

課題名 S-9-3 アジア地域における生物多様性劣化が生態系の機能・サービスに及ぼす影響の定量的解明

課題代表者名 中 静 透（東北大学大学院生命科学研究科 植物生態学研究室 教授）

研究実施期間 平成23～27年度

累計予算額 303,935千円（うち平成27年度：55,527千円）
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 生態系機能、生態系サービス、生物多様性、森林、気候変動、土地利用変化

研究体制

- (1) 植物の機能形質データに基づく樹木多様性の損失が森林生態系の機能・サービスに与える影響の解明（東北大学）
- (2) 森林の動態データに基づく樹木多様性の損失が森林生態系の機能・サービスに与える影響の解明（北海道大学）
- (3) 森林減少・劣化による花粉媒介・生物制御サービスの広域変動予測手法の開発（国立研究開発法人 森林総合研究所）
- (4) リモートセンシング技術を用いたアジアにおける生物多様性・生態系機能マッピングとその時空間変動の推定（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）

生物多様性条約（CBD）の第10回会議（COP10）では「生物多様性概況第3版（GB03）」の分析をうけて、2010年以降の戦略目標（愛知目標）が採択された。この議論の中では、さまざまなステークホルダーによる具体的な行動を促すため、測定可能で実現可能な目標であることや、生態系サービスの評価などが強調され、数値目標も増えている。また、「生物多様性と生態系サービスの経済学（TEEB）」の最終報告書が提出されたことにより、革新的資金メカニズムなどの議論も進んでおり、そのため生態系サービスの定量化を進める必要がある。とくに、森林生態系に関しては、温暖化緩和策とのコベネフィットを期待した、「森林の減少・劣化を防止することによる森林からの温室効果ガスの排出削減（REDDおよびREDD+）」が、有望なメカニズムとして注目されており、その導入に欠かせない評価やモニタリング手法が望まれている。さらに、「生物多様性と生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム」（IPBES）の設置が決まり、生物多様性や生態系サービスの現状と予測や評価に関する科学的知見がCBDの中で果たす役割が重要視されている。一方、広範な地球環境問題のモニタリングのため、政府間地球観測作業部会（GEO）による全球地球観測システム（GEOSS）のなかで、生物多様性観測に関する地球規模のネットワーク（GEO BON）がスタートしており、生物多様性条約などが求める情報の供給体制の整備を進めている。2009年には、日本国内の観測ネットワークとしてJBON、アジア太平洋地域にAP BONが設立されたが、申請者らは、日本国内のGEOSSに関係する議論に当初から関わっているほか、JBONおよびAPBONの設立にも主導的な役割を果たしてきた。こうした国際的なネットワークを効率的に利用して、喫緊の課題の解決に貢献することが求められている。

2. 研究開発目的

生物多様性と生態系の機能とサービスの関係については、1990年代から構成種の多様性と生産力や安定性などに関する解析が進んだが、森林生態系に関しては十分ではない。生態系の機能やサービスを広域に把握・評価するためには、樹木の多様な機能形質特性、森林生態系を構成する生物種、森林タイプの分布（人為的影響を含む）などに関する情報を統合することが有効である。これらのデータは、JBONおよびAPBONなどの母体となるグループによってかなり蓄積されているものの、それをデータベース化し、広域に把握・評価するためのアルゴリズムを完成する必要がある。また、樹木の特性のうち、とくに葉の窒素濃度は光合成能力、フェノール類は分解速度と密接な関係があるため、こうした機能形質と樹木組成に関するデータベースが生態系の分布や変化データと結合できれば、炭素蓄積量やその増減などに関する広域把握が可能となる。また、生物多様性が重要な関わりをもつ、送粉・生物的制御などの調節的生態系サービスについては、近年急速に研究が進みつつあり、生態系分布あるいは土地被覆データなどから送粉生物や天敵生物などの多様性や豊富さが推定できる可能性

が高まっている。こうした手法を確立することにより、REDD+における炭素および生物多様性、さらには生態系サービスの評価やモニタリングが広域で可能となる。

3. 研究開発の方法

(1) 植物の機能形質データに基づく樹木多様性の損失が森林生態系の機能・サービスに与える影響の解明

国内においては、23か所の森林調査区において、全出現樹種を対象に樹木の機能形質調査を行った。最長15mのカーボン製伸縮竿に鎌を取り付け、成木の樹冠上部から可能な限り明るい環境の葉を数十～数千枚採取した。また、同じ個体の地上1.1m付近から、直径5.15mm、長さ約5cmの材サンプルを成長錐を用いて採取した。葉および材のサンプルは宿舎に持ち帰り、個葉面積、葉重/葉面積比(LMA)、葉の強度、葉の厚さ、乾物含有量(LDMC)、各種化学成分(葉の窒素含量、リグニン含量、フェノール含量、タンニン含量)および材密度の測定に用いた。測定に際して、食害や病変の著しい葉は除外した。葉サンプルの一部(A4スキャナで1度にスキャン可能な枚数。個葉サイズにより1～数100枚)をスキャンし、生重量を測定後、60℃で重量変化がなくなるまで乾燥し、乾重量を測定した。こうして得られたスキャン画像、生重量、乾重量から、個葉面積、LMA、LDMCを算出した。これらの計測は、葉柄や複葉の葉軸を含む全葉を対象に行なった。また、別のサブサンプル(2枚)について、葉の強度と厚さを測定した。葉の強度はプッシュプルゲージに取り付けた直径2mmの金属円柱で貫通試験を行い測定した。葉の厚さの測定にはシクネスゲージを用いた。どちらの計測においても、葉脈を可能な限り避け、2回の測定の平均を計測値とした。材サンプルは、両端を垂直に切り揃えて長さを測定したのち、60℃で重量変化がなくなるまで乾燥し、乾燥後の重量を乾燥前の体積で割ることにより算出した。また、別のサブサンプル(数10g)を化学成分分析用にとりわけ、シリカゲル乾燥した。国外においては、タイとマレーシアの計10か所において、同様のサンプリングを行った。国外における調査地点は東南アジアの主要な9つの森林タイプを網羅するように選択した。国外においては、森林の種組成データが利用できない場合も多く、その場合には簡易的なプロットを設置し毎木調査も行った。さらに、最大樹高や種子重量など直接測定の困難な形質については、過去の文献に記載されたデータのデジタル化を行った。

(2) 森林の動態データに基づく樹木多様性の損失が森林生態系の機能・サービスに与える影響の解明

既存のネットワークの情報、文献検索などを通じて、900地点を超える樹木センサスに関するメタデータを収集した。メタデータを元に、種組成や動態データを収集し、データの電子化と規格の統一を進め、200地点の組成・動態データベースを作った。また、既存研究から約2000個体、130種以上の樹木の個体重とサイズのデータを集めた現存量データベースを完成させた。

これらのデータをもとに、環境変化に対する種多様性の変化を予測するため、日本国内の樹木の種組成の地理パターンとそれに影響をあたえる要因を解析した。さらに森林の攪乱や環境条件が種多様性に与える影響を明らかにするため、森林の攪乱履歴、環境条件のデータを収集し動態パラメータとの関係を明らかにした。

樹木の多様性や生態系サービスに関わる機能形質を分光リモートセンシングで評価する際の基礎研究として、冷温帯から熱帯までの18林分で421種の樹木葉の連続分光反射率、分光透過率および7種類の葉形質(LMA、窒素、炭素、タンニン、フェノール、リグニン、セルロース)の測定を行いデータベースを完成させ、アジア広域の予測を行う際の有効性を検証するため、これらのサンプルを用いて部分最小二乗法(PLS)を用いた形質予測モデルを開発した。

写真共有サービスFlickrの位置情報付き写真を用いて、景観サービスの可視化手法を開発した。

(3) 森林減少・劣化による花粉媒介・生物制御サービスの広域変動予測手法の開発

森林生態系においては、送粉サービスや生物制御サービスが森林劣化による生物多様性の変化の影響を強く受けることが懸念されている。また分解サービスは物質循環、炭素排出、リサイクルなどにおいて重要視されてきており、生物多様性の影響を受けることが推測されているものの定量的な評価が困難であった。そこでこれらのサービスについて森林劣化の観点からローカスケールで定量化を試みた。全国的な生態系サービス予測マップを作成するために、生態系サービスを供給する主要な生物や生物群のサービス供給能力(例:送粉効率)、移動性等を考慮し、送粉サービスではニホンミツバチの遺伝的多様性、生物制御サービスでは捕食性天敵の種多様性を指標とし、これらと景観および気象等の非生物的要因との関係を解析した。これらに基づき、既存の植生図(土地利用図)を用いて、ローカスケールおよび国スケールの生態系サービス分布予測マップを作成した。

アジア地域の生態系サービス評価に関しては、マレーシア・ボルネオ島において生物制御サービスおよび分解サービスについて森林劣化との関係を解析し、ローカルな予測マップを作成した。

これらの定量化から生態系サービス予測手法について整理した。またREDD+の特にセーフガードについて貢献

するために、森林劣化の定義を整理した。またモニタリングの手法の整理、指標の提案、生態系サービスに配慮した森林管理手法について、既存の文献をレビューし、また本研究成果を加えて分析した。

(4) リモートセンシング技術を用いたアジアにおける生物多様性・生態系機能マッピングとその時空間変動の推定

「温帯林における菌類の分解機能の航空機リモートセンシングによる評価」

空中写真により落葉広葉樹林の倒木の空間分布を検出するため、小川試験地(北緯 $36^{\circ} 56' 10''$ 、東経 $140^{\circ} 35' 18''$)を対象に、無人ラジコンヘリコプター(RMAX-G1、ヤマハ)に搭載したデジタルカメラによる空撮を2011年11月29日におこなった。地表面の特徴を地図化するため、ヘリコプターに搭載したレーザースキャナ(SkEyeBox, SkEye)により対象森林の樹体も含む地表面の凹凸を計測し、 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 解像度のDEM(Digital Elevation Model)を作成した。航空機リモートセンシングに対する地上真値を得るため、9箇所のサブプロット(東西南北 $10\text{m} \times 10\text{m}$ の大きさを持つ)内に認められた直径 10cm 以上の倒木の本数と長さの計測調査を2012年5月31日におこなった。これらの地上調査によって取得した倒木の分布情報と、空撮画像から目視によって検出した倒木の分布情報との対応関係を検証した。

「国内における季節林の衛星データから推定された着葉期間に基づく形質の評価」

衛星データの解析により日本の機能的な着葉期間(潜在的な光合成期間)の時空間分布の変動を検出するため、TerraとAqua衛星に搭載されたMODISセンサーで毎日観測された幾何・大気補正済みの 500m の空間分解能をもつ分光反射率データを2001年から2015年まで解析した。Green-Red Vegetation Index (GRVI) が春に0を初めて超えた日を機能的な着葉期間の開始の期日、秋に0を初めて下回った日を機能的な着葉期間の終了の期日とそれぞれ定義し、機能的な着葉期間をピクセルごと求めた。モニタリング1000サイトにおいて収集された葉の形質データ(生葉窒素濃度・個葉面積・強度・厚さ)と衛星観測データの解析により検出した機能的な着葉期間の対応関係を調査した。その結果得た対応関係と衛星データの解析により検出した機能的な着葉期間を用いて葉の形質の空間分布を広域的に推定した。

「ボルネオの熱帯林における植生フェノロジーの定点カメラ画像による検出」

熱帯多雨林の植生フェノロジーを観測するため、ランビルヒルズ国立公園内(北緯 $4^{\circ} 11' 43.71''$ 、東経 $114^{\circ} 2' 22.55''$)に位置するクレーン観測タワーの上部において定点撮影を毎日おこなった。群落全体や各個体の関心領域を対象に、フェノロジー画像から赤・緑・青のデジタルナンバー(R・G・B)の平均値を抽出し、デジタルナンバーのそれぞれの割合($\%R=R/(R+G+B)$ ・ $\%G=G/(R+G+B)$ ・ $\%B=B/(R+G+B)$)、Green Excess Index ($GEI=(G-R)+(G-B)$)およびHSLカラーモデルにおける色相・彩度・明度をそれぞれ計算した。

「東南アジアにおける森林伐採の経年変化の広域観測衛星データによる評価」

島嶼東南アジアにおいて森林伐採がおこなわれた地域の時空間分布の変動を検出するため、前述の衛星により毎日観測された分光反射率データを2001年から2014年まで解析した。雲被覆や大気ノイズなどによる影響が無いベストクオリティなGRVI(以後GRVI_{best}と表記する)をピクセルごとに計算し、1年間のGRVI_{best}の取得日に対するGRVI_{best}<0の取得日の割合をピクセルごとに算出した。1年間のGRVI_{best}の取得日に対するGRVI_{best}<0の取得日の割合が高いピクセルは、森林伐採が生じたと仮定した。

4. 結果及び考察

(1) 植物の機能形質データに基づく樹木多様性の損失が森林生態系の機能・サービスに与える影響の解明

まず国内の主要320樹種および東南アジア地域の主要な森林タイプを代表する約1000樹種の葉と材の形質を中心とした機能形質データベースを整備した。次に国内においては、形質データベースと林野庁による全国を 4km メッシュで網羅した森林調査結果を組み合わせ、高精度・高解像度で日本全域を網羅する形質組成の地図を作成した。東南アジア地域においては同様に、形質データベースと衛星観測による植生図を組み合わせ、同様の地図を作成した。これらの地図により、両地域の形質組成の空間的分布が初めて解明された。さらに、これらの形質値のいくつかと最大光合成速度・落葉分解速度係数の間の関係式を活用して、国内・東南アジアの両地域において、最大光合成速度・落葉分解速度係数の地図を作成した。最後に、気候や植生タイプなどの環境条件と最大光合成速度・落葉分解速度係数の関係を統計学的にモデル化し、異なる気候変動・土地利用シナリオの下で予測される環境条件をあてはめた。この解析により、異なる気候変動・土地利用シナリオが生態系機能・サービスに与える影響を与えることを実証した。これらの成果は、気候変動や土地利用変化が森林の生態系機能・サービスに与える影響を考慮した森林の管理や活用、リスク評価への活用が期待される。また、本研究で構築した機能形質データベースや形質組成、生態系機能・サービスの地図はいずれも今後、この地域における生態系機能・サービスに関する研究を推進する上で不可欠な基盤となるものである。

(2) 森林の動態データに基づく樹木多様性の損失が森林生態系の機能・サービスに与える影響の解明

1) 動態パラメータと機能形質・環境条件の関係

日本各地の95地点の樹木データを解析した結果、二次林のほうが成熟林よりも面積あたりの樹木種数は多いが、個体数あたりの種数では差が見られなかった。一方、成熟林の方が二次林に比べ森林間の種組成の違い(β 多様性)が大きく、攪乱によって種組成が均質化することが示唆された。

日本各地37地点の森林のうち、いくつかの森林では、機能形質と動態パラメータの相関が見られた。一方、新規加入率と死亡率、個体群増加率は年平均気温に沿って変化していた。常緑広葉樹および落葉広葉樹は、それぞれの分布域の北限に近い年平均気温の低い森林で新規加入率が高かった。地球温暖化によって樹木種の分布域が北方にシフトすると予測されているが、その予測と今回の結果は一致する結果であった。以上の結果から、動態パラメータの環境・攪乱依存性や個体サイズ依存性を考慮することで、動態パラメータを形質から精度高く推定できることが示された。

2) 生態系機能・サービスの広域推定モデルへのデータ提供

現存量データベースを用いて、日本の森林の地上部現存量の地図を作成した。また地上観測に基づく純一次生産量の年変動は、多くの地点で落葉量の年変動ではなく、樹木の成長量の年変動と対応していた。したがって、推定が難しい純一次生産量の変動を捉えるための指標として、情報が得やすい樹木の成長量が有効であることがわかった。

石狩川流域45市町村の生態系サービス間の関係を解析した結果、米・小麦生産と炭素蓄積や水質調整との間に負の関係が見られた。またサービス間の関係は20年間の間に変化していた。これらのことから、サービス間の関係を理解するためには、空間変異とともに時間変異にも着目する必要があることが示された。

3) 連続分光反射率による形質予測モデルの特性

教師と検証の着葉タイプが異なる場合、特に常緑樹で作成したモデルを落葉樹に当てはめるときに精度が悪化すること、混合モデルは中庸の精度を示すことが明らかになった。この結果は、常緑-落葉樹間の形質予測モデルの互換性はさほど高くなく、広域の森林で形質予測を行う際は、着葉タイプごとに予測モデルを選択したほうが理想的であることを示唆する。葉の機能形質は森林の生産性、生物間相互作用(植食性昆虫による被食)、有機物分解に関与することから、これらの結果は東アジアの森林における炭素固定や物質循環に関する分光リモートセンシング技術の向上に寄与し、現在日本で計画されている次世代型ハイパースペクトル観測衛星の性能で予測が可能になることを示唆している。

4) 写真共有サービスFlickrを用いた北海道の景観サービス地図化手法の開発

北海道における景観に対する需要地として最も高いスコアであったのは、北海道中央に位置する、旭川、美瑛・上富良野・中富良野等(一部国立公園)であり、その他、札幌市周辺、釧路湿原(国立公園)、阿寒湖・屈斜湖・摩周湖(国立公園)、知床半島(世界自然遺産)、支笏湖、洞爺湖(国立公園)、ニセコ・要諦山(国定公園)、函館周辺・大沼地域(国定公園)等、観光地として認知されている場所となった。供給ポテンシャルについては、需要の高かった箇所が中心となる分布をしており、山地、農地、湖、都市域の一部等にポテンシャルの高い箇所がみられた。自然公園地域、国立公園および湖を中心とする国定公園は、供給ポテンシャルが高かった。今後これらの環境要因と生物多様性との関係を組み込むことで、より直接的に生物多様性が生態系サービスの文化的サービスの評価につながると期待される。

(3) 森林減少・劣化による花粉媒介・生物制御サービスの広域変動予測手法の開発

森林劣化の観点からローカルスケールで生態系サービスの定量化を試みた結果、日本のローカルな送粉サービスにおいては、送粉昆虫の多様性とソバの結実率との間に正の相関が検出され、また人工林との明確な関連はないが、天然林や自然植生が正の効果を持つことが明らかとなった。一方昆虫による生物制御サービスについては、ローカルなスケールではおそらくミクロな景観および種の多様性により、明瞭な関係は抽出されなかった。分解サービスについては、樹種によって差異はあるもののブナ枯死木において、木材分解菌の多様性が分解サービスの指標となる可能性が示唆された。これらの定量化にもとづき、茨城県北部におけるローカルな送粉、分解サービスの予測マップを作成した。さらに過去の空中写真等から土地利用の変遷を地図化し、これに基づいて森林の成長による20年後の景観予測マップを作成した。この土地利用図に基づいて1960年代~2020年頃のローカルな生態系サービスの変化予測マップを作成した。またこれらのベースとなったデータについてはデータベース化した。

ニホンミツバチの遺伝的多様性に基づき、国スケールの送粉サービスマップを作成した。さらに県ごとに実際に昆虫等による送粉が必要な作物の作付面積についてもマップ化して比較した。その結果、潜在的に送粉サービスをより多く供給可能な地域とより多くの生態系サービスを利用していると考えられる地域はほぼ一致しており、平野部に集中する傾向があった。これらのことから里山景観におけるこれらのサービス供給生物の生息地保全

が、より重要であることが示唆された。国スケールでの捕食性天敵を指標とした生態系サービス予測では、山地の森林地帯で種多様性に基づく生態系サービスがより高いと評価された。

アジアのローカルな生物制御サービスの定量化を試みた結果、捕食性天敵(カリバチ)では明瞭な結果が得られなかったが、寄生性天敵では森林劣化によって個体数が減少し生物制御サービスが低下することが示唆された。分解サービスでは森林劣化と周囲の景観との相関が明らかになった。これらの結果に基づき東南アジアにおけるローカルなサービス予測マップを作成した。

これらの定量化から生態系サービス予測手法について、1. 東アジアの温帯雨林地域で生物相が類似する地域では類似の手法を適用可能である、2. 気候帯と生物相が大きく異なる地域では、主要なサービス提供生物を明らかにし、定量化する必要がある、3. 基盤情報として植生図(土地利用図)を整備する必要がある、4. 将来予測においては適切なシナリオの開発が必要であることを整理した。

森林劣化は国際的に認識されているものの定義が不明確であったことから、国連食料農業機構(FAO)の定義に基づき、生態系サービスの観点から森林劣化について分析し整理した。この定義に基づいて、途上国の森林減少・劣化の防止による温室効果ガスの排出削減等を目的とするREDD+において、望ましい森林管理手法を提案した。また東南アジアの生態系サービスの定量化結果と既存の文献等のレビューに基づき、REDD+セーフガードにおける生物多様性の指標として、人為かく乱や森林タイプなどを含めた8つの定量的指標を提案した。それぞれについてモニタリング手法を整理し、時間的、金銭的成本についても分析・整理した。

(4) リモートセンシング技術を用いたアジアにおける生物多様性・生態系機能マッピングとその時空間変動の推定

1) 温帯林における菌類の分解機能の航空機リモートセンシングによる評価

UAVを用いて空撮された画像から倒木を目視検出できた。しかし、実地調査と比較すると、直径30cm以上または長さ10m以上の倒木の検出率は90-80%であったが、直径や長さがそれ未満の倒木の検出率は30-0%であった。この理由として、直径や長さが短い倒木は、画像上では立木や枝・林床植生により隠れやすいためと考えられる。空撮の時間間隔を短くし複数の角度から地表面を撮影することにより、検出率の改善が期待される。

2) 国内における季節林の衛星データから推定された着葉期間に基づく形質の評価

衛星と地上観測データの統合的な解析により、機能的な着葉期間に関して北方および高標高域は、南方および低標高域よりも短い、常緑林は落葉林と比べて生葉窒素濃度が低く・個葉面積は小さく・強度は強い、北方および高標高域は南方および低標高域と比べて生葉窒素濃度が高く・個葉面積は大きく・強度は弱いという空間分布の特徴が地図化された。しかしながら、衛星データの解析により検出した機能的な着葉期間は、衛星データの空間分解能に相当する500~1,000m×500~1,000mの範囲に位置する様々な樹種の平均値をとらえている。光合成機能を高精度に推定するためには、高空間分解能をもつ葉の形質の分布情報だけではなく、群落レベルにおける気候変動に対する植生フェノロジーの感度の特徴を説明可能とする景観植生図など他の生態系情報を併せて利用することの重要性が示唆された。

3) ボルネオの熱帯林における植生フェノロジーの定点カメラ画像による検出

定点カメラ画像の解析により、樹種や個体ごとに異なる開花や葉の更新のフェノロジーを%RGBや彩度の時系列の変化として検出できた。一方、群落全体を対象とした%RGB・GEI・色相・彩度・明度の時系列や、光量子センサーによる観測で得た%RGBと植生指数(NDVI・EVI・GRVI)の時系列は、明瞭な変化を示さなかった。空間分解能が粗い(250~1,000m)衛星に搭載された可視・近赤外分光センサーとは異なり、安価で汎用性のある観測を可能とする定点カメラシステムは、熱帯多雨林の植生フェノロジーと気候変動に対する群落や樹種ごとの植生の応答性と機能変化を評価するために有益であることが示唆された。

4) 東南アジアにおける森林伐採の経年変化の広域観測衛星データによる評価

衛星データの解析により、島嶼東南アジアにおいて森林伐採がおこなわれた地域の時空間分布の変動が地図化された。おもにオイルパームのプランテーションへの転換を目的に森林伐採がおこなわれた地域は、マレーシア国のサラワク州やインドネシア国の西・中央カリマンタンやスマトラ東部の低標高域において顕著にみられた。森林伐採がおこなわれた地域は、経年的にみて高標高域へと徐々に拡大していた。近年、オイルパームの生産量の増加が著しいインドネシア国では、今後、森林伐採がおこなわれる地域が高標高域(内陸)へ拡大する可能性が予測される。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

- 1) 世界的に見て著しく遅れていたアジア地域における機能形質データベースの充実を達成し、国内においては主要樹種のほとんどを網羅して、東南アジア地域においても代表的な森林タイプ毎の特徴を把握するのに十分な規模の機能形質を収集した。この機能形質データベースは、本研究における活用に留まらず、

今後、この地域における様々な生態系機能・サービス研究に不可欠な基盤となるものである。

2) 上記の機能形質データベースと森林資源調査や衛星観測の結果を組み合わせることにより、国内・東南アジア両地域における森林の形質組成およびいくつかの重要な生態系機能・サービスの地図化を行った。このような可視化により、地域ごとに異なる生態系機能・サービスの現況を考慮した森林管理が可能になるだろう。

いくつかの重要な生態系機能・サービスと植生タイプや物理環境の関係を統計モデル化し、気候変動・土地利用シナリオを適用することで、これらのシナリオが生態系機能・サービスに異なる影響を与えることを実証した。

3) これまで散逸していた樹木の動態およびアロメトリーデータについてデータベースを構築し、一元的に情報処理を行うことで、広域の生産量などの推定が精度良く行えるようになった。

4) 森林の現存量・炭素吸収量の推定精度が従来の方法に比べ向上し、リモートセンシング技術を用いた炭素収支モデルや広域マッピング手法の開発に不可欠な地上検証データを提供できた。さらに地域の生態系サービス評価・将来予測のためのアルゴリズムを確立した。森林の生産性や生態系機能と関係する葉形質の予測モデルの構築に必要な分光データベースを構築することで、冷温帯から熱帯にかけた葉形質を予測する基礎モデルを完成させた。さらに、着葉タイプや観測機材に関する知見を提供した。

