

課題名 S-9-1 生物多様性評価予測モデルの開発・適用と自然共生社会への政策提言

課題代表者名 宮下 直 (東京大学大学院農学生命科学研究科 生物多様性科学研究室 教授)

研究実施期間 平成23～27年度

累計予算額 305,771千円 (うち平成27年度: 55,478千円)  
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 愛知目標、保護区、絶滅リスク、地球温暖化、熱帯林、生物多様性フットプリント、分布モデル

#### 研究体制

- (1) モザイク景観における生物多様性総合評価と保全への政策提言 (東京大学)
- (2) 農業環境における生物多様性評価のためのスケールアップ手法の開発・適用 (国立研究開発法人農業環境技術研究所)
- (3) 植物の広域データ解析によるホットスポット特定とその将来の定量的予測 (国立研究開発法人国立環境研究所)
- (4) アジア規模での生物多様性総合評価と自然共生社会への政策提言 (九州大学)
- (5) 東南アジア熱帯林における生物多様性損失の比較シナリオ分析 (京都大学)
- (6) 生物多様性フットプリントの評価指標の開発 (横浜国立大学)

#### 研究協力機関

東京農工大学、国立研究開発法人海洋研究開発機構

#### 研究概要

##### 1. はじめに (研究背景等)

第10回生物多様性条約締約国会議(COP10)に先だって発表された「生物多様性概況第3版」は、「2010年までに生物多様性損失を有意に減らす」という国際的に合意された「2010年目標」が達成できず、「生物多様性損失はさらに深刻化している」という結論を下した。また、同じく5月に環境省が公表した「生物多様性総合評価」(JBO)でも、「人間活動にともなうわが国の生物多様性の損失は全ての生態系に及んでおり、全体的にみれば損失は今も続いている」と結論された。しかしながら、これらの評価は、科学的エビデンスにもとづく定量的なものは少なく、専門家の判断による定性的評価にとどまっている。また、COP10で採択された愛知目標には、2020年までに生物多様性にとって重要な陸域の17%を保護地域にすること(目標11)、絶滅危惧種の絶滅の防止と保全状況の改善(目標12)などが掲げられているが、実効性のある施策をたてるには、生物多様性の現状を定量的に把握し、より客観的な将来予測を行う必要がある。そのためには、さまざまな空間・時間スケールのデータを総合的に評価可能なモデルを開発し、現時点で利用可能なデータに適用する研究開発が急務である。とくにアジア地域では、こうした評価や予測が遅れており、重要性・緊急性ともに非常に高い。日本はアジアの他地域からのさまざまな天然資源を輸入し、他国の生態系に負荷をかけている現状からすると、そうした評価を先導する責務もある。そうした研究開発から得られるアウトプットは、国内外の各種の政策決定、具体的には生物多様性国家戦略などの国内政策、アジア各国の政策、CBD 戦略計画やIPBES の国際評価などに活用することができるはずである。

##### 2. 研究開発目的

本研究では、以下の3つの達成目標を掲げる。まず第一に、他の領域2-5 のアウトプットが全体として整合性を持ち、科学的に妥当なモデルに依拠するように支援する。具体的には、統計モデルの標準化、高度化、地図化を行うとともに、保護区設定のアルゴリズムを構築し、政策提案を行う。とくに、「生物多様性の保全にとって重要な地域を抽出」(目標11)と、「絶滅危惧種の絶滅の防止と保全状況の改善」(目標12)を念頭に置く。第2に、他領域間をまたがる課題(複合生態系、農業環境、貿易による他国への負荷)について、定量評価のための新たな指標(生物多様性フットプリントなど)

の開発や、農業や貿易・開発援助のあり方についての政策提言を行う。これは「森林の消失の減少」（愛知目標5）や「農地の生物多様性の保全を確保するような持続的管理」（愛知目標7）に係る。第3に、人口増加や熱帯林の減少が著しい東南アジア諸国において、社会的要因と生態的要因を統合した要因分析、シナリオ分析を行い、生物多様性の保全と持続的利用の両立を目指した政策提言を導く。

### 3. 研究開発の方法

#### （1）モザイク景観における生物多様性総合評価と保全への政策提言

陸域生物を対象とした保全優先地の特定では、まず鳥類について、分布推定に基づいた多様性マップ作成と、相補性解析による保全優先地の候補地と既存保護区とのギャップを特定した。ついで鳥類、蝶類、両生類を対象に作成した分布モデルを用いて、種ごとの分布の将来予測を行ない、将来生息が危ぶまれる種及びそれらが分布する将来のホットスポットを明らかにした。将来予測で使用したシナリオは、IPCC第5次報告書の3つの排出シナリオ(RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5)である。さらに、将来のホットスポットと現在の保護区との重複の変化を調べ、将来の気候変動を踏まえた望ましい保全地域のあり方を提案した。

陸水生態系では、まず約85種の絶滅危惧水生植物の株数と土地利用の変化についてのデータセットを構築した。つぎに絶滅危惧植物の減少の駆動要因を推定するため、絶滅危惧水生植物の株数の変化と土地利用の変化の関係をモデル化した。優先的に保全が望まれる区域の分布を地図化した。さらに、国立公園が、土地利用変化を抑制することで、水生植物の保全に寄与しているかを検証した。

景観の異質性と種の多様性の関係が、現在と過去の土地利用や気候から受ける影響を検証するため、アジアスケールとグローバルスケールから解析を行った。1°グリッドセルを単位とした鳥類、哺乳類、両生類の総種数及びIUCNレッドリスト種数、および各グリッドセルにおける平均気温、年間降水量、標高レンジ、現在の森林率、現在の農地率、最終氷期最盛期（LGM）の森林率、1800年台（0K）の森林率、1800年台（HYDE）の農地率、1800年台（HYDE）の草地率を準備し、CAR modelを用いた解析した。

沿岸域については、まず全国の各流域を単位として、河口から一定距離の沿岸の環境要因と流域全体の陸域の環境要因双方の整備を実施した。整備された環境変数を用いてガラモ場とアマモ場の3次元メッシュ上の分布を一般化加法モデルによって推定した。つぎに、干潟の底生生物と藻類の潜在種数の空間分布を推定した。用いた生物データは生物多様性情報システム上の自然環境保全基礎調査の干潟のベントス種、藻類644種データのうち10サイト以上で出現したものを利用し、環境変数は海岸線長、陸・自然海岸からの距離、潮汐レンジ、水深、波高、無機物粒子量、クロロフィルa量を用いた。また現在・将来の海水温についてはMIROC HiからRCP8.5のシナリオによる海水温を用いた。

#### （2）農業環境における生物多様性評価のためのスケールアップ手法の開発・適用

国内の農業生態系における生物多様性評価手法の開発、開発された手法に基づく国内評価、ならびに、それら手法の東南アジア域への適用を試みた。

生物多様性の第一の危機要因として農地の圃場整備、第二の危機要因として耕作放棄に注目し、それらの空間分布と絶滅危惧植物の分布の関係について、独自に整備したデータをもとに全国規模での検討を行った。絶滅危惧植物については、もともと広域に分布していたが、現在では分布域の多くで絶滅危惧となっている種（「元」普通種）を選定した。「元」普通種の基準は、都道府県版レッドデータブック／レッドリストで35都道府県以上（全国の75%）指定されていることとした。さらに圃場整備、耕作放棄それぞれについて、それ自体をもたらす要因を、気候、地形といった自然要因と、人口、インフラ整備といった社会要因の両者から検討した。

過去に実施されてきた研究において一般的な生物多様性評価で行われる手法、ならびに上記で開発あるいは実施した生物多様性評価手法について、東南アジア域への適用を試みた。適用ができなかった場合は、何が原因で適用できなかったのか、適用するためには何が必要かについて検討を行い、評価に必要な要件の明確化をはかった。

#### （3）植物の広域データ解析によるホットスポット特定とその将来の定量的予測

日本の高精度データを使って分布推定・保護区選択等の手法の高度化を行うとともに、東南アジアのマメ科植物を対象として、分布モデルを利用した広域的なホットスポット評価と土地利用・気候変動による影響の評価を行った。

まず定量的な絶滅リスク計算により保全優先地域特定手法の開発を行った。この手法では、すべての

対象種の局所個体群ごとに絶滅リスクを計算し、保全によって低減される絶滅リスクの種間の総和が最大になるように保全地域を選択するものである。日本全国で過去10年間の個体数変化の情報がある維管束植物レッドリスト種の2次メッシュでの分布情報(日本植物分類学会絶滅危惧種問題専門委員会)を利用した。約1,600種、23,000個体群のデータを利用し、種ごとの将来の絶滅確率を推定するとともに、これを効果的に低減する保護区の実施を行った。

つぎに太平洋アジア地域におけるアジアのマメ科4属について、分布推定モデルを利用したホットスポット評価を行った。対象は、マメ科 *Dalbergia* 属118種、*Bauhinia* 属154種、および *Mucuna* 属78種の合計350種である。分布情報は、S9-3で整備された博物館標本に基づく在のみデータを利用した。説明変数には、Worldclimから取得した生物気象情報のうち、Bio01~Bio03、Bio05、Bio13~Bio15および、ISRIC-WISEデータベースから取得した5つの土壌特性を用いた。各種の分布推定の際に、分布が知られている生物地理区にのみ分布可能であるという制約を設けた。森林における農業活動・放牧による現在までの人為圧の高さを、FAOのgeonetworkで提供されている土地利用データを用いて評価した。気候条件が適しており、かつ森林である範囲を推定潜在分布面積とし、このうち、農業活動・放牧による利用強度が中程度以上の面積割合を人為圧の強度の指標とした。さらに、IPCC第5次評価報告書の4つのシナリオ(RCP2.5、4.0、6.0、8.4)を用い、気候変動を考慮した場合の2050年のホットスポットの推定と、分布面積の変化に基づく絶滅リスク評価を行った。

#### (4) アジア規模での生物多様性総合評価と自然共生社会への政策提言

社会的要因を考慮に入れた生物多様性保全の総合モデルでは、人々の意思決定と生態系の動態をつなぐ、社会系/生態系結合ダイナミクスの数理的研究を進めた。対象として熱帯林の違法伐採、モンゴルの遊牧民とイネ科草本群落の変動、マイクロファイナンスの安定性などをとりあげた。

生物多様性評価手法の統計学的検討では、生物多様性評価手法の重要な部分を成す統計的方法とモデリングについて、妥当性および方法の状況への適不適を数理的および数値計算的な方法により検討した。特に、説明変数の誤差の問題、センタリングの問題、AIC(赤池情報量規準)を用いたモデル選択による要因の特定の問題などについて詳しく検討した。

種・系統・機能的多様性の総合評価では、森林減少の著しいカンボジア(主にKampong Thomにある32固定試験地)、インドネシア(主にゲデ山の16地点)、水質汚染の激しい中国(チャオシー川の42地点)において種多様性・系統的群集構造に影響する、伐採、標高、水質汚濁の効果の大きさと方向性を明らかにした。種同定のために、rbcLとmatKの葉緑体領域をシーケンスし、BLAST検索で科属レベルまでの同定を行い、文献標本調査を行った。

政策提言については、プロジェクトS9全体会議・領域会議などを通じて、各領域から得られた成果を把握するとともに、論文レビューを通じて関連分野の研究動向を把握し、各種会議を通じて国際動向を把握する。これらを通じて得た成果や情報をもとに、政策担当者と協議を行いながら、生物多様性の保全と持続的利用に資する政策オプションを提言する。

#### (5) 東南アジア熱帯林における生物多様性損失の比較シナリオ分析

実効性のある熱帯林の保全政策を策定するには、熱帯林の減少・回復のパターンとその要因を明らかにする必要がある。そこで、1980年~現在までの熱帯53カ国、東南アジア8カ国、東南アジア325県における森林減少の駆動因、および2000年代の熱帯53カ国における森林回復に及ぼす要因を調べた。

まず各国の1981-1990年、1991-2000年、2001-2010年の森林面積変化率(%/年)を、FAOのGlobal Forest Resources Assessmentから得た。次に説明変数としての木材伐採量は、各国における産業用丸太生産に要した土地面積とした。農地拡大は、各国の食料生産に要した土地面積とした。国レベル解析の際は、東南アジアの主要輸出作物であるオイルパーム、コーヒー・ココア等の刺激物、主要穀物10種、その他に分けた。人口要因として、人口密度、農村・都市・総人口の増加率、都市人口比を用いた。経済要因として、一人当たりGDP、GDP成長率、人間開発指数、貧困率、GINI指数、農業・製造業・サービス業(%GDP)、資源レント(%GDP)、森林レント、森林レントを用いた。社会要因として、ガバナンス、社会的自由、紛争を用いた。農業集約性は、農業投資、穀物生産性、農業生産性を用いた。農林産物貿易は、面積ベースの木材自給率、食料自給率、農林産物自給率を用いた。地理的要因として、国土面積、残存森林率、山岳度、熱帯低地林(潜在自然植生)の面積率、3つの気候変数、4つの土壌変数、海岸線比率、保護区面積比、標高中央値と標高SDを用いた。

東南アジア8カ国の県レベルの森林面積の変化を、各国政府機関発行の統計資料から得た。タイは1961年(最大で76県)、マレーシアは1962年(14州)、フィリピンは1969年(12地方、2003年以降は83州)、インドネシアは1982年(33州)、カンボジアは1974年(25州)、ラオスは1982年(17県)、

ベトナムは1990年（63省）、ミャンマーは1975年（14州/地域）以降の森林面積データを得た。

また県レベルにおいて、農林産物貿易と政治・社会を除く要因をできる限り収集した。

熱帯53カ国中8カ国では森林が回復している（フィリピン、タイ、ベトナム、インド、コートジボアール、ドミニカ共和国、キューバ、コスタリカ）。2000年代の53カ国を対象に、一人当たりGDPを3等分し（177-783・981-2580・3394-16440 USドル）、さらに森林率50%を境に2つの森林率クラスに区分した。そして、FT国がどの区分に含まれるのかを調べた。

#### （6）生物多様性フットプリントの評価指標の開発

まず、木材の生産によって森林がどの程度減少するかを測るための指標（FHI）を開発し、実際の森林被覆面積の減少との関係を調べた。2000年～2005年における各国の森林被覆の減少面積（GFCL）を森林消失地図から算出した。次に、各国のFHIを産業用丸太と木質燃料に分けて計算した。最後に、産業用丸太のFHI、木質燃料FHI、それらの合計のFHIにおいて、各国のGFCLとの相関係数を求めた。

次に、森林性の絶滅危惧種（哺乳類、鳥類、両生類、爬虫類）を対象に、空間明示的手法により、種ごとに生息地の減少率を評価した生物多様性フットプリント指標（BF-spatial）を開発した。まず、IUCNのレッドリストにおいて絶滅危惧指定されており、木材生産の影響を受けているとされる計2,321種を対象に、生息分布マップと2000年～2005年の森林消失マップを重ね合わせ、国ごとに生息分布内の森林の減少率を算出した。さらにこれを拡張し、木材生産による森林減少が鳥類の絶滅リスクに与える影響を評価する生物多様性フットプリント指標（BF-extinct）を開発した。これは、生息地の減少によって個体数がある絶滅の閾値を下回る確率を計算し、それを各種のインパクトスコアとする指標である。BF-spatialの対象種のうち、分布と個体数の情報が利用可能な536種の絶滅危惧鳥類を解析対象とした。まず、国ごとの2000～2005年における森林の減少率が2100年まで続くと仮定し、5年ごとに各種の絶滅確率を計算した。絶滅の閾値は、最小存続可能分析の法則に従い、50個体を仮定した。次に、種の絶滅確率を森林減少面積に比例して生息する国に配分し、配分された各種の絶滅確率を国ごとに合計し、木材貿易が鳥類の絶滅リスクに与える影響を推定した。さらに、各国の木材消費量を維持し、2100年時点で全対象種の絶滅確率が10%を下回るシナリオ（各国の木材生産量）を探索した。

また、資源消費が窒素汚染に与える影響を評価するための指標として、窒素フットプリント(NF)の開発にも取り組んだ。ここでは国際貿易と水産物に着目し、資源消費と窒素汚染の関係を定量化した。具体的には、2010年の世界各国・地域のフットプリントを、大気中へのアンモニア、窒素酸化物、亜酸化窒素の排出量、および潜在的な水域排出窒素の4物質の合計として国際貿易を考慮して算出した。

## 4. 結果及び考察

### （1）モザイク景観における生物多様性総合評価と保全への政策提言

愛知ターゲット11（陸域17%を保全）に基づいて鳥類を対象に保全の優先順位が高い場所を相補性解析で抽出したところ、既存の保護区に比べメッシュ内の森林率が低い場所、またモザイク景観の指標である土地利用の多様度が高い場所が選ばれた。そのような場所の多くは平野部に集中し、農地性や草地性の希少種が多く分布していた。一方将来予測の結果から、蝶類では、環境省レッドリスト種（絶滅危惧Ⅱ類の以上）は現在の31種から2080年には44種に増えると予測された。鳥類では、レッドリスト種に新たに15種が追加されると予測された。両生類では、現在のレッドリスト掲載種8種から2080年には14種に増加すると予測された。現在の保護区とのギャップを考えると、低標高地も含めた保護地域の拡充が望まれる。

絶滅危惧水生植物は、直近10年間の淡水域内の改変の影響を受けた種が多かったが、淡水域外の土地利用変化は、直近10年間よりも10～20年前の改変から影響を受けた種が多かった。得られたモデルの基づき、絶滅危惧水生植物の株数が土地利用変化により影響を評価したところ、水生植物が生育した797メッシュのうち、国立公園を含んでいたのは、37.9%(302メッシュ)であった。国立公園内であっても、土地利用の変化の抑制を検討する必要があることが示唆された。

沿岸域での評価では、アマモ場の分布予測から、水温といった海域由来の要因だけではなく、海岸線長といった陸域由来の要因が影響していることがわかり、異なる生態系が複合的に多様性損失の駆動因になりうることを示した。また、将来の気候変動によって、底生生物は北上する種が多く、種数の多い地域が拡大していくと予測された。一方藻類では、種数の多い地域の北上に合わせて、温帯域の南側では生息適地が狭まることが予測された。

グローバルスケールにおけるモザイク景観と生物多様性の関係は、全球的に正の影響を示しているものの、歴史的に森林率や草地率が高い地域では、モザイク景観が負の影響を示すことも明らかとな

った。モザイク景観と生物との応答には地域性があり、モザイク景観の多様性への正の効果の一般性に警鐘を鳴らすとともに、地域ごとに異なる保全施策が推進されることが望まれる。

## (2) 農業環境における生物多様性評価のためのスケールアップ手法の開発・適用

圃場整備の全国的な二次メッシュ地図および神奈川県三次メッシュ地図と、「元」普通種の分布データを重ね合わせた結果、二次メッシュ内の全ての農地が圃場整備された場所には絶滅危惧植物はほとんど生息しないことが示された。この結果から、圃場整備は絶滅危惧植物にとって明らかに負の影響を持つこと、その影響は圃場整備の実施年代に関わらず長期にわたること、面的に大きく圃場整備が実施されることで負の影響がさらに大きくなる可能性が示唆された。耕作放棄の全国二次メッシュ地図と、「元」普通種の分布データを重ね合わせた結果、耕作放棄地の分布と絶滅危惧植物の分布は全国的に重なることが明らかになった。放棄面積を被説明変数にした放棄地の立地解析を実施したところ、放棄をもたらす要因は北海道では最高気温、本州、四国、九州では農業従事者数であることが明らかになった。この結果を元に、現在の農地を、①食料生産に特化させた方がよい農地と、②生物多様性保全に注力したほうがよい農地に区分するというゾーニング手法を提示し、地図化した。その結果、①は北海道に集中し、②は本州、四国、九州に多く存在するという結果が得られた。

タイの蝶の分布データを3時期（1960-1980年、1981-2000年、2000年以降）に分け、3時期で継続して3種以上同種が分布している郡を抽出し、森林率、農地面積データとの関係を検討した。その結果、10郡において3種以上同種が分布していることが確認でき、そのうち3郡はChang Mai県であった。そこでChang Maiの農地面積（米作面積）、森林率の推移と蝶の種数との関係を検討したが、特にこの地域に顕著な土地利用やその推移パターンを見出すことはできなかった。また、圃場整備、耕作放棄については、タイ国の地図データを整備することができなかった。

## (3) 植物の広域データ解析によるホットスポット特定とその将来の定量的予測

日本国内の維管束植物について実施した絶滅リスクにもとづく保全優先地域の特定では、今回新たに開発された手法を用いることで、相補性解析などの従来の手法に比べて、より少ない面積で高い保全効果を発揮する場所を特定できることが示された。さらに、日本国内の分析により、優先保全地域を適切に選べば、愛知目標に定められた陸地の17%の保護区面積は絶滅回避のために十分な広さであること、しかし保護区内での保全効果が十分でなければ、面積のみ増やしても絶滅は回避しきれないことが明らかとなった。新たな保全措置を講じないとして今後の国内の維管束植物の絶滅種数を予測したところ、条件の設定により、370種から560種が絶滅する可能性があるとの結果が得られた。新たに開発した保護区選択ツールを用いて、この絶滅リスクを抑制するように保護区を設定したところ、保護区内では個体群サイズの減少を完全に抑制できるなら、日本の面積の7%程度を保護区とすれば維管束植物の絶滅は避けられることが示された。

統計的に評価され118種を対象として推定されたホットスポットは、気候変動を考慮したいずれのシナリオでも、現在の気候による推定に比べてあまり位置に変化はなかった。これは、東南アジアに生育するマメ科植物は熱帯の種が主であり、気温上昇の影響を受けにくいためと考えられた。現在の土地利用による人為圧を受けている面積割合は67%の種で0.8を超えていた。気候変動に伴う分布面積の変化については、分布面積が広がるかあまり変化しない種が大半を占め、もっとも気候変動が大きいと考えられるRCP8.5でも、散布制限がないと仮定した場合、推定された潜在分布可能面積が1割減少する種は16.1%、半減する種は0%であった。分布拡大が全く起こらないと仮定した場合も、潜在分布面積が1割減少する種は22%、半減する種は1種のみ(0.008%)だった。

## (4) アジア規模での生物多様性総合評価と自然共生社会への政策提言

社会系／生態系結合モデルの解析の結果、①違法伐採が存在しない領域を大きくするには、汚職に関わる役人についての情報共有と役人の教育が重要であること、②乾燥地では、遊牧民の遊牧地域選択により環境が大きな振動が生じる可能性があり、その回避には、全ての場所の生態系に関する情報が遊牧民に広く共有されていることが有効であること、などがわかった。

分布モデルの統計学的検討については、①環境変数のスコアの数が少ない時に予測精度の低下度合いが大きかったが、各スコアに等量のデータが含まれると予測精度の低下を軽減できること、②説明変数のセンタリング前後で2つのモデルが表すものが実質的には変わらない一致型と異なる不一致型に分けられること、③AICやBICによって統計モデルを絞りそのモデルを用いて推定すると、パラメータの推定誤差が実際の推定誤差を示さなくなること、が明らかになった。

植物の種多様性の評価では、まずコンポントムにある試験地で325種の同定を行った。DNA barcoding

による種同定効率は特に科属レベルで高かったため、調査が不十分な地域での種同定に非常に有効であることが実証された。種多様性・系統的多様性は伐採によって減少し、伐採は街から近く、森林局から遠いほど行われていた。また原生林の伐採は、乾燥林との系統的距離を減少させることが分かった。ゲデ山に生育する145種の同定を行うことができた。高標高下では偏った分類群で群集が形成されていたが、中標高下では系統的に多様な分類群で構成されていた。DNA barcodingと文献標本調査によりチャオシー川に生育する47種の同定を行うことができた。種多様性や系統的多様性は、水質汚濁やアオコ量の増加に伴い減少した。

政策提言については、愛知ターゲットの短期目標と長期目標の視点から、森林面積のトレンドや人口動態をもとに以下の提言を行った。アジアでは経済発展により森林が減少から増加に転じている国があり、2050年までには人口増加に歯止めがかかる。これらの国々で現在残されている森林の生物多様性について調査を進め、調査結果を還元し、能力開発を支援することが、日本に可能な重要な国際貢献である。また保護林管理の能力開発、森林認証制度の活用・改革など、日本が可能な政策オプションを通じて、日本がアジア諸国の生物多様性にかけている負荷を軽減する努力が重要である。

#### (5) 東南アジア熱帯林における生物多様性損失の比較シナリオ分析

森林減少の駆動因は、3つの空間スケール（全球、東南アジア、県）全てにおいて1990年頃を境に大きく変化した。1990年以前に経済レベルが比較的高く森林資源を速いペースで消費していた地域が、経済発展（森林保全に充てられる予算が増える）と森林率の低下（森林保全インセンティブが高まる）がさらに進むことで、1990年以降はむしろ森林が回復した。重回帰分析により1980年～現在における国レベルの駆動因を解析した結果、肥沃な土地（農地転換圧が高い）が広がり、農村人口増加率が高く、農業投資が少ない（農業生産性が低いため農地拡大しやすい）国ほど森林が減少することが分かった。次に、森林回復に及ぼす要因を、各国の経済レベルと残存森林率に注目して解析した。森林回復は、経済レベルが中程度以上で森林が少ない国で起こりやすいことが分かった。特に、海岸線長比が高く（輸送コストが低い）、農業集約度が高く農外雇用が多く、木材輸入量が多く、ガバナンスレベルの高い国で森林が回復しやすいことが分かった。

東南アジアでは現在、森林率が低いフィリピン・タイ・ベトナムで森林回復が進み、比較的森林率の高いその他5カ国で森林減少が進んでいる。5カ国のうち、森林率が高いラオス・マレーシアと経済レベルが低いミャンマー・カンボジアでは森林減少が当面続く可能性が高い。

#### (6) 生物多様性フットプリントの評価指標の開発

各国の森林被覆の減少面積とFHIの相関係数は、産業用丸太では0.76、木質燃料では0.08、産業用丸太と木質燃料の合計では0.27であった。

BF-spatialでは、中国と日本、韓国が木材輸入を通してインドネシアの生物多様性に与える影響が大きく、またアメリカの輸入によるブラジルへのインパクトも強かった。BF-extinctではブラジルとインドネシアで生産された割合が半分以上を占めた。ブラジルでの影響が最も大きかったのは、絶滅危惧鳥類の種数が多いことに加え、絶滅確率も高かったからである。一方、インドネシアは絶滅危惧鳥類の種数は多かったが、絶滅確率は平均と同程度であった。木材輸入より海外に影響を与えている上位は、中国、日本、アメリカ、韓国であった。

自給シナリオでは、BF-extinctの総計は現状シナリオよりもやや高かった。これは、自給シナリオではインドネシアやブラジルでのBF-extinctが減少するが、日本や中国、さらにはメキシコやフィリピンなどの熱帯の木材輸入国で絶滅リスクが大きく上昇したからである。また、2100年時点で全対象種の絶滅確率が10%を下回るシナリオは、ブラジルや中国、インドネシアなどで木材生産量を大きく減少させ、アメリカやロシア、フランスで木材生産量を増加させるものであった。

世界全体のNFの約4分の1が、国際取引されている商品によるものであった。その内訳は硝酸態窒素、アンモニアおよび亜酸化窒素で、主に農畜産物由来の食料や衣類などの生産地で排出されていた。次に、輸入品の生産などのために国外で排出された量から、輸出品の生産などのために国内で排出した量を差し引いて、商品に内包された活性窒素排出の「純輸入量」を評価した。その結果、主な純輸出国は農畜産品の輸出大国（主に発展途上国）である一方、主な純輸入国は農畜産品の多くを輸入している先進国であり、中でも日本の輸入による影響が突出していた。さらに、活性窒素排出量と各産業部門の商品との間のサプライチェーンを辿る解析により、中国から米国、日本などへの輸出と、日本への輸出やカナダ・メキシコとの相互貿易を含む米国の輸出入の影響が大きいことがわかった。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

- 1) 我が国の鳥類、蝶類、両生類の合計195種を対象とした解析により、2080年までに温暖化によって絶滅危惧Ⅱ類以上に追加される種数は、どの分類群でも数10%増加することが予測された。将来の気候変動を見越した保護区選定の重要性を示すものである。
- 2) 全球スケールにおいて、種多様性の保全に景観多様性の維持が正の効果を持つ地域と負の効果を持つ地域を色分けすることができたため、景観異質性と均一景観のどちらを維持すべきかという議論に一定の方向性を与えることができた。
- 3) これまで国内ではほとんど実施されてこなかった農業生態系における第一の危機（圃場整備）と第二の危機（耕作放棄）が重要である地域を全国スケールで提示し、また耕作放棄の拡大に関係する要因の検討ができた。
- 4) 生物の空間分布情報に加えて時系列情報を活用した保全優先地域特定手法を開発し、従来の手法よりも効率的な優先付けが可能になることを示した。本手法を国内の維管束植物に適用した結果、優先保全地域を適切に選べば、愛知目標に定められた陸地の17%の保護区面積は絶滅回避のために十分な広さであること、しかし保護区内での保全効果が十分でなければ、面積のみ増やしても絶滅は回避しきれないことを示した。
- 5) 森林減少には潜在的原因→直接的原因→森林減少という階層性があり、既存研究が主に注目してきた潜在的→森林減少パスでは解析対象とする年代によって相関パターンが真逆になることを示した。これに対し、潜在的原因→直接的原因と直接的原因→森林減少の2つのパスは年代によらず一貫した傾向があることを示した。
- 6) 木材貿易の影響を評価するための2種類の生物多様性フットプリント指標を開発した。分布内の森林減少率に基づいた指標と、絶滅リスクに与える影響を評価する指標である。後者は、絶滅リスクを抑制するためのシナリオ分析を行えることが特徴である。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

- 1) 環境省による生物多様性及び生態系サービスの総合評価報告書(JBO2)に対して、相補性解析による鳥類の保全優先地の分布図を成果として報告し、平野部を中心に広がる保護区とのギャップにおいて、保全地拡充の必要性を提言した。
- 2) 環境省の平成23年度生物多様性評価の地図化検討会において、保護区設定による種の絶滅リスク低減効果の効率的計算手法により抽出した絶滅危惧植物の保全重要地域の分布マップが、生物多様性評価のための総合的な地図化に貢献した。また、種の保存法における国内希少野生植物種の新規選定のために、絶滅危惧維管束植物の絶滅リスクを考慮した保護区選択の解析結果を、環境省自然環境局の希少種保全推進室に対して情報提供した。
- 3) 「生物多様性国家戦略2012-2020」第4章第2節基本戦略4「地球規模の視野を持って行動する」において、本研究からの政策提言にもとづいて、以下の記述が盛り込まれた。「【国際協力】わが国は、食料や木材などの資源の多くを海外から輸入しており、他国の生物多様性を利用しているという視点に立ち、地球規模での生物多様性保全に貢献する必要があります。」
- 4) BF-spatialの成果をCBD第5回国別報告書へ掲載した。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

- 1) 陸域生物の将来予測の結果から、将来のホットスポットと重複している既存保護区では、保全管理施策をより一層強化する必要がある一方、既存保護区外に予測されたホットスポットは里地里山に広く存在するため、生物多様性地域戦略や各種の公的支援策などを通して、民間保護地域を含む保全地域の拡充が望まれる。
- 2) 全国スケールで食料生産と生物多様性保全の両立に向けたゾーニング手法を開発できた。これは愛知目標戦略目標B、個別目標7「農業・養殖業・林業を持続的に管理する」の達成に貢献できる。国や都道府県レベルの環境政策および農業政策の立案において今後利用されることが期待される。
- 3) 現在人口が増えて森林面積が急減しているカンボジア・インドネシアなどで、2050年には人口増加が止まり、森林を回復させ得る条件が生まれるというシナリオは、日本政府が提案し国際合意となった生物多様性条約戦略計画の長期目標を裏付けるものであり、2050年までの生物多様性条約に関わる政策の基本的視点として活用されることが見込まれる。



- 4) 熱帯林減少を抑止し回復に導くには、森林減少のパターンとその要因を正確に把握し対策を講じることが重要である。本研究が示した森林の減少・回復のパターンや要因、および解析手法は、REDD+やIPBESにおける専門家会合や国際機関・各国の政策決定者に対して必要な情報を提供できる。
- 5) 木材の消費と貿易の生物多様性影響を評価できるフットプリント指標を開発した。これは、木材の資源量だけでなく生物多様性の保全も考慮できる「持続可能な調達」の指標として使える可能性が考えられる。また、生物多様性や窒素に配慮した地方自治体の都市計画や環境基本計画として、本課題の成果が採用される見込みがある。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上发表

#### <査読付き論文>

- 1) T. YAHARA, M. AKASAKA, H. HIRAYAMA, R. ICHIHASHI, S. TAGANE, H. TOYAMA, and R. TSUJINO: The Biodiversity Observation Network in the Asia-Pacific Region, Toward Further Development of Monitoring. (S. NAKANO, T. NAKASHIZUKA, T. YAHARA eds.), Springer, 3-19 (2012), Strategies to observe and assess changes of terrestrial biodiversity in the Asia-Pacific Regions.
- 2) T. OSAWA, K. KOHYAMA and H. MITSUHASHI: PLoS ONE, 8, e79978 (2013), Areas of increasing agricultural abandonment overlap the distribution of previously common, currently threatened plant species.
- 3) 小川みふゆ、竹中明夫、角谷 拓、石濱史子、山野博哉、赤坂宗光： 保全生態学研究, 18, 69-76 (2013), 植生図情報を用いた全国スケールでの土地利用図の作成
- 4) N. KATAYAMA, T. AMANO, S. NAOE, T. YAMAKITA, I. KOMATSU, S. TAKAGAWA, N. SATO, M. UETA and T. MIYASHITA: PLoS ONE, 9, e93359 (2014), Heterogeneity–biodiversity relationship: effect of range size and conservation status.
- 5) T. OSAWA, K. WATANABE, H. IKEDA and S. YAMAMOTO: Entomological Science, 17, 425-431 (2014), New approach for evaluating habitat stability using scarce records for both historical and contemporary specimens: A case study using Carabidae specimen records.
- 6) T. KADOYA, A. TAKENAKA, F. ISHIHAMA, T. FUJITA, M. OGAWA, T. KATSUYAMA, Y. KADONO, N. KAWAKUBO, S. SERIZAWA, H. TAKAHASHI, M. TAKAMIYA, S. FUJII, H. MATSUDA, K. MUNEDA, M. YOKOTA, K. YONEKURA, T. YAHARA: PLoS ONE 9(6), e98954. doi:10.1371/journal.pone.0098954 (2014), Crisis of Japanese vascular flora shown by quantifying extinction risks for 1618 taxa.
- 7) S. NAOE, N. KATAYAMA, T. AMANO, M. AKASAKA, T. YAMAKITA, M. UETA, M. MATSUBA and T. MIYASHITA: Journal for Nature Conservation. 24, 101-108 (2015), Identifying priority areas for national-level conservation to achieve Aichi Target 11: A case study of using terrestrial birds breeding in Japan.
- 8) 松葉史紗子、赤坂宗光、宮下 直： 保全生態学研究. 20, 35-47 (2015), Marxanによる効率的な保全計画：その原理と適用事例
- 9) T. MIYASHITA, T. AMANO and T. YAMAKITA: The biodiversity observation network in the Asia-Pacific Region: Integrative Observations and Assessments of Asian Biodiversity, S. Nakano, T. Yahara, and T. Nakashizuka (eds.), Springer, 29-47 (2015), Effects of ecosystem diversity on species richness and ecosystem functioning and services: A general conceptualization.
- 10) JH. LEE, K. SIGMUND, U. DIECKMANN and Y. IWASA: Journal of Theoretical Biology, 367, 1-13, (2015), Games of corruption: how to suppress illegal logging.
- 11) JH. LEE, K. KAKINUMA, T. OKURO and Y. IWASA: Ecological Economics, 114, 208-217 (2015), Coupled social and ecological dynamics for herders in the rangeland.
- 12) H. TOYAMA, K. KAJISA, S. TAGANE, K. MASE, P. CHHANG, V. SAMRETH, V. MA, H. SOKH, R. ICHIHASHI, Y. ONODA, N. MIZOUE and T. YAHARA: Philosophical Transactions of the Royal Society B., 370, 20140008 (2015), Effects of logging and recruitment on community phylogenetic structure in 32 permanent forest plots of Kampong Thom, Cambodia.
- 13) T. FURUKAWA, C. KAYO, T. KADOYA, T. KASTNER, H. HONDO, H. MATSUDA and N. KANEKO: Global Ecology and Conservation, 4, 150-159 (2015), Forest harvest index: Accounting for global



gross forest cover loss of wood production and an application of trade analysis.

- 14) A. OITA, A. MALIK, K. KANEMOTO, A. GESCHKE, S. NISHIJIMA and M. LENZEN: Nature Geoscience, 9, 2, 111-115 (2016), Substantial nitrogen pollution embedded in international trade.

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 宮下 直、西廣 淳（編）：保全生態学の挑戦、東京大学出版会、109-125 (2015)  
「第7章 熱帯林の消失・回復と時間—過去を復元し現在の多様性を知る（執筆担当：遠山弘法、辻野亮）」

(2) 主な口頭発表（学会等）

- 1) S. YAMAMOTO: The 5th EAFES International Congress, Shiga, Japan, 2012. "The effect of landscape structure on both agricultural production and biodiversity"
- 2) R. TSUJINO, T. YUMOTO, S. KITAMURA, I. DJAMALUDDIN: The 5th EAFES International Congress, Shiga, Japan, 2012. "Forest area change and its driving factors in Indonesia"
- 3) H. IKEDA and S. YAMAMOTO: MARCO Symposium 2012, NIAES, Tsukuba, 2012. "Positive and negative relationships between agricultural activities and biodiversity in rice paddy landscapes of Japan"
- 4) R. TSUJINO: International workshop on Landuse Diversity and Autonomy in Southeast Asia, Research Institute for Humanity and Nature, 2012. "Causes and history of forest loss in Cambodia"
- 5) T. YAHARA: An International Workshop to Develop Key Strategies for the Establishment and Promotion of the Asia-Pacific Biodiversity Observation Network (AP-BON) at Local, National, and Regional Levels. A Workshop at 2102 Jeju World Conservation Congress (WCC), Jeju, Korea, 2012. "Asia-Pacific BON update."
- 6) T. AMANO, N. KATAYAMA and T. MIYASHITA: International symposium on patterns and drivers of biodiversity at macro spatial scales: historical and contemporary effects, Tokyo, Japan, 2013 "Effects of habitat heterogeneity on bird species at multiple spatial scales"
- 7) F. ISHIHAMA, A. TAKENAKA, H. YOKOMIZO and T. KADOYA: 11th INTECOL Congress, London, United Kingdom, 2013. "When do species distribution models work in conservation prioritization?"
- 8) T. YAHARA, S. TAGANE, H. TOYAMA, K. FUSE, H. NAGAMASU, E. SUZUKI, S. FUJII, A. NAIKI, C. PHOURIN, D. DARNAEDI, M. ARDIYANI, A. SYAMSUARDI, S.L. GUAN, L.C. LU, S. SUDDEE, S. RUEANGRUEA, D. MAROD and V. S. DANG: 9th International Flora Malesiana Symposium, Bogor, Indonesia, 2013. "Plant diversity assessments using a standardized transect method in Cambodia, Indonesia, Malaysia, Thailand and Vietnam."
- 9) M. MATSUBA and T. MIYASHITA: The 27th International Congress for Conservation Biology/ 4th European Congress for Conservation Biology, Montpellier, France, 2015. "Forecasting future diversity and distributions of butterflies under climate change in Japan"
- 10) A. TAKENAKA: Biological Conservation Planning under Uncertainties, 2015. "Extinction risks and conservation area prioritization for Japanese vascular flora."
- 11) S. NISHIJIMA, T. FURUKAWA, T. KADOYA, F. ISHIHAMA, T. KASTNER, H. MATSUDA, N. KANEKO : International Symposium "Biological Conservation Planning under Uncertainties", Tokyo, Japan, 2015. "A novel biodiversity footprint based on extinction risks to evaluate the effect of international wood trade"
- 12) A. OITA, A. MALIK, K. KANEMOTO, A. GESCHKE, S. NISHIJIMA, and M. LENZEN : The ISIE (International Society for Industrial Ecology) Conference, Guildford, UK, 2015. "Construction of global nitrogen footprint model"

7. 研究者略歴

課題代表者：宮下 直

東京大学大学院農学系研究科修士課程修了、博士（農学）、現在、東京大学大学院農学生命科学研究科教授

## 研究分担者

- 1) 池田 浩明  
東京農工大学大学院連合農学研究科博士課程修了、農業環境技術研究所研究員、現在、農業環境技術研究所上席研究員
- 2) 竹中 明夫  
東京大学大学院理学系研究科卒業、理学博士、現在、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 上級主席研究員／生物多様性評価・予測研究室室長／生物多様性研究プログラム総括
- 3) 巖佐 庸  
京都大学大学院理学研究科博士課程修了、理学博士、現在、九州大学大学院理学研究院教授／九州大学高等研究院長
- 4) 湯本 貴和  
京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了、理学博士、現在、京都大学霊長類研究所社会生態部門生態保全分野（副所長）
- 5) 金子 信博  
京都大学大学院農学研究科修士課程修了、農学博士、現在、横浜国立大学大学院環境情報研究院教授

## 1. 生物多様性評価予測モデルの開発・適用と自然共生社会への政策提言

### (1) モザイク景観における生物多様性総合評価と保全への政策提言

東京大学大学院

農学生命科学研究科 生圏システム学専攻 宮下 直

<研究協力者>

東京大学大学院

農学生命科学研究科 生圏システム学専攻 大久保 悟（平成23～24年度）・赤坂 宗光・  
山北 剛久・直江 将司・  
郡 麻里（平成24～26年度）・  
松葉 史紗子（平成26～27年度）・  
鈴木 真理子（平成26年度）・  
笠田 実（平成27年度）

The University of Cambridge

天野 達也

平成23～27年度累計予算額：69,993千円（うち平成27年度：12,801千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

モザイク景観を含む複合生態系における生物多様性との応答関係は、十分に評価されていない。日本全国の陸域生物（鳥類、蝶類、両生類）、沿岸生物の分布データを用いて、予測モデルを構築し、将来の気候変動による影響評価を行うとともに、ホットスポットならびに保全優先地の特定を行った。また、アジア・グローバルスケールでは、モザイク景観の成立過程を踏まえた、生物多様性との応答関係を明らかにした。

陸域生物を対象とした保全優先地の特定では、まず鳥類について、分布推定に基づいた多様性マップ作成および相補性解析から、保全優先地の候補地と保護区とのギャップは、モザイク景観を有した平野部に集中し、農地性や草地性の希少種の生息地であることが明らかとなった。将来予測では、3つの分類群すべてで、将来の危急種が増加すると予測された。蝶類では、本州以南では高標高地域に分布が集中するものの、北海道では保護区周辺の低標高地域にも種数の多い場所が残っており、気候変動下での生物多様性保全には、民間保護地域を含む保護地域の拡充が望まれる。

沿岸域での評価では、アマモ場の分布予測から、水温といった海域由来の要因だけでなく、海岸線長といった陸域由来の要因が影響していることがわかり、異なる生態系が複合的に多様性損失の駆動因になりうることを示した。また、将来の気候変動によって、底生生物は北上する種が多く、種数の多い地域が拡大していくと予測された。一方藻類では、種数の多い地域の北上に合わせて、温帯域の南側では生息適地が狭まることが予測された。

グローバルスケールにおけるモザイク景観と生物多様性の関係は、全球的に正の影響を示して

いるものの、歴史的に森林率や草地率が高い地域では、モザイク景観が負の影響を示すことも明らかとなった。モザイク景観と生物との応答には地域性があり、モザイク景観の多様性への正の効果の一般性に警鐘を鳴らすとともに、地域ごとに異なる保全施策が推進されることが望まれる。

## [キーワード]

複合生態系、保護区選定、ギャップ分析、気候変動、将来予測

### 1. はじめに

里山景観に代表されるような水田、耕作地、森林などからなるモザイク景観は、日本を含むモンスーンアジアで広くみられる景観である。モザイク景観は、それぞれの生態系が生物相を育むとともに、異質な景観の組み合わせそのものが生物生息空間を提供しているともされ、モザイク景観の生物多様性に果たす役割に注目が集まっている。しかしながら、モザイク景観と呼ばれるような異質な環境の広がりには、必ずしも生物多様性に対して正に寄与するとは限らず、その成立機構の違いに応じて、生物相とどのように関係しているのかを解明することは喫緊の課題である。同様に、沿岸域や陸水域といった複合生態系においては、生物多様性損失の駆動因が複数の生態系に由来しており、そのメカニズムの解明が急がれる。

また、第10回生物多様性条約締約国会議（COP10）の愛知ターゲットでは、陸域の17%、海域の10%を保護区とすることが目標として掲げられている。保護区の拡充が望まれるなか、どこを優先的に保全すべきなのかは、明らかとなっていない。日本においてモザイク景観が農地性・草地性種の保全に重要であることは定性的に知られてはいるものの、新たな保全優先地の選定に際しては、科学的根拠に立脚した保全策の提案が急務である。

### 2. 研究開発目的

本課題では、陸域生物（鳥類、蝶類、両生類）および水生植物と沿岸生物を指標に予測モデルを構築し、モザイク景観を含む土地利用が生物多様性に与える影響の評価と、水生植物と沿岸生物については、陸域生態系の変動が沿岸域の生物多様性に与える影響の評価を行う。また、構築したモデルを将来シナリオに適用することで、将来の気候変動による生物多様性への影響を評価する。その結果をもとに、望ましい保護区のあり方を提案するとともに、モザイク景観を含む複合生態系の管理のあるべき姿を提案する。さらに、アジア・グローバルスケールでモザイク景観がどのように分布しているのか、その成立機構に着目し、モザイク景観と生物多様性の関係の一般性を検証することを目的とする。

### 3. 研究開発方法

#### （1）陸域の評価

鳥類、蝶類、両生類について、環境省自然環境保全基礎調査の在データを用いて（鳥類は二次メッシュ、蝶類と両生類は三次メッシュ）、種ごとにMaxEntによる分布推定を行ない、国土スケールの多様性マップを作成した。鳥類の分布推定では、年平均気温、年間降水量、標高のレンジ、森林率、水田率、農地率、草地率、市街地率、開放水域・湿地率、自然林率、Simpsonの景観多様度指数を説明変数に用いた。蝶類の分布推定では、年平均気温、年間降水量、平均標高、落葉広

葉樹林率、常緑広葉樹林率、常緑針葉樹林率、その他森林率、草地率(人工草地を除く)、農地率、開放水域および湿地率、水田率、Simpsonの景観多様度指数を説明変数に用いた。両生類では、年平均気温、年間降水量、寒期の降水量、平均標高、最大傾斜、落葉広葉樹林率、常緑広葉樹林率、常緑針葉樹林率、その他森林率、河川長、水田率を説明変数に用いた。多様性マップは、MaxEntで得られた各種の存在確率を、閾値により在不在に変換した各種の分布マップを、全種で重ねあわせたものとした。さらに、鳥類については愛知ターゲット 11（陸域17%を保全）に基づいて保全の優先順位が高い場所を相補性解析で抽出し、保護区とのギャップを明らかにした。

蝶類、鳥類、両生類について、MaxEntを用いて構築した分布モデルを用いて、種ごとの分布の将来予測を行ない、将来生息が危ぶまれる種及び当該種が分布する将来のホットスポット(種多様性の高い地域)を明らかにした。将来予測で使用したシナリオは、IPCC第5次報告書に対応したCMIP5より3つの排出シナリオ(RCP 2.6(低排出), RCP 4.5(中排出), RCP 8.5(高排出))を想定した。使用した気候値は、IPCCによる予測値を二次メッシュと三次メッシュに統計的ダウンスケーリングした値(S8で農業環境技術研究所が作成)で、気候モデルは4つ(MIROC5, MRI-CGCM3, GFDL-CM3, HadGEM2-ES)の平均値を用いた。予測期間は2020年、2050年、2080年とした。分散シナリオは、移動性が低い両生類は非分散シナリオのみを想定し、蝶類と鳥類は非分散シナリオに加えて、蝶類は年5kmの移動を許容する部分的分散シナリオ、鳥類は分散無制限シナリオを想定して予測を行った。土地利用については、将来シナリオに基づいた全国スケールでの予測値が未整備のため、現在の土地利用に関する情報を用いて、気候変動のみによる分布変化を予測した。

将来のホットスポットは、将来生息が危ぶまれる種(将来の危急種)の分布マップを重ねあわせたものとし、分類群ごとに作成した。将来の危急種は、RCP 8.5シナリオ・非分散シナリオ下で、2080年に環境省レッドリスト絶滅危惧Ⅱ類の選定基準である分布面積20,000km<sup>2</sup>を下回る種とした。

また蝶類を対象に、将来のホットスポットと現在の保護区との重複度合いの変化を調べ、将来の気候変動を踏まえた望ましい保全地域のあり方を提案する。なお現在の保護区には、国立公園、国定公園、国及び都道府県指定原生自然環境保全地域、国及び都道府県指定鳥獣保護区、都道府県立自然公園、森林生態系保護地域、世界遺産、MAB、ラムサール条約湿地が含まれている。

## (2) 陸水域の評価

陸水生態系における種多様性を国土スケールで保全する際に対処すべき要因を明らかにするため、絶滅危惧水生植物の個体数の変化および駆動因としての土地利用の変化のデータを整備した。具体的には全国の二次メッシュを分析単位とし、約85種の絶滅危惧水生植物の株数と土地利用の変化についてのデータセットを構築した。絶滅危惧水生植物の株数の変化は1994年-1995年と2005年-2006年に記録された情報から約10年の変化を扱った。土地利用の変化については100m解像度の土地被覆情報が得られる国土数値情報を元データとし、最もデータ年の近い1997年から2009年までの変化量を算出し、直近の土地利用の変化として扱った。さらに土地利用変化の影響が時間的な遅れを伴って水生植物の個体数の変化に影響する可能性を考慮し、およそ10-20年前に当たる1987年から1997年の間の土地利用の変化を二次メッシュごとに集約した。これらの整備された情報を用いて、絶滅危惧植物の減少の駆動要因を推定するために、二次メッシュ単位で記録されている約85種の絶滅危惧水生植物の株数の変化と土地利用の変化の関係を記述するモデルを検討した。評価対象地域は日本全土とした。モデルの構築にあたっては、土地利用変化の影響が時間的

な遅れを伴って水生植物の株数の変化に影響する可能性を考慮した他、絶滅危惧水生植物の種による応答の違いを考慮するために階層ベイズモデルを採用した。次に優先的に保全が望まれる区域の分布を地図化した。さらに、国立公園が、土地利用変化を抑制することで、水生植物の保全に寄与しているかを検証するために、二次メッシュを、国立公園区域内については、国立公園の外縁を含まない区域（国立公園中心区域）、外縁を含む区域（国立公園境界区域）、国立公園区域外については、国立公園境界区域に接する区域（国立公園外周辺区域）、それ以外の区域（国立公園外区域）に区分し、絶滅危惧水生植物の分布と既存の国立公園の分布の重複割合を求めた。

### （3）アジア・グローバルスケールの評価

23年度には、国内スケールにおける景観異質性と鳥類種数分布との関係を解析した。対象は日本、台湾、中国、インドネシアとし、各地域で得られる鳥類分布調査データ及び環境（土地利用、気候、地形）データの整理を行った。その後まず日本を対象に、景観の異質性と鳥類の種数・個体数の関係をモデル化し、台湾、中国のデータを用いても予備解析を行った。景観の異質性は、粗い異質性の指標として森林率を、細かな異質性の指標として7種類の土地利用に基づくシンプソンの多様度指数を用いて表した。各調査地から異なるサイズのバッファを発生させて、その中で集計した各土地利用面積や景観異質性の指標を解析で利用し、異なるバッファサイズ間で全ての変数を用いたフルモデルのAICを比較することで最適なバッファサイズを決定した。最適なバッファサイズで集計した変数を対象として、改めてAICを用いたモデル選択を行い、鳥類の種数や個体数に影響を及ぼす変数について考察を行った。

24年度には、アジアスケールで地域の種プールおよび現在の局所種数に影響を及ぼすプロセス要因を検討し、景観異質性が生物多様性を高める環境条件を抽出する評価モデルの検討・確定を行った。さらに、両生類、鳥類、哺乳類の総種数およびIUCNレッドリスト種数のデータ<sup>1)</sup>、さらに環境データを入手し、実際の評価に向けたデータ整備を行った。

