地域の順位付け分析を行った。Zonationアルゴリズムによる分析では、保全上重要でない地域（1 km x 1 kmメッシュ）を逐次的に除去し、それによって各地域の保全優先度のスコアリングを行う。今回の分析では、2つの除去計算手法（CAZとABF）を用い、日本の各地域（1 km x 1 kmメッシュスケール）の空間的優先付け（スコア化）を行った。そして、1 x 1kmメッシュ毎の保全優先度スコアを地図化した。保全優先度スコアの高い地域は、南西諸島や日本列島の中部の山岳地帯に偏っていた（図(1)-14）。

なお、逐次的なメッシュの除去は、保護区でない地域から始めて、既存保護区で法的な開発規制が中程度の地域（国土面積の9%相当）、最終的に、既存保護区で法的な開発規制が強い地域（国土面積の9%相当）にかけて、体系的に行った。これにより、現在保護区ではない地域における優先保全地域、既存保護区内での優先保全地域を、順序立ててスコア化し、新たに保護区を設置すべき地域、既存保護区内で法的規制を強化すべき地域を特定した（図(1)-15の下段地図の黄色、薄水色の地域）。これによ

り、生物多様性保全の実効力を強化する保護区の新設計画として、愛知目標で設定された国土面積の17%に含まれる地域を明らかにした。



図(1)-14 既存保護区の空間分布を考慮した保全優先地域の特定。上段図は既存保護区の空間分布を考慮しない場合。下段図は既存保護区の空間分布を考慮した場合。濃水色は法的規制の強い既存保護区、薄水色は法的規制の弱い既存保護区を示す。そして、赤色、オレンジ色、黄色の地域は、保全優先度スコアの上位2%、11%、17%（愛知目標）を示す。この分析は、複数分類群（維管束植物・淡水魚・両生類・爬虫類・鳥類・哺乳類）を包括して行った。また、各分類群の種はレッドリストのカテゴリー、進化的固有度、種の有用度（生態系サービス）で重み付けされた。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本プロジェクトでは、今まで蓄積された自然史情報をビッグデータと捉えて研究基盤として整備し、それを活用して、日本の生物多様性の起源と維持のメカニズムを解明することを目的としている。本プロジェクトの解析から得られる結果は、生物地理学・進化生態学的新規性を多く含み、学術的意義が大きい。同時に、高解像度の生物多様性空間情報に基付いた自然保護区の配置分析は、応用的(保全生物学的)意義も大きい。日本における維管束植物と脊椎動物の種多様性の可視化により、生態系の基盤群集とアンブレラ群集をサロゲートにした生物多様性ホットスポットを定量的に把握することが可能になった。これにより、生物分類群の網羅度の高い、生物多様性パターン分析が可能になり、国際的な学術コミュニティでも高く評価されつつある。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

本プロジェクトにより構築した生物多様性データを用いて、奄美・琉球地域における地点毎ごとの保全上重要度を計算・地図化し、「奄美・琉球世界自然遺産登録に関する推薦書作成」への情報提供を行った。ここで用いた保全上重要度は、IUCNが定義しているIrreplaceability（かけがえのなさ度）に従った。

また、本プロジェクトにより構築した生物多様性データとその集積システムをもとに、沖縄県では生物多様性情報の整備とその活用を検討している。具体的には、1) 県レベルでのより詳細な生物分布情報を、陸域と沿岸海域の藻類・維管束植物・脊椎動物・無脊椎動物に対して整備し、2) 県内での生物多様性パターンに基づいた保全と利用に関する指針を策定し、さらに3) 生物多様性の価値と保全の希求性を一般へ啓蒙することを目的として、大規模な野外調査と文献・標本情報の収集を行なっている。このような基盤データの構築を含む包括的な保全計画の立案は、県レベルの規模としては世界的にも稀で、同様の保全政策が国内のみならず世界的に波及すると確信している。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

COP10の愛知目標に明示されているように、生物多様性保全は国際的な重要課題である。特に、東アジア島嶼の日本は、固有種が多く分布し、かつ、人為インパクトの脅威が大きな“生物多様性ホットスポット”の一つとして国際的に注目されている。よって、生物多様性保全にとって実効力のある保全政策の立案が急務となっている。具体的成果として、以下がある：1) 日本の維管束植物と脊椎動物の種多様性分布データを用いた空間的優先保全地域の特定；2) 様々な生物分類群を包括した情報に基づいた優先保全地域のスコア化。これらより、生物多様性保全の実効力を強化する観点から「新たな保護区をどこに設置すべきか」が明らかとなった。また、愛知目標で設定された「保護区を世界の陸域の少なくとも17%まで広げるという戦略目標」を国内的に達成するための具体策も明らかにした。

日本の自然公園は、風致・景観の観点から指定が行われてきた経緯もあり、生物多様性保全の実効性は高くはない。しかし、本プロジェクトの成果により、保護区の新設配置や自然公園の地種区分の見直し、あるいは世界自然遺産地域の管理計画を、システム化保全計画の枠組みで検討する基盤ができた。これらの研究成果は、環境省の関連部署（生物多様性センターや自然公園課、環境省那覇事務所など）に定期的に情報提供しており、本研究の成果は生物多様性の保全行政の実行力（例えば、奄美・琉球地域の世界自然遺産登録へ向けた活動等）への貢献とすることが見込まれる。

## 6. 国際共同研究等の状況

国際共同研究計画名：東アジア島嶼における生物多様性の優先保全地域特定に関する研究。カウンターパート：Atte Moilanen・ヘルシンキ大学・フィンランド、Joonas Lehtomäki・ヘルシンキ大学・フィンランド。

