

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

生態系保全による緩和策と適応策の統合

(S-14-2)

平成27年度～令和元年度

Integrated approach for ecosystem-based mitigation and adaptation to climate change

<研究代表機関>

国立大学法人 横浜国立大学大学院環境情報研究院

<研究分担機関>

国立研究開発法人国立環境研究所

国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所

<研究協力機関>

東京農業大学、国際マングローブ生態系協会、大阪市立大学、大正大学

令和2年5月

目次

I. 成果の概要	・・・・・・・・・・	1
1. はじめに（研究背景等）		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発の方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた主な成果		
6. 研究成果の主な発表状況		
7. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
II-1 気候変動と気候変動対策の生態系サービスへの影響評価 （国立大学法人横浜国立大学）	・・・・・・・・・・	15
要旨		
1. はじめに		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた成果		
6. 国際共同研究等の状況		
7. 研究成果の発表状況		
8. 引用文献		
II-2 陸域生態系の強靱化による緩和策、適応策の統合評価・・・・・・・・・・		34
（国立大学法人横浜国立大学）		
要旨		
1. はじめに		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた成果		
6. 国際共同研究等の状況		
7. 研究成果の発表状況		
8. 引用文献		
II-3 緩和策と適応策に資する沿岸生態系機能とサービスの評価		55
（国立研究開発法人国立環境研究所）		
要旨		
1. はじめに		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発方法		

- 4. 結果及び考察
- 5. 本研究により得られた成果
- 6. 国際共同研究等の状況
- 7. 研究成果の発表状況
- 8. 引用文献

II-4 緩和策と適応策に資する森林生態系機能とサービスの評価 78
 (国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究)

要旨

- 1. はじめに
- 2. 研究開発目的
- 3. 研究開発方法
- 4. 結果及び考察
- 5. 本研究により得られた成果
- 6. 国際共同研究等の状況
- 7. 研究成果の発表状況
- 8. 引用文献

II-5 沿岸生態系の緩和・適応策の経済評価 102
 (国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所)

要旨

- 1. はじめに
- 2. 研究開発目的
- 3. 研究開発方法
- 4. 結果及び考察
- 5. 本研究により得られた成果
- 6. 国際共同研究等の状況
- 7. 研究成果の発表状況
- 8. 引用文献

III. 英文Abstract 131

.....

I. 成果の概要

課題名 S-14-2 生態系保全による緩和策と適応策の統合

課題代表者名 松田裕之（横浜国立大学 教授）

研究実施期間 平成27～令和元年度

研究経費（累計額） 330,659千円

（H27年度：69,576千円、H28年度 66,097千円、H29年度：66,097千円、H30年度
62,792千円、R1年度：66,097千円）

本研究のキーワード 気候変動シナリオ分析、土地利用変化、生物多様性、生態系モデル、生息適地モデル、全球生態系分布、ブルーカーボン、社会経済モデル、フットプリント

研究体制

- （1） 気候変動と気候変動対策の生態系サービスへの影響評価（国立大学法人横浜国立大学、学校法人大正大学）
- （2） 陸域生態系の強靱化による緩和策、適応策の統合評価（国立大学法人横浜国立大学）
- （3） 緩和策と適応策に資する沿岸生態系機能とサービスの評価（国立研究開発法人国立環境研究所）
- （4） 森林生態系保全による緩和策と適応策に資する森林生態系機能とサービスの評価（国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所）
- （5） 沿岸生態系の緩和・適応策の経済評価（国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所）

研究協力機関

国際マングローブ生態系協会、東京農業大学、大阪市立大学

1. はじめに（研究背景等）

生態系はそれ自身が炭素蓄積や気候調整などの機能を持つと同時に気候変動がもたらす気温上昇、海面上昇、高波、山火事等の自然災害リスクの削減効果を持つ。そのため、生態系の保全は、気候変動問題に対する緩和策と適応策の両者に有効になりえる。他方、人間活動による現世代の経済利益と、生物多様性および生態系サービスの喪失がもたらす将来世代も含めた生態リスク増大との間にはトレードオフが存在する。複数の政策シナリオによる今後の生態系サービス変化の将来予測、全球的及び局所的な緩和策と適応策の両得及び得失相反の関係を明らかにし、統合策への一助とする。