25年度には、アジアスケール（東アジア、東南アジア及びロシア東部）で景観異質性が生物多様性にとって重要な地域を抽出するため、まず生物多様性の指標として、鳥類、哺乳類、両生類の総種数及びIUCNレッドリスト種数を用いた解析を行った。これらの種数データはSandelら<sup>2)</sup>が既存のデータ<sup>13)</sup>を基に0.25°グリッドセルで整備したものである。一方、景観異質性を表す指標として、土地利用13区分の各0.25°グリッドセルにおける面積から算出したシンプソンの多様度指数を用いた。また、その他の生物多様性に影響を及ぼす要因として、年間降水量、年平均気温、NDVI、蒸発散量、標高レンジ、森林面積、農地面積、最終氷期最盛期における年間降水量及び年平均気温、現在と最終氷期最盛期の年間降水量及び年平均気温の差（降水量変化、気温変化）、を同様に0.25°グリッドセル単位で準備した。解析には空間自己相関を考慮するためにCAR model (conditional autoregressive model)を用いた。

26年度には、アジアスケールを対象に前年度の解析を発展させ、0.25°グリッドセルを単位とした鳥類、哺乳類、両生類の総種数及びIUCNレッドリスト種数と景観異質性の関係が、現在と過去の土地利用によってどのような影響を受けるかを、CAR modelで解析した。また新たに最終氷期最盛期の森林率、1800年台の森林率、農地率、草地率を準備した。

27年度には、前年度に行った解析をグローバルスケールに拡張し、1°グリッドセルを単位とした鳥類、哺乳類、両生類の総種数及びIUCNレッドリスト種数と景観異質性の関係が、現在と過去

の土地利用によってどのような影響を受けるかを、CAR modelを用いた解析によって検証した。環境変数として、各グリッドセルにおける平均気温、年間降水量、標高レンジ、現在の森林率、現在の農地率、最終氷期最盛期（LGM）の森林率、1800年台（0K）の森林率、1800年台（HYDE）の農地率、1800年台（HYDE）の草地率を準備した。

#### （４）沿岸域の評価

沿岸域については、まず全国の各流域を単位として、河口から一定距離の沿岸の環境要因と流域全体の陸域の環境要因双方の整備を実施した。整備された環境変数を用いてガラモ場とアマモ場の三次メッシュ上の分布を河口からの距離バッファーによって集計した値（つまり分布グリッド数）について非線形性を考慮した一般化加法モデルによって推定することを試みた。また、陸域の変化を考慮した将来の予測を可能にするため、陸の土地利用変化の仮のシナリオを適用して、得られる藻場の分布推定値の変化の妥当性について検討した。

事業の2年度目からは、沿岸域においては、テーマ5に提供するデータ整備と解析手法の検討を行い、特に日本全国について1度メッシュの解像度で、在データのみの生物データと環境変数とを対応させた解析を行った。その際、これまでにはできなかった分布地点数の少ないアマモ以外の海藻類を含む海草を含め、Maxentによる分布ポテンシャル推定を実施した。

次にこれまでよりも解像度の高い5kmメッシュで沿岸生物の分布推定を行った。テーマ1では沿岸の海草（テーマ5サブテーマ4との共同）、干潟の底生生物の分布を担当した。まず、これまで広域の解析で用いた値を内挿して環境変数を作成し、5kmメッシュのデータセットを作成した。そして、Maxentを用いて環境と生物分布との関係を示した。結果は、既存の保護区の他に、漁業権区域、港湾区域のポリゴンデータを作成して重ね合わせて、その一致性を視覚的に検討した。

さらに温暖化による将来予測を含めた検討を行った。特に本サブテーマではテーマ4では扱えなかった干潟の底生生物および、藻類の潜在種数の空間分布について実施した。分布推定に用いた生物データは生物多様性情報システム上の自然環境保全基礎調査の干潟のベントス種、藻類644種データのうち10サイト以上で出現したものを利用し（中央値はベントス・藻場それぞれ32、15サイト）、環境変数は海岸線長、陸・自然海岸からの距離、潮汐レンジ、水深、波高、無機物粒子量、クロロフィルa量を用いた。また現在・将来の海水温についてはMIROC HiからRCP8.5のシナリオによる海水温をオフセットして用いた。これらの環境データは間引きをせずにMaxentにモデルのバックグラウンドとして使用した。潜在分布域か否かの閾値は、Maxentによって推定された0から1の値に対して、トレーニングの感度の最大値とspecificityのロジスティック値を用いた。

最後にアジア海域での分布推定の実現可能性についても、テーマ5と共同で検討しその予備的な解析とデータの一部の作成を実施した。特に解像度を1度グリッド単位にした環境変数の作成を行ない、現在、将来の水温データをはじめとする環境データを海域のサブテーマに提供した。また、テーマ1では海岸線の複雑性と景観多様性との相関を解析した。

## 4. 結果及び考察

### （１）陸域の評価

鳥類97種、蝶類77種、両生類21種について分布推定モデルを構築できた。鳥類と蝶類では、中部地方から東北の特に山地にかけて種数が多くなる一方、両生類では中部西部から日本海側にか

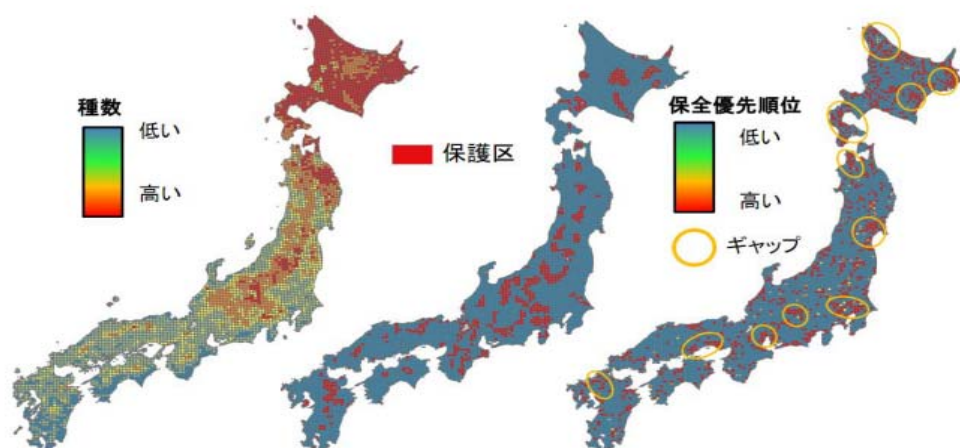


けて種数が多くなり、分類群間でホットスポットの地域差があることが明らかになった（図(1-1)）。



図(1-1) 鳥類の多様性マップ(左)、蝶類の多様性マップ(中)、両生類の多様性マップ(右)  
緑色が濃いところで種数が多い。

また、愛知ターゲット11（陸域17%を保全）に基づいて保全の優先順位が高い場所を相補性解析で抽出したところ、保護区に比ベメッシュ内の森林率が低い場所、またモザイク景観の指標である土地利用の多様度が高い場所が選ばれた。そのような場所の多くは関東平野のような平野部に集中し（図(1-2)）、農地性や草地性の希少種が多く分布していた。このことから、草地性や農地性の鳥類を守るうえでは、平野部において保護区拡充を考える必要があることが示唆された。



図(1-2) 鳥類の種数の分布(左)、保護区の分布(中)、保護区候補地と保護区とのギャップの分布(右)  
右図において、特に大きなギャップは黄色の円で囲っている。

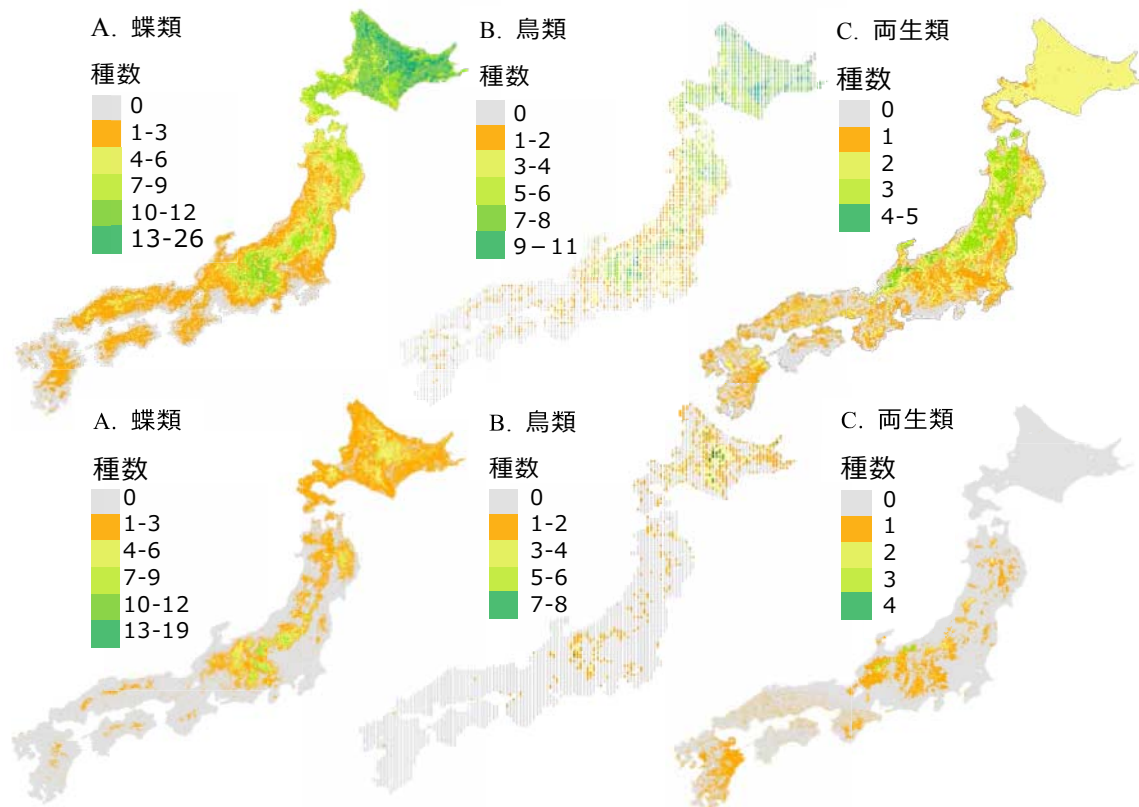
将来予測の結果から、蝶類では、環境省レッドリスト種（絶滅危惧Ⅱ類の以上、島嶼種を除く）は現在の31種から2080年には44種に増えると予測された（RCP 8.5シナリオ・非分散シナリオの場合）。これら将来の危急種のホットスポットは、現在よりも高標高地域に集中していくと予測され、とくに本州以南でその傾向が顕著であった（図(1-3-A)）。同様のシナリオを想定した場合、鳥類では、レッドリスト種に新たに15種が追加されると予測され、ホットスポットは北海道の大雪山系、日本アルプス周辺など、蝶類同様、高標高地域に多くなった（図(1-3-B)）。両生類では、現在のレッドリスト掲載種8種から2080年には14種に増加し、ホットスポットは本州の高標高地域に加え、北陸に広がる傾向が予測された（図(1-3-C)）。将来のホットスポットを分類群間で比較

すると、いずれの分類群でも中部から東北の山地で種数が多くなるが、両生類では北陸で種数が多く、分類群間でホットスポットのギャップが生じていることが明らかになった(図(1)-3)。

また、現在のレッドリスト記載種を対象に、分布面積がどのくらい減少するのかをみたところ、蝶類では、最も楽観的なシナリオ(RCP 2.6/分散あり)では、現在の分布から20%の減少にとどまるものの、最悪シナリオ(RCP 8.5/分散なし)では、60%の減少が予測された(図(1)-5-A)。鳥類では、最も楽観的なシナリオ(RCP 2.6/分散あり)では、現在の分布から20%の減少であるに対して、最悪シナリオ(RCP 8.5/分散なし)では、75%の減少になることが予測された(図(1)-5-B)。両生類では、最も楽観的なシナリオ(RCP 2.6/分散なし)では、現在の分布から40%の減少であるのに対して、最悪シナリオ(RCP 8.5/分散なし)では、現在の分布から80%の減少が予測された(図(1)-5-C)。

現在の保護区と将来のホットスポットとの重複割合の変化について、蝶類を対象にみると、重複割合は将来にかけて増加していくことが予測され、とりわけ本州でその傾向が顕著であることがわかった(将来生息が危ぶまれる種が5種以上分布する場所との重複割合は、北海道で現在の9%から2080年には28%、同様に本州以南では17%から53%に増加すると予測された(図(1)-6)。

保護区とホットスポットとの重複場所をみると、現在の保護区は高標高地域で、森林域に集中しているため(図(1)-4)、現在の保護区では、北海道の大雪山山系、本州の日本アルプス周辺で予測された蝶類と鳥類の将来のホットスポットは、概ねカバーできている。一方で、北海道の低標高地域における蝶類のホットスポット、北陸や九州での両生類のホットスポットについては、民間保護地域を含めた保全地域の拡充が必要となるだろう(図(1)-3、図(1)-4)。



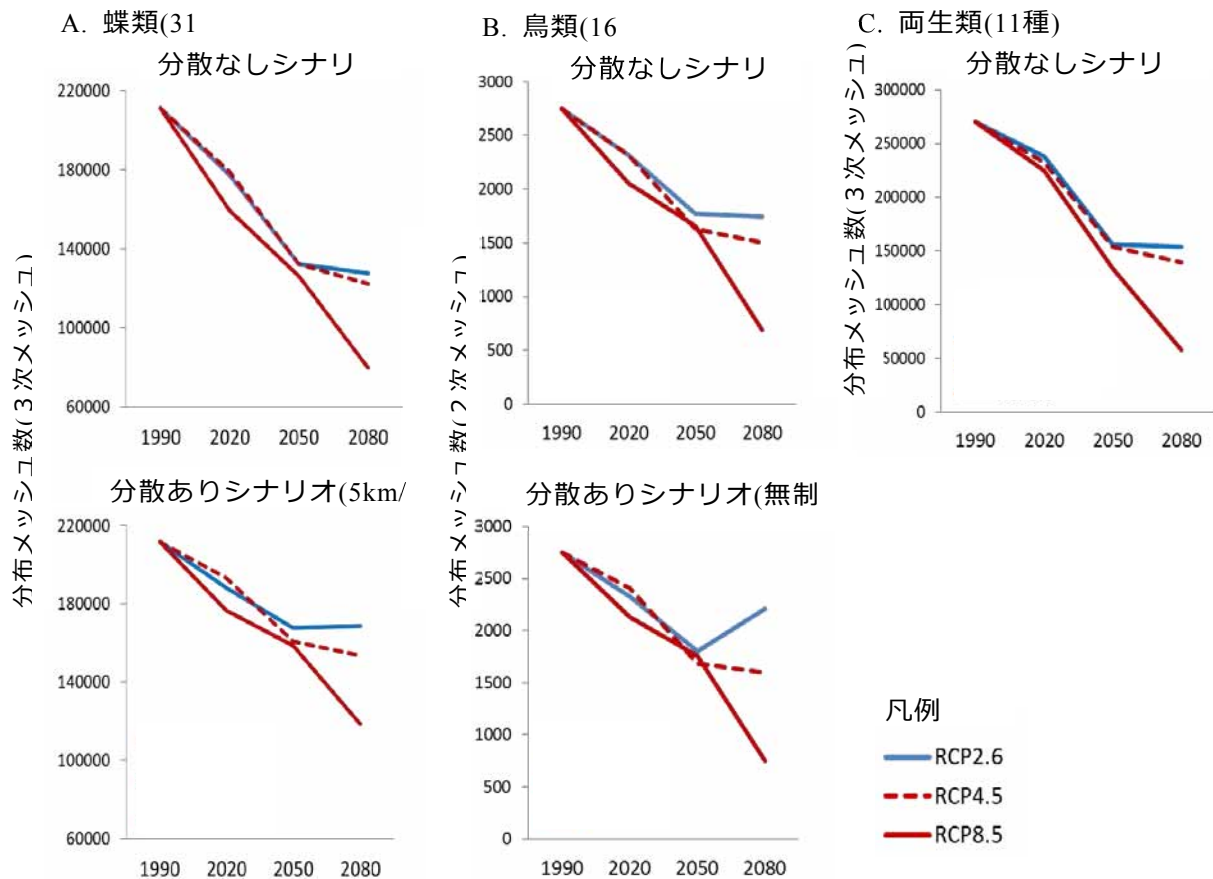
図(1)-3 蝶類(A)、鳥類(B)、両生類(C)の現在(上段)と将来(下段)のホットスポットマップ(RCP8.5/非分散シナリオ)

緑色が濃いところで種数が多い。

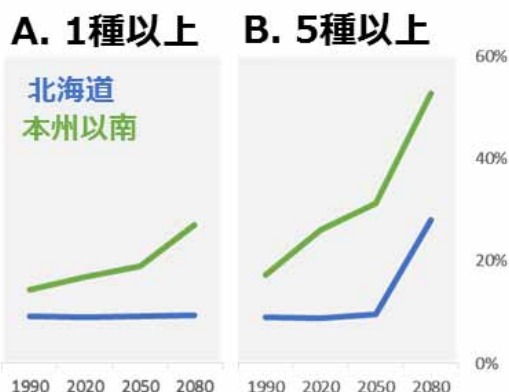


図(1)-4 現在の保護区の分布

国立公園、国定公園、国及び都道府県指定原生自然環境保全地域、国及び都道府県指定鳥獣保護区、都道府県立自然公園、森林生態系保護地域、世界遺産、MAB、ラムサール条約湿地を含む保護地域。



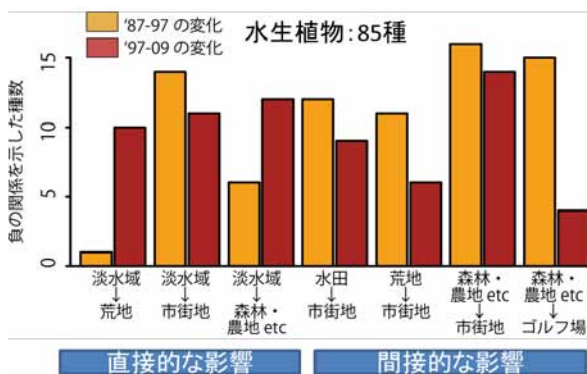
図(1)-5 最新版(2012年)のレッドリスト掲載種が1種でも分布するメッシュ数の経年変化  
蝶類(A)、鳥類(B)、両生類(C)について、分散シナリオごとに示す。ただし、鳥類については、分布推定モデルが構築できたレッドリスト種が僅かだったため(5種)、将来生息が危ぶまれる種(RCP 8.5/分散なしシナリオで、2080年に絶滅危惧Ⅱ類の選定基準を下回る種)を対象とした。



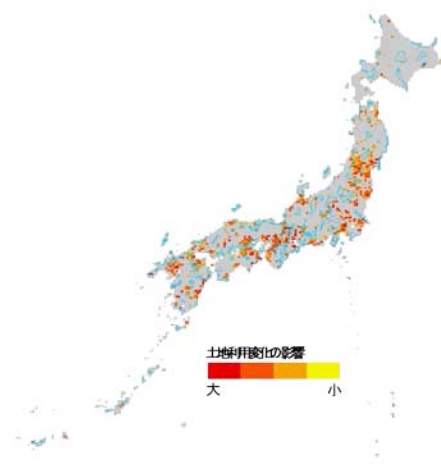
図(1)-6 ホットスポットと現在の保護区との重複割合  
 将来生息が危ぶまれる種が1種以上含まれる地点(A)、5種以上含まれる地点(B)について、現在から将来(RCP 8.5/分散ありシナリオ)にかけての保護区との重複割合を北海道と本州以南それぞれで算出した結果を示す。

(2) 陸水域の評価

全国スケールで陸水域の水生植物に注目し、その多様性と駆動因としての土地利用の関係をモデル化したところ、対象とした85種のうち48種において何らかの負の影響が検出された。生育地となりうる淡水域の改変（直接的な生息地改変）は、10-20年前の改変よりも直近10年間の改変の方が負の影響を受けた種が多かった。一方、水質の変化等をもたらす淡水域の改変以外の土地利用変化（間接的な影響）は、直近10年間よりも10-20年前の改変から負の影響を受けた種が多かった(図(1)-7)。種による応答の違いを決める形質を解析したところ、最近の土地利用変化に対する種の応答の違いを説明する変数としては、生育型と併せて、寿命つまり一年生かどうかを選ばれたが、過去10-20年前の土地利用変化に対しての種による応答の違いを説明する形質としては、生育型のみが選ばれた。得られたモデルに基づき、各二次メッシュにおいて生育する絶滅危惧水生植物の株数が土地利用変化により影響を受けている程度を評価したところ、特に影響が顕著な区域が集中している範囲が全国的に見られた(図(1)-8)。対象とした水生植物が生育した797メッシュのうち、国立公園を含んでいたのは、37.9%(302メッシュ)であり、この割合は、国土面積に対する本解析における国立公園の割合37.1%(1762/4744メッシュ)と同等であった。次に図(1)-8にしめした土地利用変化による影響の程度を、国立公園内外の4区域で比較すると、国立公園中心区域では、殆どその影響が見られなかったが、残りの3区域については、国立公園外区域でやや影響が大きい傾向が見られたものの、統計的な違いは見られなかった。これらのことから、国立公園内であっても、外縁から十分に離れた区域以外においては、絶滅危惧水生植物の保全するためには、土地利用の変化の抑制を検討する必要があることが示唆された。



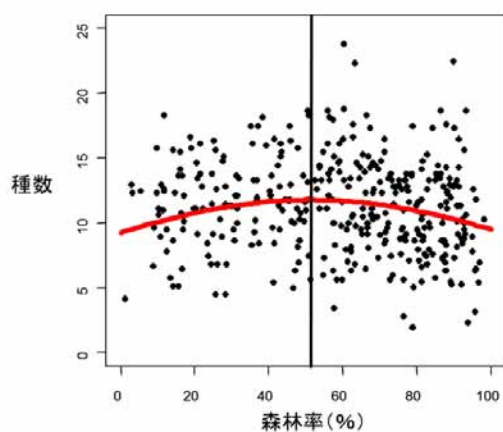
図(1)-7 土地利用の変化により株数が減少した水生植物の種数



図(1)-8 水生植物の株数減少に対する土地利用の影響の程度の空間的分布  
青線は国立公園の境界を示す。

### (3) アジア・グローバルスケールの評価

日本について、景観の異質性（主に森林・農地を中心とした景観組成の異質性）と鳥類種数の関係をモデル化した結果、最適バッファサイズは10kmの範囲と特定され、特にこの空間スケールで森林率と種数が凸型の関係を示していただいた（図(1)-9）。このことから、日本全国スケールで景観の異質性が鳥類の種数に正の影響を与えていることが示唆された。また、国内を亜寒帯・亜高山針葉樹林帯、冷温帯落葉広葉樹林帯、暖温帯常緑広葉樹林帯の三つのバイオームに区分し、各バイオームで同様の解析を行ったところ、シンプソンの多様度指数が亜寒帯・亜高山針葉樹林帯では負、他二つのバイオームでは正と、それぞれ異なる影響を及ぼしていた。さらに台湾・中国の鳥類を対象にした予備的な解析から、地理的に異なる種プールが結果台湾・中国においても景観の異質性が鳥類の種多様性に正の影響を及ぼしていることが示唆された。



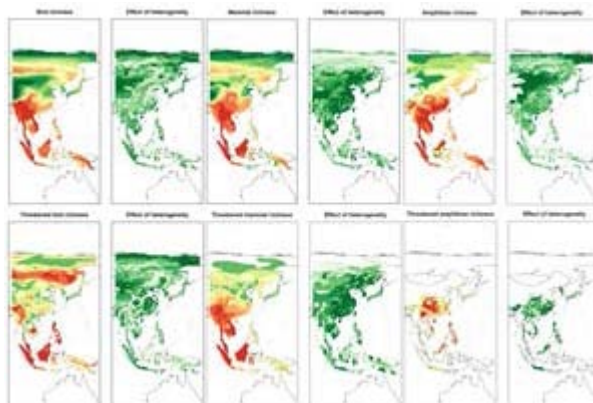
図(1)-9 10km空間スケールでの森林率（粗い景観異質性の指標）と鳥類多様性決定要因としての普遍性種数の関係  
実線はAICに基づいたベストモデルによる回帰曲線を示す。

アジアスケールでの解析の結果、鳥類、哺乳類、両生類の総種数及びIUCNレッドリスト種数全てにおいて、景観異質性（土地利用のシンプソン多様度指数）が種数に対して正の影響を及ぼし



ていることが明らかになった。しかしながら景観異質性の影響は他の説明変数に比較して必ずしも強くなく、標準化された説明変数に対して推定された係数に基づく、鳥類と哺乳類の総種数では気温変化（負）と標高レンジ（正）、両生類の総種数では年間降水量（正）と気温変化（負）、鳥類のレッドリスト種数では年間降水量（正）、哺乳類と両生類のレッドリスト種数では気温変化（負）、がそれぞれ最も強い影響を及ぼしていた。景観異質性と他の変数の交互作用項の結果に基づく、年間降水量の多い地域ほど（鳥類及び哺乳類の総種数、哺乳類のレッドリスト種数）、また気温変化が大きい地域ほど（鳥類・哺乳類・両生類の総種数及び両生類のレッドリスト種数）景観異質性の正の効果が高くなる、という傾向が見られた。

しかしながら交互作用項の結果に基づく、過去や現在の土地利用によって景観異質性の種数に対する影響は異なっており、1800年台の森林率や草地率が低いほど（鳥類総種数、哺乳類希少種数）、1800年台の農地率が高いほど（鳥類及び哺乳類の希少種数）、また現在の森林率が低いほど（鳥類及び両生類の総種数、鳥類の希少種数）、現在の農地率が高いほど（哺乳類の全種数）景観異質性の正の効果が高くなる、という傾向が見られた。さらに得られたモデルの係数を用いて、各グリッドセルにおける景観異質性の種数に対する効果を地図化した結果、景観異質性が特に多くの種を維持していると考えられる地域として、中国南東部やベトナム及びカンボジアの一部などが抽出された(図(1)-10)。



図(1)-10 左図は種数、右図は生息地多様性の係数推定値  
濃い色ほど異質性の正の影響が高い。

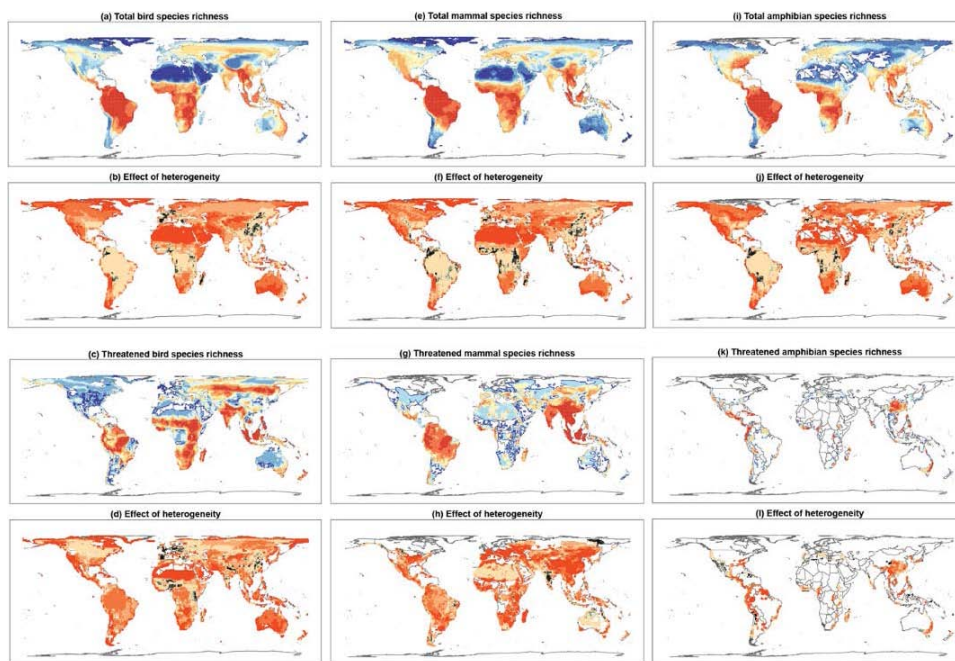
グローバルスケールの解析の結果、鳥類、哺乳類、両生類の総種数及びIUCNレッドリスト種全において、景観異質性（土地利用のシン普森多様度指数）は種数に対して正の影響を及ぼしていた（表(1)-1）。さらに交互作用項の結果に基づく、過去や現在の土地利用によって景観異質性の種数に対する影響は異なっており、最終氷期最盛期の森林率が低いほど（鳥類全種、哺乳類全種、両生類全種）、1800年台の森林率や草地率が低いほど（鳥類全種・IUCNレッドリスト種、哺乳類全種、両生類全種）、現在の農地率が高いほど（哺乳類全種・IUCNレッドリスト種、両生類全種）景観異質性の正の効果が高くなるという、事前の仮説を支持する結果が得られた。一方で、現在の森林率が高いほど（哺乳類全種）、最終氷期最盛期の森林率が高いほど（両生類IUCNレッドリスト種）、1800年台の農地率が低いほど（鳥類全種）、1800年台の草地率が高いほど（哺乳類IUCNレッドリスト種）景観異質性の正の効果が高くなるという、仮説とは逆の結果も一部分類群で得られた。さらに得られたモデルの係数を用いて、各グリッドセルにおける景観異質性の種

数に対する効果を地図化した。景観異質性は全球的に正の影響を示していたが、特に南部アフリカでは景観異質性の強い正の影響（歴史的な森林率の低さと現在農地率の高さが主たる要因）と総種数の高い地域が重複しており、景観異質性が多くの種を維持している可能性が明らかになった（図(1)-11）。一方で、南米・サブサハラアフリカ・大陸ヨーロッパの一部、中国南部、ジャワ島などでは景観異質性が負の影響を示しており（歴史的な森林率や草地率の高さが主たる要因）、これらの地域では均一景観の存在が種多様性の維持に重要である可能性が示された（図(1)-11）。

表(1)-1 鳥類、哺乳類、両生類の総種数及びIUCNレッドリスト種数に対して景観異質性が及ぼす効果と現在及び過去の土地利用との相互作用

+は有意な正の効果、-は有意な負の効果を示す。解析では他の環境要因も説明変数として考慮したが、この表では示していない。

	鳥類		哺乳類		両生類	
	全種	IUCN種	全種	IUCN種	全種	IUCN種
生息地多様性	+	+	+	+	+	+
x 現在森林率			+			
x LGM 森林率	-		-		-	+
x 1800年台森林率	-	-	-		-	
x 現在農地率			+	+	+	
x 1800年台農地率	-					
x 1800年台草地率	-	-	-	+	-	



図(1)-11 種数(上)と生息地多様性(景観異質性の指標)の係数推定値(下)  
赤い色ほど種数が多い。濃いオレンジほど正の影響が高く、黒は負の影響を示す。

#### (4) 沿岸域の評価

流域単位の解析の結果、広域のアマモ場の分布には、水質、水深、水温が影響しており、ガラモの分布は水温の影響を強く受けていた。また、アマモ場の分布予測に陸域の要因を入れた場合

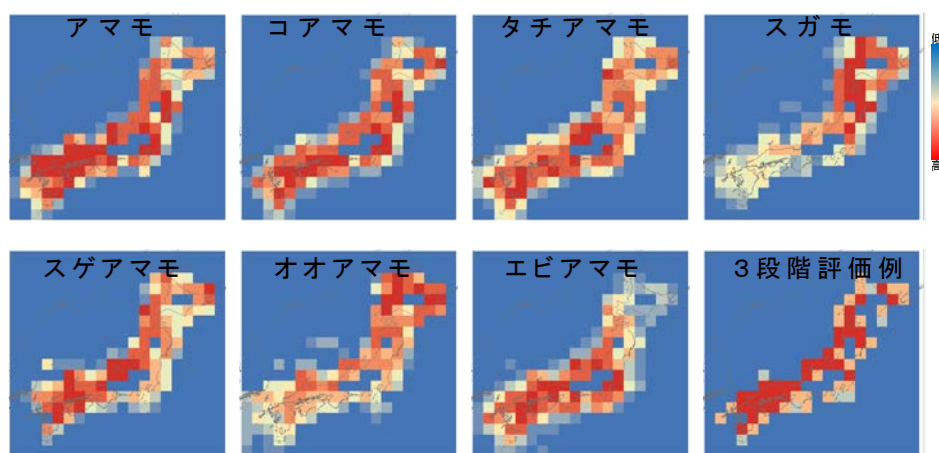


に、海域の要因のみの場合よりもモデルとデータの一致性が高まること小流域のモデルで確認された。大小2つの流域のモデルを平均した結果から予測される全国の藻場の分布よりも大流域だけのほうがモデルとデータの一致性が高くなり、モデルの解像度を評価が重要であった(図(1)-12)。



図(1)-12 異なる流域のサイズのモデルによるアマモ分布ポテンシャル  
左から小流域、大流域、平均を示す。

つぎに海草各種の分布推定を1度メッシュで実施した結果(図(1)-13)、種によって温度による分布の説明力が異なり、一般的な生理的特性と合致した。サンプル数が少ない種で分布の過大評価が見られたが、複数種の分布ポテンシャルの重ね合わせで種多様性の評価が可能か検討する素材がそろった。



図(1)-13 各種の分布ポテンシャル推定結果の例

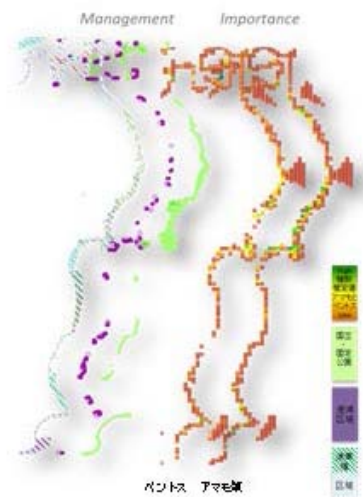
多くの種が一般的な分布範囲と一致したが、タチアマモなど推定に改善が必要な種も見られた。各種の加算による評価例も作成。

5kmメッシュでの沿岸生物の分布推定を実施した結果、海岸線長、表層水温、クロロフィルa量、水深、陸からの距離、藻場面積、濁度、波高、潮汐のレンジを用いて、沿岸の生物の分布と環境要因との関係について、Maxentによる分布推定を行った結果、アマモ類の分布には、水温、海岸線長が影響する種が多くみられた。

ベントス各種の分布には、海岸線長、濁度、陸からの距離、潮汐のレンジの寄与が大きかったが、アマモ場ほど明瞭ではなかった。今後、高解像度な沿岸の変数を利用することでより高い解

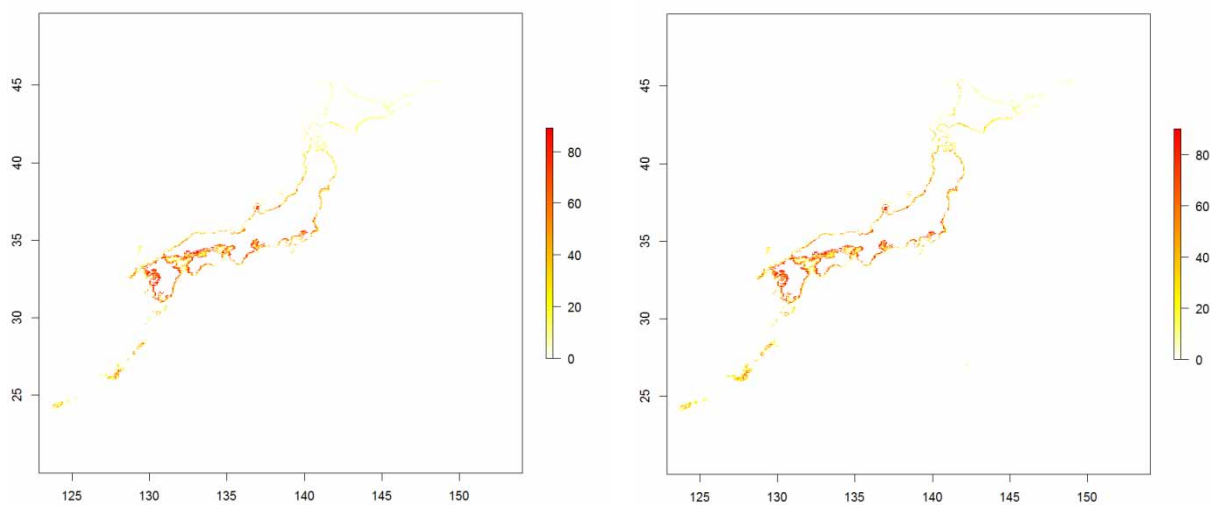
像度の予測が可能になると考えられた。

つぎに各種の閾値を0.5として推定した種数の推定結果を図(1)-14に示す。管理区域との視覚的な比較から仙台湾周辺で港湾など的人為的な攪乱との関係が懸念され、三陸の南部でアマモ類の多様性のポテンシャルが高く、国立・国定公園による保護区とも重複することが分かった。



図(1)-14 ベントスとアマモ場の分布推定結果を単純に足し合わせたものと、管理区分の重ね合わせ

温暖化による将来予測を含めた検討を行った結果、干潟の底生生物（ベントス）の潜在分布を推定について、現在の種数は西日本で最も高かった（図(1)-15）。また、温暖化により潜在分布域が北方へと増加する種が多く、潜在分布の総種数では種数多様性が高くなる予測となった。モデルのAUCは $0.89 \pm 0.05$ であり、最小値は0.75であった。今回扱ったデータの範囲で分布に影響した要因としては、水温が最も寄与しており、次いで、海岸線の複雑性や、潮位、自然海岸からの距離、濁度や植物プランクトン量などが寄与していた（表(1)-2）。



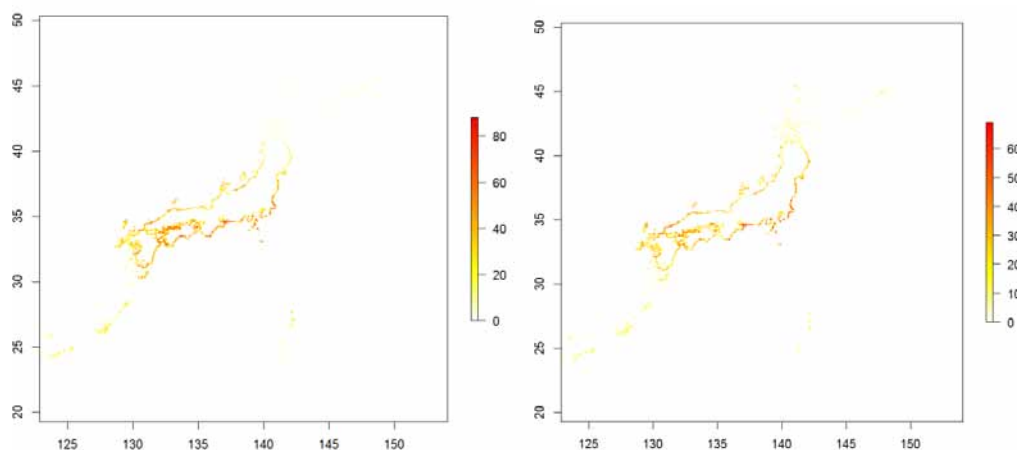
図(1)-15 干潟ベントスの潜在種数  
左図が現在気候、右図がRCP8.5の2050年の推定値。

表(1)-2 各変数の%寄与率の全種平均値

	植物プ ランク トン	水深	距離	海岸 線長	濁度	波高	潮位	表層 水温
平均値	12	3	14	17	12	3	15	24
標準偏差	11	8	12	13	11	3	10	14

増減したグリッド数から特にイボウミニナ・ホウシュノタマ・スナゴカイ・イワムシ・スジホシムシモドキ・ヨコヤアナジャコ・コメツキガニの生息可能な温度範囲が広がった。一方、シオフキ・アサリ・オオノガイツバサゴカイ・アナジャコについては生息可能な温度範囲の減少が予想された。

藻類については、AUCの低かった25種を除いた71種についての比較の結果、温帯域の種集が高い範囲が北上する点については干潟のベントスと同じであったが、鹿児島や紀伊半島など温帯域の南側では分布が不適になる推定が行われた（図(1)-16）。これは現在の環境で沖縄に分布する種数が少ない点と対応した予測結果である。今回扱ったデータの範囲で分布に影響した要因としては、水温が35%と高い割合で寄与しており、次いで、海岸線の複雑性や、植物プランクトン量であった（表(1)-3）。



図(1)-16 藻類の潜在種数

左図は現在気候、右図はRCP8.5の2050年の推定値。

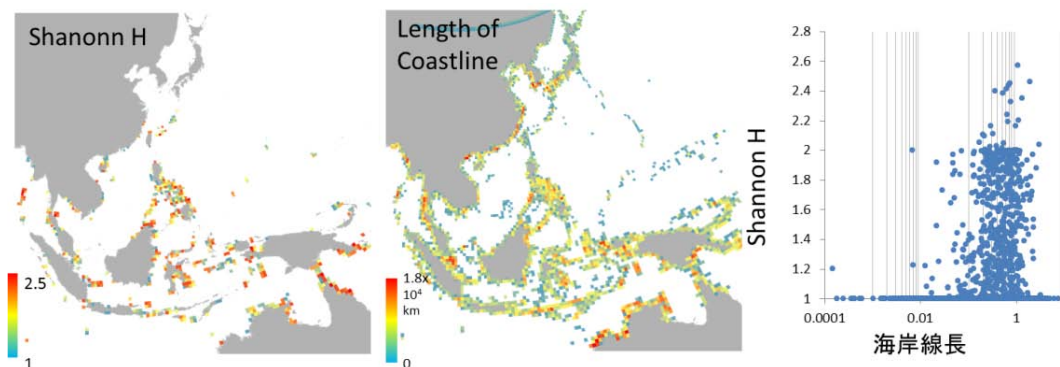
表(1)-3 各変数の%寄与率の全71種平均値

	植物プ ランク トン	水深	距離	海岸 線長	濁度	波高	潮位	表層 水温
平均値	13	5	2	22	6	8	9	35
標準偏差	10	6	2	13	9	6	6	12

ホソジュズモ、ハイミル、キッコウグサ、ボウアオノリ、ワカメ、カジメ、イバラノリ、フサノリなどで潜在分布域と推定されたグリッド数が多くなり、ウミウチワ、ヒジキ、ツルアラメ、

ヒメカニノテ、ピリヒバ、オバクサなどで潜在分布域の減少が多くみられた。

つぎにアジア海域での解析の検討のため、1度グリッド単位で整備した沿岸域の環境データを用いた解析の結果、アジア域における景観多様性の一部が海岸線の複雑性と関係している傾向が見られた(図(1)-17)。今後、文献情報の少ない海域で陸と海のモザイク性を用いた景観の分布推定の可能性が示された。



図(1)-17 アジア全域でのグリッドごとの海岸線長(陸と海のモザイク性の指標)と、アマモ場、マングローブ林、サンゴ礁の3つの景観の景観多様性(モザイク性)との関係性

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

- 1) 異なる分類群について、分布推定モデルに基づいた多様性マップを比較することで、鳥類、蝶類と両生類では、分類群間でホットスポットにギャップがあることが明らかとなり、この傾向は将来においても変わらないことがわかった。これは、単一の分類群を対象とした優先保全地域の選定では不十分であることを示唆し、指標種の選定に活用されることが期待される。また、将来予測の結果から、絶滅危惧Ⅱ類に分類される種数は、いずれの分類群でも増加すると予測され、国内において将来の気候変動による生物相への影響は看過できないことが示された。
- 2) 鳥類における相補性解析による保全優先地の選定結果や蝶類や鳥類の将来予測の結果から、保全の候補地と保護区とのギャップが平野部に多く広がり、草地性・農地性種の保全には平野部での保全地域の拡充が望まれることが示唆された。
- 3) 水生植物については、種多様性の変化と土地利用変化を関連付けるモデルを用いることで、種多様性の変化に寄与した土地利用変化について、定量的な評価を行った。国内の国立公園においても、外縁部付近では、土地利用の変化の抑制も検討する必要があることを示した。
- 4) アジア・グローバルスケールの評価では、日本国内の10kmバッファー内、アジアスケールの0.25°グリッドセル、グローバルスケールの1°グリッドセルという異なる解像度・空間スケールにおいて、景観異質性が鳥類、哺乳類、両生類といった幅広い分類群の種数と正の関係をもっていることを示した。一方で、一般に過去や現在の森林率や草地率が低く農地率が高いほど、景観異質性の効果が高くなることをアジア及びグローバルスケールで示した。これらの結果により、最終氷期以降のモザイク景観の存在や農業に基づく長期の人為攪乱が景観異質性を好む地域の種プールを決定し、その上で現在の景観異質性が現在の局所種数に正の影

響を与えるという仮説を支持することができた。さらにアジアスケールとグローバルスケールにおいて、種多様性の保全に景観多様性の維持が正の効果を持つ地域と負の効果を持つ地域を抽出した。

- 5) 沿岸域においても各種が土地利用や気候変動の影響を強く受ける可能性が示唆された。また、重要な海域の選定については異なる統合方法によって、重要な場所の選定結果が特に重要度が中程度の場所で大きく異なることを示した。最大値をとる方法が原理的には正しいが、場所間の差が小さくなるため、重みをつけるには相補性や主成分分析などのもっともらしい方法が提案された。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

環境省事業である重要里地里山選定にかかる会議（里地里山保全・活用検討会議）において、本研究成果である鳥類の保全上価値が高い里山の分布図を資料として提出しており、生物多様性の観点から重要な里地里山選定に貢献している（平成25年度第2検討会議の別添資料2「特有多様な野生動植物の生息・生育環境としての里地里山」に類の保全上価値が高い里山の分布図が採用されている）。また、環境省による生物多様性及び生態系サービスの総合評価報告書（JBO2）に対して、相補性解析による鳥類の保全優先地の分布図を成果として報告し、平野部を中心に広がる保護区とのギャップにおいて、保全地拡充の必要性を提言した。

沿岸域ではThe 3rd edition of the International Marine Protected Areas Congress に参加し、地球温暖化についてのKnowledge CafeやYouth grope において、分布推定や生物データの充実性の必要性を説明し各会合のまとめの文章に反映させた。また、IPBESの地域アセスメント、EBSAの地域ワークショップ、環境省の重要海域の選定、環境影響評価についての意見交換会に参加や情報提供をした。特に重要海域の選定においては、会議と並行して本推進費で統合方法を議論し、本課題で用いた方法のうち最大値の合計とMarxanによる方法が採用された。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

- 1) 陸域生物の将来予測の結果から、将来のホットスポットと重複している既存保護区では、保全管理施策をより一層強化する必要がある。一方、既存保護区外に予測されたホットスポットでは、生物多様性地域戦略や各種の公的支援策などを通して、民間保護地域を含む保全地域の拡充が望まれる。
- 2) 水生植物の解析結果から、国立公園内であっても、絶滅危惧水生植物の保全を検討する際には、周辺の土地利用変化の抑制が必要になることが示唆された。
- 3) アジアスケール及びグローバルスケールにおいて、種多様性の保全に景観多様性の維持が正の効果を持つ地域と負の効果を持つ地域を抽出することで、景観異質性と均一景観のどちらを維持すべきかという点について、地域ごとに異なる保全施策の実行を促進することが見込まれる。
- 4) 沿岸域に新たにおいて収集した情報は今後BISMaLに集約することとしており、データとして行政や研究における利用が促進される。

## 6. 国際共同研究等の状況

中国科学院水生生物研究所のJun Xu博士、英国Scottish Marine InstituteのJorge Garcia Molinos博士らと共同し、中国における淡水生物の保全に関する共同研究を実施し国際共著論文を二報公表し、現在も共同研究を継続している。

グローバルスケールにおける鳥類、哺乳類、両生類の種数データを取得するため、また土地利用データの整備についてアドバイスを受けるため、デンマーク・Aarhus UniversityのJens-Christian Svenning教授、Brody Sandel助教、イギリス・University of East AngliaのRichard Davies博士と共同研究を行った。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) T. YAMAKITA and M. NAKAOKA: *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 21, 177-173 (2011), Importance of considering grain and extent for the analysis on spatial dynamics: perspectives from comparison between theory and empirical example on seagrass bed dynamics in Tokyo Bay
- 2) T. ATOBE, Y. OSADA, H. TAKEDA, M. KUROE and T. MIYASHITA: *Proceedings of the Royal Society B*, 281, 20132621 (2014), Habitat connectivity and resident shared predators determine the impact of invasive bullfrogs on native frogs in farm ponds
- 3) T. YAMAKITA and T. MIYASHITA: *Asia-Pacific Biodiversity Observation Network: Integrative Observations and Assessments*, S. Nakano, T. Yahara, T. Nakashizuka (eds.), Springer (2014), Landscape mosaicism in the ocean: its significance for biodiversity patterns in benthic organisms and fish
- 4) T. MIYASHITA, M. YAMANAKA and M. H. TSUSTUI: *Social and ecological restoration in paddy dominated landscapes*, N. Usio, T. Miyashita (eds.), Springer (2014), Distribution and abundance of organisms in paddy-dominated landscapes with implications for wildlife-friendly farming
- 5) R. NAKAJIMA, T. KOMUKU, T. YAMAKITA, D. LINDSAY, Y. JINTSU-UCHIFUNE, H. WATANABE, K. TANAKA, Y. SHIRAYAMA, H. YAMAMOTO and K. FUJIKURA: *JAMSTEC Report of Research and Development*, 19, 59-66 (2014), A new method for estimating the area of the seafloor from oblique images taken by deep-sea submersible survey platforms
- 6) R. NAKAJIMA, T. YAMAKITA, H. WATANABE, K. FUJIKURA, K. TANAKA, H. YAMAMOTO and Y. SHIRAYAMA: *Diversity and Distributions*, 20, 10, 1140-1172 (2014), Species richness and community structure of benthic macrofauna and megafauna in the deep-sea chemosynthetic ecosystems around the Japanese Archipelago: an attempt to identify priority areas for conservation
- 7) N. KATAYAMA, T. AMANO, S. NAOE, T. YAMAKITA, I. KOMATSU, S. TAKAGAWA, N. SATO, M. UETA and T. MIYASHITA: *PLoS ONE*, 9, e93359 (2014), Heterogeneity–biodiversity relationship: effect of range size and conservation status
- 8) A. AKEBOSHI, S. TAKAGI, M. MURAKAMI, M. HASEGAWA and T. MIYASHITA: *Journal of Insect Conservation*, 19, 15-24 (2015), A forest–grassland boundary enhances patch quality for a grassland-dwelling butterfly as revealed by dispersal processes

- 9) S. NAOE, N. KATAYAMA, T. AMANO, M. AKASAKA, T. YAMAKITA, M. UETA, M. MATSUBA and T. MIYASHITA: *Journal for Nature Conservation*. 24, 101-108 (2015), Identifying priority areas for national-level conservation to achieve Aichi Target 11: A case study of using terrestrial birds breeding in Japan
- 10) 松葉史紗子、赤坂宗光、宮下直：保全生態学研究. 20, 35-47 (2015), Marxanによる効率的な保全計画：その原理と適用事例
- 11) J. XU, G. SU, Y. XIONG, M. AKASAKA, JG. MOLINOS, S. S. MATSUZAKI and M. ZHANG: *Global Ecology and Conservation*, 3, 288-296 (2015), Complimentary analysis of metacommunity nestedness and diversity partitioning highlights the need for a holistic conservation strategy for highland lake fish assemblages
- 12) G SU, J XU, M AKASAKA, JG. MOLINOS and S. S. MATSUZAKI: *Global Ecology and Conservation*, 4, 470-478 (2015) Human impacts on functional and taxonomic homogenization of plateau fish assemblages in Yunnan, China
- 13) T. YAMAKITA and T. MIYASHITA: Landscape mosaicism in the ocean: its significance for biodiversity patterns in benthic organisms and fish, S. Nakano, T. Yahara, and T. Nakashizuka (eds.), Springer (2015), *The biodiversity observation network in the Asia-Pacific Region: Integrative Observations and Assessments of Asian Biodiversity*
- 14) T. YAMAKITA, H. YAMAMOTO, M. NAKAOKA, H. YAMANO, K. FUJIKURA, K. HIDAKA, Y. HIROTA, T. ICHIKAWA, S. KAKEHI, T. KAMEDA, S. KITAJIMA, K. KOGURE, T. KOMATSU, N. H. KUMAGAI, H. MIYAMOTO, K. MIYASHITA, H. MORIMOTO, R. NAKAJIMA, S. NISHIDA, K. NISHIGUCHI, S. SAKAMOTO, M. SANO, K. SUDO, H. SUGISAKI, K. TADOKORO, K. TANAKA, Y. UCHIFUNE-JINTSU, K. WATANABE, H. WATANABE, Y. YARA, N. YOTSUKURA and Y. SHIRAYAMA: *Marine Policy*, 51, 136-147 (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
- 15) T. MIYASHITA, T. AMANO and T. YAMAKITA: The biodiversity observation network in the Asia-Pacific Region: Integrative Observations and Assessments of Asian Biodiversity, S. Nakano, T. Yahara, and T. Nakashizuka (eds.), Springer, Effects of ecosystem diversity on species richness and ecosystem functioning and services: A general conceptualization (in press)
- 16) M. AKASAKA, A. TAKENAKA, F. ISHIHAMA, K. KADOYA, M. OGAWA, T. OSAWA, T. YAMAKITA, S. TAGANE, R. ISHII, S. NAGAI, H. TAKI, T. AKASAKA, O. OGUMA, T. SUZUKI and H. YAMANO: The biodiversity observation network in the Asia-Pacific Region: Integrative Observations and Assessments of Asian Biodiversity, S. Nakano, T. Yahara, T. Nakashizuka (eds.), Springer, Development of a national land use/cover dataset to estimate biodiversity and ecosystem services (in press)