本プロジェクトの一部は、ヘルシンキ大学の保全研究者との国際共同研究として実施した。Moilanen教授は、システム化保全計画分野の国際的な権威で、特に、空間的保全優先地域を特定しスコアリングするアルゴリズムと解析ソフト（Zonation）を開発している。同メンバーは、推進費プロジェクトの開始前から、お互いの研究室を訪問して会議を行い、共同でのデータ解析を進めて来た。さらに、推進費に採択された直後から、琉球大学学長リーダーシッププロジェクト（東アジア生物多様性ホットスポットのパターン解明と保全戦略の立案）の予算などを用いて、ヘルシンキ大学の研究者を招聘して、推進費プロジェクトの研究を加速化させた。本プロジェクトの成果は、アジアの生物多様性ホットスポットにおける、初の体系だったシステム化保全計画の研究であり、今後明らかになる研究成果は、国際的にも高く評価されることが見込まれる。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文 (査読あり) >

- 1) Y. KUBOTA, B. KUSUMOTO, T. SHIONO and W. ULRICH: *Oecologia*, (2018)  
Multiple filters affect tree species assembly in mid-latitude forest communities (in press)
- 2) T. SHIONO, B. KUSUMOTO, M. YASUHARA & Y. KUBOTA: *Global Ecology and Biogeography*, (2018)  
Roles of climate niche conservatism and range dynamics in woody plants diversity patterns through the Cenozoic (in press)
- 3) Y. KUBOTA, B. KUSUMOTO, T. SHIONO and T. TANAKA: *Ecography*, 40, 3 (vol, issue), 436-447 (2017)  
Phylogenetic properties of Tertiary relict flora in the East Asian continental islands: imprint of climatic niche conservatism and in situ diversification
- 4) B. KUSUMOTO, T. SHIONO, M. KONOSHIMA, A. YOSHIMOTO, T. TANAKA and Y. KUBOTA: *Ecological Research*, 32, 3 (vol, issue), 299-311 (2017)  
How well are biodiversity drivers reflected in protected areas? A representativeness assessment of the geohistorical gradients that shaped endemic flora in Japan

#### <その他誌上発表 (査読なし) >

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表 (学会等)

- 1) B. KUSUMOTO: Conservation prioritization of the Ryukyu archipelago: a multi-scale analysis demonstrates the nation-level importance and intra-regional priority areas. 国際シンポジウム “生物多様性保全科学の最前線：マクロ生態学とシステム化保全計画をつなぐ” 2017年3月, 那覇市.
- 2) B. KUSUMOTO: Capturing macro-ecological patterns in conservation prioritization. シンポジウム S02 “Biodiversity conservation: bridging macro-ecology and prioritization scheme” 日本生態学会第 64 回全国大会, 2017年3月, 東京.
- 3) B. KUSUMOTO, T. SHIONO and Y. KUBOTA: Combining trait-based ecology and ethnobotany: impacts of biodiversity loss on timber provisioning service. The 60th IAVS Annual Symposium, June 2017, Palermo, Italy.
- 4) K. FUKAYA, B. KUSUMOTO, T. SHIONO, J. FUJINUMA and Y. KUBOTA: Macro-scale species abundance distribution inferred from widespread vegetation plot data. The 60th IAVS Annual Symposium, June 2017, Palermo, Italy.
- 5) J. FUJINUMA, B. KUSUMOTO, T. SHIONO and Y. KUBOTA: Revealing ecological advantage of plant clonality at the macroecological scale. The 60th IAVS Annual Symposium, June 2017, Palermo, Italy.
- 6) J. FUJINUMA, B. KUSUMOTO, T. SHIONO and Y. KUBOTA: Roles of plant clonality in shaping species-specific niche properties and community assemblages across East Asian continental islands. In 8th Biennial Conference of The International Biogeography Society, January 2017, Tucson, USA
- 7) 楠本聞太郎: 種の共存パターンに基づくマクロ生態プロセスの分析. 動物植物生態三学会合同沖縄例会, 2017年11月. 沖縄.

- 8) T. SHIONO, B. KUSUMOTO, M. YASUHARA and Y. KUBOTA: Effect of selective extinction and range shift on diversity patterns of temperate flora through the Cenozoic. The 60th IAVS Annual Symposium, June 2017, Palermo, Italy.
- 9) 塩野貴之, 楠本聞太郎, 藤井新次郎, 久保田康裕: 琉球列島の主要5島における樹種多様性パターンの形成機構: 分類学的・系統的・機能的情報を用いた検証. 植生学会第22回大会, 2017年10月, 那覇.

### (3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 成果の記者発表 (平成29年12月13日、於環境省記者クラブおよび琉球大学、「自然保護問題の価値観論争を解決する科学的アプローチを提唱: 生物多様性保全の戦略目標達成に向けた自然保護区の空間配置を解明」)
- 2) 成果の記者発表 (平成30年4月18日、於琉球大学、「日本生態学会Ecological Research Award受賞」)

### (6) その他

第65回日本生態学会大会 (札幌) Ecological Research Award受賞  
受賞者: 楠本 聞太郎

## 8. 引用文献

- M. CABEZA, A. MOILANEN: Conservation Biology, 17 (vol), 1402-1413, (2003)  
Site-selection algorithms and habitat loss.



## II-2 生物分布情報の多様性を考慮した生態ニッチモデルの開発

大学共同利用機関法人情報・システム研究機構統計数理研究所  
 数理・推論研究系・学習推論グループ  
 福井大学 学術研究院工学系部門  
 国立環境研究所 生物 生態系環境研究センター 特別研究員

江口 真透  
 小森 理  
 深谷 肇一

平成27～29年度累計予算額：2,796千円（うち平成29年度：195千円）  
 予算額は、間接経費を含む。

### 【要旨】

生物種ごとの地理分布の把握は、生物多様性保全、種の利用・管理において基本的かつ重要な課題である。それぞれの種の生息域は特異的な環境特性を示し、概念的には生態学的ニッチで説明される。生態ニッチモデリングは、種の環境ニッチを仮定し、限られた観察データから種の地理的分布域を推定するための統計的手法である。近年、種分布モデリングとして、Maxent法や最尤法が盛んに用いられている。そこで本研究では、次の4点を目的とした：1）従来の分布モデリング(Maxent法や最尤法など)の利点と問題点を把握する、2）経験的に高精度で分布域が把握されている種を用いて、実分布と分布予測の乖離を分析することで、調査手法やデータの空間的偏りが、分布予測に及ぼす影響を解明する、3）サンプリングバイアスを考慮して、生物種の分布予測の精度を向上させるため理論の再検討および新規的なモデリング手法の検討を行う、4）実データを用いて、従来のモデリング手法と新規的に開発した手法の推定精度の違いを明らかにする。本研究の成果として、準線形モデリングに基づくポアソン点過程を拡張することで、サンプリングバイアスに対応する方法を考案した。この方法では、新たに形状パラメータを導入することで、モデルの当てはまりが改善することが示された。サブテーマ1で構築した維管束植物種の分布データを用いて、推定精度の改善を示すことができた。本研究が提案する新規的な生態ニッチモデル手法は、様々な形式の生物地理情報の利用価値を高め、その蓄積を加速することで、今後の進化生態学的ビッグデータの充足と保全計画への応用に大きく貢献することが期待される。