そのため、陸域生態系の強靱化または脆弱化がもたらす災害リスクへの影響を明らかにし(サブテーマ(2))、沿岸生態系の分布情報整備と緩和適応策に資する生態系サービスを評価し(サブテーマ(3))、沿岸生態系の緩和・適応機能の応答を定量的に予測し経済的に評価し(サブテーマ(5))、森林生態系における生物種間相互作用と生態系サービスへのマクロスケールの影響予測にもとづいた緩和策と適応策の統合評価を行い(サブテーマ(4))、これらを統合した気候変動と気候変動対策の生態系サービスへの影響評価を明らかにする(サブテーマ(1))。

緩和策と適応策との統合的実施によって復元力に富み、持続可能な社会を構築しようとする施策を国内外で実施するにあたり、投入可能な経済的、人的、制度的資源が限られている条件下で、緩和策、適応策にどのように取り組むことがもっとも効果的かつ効率的であるかに関する定量的基礎資料を整備し、リスクマネジメントとしての気候変動対策の適切な計画立案に貢献する。

2. 研究開発目的

気候変動と土地利用変化の生物多様性と生態系サービスへの影響を、気候変動シナリオに基づいて予測評価し、他の人間への影響と総合的に判断する手法を開発する。生物多様性保全を目的でなく、人間の幸福のための手段ととらえ、たとえば生態系を活用した防災・減災効果と人工物による効果を比較できる形で議論する。生態系は気候変動緩和策と適応策の両方に貢献し得る。他方、生態系は気候変動そのものと気候変動対策による土地利用変化の双方の影響を受ける。生物多様性への影響が重要であるなどと結論を決めずに、RCP2.6とRCP8.5の二つの気候変動シナリオにおける陸域の生物多様性への影響、沿岸生態系の藻場面積や炭素貯留効果への影響などを比較して、気候変動の影響とその対策がもたらす影響を比較する。さらに、熱帯・温帯・寒帯域における影響の不均一性、先進国と途上国の不均一性に注目する。フットプリント指標を用いてどこの国の豊かな生活がどこの国の環境に負荷をかけているかを解明する。結果として、たとえば、RCP8.5に比べてRCP2.6でかえって生物多様性が損なわれるような地域がないか、サンゴ礁を維持するよりも防潮堤のほうが高い防災効果をもつ場合がないかなど、生態系保全の是非も含めた評価ができる方法論を開発する。

そのため、沿岸生態系では全球規模のデータベースを整備し、サンゴ礁、海草・海藻藻場、マングローブの防災減災効果と炭素貯留効果を評価するとともに、それらの経済評価を試みる。陸域では気候変動と土地利用変化による各生物種の生息適地面積への影響を評価する手法を開発し、大陸別、分類群別に、RCP2.6とRCP8.5シナリオによる気候変動、土地利用変化と両者の相乗効果の影響を社会経済シナリオ別に定量予測するとともに、多様性と炭素貯留効果などの生態系機能の関係を解明する。

3. 研究開発の方法

(1) 気候変動と気候変動対策の生態系サービスへの影響評価

生態系サービスは人間の福利をもたらす。本テーマでは、生態系保全を目的とするのではなく、人間の福利のための手段として、ほかの気候変動対策と同列に扱うことで、より包括的な環境政策の立案を目指した。

①気候変動が森林の生態系サービスに及ぼす影響として、気候変動シナリオに基づく将来の生息地面積減少から、現存個体数が推定されている鳥類種の絶滅リスク評価を試みた。

②生態系は攪乱に対して復元力（Resilience）をもつが、攪乱が大きすぎるとその攪乱を止めても元に戻らず、別の定常状態に移行する双安定性があり得る。種間相互作用を考慮した群集動態モデルにより、攪乱の大きさのある安定状態から別の安定状態に急激に移行するレジームシフトの際の予兆を理論的に検討した。

③反応性窒素は酸性雨や土壌劣化などをもたらし、気候変動、生物多様性喪失と並ぶ大きな環境負荷と言われる。窒素フットプリント（NF）は、消費される商品の生産、消費、輸送中に排出される反応性窒素の量として定義される。ここでは、食料などの生産から流通、消費、廃棄などの過程ごとにNFを評価するボトムアップ解析と、窒素負荷の種類別に産業連関表によってその国別や産業別のやり取りを評価するトップダウン解析（N-Multi-region法）の両方を用い、全球排出量データベース、IPCCによる排出係数および国内および国際貿易の国際産業連関表から各国のNFをアンモニア、窒素酸化物、亜酸化窒素等の排出量の合計として計算し、どこの国の消費がどこの国のNFを高めているかを定量的に分析した。また、日本人の平均的食生活の変化からNFの時代変化を推定し、肉食主義など他の食事と比較した。