5) 生態系サービスのうち文化的サービスの評価は他に比べて進んでいないが、ソーシャルメディアの写真を用いて景観サービスの需要と供給を地図化する手法を開発したことにより、様々な空間、時間スケールで、刻々と変化するニーズやポテンシャルを素早く把握する可能性を広げた。送粉サービスの供給者として最も重要な昆虫の一つであるニホンミツバチの遺伝的多様性の地域的変異を明らかにしたことにより、景観に基づく地域的な多様性及び生態系サービス評価の重要性を示すことが可能になった。アジアの一地域において、原生林の改変により天敵サービスが変化することを明らかにし、分解サービスにも定量的な差異が認められることを示唆したことから、森林劣化の定量的評価手法の開発が可能になった。またこれまで経済的評価が先行していた生態系サービスを生物・生態学的に定量化することにより、各生態系サービスにおける経済的価値が異なるアジア地域に標準化可能な指標およびモニタリング手法の開発着手が可能となった。生態系サービス予測のための定量化手法として、土地利用変化によって説明可能な生態系サービス供給者の個体数、種や遺伝的多様性の予測手法を開発した。このことにより土地利用変化シナリオに基づく将来予測が可能となった。またこれらを地図化する手法を開発した。

6) 高解像度かつ精密な森林内部の立体構造、及び、立木/倒木の空間分布を同時に取得可能なUAV（無人航空機）観測手法を開発した。本手法を用いることで、林分での炭素蓄積や分解速度の分布評価のための基盤情報を得ることができるため、典型的な森林タイプごとの測定によって生態系機能/サービス分布のリファレンス値の取得が可能となる。

7) 衛星データの解析により検出した機能的な着葉期間に基づいて、落葉林における葉の形質の空間分布を広域的に地図化した。その結果、気候変動下における植生の機能（光合成）の時空間分布を高精度に評価するための基盤情報を提供することが可能となった。

8) 熱帯多雨林を対象に、長期連続的な定点カメラ観測により、植生フェノロジーの様式や期日の特徴を検出する手法を開発した。その結果、超高解像度なデジタルカメラを衛星に搭載することにより、将来、生態系の機能・サービスや生物多様性の評価のための基盤情報となる植生フェノロジーを個体レベルで広域的に観測・評価する可能性を示唆した。

9) 島嶼東南アジアにおける森林伐採がおこなわれた地域の年々変動を500mの空間分解能で初めて明らかにした。本手法では森林伐採後の土地被覆を直接的に評価できないにもかかわらず、森林伐採がおこなわれた地域の年々変動の空間分布を明らかにすることは、土地被覆変化に起因した生態系の機能・サービスや生物多様性への影響を高精度に評価するための基盤情報を提供する利点がある。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

1) 環境省生物多様性及び生態系サービスの総合評価に関する検討会が2016年3月に公表した、「生物多様性及び生態系サービスの総合評価報告書」において、生態系サービスの定量評価方法について、この研究で開発された定量的推定アルゴリズムが使われた。また、Intergovernmental Science-Policy Platform for Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES)のアジア太平洋地域アセスメントの森林生態系の生態系サービス評価において、この研究の成果を活かしたアセスメント手法が提案され、採用されている。

2) 本研究成果を元にCPF/ IUFRO GFEPに参画して生物多様性、住民及び炭素に関する総説を作成し、CBD COP11及びUNFCCC COP18のサイドイベントで報告した(2012年)。

- 3) 農林水産省林野庁事業の評価等のプロジェクトに対して助言を行った(2013-2015年)。
- 4) 本研究成果を元にIPBES Deliverable 3(a): Thematic assessment of pollinators、pollination and food production にLeading Authorとして参加し、花粉媒介と食糧生産について現状や現在までの対策について本プロジェクト成果にもとづき、既存報告を取りまとめた(2013-2015年)。
- 5) 第2回生物多様性総合評価(JBO2)に貢献した(データを提供し、送粉サービスの評価結果がp113に採用された)(2015年)。
- 6) 林野庁事業「森林保全セーフガード確立事業」の REDD+におけるセーフガードの基準指標の作成とガイドブックの作成に貢献した(本研究成果に基づいて、REDD+セーフガードにおけるモニタリングの基準指標に、熱帯森林の生物多様性指標に森林タイプや人為かく乱等を含めた。また生態系サービスについての解説に利用した)(2014-2015年)。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

- 1) この研究で開発された生態系サービスの定量的推定・評価方法は、現在行われているIPBESのアジア太平洋地域アセスメントの森林生態系の生態系サービス評価において、東南アジア、東アジア地域の生態系サービス評価の手法やデータとして使用される予定である。また、生態系サービスの定量化は、自然資本推定の基礎となる情報であり、今後地方自治体などの地域資源の把握や利用などに利用できる。さらに、シナリオ分析の手法は、さらに発展させ、様々な状況にカスタマイズできるツールとして発展させる必要があるが、地域計画の策定などに利用できる可能性が大きい。
- 2) IPBES 2b: Regional Assessments for Asia Pacific Region にリードオーサーとして参画している(プロジェクト成果に基づきアジア太平洋地域の生物多様性におけるガバナンスについて、特に森林劣化およびREDD+について生物多様性保全とのリンクに関する本成果を含めた既存の報告を取りまとめ、報告書を作成している)。
- 3) Flickr を用いた景観の文化サービスの評価手法は、国立・国定公園など自然公園・保護区が提供するサービスの価値を定量化し、適切な利用・保全をすすめる上での活用が期待される。
- 4) 衛星データの解析の結果得られた、島嶼東南アジアを対象とした森林伐採がおこなわれている地域の年々変動の地図は、炭素吸収・排出量の算定や動植物の生息域分布の推定のための基盤情報として活用が期待される。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

＜査読付き論文＞

- 1) Thompson, I.D., Okabe, K., Tylianakis, J.M., Kumar, P., Bockerhoff, E.G., Schellhorn, N., Parrotta, J.A., & Nasi, R. (2011). Forest biodiversity and the delivery of ecosystem goods and services: Translating science into policy. *BioScience*, **61**, 972-981.
- 2) Aiba, M., Takafumi, H., & Hiura, T. (2012) Interspecific differences in environmental and spatial controls on plant species distribution and the relationships with functional traits. *J. Ecol.*, **100**, 950-957.
- 3) Garibaldi, L.A., Steffan-Dewenter, I., Winfree, R., Aizen, M.A., Bommarco, R., Cunningham, S.A., Kremen, C., Carvalheiro, L.G., Harder, L.D., Afik, O., Bartomeus, I., Benjamin, F., Boreux, V., Cariveau, D., Chacoff, N.P., Dudenhofer, J.H., Freitas, B.M., Ghazoul, J., Greenleaf, S., Hipolito, J., Holzschuh, A., Howlett, B., Isaacs, S., Javorek, K., Kennedy, C.M., Krewenka, S., Krishnan, Y., Mandelik, M., Mayfield, M., Motzke, I., Munyuli, T., Nault, B.A., Otieno, M., Petersen, J., Pisanty, G., Potts, S.G., Rader, R., Ricketts, T.H., Rundlof, M., Seymour, C.L., Schuepp, C., Szentgyorgyi, H., Taki, H., Tscharnkte, T., Vergara, C.H., Viana, B.F., Wanger, T.C., Westphal, C., Williams, N. & Klein, A.M. (2013). Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science*, **339**, 1608-1611.
- 4) Aiba, M., Katabuchi, M., Takafumi, H., Matsuzaki, S.S., Sasaki, T., & Hiura, T. (2013) Robustness of trait distribution metrics as a tool for community assembly studies under uncertainties of assembly processes. *Ecology*, **94**, 2873-2885.
- 5) T. INOUE, S. NAGAI, S. YAMASHITA, H. FADAEI, R. ISHII, K. OKABE, H. TAKI, Y. HONDA, K. KAJIWARA, and R. SUZUKI: PLOS ONE, 9, 10, e109881 (2014), Unmanned aerial survey of fallen trees in a deciduous broadleaved forest in Eastern Japan.
- 6) S. NAGAI, R. ISHII, A.B. SUHAILI, H. KOBAYASHI, M. MATSUOKA, T. ICHIE, T. MOTOHKA, J.J.

- KENDAWANG, and R. SUZUKI: International Journal of Remote Sensing, 35(23), 7910–7926 (2014), Usability of noise-free daily satellite-observed green–red vegetation index values for monitoring ecosystem changes in Borneo.
- 7) S. NAGAI, T.M. SAITOH, K.N. NASAHARA, and R. SUZUKI: International Journal of Biometeorology, 59, 47–54 (2015), Spatio-temporal distribution of the timing of start and end of growing season along vertical and horizontal gradients in Japan.
 - 8) Kennedy, C.M., Lonsdorf, E., Neel, M.C., Williams, N.M., Ricketts, T.H., Winfree, R., Bommarco, R., Brittain, C., Burley, A.L., Cariveau, D., Carvalheiro, L.G., Chacoff, N.P., Cunningham, S.A., Danforth, B.N., Dudenhöffer, J.-H., Elle, E., Gaines, H. R., Garibaldi L.A., Gratton, C., Holzschuh, A., Isaacs, R., Javorek, S., Jha, K.S., Klein, A.M., Krewenka, K., Mandelik, Y., Mayfield, M.M., Morandin, L., Neame, L.A., Otieno, M., Park, M., Potts, S.G., Rundlöf, M., Saez, A., Steffan-Dewenter, I., Taki, H., Viana, B.F., Westphal, C., Wilson, J.K., Greenleaf, S.S. & Kremen, C. (2013). A global quantitative synthesis of local and landscape effects on wild bee pollinators in agroecosystems. *Ecol. Lett.*, **16**, 584-599.
 - 9) Yamashita, S., Ando, K., Hoshina, H., Ito, N., Katayama, Y., Kawanabe, M., Maruyama, M. & Itioka, T. (2015). Food web structure of the fungivorous insect community on bracket fungi in a Bornean tropical rain forest. *Ecol. Entomol.*, **40**, 390-400.
 - 10) Ishihara, M.I., Usugi, H., Tanouchi, H., Aiba, M., Kurokawa, H., Onoda, Y. *et al.* (2015). Efficacy of generic allometric equations for estimating biomass : a test in Japanese natural forests. *Ecol. App.*, **25**, 1433-1446.
 - 11) Suzuki, S.N., Ishihara, M.I. & Hidaka, A. (2015). Regional-scale directional changes in abundance of tree species along a temperature gradient in Japan. *Glob. Change Biol.*, doi:10.1111/gcb.12911.
 - 12) Rader, R., Bartomeus, I., Garibaldi, L.A., Grratt, M.P.D., Howlett, B., Infree, R., Cunningham, S.A., Mayfield, N.M., Arthur, A.D., Andersson, G.K.S., Bommarco, R., Brittain, C.A., Carvalheiro, L.G., Chacoff, N.P., Enttling, M.H., Foully, B., Freitas, B.M., Gemmill-Herren, B., Ghazoul, J., Griffin, S., Gross, C.L., Herbertsson, L., Herzog, F., Hipolito, J., Jaggard, S., Jauker, F., Klein, A.-A., Klein, D., Krishnan, S., Lemos, C.Q., Lindström, S.A.M., Mandelik, Y., Monteiro, V.M., Nelson, W., Nilsson, L., Pattermore, D., Pereira, N., Pisanty, G., Potts, S.G., Reemer, M., Rundlof, M., Sheffield, C.S., Scheper, J., Schuepp, C., Smith, H.G., Stanley, D.A., Stout, J.C., Szentgyorgyi, H., Taki, H., Vergara, C.H., Viana, B.F. & Woyciechowski, M. (2016). Non-bee insects are important contributors to global crop pollination. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **113**, 146–151
 - 13) Aiba, M., Kurokawa, H., Onoda, Y., Oguro, M., Nakashizuka, T. & Masaki, T. (in press). Context-dependent changes in the functional composition of tree communities along successional gradients after land-use change. *Journal of Ecology*.

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) R. SUZUKI, H. MURAOKA, R. ISHII: International Conference on Earth Observations and Societal Impacts 2011 “Enhance the link between remote sensing and in-situ observation network for biodiversity monitoring.”
- 2) 山下 聡、吉村 剛、本田 与一、服部 武文、土居 修一、服部 力: 第55回日本菌学会大会(2011)「東南アジアにおけるアカシア植林が多孔菌類の群集構造に及ぼす影響」
- 3) H. TAKI: Conservation and sustainable use of pollinators: towards global assessments. Fukuoka, Japan, 2012.1 “Pollinator responses to forest management in Japan.”
- 4) S. NAGAI : Workshop on assessing Ecosystem Structure and Function with Satellite- and Ground-based Observations. February 23-24, University of Hawaii at Manoa (Invited; Oral), 2012 “Comprehensive, long-term, continuous, and global ground-truth for accurate phenological observations by using satellite remote-sensing -the challenging activities of the ‘Phenological Eyes Network (PEN)’ -.”
- 5) 黒川 紘子、饗庭 正寛、片渕 正紀、柴田 嶺、石田 敏、LAMTHAI ASANOK, 佐々木 雄大、中 静透: 日本生態学会第59回全国大会(2012)「異なる森林生態系における種多様性損失と機能的多様性の変化」
- 6) 滝久 智: 日本生態学会第60回大会 (2013)「日本の土地利用と送粉者 -森林管理を中心に-」
- 7) 日浦 勉: OCCCCO/NIES温暖化観測連携拠点シンポジウム(2013)「生物多様性-生態系機能観測ネット

ワークの現状」

- 8) 山下聡、服部力、岡部貴美子：第61回日本生態学会大会（2014）「生物群集に対する人為活動と環境要因の影響を相対的に評価する：木材腐朽菌群集を例に」
- 9) 中路達郎、小熊宏之、日浦勉：第61回日本生態学会（2014）「連続分光反射率を用いた葉形質の季節変化の評価」
- 10) M. AIBA : 51st Annual Meeting of the Association for Tropical Biology and Conservation, Cairns, Australia, 2014 " A comparative analysis of trait associations among forest types in Southeast Asia "
- 11) R. ISHII: 8th European Conference on Ecological Modelling, Université Cadi Ayyad – Marrakech, Morocco, Oct. 2014 "A new ecosystem network model under human activity."
- 12) R. ISHII: WG4 Asia-Pacific Biodiversity Observation Network (AP BON), 8th GEOSS Asia-Pacific Symposium, Beijing China (2015) "Progress Report from J BON" 《招待講演》
- 13) R. SUZUKI: International Workshop on Bridging Gap between Environmental Geospatial Information and Environmental Policy, a special event of 2015 Fall Conference of Korean Society of Remote Sensing, Kim-Dae-Jung Convention Center, Kwangju, Korea (2015) "Remote sensing of forest function of carbon flow/stock in the global geochemical cycle and ecosystem service." 《招待講演》
- 14) 長谷川泰洋、岡部貴美子、滝久智：環境アセスメント学会第14回大会（2015）「生物多様性・生態系サービスの将来予測におけるシナリオアプローチのあり方」
- 15) 饗庭正寛：日本生態学会第62回全国大会（2015）「アジア地域における機能形質データベース」

7. 研究者略歴

課題代表者：中 静 透

千葉大学理学部卒業、理学博士、現在、東北大学大学院生命科学研究科教授

研究分担者

1) 日浦 勉

北海道大学農学部卒業、農学博士、現在、北海道大学大学院環境科学院教授

2) 岡部貴美子

千葉大学園芸学部卒業、博士（学術）、現在、森林総合研究所森林昆虫研究領域チーム長

3) 鈴木力英

筑波大学自然科学類卒業、筑波大学地球科学系講師、現在、海洋研究開発機構地球表層物質循環研究分野分野長

3. アジア地域における生物多様性劣化が生態系の機能・サービスに及ぼす影響の定量的解明

(1) 植物の機能形質データに基づく樹木多様性の損失が森林生態系の機能・サービスに与える影響の解明

東北大学大学院

生命科学研究科 植物生態学研究室

中静 透

饗庭正寛

<研究協力者>

国立研究開発法人森林総合研究所

黒川紘子

平成23～27年度累計予算額：78,371千円（うち平成27年度：14,327千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

植物の機能形質の活用により、いくつかの重要な生態系機能・サービスについて、精度の高い定量的評価が可能であることが示されてきた。しかし、研究開始時点においてアジア地域では利用可能な形質データの蓄積が乏しく、結果として機能形質を活用した生態系機能・サービス評価事例も皆無に近い状況であった。そこで本研究では、まず国内の主要320樹種および東南アジア地域の主要な森林タイプを代表する約1000樹種の葉と材の形質を中心とした機能形質データベースを整備した。次に国内においては、形質データベースと林野庁による全国を4kmメッシュで網羅した森林調査結果を組み合わせ、高精度・高解像度で日本全域を網羅する形質組成の地図を作成した。東南アジア地域においては、形質データベースと衛星観測による植生図を組み合わせ同様の地図を作成した。さらに、これらの形質値のいくつかと最大光合成速度・落葉分解速度係数の間の関係式を活用して、国内・東南アジアの両地域において、最大光合成速度・落葉分解速度係数の地図を作成した。最後に、気候や植生タイプなどの環境条件と最大光合成速度・落葉分解速度係数の関係を統計学的にモデル化し、異なる気候変動・土地利用シナリオの下で予測される環境条件をあてはめた。この解析により、異なる気候変動・土地利用シナリオが生態系機能・サービスに異なる影響を与えることを実証した。これらの成果は、気候変動や土地利用変化が森林の生態系機能・サービスに与える影響を考慮した森林の管理や活用、リスク評価への活用が期待される。また、本研究で構築した機能形質データベースや形質組成、生態系機能・サービスの地図はいずれも今後、この地域における生態系機能・サービスに関する研究を推進する上で不可欠な基盤となるものである。

[キーワード]

機能形質、生態系機能、生態系サービス、生物多様性、土地利用変化

1. はじめに

生物多様性条約（CBD）の第10回会議（COP10）では「生物多様性概況第3版（GB03）」の分析を

うけて、2010年以降の戦略目標（愛知目標）が採択された。この議論の中では、さまざまなステークホルダーによる具体的な行動を促すため、測定可能で実現可能な目標であることや、生態系サービスの評価などが強調され、数値目標も増えている。また、「生物多様性と生態系サービスの経済学（TEEB）」の最終報告書が提出されたことにより、革新的資金メカニズムなどの議論も進んでおり、そのため生態系サービスの定量化を進める必要がある。とくに、森林生態系に関しては、温暖化緩和策とのコベネフィットを期待した、森林の減少・劣化を防止することによる森林からの温室効果ガスの排出削減（REDDおよびREDD+）」が、有望なメカニズムとして注目されており、その導入に欠かせない評価やモニタリング手法が望まれている。さらに、「生物多様性と生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム」（IPBES）の設置が決まり、生物多様性や、生態系機能、生態系サービスの現状と予測や評価に関する科学的知見がCBDの中で果たす役割が重要視されている。

生態系機能・サービスを広域に効率的に評価するための様々な手法の検討が進められており、中でも生物の機能形質に基づく手法は最も有力なもののひとつである。この手法を活用するためには対象地域の生態系機能・サービスに重要な生物の形質データベースの存在が不可欠であるが、日本を含むアジア地域ではその構築が遅れている。そのため、本研究では、アジア地域において樹木の形質データベースの構築を進め、そのデータベースに基づく生態系機能・サービスの評価手法を開発し、実際にアジア地域における森林の生態系機能・サービスを地図化し、この地域において生物多様性の劣化が生態系機能・サービスに与える影響の定量的な評価を推進する。

2. 研究開発目的

日本を含むアジア全域で、葉の面積あたり重量(Leaf mass per area, LMA)や窒素濃度、材の比重など、生態系機能に関係する樹木の形質（機能形質）のデータベースを構築し、様々な森林タイプ（二次的森林も含む）において樹木群集構造・動態のデータとの統合を行い、生産・分解のポテンシャルに関する生態系機能の変動を広域に推定するための基礎的情報を提供する。

3. 研究開発方法

（1）樹木の機能形質データベースの構築

国内においては、23か所の森林調査区において、全出現樹種を対象に樹木の機能形質調査を行った。最長15mのカーボン製伸縮竿に鎌を取り付け、成木の樹冠上部から可能な限り明るい環境の葉を数十～数千枚採取した。また、同じ個体の地上1.1m付近から、直径5.15mm、長さ約5cmの材サンプルを成長錐を用いて採取した。葉および材のサンプルは宿舎に持ち帰り、個葉面積、葉重/葉面積比(LMA)、葉の強度、葉の厚さ、乾物含有量(LDMC)、各種化学成分(葉の窒素含量、リグニン含量、フェノール含量、タンニン含量)および材密度の測定に用いた。測定に際して、食害や病変の著しい葉は除外した。葉サンプルの一部（A4スキャナで1度にスキャン可能な枚数。個葉サイズにより1-数100枚）をスキャンし、生重量を測定後、60℃で重量変化がなくなるまで乾燥し、乾重量を測定した。こうして得られたスキャン画像、生重量、乾重量から、個葉面積、LMA、LDMCを算出した。これらの計測は、葉柄や複葉の葉軸を含む全葉を対象に行なった。また、別のサブサンプル(2枚)について、葉の強度と厚さを測定した。葉の強度はプッシュプルゲージに取り付けた直径2mmの金属円柱で貫通試験を行い測定した。葉の厚さの測定にはシックネスゲージを用いた。

どちらの計測においても、葉脈を可能な限り避け、2回の測定の平均を計測値とした。材サンプルは、両端を垂直に切り揃えて長さを測定したのち、60℃で重量変化がなくなるまで乾燥し、乾燥後の重量を乾燥前の体積で割ることにより算出した。また、別のサブサンプル（数10g）を化学成分分析用にとりわけ、シリカゲル乾燥した。国外においては、タイとマレーシアの計10か所において、同様のサンプリングを行った。国外における調査地点は東南アジアの主要な9つの森林タイプを網羅するように選択した。国外においては、森林の種組成データが利用できない場合も多く、その場合には簡易的なプロットを設置し毎木調査も行った。さらに、最大樹高や種子重量など直接測定が困難な形質については、過去の文献に記載されたデータのデジタル化を行った。

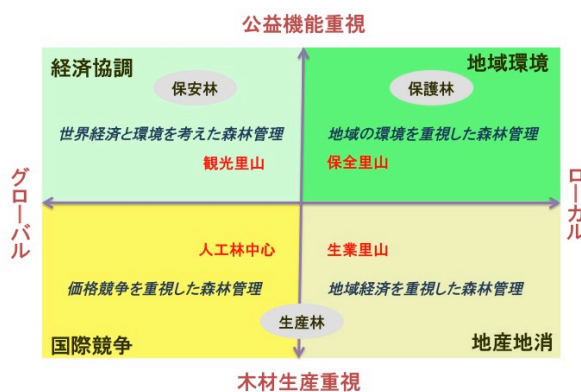
（２）樹木群集の形質組成および森林生態系の機能・サービスの地図化

次に機能形質データベースを活用して、様々な生態系機能・サービス評価の基盤となる樹木群集の形質組成、およびそこから導かれる生態系機能・サービスの地図化を行った。国内においては、林野庁の森林生態系多様性基礎調査で得られた全国4km格子の森林調査データに各樹種の機能形質データを紐づけることで、最大樹高、LMA、種子重量、材密度、個葉面積の5つの形質についてその群集加重平均値や5つの形質すべてを利用した機能的多様性を算出し、日本地図上に可視化した。また、海外については、人工衛星から作成された植生図に森林タイプごとの形質値を割り当てることで国内同様の生態系機能/サービスの評価の基盤となる機能形質値の地図を作成した。さらに、既存の論文から得られた、機能形質値および物理環境指標値と生態系機能・サービス（気候の調整サービスの基盤となる最大光合成速度および落葉分解速度）の間の関係式に基づき、各森林調査地点の生態系機能・サービス値を算出し、地図化した。国外については同様の解析を森林タイプごとに行い、衛星観測による植生図と組み合わせて地図化した。

（３）異なる気候変動・土地利用シナリオが森林生態系の機能・サービスに与える影響の可視化

異なる気候変動・土地利用シナリオが森林生態系の機能・サービスに与える影響を評価するために、まず、最大光合成速度・落葉分解速度をそれぞれ、植生タイプ、気候をはじめとする各種物理環境、空間座標の関数として、複雑なモデルの構築に適した機械学習法の一つ、ランダムフォレスト法によりモデリングした。気候変動シナリオとして、農業環境技術研究所から提供を受けたMIROC5モデルのRCP2.6、RCP4.5、RCP8.5の3つのシナリオを利用した。

また、土地利用シナリオとしては、森林総合研究所から提供を受けた、森林のもつ生態系機能を、1) 従来のように木材の供給サービスを最大化する方向か、それ以外のサービスも考えた方向か、2) 市場（経済）や環境をローカルに考えるかグローバルに考えるかという2つの軸の組み合わせからなる、国際競争、経済協調、地産地消、地域環境という4つのシナリオを用いた(図(1)-1)。これらのシナリオのもとで予期される気候値・土地利用に上述の統計モデルを当てはめることで、これらのシナリオのもとで予期される生態系機能・サービスの値を計算し、シナリオ間の比較ができる形で可視化した。国外においては、攪乱後の森林の森林タイプを分類できないという衛星観測の弱点を補うために、環境条件を



図(1)-1 本研究で想定する4つの土地利用シナリオ

説明変数としたランダムフォレスト法による森林タイプ予測モデルを構築し、潜在植生を推定した。潜在植生との比較により現在存在する二次林の起源を推定し、潜在植生・現生植生のそれぞれについて生態系機能・サービスを地図化し、両者を比較することでこれまでの人為攪乱が森林の形質組成および生態系機能・サービスに与えてきた影響を評価した。