### 【キーワード】

種分布モデリング、Maxent法、生物多様性保全

### 1. はじめに

生物種ごとの地理分布の把握は、生物多様性保全、種の利用・管理において基本的かつ重要な課題である。それぞれの種の生息域は特異的な環境特性を示し、概念的には生態学的ニッチで説明される。生態ニッチモデリングは、限られた観察データから種の地理的分布域を推定するための統計手法である。近年、生態ニッチ概念にもとづく種分布モデリングとして、Maxent法が盛んに用いられている。その理由として、分布推定に必要な情報として、種が観察された地点とその他のランダムに選んだ地点（バックグラウンド）の環境情報があげられる。すなわち、Maxent法では、サンプル地域における対象種の存在を網羅的に調べる必要がない。このような在のみを示すデータとして、観察情報から標本情報まで様々な形式のデータを用いることができる。容易に多くのデータが得られる一方で、Maxent法ではサンプリングバイアスに起因する誤推定にも配慮する必要がある。市街地や河川・道路脇など、アクセスが容易な場所で観察行為がより多く集中することから、そのような環境条件で分布データが偏る。このようなデータの空間的なバイアスを改善する有効な方法として以下があげられる：1）観察が集中している地域のデータを部分的に切り捨てる方法、2）意図的にバックグラウンド情報にも同様のサンプルバイアスを含ませるTGB法（Target-Group Background法）、3）サンプリングバイアスを共変量として分布推定モデルに組み込み、バイアスの効果を緩和する。これらの手法の問題点を把握改良することで、

様々な形式の分布データに対応し、分布情報が限られた種や絶滅危惧種の分布を高い精度で推定できる種分布モデリング手法の開発が求められている。

## 2. 研究開発目的

本サブテーマでは、次の4点を目的とした：1) 従来の分布モデリング(Maxent法や最尤法など)の利点と問題点を把握する、2) 経験的に高精度で分布域が把握されている種を用いて、実分布と分布予測の乖離を分析することで、調査サンプリング手法やデータの空間的偏りが、分布予測に及ぼす影響を解明する、3) サンプリングバイアスを考慮して、生物種の分布予測の精度を向上させるため理論の再検討および新規的なモデリング手法の検討を行う(図(1)-1)、4) 実データを用いて、従来のモデリング手法と開発した手法の推定精度の違いを明らかにする。

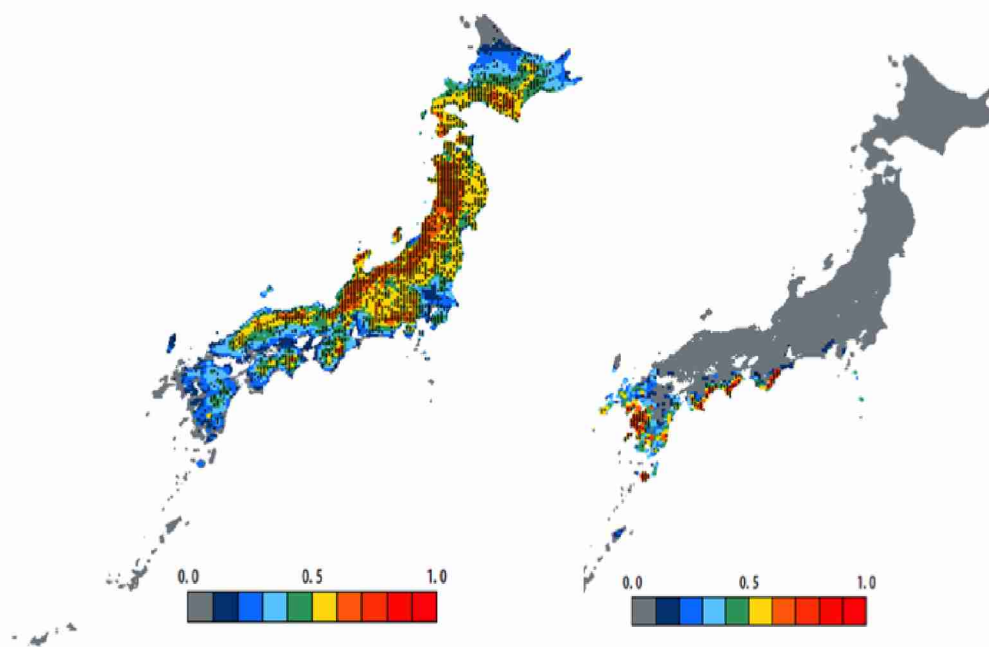
## 3. 研究開発方法

生物多様性パターン形成機構を解明する場合、元となる生物の分布情報の観測誤差(データの空間的偏り)を克服することが重要となる。よって、本サブテーマでは、生物種分布を高精度(10 x 10 km)で予測する分布モデルを開発し、種レベルとそれを積み上げた種多様性の分布予測を行った。なお、種分布と組成情報は、サブテーマ1)で整備したデータを用いた。生物分布情報の補完には、Maxent法が頻繁に用いられてきたが、最近では最尤法の枠組みで観測誤差を考慮する手法も提唱されている。これら統計手法の妥当性は、データの性質に依存するので、ベストな誤差改善の手法はない。生物の分布データは、標本採取や野外観察に基づいている。また、“分布していそうな場所”や“アクセスしやすい場所”でデータが得られているケースが多いので、調査努力量は空間的に不均一である。このようなバイアスを観測誤差として明示的に扱うMaxent法を開発した。具体的には、調査努力量の空間バイアスを、サンプリング法の特異性に帰着させた分布モデルを分析した。これにより、日本における、潜在的な植物種分布と種多様性パターンを予測し、環境変動に対する種分布・種多様性パターンの応答を分析する基盤を構築した。