④生物自身の気候変動に対する「適応の失敗」の理論的可能性を虫媒植物—訪花昆虫モデルにより分析した。

(2) 陸域生態系の強靱化による緩和策、適応策の統合評価

①野外試験地において、降水量を人為的に操作する実験を、北海道大学および中国科学院の草地生態系で実施した。2015年より世界中の野外試験地において統一プロトコルにて実施した干ばつ実験（Drought-Net）を両所にて実施した。今回の研究においては、干ばつ操作だけでなく増雨操作も行い、生態系の多

機能性（一次生産や有機物分解など）を5年間にわたり測定した。

②樹種多様性が一次生産を介して炭素隔離と温暖化緩和に関わる可能性を検証するために、環境省モニタリング1000の森林サイトデータを用いて解析を行った。有機物分解については、環境省モニタリング1000のうち北海道から沖縄までの4サイトを選び、Global Wood Decomposition Experimentの一環として標準基質（ラジアータパイン）を用いて、2年間野外培養試験を行った。当試験では、分解者としての生物多様性を操作することで、気候要因だけでなく生物要因の相対寄与率も求めた。さらに、植物リターの多様性の消失が有機物分解プロセスに与える影響評価のために、世界中の報告論文を統合したメタ解析を行い、リター多様性の効果と気候要因とを比較した。

③生態系改変に起因する災害リスク（自然撓乱が災害になるリスク）として、干ばつや豪雨、極端気象の原因となり得るエルニーニョによる遠隔相関（テレコネクション）に着目した。土地利用データを用いて、生態系改変速度指標を開発した。また、土地利用の進展によりどれだけ生態系が脆弱化したのかを評価するために、生物多様性ホットスポット内外での生態系改変速度指標の時系列変動パターンを全球規模で解析した。そして、エルニーニョ発生時の災害リスクと生態系改変の関係性について、時系列的な因果関係を明示する解析を行った。テレコネクション影響される地域を対象に、1980-2015年に発生した自然災害を対象とした時系列同調性解析を行い、エルニーニョに駆動される自然災害報告数の増加率を求めた。さらに、生態系の健全性がある程度担保されていると期待されている世界50か所の自然保護区とその近隣地域を対比させ、気候条件と関連した撓乱体制が人為影響でどのように変化しているのかを衛星画像を用いて全球規模で解析した。最後に、日本の森林生態系の防災・減災機能における生物多様性の寄与を検証するため、林野庁による森林生態系多様性基礎調査と国土交通省・国土数値情報の土砂災害・雪崩メッシュデータを用いて、樹木種多様性と表層崩壊に伴う土砂流出量の関係性を解析した。

（3）緩和策と適応策に資する沿岸生態系機能とサービスの評価

① 海岸線・地形データ整備と生態系分布データの成型、類型化 入手可能な地形データを精査し、ESRI標高データ（空間解像度90m）を選定した。同データを基に、標高0mを海岸線として全球海岸線ポリゴンデータを作成した。重点地域として解析を進めた熱帯亜熱帯地域(40°S-40°N)については、より詳細な解像度を持つSRTM Water Body Dataset（空間解像度30m）を基に海岸線ポリゴンデータを作成した。全球マングローブ・藻場・サンゴ礁生態系分布GISデータを収集整理し、上記で作成した海岸線に合わせて成型した。また、マングローブが存在する111の国とテリトリ別に、それぞれの国・テリトリに存在する主要74樹種を、文献（学術論文・報告書・書籍）・ウェブサイト情報・調査データから網羅的に収集整理した。作成したデータを基に、標高と沿岸傾斜角・生態系の組み合わせ・構成生物類似度指数（Jaccard）による生態系の類型化を行った。

② 緩和機能と適応機能評価 沿岸生態系の炭素貯留機能と沿岸保護機能を統合評価するためのデータフォームを作成し、既存文献の整理を行った。既存文献から抽出したマングローブ生態系炭素貯留データに位置情報（緯度経度）を付与し、全球マングローブ炭素貯留機能の実測データマップを作成した。さらに、マングローブ炭素貯留量の推定モデルを地上部バイオマス・地下部ネクロマス別に検証した。各パラメータ値は、全球マングローブ分布GISデータを10kmメッシュで区切り、各メッシュの中心点における値を抽出した。なお、気象データにはWorldCLIMを用い、地形データには本課題で作成したデータを用いた。また、推定の不確実性を評価するため、実測データ集から7割のデータをランダムに選択して推定を行うプロセスを100回繰り返し、説明変数の選択頻度、推定値の変動、各変数の外挿の程度を算出した。適応機能（沿岸保護機能）の評価のため、琉球列島のサンゴ礁の造礁速度に関する情報収集と整理を行った。