4. 結果及び考察

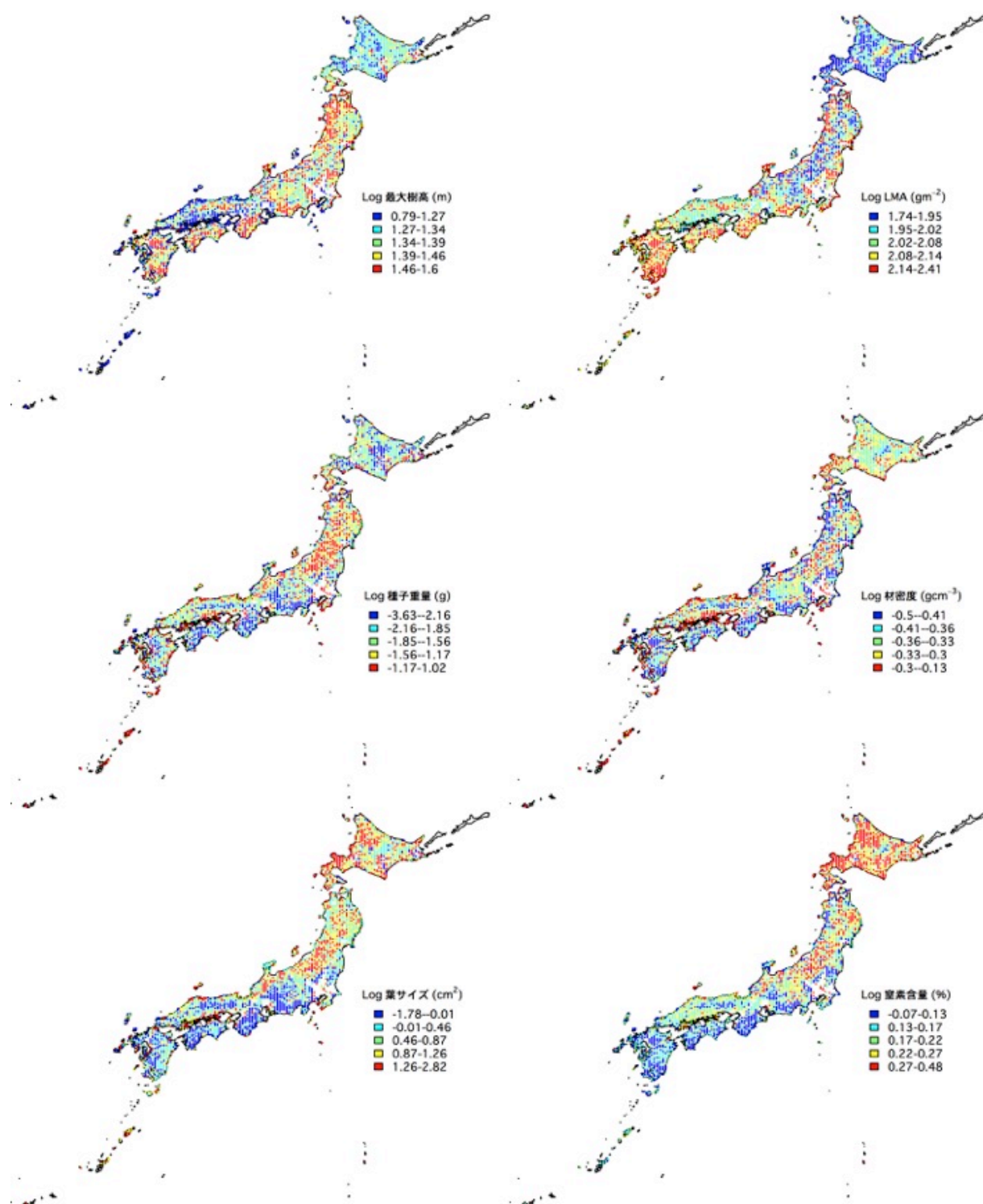
(1) 樹木の機能形質データベースの構築

国内においては全森林の現存量の99%以上に相当する320種の樹木について、生態系機能・サービスの重要な決定要因である葉と材の主要な形質のデータベースを構築することができた。またこれらの種の過半数については、最大樹高、種子重量、花や果実の諸形質、根系の形質などを既存の文献から収集することができた。国外においては東南アジアの主要な森林タイプ(低地熱帯雨林、熱帯山地林、泥炭湿地林、淡水湿地林、熱帯ヒース林、乾燥常緑林、乾燥フタバガキ林、マングローブ林)を網羅する約1000種の葉と材の主要な形質のデータベースを構築することができた。

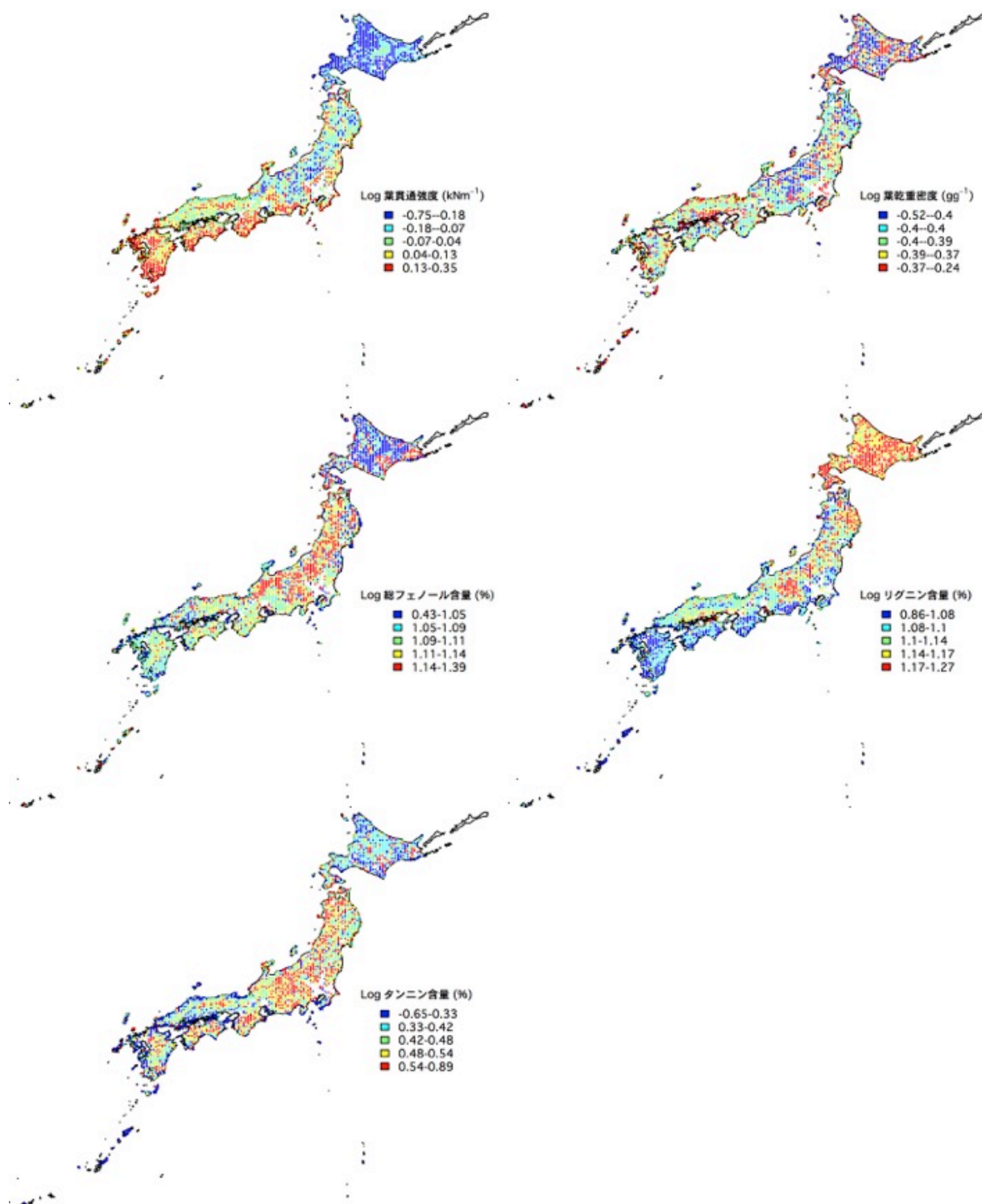
(2) 樹木群集の形質組成および森林生態系の機能・サービスの地図化

1) 国内の形質組成地図

11の主要な機能形質について、その群集加重平均値の地図を作成した(図(1)-2, (1)-3)。最大樹高は人工林を含めて針葉樹の優占する九州・四国・紀伊半島と東北の日本海側で高く、中国地方や北海道で低かった。LMAは常緑樹の自然林や針葉樹の人工林が広がる南日本で高く、また北日本でも針葉樹の人工林が多い地域では高かった。種子重量は東北で大きく、南日本の太平洋側で小さかった。材密度は瀬戸内や道南で高く、針葉樹の人工林が広がる地域で低かった。葉サイズは北日本で大きく、南日本で小さい傾向が顕著だった。葉の窒素濃度も同様に、北日本で高く、南日本で低かった。葉の貫通強度は北日本で小さく、南日本で大きかった。葉の乾重密度は北日本で低い地点が多く見られたが同時に高い地点もまた北日本に多かった。葉のフェノール含量は東北の日本海側・北陸で高く、南日本では中程度、北海道で低かった。葉のリグニン含量は北海道や東日本の高標高地域で高く、南日本で低かった。葉のタンニン含量は東北から中部地方で高く、北海道や中国地方で低かった。これらの機能形質値はいずれも森林生態系の機能・サービスと密接な関連を持つものである。例えば、最大樹高は潜在的なバイオマス現存量の、LMAや葉の窒素含量は炭素固定能力や落葉の分解速度の、材密度は木材の利用用途の重要な決定要因である。日本の森林におけるこれらの機能形質値の分布を可視化したのは本研究が最初であり、上述のようなパターンの存在はほとんど知られていなかった。これらの形質組成地図は、後述の本研究での解析例に留まらず、今後様々な生態系機能・サービスの広域的な定量評価に広く活用されていくと考えられる。また、日本の森林を形成する群集生態学的メカニズムの解明といった重要な基礎研究や、気候変動や土地利用変化といった攪乱に対する森林の応答に関する研究などにも不可欠な基盤情報である。



図(1)-2 日本の森林における生態系機能に重要な
樹木形質の群集加重平均値

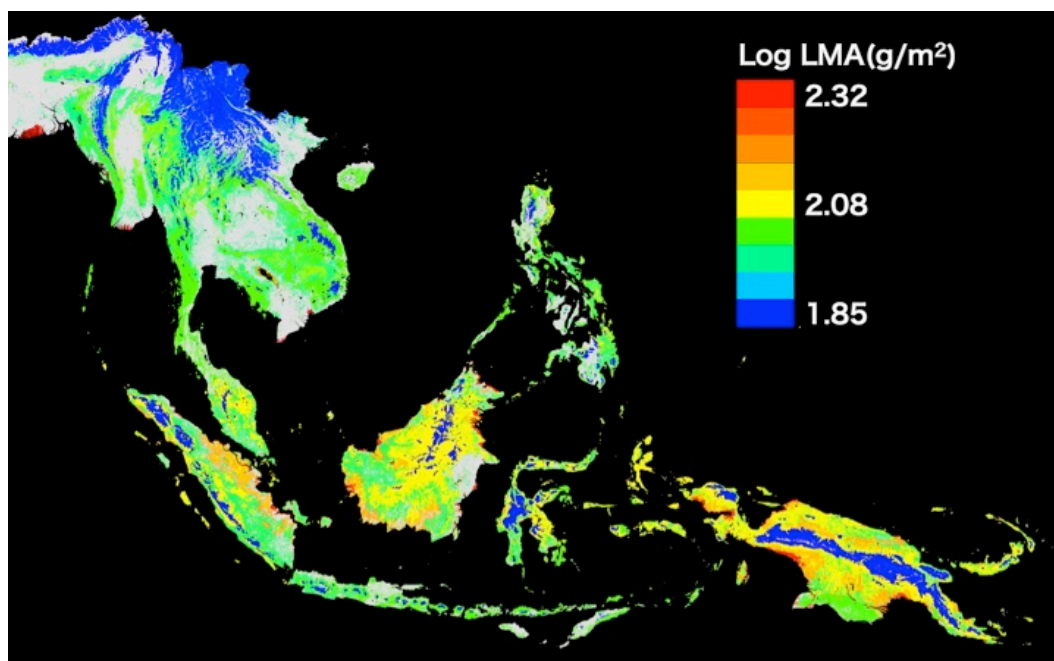


図(1)-3 日本の森林における生態系機能に重要な
樹木形質の群集加重平均値(続き)

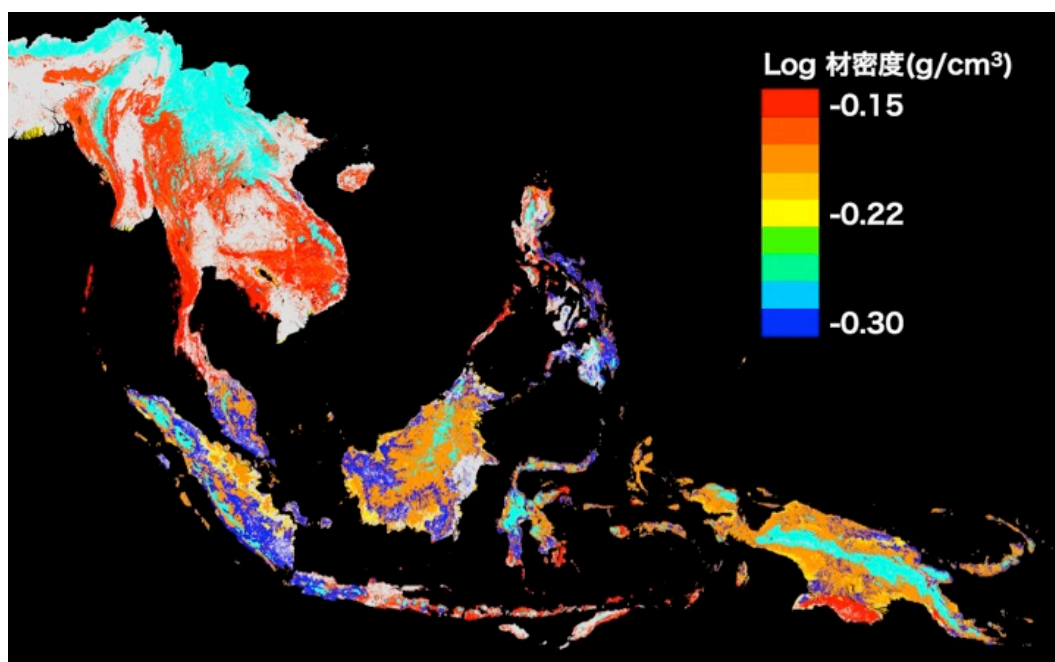
2) 海外の形質組成地図

東南アジアにおいては8の主要な機能形質について、その群集加重平均値の地図を作成した

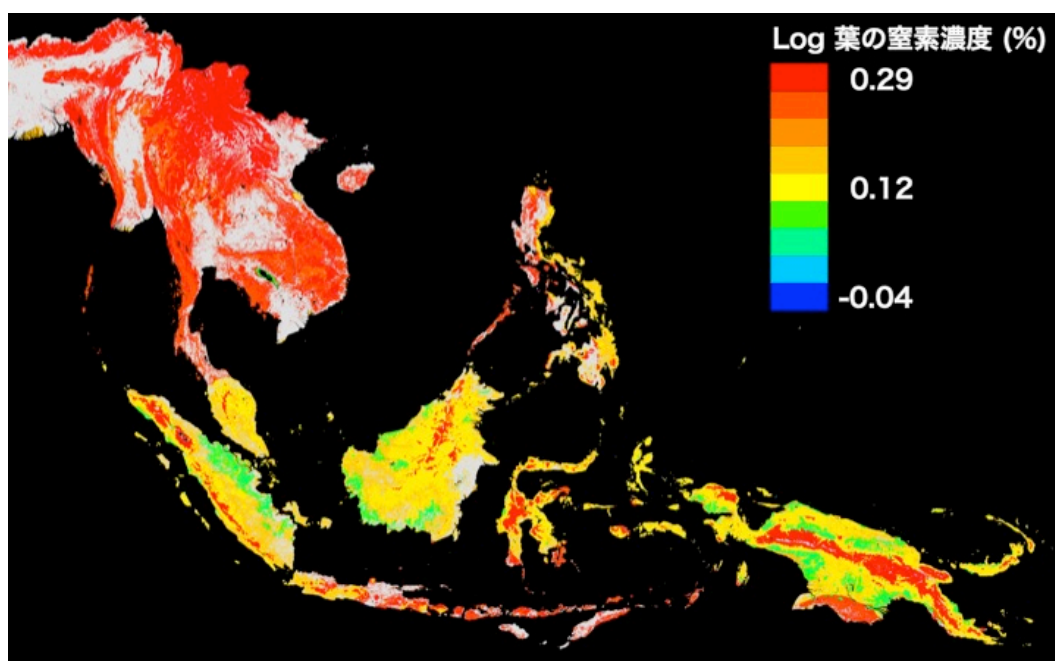
(図(1)-4, (1)-5, (1)-6, (1)-7)。LMAは低地熱帯雨林や泥炭湿地林、マングローブ林で高く、熱帯山地林で低かった。また、低地熱帯雨林では攪乱後の二次林において、自然林と比較して、LMAが大きく低下していた。材密度は、インドシナ半島に広がる乾燥常緑林、乾燥フタバガキ林で高く、熱帯山地林で低かった。また、低地熱帯雨林では攪乱後の二次林において、材密度が著しく低下していた。葉サイズは熱帯山地林で大きく、泥炭湿地林、マングローブ林で小さかった。低地熱帯雨林では攪乱後の二次林において、葉サイズが増大していた。葉の窒素含量は、インドシナ半島に多い乾燥常緑林、乾燥フタバガキ林、熱帯山地林で高く、泥炭湿地林で低かった。葉の貫通強度は泥炭湿地林で高く、熱帯山地林で低かった。葉のフェノール含量は泥炭湿地林で高く、乾燥常緑林、熱帯山地林で低かった。葉のリグニン含量は低地熱帯雨林で高く、マングローブ林で低かった。葉のタンニン含量は低地熱帯雨林・泥炭湿地林で高く、乾燥常緑林で低かった。本成果は、熱帯地域において、森林タイプ間にこのように顕著な機能形質値の違いが存在することを示した数少ない研究例である。また、衛星観測による植生図との組み合わせにより、地図として可視化した事例も少ない。これらの地図も上述の国内の形質組成地図と同様、この地域の森林の生態系機能・サービスや攪乱応答等の解析を進める上で不可欠な基盤情報である。



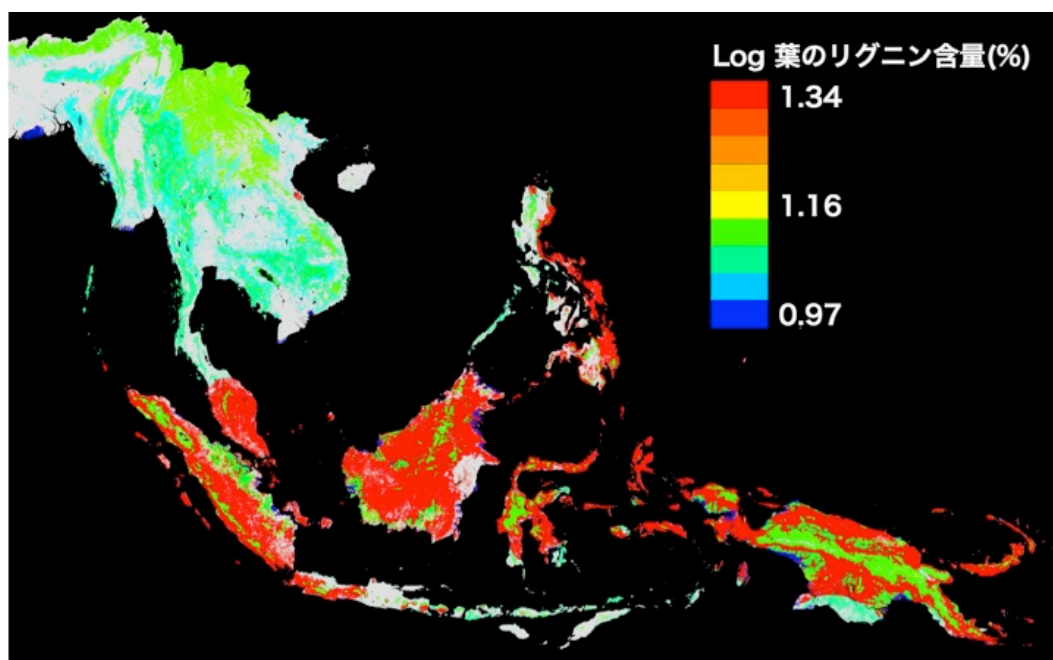
図(1)-4 東南アジア地域のLMAの群集加重平均値



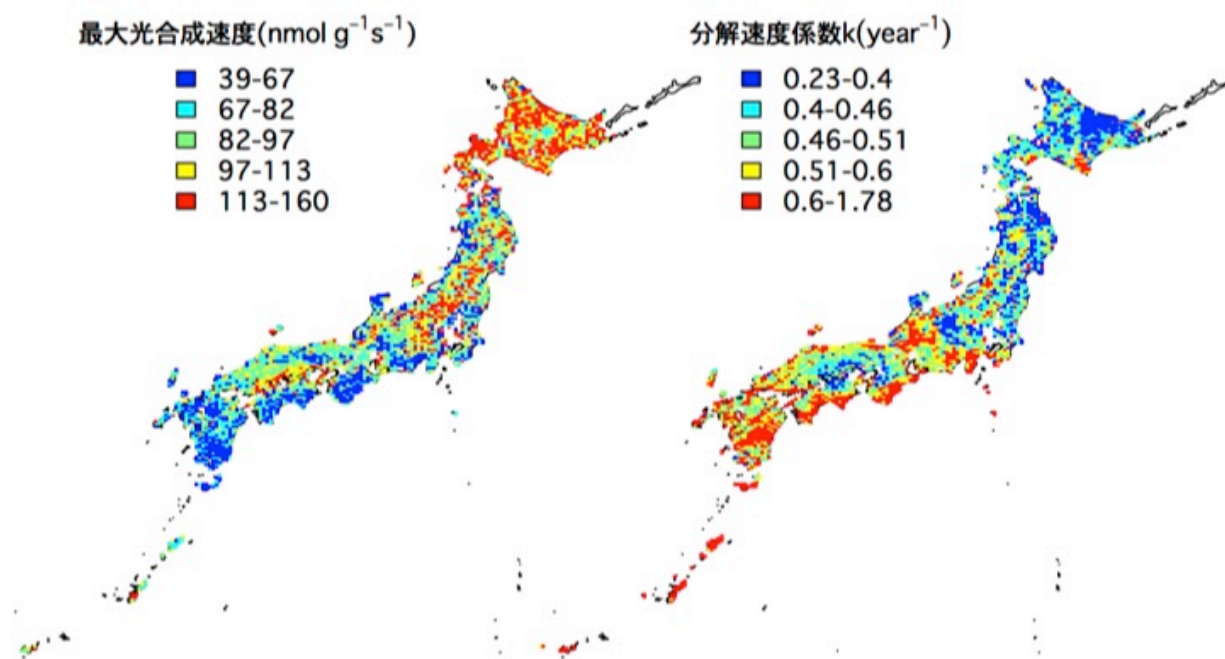
図(1)-5 東南アジア地域の材密度の群集加重平均値



図(1)-6 東南アジア地域の葉の窒素濃度の群集加重平均値



図(1)-7 東南アジア地域の葉のリグニン含量の群集加重平均値



図(1)-8 最大光合成速度と分解速度係数の全国地図

3) 国内の生態系機能・サービス地図

上述の形質組成と物理環境データに、既存の文献から得られた統計モデルを適用して潜在光合成能力(葉重量あたり最大光合成速度 A_{mass})と落葉分解速度係数を全国を対象に可視化した(図(1)-8)。最大光合成速度は落葉樹が多くLMAが小さい北海道や東日本の高標高地域で高く、南日本で低かった。実際の炭素固定量は、最大光合成速度だけでなく気温や日射量などの気候条件や葉の量に大きく影響されるため、この地図のみで森林の炭素固定能力が評価できるわけではないことには注意が必要である。落葉分解速度係数はリグニン含量が低く、夏期の雨量の多い南日本で大きく、リグニン含量が高く、夏期の雨量の少ない北日本で小さかった。このような高精度、広域、高解像度な生態系機能・サービスの可視化は国内はもとより、世界的にも新規性の高い成果である。この成果は後述のように、これらの生態系機能・サービスに対する異なる気候変動・土地利用シナリオの影響評価といった応用研究に不可欠な基盤情報である。また、将来的には、この結果を活用した生態系サービスの社会経済的価値の評価や他の生態系サービスとの間のシナジー・トレードオフ関係の解明といったさらなる発展的研究への道を開くものである。

4) 海外の生態系機能・サービス地図

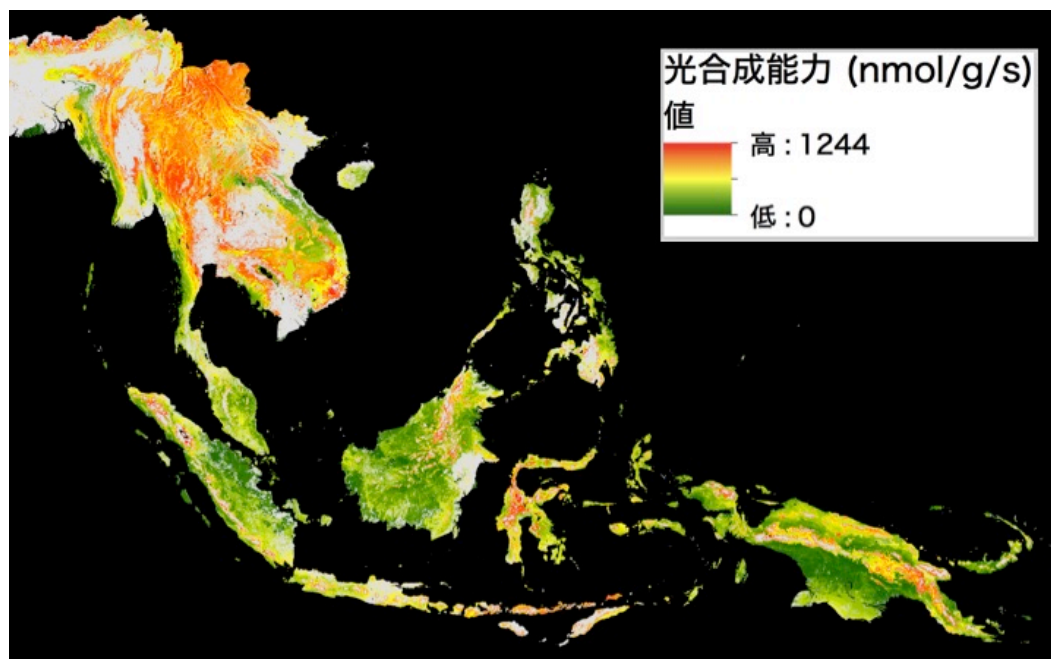
東南アジア地域においても同様の手法により森林の最大光合成速度と落葉分解速度係数の可視化を行った(図(1)-9、図(1)-10)。最大光合成速度は落葉樹が優先する落葉フタバガキ林やLMAの小さい熱帯山地林で高く、LMAの大きい泥炭湿地林で低かった。分解速度係数については、マレー半島のクラ地峡付近での低地熱帯雨林と乾燥常緑林の移行帯などに着目すると、葉のリグニン含量が高く、窒素含量の低い低地熱帯雨林で分解速度係数が乾燥常緑林よりも低くなる傾向が見られるが、全体に森林の形質組成よりも、降水量の影響が強い結果となった。その結果、大陸のインド洋岸や、カリマンタン島中央部・ニューギニア島中央部等で分解速度係数が高くなる傾向が得られた。この地域におけるこのような高解像度な生態系機能・サービスの評価は初めてであり、国内の地図同様に、様々な応用研究に不可欠な基盤情報である。