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 宮下直、井鷲裕司、千葉聡（2012）生物多様性と生態学：遺伝子・種・生態系、朝倉書店
- 2) 宮下直（編集）、西廣淳（編集）. 保全生態学の挑戦—時間と空間のとらえ方—東京大学出



版会

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 宮下直（2015）生物多様性のしくみを解く：第6の大量絶滅の縁から、工作舎
- 2) 宮下直（2016）快読「生物多様性」：共生の未来が見えてくる、工作舎
- 3) 直江将司：全国繁殖分布調査ニュースレター，第3号(印刷中)「陸鳥の多様性を守るには農地・草地の保全が大事」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 山北剛久、堀正和、松岡好美、村岡大祐、島袋寛盛、吉田吾郎、玉置仁：2011年度日本ベントス学会・日本プランクトン学会 合同大会（2011）  
「画像による東日本大震災後の沿岸環境変化の検出～石巻市および三番瀬の事例から」
- 2) 山北剛久：2011年度日本ベントス学会・日本プランクトン学会 合同大会 若手の会（2011）  
「生物多様性条約第10回締約国会議の報告」
- 3) T. YAMAKITA, H. TAKI and K. OKABE : World Conference on Marine Biodiversity 2011, Aberdeen, Scotland, 2011  
“Single large vs. several small: Does basin size represent the impact of terrestrial inputs to aquatic vegetation on a nationwide scale”
- 4) T. YAMAKITA and T. MIYASHITA : Biodiversity in Changing Coastal Waters of Tropical and Subtropical Asia, Reihoku town, Japan, 2012  
“GIS database of coastal environment in East Asia and the geographical distribution of seascape mosaicism to advance landscape-biodiversity research”
- 5) 山北 剛久、仲岡 雅裕：第28回個体群生態学会大会（2012）  
「海草2種の動態における空間を介した相互作用」
- 6) 山北剛久：日本生態学会第59回大会（2012）  
「沿岸の生物多様性を説明する景観指標の検討：連続環境や変動環境をどう扱うか」
- 7) T. AMANO, N. KATAYAMA and T. MIYASHITA: International symposium on patterns and drivers of biodiversity at macro spatial scales: historical and contemporary effects, Tokyo, Japan, 2013  
“Effects of habitat heterogeneity on bird species at multiple spatial scales”
- 8) S. NAOE and T. MIYASHITA: International symposium on patterns and drivers of biodiversity at macro spatial scales: historical and contemporary effects, Tokyo, Japan, 2013  
“Exploring bird diversity hotspots by niche modeling and its use for gap analysis of protected areas”
- 9) 片山直樹、天野達也、山北剛久、小林功武、高川晋一、植田睦之、宮下直：日本生態学会第60回大会（2013）  
「国土規模の鳥類分布決定要因：景観の異質性が影響する時空間スケールの解明」
- 10) 直江将司、片山直樹、天野達也、宮下直：日本生態学会第60回大会（2013）  
「鳥類における景観異質性への応答の多様性と生態特性との関係」
- 11) 赤坂宗光、石濱史子、角谷拓、藤田卓：日本生態学会第60回大会（2013）  
「絶滅危惧植物の分布と保全区域とのギャップ：レッドリストランクに注目して」

- 12) M. KOHRI, S. NAOE and T. MIYASHITA: The 11th International Congress of Ecology, London, U.K., 2013  
 “Exploring bird diversity hotspots by niche modeling and its use for gap analysis of protected areas”
- 13) S. NAOE, M. AKASAKA, T. YAMAKITA and T. MIYASHITA: The First Asia Parks Congress, Sendai, Japan, 2013  
 “Identification of conservation priority areas considering prediction uncertainty for terrestrial birds in Japan”
- 14) 中嶋亮太、山北剛久、渡部裕美、藤倉克則、田中克彦、山本啓之、白山義久：2013年度プランクトンベントス学会合同大会(2013)  
 「日本周辺の深海化学合成生態系におけるマクロ・メガベントスの種数および群集構造：重要海域選定の試み」
- 15) 山北剛久、宮下直：2013年度日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会（2013）  
 「景観のモザイク性はベントスの多様性に影響するか？：レビューと事例」
- 16) T. YAMAKITA, N. KUMAGAI, H. MIYAMOTO, S. SAKAMOTO, H. YAMAMOTO, T. KOMATSU, S. NISIDA, K. KOGURE and H. KITAZATO: The First Asia Parks Congress, Sendai, Japan, 2013  
 “Species distribution models off the Tohoku area as a potential of recovery from tsunami impact.”
- 17) 直江将司、赤坂宗光、山北剛久、植田睦之、宮下直：日本生態学会第61回大会(2014)  
 「全国スケールでの陸生鳥類の相補性解析から明らかになったオープンランドの保全上の重要性」
- 18) 直江将司、赤坂宗光、山北剛久、植田睦之、宮下直：日本生態学会第61回大会(2014)  
 「全国スケールでの陸生鳥類の相補性解析から明らかになったオープンランドの保全上の重要性」
- 19) T. MIYASHITA: “International Symposium: Ecosystem Service and Landscape Structure”, GCOE program (Asian Conservation Ecology), Fukuoka, 2014  
 “High effectiveness of environmentally friendly farming on paddy-dwelling organisms in heterogeneous landscapes and its comparison with dry croplands”
- 20) T. MIYASHITA and M. TSUTSUI: “Workshop 2: Perspectives on Sustainable Agriculture in Monsoon Asia: Biodiversity-Friendly Farming and Landscape Management”, MARCO Symposium, Tsukuba, 2015  
 “Dual values for biodiversity conservation in agricultural landscapes.”
- 21) M. MATSUBA, M. SUZUKI and T. MIYASHITA: The 62nd Annual Meeting of the Ecological Society of Japan, Kagoshima, Japan, 2015  
 “Predicting future diversity and distributions of butterflies and amphibians under climate change in Japan.”
- 22) M. MATSUBA and T. MIYASHITA: The 27th International Congress for Conservation Biology/ 4th European Congress for Conservation Biology, Montpellier, France, 2015  
 “Forecasting future diversity and distributions of butterflies under climate change in Japan”
- 23) M. MATSUBA and T. MIYASHITA: International Symposium "Biological range shifts in response to climate change", Tokyo, Japan, 2015

“Forecasting distributions of butterflies and implications for conservation”

- 24) M. MATSUBA and T. MIYASHITA: International Symposium "Biological Conservation Planning under Uncertainty", Tokyo, Japan, 2015

“Forecasting future diversity and distributions of butterflies under climate change in Japan”

- 25) 松葉史紗子、笠田実、宮下直：日本生態学会第63回大会（2016）  
「都市における生物多様性保全のこれから」
- 26) 笠田実、松葉史紗子、宮下直：日本生態学会第63回大会（2016）  
「人にも生物にも価値のある場所はどこか：地価と生物多様性から考える新たな保全策の提案」
- 27) M. MATSUBA, M. KASADA and T. MIYASHITA: The 63rd Annual Meeting of the Ecological Society of Japan, Sendai, Japan, 2016  
“Regional differences in range shifts of butterflies to climate change and implications for protected areas in Japan”
- 28) 宮下直、松葉史紗子：日本チョウ類保全協会（2016）  
「地球温暖化でチョウの分布がどう変化するか？」

### （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

- 1) 公開講演会「生物多様性観測・評価・予測研究の最前線2～愛知目標達成に向けての第一歩～」(2012年1月6日、東京大学農学部弥生講堂一条ホール、聴衆約100名)
- 2) 東南アジアの森林減少と可能性(公開講演会「生物多様性観測・評価・予測研究の最前線」, 2012年1月8日, 東京大学農学部1号館8番教室, 観客180人)
- 3) モザイク景観と生物多様性の関係：成因、変異性、保全(日本生態学会企画シンポジウム、2012年3月18日、龍谷大学、観客90人)
- 4) Patterns and drivers of biodiversity at macro spatial scales: historical and contemporary (国際シンポジウム、2013年2月28日、東京大学農学部1号館8番教室、聴衆約50人)
- 5) 公開講演会「生物多様性観測・評価・予測研究の最前線3～アジアでの展開～」(2014年1月11日、東京大学農学部1号館8番教室、聴衆約100名)
- 6) Workshop on Virus Dynamics and Evolution (June 30 - July 4, 2014, Centre de Recerca Matemàtica, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, Spain. Organizing Committee)
- 7) The JSMB/SMB joint meeting (July 28 - August 1, 2014, Osaka International Convention Center, Osaka, Japan. Organizing Committee, Scientific Advisory Committee)
- 8) Mini-symposium “Social sciences for ecosystem management and biodiversity conservation”, In the JSMB/SMB Joint Meeting for Mathematical Biology (July 30, 2014, Osaka International Convention Center, Osaka, Japan. Organizer)
- 9) 生物多様性観測・評価・予測研究の最前線4～生物多様性と第一次産業～(S9-1-2と合同主催、2015年1月7日、東京大学弥生一条ホール、聴衆約90名)

- 10) Symposium “Ecosystem management and environmental decisions.” A Satellite symposium of Second International Symposium of Decision Science for Sustainable Society (January 30, 2015, Centennial Hall, Kyushu University Medical School, Japan. Organizer)
- 11) The S9/Kanto Branch of ESJ joint international symposium “Biological range shifts in response to climate change”(September 5, 2015, The University of Tokyo, Tokyo, Japan. Co-organizer)

#### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 朝日新聞デジタル 2014年5月15日  
<http://b.hatena.ne.jp/entry/www.asahi.com/articles/ASG5G63JJG5GULBJ015.html>
- 2) Excite ニュース 2014年5月15日  
[http://www.excite.co.jp/News/society\\_g/20140515/Hazardlab\\_5953.html](http://www.excite.co.jp/News/society_g/20140515/Hazardlab_5953.html)

#### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

### 8. 引用文献

- 1) IUCN (2009) IUCN Red List of Threatened Species, version 2009.1. Available at:  
<http://www.iucnredlist.org>.
- 2) B. SANDEL, L. ARGE, B. DALSGAARD, RG. DAVIES, KJ. GASTON, WJ. SUTHERLAND and JC. SVENNING: Science, 334, 660-664 (2011), The influence of late Quaternary climate-change velocity on species endemism.
- 3) C. D. L. ORME, et al.: Nature, 436, 1016-1019, (2005), Global hotspots of species richness are not congruent with endemism or threat.

## (2) 農業環境における生物多様性評価のためのスケールアップ手法の開発・適用

国立研究開発法人農業環境技術研究所

生物多様性研究領域

池田浩明

農業環境インベントリーセンター

山本勝利

<研究協力者>

国立研究開発法人農業環境技術研究所

農業環境インベントリーセンター

大澤剛士・山中武彦

平成23～27年度累計予算額：37,856千円（うち平成27年度：6,916千円）

予算額は、間接経費を含む。

### [要旨]

農業生態系は、食料生産の場であると同時に、様々な生物に対して生息の場を提供している生態系である。その一方で、機械化・大規模化された近代農業は、農地の過剰利用（生物多様性第一の危機）、農業に資さない地の放棄（生物多様性第二の危機）という両面から、農業生態系における生物多様性を脅かすようになったと考えられているが、それらが注目されるようになったのは比較的最近のため、知見は限られている。特に日本を含むモンスーンアジア域における生物多様性に関わる研究は極めて限定的で、その研究を推進し、生物多様性の減少要因を特定することは急務である。本課題では、国内の農業生態系における生物多様性評価手法の開発、開発された手法に基づく国内評価、ならびに、それら手法の東南アジア域への適用を試みた。国内では、圃場整備（生物多様性第一の危機）が大規模に実施された地域と絶滅危惧植物の分布域が排他すること、耕作放棄（生物多様性第二の危機）が広がっている地域と、絶滅危惧植物の分布域が重なっていることを、それぞれ全国スケールで明らかにした。さらに、耕作放棄をもたらす要因には地域性があることを明らかにした。これらの研究成果をふまえ、国内の農地を食料生産に集中すべき地域、生物多様性保全に尽力すべき地域に区分するゾーニング手法を提示した。さらに東南アジア域への適用を想定し、データが限られている場合、豊富な場合それぞれで生物多様性を評価する手法を開発した。東南アジア域では、無償で入手可能な衛星リモートセンシングデータでは詳細な農地利用の抽出が困難であることを示した。研究の拠点としてタイ国を選定したが、利用可能な生物分布情報がほとんど入手できなかったため、昆虫を対象に出版物、野外収集データを国際規格のデータフォーマットで電子化し、国際的なデータベース上に公開した。最後に、東南アジアにおいて生物多様性評価を実施するためには、農地利用データ、生物分布情報の両者が不足していることを明確化し、将来的な生物多様性評価に向けた対応策を示した。

### [キーワード]

耕作放棄、自然史資料、地図化、農業生態系、圃場整備

## 1. はじめに

農業生態系は、食料生産の場として重要な役割を持つと同時に、様々な生物に対して生息の場を提供している生態系である。その一方で、機械化・大規模化された近代農業は、近代化に伴う農地の過剰利用（生物多様性第一の危機）、ならびに、近代農業に資さない地を放棄または利用縮小（生物多様性第二の危機）という両面から生物多様性の減少要因となり、近年の農業生態系における生物多様性の危機を引き起こすドライバーになっていると考えられている。しかし、農業生態系における生物多様性が注目されるようになったのは比較的最近であることも関係して、国内の農業生態系における生物多様性の評価に関わる研究は多くない。生物多様性の減少要因についても、圃場整備（生物多様性第一の危機）、耕作放棄（生物多様性第二の危機）等、いくつかの考えが提示されているものの、明確な根拠が示されているとは言いがたい。その原因としては、関連する既存研究がフィールドスケールのケーススタディに留まっており、国土スケールでの生物多様性評価や、日本における農業生態系の実態の全体像が解明されていないことが挙げられる。日本を含むモンsoonアジア域では、その気候に適合し、独自性の高い水稲作が広がっており、安定的な水稲作の場であるとともに、湿地の代替地として様々な生物へ生息の場を提供する等、複数の生態系サービスへ貢献していると考えられている。しかし、東南アジア域では日本以上に農業生態系における生物多様性の研究が行われておらず、これらの実施と、生物多様性の危機要因の特定は急務となっている。そこで本課題では、農業生態系における生物多様性に着目し、広域スケールの解析を主眼とした評価手法の開発、開発された手法に基づく国内評価、ならびに、それら手法の東南アジア域への適用を試みた。

## 2. 研究開発目的

本課題は、日本国内における農業生態系の生物多様性評価手法を開発すること、農業生態系における主要な生物多様性第一の危機および第二の危機要因を特定すること、東南アジア域を対象に開発した評価手法の適用を試み、その実施に向けて不足している要件を明確化することを、それぞれ目的とした。このため、研究は基本的に野外調査に基づくフィールドスケール（圃場等の単位）ではなく、データベース解析に基づくマクロスケール（都道府県以上を単位とする広域）を対象として実施した。

## 3. 研究開発方法

目的の達成に向け、大きく4つの項目に分けて研究を進めた。そのため、方法、結果および考察は4項目ごとに記す。

### （1）日本、東南アジア両地域における基盤地図情報、生物分布情報の調査、収集、整備

#### 1) 日本

マクロスケールの研究において利用可能な地図データリソースとして、国土交通省が公開している国土数値情報、国土地理院が公開している基盤地図情報、環境省生物多様性センターが公開している植生図、NASA等から無償で入手できるLandsat TM画像

（[http://landsat.usgs.gov/Landsat\\_Search\\_and\\_Download.php](http://landsat.usgs.gov/Landsat_Search_and_Download.php)）等、利用可能なデータ類を収集した。Landsat画像については、それをリソースにした土地被覆の教師なし分類を実施することで、農地利用の詳細なデータを作成できるかを検討した。さらに農林水産省が公開している統計情報である農林業センサスデータ（研究開始時点で最新だった2005年）を全国的に収集し、生物データを

はじめ、各種地図データと重ね合わせやすい形式として二次地域メッシュ（約10km四方）に加工した。これら収集した地図データ、加工して地図化したデータの精度や利用性を比較し、研究において利用する基盤地図を決定した。

利用可能な生物分布データとして、環境省生物多様性センターより自然環境基礎調査の動物データ、絶滅危惧植物情報を入手した。絶滅危惧植物情報については、許可を得た上、植物分類学会より未公開のデータについても提供を受けた。さらに、農環研が保有するものを含め、博物館等から様々な標本目録、ラベル情報を収集した。加えて地方の自然愛好家サークルの出版物、論文、報告書等の生物に関する観察情報を全国から収集した。これらの各種自然史資料から生物に関する情報を読みとり、緯度経度を付与することで生物の分布データ化した。また、この作業を効率化するため、国土地理院から地名辞書データを入手した。

## 2) 東南アジア

全球観測衛星によって作成された標高データであるAster GDEM

(<http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>)、全球の気象情報データベースであるWorldClim

(<http://www.worldclim.org/>)といった全球スケールの公開地図データおよび、東南アジア域について無償で入手できるLandsat TM画像を収集した。さらに国連環境計画（UNEP）から公開されている、全球スケールで各種GISデータがまとめられているUNEP-Grid

(<http://www.grid.unep.ch/index.php?lang=en>)を入手し、本研究課題において利用できるかどうかを検討した。Lansat TM画像については、これも日本と同様にそれをリソースに教師なし分類を実施することで、東南アジア地域における農地利用の土地被覆データを作成できるかを検討した。ただし、東南アジアでは分類結果の正解率の評価（グランドトゥルース）が困難であったため、分類精度の定量的評価は実施できなかった。

東南アジアにおける各種大学や研究機関への問い合わせや訪問によって、利用可能な生物分布データを調査した。さらに、訪問時等に図鑑や観察記録、出版物等の自然史資料を入手し、日本と同様にそこから生物に関する情報を読みとり、緯度経度を付与することで生物の分布データ化を実施した。この作業を効率化するため、対象国における地名辞書を作成した。

## (2) 日本国内における農業生態系の生物多様性評価手法の開発

### 1) 限られたデータの活用方法

項目（1）で整備した各種データを利用し、都道府県以上の広域スケールを想定した農業生態系における生物多様性の評価手法を検討した。まず、サンプル数が限られた生物情報を有効活用できる手法の検討を行った。こういった手法を検討する意義として、生物の分布情報、特に過去の生物情報を入手することには限界があることが挙げられる。例えば同じ場所で、同じ調査手法、調査努力を投入するというモニタリング調査が行われていれば、その場所における生物相の変化を直接評価し、増加や減少を論じることができるが、実際にはそういった調査が実施されている場所は多くない。現実的には機会的に採集された標本や観察情報等、散在する限られたデータを集めるしかない。そのため、モニタリングデザインになっていないような生物情報を活用して生物多様性を評価する手法や、生物多様性を指標するパラメータを決定し、生物多様性の変化を評価するといった手法が必要とされる。そこで、過去と現在という2時期のオサムシ科昆虫標本に緯度経度情報を与えた分布情報（項目（1）で作成）を利用し、過去にも現在にも同じ種が分布し



ている場所（在-在）はハビタットが安定的に存在しているという仮定に基づき、少ない生物情報からハビタットが安定的に存在する条件を抽出した。具体的には、過去にも現在にも3種以上、同じ種が分布している場所を抽出し、そこに共通した物理環境条件があるかどうかを検討した。参照する物理環境条件としては、長期的に安定していると考えられる地形要因を利用した。なお、オサムシ科昆虫は一般に移動力が乏しいため、ハビタットの評価に適していると考えられている種群である。

## 2) 豊富なデータの活用方法

項目（1）で整備したデータを利用し、1）とは逆に、国土スケールで複数種群の生物分布情報が利用可能な場合に、それらを有効利用できる手法を検討した。ここでは、保全の対象となりうる複数の生物群について豊富な分布データがある場合を想定し、それらの情報をもとに保護区や保全努力を投入すべき地域を決める際に有効となる生物多様性指標を検討した。具体的には、日本全体の $\gamma$ 多様性、すなわち全国スケールで累計した種多様性を最大化できる保全優先エリアの選定を考え、ある種群、分類群を指標に設定した場合に、その分布域が他の種群、分類群を同時にどれだけカバーするかの検討を行った。指標種群としてトンボ、蝶、維管束植物を用いた。なお、トンボ、蝶、維管束植物は、それぞれ農業生態系における生物多様性指標として利用可能と考えられている分類群である。評価軸として、生物種数（ $\alpha$ 多様性）、希少種数、地点間の相違を最大化する指標（=相補性、 $\beta$ 多様性）の3つを利用した。ここで、希少種の条件は、環境省が作成しているレッドリストに記載されていることとした。

### （3）農業生態系における生物多様性の第一の危機および第二の危機を評価

生物多様性の第一の危機要因として農地の圃場整備、第二の危機要因として耕作放棄に注目し、それらの空間分布と絶滅危惧植物の分布の関係について（データはいずれも項目（1）で整備）、全国規模での検討を行った。絶滅危惧植物については、もともと広域に分布していたが、現在では分布域の多くで絶滅危惧となっている種（「元」普通種）を選定した。「元」普通種の基準は、都道府県版レッドデータブック／レッドリストで35都道府県以上（全国の75%）指定されていることとした。「元」普通種は、全国のどこにでも存在する危機要因によって減少していると考えられるため、全国どこにでも存在する圃場整備、耕作放棄との関係を見る上で適切と考えられる。解析の単位は全国を対象に10kmメッシュ（二次メッシュ）としたが、圃場整備については、神奈川県のみを対象として1km単位の解析も実施した。解析手法は、同じ規格に合わせた圃場整備、耕作放棄それぞれの地図と、「元」普通種の分布地図を重ね合わせ、その関係（無関係なのか、重複するのか、排他するのか）を検討するという単純なものとし、共通したパターンを抽出することのみに主眼を置いた。さらに圃場整備、耕作放棄それぞれについて、それ自体をもたらし要因の検討を行った。説明要因としては、気候、地形といった自然要因と、人口、インフラ整備といった社会要因の両者を検討した。

### （4）開発した評価手法を東南アジア域への適用

過去に実施されてきた研究において一般的な生物多様性評価で行われる手法、ならびに、項目（2）、（3）で開発あるいは実施した生物多様性評価手法について、東南アジア域への適用を試みた。適用ができなかった場合は、何が原因で適用できなかったのか、適用するためには何が

必要かについて検討を行い、評価に必要な要件の明確化をはかった。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 基盤地図情報、生物分布情報の調査、収集、整備

###### 1) 日本

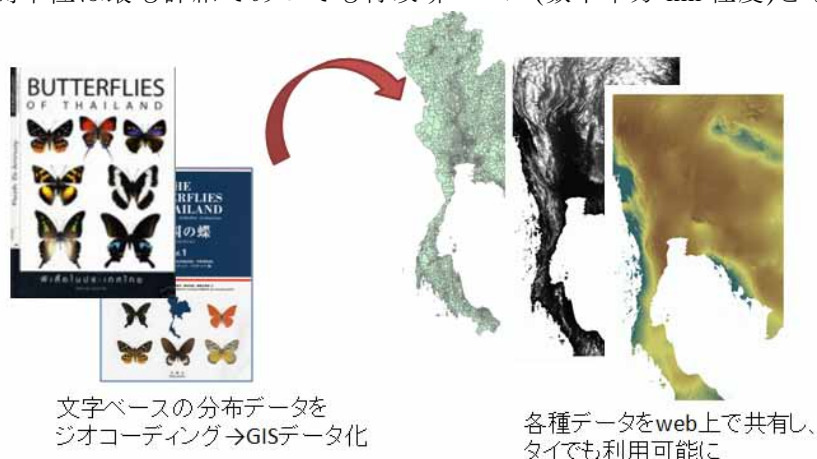
各種地図データを収集し、利用可能なGISデータとして重ね合わせられるように再整備を行った。本研究の核となる農地利用データについては、統計情報である農林業センサスを二次メッシュ単位で地図化したデータが最も研究課題に適していると判断された。Landsat TM画像を利用した農地被覆データの構築は、平坦な地においては一定の分類精度が得られたものの、山間部においては大幅に過小評価してしまうことが明らかになったため、本課題で実施する都道府県以上の広域的な研究には不向きという結論になった。地形については国土地理院から入手した基盤地図情報、気象については気象庁から入手したメッシュ気象値、人口等の社会情報については基盤地図情報、国土数値情報、国勢調査それぞれを農地利用データと同じように二次メッシュ化し、農地利用データと重ね合わせられるようにした。

生物データについては、研究期間内を通してリソースの収集、分布データ化を継続し、まとまった単位での分布データができた後に適宜、評価手法の適用を行った。

###### 2) 東南アジア

共同研究者を確保することができたタイ国を研究のコアエリアに位置づけ、収集したデータリソースから地形、気象、行政界といった基本的な地図データを一元化し、重ね合わせ可能なGISデータ化した。これら情報をタイ国側とも共有するため、データをインターネット上で共有できるプラットフォームを構築した(図(2)-1)。データは、適宜タイ国の共同研究者へ提供した。なお、データリソースは全て公開されたものを利用したため、知財等の問題は発生しない。

収集した図鑑、観察記録等の自然史資料のうち、コアエリアに決定したタイにおいて比較的分量が多かった蝶の分布データについてGISデータ化を行い、緯度経度を付与し、空間解析が可能なGISデータに整備した。ただし、入手できた自然史資料に記録された位置の精度が低かったため、解析可能な空間単位は最も詳細であっても行政界レベル(数十平方km程度)となった。



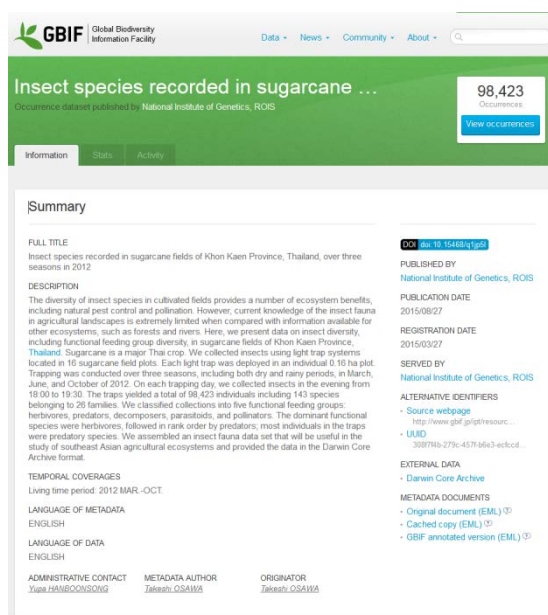
図(2)-1 タイ国における各種データのGIS化

生物については図鑑および標本目録を入手し、それに記載された採集地情報から緯度経度を算出した。これにより、公開データベースから作成した地形、気象等のGISデータと重ね合わせることが可能になった。

共同研究者の所属であるタイ国、コンケン大学（Khon Kaen University）およびコンケンフィールドクロップセンターを訪問し、コンケン県内のサトウキビ畑においてトラップ等を利用した昆虫調査を共同で実施し、可能な範囲で同定を行い、昆虫インベントリを作成した（図(2)-2）。なお、標本は全てコンケン大学博物館に収蔵した。ここで収集した昆虫目録は、国際規格である Darwin Core フォーマットで電子化し、データペーパーとして公表した後に（論文(2)-2）国際的な生物多様性情報データベースである Global Biodiversity Information Facility (GBIF) ネットワーク上 (<http://www.gbif.org/dataset/308f7f4b-279c-457f-b6e3-ecfccd1b598d>) で公開した（図(2)-3）。これにより、誰でもインターネットを通じて本データを取得し、研究等で利用することが可能になった。



図(2)-2 タイ国のサトウキビ畑  
タイにおいてサトウキビは主要作物の一つである。

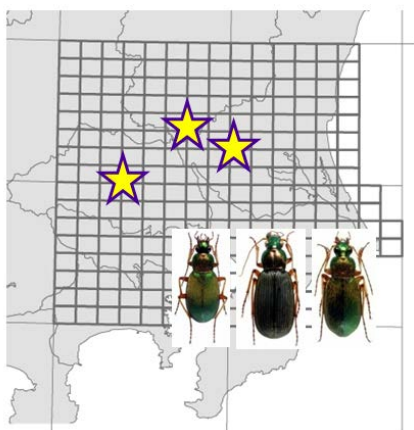


図(2)-3 GBIFネットワーク上で公開されたタイの昆虫データ

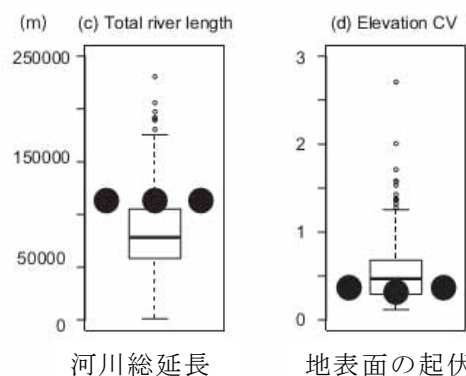
## （2）日本国内における農業生態系の生物多様性評価手法を開発

### 1) 限られたデータの活用方法

関東地域全域を対象に、10km メッシュ単位で同種が 3 種以上共通で存在する条件を検討したところ（図(2)-4）、単位面積あたりの河川総延長が大きく、地表面がなめらかである（単位メッシュ内における標高値の変動係数が小さい）場所では、対象種にとってのハビタットが安定的に存在すること（図(2)-5）が示された（論文(2)-3）。この地形条件は、定期的な洪水攪乱が起りやすいことを示唆しており、自然発生の礫河原を持つ河川敷を主なハビタットとするオサムシ科昆虫の生態とも一致した。ここで実施したような、「過去にも現在にも同種が存在する条件」を検討することにより、ハビタットが安定的に存在する条件を抽出できるとともに、昆虫標本のよりに散発的な採集記録データを一元化し、利用できる可能性を提示することができた。



図(2)-4 関東全域を対象に、10kmメッシュ内に同種が3種以上確認された場所。これらの場所の物理条件を検討した。

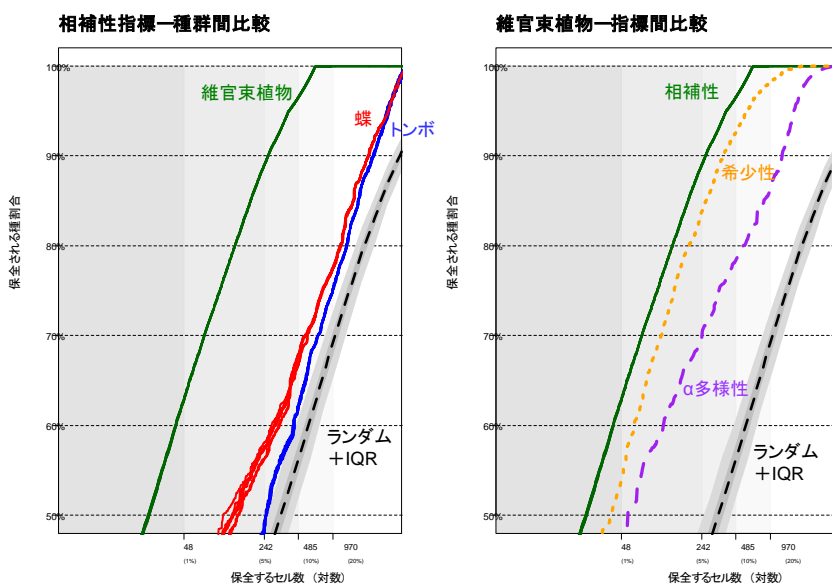


図(2)-5 過去と現在の両方にオサムシ科昆虫の分布記録があった場所 (●:10kmメッシュ) に共通する地形要因

箱ひげ図は関東全域の傾向を示す。単位面積当たりの河川総延長(左)が長く、標高の変動係数(右)が低い(地表面が平坦)という共通点が検出された。

## 2) 豊富なデータの活用方法

様々な条件における複数種群のカバー率を検討した結果、種数が格段に多い維管束植物(約5300種)を代理指標に用い、相補性(β多様性)で評価した場合、トンボ(190種)・蝶(240種)も効率的にカバーすることができ、効率的な保護区設定に向けた指標として利用できることが示された(図(2)-6)。多様性指標としては、α多様性はパフォーマンスが一番悪く、どの分類群を代理指標にした場合でも、ランダムに保全優先エリアを設定した場合と大きく差がなかった。一方、希少種数、相補性はランダムに保全優先エリアを設定した場合よりも高い保全効率を示した。



図(2)-6 日本全体の多様性を保全するために有効な分類群および指標の検討。分類群としては種数が圧倒的に多い維管束植物が優れていて(左、相補性指標の例)、指標としては、相補性のパフォーマンスが一番よく、次いで希少性であった(右、維管束植物の例)。

### (3) 農業生態系における生物多様性の第一の危機および第二の危機を評価

#### 1) 第一の危機

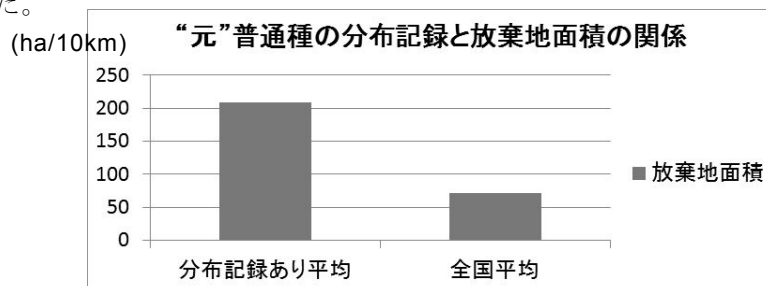
生物多様性の指標に用いた「元」普通種の絶滅危惧植物について、環境省生物多様性センターより23種の全国的な分布データを入手できた。圃場整備の全国的な二次メッシュ地図および神奈川県三次メッシュ地図と、「元」普通種の分布データを重ね合わせた結果、二次メッシュ内の全ての農地が圃場整備された場所には絶滅危惧植物はほとんど生息しないこと、三次メッシュ単位にすると、その傾向は少し弱まること(表(2)-1)が示された(論文(2)-6)。この結果から、圃場整備は絶滅危惧植物にとって明らかに負の影響を持つこと、その影響は圃場整備の実施年代に関わらず、長期にわたること、面的に大きく圃場整備が実施されることで負の影響がさらに大きくなる可能性が示唆された。同時に、整備の規模が小さく、周囲に未整備の農地が存在している場合は、絶滅危惧植物が回復できる可能性があることが示唆された。

表(2)-1 農地が全て圃場整備されたメッシュにおける絶滅危惧植物の分布状況

解析スケール	整備されたメッシュ数	総メッシュ数	比	種名	整備された分布メッシュ数	分布メッシュ総数	比
全国 (10kmメッシュ)	1553	5397	0.29	スズサイコ	5	248	0.02
				タコノアシ	5	221	0.02
				ムラサキミミカキグサ	14	210	0.07
				ミスニラ	4	182	0.02
				計23種を解析			
神奈川県 (1kmメッシュ)	369	1603	0.23	タコノアシ	12	67	0.18
				ミスニラ	2	40	0.05
				オオアカウキクサ	2	29	0.07
				イトトリゲモ	2	18	0.11
				計6種を解析			

#### 2) 第二の危機

耕作放棄の全国二次メッシュ地図と、「元」普通種の分布データを重ね合わせた結果、耕作放棄地の分布と絶滅危惧植物の分布は全国的に重なること(図(2)-7)が明らかになった(論文(2)-2)。この結果から、耕作放棄は絶滅危惧植物にとって、負の影響(第二の危機)と、正の影響(放棄によって農地が自然のハビタットに回帰していく)の2つが存在している可能性が示唆された。1)の結果と組み合わせて考えると、圃場整備を経験したうえで放棄された地は、ほぼ確実に正の影響は存在しないと考えられるため、未整備かつ放棄された場所について、正負それぞれの影響を及ぼしている場所がある可能性はあるが、本課題においては正負に分かれる条件は明らかでなかった。

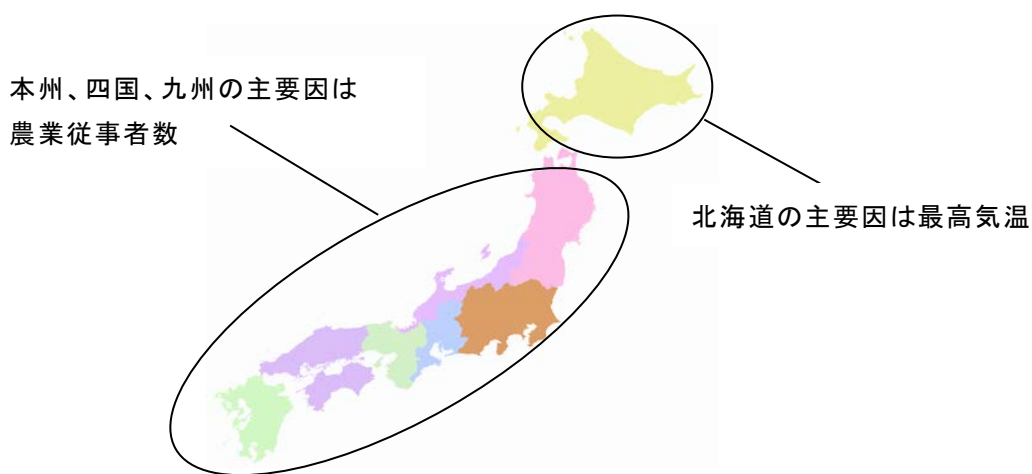


図(2)-7 10kmメッシュあたりの耕作放棄面積全国平均と絶滅危惧植物の分布記録があるメッシュ内の平均耕作放棄面積(タコノアシの例)

「元」普通種23種の分布記録がある10kmメッシュ内の平均耕作放棄面積は、全国平均と比べて有意に大きく、重なっていることが示された。



さらに、放棄面積を被説明変数にした放棄地の立地解析を実施したところ、放棄をもたらす主要因は北海道では最高気温、本州、四国、九州では農業従事者数であること（図(2)-8）が明らかになった（論文(2)-5）。この地域性は、農業における土地利用形態が大きく影響していると考えられた。つまり、農家1軒あたりの農地面積が約16haと大規模化されている北海道では、気象条件が厳しい地が放棄され、対して農家1軒あたりの農地面積が2haに満たないその他地域では、離農がそのまま放棄につながっていることが示唆された。圃場整備を被説明変数にした立地解析については、特に顕著な傾向を検出することができなかった。この理由は、圃場整備事業は1960年代から1990年代にかけて国家事業として全国的に実施されたため、近年急激に発生している耕作放棄のような地域性が存在しないことが理由と考えられた。



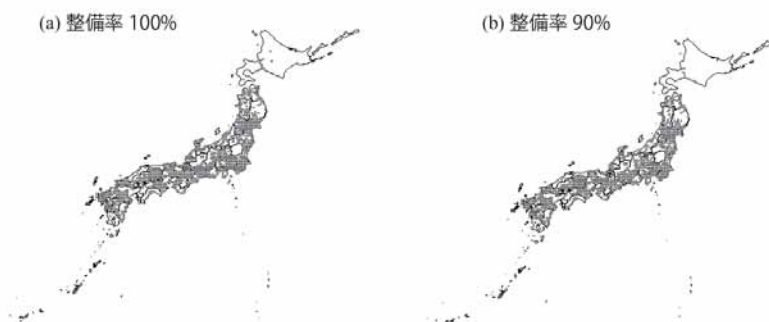
図(2)-8 耕作放棄をもたらす主要因の地域性

### 3) 国内における研究成果をまとめた地図化

項1)と2)の研究によって得られた、「圃場整備を経験した農地には指標性を持つ絶滅危惧植物がほとんど分布しなくなる」と「耕作放棄地は指標性を持つ絶滅危惧植物の分布と全国的に重なる」という結果を組み合わせ、現在の農地を、i)食料生産に特化させた方が良い農地と、ii)生物多様性保全に注力したほうが良い農地に区分するというゾーニング手法を提示し、対象ゾーンを地図として視覚化した。具体的には、大規模（解析単位である二次メッシュ内の農地の100%、90%）が圃場整備済みで、一定面積以上（二次メッシュ内に16ha以上:北海道の農家あたり平均と同値）の農地面積を持つ場所は近代農業が適切な地としてi)に区分し（図(2)-9）、i)に区分されず、未整備農地を持ち、かつ、項1)と2)で提示された指標植物種（「元」普通種）の分布記録がある地はii)に区分する（図(2)-10）という考え方に従い、全国の農地を分けした。その結果、i)は北海道に集中し、ii)は本州、四国、九州に多く存在するという結果が得られた。この結果は、放棄を引き起こす主要因の違いとも類似する傾向となった。



図(2)-9 食料生産機能が発揮できる農地



図(2)-10 生物多様性の保全機能が発揮できる農地

さらに、区分けした地に2005年時点における放棄地を割り付けると、i)に総放棄地の1.2%、9%（整備率100%、90%）が該当し、ii)には52%、49%（整備率100、90%）が該当した。このことから、食料生産効率が高い場所は放棄されにくく、生物の生息場としての機能が低い場所は相対的に放棄されやすいことが明確に示された。項2）で示したとおり、絶滅危惧植物の分布域は放棄が進んでいる場所と全国的に重なっている。そのため、農業生態系において生物多様性の保全対策を行う場合、それが食料生産と競合することはないことが示唆され、今回提案したゾーニング手法は、持続的な農業と生物多様性保全の両立を実現する上で有効な方策の一つであると考えられた。この結果は、愛知目標戦略目標B、個別目標7「農業・養殖業・林業を持続的に管理する」に貢献できる内容である。

#### （４）開発した評価手法を東南アジア域への適用

##### 1）基本的な多様性評価手法をタイ農地へ適用

タイのサトウキビ畑における昆虫相データを利用し、サトウキビの単作と輪作（数年に1度陸稲を栽培する畑）における機能群の多様性評価を検討した。具体的には、昆虫標本を形態から植食者、捕食者、分解者、寄生者という機能群に分け、それぞれの種多様性（ $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ）と作付体系（新植か株出か）の関係を検討した。その結果、輪作を行うことで植食者、捕食者の種多様性が高まり、間接的に単一種の大発生を抑え、害虫被害を低減できている可能性が示唆された。

##### 2）プロジェクト内で新開発した広域評価手法をタイ全土へ適用

項（2）－1）（論文(2)-3）で開発したハビタット評価手法について、タイへの適用を試みた。具体的には、項（1）で整備した時系列の蝶の分布データ（1960年代～2000年代）を3時期（1960-1980年、1981-2000年、2000年以降）に分け、3時期で継続して3種以上同種が分布している郡（行政区）

を抽出し、その地域における森林率、農地面積（S9-1-4から提供を受けた）データとの関係を検討した。その結果、10郡（行政堺）において3種以上同種が分布していることが確認でき、そのうち3郡はChang Mai県であった。そこでChang Maiの農地面積（米作面積）、森林率の推移と蝶の種数との関係を検討したが、特にこの地域に顕著な土地利用やその推移パターンを見出すことはできなかった。日本においてオサムシ類を指標として実施した解析では、安定的にハビタットが維持されている地域の抽出に成功したが（論文(2)-3）、タイでは移動能力が高い蝶を指標種としたことにより、地域的な土地利用の影響をうまく検出できなかったことが原因である可能性が高いという結論になった。

圃場整備、耕作放棄については、タイ国の地図データを整備することができなかった。耕作放棄の発生しやすさについての推定は、国内で実施したもの（論文(2)-5）と同様の環境要因を揃えることが不可能であったため、同様の解析が実施できなかった。国内結果における重要要因（最高気温、降雨、農業従事者数、農地の区画整理率、総農地面積）に絞っても、農地の整備や農業従事者という社会条件が全く入手できず、適用自体ができなかった。複数種群の広域的な分布データから効率的な保護区や保全区域を設定する手法についても、広域的な分布データが入手できたのが蝶のみであり、適用自体ができなかった。

### 3) 東南アジアにおける農業生態系の生物多様性評価に向けた必要要件の抽出

国内における農業生態系の生物多様性評価で用いた手法をアジア地域（タイ）で適用するために不足している要件を表にまとめた（表(2)-2）。結論は、生物多様性評価の基本となる生物分布データが最も不足しているということになった。アジア域では、日本に比べて利用可能な基盤データ、例えば標本コレクション等が電子化されていない、あるいはコレクション自体が存在していないため、評価を行う際にはそれらの整備から実施する必要がある、国内ではある程度実施できた面的な生物多様性評価が実行できないか、あるいは、良い結果が得られなかった。この問題を解決するためには、それらを整備するための取り組み、例えばGlobal Biodiversity Information Facility (GBIF)のような生物多様性情報を集積する取り組みへの積極参加が必要である。GBIFではデータ記述フォーマットや横断利用に向けた技術開発等が積極的に行われており、ソフトウェア等も無料で提供しているので、散在するデータを一元化する上でも有効と考えられる。

次いで不足していると考えられたのは、土地利用データである。地形や単純な土地被覆分類、たとえば森林、農地、市街地、水域といった分類結果のデータは衛星リモートセンシング画像等を通して整備、入手が可能であったが、本プロジェクトで注目した耕作放棄、圃場整備状況など農業生態系にかかわるデータは、人間活動が大きく関与し、短期間で変化するため、十分な情報が得られなかった。これらの整備を進める実現可能性が高い具体的な方法についての提案は困難であるが、日本を例にすると、行政主導の全国レベルの統計調査等を行う等が考えられる。これら基盤情報を整備し、利用可能な形で公開を進めていくことも今後、多様性評価を進めていく上で欠かすことができない要件である。



表(2)-2 国内で実施した研究において利用したデータと、東南アジア（タイ）でそれを実施する上で不足している項目および、その不足を埋めるための対応案

国内で実施した研究（評価手法）	実施に必要なデータ	タイ国データの不足（研究期間で発見できず、未整備であると判断されたもの）と解析結果	対応案および実際にプロジェクト内で実施した対応
① 広域的な生物の分布解析（論文(2)-1,2）	同定済みの生物分布データ（複数種）、河川等の基本地形GISデータ	同定済みの生物分布データが不足したため解析できなかった。	対応案：生物調査の実施および分布情報の一元化、 <b>Sleeping Data</b> の電子化、公開促進 実際に実施した対応：データペーパーの公表（論文4）および国際データベース（ <b>GBIF</b> ）への登録、公開
② 農地利用（耕作放棄、圃場整備）と絶滅危惧生物の分布の関係検討（論文(2)-2,6）	国レッドリストおよび分布データ、地方版レッドリスト、農地利用データ	全てのデータが不足したため解析できなかった。	対応案：生物データの電子化促進、地方での生物調査およびレッドリスト作成の促進、土地利用に関する統計等の調査推進
③ 標本等から時系列の生物分布データを整備し、ハビタットの安定的な条件を抽出（論文(2)-3）	指標になる生物種群の時系列分布データ、基本的な土地利用、地形データ	一応必要なデータは入手できたものの、解析の結果、期待した関係性は見出せなかった。	対応案：様々な種群を対象とした分布データの整備 実際に実施した対応：タイの蝶については本プロジェクト内である程度整備したので、著作権の問題が解決すれば公開可能。
④ 複数種群の広域的な分布データから効率的な保護区や保全区域を設定するための指標群およびステータス（絶滅危惧種等）を検討	複数種群（植物、蝶、トンボ）の広域的な分布データ	複数種群の広域的な分布データが必要だが、本プロジェクトでは蝶類データしか整備できなかったため、解析できなかった。	同上
⑤ 農地利用の変化（耕作放棄）をもたらし要因の解析（論文(2)-5）	面的な農地利用データおよび人口等の社会データ、地形等の自然データ	面的な農地利用データ、人口等の社会データが不足したため、解析できなかった。	対応案：政府が主導した統計調査等の実施およびそれらの公開（オープンデータ化）。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

#### 1) 東南アジア

東南アジア域では生物多様性に関する基盤データが極めて乏しい現状を把握し、それに対する対応策としてデータ整備および公開（論文(2)-4）を進めることができた。まだ論文化できていないが、それら整備データを利用し、東南アジアにおける農業生態系の生物多様性評価研究を実施することができ、将来に向けた明確な一歩を踏み出すことができた。

一方、国内で実施してきた面的な生物多様性評価手法は事実上アジア域において全く適用できなかった。その原因は、①生物分布データ、②農地利用データという基盤情報が整備、入手できなかったことによる。今後の課題として、これら基盤情報を整備するための取り組み、例えば**Global Biodiversity Information Facility (GBIF)**のような生物多様性情報を集積する取り組みへの積極的な参加が必要であろう。また、農業生態系を評価するためには、無償の衛星リモートセンシング画像を利用して抽出される土地利用データでは精度が十分ではなく、日本で実施されているような政府主導による統計調査や、基盤地図情報の整備も必要となるだろう。これら今後のアジア域における農業生態系の評価研究を発展させる上で必要な要件が明確になった

点は重要な成果であると言える。

## 2) 国内

既存地図データを活用した研究の推進（論文(2)-1,2,3）、農業生態系における第一の危機として圃場整備（論文(2)-6）を、第二の危機として不完全ではあるものの、耕作放棄（論文2）が重要である可能性を全国スケールで提示したこと、散在する限られた自然史資料を利用したハビタット評価手法の開発（論文(2)-3）、第二の危機と目される放棄の拡大に関する要因の検討（論文(2)-5）といった、国内ではほとんど実施されてこなかった農業生態系における生物多様性の広域的な評価および手法開発を実現し、日本における農業生態系の評価研究を大きく発展させることができた。

以上のように、研究計画に挙げた課題は基本的に全て遂行できたと考えている。しかし、いくつかの成果について論文化が間に合わなかった点、主要な研究成果である圃場整備、耕作放棄の評価について、ともに入手できたデータリソースの制限から、時系列的な変化を検討することができなかった点、耕作放棄について、正負両方の影響が存在することが示唆されたが、その詳細な影響メカニズムの特定には至らなかった点が残された課題として挙げられる。

### （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>

全国スケールで農地利用と生物多様性の関係を検討した研究論文は国内においてほとんど例がなく、食料生産と生物多様性保全の両立に向けたゾーニング手法という愛知目標戦略目標B、個別目標7「農業・養殖業・林業を持続的に管理する」の達成に貢献できる成果を示すことができた。したがって、国や都道府県レベルの環境政策および農業政策の立案において今後利用されることが期待できる。また、現在作成が進められている日本版生物多様性概況（JBO）第二版のとりまとめに際し、本課題の成果を複数提案しているため、少なくとも一部は反映されると期待している。

## 6. 国際共同研究等の状況

東南アジアにおける研究拠点としてタイ国を選び、コンケン大学（Khon Kaen University）農学部のHanboonsong准教授ならびに、同国において滞在研究を行っていた国立研究開発法人国際農林水産業研究センター JIRCASの小堀陽一主任研究員の協力を得て研究を遂行した。両機関とは特にMoU（Memorandum of Understanding）等を締結することはせず、個別の研究課題における共同研究者として両氏に加わってもらった。そのため関連した論文については、両氏が共著者となっている（論文(2)-4）

## 7. 研究成果の発表状況

### （1）誌上発表

## &lt;論文（査読あり）&gt;

- 1) T. OSAWA, H. MITSUHASHI and H. NIWA: *Ecological Complexity*, 15, 26-32 (2013), Many alien invasive plants disperse against the direction of stream flow in riparian areas
- 2) T. OSAWA, K. KOHYAMA and H. MITSUHASHI: *PLoS ONE*, 8, e79978 (2013), Areas of increasing agricultural abandonment overlap the distribution of previously common, currently threatened plant species.
- 3) T. OSAWA, K. WATANABE, H. IKEDA and S. YAMAMOTO: *Entomological Science*, 17, 425-431 (2014), New approach for evaluating habitat stability using scarce records for both historical and contemporary specimens: A case study using Carabidae specimen records
- 4) I. VORAPHAB, Y. HANBOONSONG, Y. KOBORI, H. IKEDA, and T. OSAWA: *Ecological Research* 30(3), 415-415 (2015), Insect species recorded in sugarcane fields of Khon Kaen Province (Thailand) over three seasons in 2012
- 5) T. OSAWA, K. KOHYAMA, and H. MITSUHASHI: *Science of the Total Environment*, 542, 478-483 (2016), Multiple factors drive regional agricultural abandonment
- 6) T. OSAWA, K. KOHYAMA and H. MITSUHASHI: *Land Use Policy*, 54, 78-84 H (2016), Trade-off relationship between modern agriculture and biodiversity: Heavy consolidation work has a long-term negative impact on plant species diversity