③ 現地調査 沖縄県西表島の全沿岸を踏査し、マングローブ・藻場・干潟・サンゴ礁の一連生態系のトランセクト調査が可能なサイトとしてユツン川流域と沿岸を選定した。調査サイトにおいて、マングローブ—藻場—サンゴ礁をつなぐ約1kmのトランセクトを設置し、トランセクト上のコア採掘調査を行った。採取したコアのプロファイルを記載するとともに各層の化石サンゴまたはマングローブ遺体の

放射性安定同位体炭素を計測した。また、マングローブ生態系については各層の土壌炭素含有量を計測した。

(4) 緩和策と適応策に資する森林生態系機能とサービスの評価

緩和策と適応策に資する森林生態系機能とサービスの評価を目指し、大きくは以下の4つの研究関連業務をおこなった。①ニホンジカの潜在生息域の将来予測、②マツ枯れ危険域の世界規模の気候変動影響評価、③日本に分布南限があり気候変動の影響を最も受けると考えられる絶滅危惧種ニホンライチョウの潜在生息域の気候変動影響評価、④生物多様性と気候変動緩和策との間のトレードオフやコベネフィットに関する影響評価等である。

①シカについては、ニホンジカ（シカ）の過去の分布変化の情報（1978～2003年）と土地利用・積雪等の環境情報から潜在生息域を予測するモデルを構築し、そのモデルに将来の気候シナリオを当てはめることで、今世紀末のシカの分布域の変化を予測した。

②マツ枯れについては、現在および将来の気候条件下におけるマツ材線虫病（マツ枯れ）の危険域およびマツ材線虫病に感受性の高い世界のマツ属樹木種の潜在生育域を1 km²メッシュ精度で推定し、両者のマップを重ね合わせることで、将来マツ枯れ被害に対して脆弱な地域を推定した。

③ニホンライチョウ（ライチョウ）の生息に不可欠な植生である高山帯のハイマツ群落、雪田草原、荒廃地草原それぞれについて、300mスケールの高解像度メッシュで気候と地形条件から各植生の分布を予測するサブモデルを構築し、それら各植生の分布推定情報からライチョウのなわばりを予測する統計モデルを構築した。そのモデルに将来の気候値をあてはめることで、ライチョウの潜在生息域の将来変化を予測し、気候変動に脆弱な生息域や安定した生息域を特定した。

④生物多様性については、世界規模で生物の分布の情報を収集・公開しているGBIF（地球規模生物多様性情報機構）からデータを収集入手・整理し、世界の陸域生物8,428種類について、統計学的手法を用いて気温、降水量、土地利用などをもとに潜在生息域予測モデルを構築した。このモデルを用いて、2℃目標を達成するために対策を推進するケースと、何もせずに気候変動が進行するケースで世界の陸域生物の潜在生息域の変化を予測した。さらに、持続可能な社会構築、化石燃料依存など、5種類の社会経済状況を想定し、それに見合った土地利用変化を予測して、想定別に2070年代の生物多様性の変化を比較した。

(5) 沿岸生態系の緩和・適応策の経済評価

①浅海生態系によるCO₂吸収速度をはじめとした気候変動の緩和効果を定量的に予測するために、沿岸浅海域における5つの生態系（サンゴ生息域、海草藻場、海藻藻場、マングローブ、塩性湿地）に着目し、プロセスベースの海草・海藻・塩性湿地の内湾生態系の既往モデルに新たに熱帯域の浅海生態系（サンゴ・マングローブ）を導入し、主要な浅海生態系を全て考慮した新たな生態系モデルを開発した。生態系の将来的な分布面積変化によってそのCO₂吸収速度は変化しうるため、海面変位や水温を関数として、浅海生態系の面積変化も予測した。

②日本の浅海域における生態系と地形をベースとしたモデル海域において、三つの仮想計算領域を設定し、RCP2.6とRCP8.5におけるGCMデータを外力値とした計算を実施し、水温と大気-生態系間CO₂フラックスの近似式を導出した。