(3) 異なる気候変動・土地利用シナリオが森林生態系の機能・サービスに与える影響の可視化

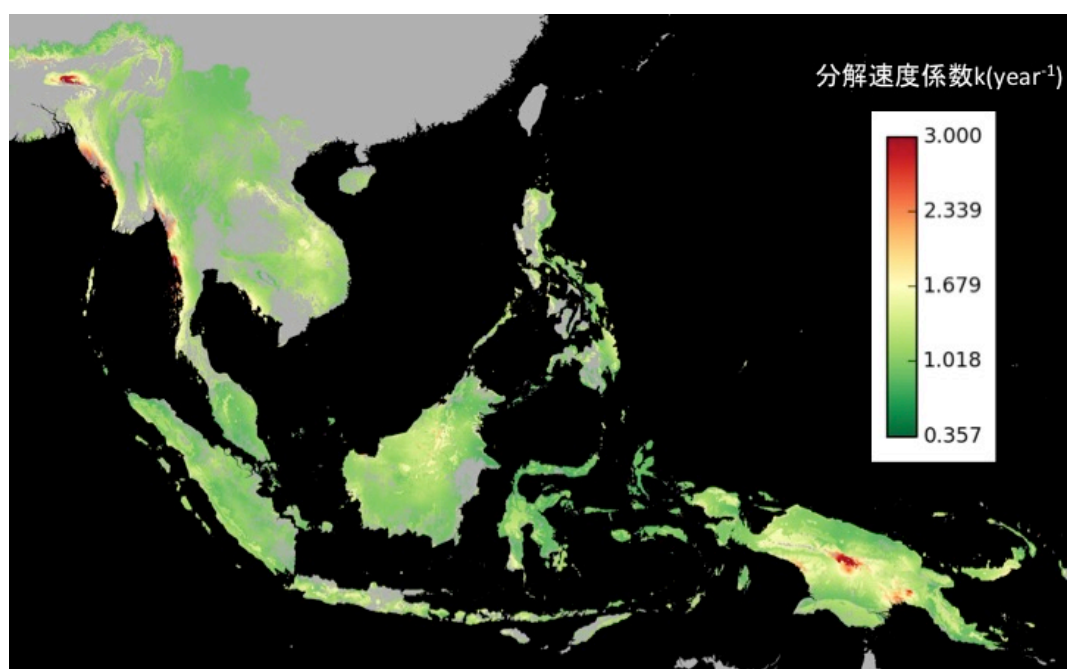
1) 国内の生態系機能・サービスに対する異なる気候変動シナリオの影響

先述のように最大光合成速度はLMAの小さい落葉樹が優占する森林で高くなるため、どの気候変動シナリオにおいても、東北・北海道を中心に最大光合成速度の低下が予測された(図(1)-11)。低下の程度・範囲は気温上昇幅の最も大きい、RCP8.5シナリオで最も大きかった。一方で、南日本においては、気候変動が最大光合成速度に与える影響は相対的に小さかった。この解析では、気候変動に追従して植生の変化が起こることを仮定しているが、実際には、世代時間が長く、移動に制限のある樹木の移動と気候の変化の間にはギャップが存在することに注意が必要である。

気温の上昇により、葉のリグニン含量の少ない南方系の樹種が増加するため、南日本を中心に全国的な分解速度係数の増加が予測された(図(1)-12)。気候変動シナリオ間の差異は比較的小さいが、北海道においては気温上昇幅の大きいシナリオほど、分解速度係数の増加傾向が強く見られた。

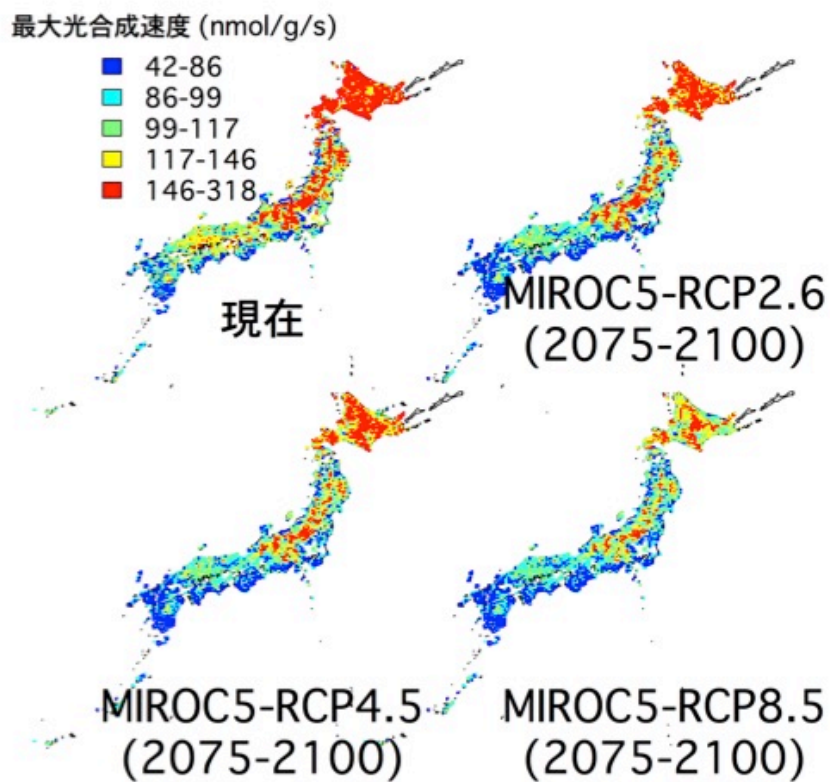


図(1)-9 東南アジア地域の最大光合成速度地図

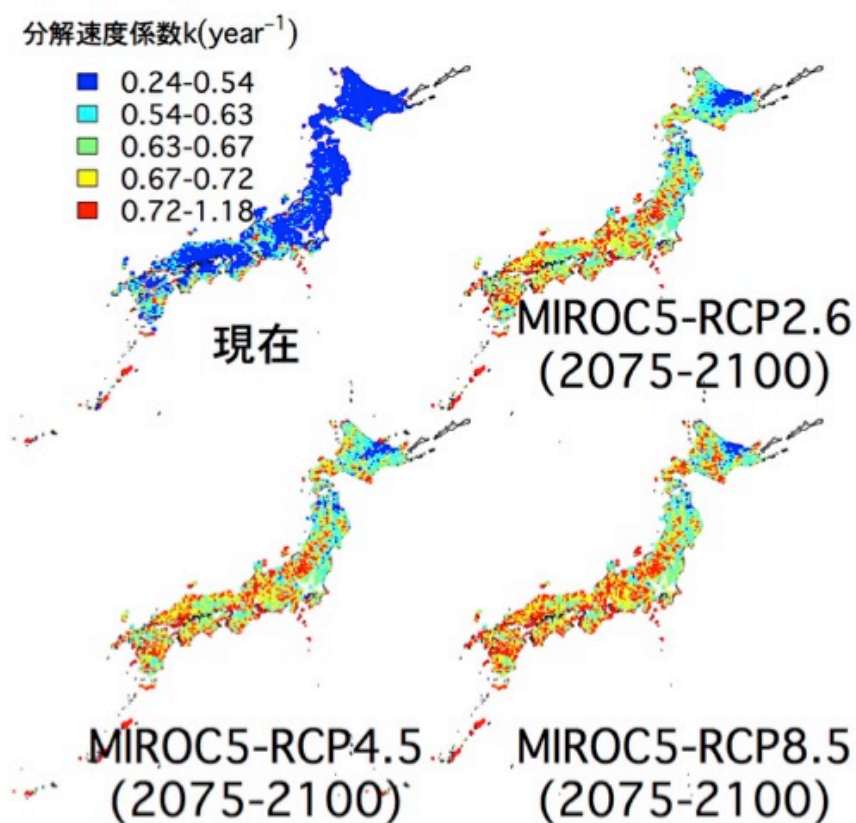


図(1)-10 東南アジア地域の分解速度係数地図

これらの結果は、国内の森林の生態系機能・サービスに対する気候変動の影響を示した数少ない研究例であり、地域ごと、シナリオ毎に異なる影響を踏まえた影響の緩和策・適応策の立案等に活用されることが期待される。



図(1)-11 異なる気候変動シナリオの最大光合成速度への影響

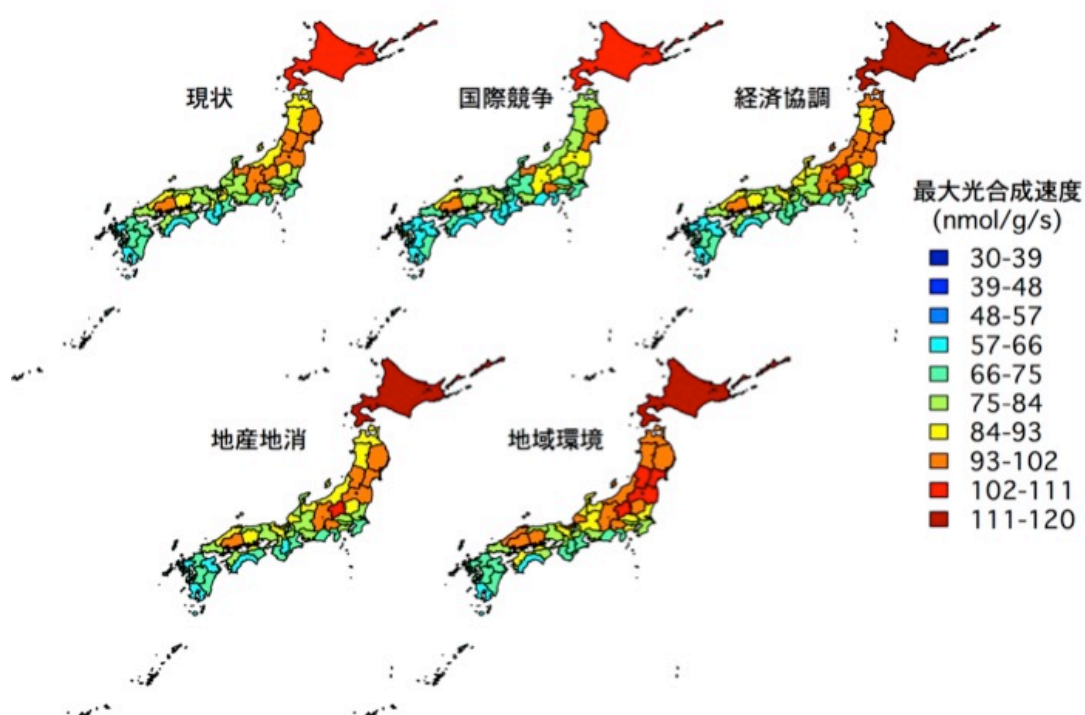


図(1)-12 異なる気候変動シナリオの落葉分解速度係数への影響

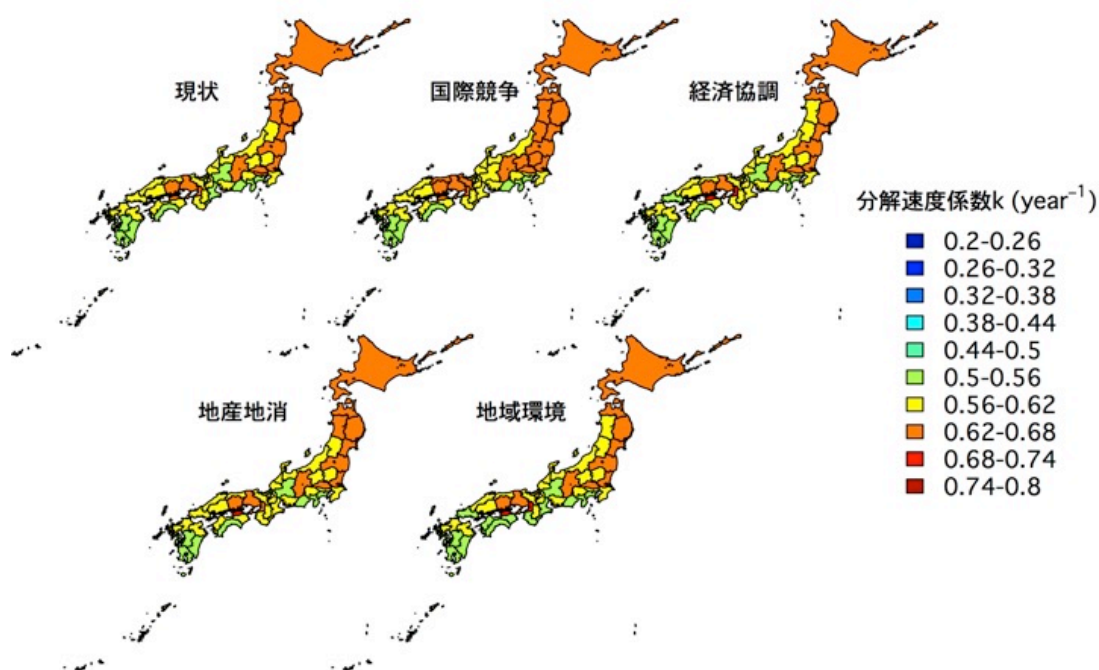
2) 国内の生態系機能・サービスに対する異なる土地利用シナリオの影響

土地利用シナリオも国内の生態系機能・サービスに異なる影響を与えることが予測された(図(1)-13)。最大光合成速度は、針葉樹の人工林が増加する国際競争シナリオでは多くの都道府県で減少の傾向を示した。経済協調・地産地消の両シナリオでは多くの都道府県では、最大光合成速度には変化が見られず、地域環境シナリオでは、落葉樹の自然林が増加する東日本・北日本を中心に多くの都道府県で最大光合成速度の増加が予測された。

落葉分解速度係数については、国際競争シナリオにおいて東北・関東を中心に増大傾向が見られた(図(1)-14)。経済協調・地産地消の両シナリオでは、落葉分解速度係数の変化は小さく、地域環境シナリオでは、いくつかの県で落葉分解速度係数の低下が予測された。



図(1)-13 異なる土地利用シナリオの最大光合成速度への影響



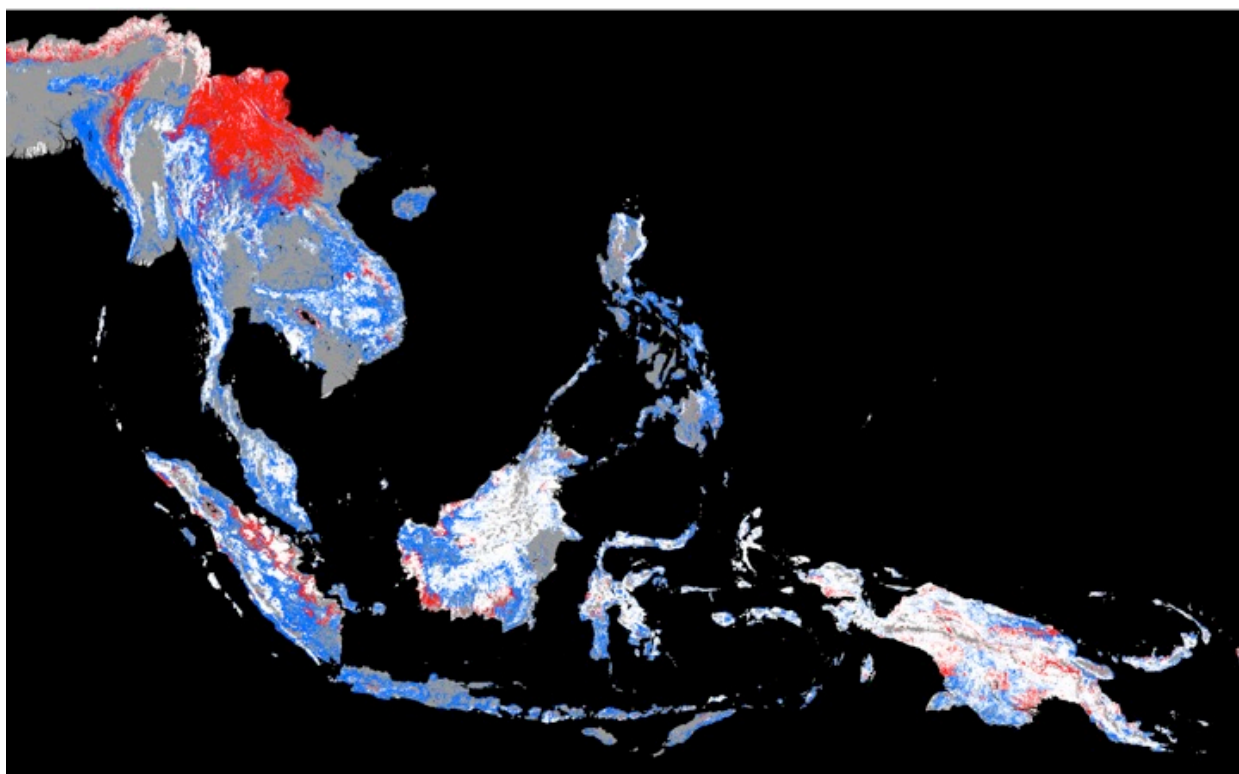
図(1)-14 異なる土地利用シナリオの落葉分解速度係数への影響

3) 海外の生態系機能・サービスに対する土地利用変化の影響

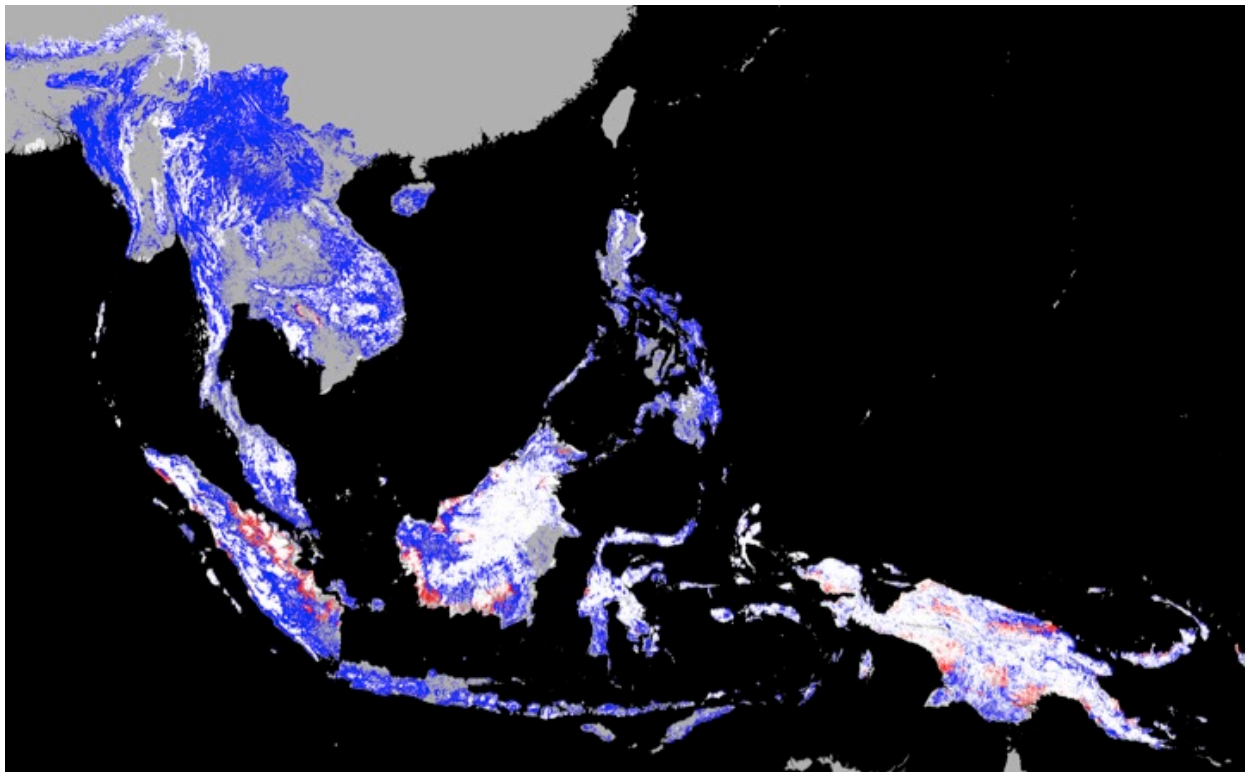
東南アジア地域において、二次林化は多くの森林タイプで最大光合成速度の上昇を引き起

こしていた(図(1)-15)。これは、多くの森林タイプにおいて、攪乱後の二次林では、LMAの小さい、光資源獲得能力に優れた種が優占するためであると考えられる。しかし、それぞれ高標高地域、泥炭湿地という特殊な環境に出現する熱帯山地林と泥炭湿地林では、二次林化によりLMAの群集加重平均値の増加が起こっており、その結果、最大光合成速度も二次林で低下していた。

落葉分解速度係数はほとんどの森林タイプにおいて、二次林化により上昇していた(図(1)-16)。これは多くの森林タイプにおいて、二次林化により葉の窒素含量の群集加重平均値の増加、葉のリグニン含量の低下のどちらかまたは両方がみられることによるものである。例外的に、泥炭湿地林においては、二次林の方が葉のリグニン含量の群集加重平均値が高く、その結果、落葉分解速度係数も二次林において低下していた。



図(1)-15 東南アジア地域において二次林化が最大光合成速度に与える影響
青は二次林化による最大光合成速度の増加、赤は減少、白は植生の変化なし(原生林)、灰色は都市や農地への転換を示す。



図(1)-16 東南アジア地域において二次林化が分解速度係数に与える影響
青は二次林化による分解速度係数の増加、赤は減少、白は植生の変化なし
(原生林)、灰色は都市や農地への転換を示す。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

1) 世界的に見て著しく遅れていたアジア地域における機能形質データベースの充実を達成し、国内においては主要樹種のほとんどを網羅し、東南アジア地域においても代表的な森林タイプ毎の特徴を把握するのに十分な規模の機能形質を収集した。この機能形質データベースは、本研究における活用に留まらず、今後、この地域における様々な生態系機能・サービス研究に不可欠な基盤となるものである。

2) 上記の機能形質データベースと森林資源調査や衛星観測の結果を組み合わせることにより、国内・東南アジア両地域における森林の形質組成およびいくつかの重要な生態系機能・サービスの地図化を行った。このような可視化により、各地域ごとに異なる生態系機能・サービスの現況を考慮した森林管理が可能になるだろう。

3) いくつかの重要な生態系機能・サービスと植生タイプや物理環境の関係を統計モデル化し、気候変動・土地利用シナリオを適用することで、これらのシナリオが生態系機能・サービスに与える影響を与えることを実証した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

環境省生物多様性及び生態系サービスの総合評価に関する検討会が2016年3月に公表した、

「生物多様性及び生態系サービスの総合評価報告書」において、生態系サービスの定量評価方法について、この研究で開発された定量的推定アルゴリズムが使われた。また、Intergovernmental Platform for Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) のアジア太平洋地域アセスメントの森林生態系の生態系サービス評価において、この研究の成果を活かしたアセスメント手法が提案され、採用されている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

この研究で開発された生態系サービスの定量的推定・評価方法は、現在行われているIPBESのアジア太平洋地域アセスメントの森林生態系の生態系サービス評価において、東南アジア、東アジア地域の生態系サービス評価の手法やデータとして使用される予定である。また、生態系サービスの定量化は、自然資本推定の基礎となる情報であり、今後地方自治体などの地域資源の把握や利用などに利用できる。さらに、シナリオ分析の手法は、さらに発展させ、様々な状況にカスタマイズできるツールとして発展させる必要があるが、地域計画の策定などに利用できる可能性が大きい。

6. 国際共同研究等の状況

- 1) Evaluating the Consequences of Tree Diversity Loss on Ecosystems Based on Plant Functional Traits in Tropical Forests in Malaysia (マレーシア熱帯林における樹木多様性損失が生態系に及ぼす影響の植物機能形質に基づく評価)、Engkamat Anak Lading・Forest Department・Malaysia、土地利用変化に伴う樹木多様性の変化が生態系機能に及ぼす影響についての研究を共同して行っている、研究者の発案に基づく共同研究。
- 2) Evaluating the Consequences of Tree Diversity Loss on Ecosystem Functioning Based on Plant Functional Traits in Tropical Forests in Thailand (タイ熱帯林における樹木多様性損失が生態系機能に及ぼす影響の植物機能形質に基づく評価)、Dokrak Marod・Kasetsart University・Thailand、Lamthai Asanok・Maejo University・Thailand、土地利用変化に伴う樹木多様性の変化が生態系機能に及ぼす影響についての研究を共同して行っている、研究者の発案に基づく共同研究。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Katabuchi, M., Kurokawa, H., Davies, S.J., Tan, S. & Nakashizuka, T. (2012). Soil resource availability shapes community trait structure in a species-rich dipterocarp forest. *Journal of Ecology*, 100, 643-651.
- 2) Aiba, M., Takafumi, H. & Hiura, T. (2012). Interspecific differences in determinants of plant species distribution and the relationships with functional traits. *Journal of Ecology*, 100, 950-957.
- 3) 黒川紘子, 饗庭正寛, 小野田雄介 (2012). 森林の生態系機能を予測する - 植物機能形質とその多様性から -. 植物科学最前線, 3, 11-21.
- 4) 小野田雄介 (2012). 植物形質のメタ解析の実用例と展望 (特集 植物界に見られる共通性・統一性). 生物科学, 63, 83-93.