## 4. 結果及び考察

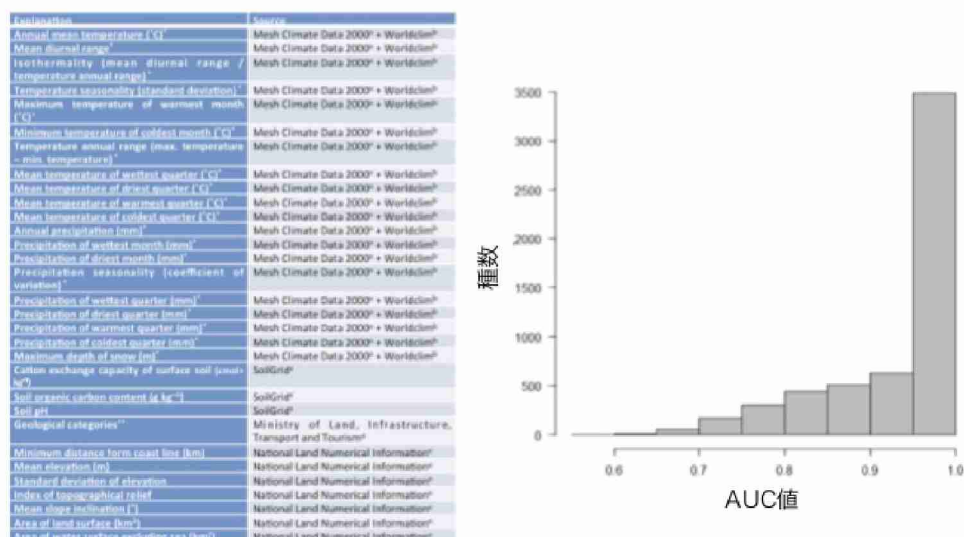
生物種の分布情報には様々なバイアスや、情報自体の特徴がある。例えば、分布情報には地域的な偏りがあるのが一般的である。例えば、ある地域には分布データがたくさんあるが、別の地域では分布情報がほとんどない、ということがしばしばある。このような分布データの空間バイアスは、地域毎のアクセスや、調査努力量と関係している。また、分布情報には地理的な座標値(緯度・経度)をポイントで表したものや、分布地域(レンジやエリア)として表されたものがある。いずれにしても、生物の分布情報を生データとして扱って、生物種の分布地図を作成することは問題が多く、これらのデータの特徴を、種の分布予測にどのように組み込むかが重要である。よって、サブテーマ2)では、統計的機械学習法(Maxent法)によって、データバイアスを考慮した種の潜在的分布域の予測手法を検討した。さらに、従来の種分布モデリングの理論的な検証を行い、調査手法やデータの空間的偏りを考慮したMaxent法を考案し、分布予測を向上させる手法を検討した。なお、これら一連の研究では、日本産維管束植物種を材料にした研究を行った。

具体的には、まず最初に一般的なMaxent法によって、植物種の潜在的分布地域を予測した。図(2)-1のように、分布予測値に基づいて種毎の分布マップを作成した。



図(2)-1 一般的なMaxent法による植物種の潜在的分布予測。黒丸は実際の分布ポイントでデータを表す。赤色ほど分布確率が高く、青色ほど分布確率が低いことを示す。

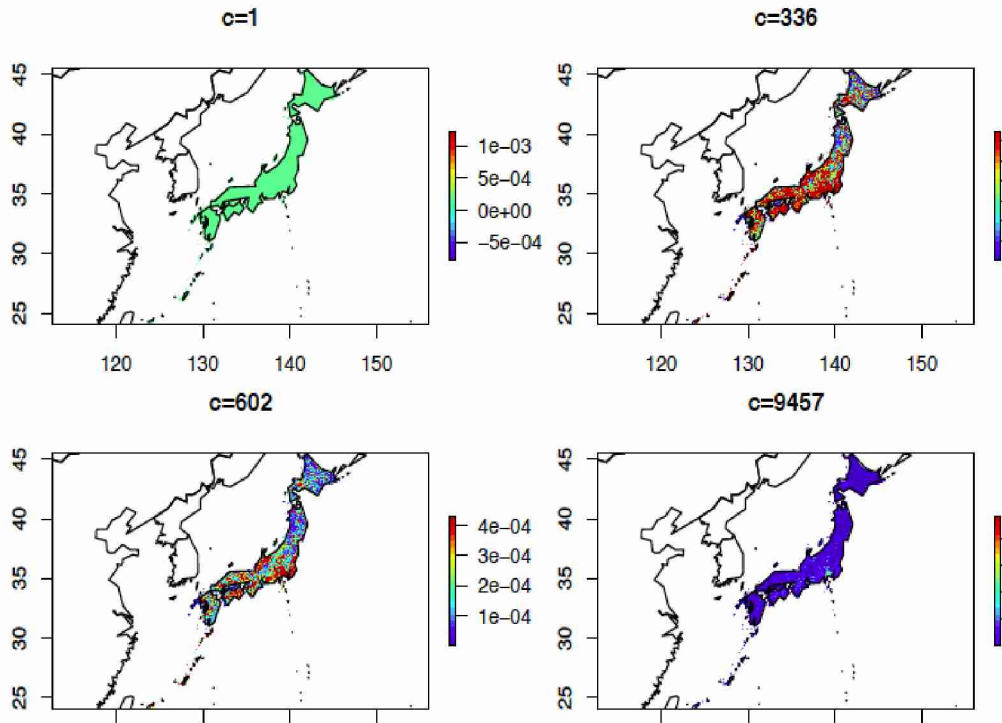
以上のような種毎のモデリングを行った後、予測の信頼度をAUC指標によって評価した(図(2)-2)。この結果から、日本産維管束植物の場合、分布予測の精度は概して高いことが判明した。これは、分布ポイントのデータにバイアスはあるものの、日本の自然史データの完全性が高いことを示唆している。