③全球の浅海域において地形や生態系分布は異なるため、全球の海岸を地形タイプによって類型化した既往研究に基づき、全球の浅海域を198のエリアに区分した。計算期間は現況（1986～2005年）から将来（2100年）までとし、各エリアにおけるGCMの水温データと予測した生態系面積変化から、全球浅海域における大気-生態系間のCO₂フラックスを推定した。

④浅海生態系の植生形態などを取り入れた波浪減衰・地形変化モデルを開発し、平均波高および極大波高に対する浅海生態系の波浪減衰効果を予測した。外洋境界値となる沖合波高については、第三世代全球波浪モデルの計算結果から50%確率の平均波高と0.137%の極大波高を抽出し適用した。

⑤テーマ5における社会経済モデル（AIM/CGEモデル）との結合により、大気-浅海生態系間のCO₂フラックスを金銭換算した。将来的な浅海生態系分布の消失面積をゼロとすることで生態系保全を仮定し、保全による追加的なCO₂吸収速度も金銭換算した。なお、ここでは社会経済シナリオ（SSP1～5）も考慮

した。

4. 結果及び考察

(1) 気候変動と気候変動対策の生態系サービスへの影響評価

①気候変動シナリオに基づき、レッドリストのデータベースを用いて鳥類の絶滅リスクの将来予測を試みた。過去の森林面積減少が今後も続くと仮定して絶滅リスクを予測した先行研究(Nishijima et al. 2016)と気候変動シナリオに基づいて生息適地を予測したサブテーマ(4)の成果(Ohashi et al. 2019)を応用した結果、現在までの予備的知見として、鳥類の準絶滅リスクは全体としてNishijima et al. (2016)に比べてかなり低いことがわかりつつある。気候変動シナリオでは気候変動と土地利用変化の影響を明示的に考慮し、種分布モデルを用いて将来の各生物種の生息適地の位置と面積を定量的に予測することができる。生物多様性喪失の主たる要因は土地利用変化、気候変動、乱獲、汚染、外来種、(人間活動により自然攪乱を過剰に抑制したことなどによる)自然遷移と言われるが、そのうち最大の要因であった土地利用変化に加えて気候変動影響を定量的に予測できるようになったことで、IPCCの議論と生物多様性条約のIPBESの議論を有機的に関連付けることができる。従来の絶滅危惧種の判定方法は、過去の個体数や生息地等の減少傾向が今後も続くと仮定した予測であった。しかし、気候変動シナリオに基づく土地利用変化は、上記で仮定した過去と同じ減少傾向が続くという前提とは異なる。このことは、今後の気候変動枠組み条約及びIPCCと生物多様性条約及びIPBESの基本認識のすり合わせが必要なことを示唆している。

②生態系はしばしば双安定状態をもち、攪乱が大きすぎると途中から急激に別の定常状態に移行する(レジームシフト)がおきることが指摘されている。生物群集の現存量全体が急激に変化する場合でも、種ごとにみるとそれ以前から変化の予兆がわかる場合が理論的にあり得ることを示し、生物個体数のわずかな変化から生態系崩壊の兆しを予測する理論を提案した(Kadowaki et al. 2019)。これは気候変動におけるティッピングポイントの概念にも当てはまる可能性がある。

③窒素フットプリント(NF)の国際収支を評価したところ、人口の多い中国、インド、米国とブラジルが世界の反応性窒素排出量の47%を占め、世界の反応性窒素排出量の約4分の1は国際取引によるものであった。反応性窒素排出量の物質別では、水を介した窒素(Nwp)が25%、NH₃が26%、NO_xが28%、そして温室効果ガスのN₂Oが27%という内訳だった。また、食生活を通じた窒素フットプリントを評価したところ、1961年から2011年までの日本食の変化の影響と、代替食(推奨タンパク質食、菜食主義食、低NF食、バランスの取れた日本食)の食物NFへの影響を比較した結果、1人あたりの年間の日本食のNFは1961年から2011年にかけて55%増加した。