- 5) Aiba, M., Katabuchi, M., Takafumi, H., Matsuzaki, S.S., Sasaki, T. & Hiura, T. (2013). Robustness of trait distribution metrics for community assembly studies under the uncertainties of assembly processes. *Ecology*, 94, 2873-2885.
- 6) Asanok, L., Marod, D., Duengkae, P., Pranmongkol, U., Kurokawa, H., Aiba, M. *et al.* (2013). Relationships between functional traits and the ability of forest tree species to reestablish in secondary forest and enrichment plantations in the uplands of northern Thailand. *Forest Ecology and Management*, 296, 9-23.
- 7) Ichie, T., Igarashi, S., Yoshida, S., Kenzo, T., Masaki, T. & Tayasu, I. (2013). Are stored carbohydrates necessary for seed production in temperate deciduous trees? *Journal of Ecology*, 101, 525-531.
- 8) Shibata, R., Shibata, M., Tanaka, H., Iida, S., Masaki, T., Hatta, F. *et al.* (2014). Interspecific variation in the size-dependent resprouting ability of temperate woody species and its adaptive significance. *Journal of Ecology*, 102, 209-220.
- 9) Kenzo, T., Inoue, Y., Yoshimura, M., Yamashita, M., Tanaka-Oda, A. & Ichie, T. (2015). Height-related changes in leaf photosynthetic traits in diverse Bornean tropical rain forest trees. *Oecologia*, 177, 191-202.
- 10) Inoue, Y., Kenzo, T., Tanaka-Oda, A., Yoneyama, A. & Ichie, T. (2015). Leaf water use in heterobaric and homobaric leafed canopy tree species in a Malaysian tropical rain forest. *Photosynthetica*, 53, 177-186.
- 11) Ishihara, M.I., Utsugi, H., Tanouchi, H., Aiba, M., Kurokawa, H., Onoda, Y. *et al.* (2015). Efficacy of generic allometric equations for estimating biomass: a test in Japanese natural forests. *Ecological Applications*, 25, 1433-1446.
- 12) Ichie, T., Inoue, Y., Takahashi, N., Kamiya, K. & Kenzo, T. (2016). Ecological distribution of leaf stomata and trichomes among tree species in a Malaysian lowland tropical rain forest. *Journal of Plant Research*, 1-11.
- 13) Shibata, R., Kurokawa, H., Shibata, M., Tanaka, H., Iida, S., Masaki, T. *et al.* (in press). Relationships between resprouting ability, species traits and resource allocation patterns in woody species in a temperate forest. *Functional Ecology*
- 14) Tanaka-Oda, A., Kenzo, T., Inoue, Y., Yano, M., Koab, K. & Ichie, T. (in press). Height-related changes in leaf photosynthetic traits in diverse Bornean tropical rain forest trees. *Trees*.
- 15) Aiba, M., Kurokawa, H., Onoda, Y., Oguro, M., Nakashizuka, T. & Masaki, T. (in press). Context-dependent changes in the functional composition of tree communities along successional gradients after land-use change. *Journal of Ecology*.

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 中静透 : 日本生態学会第59回全国大会(2012) EAFES Special Symposium "The Role of Vegetation Science in a Changing Asia: Goal of IAVS2012" (Organaizer)
- 2) 中静透 : 日本生態学会第59回全国大会(2012)企画集会「モザイク景観と生物多様性の関係 : 成因、変異性、保全」 (コメンテーター、総合討論)

- 3) 黒川紘子、饗庭正寛、片渕正紀、柴田嶺、石田敏、LAMTHAI ASANOK, 佐々木雄大、中静透：日本生態学会第59回全国大会(2012)「異なる森林生態系における種多様性損失と機能的多様性の変化」
- 4) 宇野正人, 小黒芳生, 佐々木雄大, 滝久智, 中静透：日本生態学会第60回大会. 静岡(2013)「土地利用と作物生産 -統計資料によるポリネーションサービスの評価-」
- 5) H. KUROKAWA, M. AIBA, T. NAKASHIZUKA: International Workshop on Ecological Knowledge for Adaptation on Climate Change, Bangkok, Thailand, 2013“Evaluating Forest Ecosystem Functions/Services based on Plant Functional Traits”
- 6) M. AIBA : 51st Annual Meeting of the Association for Tropical Biology and Conservation, Cairns, Australia, 2014 " A comparative analysis of trait associations among forest types in Southeast Asia "
- 7) 饗庭正寛：日本生態学会第62回全国大会（2015）「アジア地域における機能形質データベース」
- 8) T. KENZO, Y. INOUE, M. YOSHIMURA, M. YAMASHITA, A. TANAKA-ODA, T. ICHIE: Frontier in Tropical Forest Research: Progress in Joint Projects between the Forest Department Sarawak and the Japan Research Consortium for Tropical Forests in Sarawak, (2015) “Vertical changes in leaf morphological and physiological traits in diverse tropical rainforest tree species in Sarawak, Malaysia. ”
- 9) T. KENZO, T. ICHIE, J.J. KENDAWANG: Frontier in Tropical Forest Research: Progress in Joint Projects between the Forest Department Sarawak and the Japan Research Consortium for Tropical Forests in Sarawak. , (2015) “Allometric relationships for accurate estimation of forest biomass in tropical logged-over and secondary forest in Sarawak Malaysia”
- 10) Y. INOUE, T. ICHIE, T. KENZO, A. YONEYAMA, T. NAKASHIZUKA: Frontier in Tropical Forest Research: Progress in Joint Projects between the Forest Department Sarawak and the Japan Research Consortium for Tropical Forests in Sarawak, (2015) “Effect of through-fall exclusion in leaf water use in Malaysian rain forest canopy tree species of *Dryobalanops armatica* Gaertn. F.”
- 11) TANAKA-ODA, T. KENZO, Y. INOUE, M. YANO, K. KOBAYASHI, T. ICHIE: Frontier in Tropical Forest Research: Progress in Joint Projects between the Forest Department Sarawak and the Japan Research Consortium for Tropical Forests in Sarawak, (2015) “Leaf $\delta^{15}\text{N}$ values in diverse tree species in a Bornean lowland mixed dipterocarp forest”
- 12) T. KENZO, Y. INOUE, M. YOSHIMURA, M. YAMASHITA, A. TANAKA-ODA, T. ICHIE: 52nd Annual Meeting of the Association for Tropical Biology and Conservation, (2015) “Changes in leaf morphological and physiological traits with tree height in diverse tropical rain forest trees in Malaysia”
- 13) T. ICHIE, R. YOSHIHARA, S. IGARASHI, T. KENZO, K. NIIMURA, A. KASSIM, C. FLETCHER, I. TAYASU: 52nd Annual Meeting of the Association for Tropical Biology and Conservation, (2015) “Analysis of the past 50 years' tree growth by using ^{14}C dating in an aseasonal tropical rain forest”
- 14) 五十嵐秀一, 吉田昌平, 田中憲蔵, 正木隆, 永益英敏, 兵藤不二夫, 陀安一郎, 市栄智

明： 第5回 同位体環境学シンポジウム(2015)「温帯と熱帯における樹木の結実周期と樹体内貯蔵炭水化物の関係」

- 15) T. ICHIE: International Symposium, Frontier in Tropical Forest Research: Progress in Joint Projects between the Forest Department Sarawak and the Japan Research Consortium for Tropical Forests in Sarawak. Kuching, (2015) "Perspectives of tree ecophysiological research in and around Lambir National Park"
- 16) 市栄智明：第25回日本熱帯生態学会年次大会．公開シンポジウム 熱帯の人と自然の変遷と行方ー熱帯研究の歩みと重ねてー．京都．(2015) 「サラワク熱帯雨林における長期生態研究の歩みとこれから」
- 17) P. KACHINA, H. KUROKAWA, M. AIBA, L. ASANOK, D. MAROD, and T. NAKASHIZUKA: The 63rd Annual Meeting of The Ecological Society of Japan, (2016) "Changes in functional composition along forest degradation in different types of tropical forests in Thailand"
- 18) T. ICHIE：第63回日本生態学会．仙台．(2016) "Mechanisms of reproduction of dipterocarp trees in tropical rain forest in Southeast Asia."

(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) 中静 透． 2011 森林の管理と生物多様性．水資源機構環境学習会，(2011.6.9 さいたま市)
- 2) 黒川紘子 2012 「森林の生態系機能を予測する一種多様性と機能形質の観測から」環境省 環境研究総合推進費 新規戦略型課題S-9 「アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合的研究」公開講演会 生物多様性観測・評価・予測研究の最前線(2012.1.8 東京都)
- 3) 中静 透 2013 企業活動と生物多様性 三菱UFJリサーチ&コンサルティング(株) 民間企業による生物多様性の経済価値評価～企業価値の向上に向けて～ (三菱UFJリサーチ&コンサルティング(株)本社セミナー室) (2013.2.18 東京都)
- 4) 中静 透 2013 生物多様性の国際動向 三井住友海上火災(株) 企業が語るいきものがたりPart6 生物多様性保全に向けて、企業が果たすべき役割・行動ーCOP11の成果、課題等を踏まえて、また、ビジネスチャンスとしてー (2013.2.19 東京都)
- 5) 中静 透 2013 講義「私たちの暮らしと生物多様性」 青森県生物多様性地域戦略(仮称)の策定に係る「県民ワークショップ」 (2013.2.28 八戸市)
- 6) 中静 透 2013 私たちの暮らしと生物多様性 青森県生物多様性地域戦略(仮称)の策定に係る「県民ワークショップ」 (2013.3.3 青森市)
- 7) 中静 透 2013 生態系サービスと生物多様性地域戦略 シンポジウム 生物多様性を活かした地域づくりの今 身近な自然から地域の未来に向けて(2013.3.10 横浜市)
- 8) 中静 透 2013 人々の暮らしと生物多様性・生態系サービス 国連大学高等研究所いしかわ・かなざわオペレーティング・ユニット「里山・里海」研究プロジェクト公開シンポジウム「里山・里海と私たちの暮らし：新たなコモンズによる地域資源の活用と地

域活性化」(2013.3.21 金沢市)

- 9) 中静 透 2013 第1部：自然科学者からの提案：生態系サービスの持続的利用を可能にする条件について 公開シンポジウム「自然共生社会を拓くプロジェクトデザイン：文理協働による統域科学のキックオフ」(東京大学農学部キャンパス中島記念ホール)(2013.4.23 東京都)
- 10) 中静 透 2013 環境講演 「つながる 生命」～日常から生物多様性を考える～ 第7回金ケ崎町環境推進大会「子どもと大人のシンポジウム」(2013.10.2 金ケ崎町6)
- 11) 中静 透 2014 森林保全と生物多様性のあり方 こまつ水郷2020ネット講演会(2014.1.25 小松市)
- 12) 中静 透 2014 生き物を生かした豊かな地域を作るためのアイデア 第2回いのちにぎわう里づくりフリーディスカッション(2014.5.18 登米市)
- 13) 中静 透 2014 生物多様性の評価と指標 一般社団法人いきもの共生事業推進協議会総会(2014.5.19 東京都)
- 14) 中静 透 2014 生き物を生かした豊かな地域を作るための取り組み 第3回いのちにぎわう里づくりフリーディスカッション(2014.7.13 登米市)
- 15) 中静 透 2014 生き物を活かした豊かな地域を作るためのアイデア 第6回 人と野生動物の共生を考えるつどい(2014.10.18 登米市)
- 16) 中静 透 2014 私たちのくらしから見た生物多様性 宮城県生物多様性タウンミーティング(仙台会場) 自然の恵みと私たちのくらし～里山を通じて生物多様性を学ぶ～(2014.10.30 仙台市)
- 17) 中静 透 2014 地球規模生物多様性概況と愛知ターゲット 「COP12・地球規模生物多様性概況・愛知ターゲットとSDGs/ポスト2015開発アジェンダ～SDGsの在り方・生物多様性に関する各セクターの取組みを考える～」グリーンエコノミーフォーラム公開研究会(2014.11.28 東京都)
- 18) 中静 透 2015 「私たちの生活は生きものたちに支えられている ー生物多様性とはどのような問題なのか？ー」平成27年度宮城県生物多様性シンポジウム.(2015.2.3 仙台市)
- 19) 中静 透 2015 「森林・林業から考える生物多様性」平成27年度みやぎ森林保全推進活動研修会.(2015.2.6 宮城県大衡村)
- 20) 中静 透 2015 「私たちの生活をささえる生物多様性」あいち環境塾(2015.8.26 名古屋市)
- 21) 中静 透 2015 「森林生態系の変化と生物多様性」川崎市民アカデミー(2015.10.22 川崎市)
- 22) 中静 透 2015 「生物多様性の保全と持続的利用のためにできること」NACS-J市民カレッジシリーズ29、生物多様性の活かし方、自然保護協会(2015.12.9 仙台市)
- 23) 黒川紘子 2015 「森林の生態系機能を可視化する：樹木の属性を用いたアプローチ」環境省 環境研究総合推進費 新規戦略型課題S-9 「アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合的研究」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～(2016.3.25 仙台市)

（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。

（２）森林の動態データに基づく樹木多様性の損失が森林生態系の機能・サービスに与える影響の解明

北海道大学	北方生物圏フィールド科学センター	日浦 勉
北海道大学	北方生物圏フィールド科学センター	柴田英昭
北海道大学	北方生物圏フィールド科学センター	中路達郎
北海道大学	大学院環境科学院	甲山隆司

＜研究協力者＞

北海道大学	北方生物圏フィールド科学センター	中村誠宏
-------	------------------	------

平成23～27年度累計予算額：52,525千円（うち平成27年度：9,596千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

我々は東アジア地域の森林において、900プロットのメタデータと200プロットの生データのデータベースを作成した。また2000本、130種の樹木のアロメトリー、および18サイト420樹種の葉の分光特性データベースも作成した。これらのデータベースを用いて、新規加入率、死亡率、成長率が気候条件にどのように応答しているかや機能形質と関係しているかを解析し、温暖化など地球環境変化への森林生態系の応答を詳細に理解するための基礎情報を得た。また生産性や、分解、被食といった生態系機能に関わる植物の葉の機能形質が分光特性とどのような関係があるかを明らかにし、東アジア広域で衛星リモートセンシングによる観測を今後支える科学的基盤を形成した。さらに、全国スケール、北海道スケール、流域スケールといった様々な空間スケールで炭素蓄積や生物起源揮発性物質の放出量などの生態系サービスを地図化した。また自然公園景観の文化的サービスを需要供給の両面から評価する手法を開発した。

〔キーワード〕

森林動態、現存量、分光情報、景観、生態系サービス

1. はじめに

東アジア地域は南北に森林地帯が連続して存在し極めて高い生物多様性を擁している一方、人口過密地域でもある。このことから広域スケールでの生物多様性と生態系サービスとの関係や、人類営力が生態系に及ぼす影響を明らかにするためのモデルケースとして適した地域と言える。特に日本は森林に関する様々な情報が密に蓄積されている希有な地域であり、このようなデータを有効に利用解析すれば、環境勾配や変化に対する生物多様性の変化や森林生態系の応答を詳細に明らかにすることができるだろう。このことによってデータ空白域であるアジアの他地域でも引き起こされるさまざまな環境変化が、この地域全体の生物多様性や生態系サービスに与える影響の評価精度を高めることが可能となるだろう。本研究は流域、地方、全国、地域といった様々なスケールでの森林の生態系サービス評価に資するものである。

2. 研究開発目的

本サブグループでは東アジアの森林生態系を対象に、主に森林の動態データに基づいて樹木多様性の損失が森林生態系の機能・サービスに与える影響を解明することを目的とする。そのために各地に散在する森林プロットデータ、樹木個体のアロメトリーデータをデータベース化するとともに、広域での生態系機能観測技術を確立するために樹木の機能形質と分光情報の関係をデータベース化する。これらのデータを用いて、環境変化に対する森林における種多様性の変化や生態系サービスの変化を明らかにすることを目的とする。

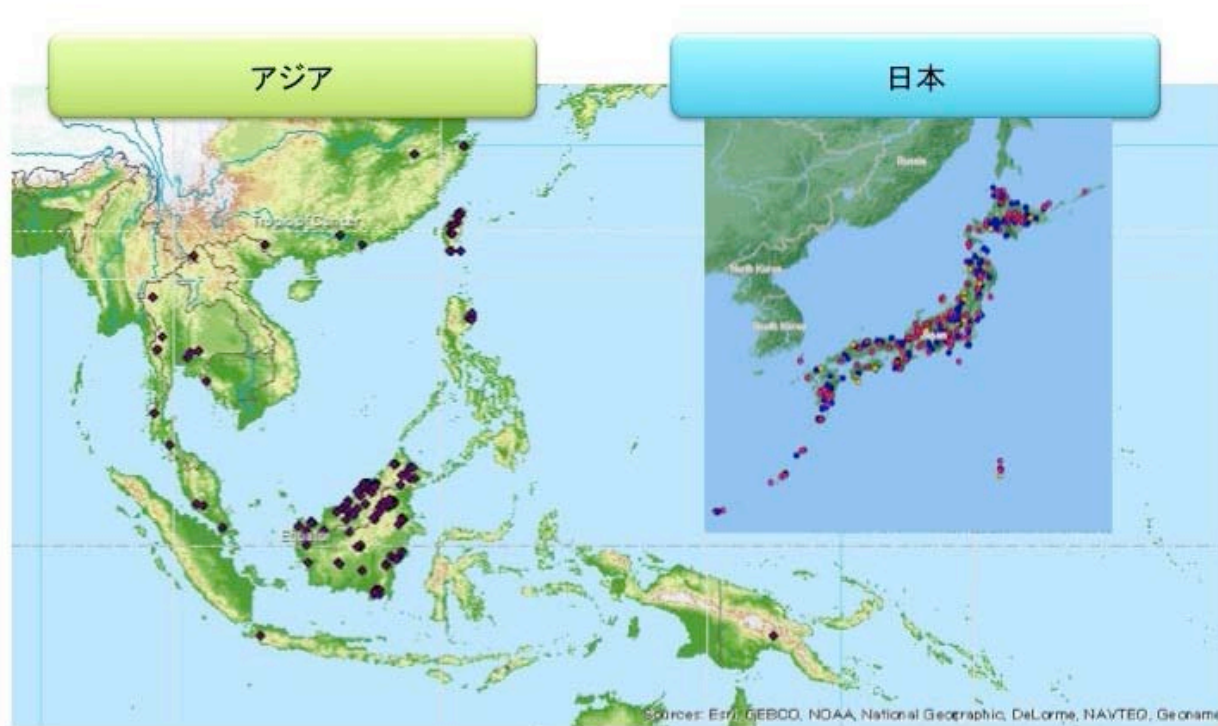
森林生態系の機能はいくつかの要素に分解して捉えることが出来る。例えば生産性の場合、[(葉の) バイオマス] x [(葉の) 単位バイオマス当たりの機能 (光合成) 量] x [時間]と表すことが出来る。単位バイオマス当たりの機能量は植物の機能形質、バイオマスは樹木個体のサイズとその頻度分布、時間は葉のフェノロジーの関数としてそれぞれ解析することが出来る。本サブグループではこのうち主にバイオマスとその変動に関わる分野を扱う。それに相当するのが森林プロットデータと樹木個体のアロメトリーデータである。また単位バイオマス当たりの機能量や時間との繋がりを広域で評価するために葉の分光情報が必要となる。さらに生態系機能から生態系サービスへと変換するための関数として人間の価値基準を導入する必要があるが、本サブグループの場合は例としてInVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)モデルとSNSを用いた景観評価をおこなうことで、生態系サービスをいくつかの側面から評価するものである。

3. 研究開発方法

(1) 日本国内およびアジア地域の樹木の動態データベースの構築

JaLTER(Japan Long-Term Ecological Research network), ILTER(International Long-Term Ecological Research network)やCTFS (Center for Tropical Forest Science) など既存のネットワークの情報、文献データベース (Web of Science, CiNii等) を用いた検索、日本-台湾ワークショップなどを通じて、900地点を超える樹木センサスに関するメタデータ(どこで、どのようなデータが、誰によって取られたかなどの情報)を収集した(図(2)-1)。メタデータを元に、種組成や動態データを収集し、データの電子化と規格の統一を進め、200地点の種組成・動態データベースを作成した。

環境変化に対する種多様性の変化を予測するため、このデータをもとに日本国内の樹木の種組成の地理パターンとそれに影響を与える要因を解析した。さらに森林の攪乱や環境条件が種多様性に与える影響を明らかにするため、森林の攪乱履歴、環境条件のデータを収集し、種多様性との関係を解析した。



図(2)-1 動態データベース メタデータを収集した森林プロットの位置を示す

(2) 動態パラメータと機能形質・環境条件の関係

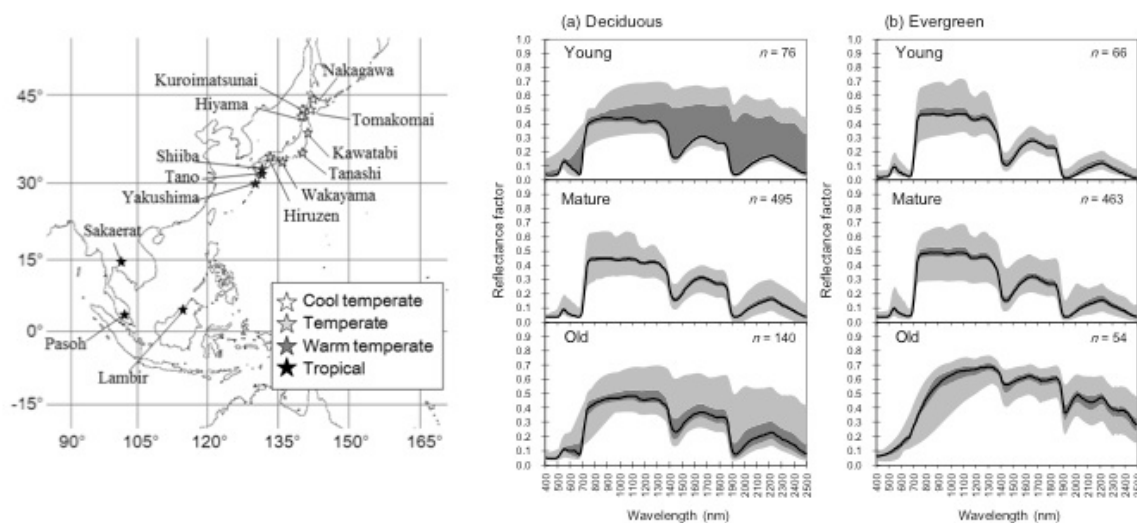
動態データベースを用いて、動態パラメータ（新規加入率、死亡率）の地理変異を解析した。また動態パラメータと機能形質との関係を解析した。さらに動態パラメータを予測するモデルの開発を行った。環境省モニタリングサイト 1000 (www.biodic.go.jp/moni1000/moni1000/) の 39 のプロットデータを用いて、全国的に分布する主要樹種 22 種の肥大成長速度を階層ベイズモデルによって解析し、気温、降水量、個体サイズ、周辺 5 m の個体密度の効果を樹種毎に明らかにした。さらに林分サイズ構造を組み込んだ幹の肥大成長速度の理論モデルを開発した。

(3) 東アジアにおける分光特性-形質データベースの構築と予測モデル

樹木の多様性や生態系サービスに関わる機能形質を分光リモートセンシングで評価する際の基礎研究として、亜寒帯から熱帯までの 18 林分で 421 種・1581 サンプルの樹木葉の連続分光反射率、分光透過率および 7 種類の葉形質（葉重/葉面積比 (LMA)、窒素、炭素、タンニン、フェノール、リグニン、セルロース）の測定を行いデータベースを完成させた。分光観測は可視～短波長赤外波長（400～2500nm）でデータを取得した。さらに、アジア広域の予測を行う際の有効性を検証す

るため、14 地点・1294 サンプルを用いて部分最小二乗法（PLS）を用いた形質予測モデルを開発し、着葉タイプの影響や季節性による感度の変化といった精度評価を行った（図(2)-2）。また、無人航空機(UAV)や衛星観測における将来的な連続分光計測手法の諸元を検討するために分光分解能を変化させた感度シミュレーションを実施した。

さらに、野外における分光モニタリング法の妥当性を検討するために、北海道苫小牧における落葉広葉樹林でハイパースペクトルカメラによる分光反射画像の連続撮影を行い、葉形質のフェノロジーを予測した。



図(2)-2 分光特性－形質データベースの構築と予測モデル
解析に利用した東アジア14サイトおよび分光反射率プロファイル

（４）生態系機能・サービスの広域推定モデルへのデータ提供

１）森林の現存量や一次生産、および揮発性有機物（VOC）放出量の推定

炭素蓄積・吸収量の推定には、樹木センサスデータに加え相対成長式（アロメトリー式）を用いる手法が一般的である。しかし用いる相対成長式によって現存量推定値に大きな誤差が生じる。そこで推定精度の向上のため、現存量データベースの構築と相対成長式（アロメトリー式）の開発を行った。文献データベース（Web of Science, CiNii 等）を検索し、既存研究から約 2000 個体、130 種以上の樹木の個体重とサイズのデータを集め、現存量データベースを完成させた。これを用いて、日本各地の天然生林に適用可能な汎用相対成長式を開発しその推定精度を検討した。この相対成長式と日本国内の動態データベースや森林資源モニタリングデータを用いて、日本各地の森林の現存量や純一次生産量を推定した。さらに４つの森林管理シナリオのもと（国際競争、経済協調、地産地消、地域環境）で Chatani et al. (2015)¹⁾の樹種毎の VOC 放出データを元に揮発性物質 VOC 放出量がどのように変化するかを求めた。