## &lt;その他誌上発表（査読なし）&gt;

- 1) 池田浩明：植生情報、17, 20-26 (2013)  
「追想録：それは環境決定論だ！」

## (2) 口頭発表（学会等）

- 1) S. YAMAMOTO: Seminar 'Biodiversity and Ecosystem Services', Padjadjaran University, Bandung, Indonesia, 2011  
“Effect of landscape structure and its changes on Japanese rural biodiversity”
- 2) S. YAMAMOTO: The 5th EAFES International Congress, Shiga, Japan, 2012  
“The effect of landscape structure on both agricultural production and biodiversity”
- 3) 山本勝利：日本生態学会第59回大会（2012）  
「わが国における半自然草地の減少とその要因」
- 4) H. IKEDA and S. YAMAMOTO: MARCO Symposium 2012, NIAES, Tsukuba, 2012  
“Positive and negative relationships between agricultural activities and biodiversity in rice paddy landscapes of Japan”
- 5) 池田浩明：植生学会第17回大会（2012）  
「長期耕作放棄地におけるセイタカアワダチソウの個体群動態」
- 6) 大澤剛士、神山和則、三橋弘宗：日本生態学会第60回大会（2013）  
「絶滅危惧植物への影響から耕作放棄地を仕分ける」
- 7) 池田浩明：日本生態学会第61回大会（2014）  
「『被度』という割り算が織りなす連続確率分布：調査面積が不定の場合について」

**(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**

- 1) 生物多様性観測・評価・予測研究の最前線4～生物多様性と第一次産業～(S9-1-1と合同主催、2015年1月7日、東京大学弥生一条ホール、聴衆約90名)

**(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

### (3) 植物の広域データ解析によるホットスポット特定とその将来の定量的予測

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生物多様性評価・予測研究室

竹中 明夫・石濱 史子・角谷 拓

平成23～27年度累計予算額：37,852千円（うち平成27年度：6,915千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

土地利用・開発、温暖化といったヒトの活動による環境変化は、地球規模で生物種の存続を脅かす要因となっているが、東南アジア域では十分な評価が行われていない。日本の高精度データを使って分布推定・保護区選択等の手法の高度化を行うとともに、東南アジアのマメ科植物を対象として、分布推定モデルを利用した、広域的なホットスポット評価と土地利用・気候変動による影響の評価を行った。また、これらの解析に必要な環境情報等の基盤データの整備を行った。

手法の高度化では、絶滅リスクを考慮した保全優先地域特定手法を開発し、日本の維管束絶滅危惧植物に適用したところ、優先保全地域を適切に選べば、愛知目標に定められた陸地の17%の保護区面積は絶滅回避のために十分な広さであること、しかし保護区内での保全効果が十分でなければ、面積のみ増やしても絶滅は回避し切れないことが明らかとなった。

分布推定手法の高度化では、分布データの少ない種の分布推定を効果的に行うために、多数の種を同時に分布推定する手法を検討した。また、分布データの座標精度の違いを考慮することで、出現頻度の少ない種の分布推定精度を向上する手法を開発した。

アジアのマメ科4属(*Dalbergia*、*Mucuna*、*Desmodium*、*Bauhinia*)の植物に分布推定モデルを適用し、ホットスポットの推定と、土地利用および気候変動による影響の評価を行った。その結果、温暖化はこれらの種のホットスポットの位置にはほとんど影響せず、それぞれの種の分布面積は約8割の種で1割以内の減少にとどまると推定された。これに対して、過去から現在にわたるヒトによる森林利用は、森林を主な分布域とする種には多大な影響を与えており、約7割の種が、潜在的な分布域のうち8割以上の面積において、高い人為圧を受けていると推定された。

#### [キーワード]

分布推定モデル、ホットスポット、保護区選択、マメ科植物、土地利用

#### 1. はじめに

土地利用・開発、温暖化といったヒトの活動による環境変化は、地球規模で生物種の存続を脅かす要因となっているが、アジアスケールでは十分な評価が行われていない。生物多様性に対するこれらの要因の広域的な影響評価を、限られたデータから効果的に行うための手法開発が必要とされている。近年、生態学分野で多用されている分布推定モデルは、限られた分布情報から、広域の生物多様性の状態を推定するために非常に効果的な手法である。しかし、分布データの量

や精度に制約のある東南アジア域で適切な分析を行うためには、これらの制約を考慮したうえで分布推定精度を向上するための手法開発が必要である。また、広域的な状態を把握した後に、適切な保全対策を行う必要がある。対策の1つとして、生物多様性条約の愛知ターゲットでは陸域の17%を保護区とすることが目標とされている。得られる情報を活用して、効果的な保護区の配置を設計する手法の開発が必要である。さらに、これらの手法を利用して評価を行うための基盤的なデータの整備も喫緊の課題である。

## 2. 研究開発目的

本課題では、アジアスケールでのホットスポット評価および土地利用・開発、温暖化による環境変化の影響評価を行うため、統計的な分布推定モデルに基づく評価手法の開発および適用を行う。特に出現頻度の低い希少種の分布推定精度を向上するため、多種を同時に分析するための手法開発を行う。また、アジア域では分布データの座標精度のばらつきが大きいと考えられるため、座標精度を考慮することで分布推定精度を向上する手法の開発を行う。また、日本国内で得られる時系列のある高精度な分布データを利用し、絶滅リスクを考慮した保護区選択手法の高度化を行う。開発した手法をアジアのマメ科植物の分布データに適用し、ホットスポット評価および土地利用・開発、温暖化によるリスクの評価を行う。さらに、これらの解析に必要とされる、地形・気象・土地利用・人口等の基盤データの整備、および、将来の土地利用変化の推計を行うためのプラットフォームの構築を行う。

## 3. 研究開発方法

### (1) 基盤データの整備

国内の生物の分布データは多くが地域標準二次メッシュで整備されている。国内の分布データを活用しながら解析を行うためには、アジアの環境データを、地域標準メッシュと整合したメッシュで整備する必要がある。そのため、アジア・太平洋域を網羅する、二次メッシュと整合性のあるメッシュ（全アジアメッシュ、以下AAメッシュ）を作成した。AAメッシュは、東京測地系にもとづき、東経60度から180度、北緯60度から南緯60度の範囲を網羅し、メッシュの総数は海域も含めて1,382,400である。環境データをAAメッシュに集約する際には、測地系をWGS1984、投影法を東経120度赤道を中心としたランベルト正積図法に変換したうえで用いた。環境データの入手については既存の地形（標高）、気象（各月の平年の気温、降水量）、および生物気象（19項目）の併せて44項目について5秒の格子毎のデータをworld climateのウェブサイトから入手した。土地利用については、1km格子毎のデータをAARS Asia 30-second Land Cover Data Setのウェブサイトより入手した。人口予測については、データが取得可能であった日本の市区町村別将来推計人口（国立社会保障・人口問題研究所）にもとづいた。入手した全てのデータは測地系および投影法の変換を行い、測地系をWGS1984、投影法を東経120度赤道を中心としたランベルト正積図法に統一した。

### (2) 土地利用変化の推計

土地利用の変化が生物多様性に及ぼす影響を定量化する手法を検討するため、複数時期における土地利用データの統合・解析を実施し、土地利用変化の推計を試行的に行った。具体的には、

詳細な土地被覆データが利用可能な、日本国内を対象とし、環境省自然環境保全基礎調査 植生図2-5回ならびに植生図6-7回（公開されている範囲）について、クオリティチェックの上10mグリッドデータとして再整備を行った。整備したグリッドデータについて、それぞれ既に構築済みの統合植生分類<sup>1)</sup>に従ってカテゴリを再構成した。基図精度の違い(2-5回:1:50,000、6-7回:1:25,000)を考慮し、10mグリッドから100m/500mグリッドをそれぞれ作成した。2-5回データを1990年代の土地被覆、6-7回を2000年代の土地被覆とみなして、100m/500mのグリッドごとに土地被覆パターンの推移データを取得し、10年間（1990->2000年）での土地被覆推移の直接確率を算出した。算出した推移確率を利用し、2050年までの土地被覆変化のシミュレーションを試行した。

作成した国内の土地利用変化の推計値に基づいて、土地利用変化が生物多様性指標にどのような影響をおよぼすかを定量化した。具体的には、土地被覆の時系列情報をもとに、生物の生息・生育環境のモザイク性にもとづいた生物多様性指標であるSatoyama Index (SI)<sup>2)</sup>を算出し、1990年、2000年と2050年の値を比較した。

これらの解析は、複数のサブテーマを横断するワーキンググループによって行った。

### （3）分布推定手法の高度化

群集組成を利用した希少種の統計的なモデルによる分布推定手法の開発には、上記の維管束レッドリスト植物の分布データを用いた。在情報の少ない希少種の分布推定精度は従来の方法では低くなりがちである。同所的に生育することが多い普通種の情報など、群集組成を考慮して複数種を同時に解析することで、推定精度を向上できる可能性がある。複数種同時の解析が可能な手法として、Multiresponse adaptive regression splines(MARS)がある。これまで、MARSを生物の分布推定に利用した例では、1種ずつ単独で解析を行うか、データセット中の全ての種を同時に解析するかのいずれかであった。MARSの特色は、分布推定に有効な環境変数の選択を、多種の情報に基づいて行うことであるが、全ての種を同時に解析する場合には、生息地特性がまったく異なる種も一緒に解析してしまうため、ごく粗い精度での変数選択しかできない。類似した生息地特性をもつ種グループを単位として解析を行うことで、より効果的で精度の高い変数選択が可能になると考えられる。このような解析に用いるために適切な種グループを構築するため、グルーピング手法の開発を行った。

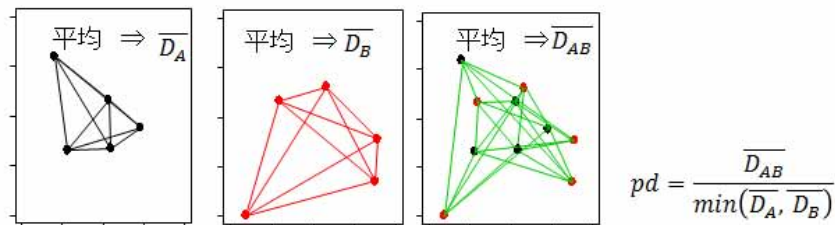
グルーピング手法として、分布パターンに基づく手法を検討した。2種の分布パターンの全体的な類似性を定量的に評価する指標をあらたに開発した。まず、2種それぞれごとに、すべての分布地点間の距離の平均値を求める。さらに種間でも、すべての分布地点の組み合わせについて距離を求めてこれを平均する。そのうち、2種それぞれの種内平均距離の小さいほうで、種間平均距離を割って、分布の違いの程度を表す指標(Distribution Pattern Dissimilarity index: DPD index)とした

(図(3)-1)。2種の分布が異なれば、種間での距離のほうが種内の距離よりも大きくなり、この比は1より大きくなる。この指標は、完全に同所的には分布しなくともほぼ近接した場所に出現すれば似ていると判断されるので、もともと分布情報の数が少なく、種間での分布の一致が期待しにくい希少種の場合にも有効である。DPD indexをすべての種（種数をNとする）の組み合わせについて求めると、N×Nの距離行列が得られる。これを使ってクラスター分析を行えば種のグルーピングが客観的に行うことができる。

DPD indexに基づいたクラスター分析を、日本の維管束植物レッドリスト種に適用し、グルーピ



ングを行った。得られたグループを利用して、MARSによる分布推定を行い、1種ずつ単独に解析を行った場合・グループ単位で解析を行った場合・全種同時に解析を行った場合の3通りについて比較を行った。



図(3)-1 種の分布パターンの類似性を定量評価するための指標の概念図

アジアの植物種のホットスポット評価においては、標本データの座標値がもつ精度を適切に反映するため、分布推定手法の高度化を行った。

新たに開発した手法では、それぞれの標本レコードの座標値に、乱数で生成したノイズを加えた。ノイズの大きさは座標精度と対応したものとし、精度が低いほど大きなノイズを加える。ノイズを含んだ座標値と、その場所での環境値を用いて、分布推定モデルのパラメータ推定を行うということを繰り返した。この手法(精度反映法)を用いたモデル推定の結果を、1. 精度の違いを無視して全てのレコードを同等に扱う(全レコード法)、2. 座標精度が低いレコードを除いて使う(低精度データ除去法)、という他の2つの方法と比較することで、手法の有効性を検証した。検証には、分布データの性質を制御できる、仮想の分布データを生成して用いた。また、座標精度がわかっているマメ科 *Dalbergia* 属のデータセットにも適用した。

#### (4) 保護区選択手法の高度化

定量的な絶滅リスク計算にもとづくより高度な保全優先地域特定手法の開発を行った。この手法では、すべての対象種について、局所個体群ごとの絶滅リスクを計算し、保全することによって低減される絶滅リスクの種間の総和が最大になるように保全優先地域を選択するものであり、個体数の時間変化の情報が得られる場合に適用可能である。この手法の有用性の検討には、日本全国で過去10年間の個体数変化に関する情報が利用できる、維管束植物レッドリスト種の基準地域二次メッシュでの分布情報(日本植物分類学会絶滅危惧種問題専門委員会の許可を得て使用)を利用した。

種ごとのおよその個体数とその変動率のデータが得られている場合を前提に、絶滅リスクを考慮した保護区選択手法の高度化を行った。特定の種が、ある区画内で経験した変動は、その後も繰り返し生じる可能性があること、また、他の区画内で同種が経験した変動が、注目する区画内で生じる可能性もあることを前提に、個体群サイズの今後の変動を総合的に評価しつつ、保全対象種群全体での絶滅リスクを満遍なく抑制することを評価関数としながら保護対象とする区画を選択する計算ツールを開発した。このツールを用いて、日本植物分類学会絶滅危惧種問題専門委員会が全国の協力者と共同してまとめた維管束植物レッドリスト種分布データの解析を行った。同データから、約1,600種、23,000個体群のデータを利用して、種ごとの将来の絶滅確率を推定す

るとともに、これを効果的に低減する保護区の選択を二次メッシュ（約10キロ四方）単位で行った。

生物の絶滅リスク評価を行うためには、個体数やその変動率のデータが必要である。しかし、現実にはこのような情報を得られることのほうが少ない。アジアの多くの地域・植物種について利用可能な植物の分布に関する情報は、標本の採集地に関する記録である。この情報のみに基づいて絶滅リスクの相対的な高さを評価する方法として、分布推定モデルと土地利用図から得られる人為圧の情報を組み合わせた種の絶滅リスク評価の枠組みを開発した。

#### （5）アジアのマメ科植物の分布推定モデルの開発とホットスポット解析、絶滅リスク評価

太平洋アジア地域におけるアジアのマメ科4属(*Dalbergia*、*Mucuna*、*Desmodium*、*Bauhinia*)について、分布推定モデルを利用したホットスポット評価を行った。対象は、マメ科*Dalbergia*属118種、*Bauhinia*属154種、および*Mucuna*属78種の合計350種である。これらの種の分布情報は、S9-3で整備された、博物館標本に基づく在のみデータを利用した。

分布推定モデルは在のみデータでの推定精度が高いMaxent<sup>3)</sup>を用いた。説明変数には、Worldclim website ([www.worldclim.org](http://www.worldclim.org))<sup>4)</sup>から取得した生物気象情報のうち、相関が低かったBio01、Bio02、Bio03、Bio05、Bio13、Bio14、Bio15および、ISRIC-WISEデータベース (<http://www.isric.org/data/isric-wise-global-data-set-derived-soil-properties-05-05-degree-grid-ver-30>)から取得した土壌特性のうちCNrt、ELCO、PHAQ、TAWC、TOTCを用いた。標本情報に基づいて分布推定を行う手法により、まず、それぞれの植物種が潜在的に分布可能な気候条件である地域を推定した。分布確率の推定のみでなく、データの一部をサブサンプリングしては分布推定を繰り返し、繰り返しごとのばらつきを求めてモデルの推定精度の指標とした。それぞれの種の分布推定をする際に、移動分散による制限を考慮するため、旧北区・東洋区・オセアニア区・オーストラリア区のうち、すでに分布が知られている生物地理区にのみ分布可能であるという制約を設けて推定を行った。

分析対象とした属の主要な生育地は森林であるので、森林における農業活動・放牧による現在までの人為圧の高さをFAOのgeonetworkで提供されている土地利用データ (LAND USE SYSTEMS OF THE WORLD - EAST ASIA AND PACIFIC、<http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=37132>) を用いて評価した。気候条件が適しており、かつ森林である範囲を推定潜在分布面積とし、このうち、農業活動・放牧による利用強度が中程度以上の範囲の面積割合を人為圧の強度の指標とした。この方法で得られた推定潜在分布面積と人為圧の強度を用いて、相対絶滅リスク評価を行った。絶滅リスクが特に高いのは、1. もともと分布範囲が狭く、かつ、2.分布範囲内の人為圧が高い種であると考えられる。推定潜在分布面積と人為圧の散布図を作成し、1および2に該当する領域は相対的に絶滅リスクが高いと判定することとした。在地点データをサブサンプリングして分布推定を繰り返すことにより、推定値のSDも求めた。

さらに、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第5次評価報告書のために用意された代表的濃度パス (RCP) の4つのシナリオ (RCP2.5、4.0、6.0、8.4) を用いて、気候変動を考慮した場合の2050年のホットスポットの推定と、潜在分布面積の推定値の変化に基づく絶滅リスク評価を行った。2050年の潜在分布面積の推定は、散布制限がなく自由に分布拡大できる場合と、散布による

分布拡大が全く起きない場合の2通りについて推定を行った。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 基盤データの整備

地形、気象、生物気象、土地利用、日本の人口推計について合計46項目の環境情報をAAメッシュを共通の単位として整備することができた。

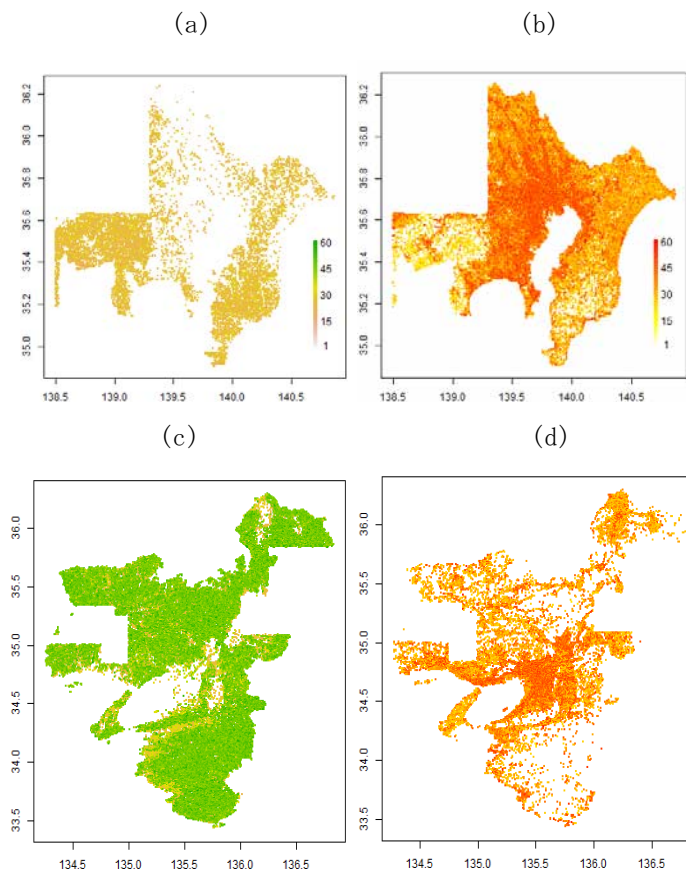
##### (2) 土地利用変化の推計

土地被覆データは全国での整備が完了していないこと、土地被覆の変化パターンは地域ごとに異なると考えられることから、全国スケールでシミュレーションを行うことは現実的でない。そこで全国を9道州（案の一つ）に分割したところ、関東、中部、近畿、九州の4地域について80%以上のデータが揃うことが明らかになった。そこで、これら4地域をシミュレーションの検討対象とした。シミュレーション試行の結果(図(3)-2)、500mグリッドでは地域に関わらず大部分が森林もしくは市街地になってしまうことが示された。この理由は、森林は国土の66%を占めること、国内における農地や草地といった土地利用は小規模である場合が多いことから、500mグリッド解像度では森林グリッドが実際より多くなってしまふことが原因と考えられた。そこで100mグリッドをシミュレーションの単位に利用することに決定した。しかし、100mグリッドでは4地域合計で1000万を超えるグリッド数となるため、高速でシミュレーション計算を実施するためのperl(プログラミング言語)によるプログラム、および、結果をGISデータ化するPostGISプラットフォームを構築した。

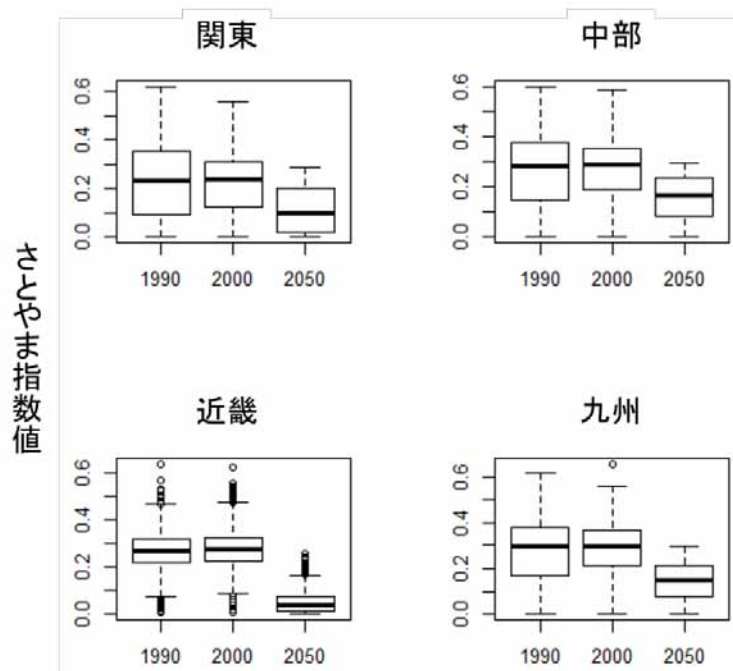
過去・現在の土地被覆および、推計された土地被覆変化に基づいて、1990年、2000年と2050年についてSIを算出した。その結果、2050年には計算対象とした4道州全てでSIは低下することが示された(図(3)-3)。

##### (3) 分布推定手法の高度化

群集情報を利用した分布推定の基盤として開発した、分布パターンに基づくグルーピング手法を日本国内維管束植物レッドリスト種の分布データに適用した。分布パターンの類型化に用いる要因は、メッシュの緯度・経度および太平洋からの距離という主に地理的要因の三次元空間中での分布パターンと、年平均気温、年降水量、最大積雪深、海岸からの距離という環境要因の4次元空間中での分布パターンそれぞれについてクラスタリングを行った。距離行列に基づくクラスタリングにはいくつかの方法があるが、全体を大括りに分けたい場合に適当だとされるWard法を採用した。また、出現メッシュ数があまりに少ない種まで含めたグルーピングは困難なので、最低5箇所以上に出現する種に限って解析を行った。



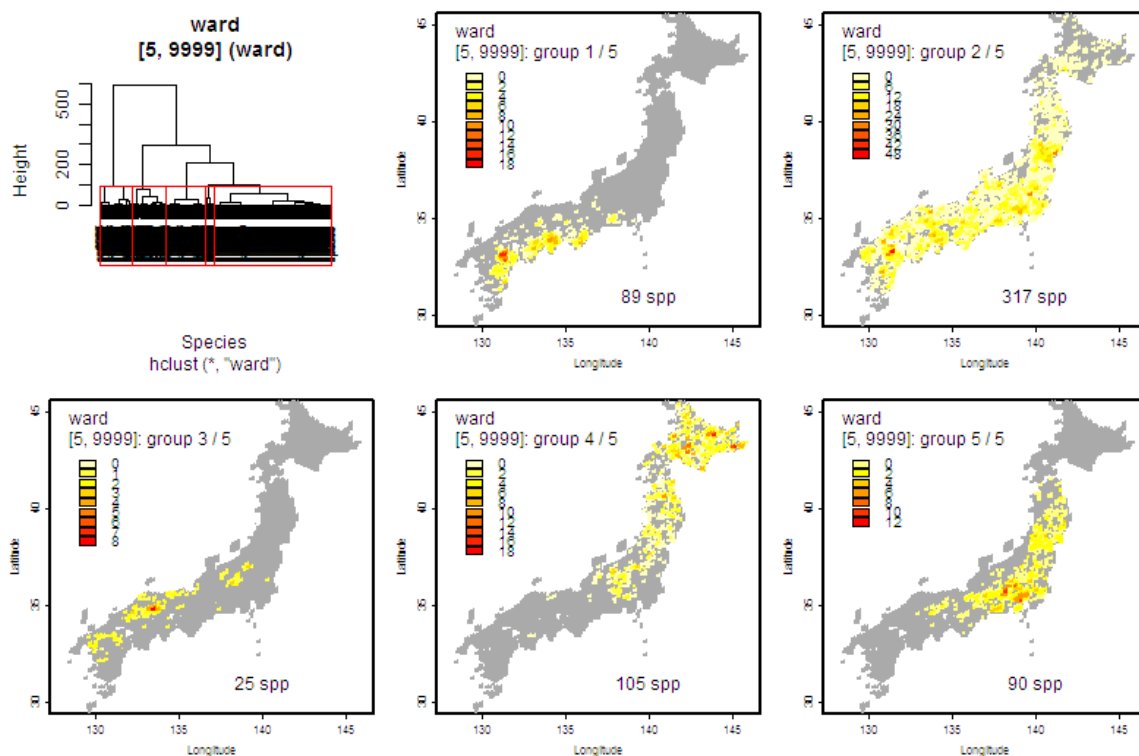
図(3)-2 南関東(a、b)、および近畿(c、d)での二次林(a、c)および市街地(b、d)の計算例  
 100回のシミュレーションのうち、50年後に各土地利用タイプがそれぞれの500mメッシュで最も頻度が高くなった回数を表す。



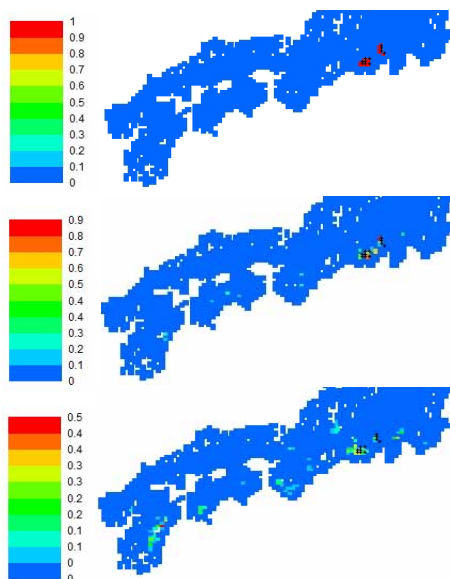
図(3)-3 土地被覆変化に基づいて算出されたたさとやま指数(SI)

図(3)-4は、地理要因に基づいてクラスタリングを行った結果の樹形図である。図中の赤い箱は、この樹形図を5つに分けた場合の分け方を示す。さらに5つのグループそれぞれに属する種をまとめて描いた分布図もあわせて示す。赤味が強いほど、そのグループに属する種が多数分布していることを示す。

この分布パターンに基づくグルーピングによって得た種グループを用いて、MARSでの分布推定を行った。1種ずつ推定した場合・グループ単位で推定した場合・全種同時に推定した場合を比較した結果、1種ずつの推定ではその種のみに限られた情報に基づいて推定を行うためにオーバーフィッティングが起きやすく、逆に全種の推定では他種の情報に影響を受けて広めの分布範囲を推定しやすくなり、グループを用いた場合はこれらの中間的な推定を行う傾向がみられた。グルーピングの効果はグループに含まれる種数に依存して異なり、中程度のグループサイズで、その種単独の分布情報が少ない種で推定精度が改善される傾向があった(例：図(3)-5)。また、全種同時の解析では、推定計算が不可能になる種が約10%存在したが、グループ単位の分析により推定計算が可能になる種があった。従って、全種での推定とグループ単位での推定を組み合わせることで、複数種情報を利用した分布推定の適用範囲が広がることが明らかになった。



図(3)-4 分布パターンの類似性に基づく日本の維管束レッドリスト種のグルーピングの例



図(3-5) 1種単独での分布推定を行った場合(上)と、グループ単位での推定を行った場合(中)、全種同時の推定を行った場合の例(下：絶滅危惧植物のため種名は不記載)

黒い点は実際に対象種が観察された地点を示し、色は分布推定モデルで推定された存在確率の高低を表す。単独の分析では、推定範囲が観察地点と過剰に一致しており、全種同時の分析では過剰に広く、グループ単位の場合に適度に一致している。

座標精度を反映した分布推定方法の高度化については、仮想データを用いて検証した結果、出現頻度が少ない種で、環境勾配が急で、好適環境の幅が狭いときに、処理の効果が大きく、新開発の精度反映法が、低精度レコード除去法および全レコード法に比べ、推定精度が高いことが明らかになった。これは、一部のレコードを使わない低精度レコード除去法よりも、精度反映法のほうが使えるデータ量が多くなるためと考えられ、*Dalbergia*属のデータに適用した場合にも、精度反映法のほうが低精度レコード除去法よりも1種あたりの利用できるレコード数が多く、分析できる種数が増えた(表(3)-1)。

推定されたモデルの精度を表すAUC値については、精度反映法と全レコード法はほとんど差がなかったが、低精度レコード除去法でAUC値が低くモデルの精度が低かった(図(3)-6)。普通種よりも希少種のほうが手法間の差が大きく、新開発の手法は利用データが限られている希少種で特に有効と考えられた。

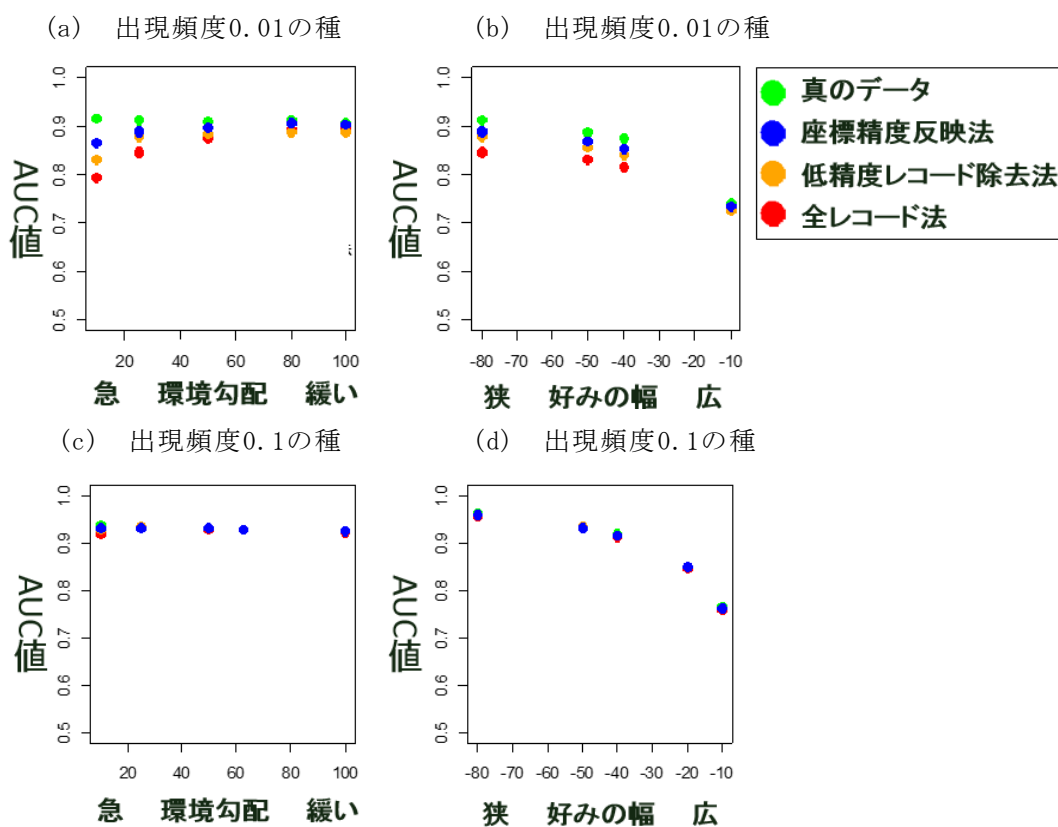
以上のことから、推定精度・推定パターン・分析可能種数の比較から、総合的に精度反映法が最も優れていると考えられた。ホットスポット推定ではできるだけ多くの種を考慮に入れることが重要であるので、分析可能な種数が多く、希少種の分布推定精度向上に有効であるという、精度反映法の性質は、ホットスポット推定において有用な手法であると考えられる。

#### (4) 保護区選択手法の高度化

日本国内の維管束植物について実施した絶滅リスクにもとづく保全優先地域の特定では、今回新たに開発された手法を用いることで、相補性解析などの従来の手法に比べて、より少ない面積で高い保全効果を発揮する場所を特定できることが示された(図(3)-7)。いっぽう、ある程度以上

の面積を保全できる場合には、種の分布データのみに基づいて選択した保護区でも十分な効果があった。アジア地域では高精度のデータを求めるのは現実的ではないが、種の分布データの集積を進め、ある程度以上の面積を保全地域とすることで、効果的な保護区デザインを提案できる。

さらに、日本国内の分析により、優先保全地域を適切に選べば、愛知目標に定められた陸地の17%の保護区面積は絶滅回避のために十分な広さであること、しかし保護区内での保全効果が十分でなければ、面積のみ増やしても絶滅は回避し切れないことが明らかとなった。本手法の適用には、分布に関する空間情報に加えて時系列情報も必要となる。時代別の分布推定と組み合わせるなど、より広域への適用を可能とするスキームの整備が今後の課題である。



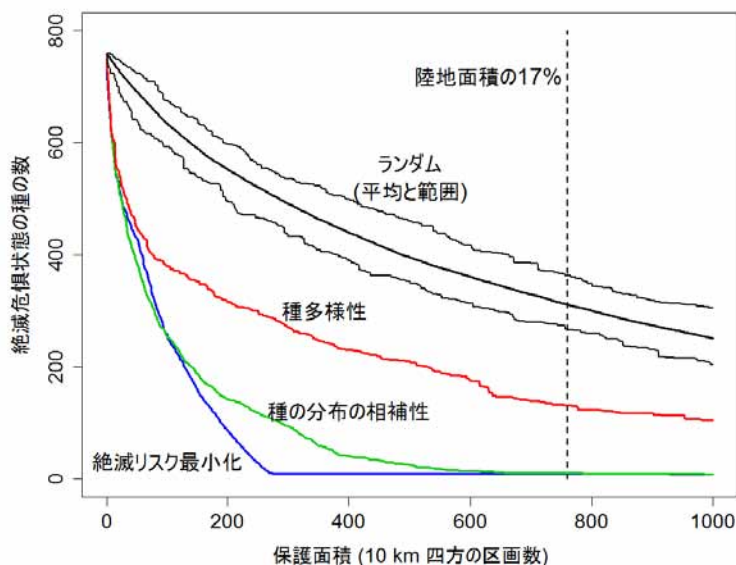
図(3)-6 座標精度の扱いに関する3つの手法間での推定精度の比較

(a)、(b)は出現頻度が低い種(0.01)、(c)、(d)は出現頻度が高い種(0.1)の場合。AUC値はモデルの精度を表し、値が大きいほど精度が高い。

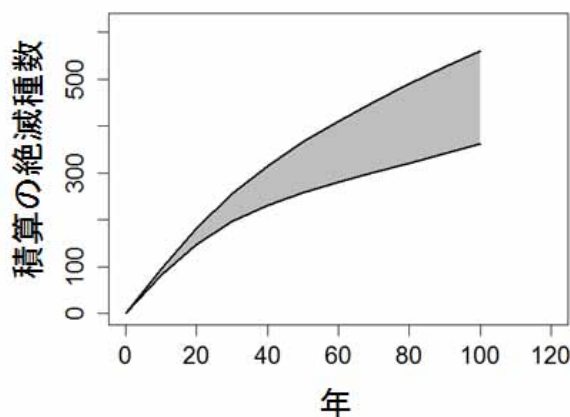
表(3)-1 分布推定可能な*Dalbergia*属の種数の手法間の比較

手法	分析可能な種数	種あたりのレコード数 (共通種のみ)
高精度のみ	62	29.9
精度反映	104	44.9





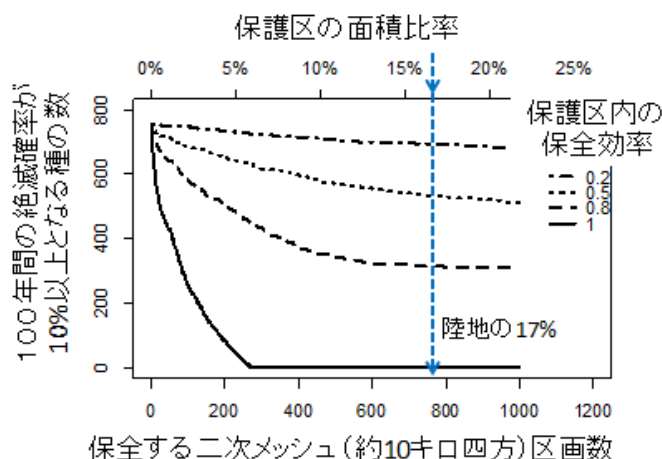
図(3-7) 絶滅リスクに基づいて保全優先地域を特定する新規手法(絶滅リスク最小化)と従来手法の保全効率の比較



図(3-8) 今後絶滅すると予測される維管束植物の種数

100年後まで計算した。種数の幅は、個々の区画での個体群サイズの変化率の計算方法の違いによるもの。

また、新たな保全措置を講じないとして今後の国内の維管束植物の絶滅種数を予測したところ、条件の設定により、370種から560種が絶滅する可能性があるとの結果が得られた(図(3-8))。新たに開発した保護区選択ツールを用いて、この絶滅リスクを抑制するように保護区を設定したところ、保護区内では個体群サイズの減少を完全に抑制できるなら、日本の面積の7%程度を保護区とすれば維管束植物の絶滅は避けられることが示された(図(3-9))。ただし、保護区内での保護が完全ではなく、ある確率個体群サイズの減少が回避できないとすると、愛知目標で設定された17%の保護区面積を確保しても、多くの種が絶滅のリスクにさらされたままとすることも明らかとなった。



図(3)-9 新たに開発した保護区選択ツールで、維管束植物の絶滅リスクを効果的に低減するように保護区を設定した場合の、保護区面積と、絶滅危惧状態の種（100年後までの絶滅確率が10%以上の種）の数との関係

#### (5) アジアのマメ科植物の分布推定モデルの開発とホットスポット解析、絶滅リスク評価

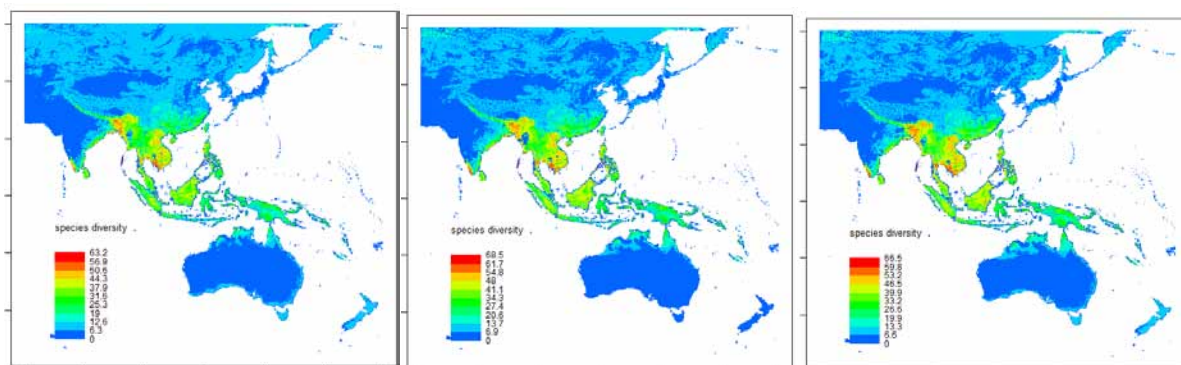
マメ科4属のうち、分布推定モデルがランダムな推定よりも有意により推定をしていると統計的に評価されたのは、118種であった。これらの種を対象として推定された、気候変動を考慮した2050年のホットスポットは、いずれのシナリオでも、現在の気候に基づいた推定に比べてあまり位置に変化はなかった(図(3)-10)。これは、対象とした東南アジアに生育するマメ科植物は、熱帯の種が主であり、気温上昇の影響を受けにくいと考えられた。

現在の土地利用による人為圧を受けている面積割合は67%の種で0.8を超えており、過去から現在にわたるヒトによる土地利用のインパクトが非常に大きいと推定された(図(3)-11)。気候変動に伴う分布面積の変化については、分布面積が広がるかあまり変化しない種が大半を占め(図(3)-12)、もっとも気候変動が大きいと考えられるRCP8.5でも、散布制限がないと仮定した場合、推定された潜在分布可能面積が1割減少する種は16.1%、半減する種は0%であった。分布拡大が全く起こらないと仮定した場合も、潜在分布面積が1割減少する種は22%、半減する種は1種のみ(0.008%)だった。ただし、もともと分布面積の狭い種や温帯域の種では大きく面積が減少する場合があった。4つの気候シナリオ間ではほとんど差が見られなかった。

### 5. 本研究により得られた成果

#### (1) 科学的意義

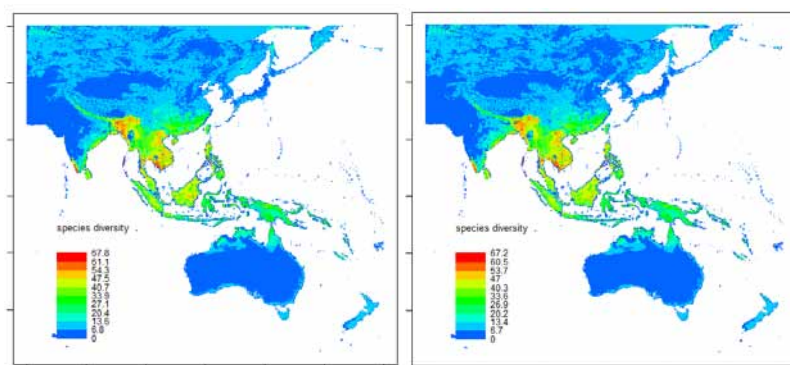
生物の空間分布情報に加えて時系列情報を活用した保全優先地域特定手法を開発し、従来の手法よりも効率的な優先付けが可能になることを示した。また、日本国内の維管束植物を対象とし本手法を用いた分析から、優先保全地域を適切に選べば、愛知目標に定められた陸地の17%の保護区面積は絶滅回避のために十分な広さであること、しかし保護区内での保全効果が十分でなければ、面積のみ増やしても絶滅は回避し切れないことを示した。



(a) 現在

(b) RCP2.6

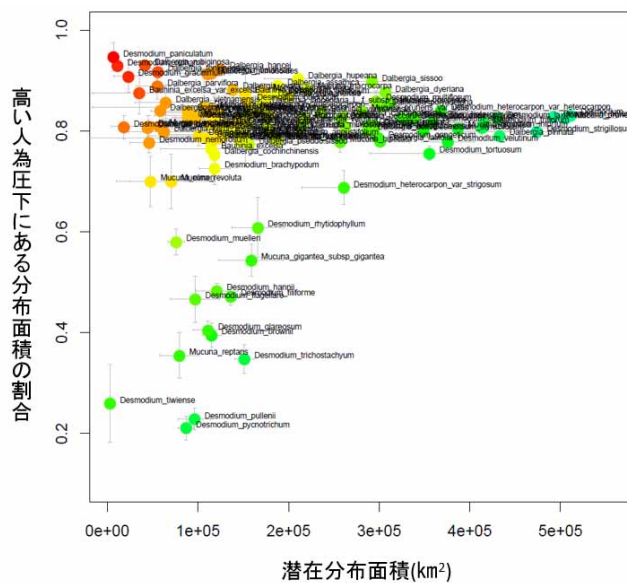
(c) RCP4.5



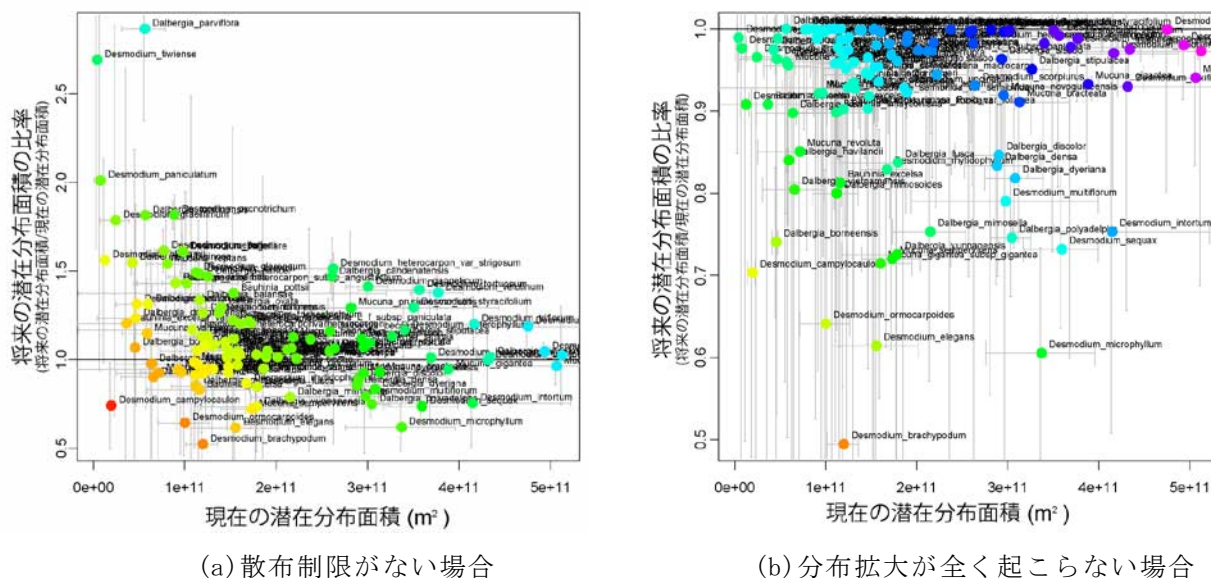
(d) RCP 6.0

(e) RCP8.5

図(3)-10 推定されたマメ科4属 (*Dalbergia*、*Mucuna*、*Desmodium*、*Bauhinia*) の合計種数の分布 (a) 現在の気候および (b) RCP2.6、(c) RCP4.5、(d) RCP6.0、(e) RCP8.5 の気候シナリオに基づく分布推定により作成した。



図(3)-11 マメ科4属のそれぞれの種についての気候変動による絶滅リスク評価  
 図の左上ほど、分布面積が狭く、人為圧が高く、リスクが高いと考えられる。



図(3)-12 マメ科4属のそれぞれの種についての気候変動による絶滅リスク評価

将来の分布面積は、RCP8.5のシナリオ下での値を用いた場合、エラーバーは反復推定に基づくSD。図の左下ほど、現在の分布が狭く、かつ将来の分布面積減少率が高いので、絶滅リスクが高いと考えられる。

(a)散布制限がない場合、(b)散布制限により、分布拡大が全く起こらない場合。

土地利用の変化は予測が難しく、生物多様性にもっとも強い影響をおよぼす要因の一つであるにも関わらず、広域的な影響予測やそれにもとづくシナリオ分析は十分に行われていない。本研究では、複数の土地被覆データをインプットすることで、生物多様性指標の将来変化を示すための計算が実施できるプラットフォームを構築した。このプラットフォームは、今後、広域評価・予測を行うための基礎となる。

分布データで一般的にみられる主要な問題の1つである、座標精度のばらつきを反映した分布推定手法を開発したことで、限られたデータの持つ情報を最大限活用できるようになり、より多くの希少種についてより精度の高い分布推定が可能となった。

分布推定においては、グルーピングという手法の導入により、複数種同時解析による希少種の分布推定精度の向上の可能性を広げた。また、DPD indexの開発により、これまで主観的に行われていた生物の分布パターンの類型化を、客観的な手法で行えるようになった。

温暖化の影響評価は欧米での研究事例が多く、アジア域では不足している。有用性の高いマメ科植物において、東南アジアでの温暖化影響を考慮したホットスポット評価を行ったことは、保全生態学的な観点から意義が大きい。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

環境省の平成23年度 生物多様性評価の地図化検討会に検討委員として参加し、本研究の成果である保護区設定による種の絶滅リスク低減効果の効率的計算手法により抽出した絶滅危惧

植物の保全重要地域の分布マップを含む生物多様性評価のための総合的な地図化に貢献した。

環境省の平成23年度 生態系サービス価値の評価・可視化に関する検討会に検討委員として参加し、生物多様性に関連の深い生態系サービスの地図化に貢献した。

種の保存法における国内希少野生植物種の新規選定のために、絶滅危惧維管束植物の絶滅リスクを考慮した保護区選択の解析結果（国立公園内にある優先度の高いサイトとそこに生育する植物種名のリスト）を、環境省自然環境局の希少種保全推進室に対して参考情報として提供した。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

日本国内の維管束植物を対象として絶滅リスクを考慮した保護区選択手法を適用し、優先保全地域を適切に選べば、愛知目標に定められた陸地の17%の保護区面積は絶滅回避のために十分な広さであるものの、保護区内での保全効果を高めることが必要であることを示した。この成果は、今後、国立公園等の保護区の管理・拡張等の方針策定において基本的視点として活用されることが期待される。

また、分布推定モデルに関して、複数種を同時に分布推定するためのグルーピングの手法や、座標精度を考慮する手法を開発したことにより、これまで分布推定が困難であった希少種について、分析対象とできる可能性を広げた。広域的なホットスポット推定・地図化で多用されている分布推定モデルについて、漏れがちな希少種を考慮できるようにしたことは、全国スケールの広域的な保全政策の基礎資料の質の向上につながると期待される。

## 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）>

- 1) T. KADOYA and I. WASHITANI: Basic Appl. Ecol., 13, 2, 178-187 (2012), Use of multiple habitat types with asymmetric dispersal affects patch occupancy of the damselfly *Indolestes peregrinus* in a fragmented landscape
- 2) 小川みふゆ、竹中明夫、角谷 拓、石濱史子、山野博哉、赤坂宗光：保全生態学研究, 18, 69-76 (2013), 植生図情報を用いた全国スケールでの土地利用図の作成
- 3) A. YOSHIOKA, M. AKASAKA and T. KADOYA: Restoration Ecology, 22(2), 185-195 (2014), Spatial prioritization for biodiversity restoration: a simple framework referencing past species distributions
- 4) 吉岡明良、角谷拓、今井淳一、鷺谷いづみ：保全生態学研究 (2014), 生物多様性評価に向けた土地利用類型と「さとやま指数」でみた日本の国土
- 5) T. KADOYA, A. TAKENAKA, F. ISHIHAMA, T. FUJITA, M. OGAWA, T. KATSUYAMA, Y. KADONO, N. KAWAKUBO, S. SERIZAWA, H. TAKAHASHI, M. TAKAMIYA, S. FUJII, H. MATSUDA, K. MUNEDA, M. YOKOTA, K. YONEKURA, T. YAHARA: PLoS ONE 9(6), e98954.

doi:10.1371/journal.pone.0098954 (2014), Crisis of Japanese vascular flora shown by quantifying extinction risks for 1618 taxa.