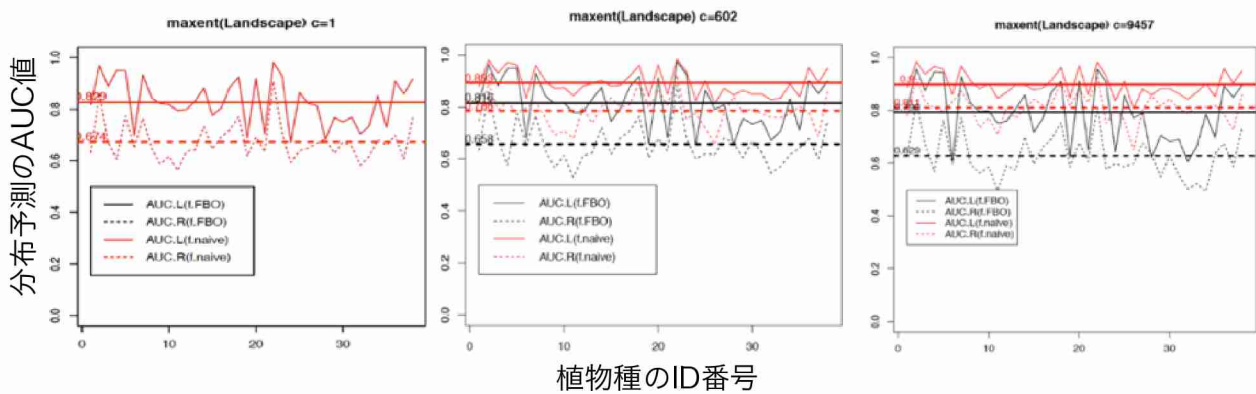
図(2)-2 種分布モデリングに用いた環境変数とモデルの当てはまり。左表の一覧は、モデリングに用いた環境変数を表す。右のヒストグラムは、AUCによる分布モデリングの当てはまり評価で、AUCが0.7以上で大きいほど当てはまりがよいことを意味する。

次に、経験的に描かれた種のレンジマップデータと、分布地点を記録したポイントデータの両方を統合的に使い、かつ、ポイントデータの地域バイアスを調査努力量と定義し、それを明示的に解析するMaxent法(FBO: factor bias out)を検討した(図(2)-3)。種の分布予測の精度が、モデリング手法に応じて、どの程度変化するのかを検証した。図(2)-4は、モデリングの手法毎に、各種の分布予測の精度をAUC指標を用いて比較した結果である。また、種の分布予測の際に、レンジマップデータをテストデータとして併用した場合についても、同様の分析を行った(図(2)-5)。同じ種(横軸の番号が種を表す)

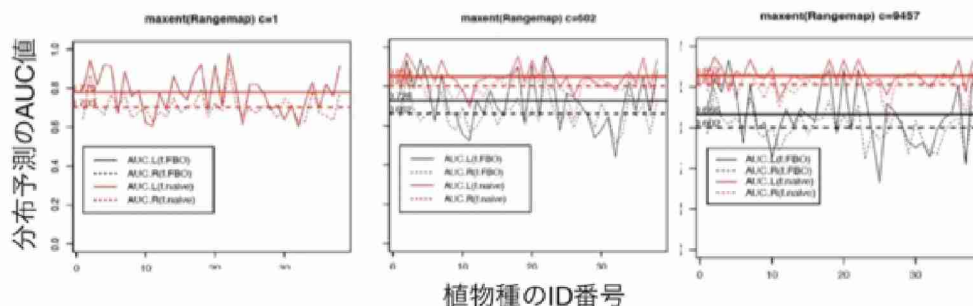
でも、調査努力量の地域バイアスの処理法によって分布モデルの予測精度が異なる（縦軸のAUC値が異なる）ことが判明した。これらの結果は、データの性質を考慮してMaxent法を改善できることを示唆している。



図(2)-3 植物種の分布ポイントデータの調査努力量の地域バイアスの推定。c値を閾値として、データの地域バイアスを検証している（c=1は調査努力量の地域バイアスがなく、データ密度が空間的に均一な状態）。

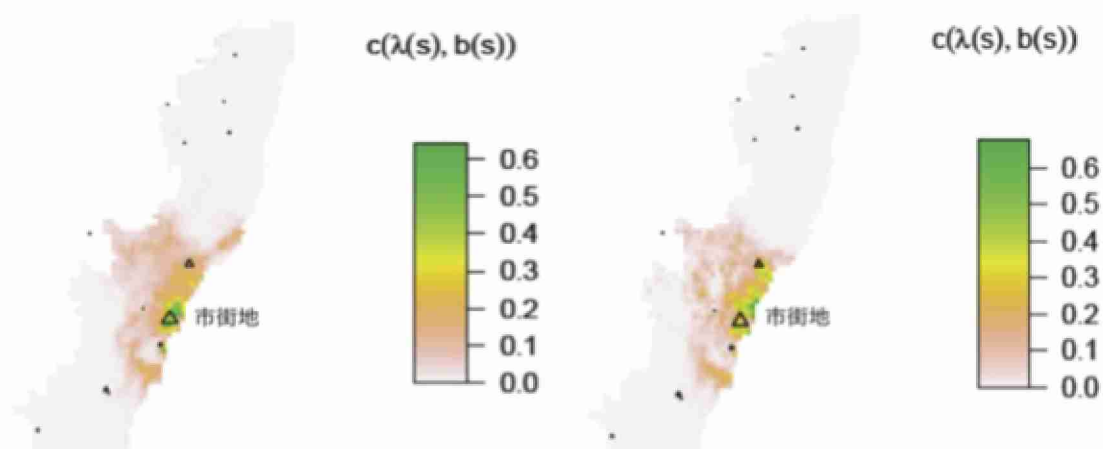


図(2)-4 Maxentモデリング手法（調査努力量の地域バイアスの緩和度c値）に応じた分布予測の精度比較。横軸は植物種の番号ラベル、縦軸は分布予測のAUC値。グラフ中の線は、4つのモデリング手法それぞれの予測精度（AUC）を表している。