２）モデル流域における生態系サービスの連環

石狩川流域４５市町村の生態系サービスの地図化を行い、生態系サービス間の関係を解析した。

農業生産サービスに関しては政府農業統計データを収集した。水質調整サービスに関しては河川水質データを収集し、小流域属性との回帰モデルから各市町村の水質を推定した。炭素蓄積サービスに関しては生態系サービスの評価ツールである InVEST を用いた。汎用相対成長式、北海道の森林調査データおよび既存研究から、植生・土壌タイプごとの炭素蓄積量を求めた。

3) 写真共有サービス Flickr を用いた北海道の景観サービス地図化手法の開発

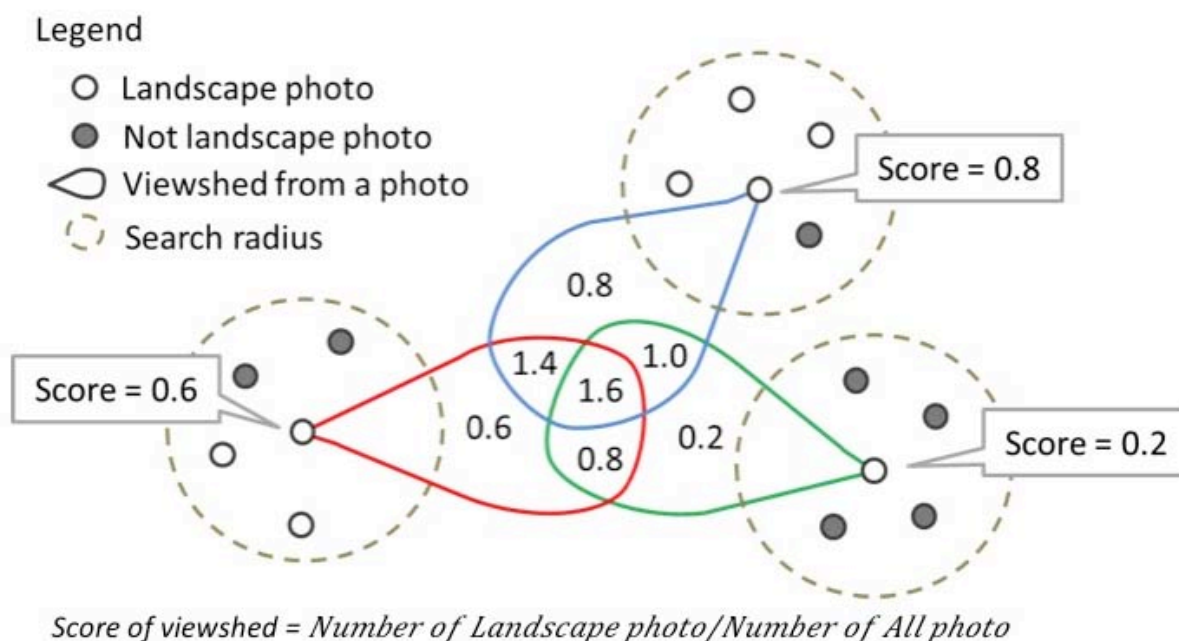
写真共有サービス Flickr の位置情報付き写真を用いて、景観サービスの可視化手法を開発した。Flickr の位置情報付き写真の枚数は、観光客数と関係があることが報告されており、観光客からみた景観サービスの地図化手法を開発した。

地図化は、景観に対する需要と供給ポテンシャルの2つの側面から行った。まず、Flickr ユーザーによって、景観写真が撮影される可能性が高い場所を景観需要の高い場所と定義して地図化した。2010年以降、スマートフォンが国内で普及が進んでおり、写真する写真の位置精度を考慮し、2010～2014年の5年間に北海道地域でアップロードされた画像で位置情報を持つ写真のメタデータ（座標、写真ID、ユーザーID、撮影日時、閲覧数、位置精度等）を使用した。Flickrでは位置精度の評価情報が付与されており、今回、位置精度12以上（Street level）のみを使用した。また、海域等対象地以外の地点の写真も含まれるため、対象地の沿岸から500m以内に含まれる点のみを使用した。沿岸域から陸域の写真を撮影する場合があるためである。

Flickrにアップロードされた写真には、撮影地点の経緯度が記録されているものは多いが、被写地点がどこであったかは記録されていない。また、撮影方向もほとんど記録されていないため、実際にどこが撮影されたかを特定することは困難である。そこで、それぞれの写真について、撮影地点から可視領域を計算し被写地点を絞り込んだ。可視領域は、ある撮影地点から見えるすべての領域であり被写地点を含んでおり、可視領域の重なる件数をスコアとし景観需要を指標化した（図(2)-3）。ただし、訪問者数による写真の枚数の増加を補正するために、撮影地点周辺の総写真数に対する景観写真数の比を用いて、景観写真が撮影されやすい場所を強調した。

可視領域は、国土地理院刊行の50mメッシュ標高データを用いて、170cmの高さから最大半径20km以内で見える領域とした。景観需要の評価は50m×50mの空間解像度で行い、結果は0～1の値に正規化し5段階で地図化した。正規化の手法は、平均値と標準偏差をもとにしたFuzzy membership関数（ArcGIS ESRI Inc.）を用いた。

供給ポテンシャルは、景観要素に対する人々の選好性等から地図化されることが多い。例えば、対象地を代表する複数の景観写真を用いて、自然度や保護状態、水域の存在、地形等の環境要素と人々の選好性の関係を調べ、それをもとに地図化する等がある。しかし、この手法はアンケートや聞き取りを行う必要があること、また対象地が広域になればなるほど、対象地を代表する景観パターンを整理すること自体が難しくなる。今回、この部分を簡便化しつつ、広域で精緻な評価を可能とするために、景観需要地の環境要因を分析し、類似した環境を持つ箇所を求め供給ポテンシャルとした。供給ポテンシャルの評価には、生物の分布推定等に用いられているMaximum entropy modeling approach（ソフトウェア：Maxent）を用いた。景観に対する環境要因としては一般的に関係するのは、開放性、不均一性、水の存在であると考えられており、今回、これに自然性を加えてデータセットを作成した（表(2)-1）。汎用性を考慮し、政府等により公開され、インターネット等から誰でも入手が簡単な空間情報を環境要因として用いた（表(2)-1）。



図(2)-3 景観需要の評価コンセプト

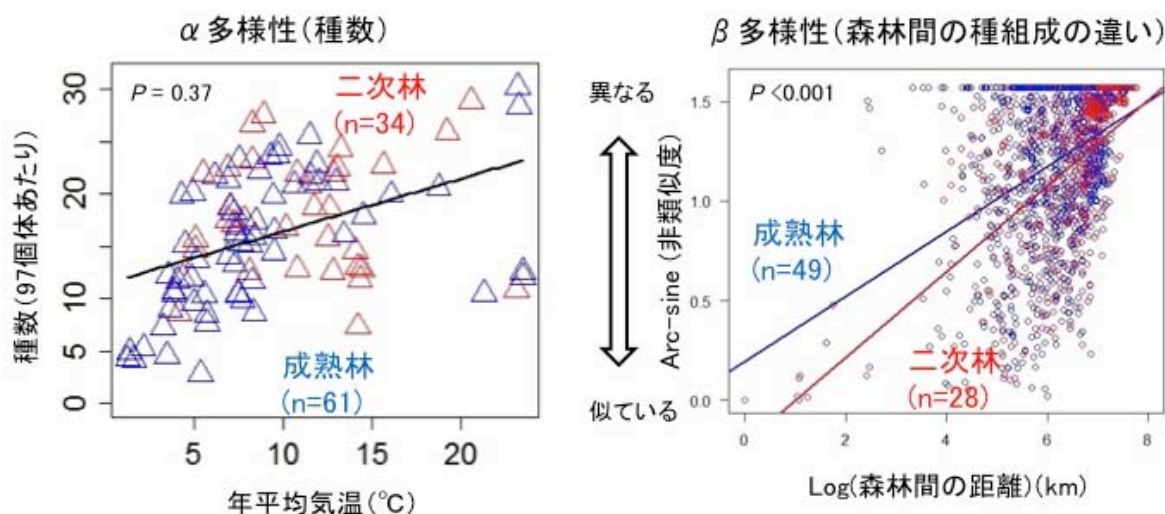
表(2)-1 景観需要の評価用データセット

Category	Data	Data Source	Description
Naturalness	植生自然度	環境省(植生図)1998	植生タイプに基づいた自然度のランク
	地形のタイプ	国土地理院	50mメッシュ標高データから計算
	山地からの距離	国土数値情報	地域資源の火山景観、山地(非火山性)景観を使用。
Water influence	河川からの距離	国土数値情報	1級、2級河川区間からの距離
	湖沼景観からの距離	国土数値情報	地域資源の湖沼景観を使用。
	海岸景観からの距離	国土数値情報	地域資源の海岸景観を使用。
Variety	植生群落の多様度	環境省(植生図)1998	3km四方のユニークな植生群落数
	地形の多様度	国土地理院	3km四方のユニークな地形タイプ数
Openness	地上開度	コンサベーションGIS	10m標高データから計算した地上開度(周囲250m)。

4. 結果及び考察

(1) 日本国内およびアジア地域の樹木の動態データベースの構築

日本各地の95地点の樹木データを解析した結果、二次林のほうが成熟林よりも面積あたりの樹木種数は多いが、個体数あたりの種数では差が見られなかった（図(2)-4）。一方、成熟林の方が二次林に比べ森林間の種組成の違い（ β 多様性）が大きく、攪乱によって種組成が均質化することが示唆された。



図(2)-4 攪乱と種多様性の関係
日本各地の成熟林と二次林で α 多様性と β 多様性を比較

(2) 動態パラメータと機能形質・環境条件の関係

日本各地39地点の森林のうち、いくつかの森林では、機能形質と動態パラメータの相関が見られた（図(2)-5）。材密度やLMAが大きいと幹成長率が低く、死亡率も低かった。

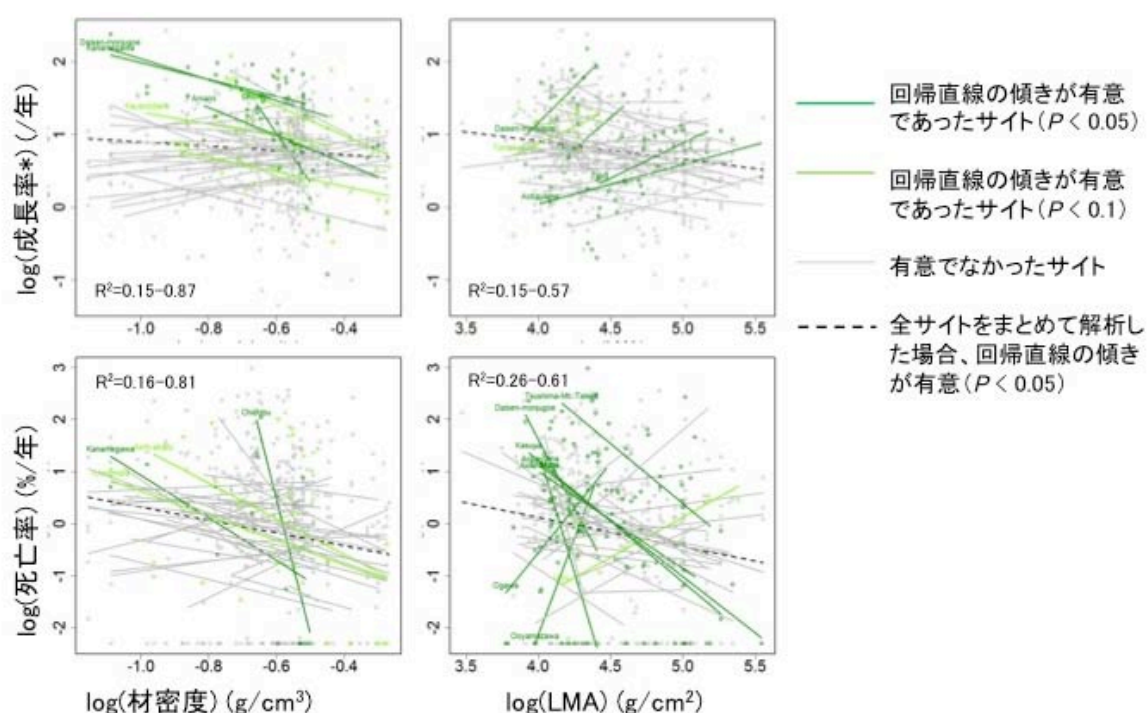
気候変動で樹木種や森林バイオーム分布がシフトすると考えられる。このような分布範囲のシフトは樹木種や機能タイプの量の変化の結果である。日本各地の39地点の森林プロットにおける新規加入率と死亡率、個体群増加率は年平均気温に沿って変化していた（図(2)-6）。常緑広葉樹は分布域の北限に近い森林で新規加入率が高く死亡率が低かったので個体群増加率が高かったが、そのような場所で落葉広葉樹の個体群増加率は低下していた。同様に落葉広葉樹は分布域の北限に近い森林で新規加入率が高く死亡率が低かったので個体群増加率が高かったが、そのような場所で北方針葉樹の個体群増加率は低下していた。種ごとの解析でも、多数の種で同様の傾向が見られた。温帯針葉樹ではそのような明瞭な傾向は見られなかった。

一方で成長量には気象条件の明瞭な効果は見られなかった。主要22種のうち、成長量に個体サイズの正の効果が見られたのは8種あったが、気象条件の影響を受けていたのは年降水量に負の影

響を受けていたヤブニッケイのみであった。年平均気温や周辺の個体密度の有意な効果はミズナラ、ツバキをはじめいずれの種からも検出されなかった（図(2)-7）。

地球温暖化によって樹木種の分布域が北方にシフトすると予測されているが、その予測と今回の結果は一致する結果であった。ただし、二次林では成熟林よりも常緑広葉樹の個体数増加率が高かったことから、過去の攪乱の影響も見られた。

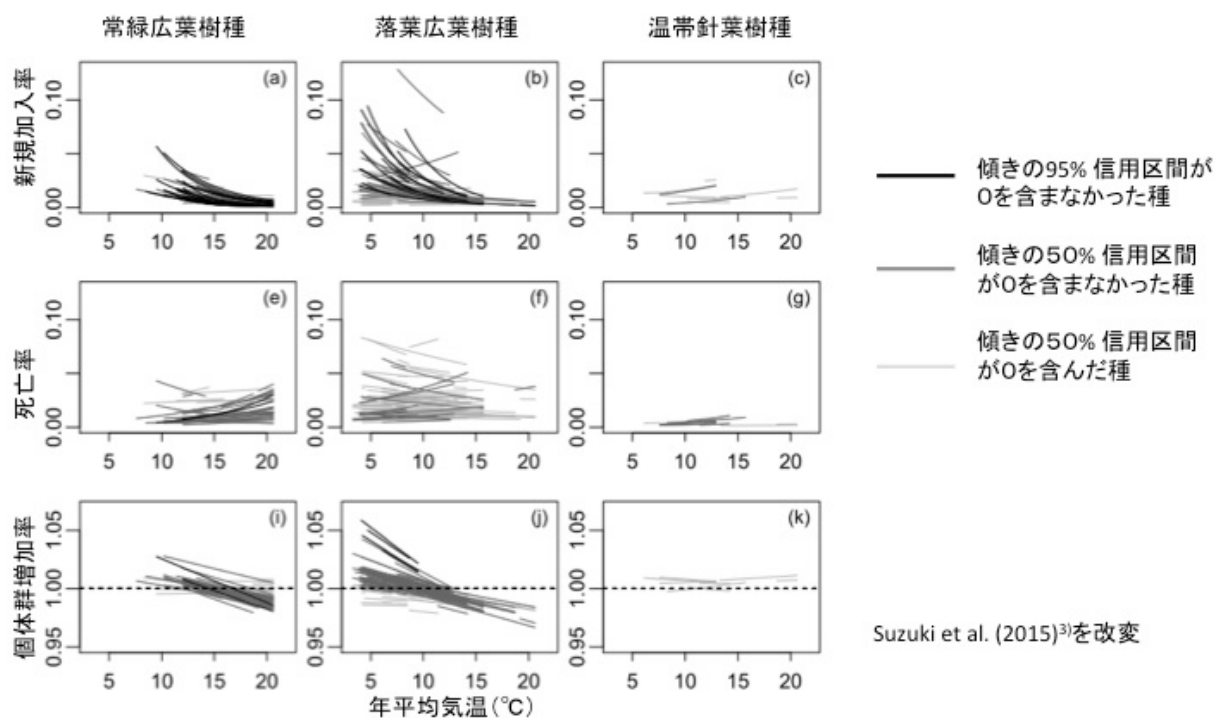
様々なサイズの個体から構成される森林では、林分内のサイズ構造によって個体間の非対称競争が生じ、サイズの大きい個体ほど幹の肥大成長率が大きくなると予測される。そこで幹の成長率モデルに林分内のサイズ構造を組み込むと、サイズ構造を組み込まない従来のモデルに比べ実測値によく当てはまった（図(2)-8）。一部の森林では、サイズ構造を組み込んだモデルで予測した成長率と実測の成長率の差には、葉の厚さなどの機能形質との関係がみられた。



*95パーセンタイルRGRを好適な環境下での成長率の指標として用いた

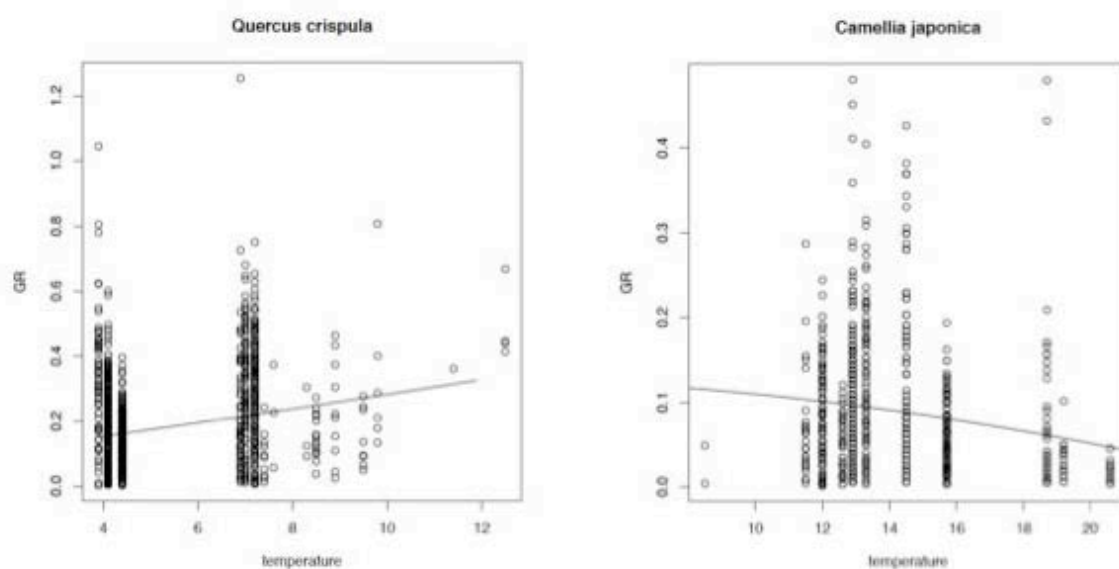
図(2)-5 機能形質と動態パラメータの関係

日本各地37地点の森林において樹種特有の機能形質と幹の成長率あるいは死亡率との関係を回帰分析した。



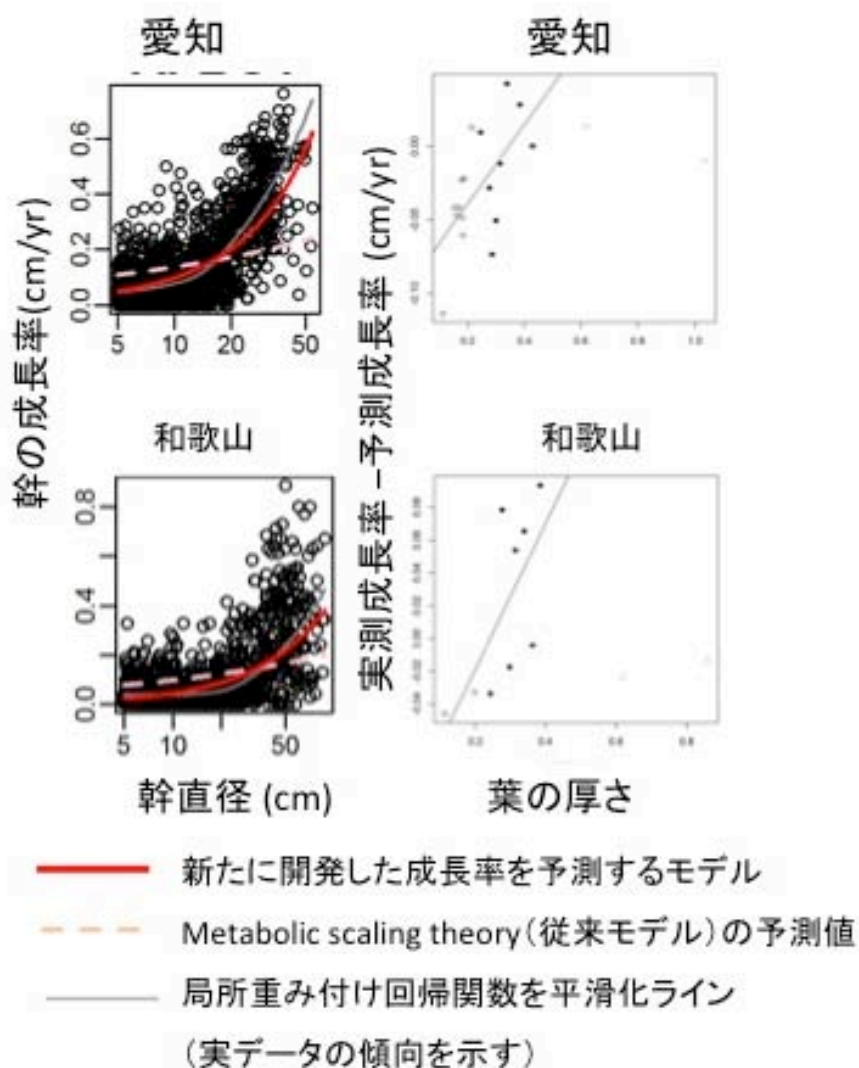
図(2)-6 年平均気温と動態パラメータの関係

日本各地の森林において樹種ごとに動態パラメータと年平均気温の関係を分析した。



図(2)-7 年平均気温と直径成長量の関係の例。

左:ミズナラ、右:ツバキ



図(2)-8 幹の成長率と個体サイズ・機能形質(葉の厚さ)の関係

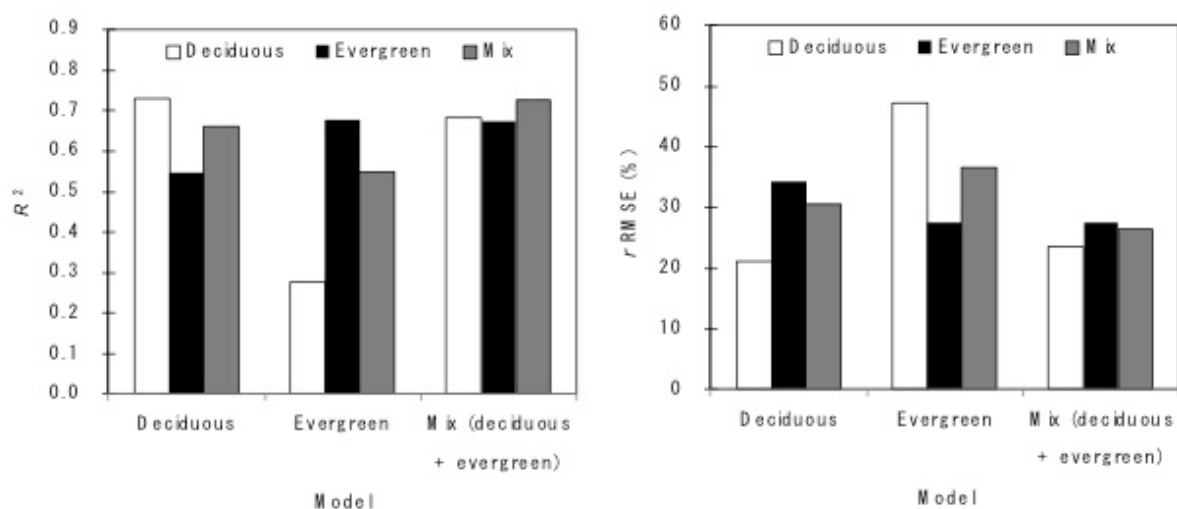
以上の結果から、動態パラメータの環境・攪乱依存性や個体サイズ依存性を考慮することで、動態パラメータを形質から精度高く推定できることが示された。気象要因の影響について更に詳細に検討が必要であるものの、林分のサイズ構造および機能形質を用いたより詳細なモデルを今後開発することが、成長速度の推定精度の向上に重要であると考えられる。