- 6) J. NISHIHIRO, M. AKASAKA, M. OGAWA and N. TAKAMURA: Ecological Research, 29, 3, 369-369 (2014), Aquatic vascular plants in Japanese lakes
- 7) 角谷拓、赤坂宗光、竹中明夫: 景観生態学, 19, 111-119 (2014), 相補性解析による効率的な保全に寄与する地域の地図化
- 8) T. FURUKAWA, C. KAYO, T. KADOYA, T. KASTNER, H. HONDO, H. MATSUDA and N. KANEKO: Global Ecology and Conservation, 4, 150-159 (2015), Forest harvest index: Accounting for global gross forest cover loss of wood production and an application of trade analysis
- 9) S. MATSUZAKI and T. KADOYA: Ecological Applications, 25(5), 1420-1432 (2015), Trends and stability of inland fishery resources in Japanese lakes: introduction of exotic piscivores as a driver

#### <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) T. KADOYA and I. WASHITANI: 25th Society for Conservation Biology International Congress for Conservation Biology, Auckland, New Zealand, 2011  
"The Satoyama Index: A biodiversity indicator for agricultural landscapes."
- 2) N. IWAI, T. KADOYA, M. AKASAKA, S. ISHIDA and N. TAKAMURA: The 5th East Asian Federation of Ecological Societies International Congress, Shiga, Japan, 2012  
"Biomass or Diversity? - How aquatic plants affect Odonata."
- 3) A. YOSHIOKA, Y. SEKIZAKI, S. SUDA, T. KADOYA and I. WASHITANI: The 5th East Asian Federation of Ecological Societies International Congress, Shiga, Japan, 2012  
"Lost Biodiversity Approach: application to agricultural-pond damselfly species richness."
- 4) T. MAEZUMI, S. SUDA, T. KADOYA, M. YASUKAWA, M. KITSUREGAWA and I. WASHITANI: The 5th East Asian Federation of Ecological Societies International Congress, Shiga, Japan, 2012  
"Effects of land use elements of urban landscape on distribution of butterflies using data collected by citizen scientists."
- 5) 竹中明夫：日本生態学会第59回大会（2012）  
「生物の広域分布パターンを分布の類似度指標に基づいて類型化する」
- 6) 角谷拓：日本生態学会第59回大会(2012)  
「相補性解析を用いた保全優先度の指標作成」
- 7) 角谷拓：日本生態学会第59回大会(2012)  
「市民調査のデータを政策に活かす地図化」
- 8) 角谷拓：日本生態学会第59回大会(2012)  
「温暖化・土地利用変化・シカの増加：駆動因の将来変化が絶滅リスク予測に及ぼす影響」
- 9) 石濱史子、赤坂宗光、小川みふゆ、竹中明夫：日本生態学会第59回大会（2012）



「絶滅危惧植物はどこにいる？-統計モデリングによる潜在分布の推定-

- 10) 松崎慎一郎、角谷拓：日本生態学会第59回大会(2012)  
「全国24湖沼における50年の漁獲量トレンドの推定」
- 11) 今井淳一、角谷拓、平山亜希子、松村俊幸、鷲谷いづみ：日本生態学会第59回大会(2012)  
「ランドスケープ構造が小水域への水生昆虫の移入と食物網形成に与える影響」
- 12) 石田真也、角谷拓、竹中明夫、赤坂宗光、下田路子、角野康郎、石井禎基、高村典子：日本生態学会第60回大会(2013)  
「長期消長データに基づく水生植物の絶滅リスク評価とため池の保全優先順位付け」
- 13) 石濱史子、竹中明夫、横溝裕行、角谷拓：日本生態学会第60回大会(2013)  
「分布推定モデルは保護区選択の役に立つのか？」
- 14) 角谷拓、竹中明夫、矢原徹一：日本生態学会第60回大会(2013)  
「保護区は絶滅リスクをどのくらい減らせるか？：維管束植物を対象とした全国評価」
- 15) 竹中明夫、角谷拓、矢原徹一：日本生態学会第60回大会(2013)  
「絶滅リスクを抑えるように保護区を選ぶー計算ツール MeBERA の開発」
- 16) 吉岡明良、赤坂宗光、角谷拓：日本生態学会第60回大会(2013)  
「相補性解析による自然再生優先度の地図化-レッドリスト鳥類を事例として」
- 17) F. ISHIHAMA, A. TAKENAKA, H. YOKOMIZO and T. KADOYA: 11th INTECOL Congress, London, United Kingdom, 2013  
“When do species distribution models work in conservation prioritization?”
- 18) 石濱史子、竹中明夫、横溝裕行、角谷拓：日本生態学会第61回大会(2014)  
「保護区選択における分布推定モデルの限界」
- 19) 今井葉子、角谷拓、竹中明夫、上市秀雄、高村典子：日本生態学会第61回大会(2014)  
「一般市民の生態系サービスの認知に影響を与える要因の検討 -幼少期の自然環境および生き物の選好に着目して-
- 20) 木寺法子、角谷拓、高村典子、小賀野大一、長谷川雅美：第61回日本生態学会大会(2014)  
「両生類の分布の規定要因：千葉県の場合」
- 21) 竹中明夫、石濱史子：日本生態学会第61回大会(2014)  
「限られた分布データからでも有効な保護区を作れるか」
- 22) 古川拓哉、角谷拓、石濱史子、加用千裕、T. Kastner、本藤裕樹、松田裕之、金子信博：日本生態学会第61回大会(2014)  
「世界の木材貿易・消費の生物多様性フットプリント」
- 23) 吉岡明良、今井淳一、角谷拓、鷲谷いづみ：日本生態学会第61回大会(2014)  
「さとやま指数」でみた日本の国土」
- 24) 石濱史子、田金秀一郎、小川みふゆ、赤坂宗光：第46回種生物学シンポジウム (2014)  
「生息環境データベースに基づく維管束レッドリスト種のグルーピングー希少種の分布推定のためにー」
- 25) 竹中明夫、石濱史子：日本生態学会第62回大会 (2015)  
「全種をカバーする保護区のサイズと、多種の分布相関」
- 26) 西嶋翔太、古川拓哉、角谷拓、石濱史子、T. KASTNER、松田裕之、金子信博：日本生態

## 学会第62回大会（2015）

「絶滅リスクに基づいた新たな生物多様性フットプリント：木材貿易が絶滅危惧鳥類に与える影響」

- 27) 今井葉子、上市秀雄、高川晋一、角谷拓、高村典子：日本生態学会第62回大会（2015）  
「生物多様性に対する市民意識：保全行動を規定する心理的要因」
- 28) 福森香代子、吉崎えり奈、高村典子、角谷拓：日本生態学会第62回大会（2015）  
「リター分解者の種多様性が腐食連鎖の流れを変える：安定同位体比から見た池の食物網」
- 29) 木寺法子、角谷拓、山野博哉、深澤圭太、高村典子、小賀野大一、若林恭史、竹澤真人、長谷川雅美：日本生態学会第62回大会（2015）  
「ニホンアカガエルの個体群衰退をもたらす要因の検討—衛星画像データを用いた要因解析—」
- 30) 松崎慎一郎、角谷拓、中川恵、高村典子：日本生態学会第62回大会（2015）  
「過去30年間に霞ヶ浦で生じた一次生産者の構造と機能の急激な変化とその要因～レジームシフトパターンの分析～」
- 31) 山中武彦、大澤剛士、二橋亮、角谷拓、望月淳、池田浩明、山本勝利：日本生態学会第62回大会（2015）  
「日本の $\gamma$ 多様性を最大化する：どの種を指標種に、何のインデックスを計測するか？」
- 32) 横溝裕行、角谷拓：日本生態学会第62回大会（2015）  
「絶滅危惧植物の減少率と保全効果に関する不確実性に頑健な保全努力の空間配分」
- 33) A.TAKENAKA: Biological Conservation Planning under Uncertainties, 2015  
“Extinction risks and conservation area prioritization for Japanese vascular flora.”
- 34) Y. YOKOUCHI, A. TAKENAKA, Y. MIYAZAKI, K. KAWAMURA and T. HIURA: European Geosciences Union General Assembly, 2015  
“Methyl chloride emission from a fern growing in sub-tropical, temperate and cool-temperate climates.”
- 35) 今井葉子、高川晋一、上市秀雄、角谷拓、高村典子：日本社会心理学会第56回大会，（2015）  
「市民の自然環境保全行動を規定する要因の検討」
- 36) 石濱史子：第63回日本生態学会大会，(2016)  
「情報が欠如した種の分布をどうモデリングするか」
- 37) 西嶋翔太、古川拓哉，角谷拓，石濱史子，T. Kastner，松田裕之，金子信博：日本生態学会第63回大会，(2016)「鳥類の絶滅リスクを抑えるための木材生産・消費シナリオの探索」
- 38) 竹中明夫、石濱史子：日本生態学会第63回大会，(2016)  
「コンパクトな保護区の背景にある群集構造」
- 39) 吉岡明良、深澤圭太、三島啓雄、佐々木恵子、角谷拓：日本生態学会第63回大会，(2016)  
「類似度を考慮した景観不均一性指数の提案～耕作放棄の影響の評価のために」

**（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

- 1) 第1回にじゅうまるプロジェクトパートナーズ会合 愛知目標19分科会において講演 (主催: 国際自然保護連合日本委員会、2014年2月16日、大阪府立大学 I-siteなんば、参加者約20名)
- 2) 第2回にじゅうまるプロジェクトパートナーズ会合 全体会合において講演 (主催: 国際自然保護連合日本委員会、2016年2月21日、名古屋大学 野依記念学術交流館、参加者約20名)
- 3) 日本生態学会第63回大会 「みんなのジュニア生態学講座: 高校生と研究者の交流会」において講演 (主催: 日本生態学会、2016年3月21日、参加者約50名)

#### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 読売新聞 (2014年6月20日、全国版、朝刊、2面)
- 2) 朝日新聞 (2014年6月18日、全国版、夕刊、2面)
- 3) 成果の記者発表(2014年6月16日、於独立行政法人国立環境研究所)

#### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

#### 8. 引用文献

- 1) 小川みふゆ、竹中明夫、角谷 拓、石濱史子、山野博哉、赤坂宗光: 保全生態学研究, 18, 69-76 (2013), 植生図情報を用いた全国スケールでの土地利用図の作成
- 2) T. KADOYA and I. WASHITANI: Agriculture, Ecosystems and Environment, 140 (1-2), 20-26 (2011), The Satoyama Index: a biodiversity indicator for agricultural landscapes.
- 3) SJ. PHILLIPS, RP. ANDERSON and RE. SCHAPIRE: Ecological Modelling, 190, 231-259 (2006), Maximum entropy modeling of species geographic distributions.
- 4) RJ. HIJMANS, SE. CAMERON, JL. PARRA, PG. JONES and A. JARVIS: International Journal of Climatology 25: 1965-1978 (2005), Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas.

#### (4) アジア規模での生物多様性総合評価と自然共生社会への政策提言

九州大学大学院理学研究院

巖佐 庸・矢原 徹一・粕谷 英一

<研究協力者>

九州大学大学院理学研究院

遠山 弘法

平成23～27年度累計予算額：81,230千円（うち平成27年度：14,262千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

アジア規模での生物多様性総合評価と自然共生社会への政策提言をテーマに、4つのグループに分かれ研究を進めた。(1) 社会的要因を考慮に入れた生物多様性保全の総合モデルでは、人々の意思決定と生態系の動態をつなぐ、社会系/生態系結合ダイナミックスの数理的研究を進めた。対象として熱帯林の違法伐採、モンゴルの遊牧民とイネ科草本群落の変動、マイクロファイナンスの安定性などをとりあげた。また孤立保護区の年月による種数減少に関する新しい公式を導いた。(2) アジア規模での生物多様性総合評価とその成果にもとづく政策提言では、プロジェクト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」の目標達成のために、全体の目標・計画、各公募領域の目標・計画を調整し、進捗を管理するとともに到達度を評価し、研究計画および実施体制の改善策を提案した。また、関連分野の研究開発と国際動向について、最新の情報を収集するとともに、最新の研究成果を国内外に発信した。(3) 生物多様性評価手法の統計学的検討では、生物多様性評価手法の重要な部分を成す統計的方法とモデリングについて、妥当性および方法の状況への適不適を数理的および数値計算的な方法により検討した。(4) 種・系統・機能的多様性の総合評価では、森林減少の著しいカンボジア、インドネシア、水質汚染の激しい中国において種多様性・系統的群集構造に影響する、伐採、標高、水質汚濁の効果の大きさと方向性を明らかにした。

#### [キーワード]

政策提言、社会系/生態系結合動態、熱帯林の違法伐採、分布モデリング

### 1. はじめに

#### (1) 社会的要因を考慮に入れた生物多様性保全の総合モデル

これまで生物多様性保全に関しての研究の大部分は、対象と成る生物種や群集、さらには生態系の仕組みを理解すること、つまり自然科学的な研究に振り向けられてきた。社会的な要因を考慮する場合にも土地利用の変遷に関するマルコフ連鎖モデルのように、状態変化をもたらす要因として取り扱うか、いくつかの異なる政策を採る場合にどのような結果がもたらされるかといった議論にとどまっている。

他方で環境経済学や環境社会学における研究は、人々は生物多様性の価値をどのように評価し

ているかを測定するための手法を開発したり、人々の間で合意形成がどのようになされるかを議論したりすることに集中したが、対象と成る自然系を単純化した扱いを行ってきた。しかし生物多様性保全の対象は自然資源であり、それ独自のダイナミックスをもち、しばしば非線形で、予測不可能な変動を示す。

生物多様性保全を実現するにはこれら両者の研究を統合した分野が必要である。つまり、生態系の変動を示すダイナミックスと人々の社会・経済的選択のダイナミックスとが結合した系の挙動を明らかにすることが必要である。

## (2) アジア規模での生物多様性総合評価とその成果にもとづく政策提言

第10回生物多様性条約締約国会議（COP10）が我が国で開催され、生物多様性に関する国内の関心が高まった。国際的には、生物多様性科学の推進を目的とするDIVERSITAS（生物多様性科学に関する国際プログラム）、GEO（地球観測に関する政府間会合）の下での地球規模の生物多様性観測ネットワーク（GEO BON）、CBD（生物多様性条約）に加えて、国際アセスメントをになうメカニズムとして、IPBES（生物多様性・生態系サービスに関する政府間プラットフォーム）が2011年に設立された。2013年には、DIVERSITAS, IGBP, IHDP, WCRPという4つの地球環境プログラムが統合され、新たなプログラム（Future Earth）がスタートした。このような国際的な動きの下で、アジア地域における生物多様性の観測・アセスメントに関する科学的基盤の強化を目標とするプロジェクト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」の成果への関心が国内外で高まり、その成果は国際討議において活用されてきた。

## (3) 生物多様性評価手法の統計学的検討

分布推定の統計モデリングは、新たなデータと課題に対するものであり、必要性のために急速に発展してきたが、使える範囲や方法の妥当性や優劣は未解決の部分が多い。

## (4) 種・系統・機能的多様性の総合評価

これまで生物多様性に影響を与える要因を明らかにする研究の多くは、種多様性のみ注目してきた。本研究では、生物群集の種組成や分布情報に、種の系統情報を併せた集系統学的研究アプローチを用い、種・系統・機能的多様性の総合評価を行う

## 2. 研究開発目的

### (1) 社会的要因を考慮に入れた生物多様性保全の総合モデル

生物多様性保全を実現する上に必要な社会要因まで考慮に入れた政策提言を行うことをめざす。そのため、他サブグループによる自然科学的な研究の成果にもとづいた情報をもとに、社会要因をどのように取り込むのか、また生物多様性保全に関してどのように管理を行うのが社会経済学的に望ましいのか（ガバナンス）、について研究成果を組み入れることによって、保全を実現することが可能な政策の提言を行う。

### (2) アジア規模での生物多様性総合評価とその成果にもとづく政策提言

プロジェクト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」の各領域

から得られた成果を総合するとともに、関連分野の研究開発と国際動向について最新の情報を収集し、生物多様性の保全と持続的利用に資する政策オプションを提言する。

### (3) 生物多様性評価手法の統計学的検討

分布推定の統計モデリングは、各種の方法が使われているが、必要に応じて他の分野で使われている方法が修正されて使われたり、新たな方法が考案されたり、また別々に発展してきた複数の方法が組み合わされたりしており、それ自体が発展途上の技術の集積である。その方法としての妥当性は必ずしも明らかではないことも多く、解析法の適用可能範囲や条件に応じた適不適を明確にすることは、生物多様性評価のうえで必要である。

### (4) 種・系統・機能的多様性の総合評価

生物群集の種組成や分布情報に、種の系統情報を併せた集系統学的研究アプローチを用い、種・系統・機能的多様性の総合評価を行う。熱帯林の減少が著しいカンボジアにおいては伐採の効果に注目し、多様性や群集の機能的性質（常緑林 or 乾燥落葉林）に対する影響を系統的な側面から評価する。1400m以下に森林が残っていないインドネシア・ゲデ山では、現状の多様性評価をするとともに、標高の系統的多様性や系統的群集構造に対する影響を評価する。水質汚染が著しい中国では、水草の系統的多様性や系統的群集構造に対する水質悪化の影響を評価する。

## 3. 研究開発方法

### (1) 社会的要因を考慮に入れた生物多様性保全の総合モデル

研究担当者はこれまで森林伐採と湖水の水質汚染を対象として基本的理論ベースを構築してきた。今回はこの成果にもとづいて生物多様性保全に関わる施策の社会的実現可能性を明らかにする社会／生態結合動態モデリングを進める。

#### 1) 熱帯林における違法伐採の進化ゲーム理論による解明

熱帯地域の森林生態系の最大の脅威のひとつが、違法伐採である。保護区に指定されても取り締まるべき役人が賄賂を受け取り、黙って見過ごす事によって大面積が開発されてしまう。林業者のタイプと監視者にいくつかのタイプを考え、どのような状況で違法伐採がはびこるのかを解明した。（国際システム分析研究所のDieckmann教授、Sigmund教授、九大の李貞憲助教との共同研究）

#### 2) モンゴル遊牧民の社会系／生態系結合動態の研究

モンゴルの南部では乾燥が激しい季節に、大きな群れを持つ遊牧民は北部の湿潤な地域に移動し、残りは留まる。この結合動態をダイナミックスとして初めてモデル化した。どのような条件で生態系の激しい変動が生じるかを明らかにした。（東京大学農学部、大黒俊哉教授、柿沼薫博士、九大の李貞憲助教との共同研究）

#### 3) 孤立した生息地における種数の減少に関する中立群集モデルの公式

連続した森林の一部を保護区として残し、他を開発した場合には、最初に種数が減少するのに加え、非常に長期にわたって種数の減少がつづく。これは数十年からと数百年、また大きな島では数千年単位で生じる。この現象についての新しい公式を導出し、島における鳥類の種数で検証した。（ギリシャのイオアニナ大学のJohn Halley教授との共同研究）

#### 4) 協力の維持と進化に関する数理的研究

生態系の保全や生物資源種の乱獲の克服は、自らの利益を抑え、長期にわたる共同体の利益を優先する「協力」行動と見なせる。それを実現するためのメカニズムのいくつかについて研究した。まず間接互惠により他人に行動を知られ評判を落とす事を避ける機構（Harvard大学Nowak教授、総研大大槻 久講師との共同）、グラミン銀行のようなマイクロファイナンスは、環境保全にとっても重要なツールと考えられている。その安定性について解明した（九大のMarko Jusup博士、李貞憲助教等との共同研究）

#### (2) アジア規模での生物多様性総合評価とその成果にもとづく政策提言

- 1) プロジェクト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」全体会議・領域会議などを通じて、各領域から得られた成果を把握する。
- 2) 論文レビューを通じて関連分野の研究動向を把握する。
- 3) IPBES, CBD, Future Earth, GEO BON, AP BON, GEOSS APの会議を通じて国際動向を把握する。
- 4) これらを通じて得た成果や情報をもとに、政策担当者と協議を行いながら、生物多様性の保全と持続的利用に資する政策オプションを提言する。

#### (3) 生物多様性評価手法の統計学的検討

- 1) 分布推定の統計モデリング(分布モデリング)の方法のうち、代表的なものである、GLM, GAM, GBM, MaxEnt, Random Forestについて、土地利用、気候条件、地形などの環境データの誤差が分布の推定に与える影響をコンピューターシミュレーションにより検討した。とくに土地利用を意識して、完全に量的なデータが記録されず、たとえば強・中・弱などいくつかの段階（スコア）でだけ記録されていることにより生じる誤差の影響を検討した。
- 2) 統計モデル及び分布推定モデルなど、説明変数が分布に与える影響を量的にモデル化する際、モデリングの良さを評価する基準が複数ある。それぞれの基準についてまとめ、検討した。
- 3) 統計モデルや分布推定モデルなど広い分野で頻繁に使用される説明変数のセンタリングの影響を検討した。センタリングとは予め目的変数以外の変数の平均をゼロにしておくという操作である。モデル内に変数の一次の項、二次の項、三次の項、交互作用項が含まれるケースで、センタリング前後の各変数の回帰係数およびモデルの最大対数尤度、デビアンズ、AICの変化から、センタリングの実質的な影響やその有無について評価した。
- 4) 生物の種の分布モデルを決定する際に、AIC（赤池情報量規準）が小さいモデルを選ぶことにより、種の分布や存在/不存在に影響する要因を正しく特定できるかをコンピューターシミュレーションにより検討した。単一の要因が影響しているか影響していないかを問題としている単純な状況だけでなく、複数の要因が影響している状況も想定して検討した。またAICの差に閾値を設け、他のモデルに比べて単にAICが小さいだけではなく小さくかつ差が閾値を越えている場合に限りモデルを採用する方法についても検討した。
- 5) 生物の分布モデルのパラメータ推定において、AICやBIC（ベイズ情報量規準）によって多くの候補モデルの中から統計モデルを絞り、次に絞られたモデルを使って推定を行う手順が、パラメータの推定誤差等に与える影響をコンピューターシミュレーションにより検討した。
- 6) 生物の種の分布に影響する要因の影響を検定する際に、まずAICやBICを使って統計モデルを

絞り、次に絞られたモデルを使って検定するという手順が、有意水準を正しく評価した妥当な方法であるかを、コンピューターシミュレーションにより検討した。

#### (4) 種・系統・機能的多様性の総合評価

1) カンボジア、Kampong Thomにある32固定試験地でDNA barcodingと文献調査による種同定、及び系統的多様性の評価、系統的群集構造、群集の機能的性質（常緑林or 落葉乾燥林）に対する森林動態の効果を評価した。種同定のために、rbcLとmatKの葉緑体領域をシーケンスし、BLAST検索で科属レベルまでの同定を行い、その後、文献標本調査を行った。系統的多様性・系統的群集構造の評価のために、1998年、2000年、2004年、2010年の4回計測が行われている32固定試験のプロットデータを用いた。多様性・系統的群集構造の変化に対する森林動態の効果をみるために、一般化線形混合モデルを用いて検定を行った。群集の機能的性質（常緑林 or 落葉乾燥林）に対する森林動態の効果を明らかにするために常緑林の乾燥落葉林に対する系統的距離を計算した。ここでは、常緑林で違法伐採があると、系統的に乾燥落葉林と近くなり、リクルートがあると系統的に乾燥落葉林と遠くなるという検証を検証した。常緑林の乾燥落葉林に対する系統的距離への森林動態の効果を一般化線形混合モデルで検定した。

2) 生物多様性が高いにも関わらず森林減少が著しいインドネシアで植物多様性の総合評価を行った。特に、森林が1400m以下にほとんど残っていないゲデ山に注目した。種同定のために、rbcLとmatKの葉緑体領域をシーケンスし、BLAST検索で科属レベルまでの同定を行い、文献標本調査を行った。種多様性・系統的多様性に対する標高の効果を明らかにするため、標高1460～3030 mの標高勾配に沿って16の調査プロット（100×4 m）を設け、生育植物をすべて記録した。群集内種間の系統関係に対する標高の効果を明らかにするため、プロットごとに種間の平均系統距離（MPD）を計算した。群集間の系統関係に対する標高の効果を明らかにするためプロット間の系統的距離行列を基にクラスター解析を行い、標高帯間の系統的な類似性を求めた。また、プロット間の標高差と系統的距離の関係を調べるためにMantel's testを行った。

3) 近年、水質汚染が進んでいる中国チャオシー川の植物多様性の評価を行った。具体的には河口から47の調査プロット（50×2 m）を設置し、生育している植物種をすべて記録した。また同地点で、水質に関わる22項目（Turbidity、Depth、pH、Temp、DO\_mgL、Chl\_a、SS\_mgL、N03\_N、NH4\_N、PO4\_P、As、Se、Zn、Pb、Co、Cd、Ni、Mn、Cr、V、Cu、Al）を測定した。水質データの共線性を除くために主成分分析を行った。種同定のためにrbcLとmatKの葉緑体領域をシーケンスし、BLAST検索で科属レベルまでの同定を行い、その後、文献標本調査による種同定を行った。種多様性・系統的多様性に対する水質の効果を明らかにするため、階層ベイズモデルを用いた。群集内種間の系統関係に対する水質の効果を明らかにするために、プロットごとに種間の平均系統距離（ $\alpha$ MPD）を計算した。また、 $\alpha$ MPDに対する水質の効果をみるために、階層ベイズモデルを用いた。群集間の系統関係に対する水質の効果を明らかにするために、プロット間の地理的距離、水質の差（PC1、PC2、PC3）と系統的距離（ $\beta$ MPD）間でMantel's testを行った。すべての変数に対し系統的不確実性を考慮した解析を行った。

4) カンボジアにはKampong Thom地域以外にも、Koh Kong、Siem Reap、Kratie、Ratanakiriにそれぞれ0.25 ha×20プロットずつある。カンボジア全土での多様性評価に向けて、すべてのプロット樹種のDNAバーコーディング領域rbcLとmatKのシーケンスを行い、文献標本調査による種同定を

行った。また、Bokor国立公園の種同定も並行して進めた。その中で2種の新種を発見したので新種記載を行った。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 社会的要因を考慮に入れた生物多様性保全の総合モデル

###### 1) 熱帯林における違法伐採の進化ゲーム理論による解明

違法伐採がはびこり、役人の多くが賄賂を受け取る状態と、違法伐採がなく役人の賄賂が見られない2つの状態が安定であり、歴史的経緯によって何れかにいくことがわかった。違法伐採が存在しない最終状態に向かう領域を大きくするには、汚職に関わる役人についての情報共有と役人の教育が重要であることがわかった（林業者についての教育はほとんど効果がない）。

###### 2) モンゴル遊牧民の社会系／生態系結合動態の研究

広いパラメータ領域で、自律的に大きな振幅をもって変動することがわかった。通常、環境条件がそのような大きな変動をもたらすと考えられているが、実際には、遊牧民の遊牧地域選択により、大きな振動が生じる可能性がある。またそれを避けるには、全ての場所の生態系に関する情報が遊牧民に広く共有されていることが有効であることが示された。

###### 3) 孤立した生息地における種数の減少に関する中立群集モデルの公式

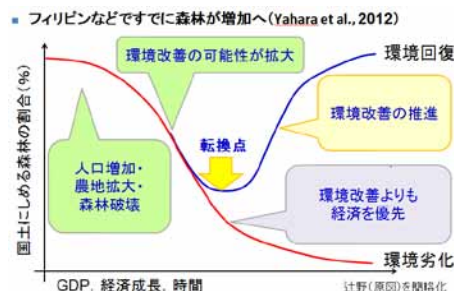
連続した森林の一部を保護区として残し、他を開発した場合には、最初に種数が減少するのに加え、非常に長期にわたって種数の減少がつづく。これを考慮すると、保護地域の選定において、現在底に存在する種数をカバーできるように選ぶとする方策ではなく、むしろできるだけ多数の全個体数を安定に維持できるようにこれは数十年からと数百年、また大きな島では数千年単位で生じる。この現象についての新しい公式を導出し、島における鳥類の種数で検証した。

###### 4) 協力の維持と進化に関する数理的的研究

これらの一連の研究は、環境保全を実現するにあたって、ステークホルダ、とくに地域住民や地域政府の協力を得るためには最も必要なことである。生態系に残っている種数を推定して、そこを保全地域としたとしても、実現されるかどうかはわからない。協力の維持成立のメカニズムとして理解することが有効であると考えられる。

##### (2) アジア規模での生物多様性総合評価とその成果にもとづく政策提言

1) 生物多様性条約第10回締約国会議（COP10）で2010年に合意された戦略計画は、愛知ターゲットとして知られる2020年までの20の短期目標と、「2050年までに、生物多様性が評価され、保全され、回復され、そして賢明に利用され、そのことによって生態系サービスが保持され、健全な地球が維持され、全ての人々に不可欠な恩恵が与えられる」という長期目標からなる。アジア規模での両者の関係と達成可能性について、森林面積のトレンドや人口動態をもとに以下の提言を行った。アジアでは、日本・中国・ベトナム・フィリピンのように森林面積が増加に転じた国と、カンボジア・マレーシア・インドネシアのように森林面積が減り続けている国がある。この違いを説明するモデルと



図(4)-1 環境クズネツ曲線

して、環境クズネツ曲線仮説（図(4)-1: 経済が発展し、国の主力産業が農業から農業以外へとシフトし、人口の都市への集中化が進めば、一度農地に転換された場所が森林に戻る条件が生まれ、森林回復が進むとする仮説）がある。この仮説は常に成り立つとは限らないが、2050年に向けての将来シナリオとしては有力である。なぜなら、カンボジア・マレーシア・インドネシアのように森林面積が減り続けている国では、一方で人口が増加を続けているが、現在の人口ピラミッドと年齢別出生率をもとに将来の人口を予測すると、2050年ころにはこれらの国においても人口増加が止まるからである。この傾向を大きく規定しているのは女性一人当たりの子供の数が一貫して減少し、すでに2に近いことである（近い将来2を下回ると予想され、2を下回れば人口はやがて減少する）。このトレンドを念頭に置けば、カンボジアなどのように現在人口が増え、森林が減少している国でも、2050年ころには現在の日本のように、人口が減り、森林が回復する状況が期待できる。これらの国々において現在残されている森林の生物多様性について調査を進め、調査結果を還元し、能力開発を支援することが、日本に可能な重要な国際貢献である。

2) 一方で、日本は木材・紙・パーム油などの輸入を通じて、マレーシア・インドネシアなどの森林減少に大きく関与している。マレーシア・インドネシアでは、国立公園などの保護区以外に残されている森林の多くは企業が管理する保護林であり、これらの保護林が残っていくかどうかで東南アジア熱帯林の生物多様性の運命は決まると言っても過言ではない。保護林管理の能力開発、森林認証制度の活用・改革など、日本が可能な政策オプションを通じて、日本がアジア諸国の生物多様性にかけている負荷（生物多様性フットプリント）を軽減する努力が重要である。

3) 東南アジア諸国の国立公園や保護区では、一部の動物（哺乳類や鳥など）を除いて生物多様性調査が遅れている。国立公園や保護区での調査を進め、図鑑の作成などを通じて能力開発を支援することは、日本に可能な重要な国際貢献である。S9はこの点で確実な成果をあげた。

4) 以上のような政策オプションを通じて、2010年に合意されたCBD戦略計画が掲げる「自然共生社会」の実現に貢献することができる。「自然共生社会」については、その科学的裏付けについて英語で書かれた文書がなかったので、IPBES概念枠組みに関する共著論文（Diaz et al. 2015）の中で以下の記述を行い、この概念の背景を国際的に発信した。

For example, the concept of Living in harmony with nature — which was initially presented in international discourse at the United Nations in 1982, but then largely ignored until recently — has been adopted as vision by the Convention on Biological Diversity and used in its Strategic Plan for Biodiversity 2011–2020 and the Aichi Targets (<http://www.cbd.int/decision/cop/?id=12268>). This concept appears already in early colonial sources describing indigenous populations in the Andes [40]. Over time, it has come to highlight the interdependence that exists among human beings, other living species and the elements of nature. It implies that we should live together with all other organisms respectfully even though we need to exploit some of these organisms to a certain degree. This concept was originally proposed to the Convention on Biological Diversity by Japan. The original Japanese term (shizen kyosei shakai) literally means society in symbiosis —or living together — with nature, not only with mutual benefit but also with relationships which are necessarily detrimental for one of the parties, but which should be made sustainable [41].

41. Yahara T: History of the human use of environment over 50,000 years and lessons toward "Shizen Kyosei Shakai" (society in harmony with nature). In What is Environmental History?. Edited by Yumoto T,



Yahara T, Matsuda H. 2011:75-104. Bun-ichi Sogo Shuppan (in Japanese).

### (3) 生物多様性評価手法の統計学的検討

1) 予測精度を表すAUCで比較したところ、環境変数をそのデータの最大値に基づいて等量間隔でスコアの範囲を設定した場合、および0を最少スコアとして、残りの0より大きいデータを最大値に基づいてスコアの範囲を設定した場合は、**GAM, GBM, GLM, MaxEnt, Random Forest**のいずれの手法でも環境変数のスコアの数が少ない時に予測精度の低下度合いが大きかった。また、スコアの増加とともに予測精度の低下が軽減された。一方で、各スコア内に等量のデータ数を含む等量変換ではスコアが0~1の2値でも0~9までの10段階でもほぼ予測精度に差はなかった。環境データがスコアのような粗い精度でしか得られない場合でも、各スコアに等量のデータが含まれるように設定することで予測精度の低下を軽減させることができる。スコアの細かさが予測精度に貢献しないので、0~1のような二値データでも十分である。

2) 分布予測の精度を最適にする場合にはAUCが使える、また問題によってはAIC(赤池情報量規準)のような指標が適切な場合もある。一方、分布モデルをあてはめ、個別の環境変数が分布に影響しているかを評価する際には、予測最適化の際には適切だった指標が適切ではなくなることがある。これはデータの数が少ないときだけでなく、データが多くても起こる(データ数が無限大でも同様)。したがって、目的に合った適切な指標を使う必要がある。変数の影響の評価に広く使われている統計的検定の有意確率は、データ数が有限であるために生じるサンプリングエラーと観察された効果を比べるものであり、個別の環境変数が分布に影響しているかを評価する際にも有効な場合がある。環境変数が分布に影響しているかの評価には、**Bayes factor**などの方法も直感的に解釈しやすい指標を与えるので、有効な場合がある。

3) モデルは、まずセンタリング前後の2つのモデルが表すものが実質的には変わらない一致型と実質的に異なる不一致型に分けられる。高次の交互作用や高次の項を含んでいながら、それより低次の項を含んでいないモデルは不一致型になる。一致型では、センタリング前後で、データ点とモデルの相対的な関係は変わらず、最大対数尤度は等しく、したがって **AIC** やデビアンズも等しい。一致型では、最高次の交互作用の係数はセンタリング前後で変わらない。また、一致型では、説明変数の値が標本平均のときの、ある説明変数だけの変化が目的変数の期待値に与える変化の率は、センタリング後のその説明変数の主効果の係数に等しい。一致型は、ある説明変数だけの変化が目的変数の期待値に与える変化の率の全データ点についての平均がセンタリング後のその説明変数の主効果の係数に等しいかどうかにより2つに分かれる。最高次の交互作用が2元までの場合には、平均とセンタリング後のその説明変数の主効果の係数が等しい一致型になる。最高次の交互作用が3元の場合には、平均とセンタリング後のその説明変数の主効果の係数が等しくない一致型になる。

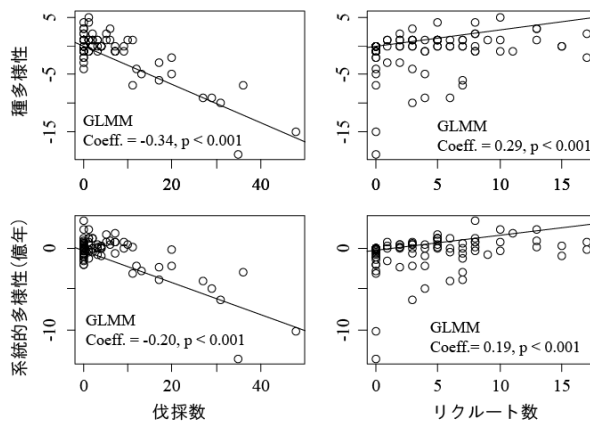
4) **AIC**が小さいモデルを選ぶことにより、実際には影響を与えていない要因を誤って影響していると評価してしまう確率は一般的に約15%あり、この誤評価率はデータ量に関わらなかった。誤評価の確率は候補モデルが多い場合でより大きくなることが示された。また、**AIC**の差に閾値を設定することでは、誤評価の確率を軽減できないことが示された。影響している要因の特定に**AIC**を用いることは、**AIC**本来の目的とは乖離したものであり、また誤評価の確率が大きく、適切ではないことが明らかとなった。

5) AICやBICによって統計モデルを絞りそのモデルを用いて推定すると、パラメータの推定誤差(標準誤差)が実際の推定誤差を示さなくなること、またパラメータの推定誤差を知るためにはパラメータの真の値が必要であることが明らかとなった。推定を行なうのはパラメータの真の値がわからないので、実際は推定を行なっても推定精度に関する情報が得られず、通常、推定の精度を表すものとして使われている標準誤差が信用できないことになる。また、パラメータが中間的な値をとるときに、単純な最尤推定よりもAICやBICでモデルを選んだ後の推定の方が誤差が大きい場合があることが明らかになった。AICやBICでモデルを絞ってから推定を行うことは、推定精度の点から望ましくないことが示された。

6) AICやBICを使って統計モデルを絞った後にそのモデルを使って検定を行うと、設定した有意水準(たとえば5%水準)に比べて、実際には効果の無い場合に誤って帰無仮説を棄却する確率が大きくなり、検定が妥当ではない領域が生じることが明らかとなった。AICやBICによってモデルを絞ってから検定することは、妥当性を持つとは言えず、適切ではないことが示された。

#### (4) 種・系統・機能的多様性の総合評価

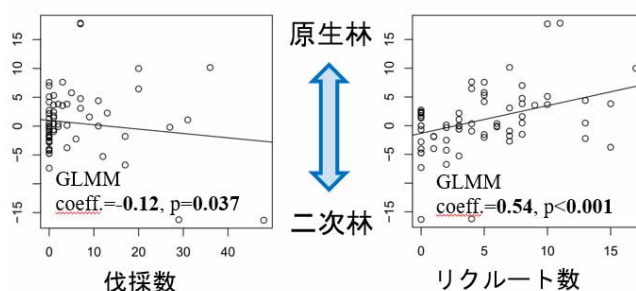
1) DNA barcodingと文献調査による種同定により、コンポントムにある32固定試験地で325種の同定を行うことができた。DNA barcodingによる種同定効率は科レベルでは100%、属レベルでは75%、種レベルでは15%であった。科属レベルでの同定効率は高いため、Flora調査が不十分な地域での種同定に非常に有効な方法であることが分かった。多様性に対する森林動態の効果を見ると、種多様性・系統的多様性は伐採によって減少し、リクルートによって増加した(図(4)-2)。



図(4)-2 種多様性・系統的多様性

また、伐採は街から近いほど、森林局から遠いほど行われていた。今後の系統的多様性保全のためには、街の近くでの違法伐採を取り締まり、森林局を増やし見回り頻度を増加させることで伐採を減少させ、森林のリクルートを促すことが必要である。系統的群集構造に対する森林動態の効果を見ると、伐採があると森林は系統的に偏った分類群で構成されるようになり、リクルートがあると系統的に多様な分類群で構成されるようになることが分かった。系統的に多様な森林を維持するためには伐採を取り締まり、森林のリクルートを促す必要があることを示唆する。群集の機能的性質(常緑林 or 乾燥落葉林)に対する森林動態の効果を見ると、原生林での伐採は乾燥林との系統的距離を減少させ、原生林でのリクルートは乾燥林との系統的距離を増加させるこ

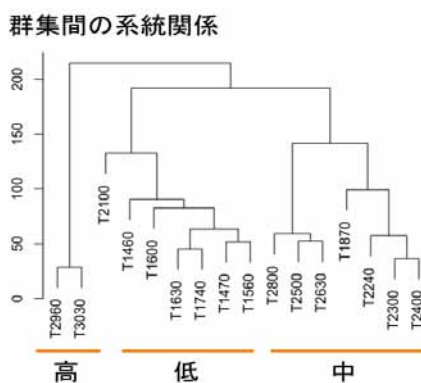
とが分かった（図(4)-3）。このことは、常緑林、乾燥落葉林といった群集機能の維持には、常緑林におけるリクルートを促す必要があることを示唆する。



図(4)-3 原生林の乾燥落葉林に対する平均系統距離

2) DNA barcodingと文献調査によって、森林減少が著しいインドネシア・ゲデ山に生育する145種の同定を行うことができた。種多様性・系統的多様性は標高が上がるにつれて減少した。

これは先行研究を支持するものである。系統的群集構造に対する標高の効果を見ると、標高2960 m、3030 mの植物群集は系統的に偏った分類群で構成されており、1870 m、2300 mの植物群集は系統的に多様な分類群で構成されていた。一般に、高標高下では環境制約が大きくなり、環境に適応的な近縁種が生育する。本研究でも高標高下では環境制約が強く働き偏った分類群で群集が形成されていた。一方、中標高下では環境制約よりも近縁種間の競争排他が強く働いた為、系統的に多様な分類群で構成されていると考えられる。群集間の系統関係を解析したところ、近い標高帯プロットが系統的に近かった（図(4)-4）。また、プロット間の標高差と系統的距離の相関が強く、標高によって系統的な置換が生じていた。これは各標高帯での保全が必要であることを示唆する。



図(4)-4 調査プロット間の系統関係

3) 中国チャオシー川の植生調査の結果、日本では絶滅危惧種に指定されている植物がアオコの中に生育していた（図(4)-5）。水質データの主成分分析の結果、第3主成分までで分散の74.1%を説明した。PC1の増加は濁度、重金属の増加を示しており、水質汚濁の程度を示していた。PC2の増加はクロロフィルaの増加、溶存酸素量の増加を示しており、アオコ量を反映していた。PC3の増加は酸化による最終生成物NO<sub>3</sub>-Nの増加を示しており、汚染されてからの時間を反映していた。DNA barcodingと文献標本調査によりチャオシー川に生育する47種の同定を行うことができた。階層サイズモデルによる検定の結果、種多様性（SR）、系統的多様性（PD）、個体数で重みづけし

た系統的多様性 (PDab) はPC1 (水質汚濁)、PC2 (アオコ量) の増加に伴い減少した。系統樹の不確実性を考慮した解析を行ったところ、PDabに対するPC2の効果が27% (2457/9000) の系統樹で有意でなくなった。このことは系統的多様性の解析において系統樹の不確実性を考慮する必要があることを示す (表(4)-1)。



図(4)-5 チャオシー川河口域の様子

表(4)-1 種多様性 (SR)、系統的多様性 (PD)、重みづけPD (PDab) に対する水質の効果  
括弧内は、系統樹のトポロジーの不確実性による係数とp値の範囲。

		係数	p値
SR	PC1	-0.13	<0.001
	PC2	-0.14	<0.001
	PC3	0.024	0.59
PD	PC1	-0.099 (-0.11 – -0.089)	<0.001 (<0.001)
	PC2	-0.10 (-0.11 – -0.096)	0.004 (<0.001 – 0.032)
	PC3	0.011 (0.0043 – 0.021)	0.77 (0.50 – 0.90)
PDab	PC1	-0.13 (-0.13 – -0.12)	<0.001 (<0.001– 0.002)
	PC2	-0.097 (-0.10 – -0.087)	0.032 (0.006 – 0.088)
	PC3	-0.043 (-0.052 – -0.038)	0.40 (0.27 – 0.47)

7つの調査プロットにおいて、群集は系統的に偏った分類群で構成されていた。このことは水草群集の組成を決めるうえで、競争排他よりも環境による制約が相対的に重要であることを示唆する。階層ベイズモデルによる検定結果、個体数で重みづけした群集内種間の系統距離 (MPDab) はPC1、PC2の増加に伴い減少した。また、系統樹の不確実性は結果に影響しなかった (表(4)-2)。以上のことは水質汚濁、アオコの量の増加に伴い水草群集は系統的に偏った分類群で構成されるようになることを示し、群集内の多様性の維持、増加のためには水質改善が必要とされることを示唆する。群集間の系統距離と地理的距離の相関解析を行ったところ、系統的な置換わりが地理的距離、アオコの量によって生じていることが分かった。

表(4)-2 群集内種間の系統関係 (MPD)、個体数で重みづけしたMPD (MPDab) に対する水質の効果  
括弧内は、系統樹のトポロジーの不確実性による係数とp値の範囲。

		係数	p値
MPD	PC1	-0.014 (-0.021 – -0.0094)	0.29 (0.17 – 0.52)
	PC2	-0.028 (-0.039 – -0.017)	0.27 (0.12 – 0.54)
	PC3	0.0087 (0.0027 – 0.016)	0.75 (0.61 – 0.93)
MPDab	PC1	-0.085 (-0.091 – -0.073)	<0.001 (<0.001)
	PC2	-0.083 (-0.094 – -0.075)	<b>0.010 (&lt;0.001 – 0.004)</b>
	PC3	0.036 (0.027 – 0.043)	0.33 (0.21 – 0.48)

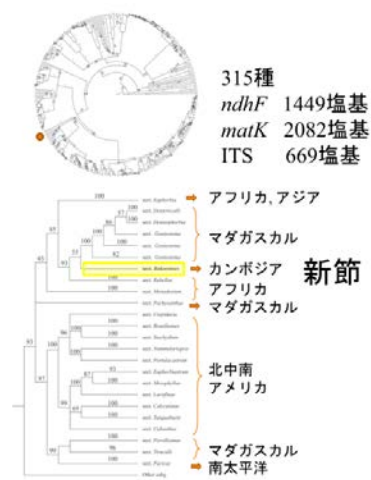
4) カンボジア、Koh Kong州で306個体、Siem Reap州で289個体、Kratie州で106個体、Ratanakiri州で296個体において $rbcL$ と $matK$ の配列を決定した。Kratieにおいては同定作業を終え、27科を含む83種がプロット内で生育していた。Bokor国立公園で採集された*Garcinia* (フクギ属、図(4)-6)と*Euphorbia* (トウダイグサ属、図(4)-7)の2種が新種だったので新種記載を行った。特に*Euphorbia*は、形質比較と系統解析の結果、これまで知られているどの節にも属さずアジアの種ではなくアフリカの種に近縁で、新種とともに新節の記載も行った (図(4)-8)。



図(4)-6 *Garcinia*新種



図(4)-7 *Euphorbia*新種



図(4)-8 *Euphorbia*系統解析

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

#### 1) 社会的要因を考慮に入れた生物多様性保全の総合モデル

##### a. 熱帯林における違法伐採の進化ゲーム理論による解明

熱帯林の違法伐採は、熱帯生態系の保全に最も大きな脅威である。我々の進化ゲーム理論は、違法伐採の跋扈する条件についての世界初の数理モデリングである。違法伐採が広く行われる状態とほとんど行われない状態のいずれもが安定であり、歴史的事情で何れかになること、また違法伐採が存在しない最終状態に向かう領域を大きくするための施策について考察した。

##### b. モンゴル遊牧民の社会系/生態系結合動態の研究

草原生態系は雨量が大きく変動するために不安定だと理解されてきた。我々は遊牧民がより望ましい放牧地を選択するプロセスを考慮したダイナミクスにより、大きな変動が人の選択から作り出される可能性を始めて明らかにした。非線形力学を取り込んだ進化ゲーム理論の成果であり、均衡状態を強調する旧来のゲーム理論では取り扱えない側面といえる。

### c. 孤立した生息地における種数の減少に関する中立群集モデルの公式

連続した森林の一部を保護区として残し、他を開発した場合には、最初に種数が減少するのに加え、非常に長期にわたって種数の減少がつづく。このことから、保護地域の選定において、現在そこに存在する種数をカバーできるように選ぶとする方策ではなく、むしろできるだけ多数の全個体数を安定に維持できるようにすることが望ましいといえる。

### d. 協力の維持と進化に関する数理的研究

間接互惠や違法者への処罰のやり方、マイクロファイナンスの安定性などさまざまな新しい発見を行った。これらは環境保全を実現するにあたって、地域住民などの協力を得て正多物多様性保全を実現する上で重要であろう。

## 2) 生物多様性評価手法の統計学的検討

本研究では、精度の粗い環境データが統計モデルによる分布推定にどの程度悪影響を及ぼすかを評価するとともに、環境データの精度が低い場合には、各階級値に同数のデータ数（メッシュ数）が入るような取得の仕方をするすることで、予測精度の低下を防げることを明らかにした。

AICは予測の最適化の基準であるにも関わらず、正しいモデルを選ぶという目的で誤用されていることが多い。統計的検定とAICによるモデル選択の違いを改めて明確に区別することで、今後のモデリング使用者の基礎的な誤りを減らすことに貢献する。

幅広い分野で使用されるセンタリングという操作が、解析結果を変化させてしまうケースを特定した。これは今後の統計モデル、分布予測モデルについて有用な知見である。

AICやBICなどの情報量規準によるモデル選択と推定・検定の併用は、種の分布解析でしばしば行なわれているが、これは推定精度がわからなくなることに加えて、単純な推定よりも推定誤差が大きくなることもある。また、検定においては、効果の無い場合に誤って帰無仮説を棄却する確率を過小評価する場合がある。検定・推定のいずれにおいても、情報量規準によるモデル選択と併用した場合には妥当性を欠くため、別の根拠を確立することが求められる。

## 3) 種・系統・機能的多様性の総合評価

a. カンボジア森林プロットでの群集系統解析を通して、種多様性・系統的多様性の変化をもたらす要因を明らかにすることができた。特に、常緑林での伐採は、乾燥林との系統的距離を小さくし、反対にリクルートは乾燥落葉林との系統的距離を大きくすることが分かった。このことは、常緑林、乾燥落葉林といった群集機能の維持には、常緑林におけるリクルートを促す必要があることを示唆する。

b. インドネシア・ゲデ山の標高勾配に沿った植生調査・多様性評価により、どの標高帯で種多様性・系統的多様性が高いのかを明確に示すことができた。また、群集系統解析を通して、標高ごとの種組成に関わる競争排他と環境制約の相対的な重要性を明らかにすることができた。

c. 中国チャオシー川の水質勾配に沿った植生調査・多様性評価を行ったことで、どの場所で種多様性・系統的多様性が高いのかを明確にできた。また、群集系統解析を通して、競争排他よりも環境制約が水草群集の組成に重要であることを示すことができた。さらに、水草多様性



に対する水質の効果において、系統樹のトポロジーによって結果が変わった。先行研究の多くは、系統樹の不確実性を考慮したうえでの解析を行っていないので、誤った評価をしている可能性がある。今後、系統的多様性評価を行う際には、結果の頑健性を確かめる必要がある。

d. カンボジアは植物相調査が他国に比べて遅れている国の一つである。本研究を通して、カンボジアのプロット樹種997個体のシーケンスを行い、プロット樹種の同定を進め、また、2種の新種記載を行った事で、カンボジアの植物相の解明に貢献することができた。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

「生物多様性国家戦略2012-2020」第4章第2節基本戦略4「地球規模の視野を持って行動する」において、本研究からの政策提言にもとづいて、以下の記述が盛り込まれた。

「【国際協力】わが国は、食料や木材などの資源の多くを海外から輸入しており、他国の生物多様性を利用しているという視点に立ち、地球規模での生物多様性保全に貢献する必要があります。」

### <行政が活用することが見込まれる成果>

現在人口が増えて森林面積が急減しているカンボジア・インドネシアなどで、2050年には人口増加が止まり、森林を回復させ得る条件が生まれるというシナリオは、日本政府が提案し国際合意となった生物多様性条約戦略計画の長期目標を裏付けるものであり、2050年までの生物多様性条約に関わる政策の基本的視点として活用されることが見込まれる。

## 6. 国際共同研究等の状況

### (1) 社会的要因を考慮に入れた生物多様性保全の総合モデル

孤立した島状の生息地における種数の減少に関する中立群集の理論的研究に関してはギリシャのIoannina大学のJohn Halley教授やそのグループとの共同研究を進めた。協力の進化成立に関する間接互惠の研究は米国ハーバード大学のMartin Nowak教授のグループと進めた。

### (2) アジア規模での生物多様性総合評価とその成果にもとづく政策提言

IPBES, CBD, Future Earth, GEO BON, AP BON, GEOSS APの関係者と国際会議やメールを通じて共同研究や討議を進め、IPBESにおいては概念枠組みに関する論文 (Diaz et al. 2015)に共著者として加わり、AP BONにおいては2冊の著作を出版し、それぞれにおいて基調となる章 (Yahara et al. 2012, 2014) を執筆した。

### (3) 種・系統・機能的多様性の総合評価

カンボジアにおける多様性評価研究では、カンボジア森林局のHeng Sokh博士、Phourin Chhangさん、Vanna Samrethさん、Vuthy Maさんと共同研究を進めた。インドネシア、ゲデ山における多様性評価研究では、Herbarium Bogoriense-LIPIのArief Hidayat博士、Asep Sadili博士、Marlina Ardiyani博士、Dedy Darnaedi博士と共同研究を進めた。また、中国チャオシー川における多様性評価研究では、同済大学のJianhua Li博士と共同研究を進めた。



## 7. 研究成果の発表状況

## (1) 誌上发表

## &lt;論文(査読あり)&gt;

- 1) JH. LEE and Y. IWASA: *Ecological Economics*, 70, 2350-2360 (2011), Tourists and traditional divers in a common fishing ground.
- 2) K. BESSHO and Y. IWASA: *Journal of Theoretical Biology*, 304, 66-80 (2012), Variability in the evolutionarily stable seasonal timing of germination and maturation and the mode of competition.
- 3) CM. TANAKA and Y. IWASA: *Journal of Theoretical Biology*, 309, 20-28 (2012), Cultural evolution of a belief controlling human mate choice: dynamic modeling of the *hinoeuma* superstition in Japan.
- 4) T. YAHARA, M. AKASAKA, H. HIRAYAMA, R. ICHIHASHI, S. TAGANE, H. TOYAMA, and R. TSUJINO: *The Biodiversity Observation Network in the Asia-Pacific Region, Toward Further Development of Monitoring*. (S. NAKANO, T. NAKASHIZUKA, T. YAHARA eds.), Springer, 3-19 (2012), Strategies to observe and assess changes of terrestrial biodiversity in the Asia-Pacific Regions.
- 5) H. TOYAMA and T. YAHARA: *Journal of Plant Studies*, 1, 2, 26-39 (2012), Adaptive species differentiation and population uniformity in *Viola* species sharing similar geographical distribution but differing habitat preference.
- 6) N. TAKASHINA, A. MOUGI and Y. IWASA: *Population Ecology*, 54, 475-485 (2012), Paradox of marine protected area: suppression of fishery may cause species loss.
- 7) JH. LEE and Y. IWASA: *Theoretical Population Biology*, 82, 177-186 (2012), Optimal investment in enhancing social concern on biodiversity conservation: a dynamic approach.
- 8) R. YAMAGUCHI and Y. IWASA: *Interface Focus*, 2013, 3 (2013), First passage time to allopatric speciation, for a contribution to a special issue of 'Modelling biological evolution: recent progress, current challenges and future direction.
- 9) T. YAHARA, F. JAVADI, Y. ONODA, L. P. DE QUEIROZ, D. P. FAITH, D. E. PRADO, M. AKASAKA, T. KADOYA, F. ISHIHAMA, S. DAVIES, J. W. F. SLIK, T. YI, K. MA, B. CHEN, D. DARNAEDI, R. T. PENNINGTON, M. TUDA, M. SHIMADA, M. ITO, A. N. EGAN, S. BUERKI, N. RAES, T. KAJITA, M. MIMURA, H. TACHIDA, Y. IWASA, G. F. SMITH, J. E. VICTOR and T. NKONKI: *Taxon*, 62, 249-266 (2013), Global legume diversity assessment: concepts, key indicators, and strategies.
- 10) N. RAES, L.G. SAW, P.C. VAN WELZEN and T. YAHARA: *South African Journal of Botany*, 89, 265-272 (2013), Legume diversity as indicator for botanical diversity on Sundaland, South East Asia.
- 11) Y. IWASA and JH. LEE: *Journal of Theoretical Biology*, 333, 117-125 (2013), Graduated punishment is efficient in resource management if people are heterogeneous.
- 12) Y. FUKANO, Y. TACHIKI, T. YAHARA and Y. IWASA: *Ecological Modelling*, 260, 42-49 (2013), Soil disturbances can suppress the invasion of alien plants under plant-soil-feedback.
- 13) Y. TACHIKI and Y. IWASA: *Journal of Theoretical Biology*, 339, 129-139 (2013), Coevolution of

- mast seeding in trees and extended diapause of seed predators.
- 14) Y. YOSHIMURA and E. KASUYA: PLoS ONE, 8, 11, e81280 (2013), Odorous and Non-Fatal Skin Secretion of Adult Wrinkled Frog (*Rana rugosa*) Is Effective in Avoiding Predation by Snakes.
  - 15) J. WAKANO and Y. IWASA: Genetics, 193, 229-241 (2013), Evolutionary branching in a finite population: deterministic branching versus stochastic branching.
  - 16) H. TOYAMA, S. TAGANE, P. CHHANG, T. KAJISA, R. ICHIHASHI, V. SAMRETH, V. MA, H. SOKH, A. KATAYAMA, H. ITADANI, M. TATEISHI, Y. TACHIKI, K. MASE, Y. ONODA, N. MIZOUE, H. TACHIDA and T. YAHARA: Acta Phytotaxonomica & Geobotanica, 64, 2, 45-105 (2013), Inventory of woody flora in permanent plots of Kampong Thom and Kampong Chhnang Provinces, Cambodia.
  - 17) H. HIRAYAMA and E. KASUYA: Entomologia Experimentalis et Applicata, 149, 3, 250–255 (2013), Effect of adult females' predation risk on oviposition site selection in a water strider.
  - 18) S. FURUICHI and E. KASUYA: Ecological Entomology, 38, 339-345. (2013), Mothers vigilantly guard nests after partial brood loss: a cue for nest predation risk in a paper wasp.
  - 19) S. YAMAGUCHI, K. SAWADA, Y. YUSA and Y. IWASA: Journal of Theoretical Biology, 334, 101-108 (2013), Dwarf males and hermaphrodites can coexist in marine sedentary species if the opportunity to become a dwarf male is limited.
  - 20) S. YAMAGUCHI, K. SAWADA, Y. YUSA and Y. IWASA: Theoretical Population Biology, 85, 49-57 (2013), Dwarf males, large hermaphrodites, and females in marine species: a dynamic optimization model of sex allocation and growth.
  - 21) S. FURUICHI and E. KASUYA: Ethology, 119, 786-792 (2013), Hurrying foragers fail to choose the best prey item: prey choice in paper wasps depredating conspecific nests.
  - 22) M. VATANPARAST, B. B. KLITGÅRD, F. A. C. B. ADEMA, R. T. PENNINGTON, T. YAHARA and T. KAJITA: South African Journal of Botany, 89, 143-149 (2013), First molecular phylogeny of the pantropical genus *Dalbergia*: implications for infrageneric circumscription and biogeography.
  - 23) S. FURUICHI and E. KASUYA: Behavioral Ecology and Sociobiology, 68, 215–221 (2014), Costs, benefits, and plasticity of construction of nest defensive structures in paper wasps.
  - 24) S. YAMAGUCHI, J.T. HØEG and Y. IWASA: Journal of Theoretical Biology, 347, 7-16 (2014), Evolution of sex determination and sexually dimorphic larval sizes in parasitic barnacles.
  - 25) R. IRITANI and Y. IWASA: Theoretical Population Biology, 92, 1-13 (2014), Parasite infection drives the evolution of state-dependent dispersal of the host.
  - 26) H. HIRAYAMA and E. KASUYA: Ethology, 120, 12, 1228–1236 (2014), Potential costs of selecting good sites for offspring: increased risk of drowning and negative effects on egg production.
  - 27) H. TOYAMA, T. KAMIYAMA and T. YAHARA: Plant Systematics and Evolution, DOI:10.1007/s00606-014-1137-2 (2014), A genome-wide AFLP replacement in a hybrid population derived from two closely related *Viola* species from contrasting habitats.
  - 28) JH. LEE and Y. IWASA: Population Ecology, 56, 27-40 (2014), Modeling socio-economic aspects of ecosystem management and biodiversity conservation.
  - 29) T. KADOYA, A. TAKENAKA, F. ISHIHAMA, T. FUJITA, M. OGAWA, T. KATSUYAMA, Y.