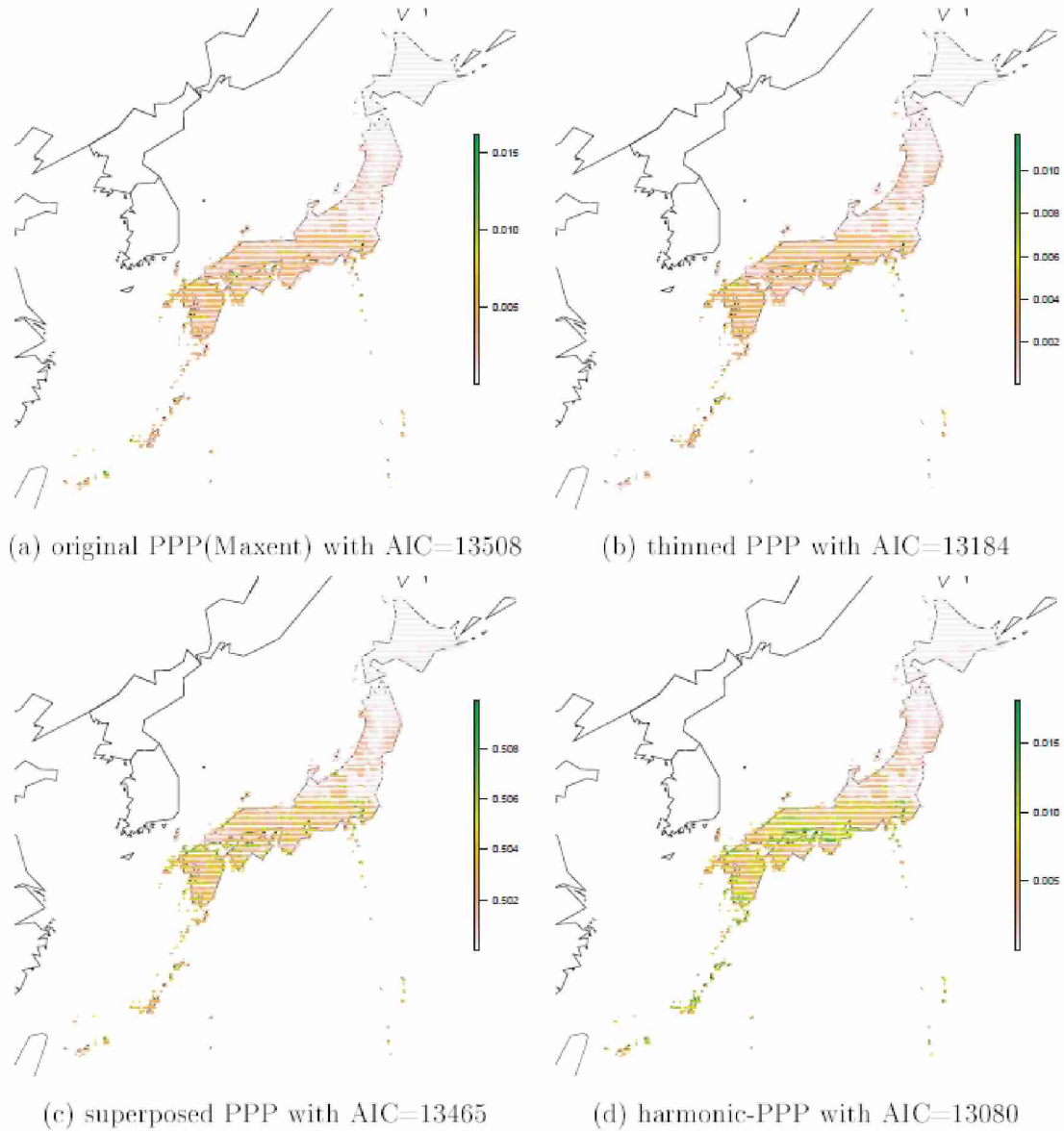
図(2)-5 レンジマップデータをテストデータにした場合のMaxentモデリング手法（調査努力量の地域バイアスの緩和度 $c$ 値）に応じた分布予測の精度比較。横軸は植物種の番号ラベル、縦軸は分布予測のAUC値。グラフ中の線は、4つのモデリング手法それぞれの予測精度（AUC）を表している。

そこで、分布情報の空間的な偏りを考慮し、分布の不在情報を統合した手法を検討した。ある地域に焦点をあて、樹木種の分布データを用いて解析した。モデルに市街地からの距離等のバイアス変数を考慮した場合、通常Maxentによる予測よりも良好な結果を得た(図(2)-6)。