(3) 東アジアにおける分光特性-形質データベースの構築と予測モデル

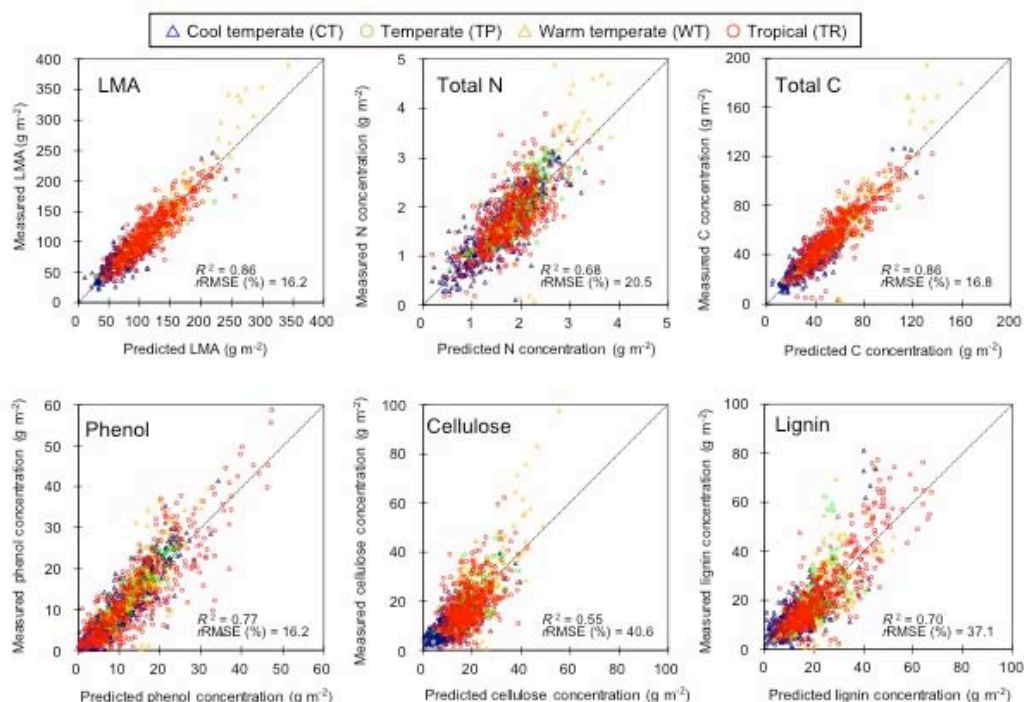
作成した分光特性-形質データベースをもとにPLS回帰による形質予測モデルを開発した。はじめに、着葉タイプ(落葉樹、常緑樹および落葉・常緑混合)ごとの教師データを使用した予測モデルを作成し、互換性を調査した結果、教師と検証の着葉タイプが異なる場合に予測精度が低下することが明らかになった。特に常緑樹で作成したモデルを落葉樹に当てはめたときに精度が低下し、その一方で、混合モデルは安定した高い予測精度を示すことが明らかになった(図(2)-9)。この結果は、常緑-落葉樹間の形質予測モデルの互換性はさほど高くなく、今後、東アジアの森林でリモートセンシングによる形質予測を行う際は、着葉タイプごとに予測モデルを選択したほう

が理想的であることを意味する。ただし、その一方で、着葉タイプを判別するために必要な空間分解能と樹種判別の精度によってモデルが適切に選択できない場合は、混合モデルが活用できることも示唆された。混合モデルを使用し、冷温帯、温帯、暖温帯および熱帯の森林における形質予測を行ったところ、決定係数 $R^2 = 0.55 \sim 0.86$ の精度が得られた（図(2)-10）。

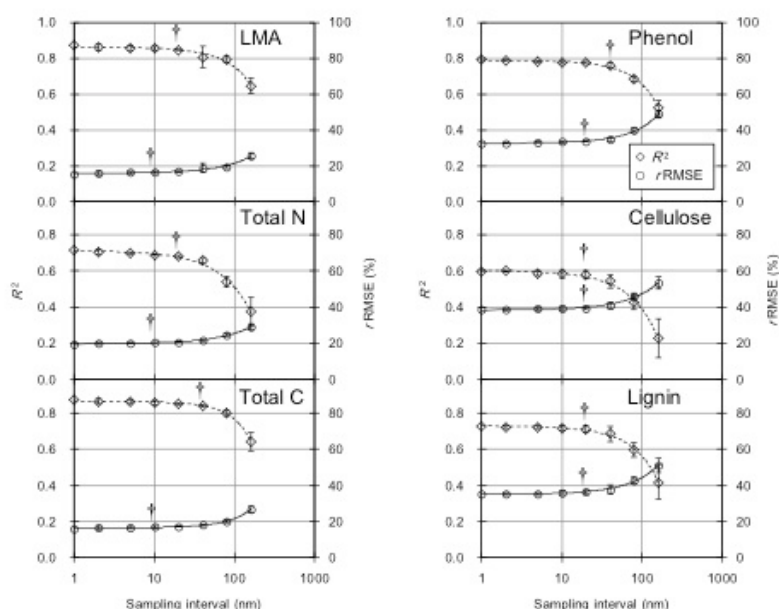
これらの形質は森林の生産性、生物間相互作用（植食性昆虫による被食）、有機物分解に関与することから、これらの結果は、東アジアの森林における炭素固定や物質循環に関する分光リモートセンシング技術の向上に寄与する。



図(2)-9 分光特性－形質データベースの構築と予測モデル
着葉タイプの互換性比較. 値は6形質の平均値を示す



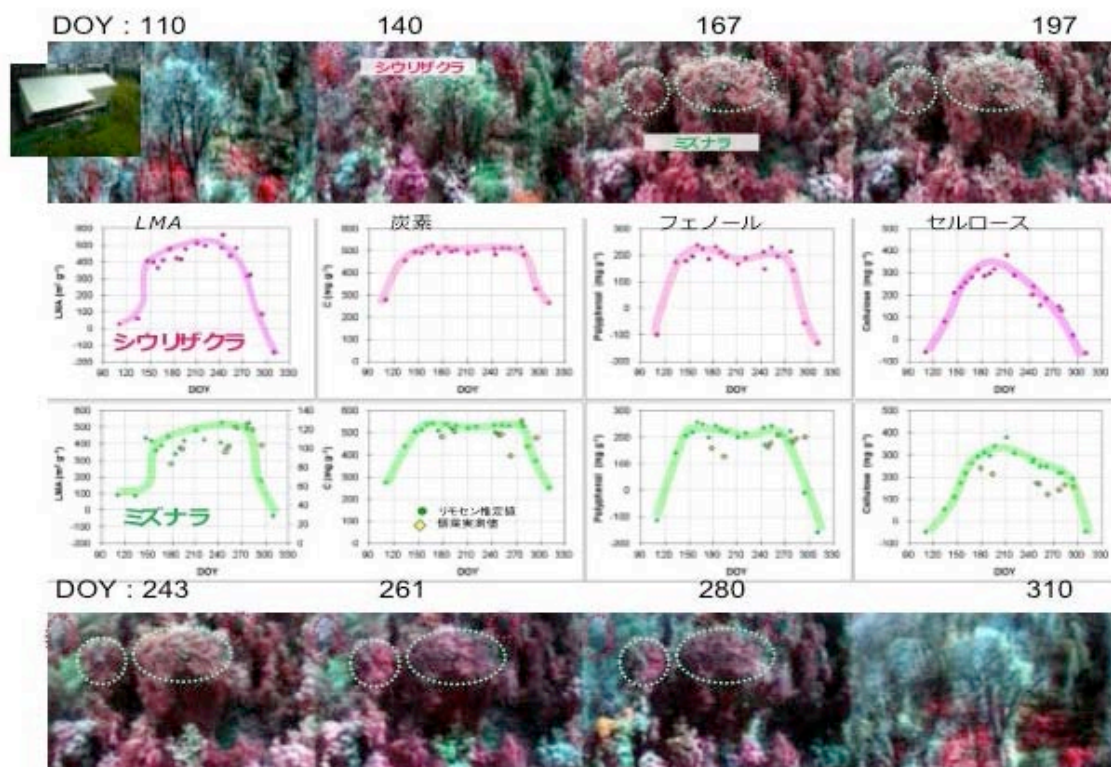
図(2)-10 分光特性－形質データベースの構築と予測モデル
混合モデルによる予測. 幅広い気候帯に対応した形質予測が可能となった.



図(2)-11 分光特性－形質データベースの構築と予測モデル
可視～短波長赤外波長帯における分光分解能と形質予測モデルの予測精度の関係。+は最高分解能(サンプリング幅1nm)と比べて5%の変動がない最大サンプリング幅を示す。10nm以下の分解能であれば精度が安定することが判明した。

予測モデルの精度を分光分解能ごとに調査した結果、可視～短波長赤外域において10nm以下の波長分解能であれば形質予測モデルの精度が $\pm 5\%$ 以内に安定することが判明した（図(2)-11）。この結果は、現在、日本で計画されている次世代型ハイパースペクトル観測衛星の性能で予測が可能になることを示唆している。

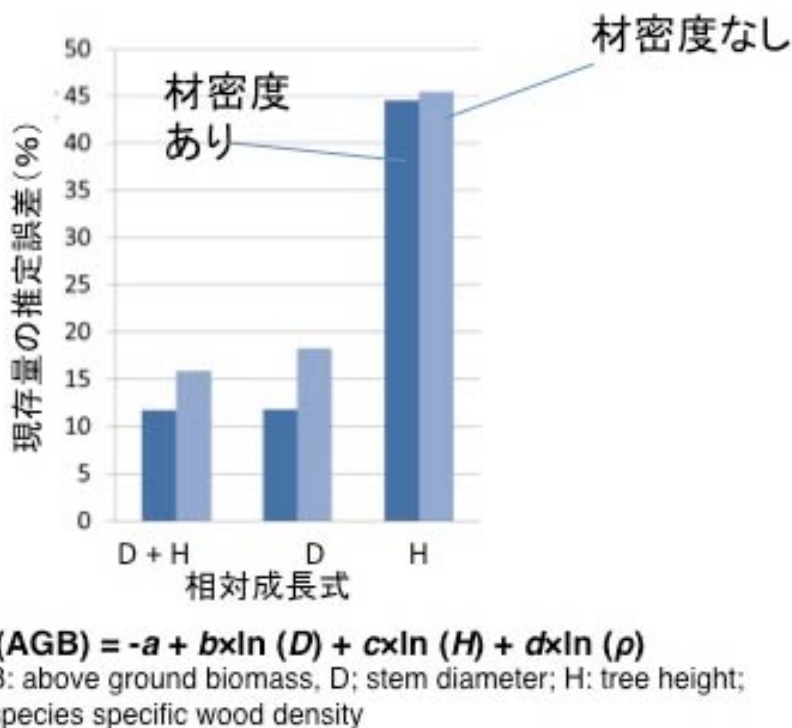
森林の樹冠における形質予測モデルの妥当性を評価するために、落葉広葉樹林において樹冠の連続分光反射率画像をハイパースペクトルカメラで撮影し、個葉で得られた形質予測モデルを当てはめて樹冠（シウリザクラおよびミズナラ）の形質変動の解析を行った。画像撮影と同時期に行った個葉の形質と比較すると、LMA、C、フェノールについては比較的よく一致しており（図(2)-12）、樹種ごと、形質ごとの季節性を可視化することが可能になることが示された。今後、詳細なモデル化によって高精度化することができれば、UAVや航空機などから機能形質の多様性や養分動態、ストレス応答などの評価が可能になると期待される。



図(2)-12 分光特性－形質データベースの構築と予測モデル
落葉広葉樹林におけるハイパースペクトルカメラ画像の解析による形質の季節変化

(4) 生態系機能・サービスの広域推定モデルへのデータ提供

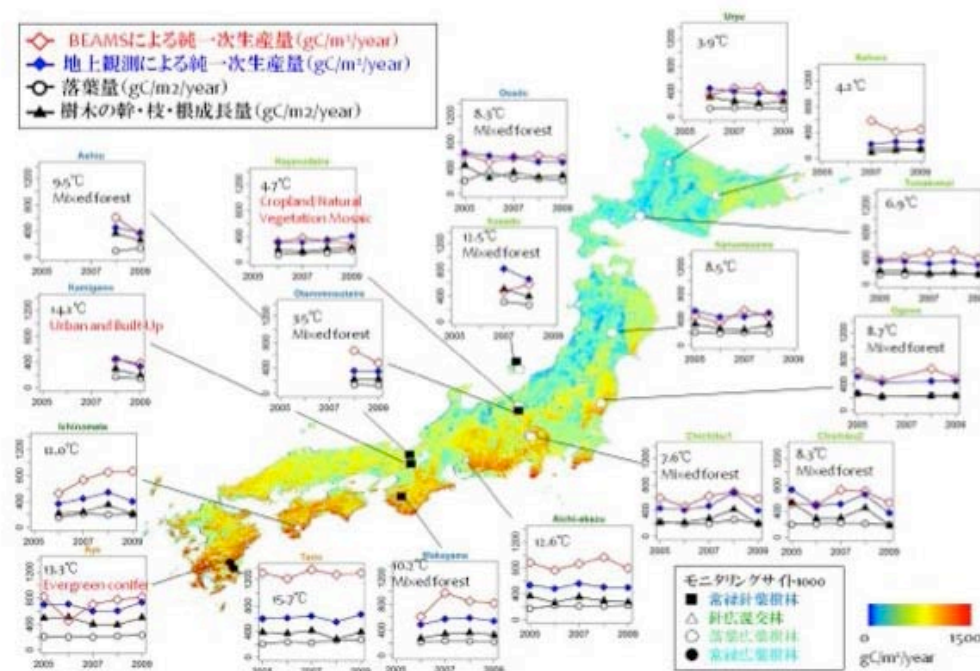
1) 森林の現存量や一次生産、およびVOC放出量の推定



図(2)-13 現存量を推定するための汎用相対成長式の精度

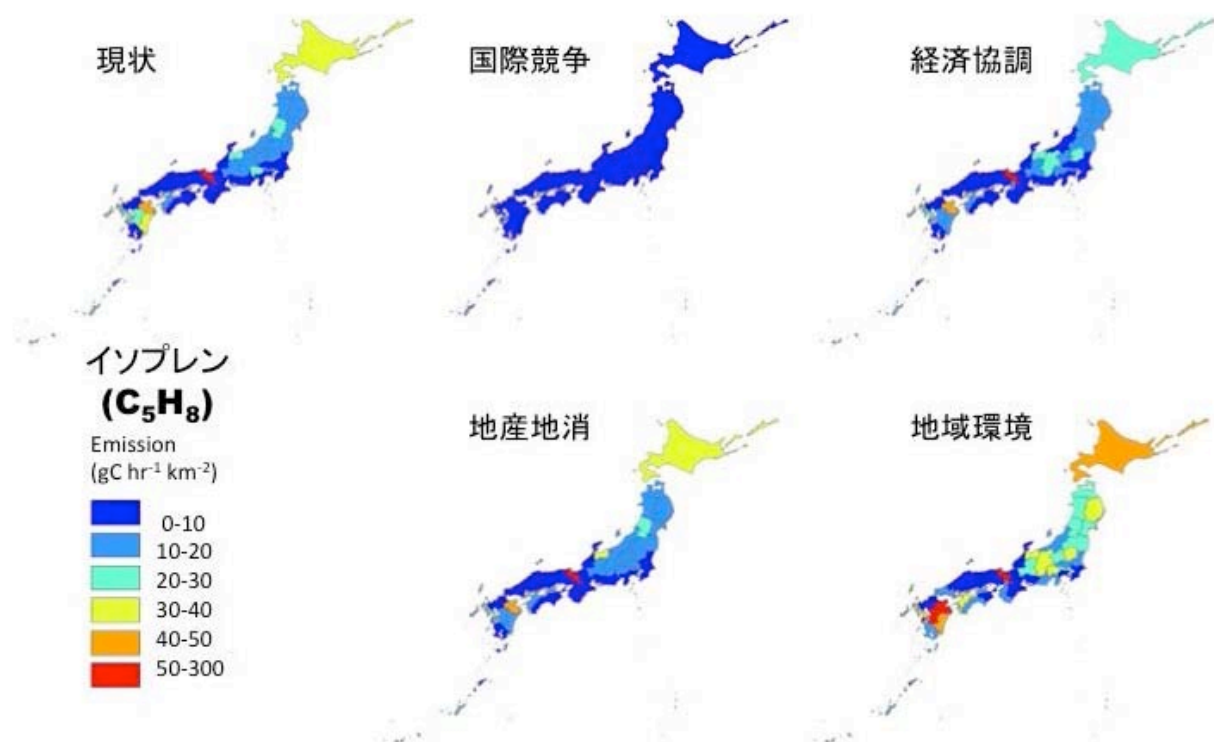
現存量データベースを用いて、日本各地の天然性林に適用可能な汎用相対成長式を開発した。幹直径や樹高に加え樹種固有の材密度を式に入れると、森林の地上部現存量を平均 12%の誤差で推定できた（図(2)-13）。また幹、枝、葉、根などの部位ごとの現存量においても、材密度を入れた式あるいは機能群（常緑広葉樹、落葉広葉樹、常緑針葉樹）ごとの式を用いると、推定誤差が小さくなった。このことから、生態系機能に関する樹木の形質（機能形質）情報が生態系機能の推定にとって重要であることが示された。さらに、今回開発した汎用相対成長式を用いると、地域固有な式を他地域に適用した場合と比べ、誤差が 6%減少した。このことから、多地点で調査されたデータを集めて汎用相対成長式を作るという手法が、亜熱帯から亜寒帯までの天然林においても有効であることがわかった。本データベースに収録したデータは、世界中のデータとともにデータペーパーとして公開した。

この式を用いて、日本の森林の地上部純一次生産量を推定した。また推定した森林の純一次生産量は概ね陸域炭素収支モデル BEAMS (Sasai *et al.* 2012)²⁾の推定値と一致していた（図(2)-14）が、一部の森林では乖離が見られた。本研究で求めた地上観測による現存量や純一次生産量は、炭素蓄積・吸収量を広域に把握・評価するモデルやリモートセンシングの改良に寄与する。また地上観測に基づく純一次生産量の年変動は、多くの地点で落葉量の年変動ではなく、樹木の成長量の年変動と対応していた（図(2)-14）。したがって、推定が難しい純一次生産量の変動を捉えるための指標として、情報が得やすい樹木の成長量が有効であることがわかった。



図(2)-14 地上観測による純一次生産量と陸域炭素収支モデルによる純一次生産量の比較
日本各地の森林の純一次生産量(2005～2009年)と、陸域炭素収支モデルBEAMSによる推定値(Sasai et al. 2012²⁾)との比較。地図はBEAMSによる純一次生産量の分布を示す。

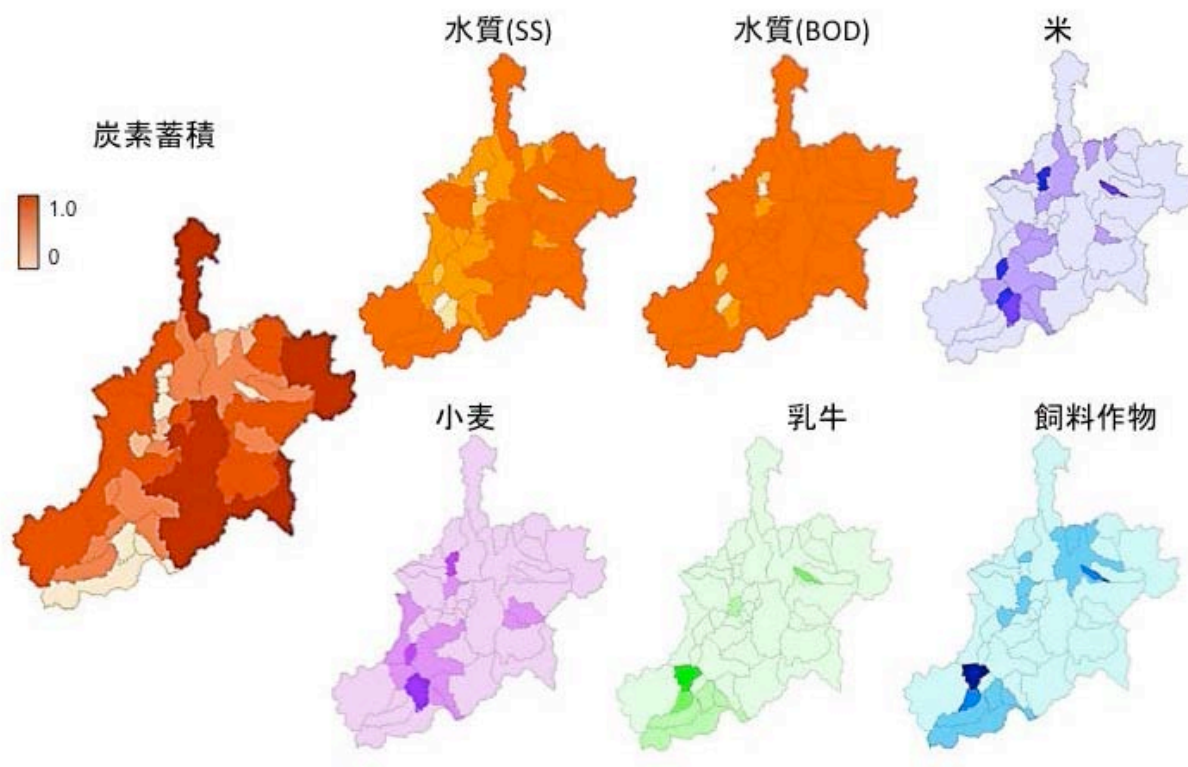
揮発性物質 VOC 放出量は樹種によって異なるため、森林の構成種が異なる 4 つの将来シナリオによって各都道府県の VOC 放出量は大きく異なると予測された(図(2)-15)。このことは多様性の変化が生態系機能やサービス量を左右することを示している。



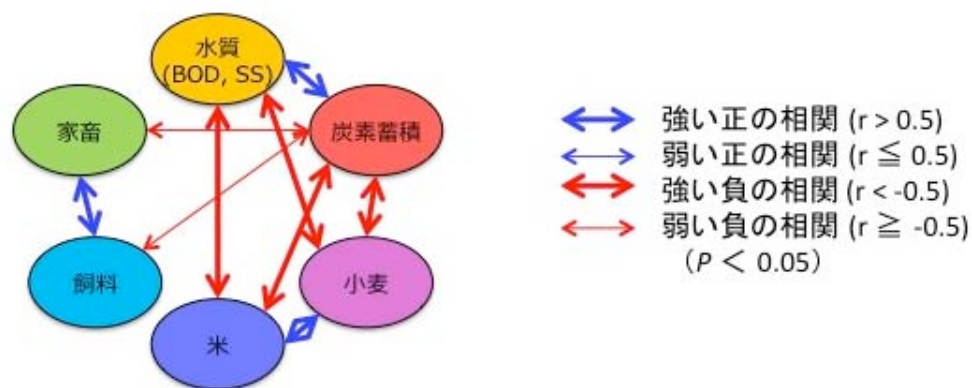
図(2)-15 様々なシナリオのもとでの揮発性物質VOC放出量の変化

2) モデル流域における生態系サービスの連環

石狩川流域45市町村の生態系サービス間の関係を解析した結果(図(2)-16)、米・小麦生産と炭素蓄積や水質調整との間に負の関係が見られた(図(2)-17)。またサービス間の関係は20年間の間に変化していた。これらのことから、サービス間の関係を理解するためには、空間変異とともに時間変異にも着目する必要があることが示された。今後は、複数サービスの評価から地域をタイプ分けすることで、タイプに応じた政策提言ができるようになったり、サービスの多様性を指標化することで、特定のサービスに特化してきている地域とサービスの多様化が進んでいる地域を検出できるようになると期待される。



図(2)-16 1980年代の石狩川流域45市町村の生態系サービス量
サービス量は1980年代、1990年代前半、後半の全期間・全市町村の最大値に対する相対値



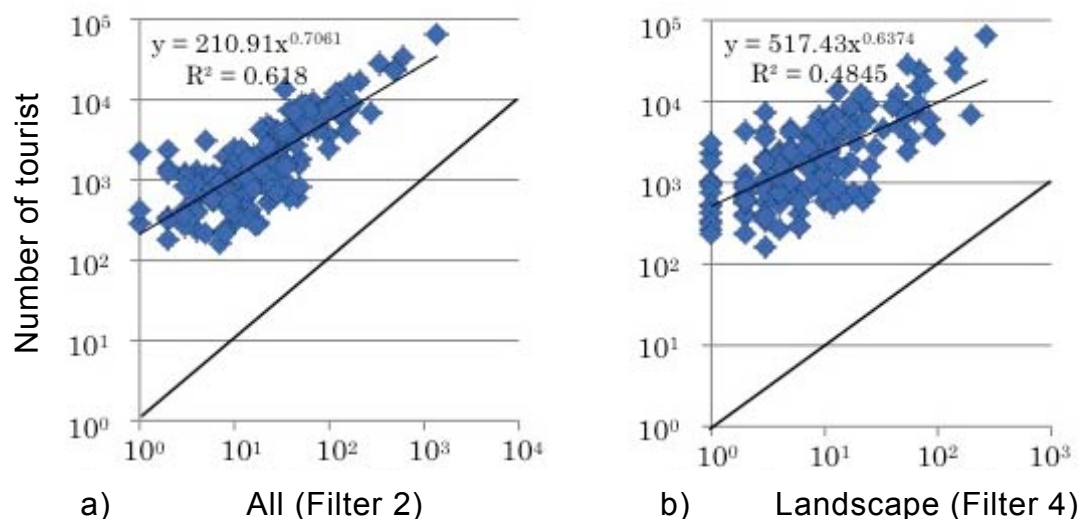
図(2)-17 1980年代の石狩川流域45市町村の生態系サービス間の空間的關係

3) 写真共有サービス Flickr を用いた北海道の景観サービス地図化手法の開発

対象地域におけるFlickrデータの特徴を確認するため、北海道観光入込客数調査報告書（北海道）から、2010～2014年の5年間の市町村別の観光入込数を合計し、市町村別のFlickrユーザー数と比較した結果、ある程度の相関があることがわかった（図(2)-18、対数スケールで $R^2=0.618$ 、線形近似で $R^2=0.89$ ）。今後、Flickrの写真データを観光客の代用指標となりうることが示唆された。