- KADONO, N. KAWAKUBO, S. SERIZAWA, H. TAKAHASHI, M. TAKAMIYA, S. FUJII, H. MATSUDA, K. MUNEDA, M. YOKOTA, K. YONEKURA and T. YAHARA: *PLoS ONE*, 9, 6, e98954 (2014), Crisis of Japanese vascular flora shown by quantifying extinction risks for 1618 taxa.
- 30) T. MATSUO, M. JUSUP and Y. IWASA: *Journal of Theoretical Biology*, 346, 34-46 (2014), The conflict of social norms may cause the collapse of cooperation: indirect reciprocity with opposing attitudes towards in-group favoritism.
- 31) T. YAHARA, K. MA, D. DARNAEDI, T. MIYASHITA, A. TAKENAKA, H. TACHIDA, T. NAKASHIZUKA, E. KIM, N. TAKAMURA, S. NAKANO, Y. SHIRAYAMA, H. YAMAMOTO and S.G. VERGARA. In: S. Nakano, T. Yahara, and T. Nakashizuka eds. *Asia-Pacific Biodiversity Observation Network: Integrative Observations and Assessments. Ecological Research Monographs 2014*, 3-28, Springer (2014), Developing a Regional Network of Biodiversity Observation in the Asia-Pacific Region: Achievements and Challenges of AP BON.
- 32) M. JUSUP, T. MATSUO and Y. IWASA: *PLoS Computational Biology*, 10(5), e1003618 (2014), Barriers to cooperation aid ideological rigidity and threaten societal collapse.
- 33) A. NAIKI, S. TAGANE, P. CHHANG, H. TOYAMA, H. ZHU, VS DANG and T. YAHARA: *Acta Phytotaxonomica et Geobotanica*, 66, 3, 153-179 (2015), Flora of Bokor National Park, Cambodia II: four new species and nine new records of *Lasianthus* (Rubiaceae) from Cambodia.
- 34) H. HIRAYAMA and E. KASUYA: *Hydrobiologia*, 745, 1, 195-200 (2015), Parasitoid avoidance behavior is not triggered by airborne cues in a semi-aquatic bug.
- 35) H. HIRAYAMA, T. SO and E. KASUYA: *Entomol. Exp. Appl.*, 154, 3, 222–227 (2015), Presence of conspecifics triggers host searching behavior in an egg parasitoid wasp.
- 36) H. KOHMURA, H. HIRAYAMA and T. UENO: *Ethology*, 121, 2, 168–175 (2015), Diving into the water: cues related to the decision-making by an egg parasitoid attacking underwater hosts.
- 37) H. TOYAMA, K. KAJISA, S. TAGANE, K. MASE, P. CHHANG, V. SAMRETH, V. MA, H. SOKH, R. ICHIHASHI, Y. ONODA, N. MIZOUE and T. YAHARA: *Philosophical Transactions of the Royal Society B.*, 370, 20140008 (2015), Effects of logging and recruitment on community phylogenetic structure in 32 permanent forest plots of Kampong Thom, Cambodia.
- 38) JH. LEE, K. KAKINUMA, T. OKURO and Y. IWASA: *Ecological Economics*, 114, 208-217 (2015) Coupled social and ecological dynamics for herders in the rangeland.
- 39) JH. LEE, K. SIGMUND, U. DIECKMANN and Y. IWASA: *Journal of Theoretical Biology*, 367, 1-13, (2015), Games of corruption: how to suppress illegal logging.
- 40) N. TANAKA, S. TAGANE, P. CHHNANG, T. YAHARA: *Bulletin of National Museum of Natural Science, Series B*, 41, 155-159 (2015), A purple flowered new *Globba* (Zingiberaceae), *G. bokorensis*, from southern Cambodia.
- 41) S. DIAZ and 83 authors including T. YAHARA: *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 1–16 (2015), The IPBES Conceptual Framework — connecting nature and people.
- 42) S. FURUICHI and E. KASUYA: *Ethology*, 121, 609-616 (2015), Construction of nest defensive structure according to offspring value and its effect on predator's attack decision in paper wasps.

- 43) S. IWAMI, K. SATO, S. MORITA, H. INABA, T. KOBAYASHI, J. S TAKEUCHI, Y. KIMURA, N. MISAWA, FENRONG REN, Y. IWASA, K. AIHARA and Y. KOYANAGI: Scientific Reports 5:12256 doi:10.1038/srep12256 (2015), Pandemic HIV-1 Vpu overcomes intrinsic herd immunity mediated by tetherin.
- 44) S. TAGANE, H. TOYAMA, P. CHHANG, H. NAGAMASU and T. YAHARA: Acta Phytotaxonomica et Geobotanica, 66, 2, 95-135 (2015), Flora of Bokor National Park, Cambodia I: Thirteen new species and a new species status.
- 45) S. TAGANE, T. YUKAWA, P. CHHNANG, Y. OGURA-TSUJITA, H. TOYAMA and T. YAHARA: Cambodian Journal of Natural History, 2015, 2, 128-130 (2015), A new record of *Aphyllorchis pallida* (Orchidaceae) from Cambodia.
- 46) S. TAGANE, LS. WIJEDASA, P. CHHANG, H. TOYAMA and T. YAHARA: Cambodian Journal of Natural History, 2015, 2, 139-143 (2015), Two new records of *Memecylon corticosum* var. *kratense* and *M. paniculatum* (Melastomataceae) from Cambodia.
- 47) S. TAGANE, V. S. DANG, H. TOYAMA, A. NAIKI, H. NAGAMASU, T. YAHARA and H. TRAN: Phytokeys, 57, 51-60 (2015), *Aporosa tetragona* Tagane & V. S. Dang (Phyllanthaceae), a new species from Mt. Hon Ba, Vietnam.
- 48) S. TAGANE, V. S. DANG, H. TOYAMA, H. TRRAN and T. YAHARA: PhytoKeys, 50, 1-8 (2015), *Goniothalamus curvistylus* Tagane & V. S. Dang (Annonaceae), a new species from Mt. Hon Ba, Vietnam.
- 49) S. TAGANE, V. S. DANG, S. RUEANGRUEA, S. SUDDEE, P. CHHANG, H. TOYAMA and T. YAHARA: Thai Forest Bulletin, 43, 30-35 (2015), *Elaeagnus elongates* Tagane & V. S. Dang (Elaeagnaceae), a new species from Cambodia and Thailand.
- 50) S. YAMAGUCHI and Y. IWASA: Theoretical Population Biology, 102, 16-25 (2015), Phenotype adjustment promotes adaptive evolution in a game without conflict.
- 51) V. S. DANG, S. TAGANE, H. TOYAMA, T. YAHARA, A. NAIKI, HQ. NGUYEN and H. TRAN: Journal of Biotechnology, 13, 4A, 1393-1396 (2015), A new record of *Burmannia championii* Thwaites (Burmanniaceae) from Southern Vietnam.
- 52) V. S. DANG, S. TAGANE, H. TOYAMA and H. TRAN: Annales Botanici Fennici, 52, 352-354 (2015), *Lasianthus yaharae* (Rubiaceae), a new species from Hon Ba Nature Reserve, Southern Vietnam.
- 53) 粕谷英一：日本生態学会会誌、69, 179-185 (2015), 生態学におけるAICの誤用
- 54) H. TOYAMA, S. TAGANE, P. CHHANG, H. NAGAMASU and T. YAHARA: Acta Phytotaxonomica et Geobotanica, 67, 1, 47-53 (2016), Flora of Bokor National Park, Cambodia III: A new species, *Garcinia bokorensis* (Clusiaceae).
- 55) H. TOYAMA, S. TAGANE, P. CHHANG, H. NAGAMASU and T. YAHARA: Acta Phytotaxonomica et Geobotanica, (2016), Flora of Bokor National Park, Cambodia IV: A new section and species of *Euphorbia* subgenus *Euphorbia* (in press)
- 56) S. TAGANE, H. NGUYEN, N. NGUYEN, S. HOANG, H. TOYAMA, CJ YANG and T. YAHARA: Phytokeys, 58, 97-104 (2016), *Homalium glandulosum* (Salicaceae), a new species from Vu Quang

National Park, North Central Vietnam.

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) H. TOYAMA, S. TAGANE, T. KAJISA, P. CHHANG, R. ICHIHASHI and T. YAHARA: Center for Asian Conservation Ecology, Kyushu University (2012), A pictured guide of forest trees in Cambodia I Kampong Chhnang.
- 2) H. TOYAMA, S. TAGANE, T. KAJITA, P. CHHANG and T. YAHARA: Center for Asian Conservation Ecology, Kyushu University (2013), A pictured guide of forest trees in Cambodia II ~Kampong Thom~.
- 3) S. TAGANE, K. FUSE, H. TOYAMA, P. CHHANG, T. KAJISA and T. YAHARA: Center for Asian Conservation Ecology, Kyushu University (2015), A Picture guide of forest trees in Cambodia III ~Kratie ~.
- 4) 粕谷英一（著）、金明哲（編）：一般化線形モデル、共立出版（2012）
- 5) 佐竹暁子・巖佐庸（共編）：生態学と社会科学の接点、共立出版、3-20 & 150-170（2014）  
「第1章 生物の適応戦略と進化ゲーム、第9章 湖の水質管理についての社会・生態結合ダイナミックス（執筆担当：巖佐庸）」
- 6) 宮下直、西廣淳（編）：保全生態学の挑戦、東京大学出版会、109-125（2015）  
「第7章 熱帯林の消失・回復と時間一過去を復元し現在の多様性を知る（執筆担当：遠山弘法、辻野亮）」
- 7) 矢原徹一、藤井伸二、伊藤元己（監修）、永田芳男（写真）：絶滅危惧植物図鑑-レッドデータプランツ増補改訂新版、山と溪谷社、253-255（2015）  
「アワガタケスミレ、イソスミレ、シロコスミレ、ホソバシロスミレ、イシガキスミレ（執筆担当：遠山弘法）」

<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) Y. IWASA: Invited Speaker, AMP 2011, Mathematical Biology Workshop and Pacific Institute of Mathematical Sciences International Graduate Training Centre (PIMS IGTC), University of Victoria, 2011  
“Neutral theory as a predictor of avifaunal extinctions after habitat.”
- 2) Y. IWASA: Invited Speaker, Seventh International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 2011), Vancouver, Canada, July 20, 2011  
“Evolution of masting: synchronized and intermittent reproduction of trees.”
- 3) Y. IWASA: International Congress of Natural Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea August 26, 2011  
“Modeling morphogenesis in development.”
- 4) H. TOYAMA: Invited lecture, Conference on Biodiversity Informatics in Indonesia, Universitas

- Gunadarma, Indonesia, 2011  
 “Identification using DNA barcoding of forest trees in Cambodia.”
- 5) H. TOYAMA: Symposium for the 100 years Anniversary of Kyushu University, “Asian Conservation Ecology.”, Ito Inamori Hall, November 19, 2011  
 “Evaluation of biodiversity in Cambodia. I. Identification using DNA barcoding of forest trees in Cambodia. II. Preliminary results of phylogenetic community structure. ”
  - 6) Y. IWASA: Symposium for the 100 years Anniversary of Kyushu University, “Asian Conservation Ecology.”, Ito Inamori Hall, 2011  
 “Neutral theory as a predictor of avifaunal extinctions after habitat loss.”
  - 7) H. TOYAMA: EAFES Symposium, AP-BON (Asia Pacific Biodiversity Observation Network) and Ecological Studies Joint Meeting of The 59th Annual Meeting of ESJ & The 5th EAFES International Congress. Shiga, Japan, 2012.  
 “Forest plot studies using DNA barcoding. “
  - 8) 平山寛之、粕谷英一：日本生態学会第59回大会（2012）  
 「基礎データの誤差が分布予測に与える影響」
  - 9) 粕谷英一：日本生態学会第59回大会（2012）  
 「一般化線形モデル（GLM）でのデータ解析における説明変数の分布の影響」
  - 10) T. YAHARA, T. KAJISA, N. MIZOUE, H. TOYAMA, S. TAGANE, Y. KANO, F. IWANAGA: The Stakeholder Meeting on Hydrology and Water Management. Phnom Penh, Cambodia, 2012. “Kyushu University Projects for biodiversity conservation and sustainable forestry in Cambodia. “
  - 11) Y. IWASA, Y. TACHIKI and A. SATAKE: Keynote speech, BIOCAMP2012, Vietri Sul Mare, Italy June 4-8, 2012  
 “Evolution of masting: synchronized and intermittent reproduction of trees.”
  - 12) T. YAHARA: An International Workshop to Develop Key Strategies for the Establishment and Promotion of the Asia-Pacific Biodiversity Observation Network (AP-BON) at Local, National, and Regional Levels. A Workshop at 2102 Jeju World Conservation Congress (WCC), Jeju, Korea, 2012  
 “Asia-Pacific BON update.”
  - 13) 巖佐庸：日本数理生物学会大会、岡山大学、9月12日（2012）  
 プレナリー総合講演「生態学の数理モデル：これまでとこれから」
  - 14) T. YAHARA: International Workshop on Assessment of Wetland Change in West Kalimantan Province: Does It Enhance Sustainability? Pontianak, Indonesia, 2012  
 “Asia-Pacific BON - its vision, activities and role on assessments of biodiversity changes in the Asia-Pacific region.”
  - 15) T. YAHARA: International Symposium on Southeast Asian Tropical Rain Forest Research related with Climate Change and Biodiversity, Tokyo, Japan, 2012  
 “Three approaches for plant diversity assessments in Asian tropical forest.”
  - 16) T. YAHARA: International Symposium on Conservation of biodiversity in the tropical Asia, Kagoshima, Japan, 2012  
 “Biodiversity in SE Asia: its status and future. “

- 17) 巖佐庸：数理生物学シンポジウム福岡「数理生物学のこれまでとこれから：九大数理生物の40年」（org. 山内淳ら企画）九州大学国際センター、11月23日（2012）
- 18) T. YAHARA: International Workshop on Freshwater Biodiversity Conservation in Asia Ito Campus, Fukuoka, Japan, 2012  
“Introduction of Asia-Pacific BON and brief introduction of biodiversity conservation in Ito campus.”
- 19) T. YAHARA: International Workshop on Biodiversity in Changing Coastal Waters of Tropical and Subtropical Asia, Amakusa, Kumamoto, Japan, December 1-4, 2012  
“Introduction of Asia-Pacific BON.”
- 20) Y. IWASA: The 25th International Symposium, Foundation for Promotion of Cancer Research. “Radiation and Cancer”. National Cancer Center, Tokyo, 2012  
“Cancer as a mini-evolution: Chronic myeloid leukemia and drug resistance.”
- 21) T. YAHARA, F. JAVADI, S. TAGANE, H. TOYAMA, K. FUSE : Sixth International Legume Conference “Toward a New Classification System for Legumes”, Johannesburg , South Africa, 2013  
“States of legume species revealed by transect surveys of plant diversity in tropical Asia.”
- 22) M. VATANPARAST, F. ISHIHAMA, M. AKASAKA, F. ADEMA, N. RAES, T. R. PENNINGTON, T. YAHARA and T. KAJITA: 6th International Legume Conference “Toward a New Classification System for Legumes” , Johannesburg , South Africa, 2013  
“Biodiversity assessment and phylogeny of *Dalbergia*.”
- 23) T. YAHARA, S. VERGARA, E.-S. KIM: Sixth GEOSS Asia Pacific symposium, Ahmedabad, India, 2013  
“AP BON (Asia-Pacific BON): Overview for achievements and challenges.”
- 24) Y. IWASA: Conference “Cooperation and major evolutionary transitions.” (org. D. Bensimon, P. Durand, C. Extavour, G. Huber). KTIP, UC Santa Barbara, 2013  
“Evolution of stalk/spore ratio in a social amoeba: cell-to-cell interaction via a signaling chemical shaped by cheating risk.”
- 25) 平山寛之、粕谷英一：日本生態学会第60回大会（2013）  
「環境データのスコア化が分布予測に与える影響」
- 26) 粕谷英一：日本生態学会第60回大会（2013）  
「一般化線形モデルにおける交互作用の意味－2次式の場合」
- 27) T. YAHARA: Earth and Biodiversity Observing Workshop, Bangkok, 2013  
“AP-BON, and Specific Activities in South East Asia.”
- 28) T. YAHARA: Seminar at Andalas University, Padang, Indonesia, 2013  
“Project in Gn Gadut, Padang.”
- 29) Y. IWASA: Workshop "Frontiers in Integrative Biology". (orgs. E.P. Economo et al.) Lecturer, OIST, Okinawa, Japan, 2013  
“Modeling adaptations in evolutionary ecology.”
- 30) Y. IWASA: Hot topics workshop -- special highlights on mathematical biology (orgs. Eunok Jung et al.), National Institute for Mathematical Sciences, Daejeon, Korea, 2013

- “Evolution of masting -- synchronized and intermittent reproduction of trees.”
- 31) 遠山弘法：日本熱帯生態学会第23回大会（2013）  
「森林動態による系統的群集構造の変化-カンボジアの森林プロットを用いて-」
  - 32) T. YAHARA, S. TAGANE, H. TOYAMA, K. FUSE: Seminar at the Institute of Tropical Biology, Ho Chi Minh, Vietnam, 2013  
“Plant Diversity Assessment in Hon Ba, Vietnam.”
  - 33) I. DJAMALUDDIN, Y. MITANI, P. INDRAYANI, S. TAGANE and T. YAHARA: 9th International Flora Malesiana Symposium, Bogor, Indonesia, 2013.  
“GIS Web Server for Biodiversity Information System.”
  - 34) N. RAES, L.G. SAW, P.C. VAN WELZEN and T. YAHARA: 9th International Flora Malesiana Symposium, Bogor, Indonesia, 2013  
“Legume diversity as indicator for overall botanical diversity on sundaland, South East Asia.”
  - 35) T. YAHARA, S. TAGANE, H. TOYAMA, K. FUSE, H. NAGAMASU, E. SUZUKI, S. FUJII, A. NAIKI, C. PHOURIN, D. DARNAEDI, M. ARDIYANI, A. SYAMSUARDI, S.L. GUAN, L.C. LU, S. SUDDEE, S. RUEANGRUEA, D. MAROD and V. S. DANG: 9th International Flora Malesiana Symposium, Bogor, Indonesia, 2013  
“Plant diversity assessments using a standardized transect method in Cambodia, Indonesia, Malaysia, Thailand and Vietnam.”
  - 36) Y. IWASA: Invited speaker. Sustainability and Complex Systems Workshop (orgs. A Hastings et al.), Mathematical Biosciences Institute, Ohio State University, USA, 2013  
“Modeling socio-economic aspects for ecosystem management and biodiversity conservation.”
  - 37) T. YAHARA, S. TAGANE, H. TOYAMA, K. FUSE, H. NAGAMASU, E. SUZUKI, S. FUJII, A. NAIKI, C. PHOURIN, D. DARNAEDI, M. ARDIYANI, A. SYAMSUARDI, S.L. GUAN, L.C. LU, S. SUDDEE, S. RUEANGRUEA, D. MAROD and V. S. DANG: Asia Park Congress, Sendai, 2013  
“Plant diversity assessments using a standardized transect method in Cambodia, Indonesia, Malaysia, Thailand and Vietnam.”
  - 38) H. TOYAMA: Invited speaker, East Asian Plant Diversity and Conservation, Korea, 2013  
“DNA barcoding and community phylogenetics in 32 permanent plots of Kampong Thom, Cambodia.”
  - 39) Y. IWASA: Kyoto Prize Workshop, organiser and moderator. Kyoto International Hall, 2013  
“From molecular population genetics to comparative genomics.”
  - 40) T. YAHARA: 5th AP-BON Workshop, ASEAN Centre for Biodiversity, Los Banos, the Philippines, 2013  
“AP-BON History and Strategy.”
  - 41) T. YAHARA: Asia Forest Workshop 2013, Phnom Penh, Cambodia, 2013  
“Achievements and challenges of Asian Conservation Ecology under the global efforts for conservation and sustainable use of biodiversity”
  - 42) H. TOYAMA: Asia Forest Workshop 2013, Phnom Penh, Cambodia, 2013  
“The effect of illegal logging on forest diversity in permanent sample plots, Kampong Thom



- Cambodia.”
- 43) T. YAHARA: Second International Workshop for the Genetic Diversity Report, Kyushu University, Japan, 2014.  
“Status and Trends in Genetic Diversity under Changing Environments, Opening Segment.”
- 44) Y. IWASA: Plenary Talk. 6th International Systems Radiation Biology Workshop, National Institute of Radiological Studies, Chiba, 2014  
“Cancer as a mini-evolutionary process.”
- 45) 平山寛之、粕谷英一：日本生態学会第61回大会（2014）  
「分布推定モデルにおけるスコア化変数の使用」
- 46) 巖佐庸：日本生態学会第61回大会、シンポジウム「モデルの単純化」（箱山 洋・粕谷英一企画）、広島市、3月15日（2014）  
「動態モデルのアグリゲーション」
- 47) 粕谷英一：日本生態学会第61回大会（2014）  
「生態学におけるAICの誤用」
- 48) 遠山弘法：日本生態学会第61回大会（2014）  
「チャオシー川下流域における水草類の多様性」
- 49) T. YAHARA: Phylogeny, extinction risks and conservation, the Royal Society, London, 2014  
“Extinction risk analyses in Southeast Asian Angiosperms.”
- 50) 遠山弘法：日本植物分類学会13回大会（2014）  
「群集組成における競争排他と環境制約の相対的な重要性」
- 51) T. YAHARA: The Seventh GEOSS Asia-Pacific Symposium, Tokyo, Japan, 2014  
“Benefits for Society from GEOSS evolution toward addressing SDGs.”
- 52) Y. IWASA: Invited Talks. JSMB/SMB Joint Meeting for Mathematical Biology, in mini- symposium “Biological markets and the evolution of interaction networks.” (org. Telschow and Yamauchi), Osaka, Japan, 2014  
“Mating preferences by females and parental care by males.”
- 53) Y. IWASA: JSMB/SMB Joint Meeting for Mathematical Biology, in mini-symposium “Social sciences for ecosystem management and biodiversity conservation” (org. Y. Iwasa) , Osaka, Japan, July 30, 2014  
“Modeling socio-economic aspects for ecosystem management”
- 54) Y. IWASA: 14th SAET Conference on current trends in economics. Waseda University, Symposium session “Simulation on social behavior.” (org. E. Akiyama), Waseda University, Tokyo, Japan, 2014  
“Harvester-Enforcer Games of Corruption: How to Suppress Illegal Logging.”
- 55) T. YAHARA: 6th AP-BON Workshop, NIBR, Korea, 2014  
“Achievements and challenges of AP BON.”
- 56) T. YAHARA: 6th AP-BON Workshop, NIBR, Korea, 2014  
“Scoping of IPBES regional assessment.”
- 57) Y. IWASA: Symposium “Ecosystem management and environmental decisions.” (org. Y. Iwasa); A Satellite symposium of Second International Symposium of Decision Science for Sustainable

- Society, Kyushu University, Fukuoka, Japan, 2015  
 “Modeling socio-economic aspects for ecosystem management.”
- 58) 粕谷英一：日本生態学会第62回大会（2015）  
 「時間の長さを分析する」
- 59) 粕谷英一：日本生態学会第62回大会（2015）  
 「モデル選択をしてからパラメーター推定すると：推定精度への影響」
- 60) 平山寛之、粕谷英一：日本生態学会第62回大会（2015）  
 「精度の低い環境データが分布予測に与える影響」
- 61) Y. IWASA: Plenary speaker. International conference Modelling biological evolution 2015: linking mathematical theories with empirical realities. (org. A. Morozov), University of Leicester, UK, 2015  
 “Rate of species creation by geographic isolation and recurrent migration.”
- 62) T. YAHARA: FUTURE EARTH Symposium on Global Biodiversity Monitoring, Yale University, USA, 2015  
 “Plant diversity monitoring in AP BON, Asia-Pacific Biodiversity Observation Network.”
- 63) Y. IWASA: Plenary Speaker, The 3rd Toulouse Economics and Biology Workshops, Evolution and Morality, Toulouse School of Economics, Toulouse, France, 2015  
 “Morality as a mechanism for maintaining cooperative society by indirect reciprocity.”
- 64) T. YAHARA: GEO BON Joint Advisory Board and Implementation Committee Meeting, Leibzig, Germany, 2015  
 “AP-BON and J-BON as examples for the implementation of regional/national BON.”
- 65) T. YAHARA: 6th International Barcode of Life Conference “Barcodes to Biomes”, University of Guelph, Canada, 2015  
 “Plant Diversity Assessments in tropical forest of SE Asia.”  
<http://dnabarcodes2015.org/wp-content/uploads/2015/09/TetsakazuYahara.pdf>
- 66) Y. IWASA: The Annual meeting of Japanese Society for Mathematical Biology and China-Japan-Korea Colloquium of Mathematical Biology, Doshisha University, Kyoto, 2015  
 “Rate of species creation by geographic isolation and recurrent migration. “
- 67) T. YAHARA, S. VERGARA, E-S. KIM: 8th GEOSS-AP symposium, Beijing, China, 2015  
 “Introduction from co-chairs of AP BON (Asia-Pacific BON).”
- 68) Y. IWASA: The 22nd East Asia Joint Symposium on Biomedical Research, Special workshop of Ecology and evolution, OIST (Okinawa Institute of science and technology graduate university" (orgs. E. Economo, T. Yamamoto, and I Masai), 2015  
 “Rate of species creation by geographic isolation and recurrent migration. “
- 69) T. YAHARA, S. VERGARA, E-S. KIM: 7th AP BON workshop, Bangkok, Thailand, 2016  
 “7th AP BON workshop: Introduction. “
- 70) S. TAGANE, T. YAHARA, S. RUEANGRUEA, S. SUDDEE: 7th AP BON workshop, Bangkok, Thailand, 2016  
 “Plant Diversity Assessments along altitudinal gradients of some mountains in Thailand. ”
- 71) T. YAHARA: 7th AP BON workshop, Bangkok, Thailand, 2016

“How can AP BON contribute to IPBES AP regional assessments?”

- 72) E. KASUYA: RARC International Symposium in The Institute of Statistical Mathematics, 2016  
 “What "good models" mean: use and abuse of model selection based on information criteria in practice.”
- 73) 巖佐庸、山口 諒: 日本生態学会第63回大会 (2016)  
 「新しい種が次々と創出されるメカニズムの数理的研究」
- 74) 粕谷英一、日室千尋: 日本生態学会第63回大会 (2016)  
 「モデル選択で選ばれたモデルを使って検定するという方法は妥当か」
- 75) 遠山弘法、日室千尋: 日本生態学会第63回大会 (2016)  
 「DNAバーコーディングによる *Balanophora* の宿主探索と2種の新種記載」

### (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

- 1) International Workshop on Freshwater Biodiversity Conservation in Asia Ito Campus (S9 およびグローバルCOEプログラム「自然共生社会を拓くアジア保全生態学」共催) (2012年11月26-28日、九州大学伊都キャンパス稲森会館ホール、聴衆約50名)
- 2) International Workshop on Biodiversity in Changing Coastal Waters of Tropical and Subtropical Asia (S9、九州大学天草生物学実験所、およびグローバルCOEプログラム「自然共生社会を拓くアジア保全生態学」共催) (2012年12月1-4日、九州大学天草生物学実験所、聴衆約100名)
- 3) 公開講演会「生物多様性観測・評価・予測研究の最前線2～愛知目標達成に向けての第一歩～」(2012年1月6日、東京大学農学部弥生講堂一条ホール、聴衆約100名)
- 4) Workshop: Global Legume Diversity Assessment (GLDA), Concept and Challenges. (Chair Person: Tetsukazu Yahara and Tadashi Kajita). (2013年1月10日、ヨハネスブルグ大学 D LES棟 101. 6th International Legume Conference “Toward a New Classification System for Legumes”におけるワークショップ。観客数約100名)。
- 5) 公開講演会「生物多様性観測・評価・予測研究の最前線3～アジアでの展開～」(2013年1月11日、東京大学農学部1号館8番教室、聴衆約100名)
- 6) Second International Workshop for the Genetic Diversity Report, Kyushu University, Japan (2014年2月15-16日、九州大学システム生命科学府講義室、参加者約30名)
- 7) Workshop on Virus Dynamics and Evolution (Centre de Recerca Matematica, Universite Autonoma Barcelona, Spain. June 30 - July 4, Organizing Commitee)
- 8) The JSMB/SMB joint meeting (Osaka, Japan. July 28 - August 1, 2014, Organizing Committee, Scientific Advisory Committee)
- 9) Mini- symposium “Social sciences for ecosystem management and biodiversity conservation”, In the JSMB/SMB Joint Meeting for Mathematical Biology (Osaka. “Mating preferences by females and parental care by males.” Organizer. Osaka, Japan. July 30, 2014)

- 10) 公開講演会「生物多様性と一次産業」(2015年1月7日、東京大学農学部弥生講堂、聴衆89名)
- 11) Symposium “Ecosystem management and environmental decisions.” A Satellite symposium of Second International Symposium of Decision Science for Sustainable Society (Kyushu University. Organizer. Centennial Hall, Kyushu University Medical School. January 30, 2015)
- 12) S9主催シンポジウム：Conservation planning under uncertainty (2015年4月4日、東大農学部1号館2階8番講義室)
- 13) 日本生態学会第63回仙台大会フォーラム「生態学の展望」(企画者巖佐 庸+矢原徹一、2016年3月24日、仙台国際センター)
- 14) 公開講演会「生物多様性観測・評価・予測研究の最前線 5 ～アジアの生物多様性はどこまでわかったか～」(2016年3月25日、東北大学片平ホール)

#### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) ウェブマガジンJB Pressへの寄稿 (アウトリーチ) 2015年5月16日 矢原徹一：日本人こそ知っておくべき熱帯林消失の現状 東南アジアの森林を守るために何が必要なのか  
<http://jbpress.ismedia.jp/articles/-/43703>
- 2) ウェブマガジンJB Pressへの寄稿 (アウトリーチ) 2016年3月10日 矢原徹一：全世界を挙げて守るべき65兆円を稼ぐ花粉の運び屋 いま人類が試されている！ 日本にしかできない国際貢献とは <http://jbpress.ismedia.jp/articles/-/46262>

#### (6) その他

- 1) H. TOYAMA, S. TAGANE, P. CHHANG, T. KAJISA, R. ICHIHASHI, V. SAMRETH, V. MA, H. SOKH, A. KATAYAMA, H. ITADANI, M. TATEISHI, Y. TACHIKI, K. MASE, Y. ONODA, N. MIZOUE, H. TACHIDA and T. YAHARA: *Acta Phytotaxonomica & Geobotanica*, 64, 2, 45-105 (2013) “Inventory of woody flora in permanent plots of Kampong Thom and Kampong Chhnang Provinces, Cambodia” 日本植物分類学会論文賞受賞 (2013)
- 2) S. TAGANE, H. TOYAMA, P. CHHANG, H. NAGAMASU and T. YAHARA: *Acta Phytotaxonomica et Geobotanica* 66, 2, 95-135 (2015) “Flora of Bokor National Park, Cambodia I: Thirteen new species and a new species status” 日本植物分類学会論文賞受賞 (2015)

## 8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

## (5) 東南アジア熱帯林における生物多様性損失の比較シナリオ分析

京都大学霊長類研究所

湯本貴和

<研究協力者>

京都大学霊長類研究所

辻野 亮 (平成23～24年度) ・

今井伸夫 (平成24～26年度)

石川県立大学

北村俊平

平成23～27年度累計予算額：40,988千円（うち平成27年度：7,669千円）

予算額は、間接経費を含む。

### [要旨]

東南アジア熱帯ではアマゾン熱帯を凌ぐペースで森林が減少しており、グローバルレベルの生物多様性に対して大きな脅威となっている。実効性のある森林保全政策を策定するには、熱帯林の減少・回復のパターンとその要因を明らかにする必要がある。そこで、1) 1980年～現在までの熱帯53カ国、東南アジア8カ国、東南アジア325県における森林減少の駆動因、2) 2000年代の熱帯53カ国における森林回復に及ぼす要因、を調べた。森林減少の駆動因は、3つの空間スケール全てにおいて1990年頃を境に大きく変化した。1990年以前に経済レベルが比較的高く森林資源を速いペースで消費していた地域が、経済発展（森林保全に充てられる予算が増える）と森林率の低下（森林保全インセンティブが高まる）がさらに進むことで、1990年以降はむしろ森林が回復した。重回帰分析により1980年～現在における国レベルの駆動因を解析した結果、肥沃な土地（農地転換圧が高い）が広がり、農村人口増加率が高く、農業投資が少ない（農業生産性が低いため農地拡大しやすい）国ほど森林が減少することが分かった。次に、森林回復に及ぼす要因を、各国の経済レベルと残存森林率に注目して解析した。森林回復は、経済レベルが中程度以上で森林が少ない国で起こりやすいことが分かった。特に、海岸線長比が高く（輸送コストが低い）、農業集約度が高く農外雇用が多く、木材輸入量が多く、ガバナンスレベルの高い国で森林が回復しやすいことが分かった。東南アジアでは現在、森林率が低いフィリピン・タイ・ベトナムで森林回復が進み、比較的森林率の高いその他5カ国で森林減少が進んでいる。5カ国のうち、森林率が高いラオス・マレーシアと経済レベルが低いミャンマー・カンボジアでは森林減少が当面続く可能性が高い。インドネシアは森林回復が起こりうる経済・森林率レベルに当たり、政策介入によって森林減少を低下できる可能性がある。

### [キーワード]

熱帯林減少、生物多様性、東南アジア、REDD+、Forest Transition

### 1. はじめに

熱帯林の減少・劣化は、グローバルレベルでの生物多様性に対する最大の脅威である。また、

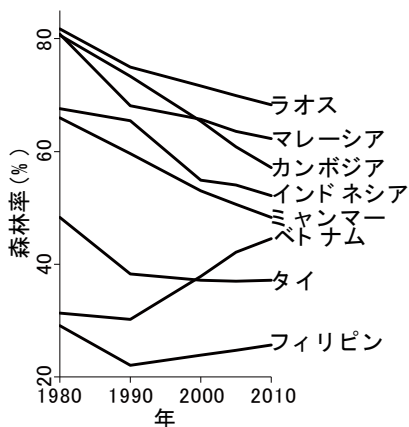
それに伴う炭素排出量は人為起源炭素排出の7-14%にも達する。この問題に対し、気候変動枠組み条約は、REDD+（Reducing Emissions from Deforestation and Degradation in Developing Countries:発展途上国での森林減少・劣化に伴う温室効果ガス排出の抑制）の創設を検討している。REDD+は、基本的に熱帯林を対象とした炭素排出抑制を通じた気候変動緩和策であるが、森林消失が回避されることにより熱帯林の生物多様性保護も同時達成されることから、もう1つの国際条約である生物多様性条約サイドもREDD+に大きな期待を寄せている。しかし、REDD+が森林保全効果を発揮するのは、森林減少の駆動因を除去・低減する方向にうまく機能した時のみである。またREDD+は、暗黙に、各国政府が自国の森林減少要因を既に知っている、もしくは容易に特定しうることを前提としている。しかし、森林減少の駆動因は複雑で多岐にわたり、時空間的に大きく変動することが知られている。効果的な森林保全政策を立案するには、経験や憶測に依らない科学的手法に基づいて、正確に駆動因を特定することが求められる。

熱帯林減少の駆動因には、直接的原因と潜在的原因の二つがある。直接的原因として木材伐採、農地拡大、インフラ拡大が挙げられ、潜在的原因としては人口、経済、政治体制、技術、文化、貿易、環境が挙げられる。これまで、各要因の熱帯林減少への影響について多くの研究が行われてきた。しかし、そのほとんどは、1)1～数個の駆動因にしか着目しておらず、各要因の相対的重要性が分からない、2)森林減少は、潜在的原因→直接的原因→森林減少という流れ（パス）で生じるにもかかわらず、比較的データが得やすい潜在的原因→森林減少パスにのみ注目しており、直接的原因→森林減少パスおよび潜在的原因→直接的原因パスがどのようなものであるかが分からない、3)一つの研究は普通一つの空間スケールのみを対象にするため、空間スケール間で各要因の影響がどのように変化するのが分からない（例えば人口増加は、地域レベルでは森林に負の影響を及ぼす一方、国レベルでは経済活性化を通して正の影響を及ぼすということがあるかもしれない）、4)最近の傾向のみを扱った研究が多く、森林減少要因の経時的変化を定量的に調べた研究がほとんど無い、という問題がある。そのため、なるべく過去～現在までを対象に、上記全ての原因とパスを考慮に入れた、地域～グローバルの多重空間スケールでの統合的な駆動因解析が求められる。

一部の熱帯国では、森林が回復に向かっている。同じ熱帯国でありながらなぜ森林が減少し続ける国と回復する国があるのかについて、長年研究が行われてきた。そのほとんどは、各国の経済レベルが重要であるとするForest Transition (FT) 仮説に注目してきた。FT仮説は、経済レベルが低い国は経済発展のために森林資源を強度に利用するため森林は減少するが、国が豊かになると森林資源への依存が減るとともに人々がより良い環境を求めようになり森林はやがて回復に向かう、という仮説である。これまで多くの研究が仮説検証を試みてきたが、残念ながら、仮説支持と不支持に大きく分かれてきた。そうしたなかEwersら<sup>1)</sup>は、各国の経済レベルのみならず、残存森林率も重要であることを示した（残存森林率がある程度まで低下してはじめて森林を保全しようというインセンティブが生じ森林が回復に向かう）。しかし、Ewersら<sup>1)</sup>のグローバルレベルの解析は、温帯域の富裕国を多く含むため、熱帯国の実情を反映していない可能性が高い。また、森林回復が起りやすいとされる富裕で森林の少ない国々の中にもなお回復国と減少国が混在しており、依然としてどのような要因がFT国と非FT国を分けるのかはよく分かっていない。熱帯林の回復シナリオを考えるためには、熱帯国のみを対象に、FTが起こる原因を経済、残存森林率、他の要因も考慮して解析を行う必要がある。

## 2. 研究開発目的

森林減少の駆動因解析を、グローバル・国・県の3つの空間スケールで行う。グローバルレベルは熱帯湿潤・乾燥林が優占する53ヶ国、国レベルは東南アジア8か国（カンボジア、インドネシア、ラオス、マレーシア、ミャンマー、フィリピン、タイ、ベトナム）、県レベルはこれら8か国の計325県を対象とする。2000年以降、東南アジア諸国はアマゾン熱帯を上回るペースで森林が減少する一方<sup>2)</sup>、8か国のうち3か国では森林が回復し始めている（図(5)-1）。本課題は、この地域を今後の熱帯林の生物多様性および炭素動態において特に重要な地域として注目した。グローバルおよび国レベルでは、直接的な原因を木材伐採と農地拡大、潜在的な原因を人口、経済、政治・社会、農業生産性、農林産物貿易、環境とした。1980年代、1990年代、2000年代の3時期における、森林減少率－直接的な原因－潜在的な原因の3者の相関関係をそれぞれ調べた。県レベルでは、県レベルの農林産物貿易や政治・社会データは得ることが難しいため、これらを除く各要因と森林減少との関係を調べた。最後に、2000年代における53ヶ国中のFT国と非FT国間で、経済レベル、残存森林率、その他の要因を比較しFTが起こる原因を調べた。以上から、熱帯林の減少・回復のパターンとその要因を統合的に明らかにすることを目的とした。



図(5)-1 東南アジア8か国の森林率の変化

## 3. 研究開発方法

### (1) 国・グローバルレベル

#### 1) 森林減少率

各国の1981-1990年、1991-2000年、2001-2010年の森林面積変化率(%/年)を、FAOのGlobal Forest Resources Assessment(FRA)から得た。後述する約40個の変数とこれら森林面積変化率との関係について、Pearsonの相関関係を求めた。また、1990年時の森林率(%)との相関関係も調べた。

#### 2) 直接的な原因

木材伐採要因は、各国における産業用丸太生産に要した土地面積(ha)とした。FAOSTATから、1981-2010年における産業用丸太の生産量( $m^3$ )を得た。毎年このボリュームの丸太を生産するのに必要な森林面積(ha)を、地上部バイオマス生産量( $Mg/ha/年$ )<sup>3)</sup>で除すことで推定した。地上部バイオマス生産量のマス・ベース( $Mg$ )からボリューム・ベース( $m^3$ )への変換、および木材の生産・加工過程での材積減少の補正を、バイオマス変換拡大係数<sup>3)</sup>を用いて行った。地上部バイオマス生産量は気候帯(亜寒帯、温帯、亜熱帯、熱帯)と森林タイプ(自然林もしくは植林)、バイ

オマース変換拡大係数は気候帯、森林タイプ、材積レベル ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) によってそれぞれ異なる値を用いた。各国内の各気候帯から生産された丸太の相対的割合を、世界気候帯地図<sup>4)</sup>を用いて推定した。地上部バイオマス生産量は、自然林と植林の平均値を用いた。各気候帯および森林タイプにおける材積レベル ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) は、それぞれにおける地上部バイオマスデータ ( $\text{Mg}/\text{ha}$ )<sup>3)</sup>と平均材密度<sup>5)</sup>から求めた。

農地拡大要因は、各国における食料生産に要した土地面積 (ha) とした。1986-2009年の200カ国以上における約450種類の農畜産物を生産するのに必要な土地面積 (ha) を解析したKastnerら<sup>6)</sup>のデータを用いた。国レベル解析の際は、東南アジアの主要輸出作物であるオイルパーム、コーヒー・ココア等の刺激物、主要穀物10種、その他に分けた。

### 3) 潜在的原因

人口要因として、人口密度、農村・都市・総人口の増加率、都市人口比を用いた (UN population division)。

経済要因として、一人当たりGDP、GDP成長率、人間開発指数、貧困率、GINI指数、農業・製造業・サービス業 (%GDP)、資源レント (%GDP)、森林レント、森林レント (%資源レント) を用いた (IMF、UNDP、World Bank)。人間開発指数は、経済・健康・教育レベルの統合指標である。資源レントは、石油、ガス、石炭、鉱物、森林レント (超過利潤) の合計である。

社会要因として、ガバナンス、社会的自由、紛争を用いた。ガバナンスは、Transparency Internationalが報告しているCorruption Perception Index(CPI)を用いた。CPI値は、1994年より過去のデータがない。Smithら<sup>7)</sup>の手法を用いて、1980年代から統計が取られているInternational Country Risk Guideの“汚職”“官僚の質”“法秩序”データとCPI値との相関関係に基づき、CPI値を過去に外挿した。社会的自由は、PolityIVデータベースの政治形態スコア (民主的～独裁的) およびFreedom Houseの自由スコア (自由～不自由) のPCA1軸値を変数とした。自由スコアは、政治的権利スコアと市民的自由スコアの合計値とした。紛争は、虐殺/粛清 (INSCR、CSP) と武力衝突 (Battle death dataset、PRIO) による死者数の合計値とした。

農業集約性は、農業投資、穀物生産性、農業生産性を用いた。農業投資は、単位農地面積当たりの農業機械輸入額、殺虫剤輸入額、施肥量 (FAOSTAT) のPCA1軸値とした。農業生産性は、穀物・雑穀・根および塊茎・野菜・果物・油糧作物の生産性 (FAOSTAT) のPCA1軸値とした。

農林産物貿易は、面積ベースの木材自給率、食料自給率、農林産物自給率を用いた。自給率は、以下のように定義できる。

$$\text{自給率} = \frac{\text{生産} \times 100}{\text{生産} + \text{輸入} - \text{輸出}}$$

木材の生産は先述のデータ、食料の輸出入はKastnerら<sup>6)</sup>の貿易フロー分析のデータを用いた。

FAOSTATから、1981-2010年における産業用丸太、挽き立て材、木質ボード、紙類、チップ・パルプの輸出量を得た。パルプ、新聞紙、紙・板紙はマス・ベース (Mg) のデータであるため、それぞれの変換係数 (Observatory of the European Forest Economy) を用いてボリューム・ベース ( $\text{m}^3$ ) へ変換した。紙・板紙については、各国のリサイクル率を算出し、古紙利用分のダブル・カウントを避けた。先述の地上部バイオマス生産量を用いて、輸出用の木材製品を生産するのに必要な森林面積(ha)を算出した。

FAOSTATから、1997-2010年の174カ国における木材製品の輸入量 (174カ国×174カ国のマトリックスデータ) を得た。先述と同じ方法で、パルプと紙類の単位変換とリサイクル率の考慮をした



後、地上部バイオマス生産量を用いて輸入用木材製品を生産するのに必要な森林面積(ha)を算出した。1996年以前の木材輸入については各国における品目ごとの輸入総量のデータしかなく、どの国からどれだけ輸入されたのかが分からない。そこで、それぞれの品目の1997-1999年の国別輸入割合の平均が1996年以前も一定だったと仮定し、計算を行った。

地理要因として、国土面積、残存森林率、山岳度、熱帯低地林（潜在自然植生）の面積率、3つの気候変数、4つの土壌変数、海岸線比率（The World Factbook、CIA）、保護区面積比（FAO FRA）、標高中央値と標高SD（WorldClim）を用いた。熱帯低地林は、熱帯山地林よりも生産性とアクセス性が良く農地転換圧が高いため、森林が消失しやすいと考えられる。そこで、世界気候帯地図<sup>4)</sup>を用いて、熱帯低地林（熱帯湿潤・乾燥林、泥炭・淡水湿地林）が潜在自然植生となっている面積の割合を求めた。19個の気候変数（1kmメッシュ、WorldClim）と12個の土壌変数（10kmメッシュ、GeoNetwork）の各国の平均値を計算し、それぞれPCA解析を行った。10%以上の変動を説明していた3つの気候要因（気温季節性、平均気温、降水量）と4つの土壌要因（土壌有機態炭素、土壌肥沃度、土壌水分、土壌窒素）を変数として用いた。国レベルの解析には、それぞれのPCA1軸値のみを用いた（気候要因は気候季節性、土壌要因は土壌水分及びCEC）。