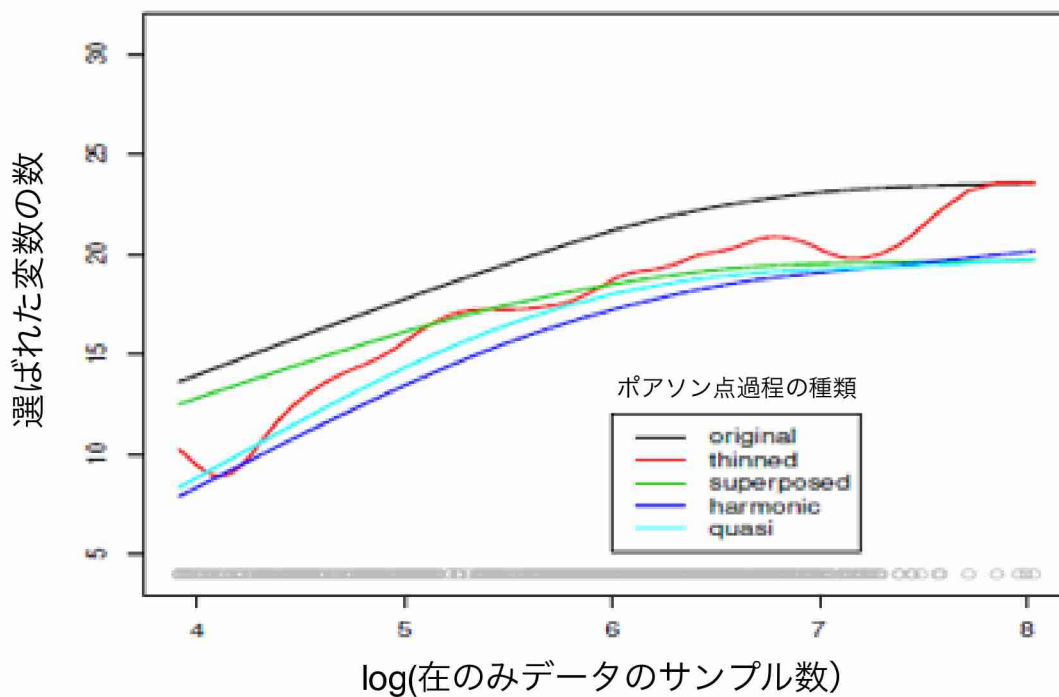


図(2)-6左：通常Maxent. 市街中心地が高い生息確率予測となった. 図(2)-6右：提案手法. 市街地からの距離等のバイアス変数を考慮しているため、郊外でも高い生息確率予測の地点が出現した. 不在のテストデータを使ったAUCの評価でも通常Maxentより良好な予測になることがわかる。

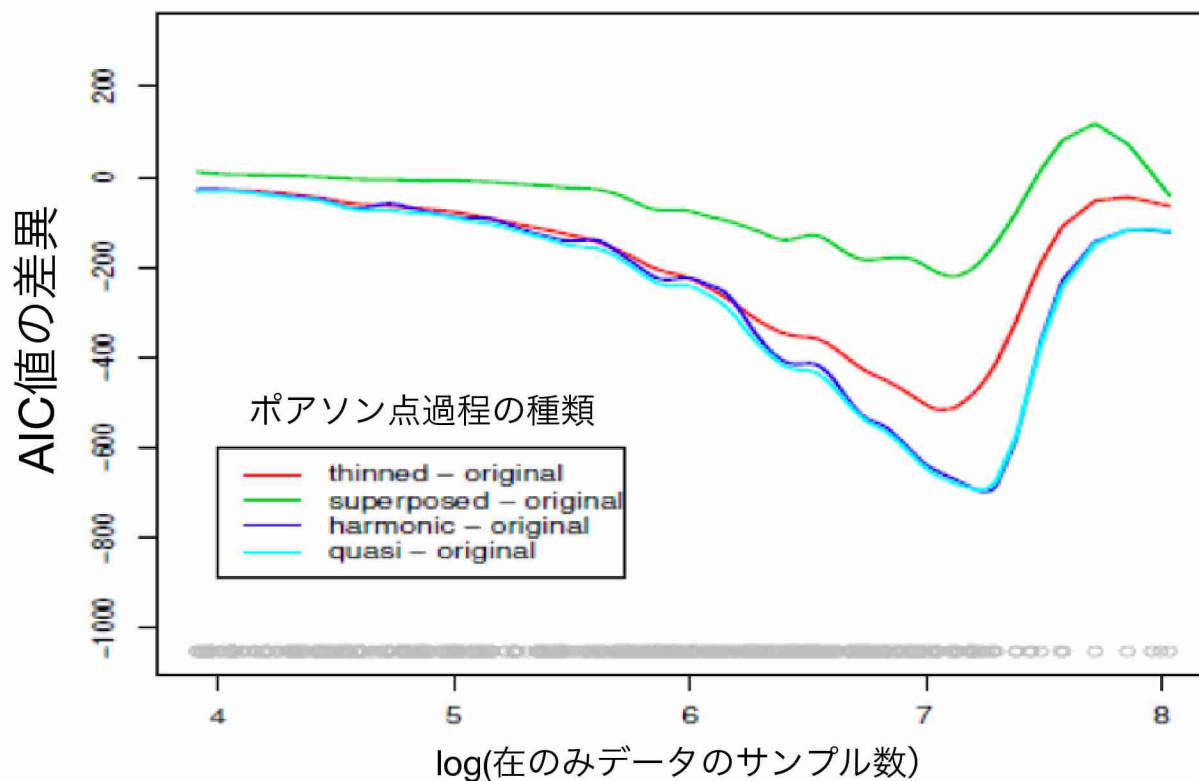
さらに、準線形モデリングに基づくポアソン点過程を拡張することで、種分布推定の精度の向上を図った。具体的には、新たに形状パラメータ $\tau$ を導入し、環境変数とバイアス変数のモデル化をより柔軟にした。図(2)-7では、従来のモデルと今回提案したモデル(harmonic-PPP)による分布推定結果の例とモデルの推定精度を示した。さらに、これらの分布推定では、最大37の環境変数を用いたが、本研究で提案したharmonic-PPPを用いたモデルでは、予測に貢献しない変数を他のモデルと比較してより多く切り捨てることに成功した。日本に分布する522種の維管束植物の分布データを用いた解析の結果から、日本に分布する522種の維管束植物の分布データを用いた解析の結果から、分布情報数の異なる様々な種に対して、harmonic-PPPを用いたモデルが最も簡潔な予測モデルとなった(図(2)-8)。さらにサンプリングバイアスを考慮しないMaxent法と考慮したモデルの中で、今回提案したモデルは最も高い精度での分布推定結果を様々なサンプルサイズの種に対して一貫して示した(図(2)-9)。なお、これらを用いた522種のサンプルバイアスの強度は、観察情報数が1000点( $e^7$ )程度が最も高かったことから、AIC評価にもとづく推定精度のモデル間の差異も、同様にこの規模の情報数の種に対して最も大きく現れたと言える。