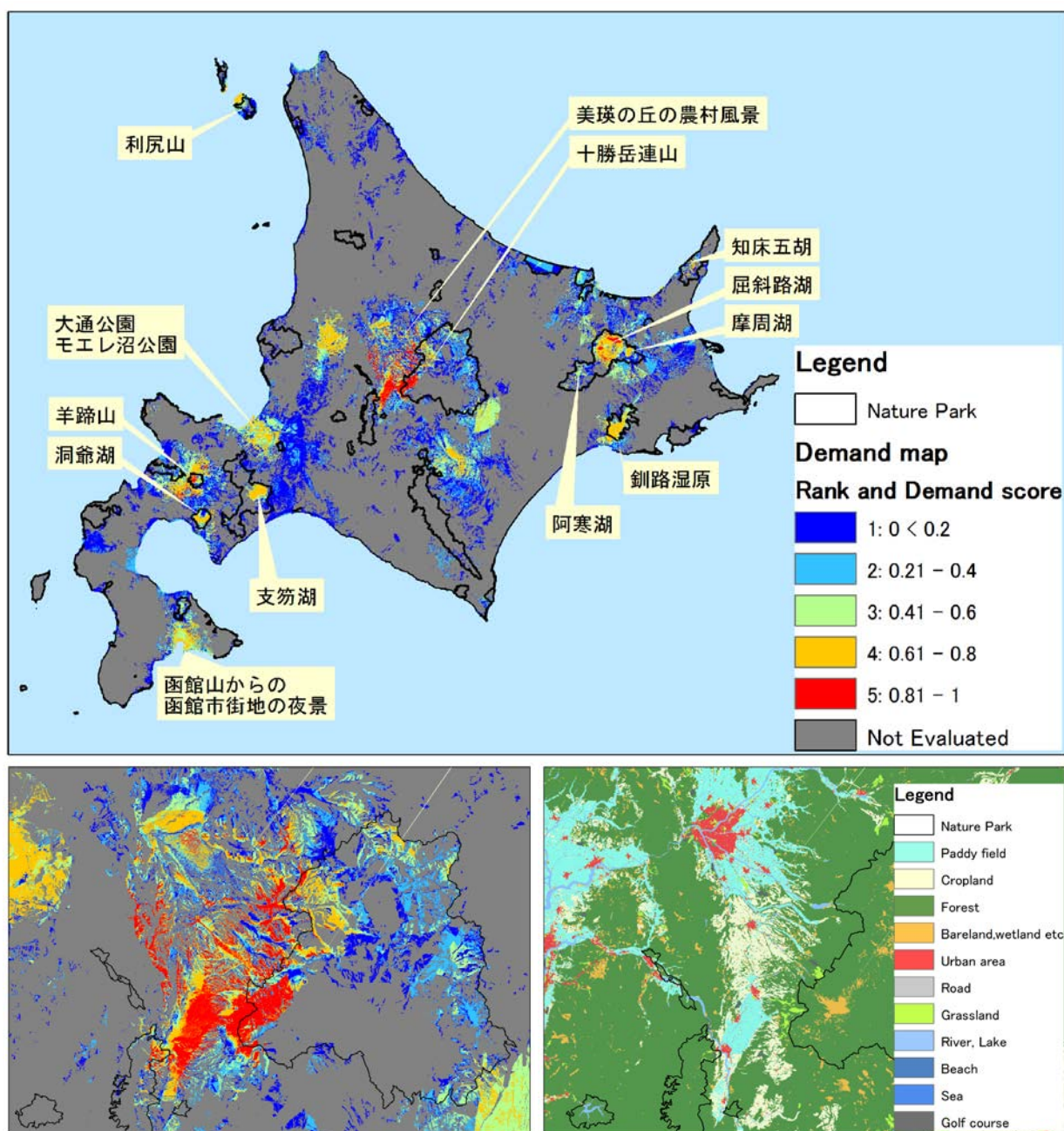
北海道における景観に対する需要地として最も高いスコアであったのは、北海道中央に位置す

る、旭川、美瑛・上富良野・中富良野等（一部国立公園）であり、その他、札幌市周辺、釧路湿原（国立公園）、阿寒湖・屈斜湖・摩周湖（国立公園）、知床半島（世界自然遺産）、支笏湖、洞爺湖（国立公園）、ニセコ・支笏山（国定公園）、函館周辺・大沼地域（国定公園）等、観光地として認知されている場所となった（図(2)-19）。需要マップを拡大することで、各観光地内で需要の高い箇所も確認できる。



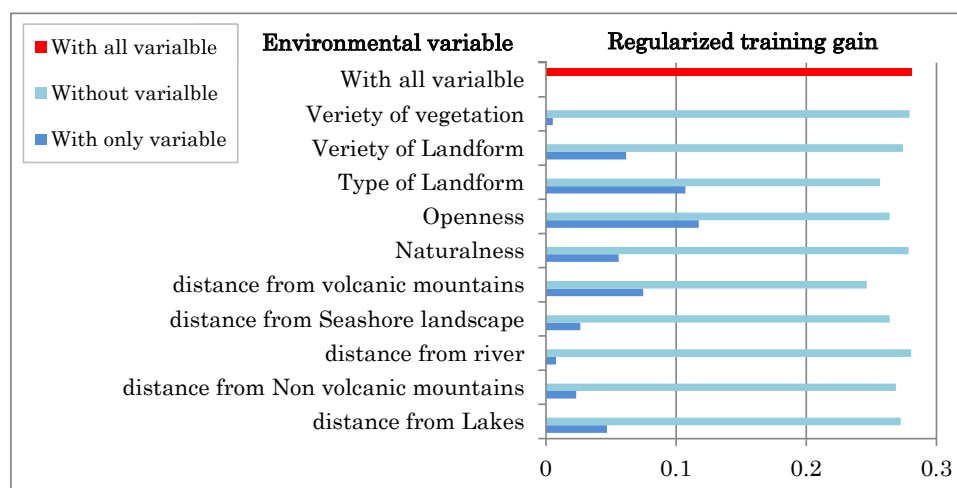
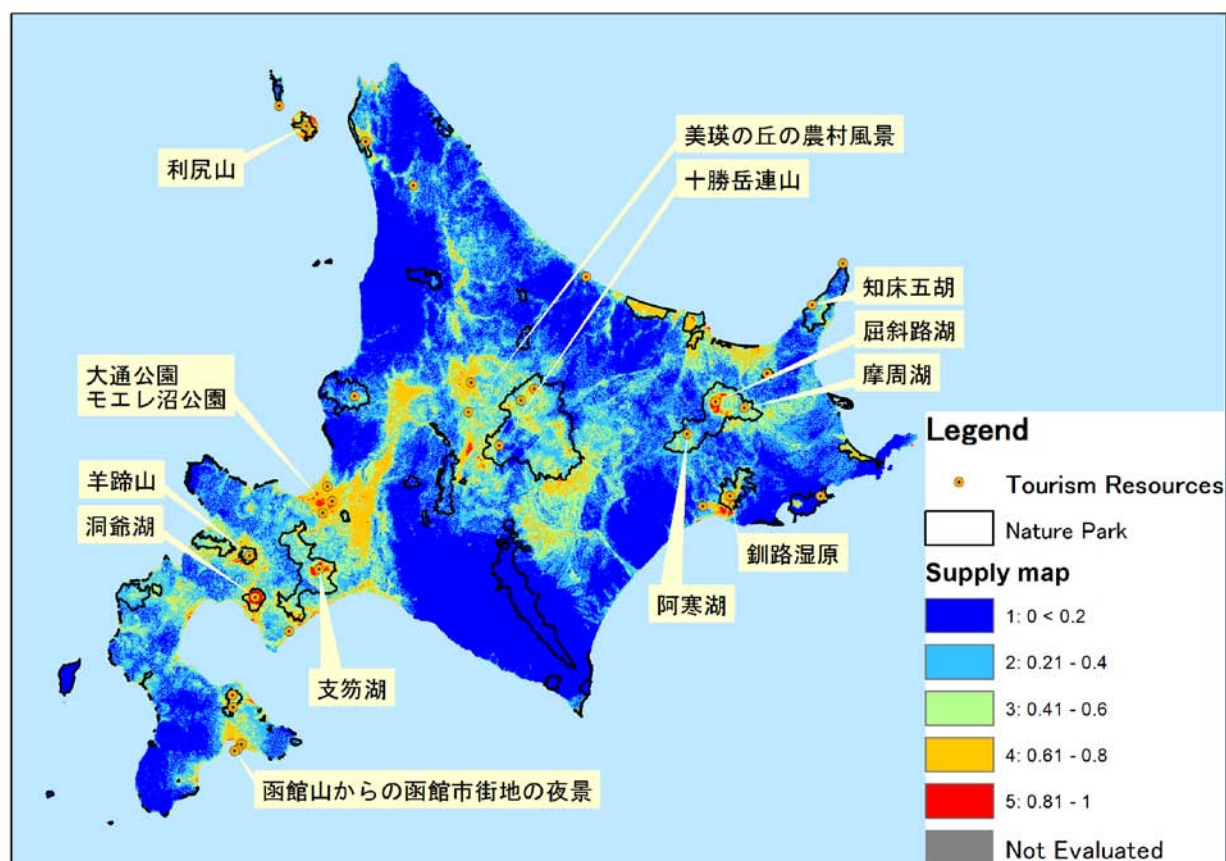
図(2)-18 Flickrユーザーと観光入込数との関係(市町村別集計)

景観需要マップから供給ポテンシャルマップを作成した（図(2)-20）。Maxentによる推定精度はAUC=0.726であった。環境要因では、地上開度、地形、火山からの距離の順でモデルに貢献が高く、植生の多様度、河川からの距離はモデルへの貢献が少なかった。地形については、水域も含む、平野、台地、山頂等が、自然度については農耕地が強く応答していた。湖沼は水景要因の中で最も貢献が強かった。供給ポテンシャルの分布については、需要の高かった箇所が中心となっているが、需要地として示されなかった場所にも供給ポテンシャルがあるということが分かった。今回の結果においては、山地（火山性）、農地、湖、都市域の一部等にポテンシャルの高い箇所がみられ、いわゆる「北海道らしい」景観地が多く示されている。自然公園地域、国立公園および湖を中心とする国定公園は、供給ポテンシャルも高かった。例えば、大雪山国立公園においては、需要地としては評価されなかったが、中心部等で供給ポテンシャルは高いと示された場所が多くギャップがある。これは、アクセス性によるものと考えられるが、このようなギャップは、暑寒別天売焼尻国定公園、桧山道立自然公園、利尻礼文サロベツ国立公園にも散見される。今後これらの環境要因と生物多様性との関係を組み込むことで、より直接的に生物多様性が生態系サービスの文化的サービスの評価につながると期待される。今回はFlickrを用いたが、スマートフォンやソーシャルメディアの情報活用は一般化してきており、取得される位置情報の量も増加し、位置情報精度も向上している。機械学習による写真の自動認識機能を併用することにより他のソーシャルメディアの情報も活用ができるため、今後は、客観的な文化的サービスの把握につなげることができると考えられる。



図(2)-19 景観の需要マップ

全体図（上図）および美瑛域の拡大と土地利用図との比較（下図）



図(2)-20 景観の供給ポテンシャル

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまで散逸していた樹木の動態およびアロメトリーデータについてデータベースを構築し、一元的に情報処理を行うことで、広域の生産量などの推定が精度良く行えるようになった。

森林の現存量・炭素吸収量の推定精度が従来の方法に比べ向上し、リモートセンシング技術を用いた炭素収支モデルや広域マッピング手法の開発に不可欠な地上検証データを提供できた。さらに地域の生態系サービス評価・将来予測のためのアルゴリズムを確立した。森林の生産性や生態系機能と関係する葉形質の予測モデルの構築に必要な分光データベースを構築することで、冷温帯から熱帯にかけた葉形質を予測する基礎モデルが完成させた。さらに、着葉タイプや観測機材に関する知見を提供した。

生態系サービスのうち文化的サービスの評価は他に比べて進んでいないが、ソーシャルメディアの写真を用いて景観サービスの需要と供給を地図化する手法を開発したことにより、様々な空間、時間スケールで、刻々と変化するニーズやポテンシャルを素早く把握する可能性を広げた。

(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>

Flickrを用いた景観サービスの評価手法において、国立・国定公園など自然公園・保護区の利用・サービスについて今後行政が活用することが見込まれる。

6. 国際共同研究等の状況

Global Land Projectに協力し、札幌拠点オフィスの運営および土地変化科学に関する研究・教育を推進した。GLPは土地変化科学に関する研究プログラムであり、Future Earthのコアプロジェクトの一つである。Daniel S. Falster (Macquarie University・オーストラリア) が主導するBAAD: a Biomass And Allometry Database for woody plantsに協力し、日本国内の現存量データを提供し、データベースを公開した。本データベースは世界初・最大級のもので、世界各地で計測された21 084 個体、678種の樹木の現存量データを収録している。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Aiba, M., Takafumi, H., & Hiura, T. (2012) Interspecific differences in environmental and spatial controls on plant species distribution and the relationships with functional traits. *J. Ecol.*, 100, 950-957.
- 2) Inari, N., Hiura, T., Toda M.J., & Kudo, G. (2012) Pollination linkage between canopy tree flowering, bumble bee abundance, and seed production of understory plants in a cool-temperate forest. *J.Ecol.* 100, 1534-1543.

- 3) Ohte, N., Nakaoka, M., Shibata, H., Nakano, S., Yahara, T. & Nakashizuka, T. (2012). ILTER and JaLTER: Their Missions and Linkage to Database Development in the Asia-Pacific Region. The Biodiversity Observation Network in the Asia-Pacific Region; Toward Further Development of Monitoring, 205-215.
- 4) Suzuki, S.N., Ishihara, M.I., Nakamura, M., Abe, S., Hiura, T., Homma, K. *et al.* (2012). Nation-wide litter fall data from 21 forests of the Monitoring Sites 1000 Project in Japan. *Ecol. Res.*, 27, 989-990.
- 5) Hiura, T. & Nakamura, M. (2013) Different mechanisms explain feeding type-specific patterns of latitudinal variation in herbivore damage among diverse feeding types of herbivorous insects. *Basic Appl. Ecol.*, 14, 480-488.
- 6) Aiba, M., Katabuchi, M., Takafumi, H., Matsuzaki, S.S., Sasaki, T., & Hiura, T. (2013) Robustness of trait distribution metrics as a tool for community assembly studies under uncertainties of assembly processes. *Ecology*, 94, 2873-2885.
- 7) Chung, H., Muraoka, H., Nakamura, M., Han, S., Muller, O. & Son, Y. (2013) Experimental warming studies on tree species and forest ecosystems: A literature review. *J. Plant Res.*, 127, 447-460.
- 8) Nakamura, M., Inari, N. & Hiura, T. (2014) Spatial variation in leaf traits and herbivore community within the beech canopy between two different latitudes. *Arthropod-Plant Inte.*, 8, 571-579
- 9) Nakamura, M., Nakaji, T., Muller, O. & Hiura, T. (2014) Different initial responses of the canopy herbivory rate in mature oak trees to experimental soil and branch warming in a soil-freezing area. *Oikos*, 124, 1071-1077.
- 10) Ohta, T., Niwa, S., & Hiura, T. (2014) Catchment vegetation alters benthic invertebrate communities in warm-temperate forests via the calcium concentration of leaf litter. *Freshw. Biol.*, 59, 748-760.
- 11) Ohta, T., Niwa, S., Agetsuma, N., & Hiura, T. (2014) Calcium concentration in leaf litter alters the community composition of soil invertebrates in warm-temperate forests. *Pedobiol.*, 57, 257-262.
- 12) Sakai, T., Sugita, H., Yone, Y., & Hiura, T. (2014) Instability of ground surface mediate coexistence of tree species in a warm temperate mixed forest. *Plant Ecol.*, 215, 121-131.
- 13) Ishihara, M.I., Utsugi, H., Tanouchi, H., Hiura, T., Nakano, S., Yahara, T. *et al.* (2014). Evaluating relationship between biodiversity and ecosystem functions in forests using forest inventory data and allometry data. Asia-Pacific Biodiversity Observation Network: Integrative Observations and Assessments, 351-365.
- 14) Shibata, H., Branquinho, C., McDowell, W.H., Mitchell, M.J., Monteith, D.T., Tang, J. *et al.* (2014). Consequence of altered nitrogen cycles in the coupled human and ecological system under changing climate: The need for long-term and site-based research. *AMBIO*, 44, 178-193.
- 15) Sapporo Nodal Office Addressing Land System Studies on Resilience, Sustainability and Vulnerability in Asia. *Glob. Environ. Res.*, 18, 105-112.
- 16) Osada, N., Nabeshima, E. & Hiura, T. (2015) Geographic variation in shoot traits and branching intensity in relation to leaf size in *Fagus crenata*: a common-garden experiment. *Amer. J. Bot.*, 102, 878-887
- 17) Ishihara, M.I., Usugi, H., Tanouchi, H., Aiba, M., Kurokawa, H., Onoda, Y. *et al.* (2015). Efficacy of

- generic allometric equations for estimating biomass : a test in Japanese natural forests. *Ecol. App.*, 25, 1433-1446.
- 18) Falster, D.S., Duursma, R.A., Ishihara, M.I., Barneche, D.R., FitzJohn, R.G., Vårhammar, A. *et al.* (2015). BAAD: a Biomass And Allometry Database for woody plants. *Ecology*, 96, doi: 10.1890/14-1889.1.
 - 19) Suzuki, S.N., Ishihara, M.I. & Hidaka, A. (2015). Regional-scale directional changes in abundance of tree species along a temperature gradient in Japan. *Glob. Change Biol.*, doi:10.1111/gcb.12911.
 - 20) Shibata, H. (2015). Impact of winter climate change on nitrogen biogeochemistry in forest ecosystems: A synthesis from Japanese case studies. *Ecol. Indic.*, doi:10.1016/j.ecolind.2015.10.063.
 - 21) Shibata, H., Rozzi, R., Chapin III, F.S., Callicott, J.B., Pickett, S.T.A., Power, M.E. *et al.* (2015). Biogeochemistry and traditional ecological knowledge and practices in Japan. *Earth Stewardship - Linking Ecology and Ethics in Theory and Practice* 2, 27-38.
 - 22) 柴田英昭, 石原正恵, 渡辺悌二, 氷見山幸夫, 甲山隆司, 占部城太郎 ほか (2015). 環境変動下における陸域変化研究の歩みと将来. *地球環境*, 20, 143-150.
 - 23) Ohta, T., Matsunaga, S.N., Kawamura, K. & Hiura, T. (2016) Stoichiometry meets diversity effects on decomposition in the freshwater ecosystem. *Oikos* (in press)
 - 24) Ohta, T. and Hiura, T. (2016) Root exudation of organic acids for six tree species alters dynamics of calcium and magnesium in soil. *Can. J. Soil Sci.* (in press)
 - 25) Nakamura, M., Makoto, K., Tanaka, M., Inoue, T., Son, Y. & Hiura, T. (2016) Leaf flushing and shedding, bud and flower production, and stem elongation in tall birch trees subjected to increases in aboveground temperature. *Trees* (in press)
 - 26) Tanaka, M. & Nakamura, M. (2016) Spatially distinct responses within willow to bark stripping by deer: effects on insect herbivory. *Naturwissenschaften* (in press)
 - 27) Ishihara, M.I., Konno, Y., Umeki, K., Ohno, Y., Kikuzawa, K. (2016) A new model for size-dependent tree growth in forests. *PLoS ONE* 11: e0152219.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 石原正恵、柴田英昭、津久井成美、渡辺悌二：北方森林保全技術、30, 25-28 (2012)
「全球陸域研究計画（GLP）札幌拠点オフィスの取り組み」
- 2) 石原正恵、吉村暢彦、Min Fan, 井上貴央, 三島啓雄, 北條愛 ほか (2015). 石狩川流域市町村における生態系サービス間の関係. *北方森林研究*, 63, 5-6.

（２）口頭発表（学会等）

- 1) M. ISHIHARA, T. HIURA, H. SHIBATA, T. KOHYAMA: 日本地球惑星科学連合大会(2012)
“Evaluating human impacts on tree diversity and ecosystem functions in East Asia from forest inventory database”
- 2) M. ISHIHARA, H. UTSUGI, H. TANOUCHI, H. KUROKAWA, M. AIBA, Y. ONODA, T. HIURA:
Third Japan-Taiwan Ecological Workshop, Sapporo, Japan (2012)
“Evaluating species diversity and ecosystem functions in Japanese forests from forest inventory and allometry database”
- 3) H. SHIBATA, Y. HASEGAWA, T. WATANABE, K. FUKUZAWA: BIOGEMON, The 7th

- International Symposium on Ecosystem Behavior, North Port, USA (2012)
 “Impact of snowpack decrease on net nitrogen mineralization and nitrification of forest soil in northern Japan”
- 4) H. SHIBATA: ILTER Science meeting, Lisbon, Portugal (2012)
 “ILTER initiative; Socio-biogeochemistry of Nitrogen cascading and interactions”
- 5) T. HIURA: 20th memorial symposium of Takayama site, Takayama, Japan, 2013
 “Japanese cedar plantations alter the ecosystem functioning and biodiversity.”
- 6) 日浦勉：OCCO/NIES温暖化観測連携拠点シンポジウム（2013）
 「生物多様性-生態系機能観測ネットワークの現状」
- 7) 石原正恵、宇都木玄、田内裕之、永野正弘、安藤信、宮田理恵、黒川紘子、饗庭正寛、小野田雄介、日浦勉：第60回日本生態学会（2013）
 「亜熱帯林から亜寒帯林における現存量推定のための相対成長式」
- 8) H. SHIBATA, Y. HASEGAWA, T. WATANABE, K. FUKUZAWA: 第60回日本生態学会（2013）
 “Impact of snowpack decrease on net nitrogen mineralization and nitrification of forest soil in northern Japan”
- 9) 中路達郎：第60回日本生態学会（2013）
 「光学リモートセンシングを用いた葉形質の推定」
- 10) 鍋嶋絵里、久保 拓弥、香川聡、日浦 勉、船田 良：第60回日本生態学会（2013）
 「ミズナラの幹の炭素・酸素安定同位体比と肥大成長の長期変化」
- 11) 山口大輔、中路達郎、日浦勉、三島大、中村こずえ、佐野淳之、彦坂幸毅：第60回日本生態学会（2013）
 「異なる緯度におけるコナラ林冠葉の緯度-光合成関係に対する温暖化処理の影響」
- 12) 松永壮、中塚誠次、佐伯いく代、日浦勉：第60回日本生態学会（2013）
 「拡大造林による樹種改変とその大気環境影響」
- 13) 宮崎祐子、門田有希、中路達郎、日浦勉：第60回日本生態学会（2013）
 「野外操作実験による樹木の温暖化への応答：コナラにおけるトランスクリプトーム解析」
- 14) 日浦勉：低温科学研究所 平成26年度共同利用研究集会「寒冷圏陸域植生と大気微粒子・気体成分を介した大気環境の相互作用」（2014）
 「苫小牧研究林におけるこれまでの森林-大気相互作用研究」
- 15) Ishihara MI, N. YOSHIMURA, M. FAN, T. INOUE, Y. MISHIMA, A. HOJO, A. NAGASAKA, Y. OHNO, T. TSUDA, N. TSUJI, H. SHIBATA: Asia Global Land Project Conference, Taipei, Taiwan, 2014
 ”Synergies and tradeoffs among ecosystem services in Ishikari River watershed, Japan”.
- 16) 石原正恵：第61回日本生態学会（2014）
 「データーペーパーの現状」
- 17) 中路達郎、小熊宏之、日浦勉：第61回日本生態学会（2014）「連続分光反射率を用いた葉形質の季節変化の評価」
- 18) 長田典之、中路達郎、日浦勉：第61回日本生態学会（2014）「日本全国の森林樹木の展葉フェノロジーの予測可能性」
- 19) 太田民久、松永壮、日浦勉：第61回日本生態学会（2014）
 「多様性-生態系機能の関係-Stoichiometryの理論を用いて検証-」
- 20) 日浦勉：第79回日本植物学会シンポジウム「自然変異に学ぶ：多様性の理解から育種への応用まで」（2015）
 「生態系機能に波及するブナの地理変異」

(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) 苫小牧市立美園小学校における特別授業「シカは何を食べる？」（2013年2月27日、聴講者約80名）にて日浦勉が講演
- 2) とっとり県民参加の森づくり推進事業シンポジウム「ところかわればブナかわる」（主催：鳥取大学、2014年3月9日、鳥取県民会館、観客約60人）にて日浦勉が講演
- 3) 黒松内ブナ林再生事業シンポジウム「北限のブナ林は南のブナ林と何が違うのか」（主催：黒松内町、2014年4月19日、黒松内町民会館、観客約40人）にて日浦勉が講演
- 4) サイエンスカフェ@苫小牧「目に見えない光で森を見る」（主催：苫小牧市美術博物館、2015年6月6日、苫小牧市美術博物館、観客約30人）にて中路達郎が講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 北海道新聞（2013年1月19日、道内版、22頁、「鳥の目で見つめ多様性探る」）
- 2) 北海道新聞（2014年11月2日、日曜navi、1-2頁、「ほっかいどう知究人」）
- 3) 苫小牧民報（2015年6月10日、15頁、「見えない光で森を分析」）

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Chatani, S., Matsunaga, S. N. & Nakatsuka, S. (2015) Estimate of biogenic VOC emissions in Japan and their effects on photochemical formation of ambient ozone and secondary organic aerosol. *Atmos. Env.*, 120, 38-50.
- 2) Sasai, T., Nakai, S., Setoyama, Y. et al. (2012) Analysis of the spatial variation in the net ecosystem production of rice paddy fields using the diagnostic biosphere model. *BEAMS. Ecol. Model.*, 247, 175-189.
- 3) Suzuki, S.N., Ishihara, M.I. & Hidaka, A. (2015). Regional-scale directional changes in abundance of tree species along a temperature gradient in Japan. *Glob. Change Biol.*, doi:10.1111/gcb.12911.