#### 4) 重回帰分析

1981-2010年の間の森林面積変化率に一貫した影響をもつ駆動因を明らかにするために、主要な変数の説明力を重回帰分析によって調べた。まず、先述の相関解析によって3年代のうちの少なくとも一つの年代で相関関係が見られた変数のみを選択し、解析に用いた。森林面積変化率に対して凹型もしくは凸型に応答する変数がある可能性を考慮し、各変数の2乗項も設けた。説明変数の多重共線性は、Variance Inflation Factor（VIF）を調べてVIFが10以上の変数は解析から外した<sup>8)</sup>。モデル選択は、小標本サイズのための赤池情報量規準（AICc）に基づいた<sup>9)</sup>。全ての組み合わせの中でどのモデルの重要度が高いのかをAICc weightによって算出した後、説明変数の相対的な重要度（IOV: relative Importance Of Variable）を調べてモデル選択を行った<sup>10)</sup>。

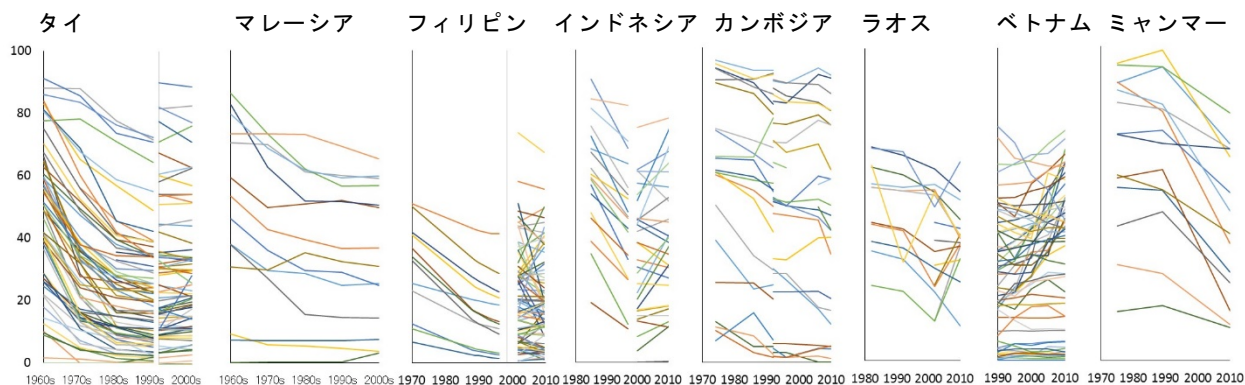
#### (2) 県レベル

東南アジア8カ国のなるべく過去から現在までの県レベルの森林面積の変化を、各国政府機関発行の統計資料から得た（図(5)-2）。タイは1961年（最大で76県）、マレーシアは1962年（14州）、フィリピンは1969年（12地方、2003年以降は83州）、インドネシアは1982年（33州）、カンボジアは1974年（25州）、ラオスは1982年（17県）、ベトナムは1990年（63省）、ミャンマーは1975年（14州/地域）以降の森林面積データを得た。森林面積変化率と後述する要因との関係について、Pearsonの相関関係 $r$ を求めた。また、1990年頃の森林率（%）との相関関係も同様に調べた。各国ともおよそ1980年代以降は衛星リモセンに基づいて森林面積を算出している。しかし、画像の空間解像度や“森林”の基準は、国間及び同一国内の時期間で異なる。また、1970年代以前のデータは各国独自の国土データに基づいている場合も多い。森林以外のデータも国間・時期間でデータの内容に大きな違いがある（後述）。そのため県レベル解析では、同一国内のあるまとまった期間内における県間で駆動因を比較し、国間・時期間での直接的な比較はしない（例えばラオスの場合、1982-1992年、1992-2002年、2002年-2010年の各時期内で相関解析を行うが、時期間の直接的な比較はしない）。しかし、各国・各時期の相関解析で有意な関係が得られた要因を概観することにより、駆動因の国間の違いや時間的変化を推察することができる。

各国において、農林産物貿易と政治・社会を除く要因をできる限り収集した。マレーシアでは、他国で普通に発刊されている人口・農業・経済・林業センサスのような県レベルの統計データがほとんど公表されておらず、十分な駆動因データが得られなかったためマレーシアは解析から除外した。木材伐採要因は木材生産量もしくは生産額とし、いくつかの国・時期で得られた。農地拡大要因は、各国の主要農作物の作付面積とし、ほぼ全ての国で得られた。人口要因は、人口密度と総人口増加率とし、ほぼ全ての国・時期で得られた。経済要因は、得られるデータの内容に国間で顕著な違いがあった。そこで、1.人間開発指数（教育・健康・経済の統合指標）、2.識字率、乳幼児死亡率、世帯収入のPCA1軸値、3.Gross Provincial Product（県レベルのGDP）、4.平均世帯収入、5.データなし、の1→5の優先順位で、いずれかの値をその国・時期の経済データとした。農業集約性は、主要農作物の生産性のPCA1軸値とし、ほぼすべての国・時期で得られた。地理要因として、残存森林率、標高中央値、標高SD、熱帯低地林（潜在自然植生）の面積率、熱帯山地林（潜在自然植生）の面積率、気候変数を用いた。

### （3） Forest Transition

熱帯53カ国中8カ国では森林が回復している（フィリピン、タイ、ベトナム、インド、コートジボアール、ドミニカ共和国、キューバ、コスタリカ）。この森林回復の要因として、経済レベルと残存森林率の重要性が指摘されている<sup>1)</sup>。2000年代の53カ国を対象に、一人当たりGDPクラスを3等分し（低・中・高、それぞれ177-783・981-2,580・3,394-16,440 USドル）、さらに森林率50%を境に2つの森林率クラスに区分した（50%以上・50%未満）。そして、FT国がどの区分に含まれるのかを調べた。



図(5)-2 東南アジア8か国の県レベルの森林率の変化

## 4. 結果及び考察

### （1）国レベル

#### 1) 森林率

約40の変数中わずか3つの変数と森林率との間に相関関係が見られた（図(5)-3）。潜在自然植生“熱帯低地林”の面積率および人口密度と負の相関、森林レントと正の相関がみられた。つまり、生産性とアクセス性の高い（農地転換圧の高い）低地面積が広く人口が多い国ほど、森林が少ないことが分かった。また、森林が多い国ほど木材生産の対GDP比が高いことが分かった。

## 2) 潜在的原因→直接的原因パス

3時期のうち少なくとも1時期において、木材生産（生産面積/人）は8変数と、食料生産は6変数と有意な相関関係が見られた（図(5)-4）。すべての変数で、関係性（正もしくは負の相関）は年代によらず一貫していた。変数は、木材生産と食料生産で異なっていた。例えば、木材生産は、森林率・森林レント・木材自給率が高いほど、また人口密度と熱帯低地林が少ないほど増加した。一方、食料生産は、食料自給率・国土面積・社会的自由・GDPpcが高いほど、また貧困率が低いほど増加した。

## 3) 直接的原因→森林減少パス

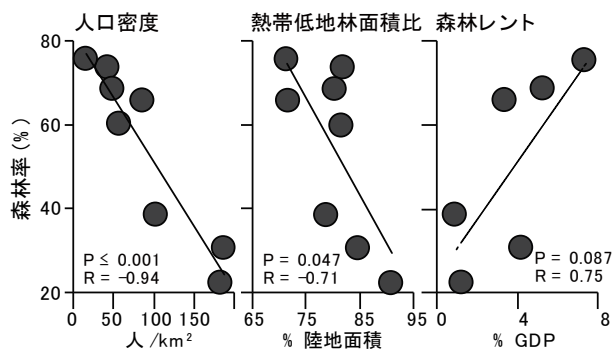
木材と食料（主要穀物と刺激物を含む）生産は、年代によらず一貫して森林面積変化率と負の相関があった（図(5)-5）。

## 4) 潜在的原因→森林減少パス

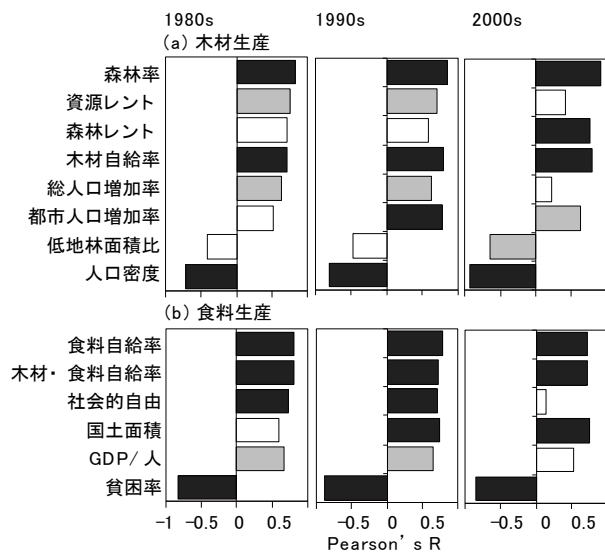
1980年代は、人口密度・都市化・人間開発指数・社会的自由・農業投資が多いほど、また木材自給率が少なく森林が少ないほど、森林は減少した（図(5)-5）。1990年代以降は、バーの向きがすべて逆方向になった。つまり、高開発な（人口が多くて都市化が進み、自由で、農業投資が多く、木材輸入が多い）森林の少ない国々が、1980年代はさらに森林を減少させたが、1990年代以降は逆にそのような国で森林回復が進んだといえる。

## 5) 重回帰分析

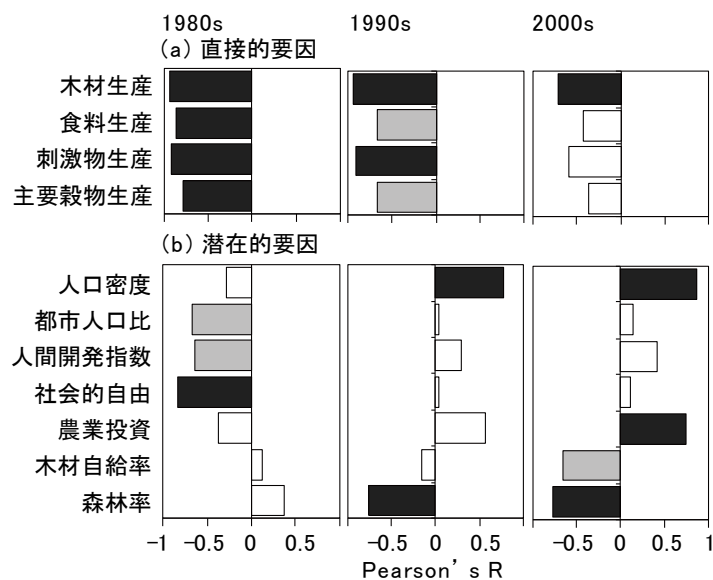
農業投資が多いほど、森林が回復することが分かった（図(5)-6）。また社会的自由の2乗項が要因に選ばれたことから、社会的にとっても自由な国々ととても閉鎖的な国々で森林が回復する一方、中程度に自由な国で最も森林が減少することが分かった。



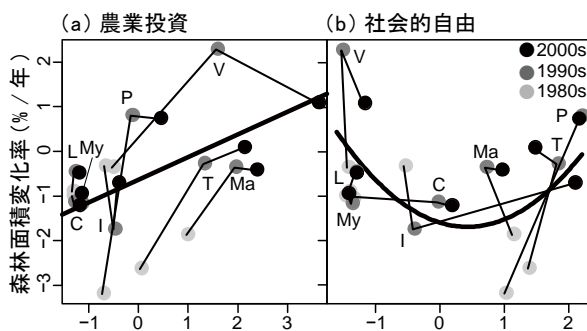
図(5)-3 東南アジア8か国における森林率と駆動因の関係



図(5)-4 直接的原因（木材生産と食料生産）と潜在的原因との相関関係  
 黒バー： $p < 0.05$ 、灰色バー： $0.05 \leq p < 0.1$ 、白バー： $p > 0.1$ 。



図(5)-5 直接的原因→森林減少パス(a)と潜在的原因→森林減少パス(b)



図(5)-6 重回帰分析の結果選ばれた要因  
 1つの国が年代の異なる3点で示されている。

## (2) グローバルレベル

### 1) 森林率

工業が発達しGDPpcが高く（しかし所得配分は不平等）資源レントが多く都市化している国ほど森林は多かった（図(5)-7）。また、貧困率と人口密度が高く、亜熱帯国で、土壌が肥沃で土壌炭素が少ない国ほど森林は少なかった。

### 2) 潜在的な原因→直接的な原因パス

木材および食料生産はそれぞれ様々な潜在的な要因と相関していたが、その関係性（正もしくは負の相関）は年代に関わらず一貫していた（図(5)-8）。

### 3) 直接的な原因→森林減少パス

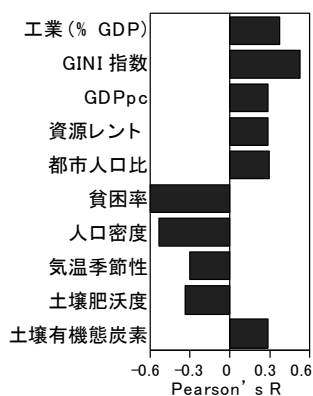
木材および食料生産の多い国ほど、年代に関わらず一貫して森林減少率は高かった（図(5)-9）。

### 4) 潜在的な原因→森林減少パス

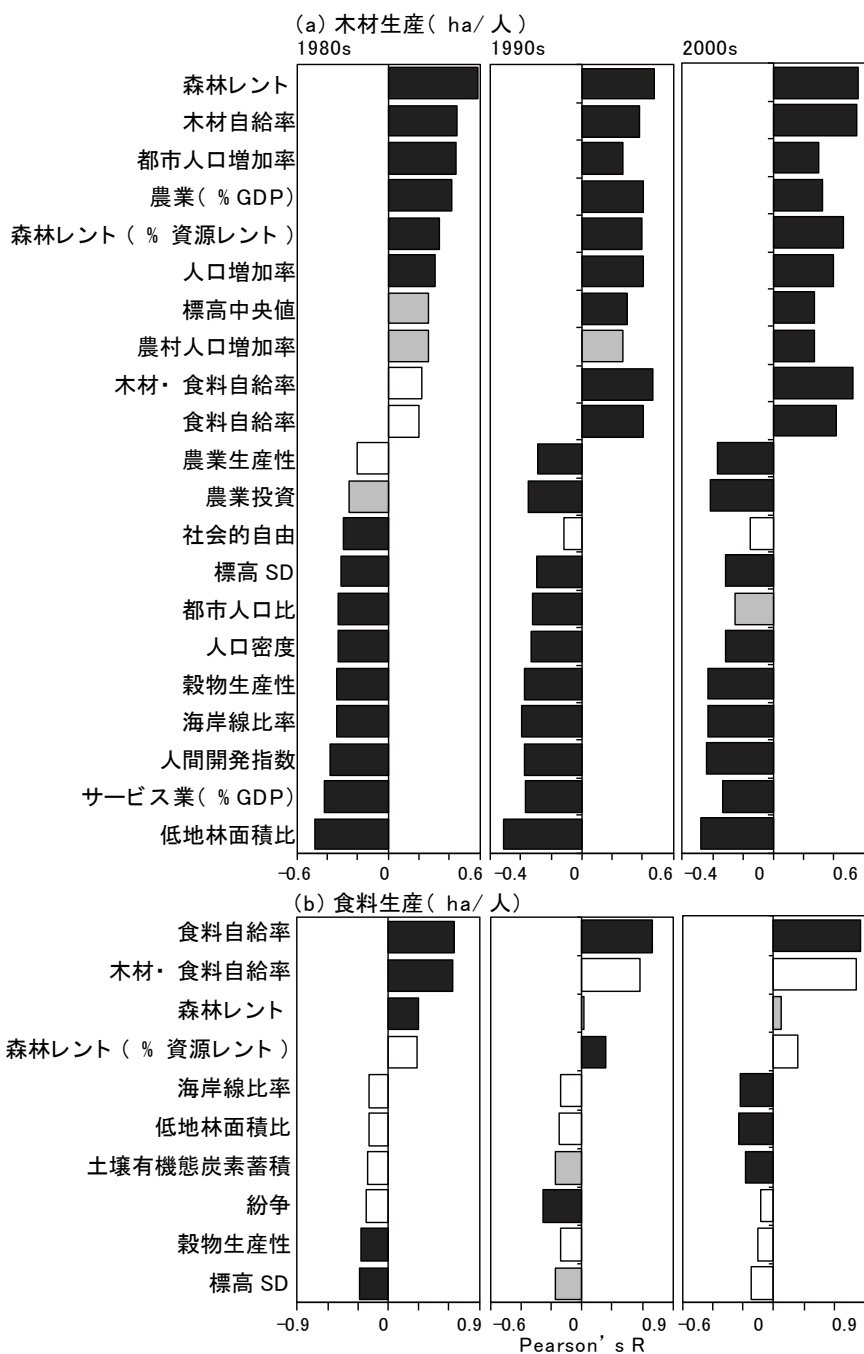
土地が肥沃で、山がちで、農村・総人口増加率が高く、汚職が蔓延している国ほど、年代に関わらず一貫して森林は減少していた（図(5)-9）。また驚いたことに、保護区面積が広い国ほど森林は減少した。これは、森林減少の激しい熱帯国ではそれを防ぐためにより多くの保護区を設置するが、保護区境界の管理に失敗し保護区内外で森林減少が進んでいるためかもしれない<sup>11)</sup>。一方、それ以外の要因のパターンは、1980年代とそれ以降で全く異なった。1980年代は、海岸線が長く（輸送コストが安い）、降水量が多く、熱帯低地林の潜在面積が広く、人口密度が高く、農業投資が多く、穀物生産性が高く、森林率が低く、資源（特に地下資源）レントが少ない国ほど森林は減少した（一般に、地下資源の乏しい国は地上資源（森林）レントを得ようとする）。1990s以降は、逆にそのような国ほど森林は回復した。

### 5) 重回帰分析

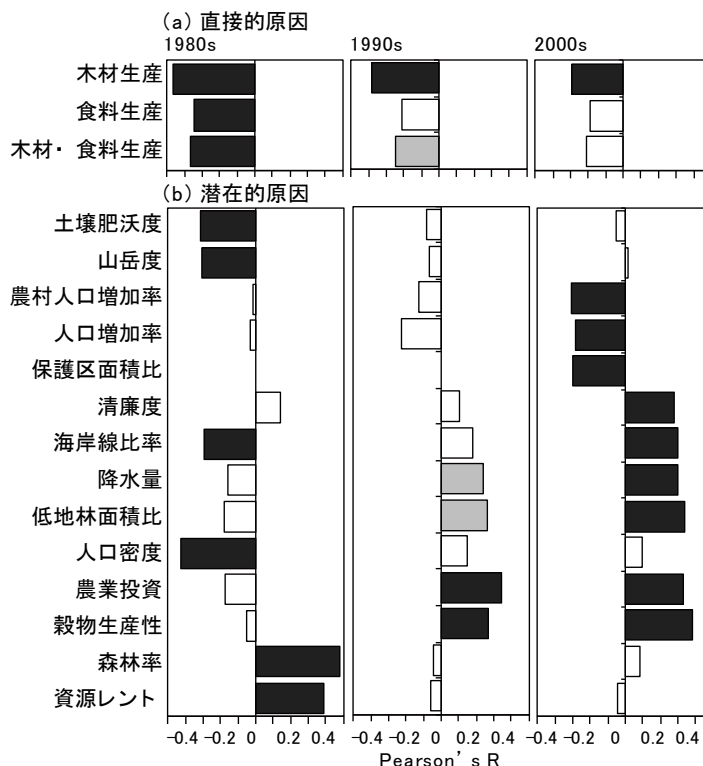
農村人口増加率と土壌肥沃度が高いほど、また農業投資が少ないほど森林が減少することが分かった（図(5)-10）。



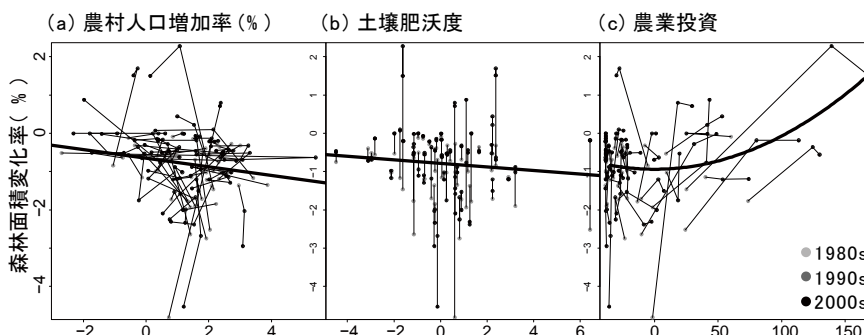
図(5)-7 53カ国における森林率と駆動因との相関関係



図(5)-8 直接的原因 (木材生産と食料生産) と潜在的な原因との相関関係



図(5)-9 直接的原因→森林減少パス(a)と潜在的な原因→森林減少パス(b)



図(5)-10 重回帰分析の結果選ばれた要因

### (3) 県レベル

森林率は、国によらず、標高が低く熱帯低地林の潜在面積比が高く、人口密度の高い高開発な県ほど、森林率が低かった。マレーシアを除く7か国の森林減少・回復のパターンは以下であった。

#### 1) カンボジア

気候季節性が大きい亜熱帯域で（湿潤熱帯より植生回復力に劣る）、年代によらず一貫して森林減少率が高かった。1970-1990年代は、熱帯低地林の潜在面積比の高い県で森林減少が進んでいたが、2000年代はそのような県ほどで森林回復が進んだ。

#### 2) インドネシア

1980-1990年代は、森林減少のペースが県間でおおむね一様だったため駆動因に特徴は無かった。2000年代は、無季節熱帯低地（カリマンタンとスマトラ）でより減少した。

### 3) ラオス

全ての年代で、森林減少率と相関する要因が特に無かった。各県の特徴の違いに関わらず森林面積が変化しているためか、サンプル（県）数が少ないためだと考えられる。

### 4) ミャンマー

1970-1980年代は、森林減少率と相関する要因が特に無かった。1990-2000年代は、高標高の気候季節性が大きい亜熱帯域で森林減少が進んだ。

### 5) フィリピン

1980-1990年代は、低開発な無季節熱帯低地の県で森林減少が進んだ。2000年代は、逆にそのような県でより森林が回復した。

### 6) タイ

1970-1980年代は、温暖な中南部の貧しい低開発な県で森林がより減少した。2000年代は、低地の人口が多く人口増加率も高い県（チャオプラヤ川周辺県）ほど森林が回復した。

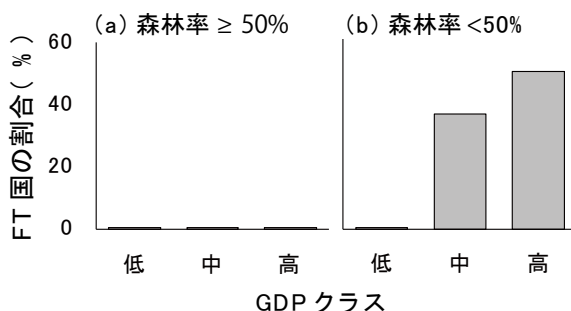
### 7) ベトナム

1990年以降一貫して、高標高の低開発で人口が少ない省でより森林が回復した。以上のように、森林の減少・回復の要因は国間で異なったが、おおむね1990年代頃を境に駆動因に変化が見られた。

## (4) Forest Transition

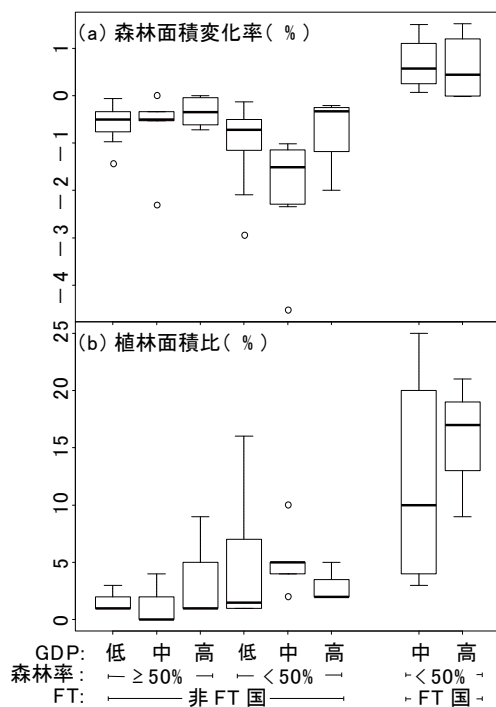
FTは、森林率が50%以上の国では起こっておらず、森林率が50%未満のGDPクラスが中程度以上の国でのみ起こっていた（図(5)-11）。植林面積比がFT国で特に高いことから（図(5)-12）、植林は森林回復の主要な手段であることが分かった。森林減少率は、非FT国のどの森林率・経済クラスでもおおよそ0.5%前後であったが、森林率50%未満かつGDPが中程度の国では突出して高かった。経済レベルが中程度の時、森林の少ない国は残されたそのわずかな森林資源をむしろ森林が多い国よりも早いペースで消費する、ネガティブ・フィードバックが生じることが分かった。

森林が少ない経済レベルが中程度以上の国の中でも、FT国（42%）と非FT国（58%）が混在する。この要因を明らかにするため、森林率<50%かつGDPクラス中・高の国のみを抽出し、FT国と非FT国間で駆動因を比較した。その結果、FT国は非FT国よりも海岸線が長く、農村・総人口増加率が低く、農業投資が多くて穀物生産性が高く、清廉で、森林レントと木材自給率が低かった（図(5)-13）。つまりFTは、安い輸送コスト（高い海岸線長比）、農外雇用の増加（農村人口の低下）、農業集約化、良いガバナンス、木材輸入増などに関係が深いことが分かった。

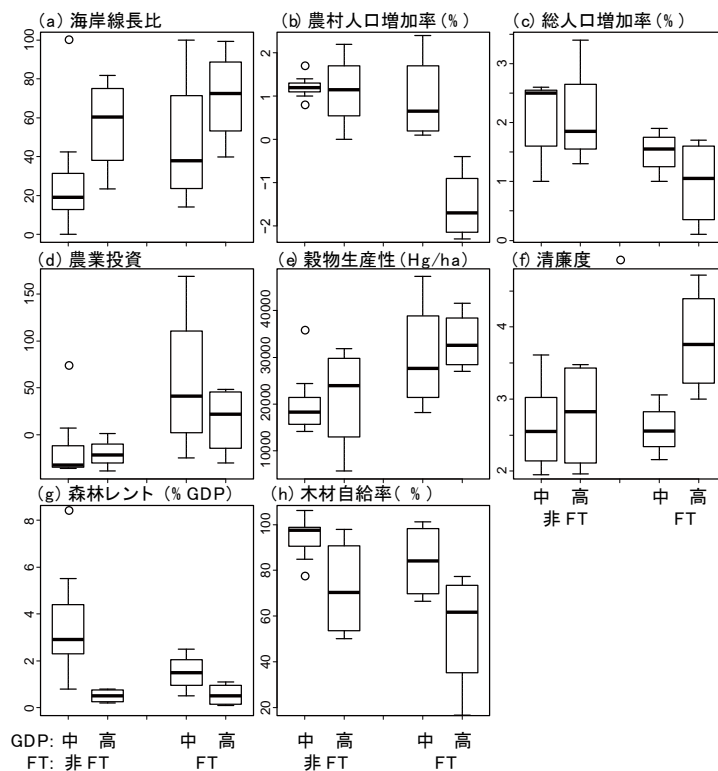


図(5)-11 熱帯53カ国中のFT国の割合  
GDPpcおよび森林率クラスごとに示す。





図(5)-12 53カ国の森林面積変化率と植林面積比  
 GDPクラス、森林率クラス、FT/非FT国ごとに示す。



図(5)-13 Forest Transitionが起こりやすい森林率(<50%)およびGDPクラス(中・高)の国々における、FT国と非FT国間での駆動因の比較

## (5) まとめ

### 1) 森林減少の駆動因

森林率に及ぼす要因は、県・国・グローバルといった空間スケールによらず、おおむね共通していた。つまり、農地転換圧が高いと考えられる肥沃で低平な土地が多く、人口の多い所ほど森林が少なかった。一方、森林減少率に及ぼす要因は非常に多様で、また国・グローバルレベルの間では似ていたが県レベルでは各国固有の特徴が見られた。森林減少に関する研究は、データの利用しやすさなどから国・グローバルレベルを対象にしたものが多くその知見に基づいて森林保全政策が議論されることが多い。しかし、県レベルの駆動因は国・グローバルレベルのそれと異なることがあるため、グローバルレベル解析で得られた知見を即各国の森林保全政策に活用するには注意が必要であると考えられた。

全ての空間スケールにおいて、1990年頃を境として駆動因に大きな変化が見られた。これには、以下の二つの理由が考えられる。一つ目は、経済レベルが中程度の時にネガティブ・フィードバック（森林が少ない地域では残されたそのわずかな森林資源を、むしろ森林が多い地域よりも早いペースで消費する）が生じやすい一方、経済レベルがさらに上がると森林が回復しやすいためである。1980年代は、森林の少ない比較的高開発の国々で森林がさらに減少し続けていた（図(5)-5, 9）。1980年代以前は、このようなネガティブ・フィードバックの状況にある国・地域が多かったと考えられる（例：フィリピン、ベトナム）。経済開発と森林減少がさらに進むと、生態系サービスの低下が顕著となって森林保全インセンティブが政策決定者の間で高まるとともに、森林保全、特に植林に充てられる予算額が増える<sup>1)</sup>。そのため、1980年代までは森林減少の速かった地域が、むしろ1990年代以降は先んじて森林回復に向かったと考えられる。従って、そのような地域を特徴づけるような駆動因（例：低い森林率、高い人口密度、高い農業投資）と森林減少との相関パターンが1990年頃を境に真逆になったと考えられる。二つ目は、1980年代後半からの急速なグローバル化である。ソ連崩壊前後からの国際貿易量の急速な増大によって、農林産物貿易も活発化した。農林産物輸入は自国における森林減少圧を低下させる一方、輸出はこれを増加させる。残存森林率が低く比較的高開発な国々は、1980年代後半から輸入増加によって森林回復しやすい土壌が生まれていった一方、残存森林率が高い国や貧困国ではその時期から輸出用農林産物の輸出を盛んに行い森林減少が進んだ（例：マレーシアのオイルパーム、ミャンマーの木材）。

潜在的原因→森林減少パスは1990年頃を境に相関パターンが真逆になったが、潜在→直接と直接→森林減少という2つの直接的パスのそれは年代に関わらず一貫していた。森林減少に関する研究のほとんどはデータの利用しやすい潜在的原因に注目したもので、直接的要因に注目したものは少ない。これは、直接的原因（木材伐採と農地拡大）が森林減少につながることは自明であること、また森林減少が起こった場合にそれが木材伐採によるのか農地拡大によるのかを判断することが難しい、ためであると考えられる。しかし、潜在的原因→森林減少パスは先述のように、サンプル群の多くがどの経済レベル・森林率に当たるかによって相関パターンが真逆を向くことがあるため、ある要因が森林に負に効く要因なのか正に効く要因なのかは状況依存的になってしまう。今後は、2つの直接的パスにより注目した研究が求められる。木材伐採と農地拡大に及ぼす潜在的原因はそれぞれ異なっていたことから（図(5)-4,8）、森林減少が主に木材生産によって起きている国と食料生産によって起きている国とでは取るべき政策も異なってくるだろう。本研究が行った、木材・食料の生産データから間接的に木材伐採と農地拡大を推定する方法は、こう

した研究の重要な手法になりうる。

重回帰分析の結果、肥沃で農村人口増加率が高く農業投資が少ないほど森林が減少することが分かった。また、民主的（タイ・フィリピンなど）もしくは閉鎖的（ベトナムなど）な社会で森林は回復し、中程度の社会で最も減少することを示した。肥沃度と農村人口増加率が高い所ほど森林減少が進むのは、そうした場所は農地転換圧と人口圧が高いためだと考えられる。農業投資が多いほど森林回復が進むのは、1)生産性が上がり農地の新規開拓を防ぐ、2)生産コスト増で収益性が下がり低生産性農地が放棄される、3)技術革新や農産物価格上昇は地方の世帯収入を上げ農外雇用を促進する、などの複数の要因が考えられる。社会的自由に関しては、独裁的で強い官僚システムをもつ社会はしばしば民主的社会よりも効率的かつ強力に環境保全活動を行うことがある一方（例：中国の植林）、民主的社会ほど森林保全への社会的関心が高くそれに適した組織・資源利用方式・法律や選挙システムを持つためであると考えられる。以上のように、社会的自由、農業集約化と農外雇用の増加（農村人口の低下）という、従来の森林セクターにおける森林保全政策（例：土地利用デザイン、持続的森林管理、植林、丸太の伐採・輸出禁止）とは異なる側面も重要性であることが分かった。また、保護区設置も重要な森林保全政策の一つであるが、それを維持する資金と実行力が無ければ効果は無いことが分かった。

## 2) Forest Transition

FTは、森林が少ない経済レベルが中程度以上の国でのみ起こることが分かった。経済レベルが低い国でFT国が無いのは、植林などの森林保全政策に充てられる予算が十分確保できないためであり、こうした国々には外部からの経済的支援を含む保全政策が必要であろう。一方、森林が多い国でFT国が無いのは、森林減少による生態系サービス低下の悪影響が比較的少ないためだろう。しかし、大国（例：ブラジル、インドネシア、マレーシア）における森林減少は、森林減少“率”は小さくとも地域レベルでは大面積の森林消失を招き生物多様性を低下させる。こうした国々には、森林減少による生態系サービス低下の社会経済的効果を、政策決定者（特に森林以外のセクター担当者）に十分認知してもらうことが重要であろう。

経済レベルが中程度の森林が少ない国で、ネガティブ・フィードバックが生じていた。これに該当する経済・森林クラスの国々は、“貧困の罠”のように、“森林急減の罠”に陥りやすい国々であるため、国際社会はこうした国々の状態に特に注意する必要がある。一方で、この経済・森林クラスの国々こそ、最もForest Transitionが起こりやすい国々でもある。FT国と非FT国間の比較によると、この両者を分ける地理的要因は少なく（海岸線比率のみ、輸送コストに影響する）、社会経済政策などによって誘導可能な要因がほとんどだった。つまり、森林セクターとしては植林の促進、それ以外のセクターとしては農外雇用の増加、農業集約化、良いガバナンス、木材輸入の増加である。木材輸入増加はいわゆるリーケージ（自国で起こるはずの森林減少の他国への付け替え）を起こすが、ネガティブ・フィードバックが生じつつある国々に限っては現実的で有効な政策オプションであろう。

東南アジアでは現在、森林率が低いフィリピン・タイ・ベトナムで森林回復が進み、比較的森林率の高いその他5カ国で森林減少が進んでいる（経済レベルはラオス・カンボジア・ミャンマーが低、インドネシアが中、マレーシアが高）。森林率50%以上の熱帯国で森林が回復した例がこれまで一つも無いことを鑑みると、これら5カ国、特に森林率が60%を超えるラオス・マレーシアでは森林減少が当分続くだろう。一方、ミャンマーの森林率は既に40%台にまで下がり、インドネシ

ア・カンボジアも50%を割り込む勢いで減っている。経済レベルの低いミャンマー・カンボジアでは、外部からの資金協力及び良いガバナンスを通じた実効性のある森林保全政策が実行されない限り、森林減少が当面続く可能性が高い。インドネシアが5か国の中で唯一FTが起りうる経済・森林率クラスに当たるが、FTが起こる確率は文字通り半々である（図(5)-11）。ブラジルではここ数年、肉・大豆サプライチェーンへの政策介入等によって森林減少率の急減に成功した<sup>12)</sup>。インドネシアにおいても、森林減少に特に重要な生産物（例：オイルパーム、丸太）サプライチェーンへの政策介入や先述のような社会経済構造（農外雇用増、農業集約、良いガバナンス、木材輸入増）への政策誘導がうまく機能すれば、森林減少を低下できる可能性は高い。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

熱帯林の減少・劣化に伴う生物多様性損失を避けるために、熱帯林減少の駆動因を統一的に理解することが求められている。既存研究の多くは、1-数個のごく限られた駆動因にのみ注目、一つの空間スケールにのみ注目、もしくはごく最近の傾向にのみ注目し、統一的理解には及んでいなかった。その中で本課題は、森林減少の駆動因は非常に多様で、対象とする空間スケールと年代によって大きく異なることを示した。また、森林減少には潜在的原因→直接的原因→森林減少という階層性があり、既存研究が主に注目してきた潜在的→森林減少パスでは解析対象とする年代によって相関パターンが真逆になることを示した。これに対し、潜在的原因→直接的原因と直接的原因→森林減少の2つのパスは年代によらず一貫した傾向があり、どのパスに注目するかによっても駆動因の理解が大きく変わりうることを示した。最後に、森林の回復は、ある特定の経済レベル・森林率の国でのみ起こるもので、森林回復に重要な社会経済要因も明らかにした。このように本課題は、熱帯林の減少・回復の要因の理解に大きな貢献を果たした。

### (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>

熱帯林減少を抑止し回復に導くには、森林減少のパターンとその要因を正確に把握して対策を講じることが重要である。本研究が示した森林の減少・回復のパターンや要因、および解析手法は、REDD+やIPBESにおける専門家会合や国際機関・各国の政策決定者に対して必要な情報を提供する。

## 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）>

- 1) R. TSUJINO and T. YUMOTO: Journal of Plant Research 126, 203-214 (2013), Vascular plant species richness along environmental gradients in a cool temperate to sub-alpine mountainous zone in central Japan.
- 2) R. TSUJINO, K. MATSUI, K. YAMAMOTO, R. KODA, T. YUMOTO, KI. TAKADA: Journal of Plant Research 126, 625-634 (2013), Degradation of *Abies veitchii* wave-regeneration on Mt. Misen in Ohmine Mountains: effects of sika deer population.
- 3) R. TSUJINO and T. YUMOTO: Primates 55, 161-165 (2014), Problems associated with the seed-trap method when measuring seed dispersal in forests inhabited by Japanese macaques.
- 4) R. TSUJINO and T. YUMOTO: Ecological Research 29, 701-71 (2014), Habitat preferences of medium/large mammals in human disturbed forests in Central Japan.
- 5) T. YUMOTO, M. TERAOKA, S. TERADA, A. BOUPOYA and T. NZABI: Tropics 23, 205-213 (2015), Species composition of a middle altitude forest in Moukalaba-Doudou National Park, Gabon.

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) R. TSUJINO, T. YUMOTO, S. KITAMURA, I. DJAMALUDDIN: The 5th East Asian Federation of Ecological Societies, Shiga, Japan, 2012  
“Forest area change and its driving factors in Indonesia”
- 2) R. TSUJINO: International workshop on Landuse Diversity and Autonomy in Southeast Asia, Research Institute for Humanity and Nature, 2012  
“Causes and history of forest loss in Cambodia”
- 3) 辻野亮：公開講演会「生物多様性観測・評価・予測研究の最前線」（2012）  
「東南アジアの森林減少と可能性」
- 4) 辻野亮：第22回日本熱帯生態学会(2012)  
「東南アジアの森林減少とその保全」
- 5) 辻野亮、加治佐剛、湯本貴和：日本生態学会第60回大会（2013）  
「カンボジアにおける森林減少の要因と歴史」
- 6) 今井伸夫、湯本貴和、辻野亮：日本生態学会第61回大会（2014）  
「東南アジアにおける森林面積の減少と回復の要因」
- 7) 今井伸夫、湯本貴和、辻野亮、北村俊平：日本生態学会第62回大会（2015）  
「熱帯林減少の駆動因 -人口・経済・貿易・地理-」
- 8) 今井伸夫：日本生態学会第63回大会（2016）  
「熱帯林減少の駆動因のマルチスケール解析」
- 9) 湯本貴和：日本生態学会第63回大会（2016）  
「里山里海サブグローバルアセスメントからIPBESへの貢献」

(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

- 1) RM. EWERS: Global Environmental Change, 16, 161-169 (2006), Interaction effects between economic development and forest cover determine deforestation rates.
- 2) MC. HANSEN, PV. POTAPOV, R. MOORE, et al.: Science 342, 850-853 (2013), High-resolution global maps of 21st-century forest cover change.
- 3) IPCC: IGES, Japan (2006), IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- 4) DM. OLSON, E. DINERSTEIN, ED. WIKRAMANAYAKE, et al.: Bioscience, 51, 933-938 (2001) Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on earth.
- 5) J. CHAVE, HC. MULLER-LANDAU, TR. BAKER, et al.: Ecological Applications 16, 2356-2367 (2006), Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species.
- 6) T. KASTNER, KH. ERB and H HABERL: Environmental Research Letters 9, 034015 (2014), Rapid growth in agricultural trade: effects on global area efficiency and the role of management.
- 7) RJ. SMITH, RDJ. MUIR, MJ. WALPOLE, et al.: Nature 426, 67-70 (2003), Governance and the loss of biodiversity.
- 8) CF. DORMANN, J. ELITH, S. BACHER, et al.: Ecography 36:27-46 (2013), Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance.
- 9) N. SUGIURA: Communications in Statistics - Theory and Methods 7, 13-26 (1978), Further analysts of the data by akaike' s information criterion and the finite corrections.
- 10) KP. BURNHAM and DR. ANDERSON: Springer (2002) Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach.
- 11) LM. Curran, SN. Trigg, AK. McDonald, et al.: Science 303, 1000-1003 (2004), Lowland forest loss in protected areas of Indonesian Borneo.
- 12) D. NEPSTAD, D. MCGRATH, C. STICKLER, et al.: Science 344, 1118-1123 (2014), Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains.

## (6) 生物多様性フットプリントの評価指標の開発

横浜国立大学環境情報研究院

金子 信博・松田 裕之・本藤 祐樹

<研究協力者>

横浜国立大学環境情報研究院

古川 拓哉（平成23～25年度）

西嶋 翔太（平成25～27年度）・

種田 あずさ（平成24～27年度）

国立研究開発法人国立環境研究所

角谷 拓・石濱 史子

東京農工大学農学研究院

加用 千裕

平成23～27年度累計予算額：37,852千円（うち平成27年度：6,915千円）

予算額は、間接経費を含む。

### [要旨]

私たちの生活において、農畜産物や木材といったバイオマス資源は欠かせないものであるが、バイオマス資源の過剰な消費は生態系や生物多様性を劣化させる遠因となる。ある国で消費されるバイオマス資源は、しばしば国際貿易によって別の生産国から輸入されるため、消費活動が生態系や生物多様性に与える影響は国境を越える。本課題では、木材貿易の生物多様性影響を評価するためのフットプリント指標の開発に取り組んだ。まず、木材の生産量から森林減少を予測する指標を開発し、実際の森林被覆の減少をうまく説明できることを示した。次に、この結果に基づき、2種類の生物多様性フットプリントを開発した。一つは、生息分布内の森林減少率に基づいた指標であり、哺乳類・鳥類・両生類・爬虫類という幅広い分類群を対象に木材貿易の影響を評価可能である。もう一つは、木材貿易が鳥類の絶滅リスクに与える影響を評価可能な指標であり、貿易と種の絶滅を関連付けたうえで、絶滅リスクを抑制するためのシナリオ分析を行えることが特徴である。これら指標から、特にブラジルとインドネシアが木材の輸出によって海外から生物多様性が脅かされている一方で、中国、日本、アメリカといった国が木材の輸入により海外に大きな生物多様性影響を与えていることが明らかになった。また、木材の消費量を維持しながら鳥類の絶滅リスクを抑えるためには、ブラジルやインドネシア、中国などの生産量を減らす一方で、アメリカやロシアなどにおいて生産量を増加させることが必要であることが示された。さらに、農畜産物の国際貿易に関する窒素フットプリント指標の開発も行い、日本を筆頭とする先進国が、特に農業生産を通じて途上国の窒素汚染を助長していることが明らかになった。これらの成果が、生物多様性に配慮した国際貿易や日々の消費生活のあり方を考える契機となることが期待される。

### [キーワード]

木材貿易、絶滅リスク、シナリオ分析、産業連関分析、窒素汚染

## 1. はじめに

私たちの生活には、農畜産物や木材といったバイオマス資源が欠かせないものであるが、バイ

オマース資源の過剰な消費は生態系や生物多様性を劣化させる遠因となる。ある国で消費されるバイオマス資源は、しばしば別の生産国から輸入されるため、消費活動が生態系や生物多様性に与える影響は国内にとどまらず、貿易を通じて国境を越える。国際貿易が生物多様性に与える影響を評価することは、日々の生活と生物多様性の関係を考える契機を提供するとともに、生物多様性損失の問題を国際的に取り組むうえで重要である。

日々の生活に伴う環境影響を定量化するものとして、フットプリント指標が挙げられる。エコロジカル・フットプリントやカーボン・フットプリントといった指標は古くから提案されてきたが、生物多様性フットプリントが開発されたのは比較的最近である<sup>1)2)</sup>。おそらくこれは、生物多様性には空間的遍在性が大きく、消費生活に伴う影響を評価するためのデータや手法が欠如していたことが理由である。また、国際貿易に関わる生物多様性フットプリントの既存研究<sup>1)</sup>は生物種間の差を考慮しておらず、より実際に即した形で生態影響を考慮した指標の開発が求められている。

## 2. 研究開発目的

本課題では、絶滅危惧種の生息地の減少率や、絶滅リスクに基づいた木材貿易の生物多様性フットプリント指標を開発することを目的とした。天然林における木材の生産と貿易は森林減少の主要因であり<sup>3)</sup>、特に熱帯林における生物多様性の消失を助長していると考えられる。ここではまず、木材の生産によって森林がどの程度減少するかを測るための指標 (FHI: forest harvest index) を開発し、実際の森林被覆面積の減少との関係を解析した。次に、森林性の絶滅危惧種 (哺乳類、鳥類、両生類、爬虫類) を対象に、空間明示的手法により、種ごとに生息地の減少率を評価した生物多様性フットプリント指標 (BF-spatial) を開発した。さらに、BF-spatialを拡張し、木材生産による森林減少が鳥類の絶滅リスクに与える影響を評価した生物多様性フットプリント指標 (BF-extinct) を開発した。

また、資源消費が窒素汚染に与える影響を評価するための指標として、窒素フットプリントの開発にも取り組んだ。窒素汚染は、地下水や大気の汚染、富栄養化などを通じて生態系と生物多様性の脅威となりえるが、カーボン・フットプリントと比べると開発が遅れている。ここでは、国際貿易と水産物に着目し、資源消費と窒素汚染の関係を定量化した。

## 3. 研究開発方法

### (1) 森林被覆面積の減少と木材生産の関係に関する研究

木材生産量から森林被覆の減少面積を予測することのできる指標 (FHI) の開発に取り組んだ。まず、2000年から2005年における各国の森林被覆の減少面積 (GFCL: gross forest cover loss) を森林消失マップ<sup>4)</sup>から算出した。次に、各国のFHIを産業用丸太と木質燃料に分けて、以下の式を用いて計算した：

$$FHI = \sum_y \sum_i \frac{V_{i,y} \cdot BEF_i}{D_{i,y}}$$

$V$ は産業用丸太と木質燃料の生産材積 ( $m^3$ ) であり、森林消失マップ<sup>4)</sup>と対応する5年間 (2000～2004年度) のデータを、利用可能であった139か国についてFAOSTAT (<http://faostat.fao.org/>) から取得した。添え字の $i$ と $y$ はそれぞれ木材の種類 (針葉樹か広葉樹) と年度 (2000～2004) を表してい



る。*BEF* (biomass expansion factor) は丸太の材積から枝葉つき材積に換算するための拡大係数であり、既存研究<sup>5)6)</sup>を基に、気候帯と木材の種類ごとに異なる値を用いた (表(6)-1)。複数の気候帯をまたぐ国については、各気候帯に属する面積<sup>7)</sup>に比例して木材生産が行われていると仮定し、*BEF*を計算した。*D*は森林蓄積密度 ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) であり、単位森林面積当たりの樹木の枝葉つき材積を表す。各国の森林蓄積密度は、*FRA* (Global Forest Resources Assessment<sup>8)</sup>)における2000年と2005年のデータから各年の値を線形補完したものを使用した。

算出された*FHI*の妥当性を評価するために、産業用丸太の*FHI*、木質燃料*FHI*、およびそれらの合計からなる*FHI*において、それぞれ各国の*GCFL*との相関係数を求めた。さらに、*FHI*の予測力を改善するために、誤差分散の大きさが森林蓄積密度のデータ精度の影響を受けることを仮定した階層ベイズモデルを構築し、相関係数が最も高かった産業用丸太の*FHI*と*GCFL*の関係を推定した。

最後に、木材貿易が*GFCL*に与える影響についても統計解析を行った。既存の木材貿易データ<sup>9)</sup>を基に、産業用丸太について、自国消費のための生産による*FHI*、輸出のための生産による*FHI*、輸入された木材による*FHI*を計算した。木質燃料についてはすべて自国消費のために生産されたと仮定した。各国の*GCFL*を目的変数とし、自国*FHI*、輸出*FHI*、輸入*FHI*、燃料*FHI*を説明変数としたモデル選択を行い、*Akaike weight*<sup>10)</sup>に基づき各変数の相対的重要性を求めた。

表(6)-1 *FHI*の計算に使用した木材材積から枝葉つき材積に換算するための拡大係数*BEF*

気候帯	木材の種類	<i>BEF</i>
寒帯	針葉樹	1.35
	広葉樹	1.3
温帯	針葉樹	1.3
	広葉樹	1.4
熱帯	針葉樹	1.3
	広葉樹 (産業用丸太)	1.274
	広葉樹 (木質燃料)	3.4

## (2) 空間明示的手法に基づいた生物多様性フットプリント指標の開発

空間明示的手法によって算出された生息地の減少率に基づいた生物多様性フットプリント指標 *BF-spatial*を開発した。まず、*IUCN*のレッドリストにおいて絶滅危惧指定されており (Critically Endangered, Endangered, Vulnerable)、木材生産の影響を受けているとされる哺乳類・鳥類・両生類・爬虫類2,321種を対象に、生息分布マップ([www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org)) と2000年から2005年の森林消失マップ<sup>4</sup>を重ね合わせ、各国ごとに生息分布内の森林の減少率を算出した。例えば、国Aと国Bに生息しているある種の森林の生息面積が1,000haであり、そのうち国Aでは100ha、国Bでは300haの森林が消失した場合、その種の国Aと国Bにおけるインパクトスコアはそれぞれ0.1と0.3となる。つまり、同じ木材生産量であっても、森林の消失と絶滅危惧種の分布との重なり程度により影響の大きさが変化する。次に、各国ごとに各種のインパクトスコアを足し合わせ、それをその国の生産 *BF-spatial*とした。さらに、原産国と最終消費国の関係を推定した木材貿易データ<sup>9)11)</sup>に基づいて、生産 *BF-spatial*を消費国に案分し、木材貿易の影響を求めた。

*BF-spatial*の有効性を評価するために、種間差を考慮していない既存の手法<sup>1)</sup>に倣った指標の解析も行った。この指標は、潜在的に木材生産・貿易の影響を受ける種数を評価するため、*BF-potential*と名付けた。まず、上記の2,321種すべてのインパクトスコアが1に等しいと仮定した。次に、各種

が生息する国の生産FHIに比例して、インパクトスコアを配分した。例えば、ある種が国Aと国Bに生息しており、国Aと国Bの生産FHIがそれぞれ100haと400haだった場合、その種の国Aと国Bのインパクトスコアはそれぞれ、0.2 (100/500) と0.8 (400/500) となる。つまり、BF-potentialは、各種のインパクトスコアの種間差を考慮していない点と、インパクトスコアの配分を空間非明示的に行っている点で、BF-potentialと異なる。各種のインパクトスコアの合計を生産BF-potentialとして、BF-spatialと同様のデータ<sup>9)11)</sup>と手法によって、木材貿易の影響を計算した。

### (3) 絶滅リスクに基づいた生物多様性フットプリント指標の開発

#### 1) 現状シナリオの解析と既存指標との比較

BF-spatialを拡張し、絶滅リスクに基づいた生物多様性フットプリントBF-extinctを開発した。これは、生息地の減少によって個体数がある絶滅の閾値を下回る確率を計算し<sup>12)</sup>、それを各種のインパクトスコアとする指標である。BF-spatialの対象種のうち、BirdLife International (<http://www.birdlife.org/>) において分布と個体数の情報が利用可能な536種の絶滅危惧鳥類を解析対象とした。まず、BF-spatialで計算した種ごと国ごとの2000~2005年における森林の減少率が2100年まで続くと仮定し(現状シナリオ)、5年ごとに各種の絶滅確率を計算した。絶滅の閾値は、最小存続可能分析の法則<sup>13)</sup>に従い、50個体と500個体を仮定した。両方の場合であまり結果が変わらなかったため、ここではより絶滅に近い50個体の場合を示す。次に、種の絶滅確率を森林減少面積に比例して、その種が生息する国に配分した。さらに、BF-spatialやBF-numberと同様に、配分された各種の絶滅確率を国ごとに合計し、木材貿易データ<sup>9)11)</sup>に基づいて、木材貿易が鳥類の絶滅リスクに与える影響を推定した。同じ536種類を対象にBF-potentialの計算も行い、BF-extinctと比較した。