図(2)-7 従来のポアソン点過程モデル (a, b, c) と、準線形モデリングにもとづいてポアソン点過程を拡張した提案モデルの地理分布推定の例 (シロダモ: *Neolitsea sericea*)。赤池情報基準AICにもとづいて推定精度を評価。



図(2)-8 AICに基づいて最良とされたモデルに含まれる環境変数の数とサンプルサイズの関係。実線の色は従来モデルと新規モデル（青色）を示す。検証では日本産維管束植物522種を用いた。



図(2)-9 一般的に用いられるMaxent法とサンプリングバイアスを考慮した各モデルとのAICの差異。青色の実線が新規モデルを示す。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

この分析では日本における、生物の分布に関する様々な情報(在情報・不在情報・レンジマップなど)が蓄積されている点が有利に作用した。実際、サブテーマ(2)では、性質の異なる生物分布情報を補完的あるいは統合的に利用する分布モデリングの開発を行い、生物種の空間分布の予測精度を向上させ、それを、サブテーマ(1)にフィードバックしている。サブテーマ(2)における理論・方法論的な研究は、日本の生物多様性に関するビッグデータを発展させていく上で意義が大きい。さらに、種の空間分布の予測精度を向上させることは、地域的な種の保全策や生態系管理計画の信頼度を向上させることにつながり応用学的意義が大きい。すなわち、本研究が提案する新規的な生態ニッチモデリングの手法は、様々な形式の生物地理情報の利用価値を高め、その蓄積を加速することで、保全計画の立案に大きく貢献することが期待される。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

有限な予算に基づいて、最大限効果的な保全政策を計画することは、加速的に消失しつつある生物多様性を保全する上で急務となっている。特に絶滅危惧種や生息地の環境変化に脆弱な種を保全する上で、適切な保護区ネットワークの設置が不可欠である。分布範囲の異なる様々な種に対して最適な保護計画を検討する上で、それぞれの種の分布域を精確に把握していることは保全計画を立案する上で必要条件となる。このサブテーマの研究成果をもとに提案した生態ニッチモデリングは、限られた観察情報や、空間バイアスを含む分布情報をもとに種ごとの分布域をより高い精度で推定することを可能にした。この成果は、様々な形式の分布情報の利用価値を高めることで生物多様性データの収集事業に対するインセンティブとなり、生態学的ビッグデータを充実させるための基盤となる。将来的に、これらの革新は信頼度の高い保全政策の立案を可能とすることが期待できる。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

#### <その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表(学会等)

- 1) 小森理, 三枝祐輔, 江口真透: 生態データのためのポアソン点過程モデルー準線形モデリング. 統計関連学会連合大会(2017)



**(3) 出願特許**

特に記載すべき事項はない。

**(4) 「国民との科学・技術対話」の実施**

特に記載すべき事項はない。

**(5) マスコミ等への公表・報道等**

特に記載すべき事項はない。

**(6) その他**

特に記載すべき事項はない。

**8. 引用文献**

特に記載すべき事項はない。

### III. 英文Abstract

#### **Spatial prioritization of protected areas in East Asian biodiversity hotspots: assessment of conservation bias and long-term effectiveness based on ecological big data**

Principal Investigator: Yasuhiro KUBOTA

Institution: University of the Ryukyus  
 1 Senbaru Nishihara-cho, Okinawa 903-0213, JAPAN.  
 Tel: +81-98-895-8561 / Fax: +81-98-895-8576  
 E-mail: kubota\_y@sci.u-ryukyu.ac.jp

Cooperated by: Institute of Statistical Mathematics

#### [Abstract]

**Key Words:** Biogeography, Biodiversity, Ecosystem management and conservation, Macroecology, Protected areas network, Spatial conservation prioritization, Systematic conservation planning, Zonation algorithm

To create the database of biodiversity information in Japan, a global biodiversity hotspot, we compiled species occurrence data for multiple taxa across vascular plants and vertebrates. Phylogenetic trees including all species for individual taxa were also estimated. We mapped geographical patterns of species richness, phylogenetic diversity and evolutionary distinctiveness at 1 km x 1 km grid scale. Specifically, we modeled the distributions of 6,235 species (amphibians, birds, freshwater fish, mammals, plants and reptiles) using 4,389,489 occurrence data points. For species distribution modeling, we proposed a new Poisson point process (PPP) model to improve the issue of spatial sampling bias, where environmental effect and sampling bias were explicitly modeled in separate clusters in a framework of quasi-linear modeling. Using the predicted data of species distributions, we revealed macroecological processes that generated biodiversity patterns along environmental gradients. We assessed conservation planning in Japan, based on biogeographical findings and spatial patterns of the current protected areas. In this gap analysis, we showed that the existing protected areas network (PAN) poorly captured potential biodiversity patterns, especially for vascular plants, and then identified priority areas to improve conservation effectiveness of PAN. Moreover, we applied the Zonation software for spatial conservation prioritization (SCP) to identify a balanced and area-effective PAN expansion in Japan. First, we analyzed each taxon individually to understand baseline priority patterns. Second, we combined all taxa into an inclusive analysis to identify most important PAN expansions. Human influence was used as a proxy for potential socio-economic cost of PAN expansion. There was remarkably little overlap between priority areas for the individual taxa. The inclusive prioritization analysis across all taxa identified priority regions in particular in southern subtropical and mountainous areas. Expanding the PAN up to 17%, as agreed in the Convention on Biological Diversity's Aichi 11 target, would cover most of the ranges for rare and/or restricted-range species. On average, approximately 30% of the ranges of all species could be covered by the 17% expansion identified here. Our analyses identified top candidates for the expansion of Japan's

protected area network. Taxon-specific prioritization was informative for understanding the conservation priority patterns of different taxa associated with unique biogeographical processes. For the basis of PAN expansion, we recommended the multi-taxon prioritization as an area-efficient compromise that reflects taxon-specific priority patterns. Spatial prioritization across multiple taxa provides a promising start for the development of conservation plans aiming at long-term persistence of biodiversity in Japan.