#### 2) 鳥類の絶滅リスクに影響する社会的要因の解析

BF-extinctがBF-potentialと最も大きく違う点は、各種のインパクトが絶滅確率に基づいている点である。ここでは、絶滅確率に影響する社会的要因に関する、以下の仮説を統計的に検証した：(1) 人口が増加すると木材消費量が増加するため、森林の減少率が上昇し、絶滅確率が高まる；(2) 人口増加が絶滅確率に与える影響は木材自給率によって左右される。構築した統計モデルは、人口と木材自給率の交互作用を含んだ以下のモデルである：

$$\ln(\text{森林減少率}_i) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln(\text{人口}_i) + \alpha_2 \cdot \ln(\text{木材自給率}_i) + \alpha_3 \cdot [\ln(\text{人口}_i) \times \ln(\text{木材自給率}_i)] + \varepsilon_{1,i}$$

$$\text{logit}(\text{絶滅確率}_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(\text{森林減少率}_i)_{pred} + \beta_2 \cdot \text{初期個体数}_i + \varepsilon_{2,i}$$

$\alpha_0$ - $\alpha_3$ と $\beta_0$ - $\beta_2$ は回帰係数であり、 $\varepsilon_{1,i}$ と $\varepsilon_{2,i}$ は正規分布を仮定した誤差項である。人口はWorld Population Prospects (<http://esa.un.org/unpd/wpp/>) から2000~2004年のデータを取得し、平均値を用いた。木材自給率は推定された貿易データ<sup>9)</sup>から2000~2004年の値を求めた。これらの説明変数、および交互作用が、各国における各種の森林減少率の平均値に影響するとした。さらに、上式で人口と木材自給率から予測された森林減少率が、各国の2100年時点の絶滅確率の平均値に影響すると考えた。また絶滅確率に影響する共変量とし、初期個体数の平均値を使用した。これらの解析には絶滅確率の不確実性を減らすため、3種以上含む33か国を対象とした。各説明変数の有無別のモデルを構築し、有限サンプル補正済み赤池情報量基準 (AICc)<sup>10)</sup> を用いてモデル選択を行った。

### 3) 自給シナリオと絶滅リスクを抑制可能なシナリオの解析

BF-extinctの長所の一つとして、絶滅危惧鳥類の保全のためのシナリオ分析が可能である点が挙げられる。そこでまず、極端なシナリオとして、すべての国が必要な木材を自給した場合のシナリオを解析した。各国の木材の生産量と消費量の比<sup>9)</sup>が、現状シナリオと自給シナリオにおける森林減少率に等しいと仮定し、自給シナリオにおける森林減少率を求めた。この木材減少率のもと、自給シナリオと同様の方法で、BF-extinctを計算した。

次に、各国の木材消費量を維持し、2100年時点で全対象種の絶滅確率が10%を下回るシナリオを探索した。これは、IUCNのレッドリストの絶滅危惧種の指定基準を満たさないことに相当する。まず、現状シナリオで絶滅確率が10%を上回る種を対象に、それらの絶滅確率を最も高めている生産国と消費国のリンクを特定した。次に、その消費国が生産国を替えた場合の絶滅確率を計算した。この際、新たな生産国の候補は、絶滅リスクの計算が可能である対象種が1種以上生息する国としたため、カナダやスウェーデンなどの主要な木材生産国は含まれない。また、木材生産量が現状の2倍までしか増やせないと仮定した。生産国の候補のうち、絶滅確率が10%を超える種数が最も少なくなる国を選び、複数であった場合はBF-extinctの総和が最小の国を選んだ。以上の手順を、全対象種の絶滅確率が10%を下回るまで繰り返し、最終的な各国の木材生産量を算出した。

## (4) 国際貿易と水産物に着目した窒素フットプリント指標の開発

### 1) グローバル窒素フットプリントモデルの開発

資源消費の結果として環境中に排出される活性窒素による環境負荷を定量化するために、窒素フットプリント (NF) 指標が開発された<sup>14)</sup>。既存のNFモデル<sup>14)</sup>では数カ国の分析結果はあるが、世界的構図や負荷発生地との関係が未解明で、国際的な消費者側対策のための情報が欠けていた。

本課題では、2010年の世界各国・地域のNFを、大気中へのアンモニア、窒素酸化物、亜酸化窒素の排出量、および潜在的な水域排出窒素（主に硝酸態窒素）の4物質の合計として国際貿易を考慮して算出した。解析では、4物質のそれぞれについて、まず、国際連合食糧農業機関 (FAO) および国際肥料産業協会 (IFA) の生産量 (<http://faostat3.fao.org/>) や施肥量<sup>15)</sup>のデータと、気候変動に関する政府間パネル (IPCC)<sup>16)</sup>による排出係数を用いて、農畜産業由来の排出量を推計した。次に、地球規模の大気汚染物質のデータベースEDGAR (<http://edgar.jrc.ec.europa.eu/>) から、化石燃料由来の排出量を推計した。これらの排出量と188か国 15,000産業部門の取引に関するEora国際産業連関データベース<sup>17)18)</sup>を産業連関分析により結びつけることで、各産業部門の直接・間接的排出量を算出した。また、各国の家庭などからの下水による排出量をFAOの食料供給や食品廃棄率のデータ<sup>19)</sup>、経済協力開発機構 (OECD) の下水処理率データ (<http://www.oecd-ilibrary.org/>) などから推計した。最後に、各国・地域の全産業部門と家庭等からの直接・間接的排出量の合計として国・地域別の窒素フットプリントを評価した。

### 2) 水産物評価のための窒素フットプリントモデルの開発

既存のNFモデル<sup>20)</sup>では、NFは窒素肥料と農産物の生物的窒素固定に由来する食料NFと、化石燃料の燃焼によるエネルギーNFからなる。この食料NFの評価において、水産物は、家畜と同じ単純な仮定のもと、単一のカテゴリとして共通のモデルにより計算されていた。そこで、水産物消費による影響を正確にかつ詳細に評価するための食料NF評価モデルを構築し、日本に適用した。

新たなモデルでは、給餌養殖魚介類、無給餌養殖魚介類（主に二枚貝と草食性のコイ）および天

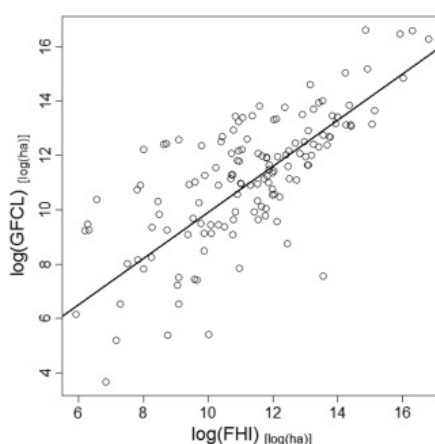
然魚介類の違いを考慮し、魚介類の供給過程を詳細に扱った。具体的には、淡水・回遊魚、底魚、浮魚、その他の海産魚、甲殻類、頭足類、貝類の7分類 (FAOの区分) に対し、養殖率や飼料中の植物性タンパク質含有率、生産・流通・消費の工程での窒素利用効率や再利用率に対し、世界共通変数と日本用変数を新たに設定した。これらとFAOのタンパク質供給量データ (<http://faostat.fao.org/>) を用い、2009年の日本について、各生産方法別・分類別の魚介類のNFを求めた。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 森林被覆面積の減少と木材生産の関係に関する研究

解析対象の139か国において、5年間 (2000~2004年度) の木材の総生産材積は、産業用丸太では  $7.98 \times 10^9 \text{ m}^3$  ( $1.60 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ )、木質燃料では  $8.95 \times 10^9 \text{ m}^3$  ( $1.79 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ ) であった。これらの木材を生産するのに必要な面積に相当するFHIは、産業用丸太では  $9.30 \times 10^7 \text{ ha}$  ( $1.86 \times 10^7 \text{ ha yr}^{-1}$ )、木質燃料では  $3.81 \times 10^8 \text{ ha}$  ( $7.62 \times 10^7 \text{ ha yr}^{-1}$ ) であった。同期間における森林被覆の総減少面積は  $9.66 \times 10^7 \text{ ha}$  ( $1.93 \times 10^7 \text{ ha yr}^{-1}$ ) であった。各国の森林被覆の減少面積とFHIの相関係数は、産業用丸太では0.76 ( $P < 0.001$ )、木質燃料では0.08 ( $P = 0.34$ )、産業用丸太と木質燃料の合計では0.27 ( $P < 0.05$ ) であった。また、森林蓄積密度データの不確実性を考慮した階層ベイズモデルにおいても産業用丸太のFHIと森林被覆の減少の関係において有意な相関が検出された (図(6)-1)。この結果は、産業用丸太の生産は皆伐に近い形で行われることが多く、森林被覆の減少を引き起こすのに対し、木質燃料は択伐によって生産されることが多いことを示唆していると考えられる。

木材貿易の影響を解析したところ、自国消費のためのFHI ( $P < 0.001$ ) と輸出のためのFHI ( $p < 0.001$ ) は、GFCLを説明するのに同程度に重要な変数であることが示された。一方、輸入のFHIは有意にGFCLを低下させることが示されたが ( $p = 0.035$ )、その影響は輸出のFHIよりも小さかった。これは、木材輸出によるGFCLが木材輸入によって十分に抑えられるわけではないことを意味しており、木材貿易は世界規模での森林面積の減少を促進させることを示唆している。



図(6)-1 階層ベイズモデルによって予測されたFHIと森林被覆の減少面積 (GFCL) の関係

##### (2) 空間明示的手法に基づいた生物多様性フットプリント指標の開発

BF-potentialでは全体の23.7%が木材貿易の影響を受けた一方で、BF-spatialでは29.0%であり、木

材貿易の影響がやや高くなった。BF-potentialでは、中国と日本が木材輸入を通じて海外に与える影響が大きかったが、特にインドネシアの生物多様性を脅かしていた (図6-(2))。一方、BF-spatialでは、中国と日本に加え韓国がインドネシアに与える影響も大きく、またブラジルからアメリカへの輸入インパクトも強かった (図6-(2))。これらの結果は、空間明示的手法を用いることで、生物多様性に影響を与える木材貿易の経路を特定することができることを示唆している。

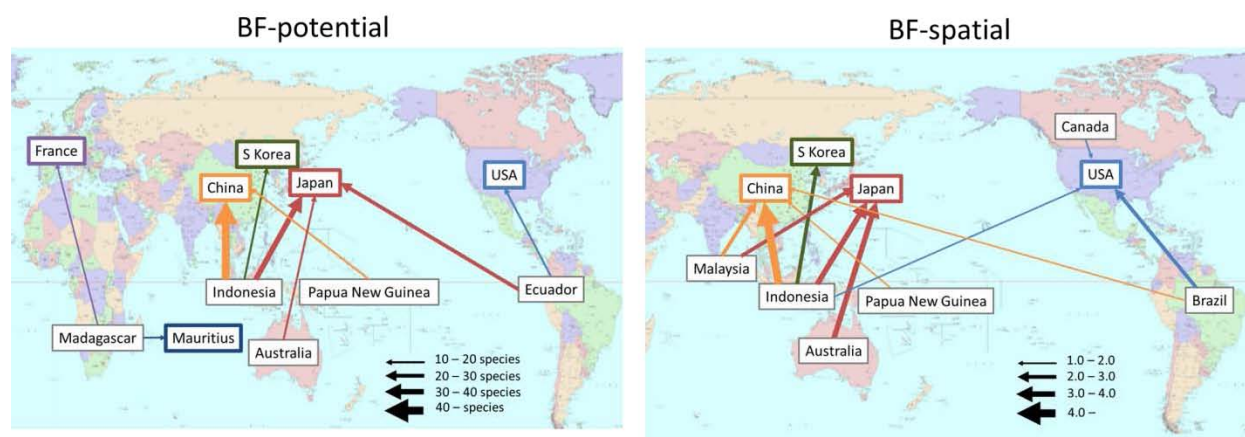


図6-(2) BF-potential(左)とBF-spatial(右)の貿易関係

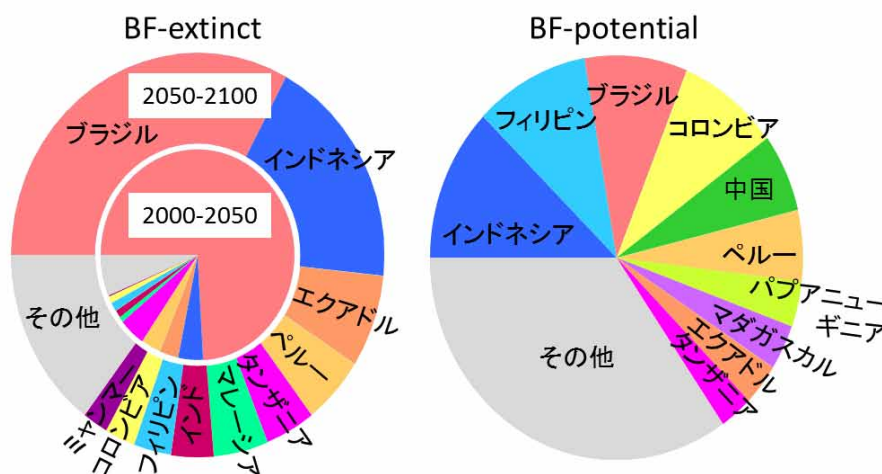
矢印は木材の輸出国から輸入国の方向。

### (3) 絶滅リスクに基づいた生物多様性フットプリント指標の開発

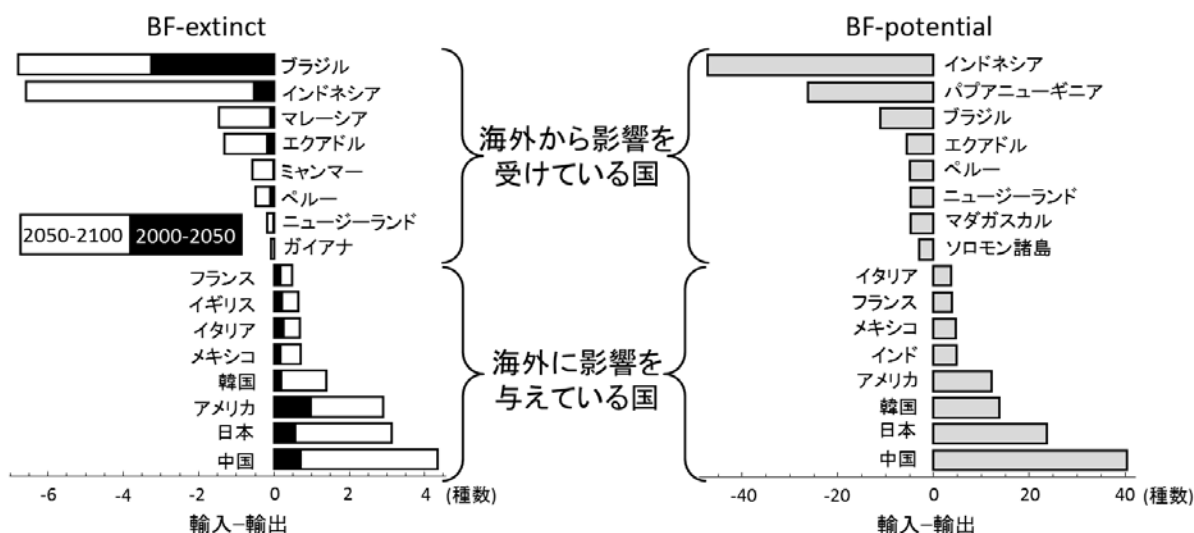
#### 1) 現状シナリオの解析と既存指標との比較

2050年と2100年における絶滅確率の平均は、それぞれ0.03と0.12であった。BF-extinctの合計のうち、ブラジルとインドネシアで生産された割合が半分以上を占めた (図(6)-3)。ブラジルでの影響が最も大きかったのは、絶滅危惧鳥類の種数が多いことに加え (45種)、絶滅確率も高かったからである (2050年: 0.30、2100年: 0.62)。一方、インドネシアは絶滅危惧鳥類の種数は多かったが (59種)、絶滅確率は平均と同程度であった (2050年: 0.01、2100年: 0.15)。一方、BF-extinctに比べると、BF-potentialでは国間で差が小さかった (図(6)-3)。BF-extinctの方がBF-potentialよりも相対的な影響が大きかった国はブラジル、エクアドル、マレーシアであり、これらの国は絶滅確率が高かった。つまり、BF-extinctとBF-potentialを比較することにより、伐採による森林の消失によって種が絶滅するほど強い影響を受けている国が特定可能になった。

貿易解析を行った結果、BF-extinctではブラジルとインドネシアは海外からの影響も突出していたが、BF-potentialではブラジルが海外からの影響はあまり大きくなかった (図(6)-4)。木材を輸入することにより海外に影響を与えている国の上位は、どちらの指標でも中国、日本、アメリカ、韓国であったが、BF-extinctではアメリカの影響が相対的に大きかった。これは、アメリカは多くの木材をブラジルから輸入しているためである。



図(6-3) BF-extinct(左)とBF-potential(右)の生産国の内訳

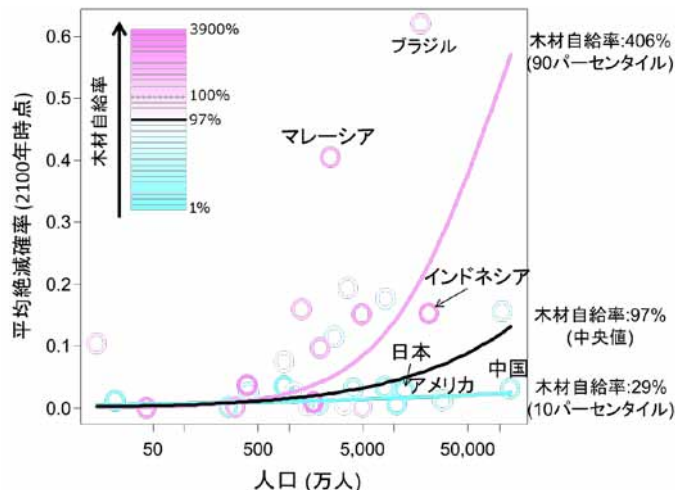


図(6-4) BF-extinct(左)とBF-potential(右)において輸出と輸入の差が大きい国

## 2) 鳥類の絶滅リスクに影響する社会的要因の解析

人口と森林減少率は上位5位までのモデル ( $\Delta AICc \leq 4.6$ ) に必ず選ばれた。これは、人口の増加が森林減少率の上昇を介して、絶滅確率を高めていることを示している。また、人口と木材自給率の交互作用は上位2位までのモデル ( $\Delta AICc \leq 0.74$ ) に選ばれた。これはブラジルやマレーシアといった人口の多い木材輸出国で絶滅確率が高い一方で、木材輸入国では人口が多くても (中国、日本、アメリカ)、絶滅確率は高まらないことを示している (図(6-5))。この結果は、人口増加が鳥類の絶滅リスクを高めるが、その影響は木材貿易によって左右されることを示している。



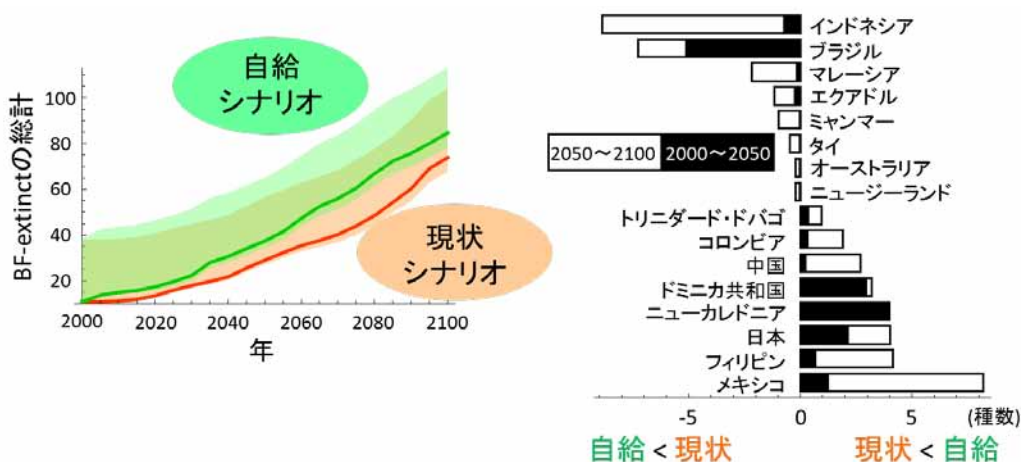


図(6-5) 鳥類の平均絶滅確率に対する人口と木材自給率の交互作用効果

3) 自給シナリオと絶滅リスクを抑制可能なシナリオの解析

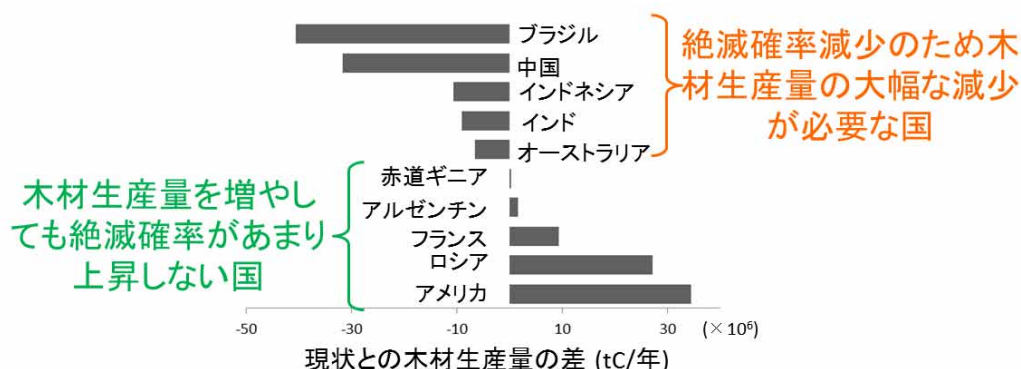
自給シナリオでは、BF-extinctの総計は現状シナリオよりもやや高かった (図(6-6))。これは、自給シナリオではインドネシアやブラジルでのBF-extinctが減少する一方で、日本や中国、さらにはメキシコやフィリピンなどの熱帯の木材輸入国で絶滅リスクが大きく上昇したからである (図(6-6))。メキシコやフィリピンは、経済発展によって木材の輸出国から輸入国に転換した国であり<sup>3)20)</sup>、現状の木材貿易はこうした熱帯国の高い生物多様性を守る役割をしていると考えられる。また、自給シナリオで日本での影響が増加したのは、このシナリオ分析では原生林と人工林を区別していないことが理由として考えられる。木材を自給した場合でも、優先的に人工林から生産することで、この自給シナリオよりも生物多様性影響を抑制可能であると考えられる。

2100年時点で全対象種の絶滅確率が10%を下回るシナリオは、ブラジルや中国、インドネシアなどで木材生産量を大きく減少させ、アメリカやロシア、フランスで木材生産量を増加させるものであった (図(6-7))。この結果は、仮に木材消費量を減らせない場合でも、木材生産を行う国を変化させることで、鳥類の生物多様性の損失を抑制可能であることを示唆している。



図(6-6) 現状シナリオと自給シナリオの時間変化(左)と両シナリオ間の差が大きい国(右)

左図の線の幅は初期個体数の上限と下限を表し、太線はそれらの平均値に相当する。



図(6)-7 全対象種の絶滅確率を抑制するシナリオにおいて現状との木材生産量の差が大きい国

#### (4) 窒素フットプリント指標の開発

##### 1) グローバル窒素フットプリントモデルの開発

2010年の世界全体の活性窒素排出量189 Tgのうち、農業を含む産業部門からの排出は161 Tg N、消費者からの排出は28 Tg Nであった。国・地域別では、中国 (20%)、インド (11%)、米国 (10%) およびブラジル (6.1%) 国内での排出量が47%を占め、それらに次ぐロシア、パキスタン、インドネシア、オーストラリア、メキシコ、アルゼンチンでの合計が12%を占めた。

一方、NF評価では、世界全体に占める割合は、中国 (19%)、インド (11%)、米国 (10%) およびブラジル (6%) の上位5か国が合計で49%を占めた。1人あたりのNFに換算すると、ギニア、コートジボアール、リベリアなどの発展途上国では約7 kg N/年であったが、香港やルクセンブルク、クウェートなどでは100 kg N/年を大きく超え、10倍以上の差があることが示された。オーストラリア、カナダ、米国、英国、フランスなども50 kg N/年を超えていたが、日本は40 kg N/年と、先進国の中では比較的低いと評価された。その主な要因は、日本の食生活では食肉消費量が比較的小さいことと、移動や物品輸送の手段として鉄道を利用することが多く、自動車の利用が比較的小さいことである。

世界全体のNFの評価のおよそ4分の1が、国境を越えて取引されている商品によるものであることが示された。国際貿易商品のNFの内訳をみると硝酸態窒素、アンモニアおよび亜酸化窒素が占め、主に農畜産物由来の食料や衣類などの生産地で排出されていた。したがって、国際貿易を通じて農畜産業の盛んな地域の地下水汚染などを助長していると考えられた。

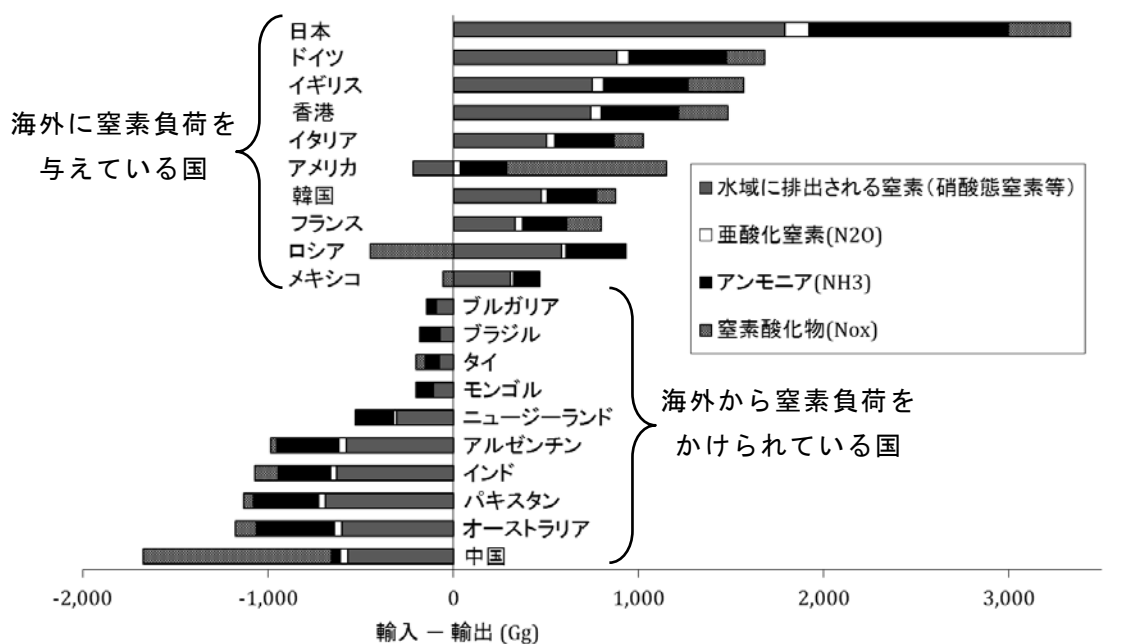
次に、輸入品の生産などのために国外で排出された量から、輸出品の生産などのために国内で排出した量を差し引いて、商品に内包された活性窒素排出の「純輸入量」を評価した。その結果、主な純輸出国は農畜産品の輸出大国であり、その多くは発展途上国である一方、主な純輸入国は農畜産品の多くを輸入に頼って消費している先進国であり、中でも日本の輸入による影響が突出していた (図(6)-8)。

さらに、活性窒素排出量と各産業部門の商品との間の詳細なサプライチェーンを辿る解析により、特定の国際貿易ルートに内包された窒素汚染を評価した。その結果、中国から米国、日本などへの輸出と、日本への輸出やカナダ・メキシコとの相互貿易を含む米国の輸出入の影響が大きい結果となった (図(6)-9)。

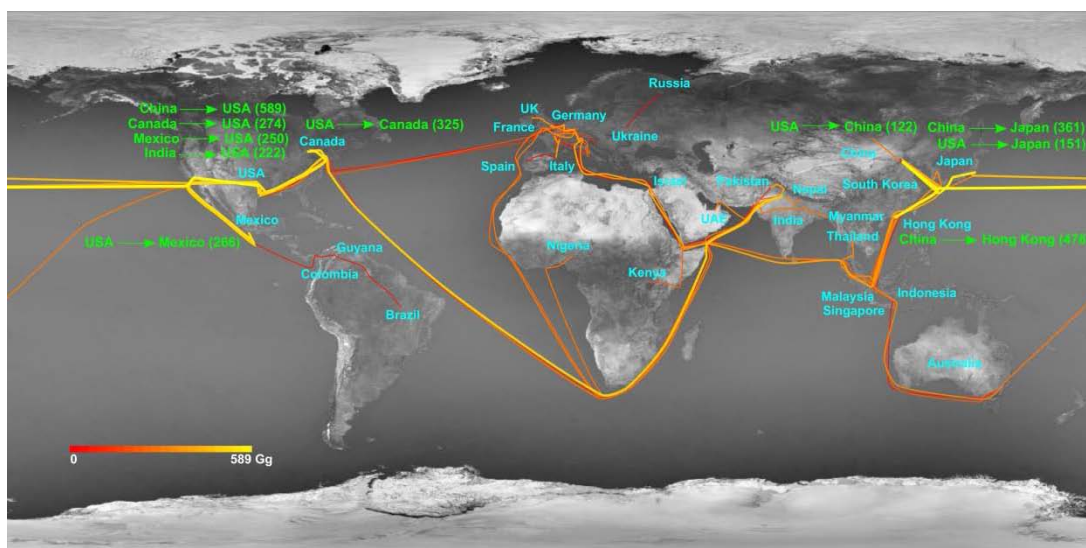
これらの結果は、各国の海洋や湖沼の富栄養化、地下水や野菜の硝酸態窒素汚染、窒素酸化物



や微小粒子状物質 (PM2.5) などによる大気汚染、酸性雨といった局地的な窒素汚染の多くの部分が、日本を含めた他国からの需要によって引き起こされていることを示すものである。窒素汚染の問題解決のためには、生産者だけでなく、消費者や食品販売者、加工業者など様々なステークホルダーを対象とした政策が必要であり、環境負荷の低い農畜産業由来の商品の認証ラベルの導入や、企業などにおける窒素による環境負荷の報告などが有効であると考えられる。



図(6-8) 純輸出入量上位10か国、地域の商品に内包された活性窒素の総排出量

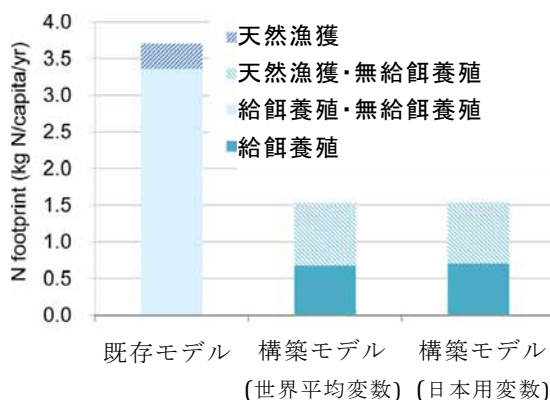


図(6-9) 2010年における活性窒素排出量の国際貿易ルート (最終販売国—消費国、緑字は上位10ルート) 黄色に近いほど内包された活性窒素 (原産国や中間生産国における排出も含む) の排出量が多い。

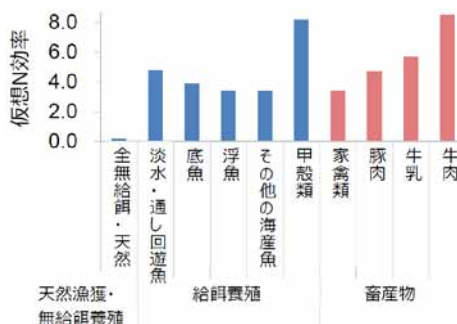
## 2) 水産物評価のための窒素フットプリントモデルの開発

2009年の日本の水産物消費に由来する食料NF(魚介類NF)は、世界共通変数セットを用いると1.53 kg N/年、日本用変数セットでは1.55 kg N/年と評価され、既存の魚介類・畜産物共通モデルによる3.36 kg N/年という評価から半減する結果となった。今回新たに構築したモデル(以下、構築モデル)を用いると、魚介類は日本人のタンパク質供給量の23%を占めたが、魚介類NFは食料NF全体の約10%に過ぎなかった。また、魚介類NF全体に占める給餌養殖の魚介類の割合は、半分以下であった(図(6)-10)。

NF評価モデルの変数の重要度を調べるために、飼育段階の変数を一つずつ変えてNF評価値の変化を調べた結果から、給餌養殖の割合と、飼料中の植物性タンパク質の割合が魚介類NFの評価値を大きく変えることが示された。また、効果的にNFを削減する食品選択のための情報として、2つの生産方法(天然漁獲・無給餌養殖、給餌養殖)による7つの分類の魚介類の負荷の度合いを比較するため、「食物からの摂取窒素量(ベネフィット)あたりの生産・流通段階における活性窒素排出量(コスト)」を示す仮想N効率を求めた。世界共通変数セットでは、給餌養殖魚介類については淡水・通し回遊魚4.8、底魚3.9、浮魚その他3.4、甲殻類8.2、天然漁獲・無給餌養殖については0.2と評価された(図(6)-11)。日本用変数セットでも同様に、給餌養殖魚介類については淡水・通し回遊魚4.3、底魚3.4、浮魚その他3.4、甲殻類7.6、天然漁獲・無給餌養殖では0.2と評価された。この結果から、養殖エビの代わりに無給餌の魚介類を食べることで削減できるNFは、牛肉の代わりに鶏肉を選ぶ場合より大きく、効果的に食料NFを低減できると考えられた。



図(6)-10 日本の一人あたりの魚介類窒素フットプリント評価の比較



図(6)-11 食品分類別の窒素による環境負荷の度合い

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

木材生産量から森林被覆の減少面積を予測可能な指標を開発し、木材貿易が森林減少を促進していることを示した。この成果に基づき、木材貿易の影響を評価するための、2種類の生物多様性フットプリント指標を開発した。一つは、生息分布内の森林減少率に基づいた指標であり、哺乳類・鳥類・両生類・爬虫類という幅広い分類群を対象にできることが特徴である。もう一つは、木材貿易が鳥類の絶滅リスクに与える影響を評価可能な指標であり、貿易と種の絶滅を関連付けたうえで、絶滅リスクを抑制するためのシナリオ分析を行えることが特徴である。また、人口と木材貿易が鳥類の絶滅リスクに影響する重要な要因であるという統計的な証拠を提示した。さらに、新しい窒素フットプリントモデルを開発し、水産物消費と国際貿易が窒素汚染に与える影響を詳細に評価することが可能になった。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

BF-spatialの成果をCBD第5回国別報告書へ掲載した。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

木材生産量から森林被覆の減少面積を予測可能な指標 (FHI) を開発した。これを逆算的に使用して、森林減少を抑制可能な木材の生産量を推定することが可能となった。

木材の消費と貿易の生物多様性影響を評価できるフットプリント指標を開発した。これは、木材の資源量だけでなく生物多様性の保全も考慮できる「持続可能な調達」の指標として使える可能性が考えられる。具体的には、日本が木材を輸入することによって、生物多様性影響が上昇している国 (インドネシアなど) を特定した。また、シナリオ分析により、木材輸入量を増やしても絶滅リスクがあまり高まらない国 (アメリカ・ロシアなど) を明らかにした。

また、沿岸域の海洋生物やコケ類・地衣類などの絶滅リスクを高める窒素汚染の原因物質について、世界各国のフットプリントを一斉に評価できる分析法を開発した。これにより、日本が畜産物や衣類などを輸入することによって窒素汚染が拡大している貿易ルートを特定 (中国、アメリカ、オーストラリアなど) した。

生物多様性フットプリントや窒素フットプリントの既存研究の成果は、例えばWWFのLiving Planet Report ([https://www.wwf.or.jp/activities/lib/lpr/WWF\\_LPR\\_2014.pdf](https://www.wwf.or.jp/activities/lib/lpr/WWF_LPR_2014.pdf)) に記載されている。本課題の成果もこうした公開文書に取り上げられる可能性が考えられる。また、生物多様性や窒素に配慮した地方自治体の都市計画や環境基本計画として、本課題の成果が採用される見込みがある。

## 6. 国際共同研究等の状況

クラゲンフルト大学 (オーストリア) のThomas KASTNER博士には、共同研究として、2国間の木材貿易データの解析をして頂き、森林伐採指標と生物多様性フットプリント指標の開発に大きく貢献して頂いた。

シドニー大学のManfred LENZEN教授・Arunima MALIK氏・Arne GESCHKE博士には、共同研

究として、窒素フットプリント指標に対する多地域間産業連関分析の適用に大きく貢献して頂いた。

メルボルン大学（オーストラリア）のMark BURGMAN教授・Anca HANEA博士・Cindy Emma HAUSER博士を招き、2015年4月に国際シンポジウム”Biological Conservation Planning under Uncertainties”を開催した。不確実性が高い状況下で生物多様性保全を効率的に行うための方策等についての講演をして頂いた。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) T. F. KOYANAGI and T. FURUKAWA: Biological Conservation, 167, 1-8 (2013), Nation-wide agrarian depopulation threatens semi-natural grassland species in Japan: Sub-national application of the Red List Index
- 2) T. FURUKAWA, C. KAYO, T. KADOYA, T. KASTNER, H. HONDO, H. MATSUDA and N. KANEKO: Global Ecology and Conservation, 4, 150-159 (2015), Forest harvest index: Accounting for global gross forest cover loss of wood production and an application of trade analysis
- 3) A. OITA, I. NAGANO and H. MATSUDA: Ecological Indicators, 60, 1091-1103 (2016), An improved methodology for calculating the nitrogen footprint of seafood
- 4) A. OITA, A. MALIK, K. KANEMOTO, A. GESCHKE, S. NISHIJIMA and M. LENZEN: Nature Geoscience, 9, 2, 111-115 (2016), Substantial nitrogen pollution embedded in international trade

#### <その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 松田裕之・種田あずさ：BIOCITY、56, 70-75 (2013)  
「生態系アプローチを可視化する」（特集：地球にちょうどいい生き方の指標—エコロジカル・フットプリント入門）

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 古川拓哉、角谷拓、石濱史子、加用千裕、T. KASTNER、本藤祐樹、松田裕之、金子信博：日本生態学会第61回大会（2014）  
「世界の木材貿易・消費の生物多様性フットプリント」
- 2) 種田あずさ、永野一郎、居城琢、長谷部勇一、松田裕之：平成26年度日本水産学会春季大会（2014）  
「日本の魚介類消費に起因する窒素負荷量の評価」
- 3) 西嶋翔太、古川拓哉、角谷拓、石濱史子、T. KASTNER、松田裕之、金子信博：日本生態学会第62回大会（2015）  
「絶滅リスクに基づいた新たな生物多様性フットプリント：木材貿易が絶滅危惧鳥類に与える影響」
- 4) A. OITA, A. MALIK, J. LAN, S. NISHIJIMA, H. MATSUDA and M. LENZEN：日本生態学会第62回大会（2015）

“Applying Multi-Region Input-Output Analysis to Global Nitrogen Emission”

- 5) S. NISHIJIMA, T. FURUKAWA, T. KADOYA, F. ISHIHAMA, T. KASTNER, H. MATSUDA and N. KANEKO : International Symposium “Biological Conservation Planning under Uncertainties”, Tokyo, Japan, 2015  
 “A novel biodiversity footprint based on extinction risks to evaluate the effect of international wood trade”
- 6) A. OITA, A. MALIK, K. KANEMOTO, A. GESCHKE, S. NISHIJIMA and M. LENZEN : The ISIE (International Society for Industrial Ecology) Conference 2015, Guildford, UK, 2015  
 “Construction of global nitrogen footprint model”
- 7) 種田あずさ、永野一郎、松田裕之：日本海洋政策学会第7回年次大会（2015）  
 「水産物消費に由来する活性窒素の環境負荷評価とその低減策」
- 8) 種田あずさ：日本生態学会第63回大会（2016）  
 「フットプリント指標を用いた国際貿易による窒素汚染の評価」
- 9) 西嶋翔太：日本生態学会第63回大会（2016）  
 「鳥類の絶滅リスクに基づく木材貿易の生物多様性フットプリント」

### （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

- 1) International Symposium “Biological Conservation Planning under Uncertainties”（主催：環境省環境研究総合推進費S-9、共催：横浜国立大学総合的海洋教育・研究センター、2015年4月4日、東京大学農学部キャンパス）の企画・講演

### （5）マスコミ等への公表・報道等

- 1) プレスリリース（2016年1月25日、於Nature Geoscience、“Developed nations outsource part of nitrogen emissions to developing countries”）  
[http://www.nature.com/ngeo/press\\_releases/ngeo01116.html](http://www.nature.com/ngeo/press_releases/ngeo01116.html)
- 2) Earth Island Journal, 2016年1月25日  
[http://www.earthisland.org/journal/index.php/elist/eListRead/what\\_is\\_your\\_nitrogen\\_footprint/](http://www.earthisland.org/journal/index.php/elist/eListRead/what_is_your_nitrogen_footprint/)
- 3) Dispatch Tribunal, 2016年1月25日  
<http://www.dispatchtribunal.com/us-china-india-and-brazil-responsible-for-46-of-worlds-nitrogen-emissions/12287/>
- 4) E&T Magazine, 2016年1月25日  
<http://eandt.theiet.org/news/2016/jan/global-nitrogen-footprint.cfm>
- 5) EurekaAlert, 2016年1月25日  
[http://www.eurekaalert.org/pub\\_releases/2016-01/uos-gnf012216.php](http://www.eurekaalert.org/pub_releases/2016-01/uos-gnf012216.php)
- 6) Market Business News, 2016年1月25日  
<http://marketbusinessnews.com/half-nitrogen-emissions-from-just-four-countries-says-new-study/12>

2103

- 7) ScienceDaily, 2016年1月25日  
<http://www.sciencedaily.com/releases/2016/01/160125114124.htm>
- 8) Science 2.0, 2016年1月25日  
[http://www.science20.com/news\\_articles/global\\_nitrogen\\_footprint\\_mapped\\_for\\_first\\_time-164126](http://www.science20.com/news_articles/global_nitrogen_footprint_mapped_for_first_time-164126)
- 9) The Guardian, 2016年1月25日  
<http://www.theguardian.com/environment/2016/jan/26/study-reveals-your-nitrogen-footprint-and-who-it-is-impacting>
- 10) Phys.org, 2016年1月25日  
<http://phys.org/news/2016-01-global-nitrogen-footprint.html>
- 11) プレスリリース (2016年1月26日、於横浜国立大学、「国際貿易が引き起こす窒素汚染の実態を解明—窒素による地球環境汚染、日本は輸出の影響が突出」)  
<http://www.ynu.ac.jp/hus/koho/15185/detail.html>
- 12) プレスリリース (2016年1月26日、於シドニー大学(オーストラリア)、“Global nitrogen footprint mapped for first time”)  
<http://sydney.edu.au/news-opinion/news/2016/01/26/global-nitrogen-footprint-mapped-for-first-time.html>
- 13) プレスリリース (2016年1月26日、於Natureasia.com、「先進国は窒素放出の一部を発展途上国に委託している (“Developed nations outsource part of nitrogen emissions to developing countries”)」)  
<http://www.natureasia.com/ja-jp/research/highlight/10472>  
<https://www.natureasia.com/en/research/highlight/10472/>
- 14) Behindwoods, 2016年1月26日  
<http://www.behindwoods.com/news-shots/rich-nations-leave-nitrogen-footprint-on-developing-countries.html>
- 15) Carbon Brief, 2016年1月26日  
<http://www.carbonbrief.org/new-study-tracks-nitrogen-footprint-of-products-made-for-export>
- 16) Catch News, 2016年1月26日  
<http://www.catchnews.com/social-sector/rich-nations-might-be-causing-high-nitrogen-pollution-in-developing-countries-environment-geoscience-us-china-japan-india-1453786976.html>
- 17) Deccan Chronicle, 2016年1月26日  
<http://www.deccanchronicle.com/pets-and-environment/260116/developing-countries-bear-brunt-of-nitrogen-pollution-study.html>
- 18) Newshub, 2016年1月26日  
<http://www.newshub.co.nz/environmentsci/half-worlds-nitrogen-pollution-from-4-countries-2016012522#axzz3yJMK4y3h>
- 19) New Vision, 2016年1月26日  
[http://www.newvision.co.ug/new\\_vision/news/1415565/developing-countries-bear-brunt-nitrogen-pollution](http://www.newvision.co.ug/new_vision/news/1415565/developing-countries-bear-brunt-nitrogen-pollution)

- 20) Pacific Standard, 2016年1月26日  
<http://www.psmag.com/business-economics/international-trade-hurts-the-worlds-poor>
- 21) Science World Report, 2016年1月26日  
<http://www.scienceworldreport.com/articles/36360/20160126/global-nitrogen-footprint-mapped-first-time-five-countries-responsible-half.htm>
- 22) The Economic Times, 2016年1月26日  
[http://articles.economictimes.indiatimes.com/2016-01-26/news/70091549\\_1\\_nitrogen-oxide-acid-rain-countries](http://articles.economictimes.indiatimes.com/2016-01-26/news/70091549_1_nitrogen-oxide-acid-rain-countries)
- 23) The Marshalltown, 2016年1月26日  
<http://www.themarshalltown.com/2016/01/26/the-first-ever-global-map-of-nitrogen-emissions-has-revealed/>
- 24) Yahoo.com, 2016年1月26日  
<http://www.theguardian.com/environment/2016/jan/26/study-reveals-your-nitrogen-footprint-and-who-it-is-impacting>
- 25) Bangalore Mirror, 2016年1月27日  
<http://www.bangaloremirror.com/others/sci-tech/India-four-others-cause-almost-half-the-worlds-emissions/articleshow/50734624.cms>
- 26) AllAfrica.com, 2016年2月2日  
<http://allafrica.com/stories/201602021090.html>
- 27) SciDev.Net, 2016年2月2日  
<http://www.scidev.net/global/pollution/news/richer-nations-ousource-nitrogen-pollution.html> Earth

## (6) その他

特に記載すべき事項はない

## 8. 引用文献

- 1) M. LENZEN, et al.: Nature 486, 109–12 (2012), International trade drives biodiversity threats in developing nations.
- 2) MM. HANAFIAH, AJ. HENDRIKS and MAJ. HUIJBREGTS: J. Clean. Prod. 37, 107–114 (2012), Comparing the ecological footprint with the biodiversity footprint of products.
- 3) P. MEYFROIDT, TK. RUDEL and EF. LAMBIN: Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 107, 20917–20922 (2010), Forest transitions, trade, and the global displacement of land use.
- 4) MC. HANSEN, SV. STEHMAN and PV. POTAPOV: Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 107, 8650–8655 (2010), Quantification of global gross forest cover loss.
- 5) J. PENMAN, et al.: IPCC Natl. Greenh. Gas Invent. Program. at <<http://www.cabdirect.org/abstracts/20083162304.html>> (2003), Good practice guidance for land use, land-use change and forestry.
- 6) M. TEOBALDELLI, Z. SOMOGYI, M. MIGLIAVACCA and VA. USOLTSEV: For. Ecol. Manage. 257, 1004–1013 (2009), Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and

broadleaved by stand age, growing stock and site index.

- 7) DM. OLSON, et al.: *Bioscience* 51, 933-938 (2001), Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on earth.
- 8) FAO: (2010), *Global Forest Resources Assessment 2010*. doi:ISBN 978-92-5-106654-6
- 9) T. KASTNER, KH. ERB and S. NONHEBEL: *Glob. Environ. Chang.* 21, 947–956 (2011), International wood trade and forest change: A global analysis.
- 10) KP. BURNHAM and DR. ANDERSON: Springer-Verlag, (2002), *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*.
- 11) T. FURUKAWA, et al.: *Glob. Ecol. Conserv.* 4, 150–159 (2015), Forest harvest index: accounting for global gross forest cover loss of wood production and an application of trade analysis.
- 12) J. KITZES, J. and J. HARTE: *Methods Ecol. Evol.* 5, 1–8 (2014), Beyond the species-area relationship: improving macroecological extinction estimates.
- 13) IR. FRANKLIN: *Conserv. Biol. an Evol. Perspect.* Soule, M. E. and Wilcox, B. A (eds.), 135–149, Sinauer Associates, (1980), *Evolutionary change in small populations*.
- 14) AM. LEACH, et al.: *Environ. Dev.* 1, 40–66 (2012), A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment.
- 15) P. HEFFER: *Assessment of Fertilizer Use by Crop at the Global Level*. (2013).
- 16) IPCC: JGES, (2006) *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- 17) M. LENZEN, D. MORAN, K. KANEMOTO and A. GESCHKE: *Econ. Syst. Res.* 25, 20–49 (2013), Building EORA: A Global multi-region input-output database at high country and sector resolution.
- 18) M. LENZEN, K. KANEMOTO, D. MORAN and A. GESCHKE: *Environ. Sci. Technol.* 46, 8374–81 (2012), Mapping the structure of the world economy.
- 19) FAO: (2010), *Global food losses and food waste-Extent, caused and prevention*.
- 20) PE. KAUPPI et al.: *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 103, 17574–9 (2006), Returning forests analyzed with the forest identity.



## **Development and Application of Biodiversity Models and Policy Recommendation for Symbiotic Society**

Principal Investigator: Tadashi MIYASHITA

Institution: School of Agriculture and Life Sciences, University of Tokyo  
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, JAPAN  
Tel: +81-3-5841-7544  
E-mail: [tmiya@es.a.u-tokyo.ac.jp](mailto:tmiya@es.a.u-tokyo.ac.jp)

Cooperated by: National Institute of Agro-Environmental Sciences, National Institute for Environmental Studies, Kyushu University, Kyoto University, Yokohama National University

[Abstract]

Key Words: Aichi target, Protected area, Extinction risk, Global warming, Tropical forest, Biodiversity footprint, Distribution model

This project aimed at identifying candidate priority areas for conservation and socio-ecological drivers for the loss of tropical forests.

Our newly developed method of extinction risk analysis revealed that 370 to 560 species of vascular plants in Japan would become extinct during the next century if past trends continue. To avoid those extinctions, efforts should be made to preserve populations of the threatened species that are decreasing in the national protected areas.

Analyses of various animals identified candidate priority areas in lowland plains and Satoyama areas where biodiversity has been maintained by local governments and stakeholders and thus the national capacity of conservation needs to be strengthened.

Projections of biodiversity trends under global warming scenarios showed that threatened species of birds, amphibians, and butterflies will increase substantially even without any land-use change, demonstrating the need to design protected areas considering future range shifts.

The analyses of freshwater and coastal biodiversity revealed that adjacent terrestrial environments or land use had significant negative effects, indicating that conservation efforts should consider cross-ecosystem linkages.

In agricultural lands, threatened plant species once common are relatively rich in abandoned areas while poor in consolidated areas. Based on this finding, we proposed zoning of areas with high crop production vs. biodiversity conservation, considering past history of land consolidation and abandonment. This map will be helpful for harmonizing biodiversity conservation with human food supply.

Trends of forest coverage vary largely; some countries still exhibit declines

while others show current increases. Statistical analyses for drivers of forest coverage change in SE Asian countries showed a striking difference before and after 1990; in countries with higher economic levels, forest coverage decreased before 1990 but increased after 1990. This phase shift was also observed in the global scale. However, phase shift has never been observed in countries with lower economic level but higher forest coverage. In such countries (e.g. Cambodia), financial supports from other countries are needed to reduce forest loss.

We developed a new method for assessing “biodiversity footprint” considering wood trade and its relationship with extinction risks of threatened birds in each country. This assessment indicated that China and Japan are exerting a large impact on biodiversity in Indonesia by importing timber. We explored scenarios that could minimize extinction risks by changing timber production for trade. Developing policies towards achieving such scenarios could ensure sustainable trades in terms of global biodiversity conservation.