④気候変動に生物が適応的に反応することで、かえって種の共存が損なわれる可能性があることを理論的に示した。

(2) 陸域生態系の強靱化による緩和策、適応策の統合評価

①気候変動に応じて頻度・強度が増加すると考えられている極端気象(干ばつや豪雨など)に対して、一次生産性を主とする生態系機能がどのように担保されるのか、とくに生物多様性による効果を定量化した。まず、大規模なデータ統合から、極端気象時の生態系安定化に対する生物多様性の寄与が示された(Isbell et al. 2015)。北海道の草原で実施した降水量操作試験では、植物種多様性と生態系の多機能性の間に有意な正の相関が見られた。この多様性-機能性に対する極端気象の影響を、降雨量操作実施後のデータをもとに解析したところ、降雨量操作前に見られた生物多様性と生態系機能の正の関係性が検出されなくなった。このことから、緩和策により極端気象が減少することが、植物群集構造の保全を介した生態系機能の維持に肝要であることが示唆された。中国内モンゴルの試験区では、降水量減少下では、多様な植物群集が形成する局所の不均一性が、群集全体の分解機能の安定性に寄与しうる可能性が示唆された。さらに、草本群集を構成する各種が非同調的に年変動することが、生態系の多機能性の安定性に寄与していることを明らかにした。これら草地試験における一連の解析から、生物多様性が気

候変動に対して生態系の多機能性を安定化させることで、強靱化に寄与し得る知見を提供した。

②日本の森林生態系の樹種数と一次生産速度に正の関係性を見出した。このことから、樹木多様性が森林の炭素隔離に貢献しうること、その効果が将来的な温暖化により変化する可能性が示唆された (Mori 2018)。有機物分解については、リター多様性が上がるほどに分解速度が向上することが分かった。そして、その効果は将来的に生じる気温上昇の効果に相当することも分かった。これらのことから、単一種人工林の造成や農地造成といった植生を単調化するような土地利用は、植物種多様性を低下させることで一次生産性を低下させ、ひいては落葉リターを単調化させることで生物圏の炭素循環を著しく変え得る可能性が示唆された。

③開発した生態系改変速度指標の時系列データを解析した結果、生物多様性ホットスポットと同等のポテンシャルを持つ未認識の地域が抽出された (Kobayashi et al. 2019)。この未認識スポットと生物多様性ホットスポットにおける過去500年間の土地利用の歴史を検証したところ、生物多様性ホットスポットでは、土地利用改変が比較的ゆっくりと行われてきたことが分かった。このことから、将来的な環境変動シナリオに適応する生物多様性保全策の必要性を示した。次に、生態系改変速度指標が高い地域では、エルニーニョに関連した災害の被影響者数や被害額の増加率が高い傾向が見られ、土地改変を制御することで、生態系をベースにした防災・減災の策を講じる必要性を見出した。そして、世界中の50保護区を対象に、その内外で森林の自然攪乱パターンをランドサットデータで比較した結果、人為影響下にある保護区外で攪乱パターンが単純化されていることが分かった (Sommerfeld et al. 2018)。さらに、気候と攪乱の結びつきがみられるので、今後の温暖化で干ばつや山火事などの大規模攪乱が増える可能性が示された(5)。最後に、日本の森林生態系を対象に、集水域ごとの樹種数と表層崩壊との関係性を解析したところ、表層崩壊予測モデルの予測精度が、樹種が高いほどに高まることを見出した。このことから、樹木多様性を高く維持する土地利用が、災害予測に係る不確実性を削減し得ることが示唆された (Kobayashi et al. 2017)。

(3) 緩和策と適応策に資する沿岸生態系機能とサービスの評価

①海岸線・地形データ整備と生態系分布データの成型、類型化については、生態系分布と沿岸地形データ解析により、台風や高潮・高波の襲来といった災害時に被害を受けやすい低標高・低傾斜地形を抽出し、沿岸生態系を活用したグリーンインフラが効率的に行える地域を示すことが出来た。また、マングローブ生態系の構成樹種データを基に類似度解析を行い、全球のマングローブ生態系を3つに類型化した。これにより、緩和機能（炭素貯留）や適応機能（沿岸保護機能）をカテゴリごとに評価できるようになった。台風や高潮・高波の襲来といった災害時に被害を受けやすい地形にはマングローブ林が分布していること、マングローブ植物74種の分布は2つに類型化でき、樹種の重なりが全く見られないことがわかった。以上により、全球の沿岸生態系を統一データで扱うことが可能となり、生態系の特徴を加味したカテゴリごとに生態系機能を評価し、将来影響予測が可能となった。整備したデータはサブテーマ5に提供するとともに、多くの活用が可能となるように国立環境研究所配信のwebsite (Tropical Coastal Ecosystems Portal <http://www.nies.go.jp/TroCEP/index.html>) に掲載した。

②マングローブ生態系の炭素貯留量について既報データの整理を行い、実測値データベースを作成したところ、計測値の地域が東南アジアと中南米に偏り、中東地域やオセアニア地域での計測値が少ないことが明らかとなった。マングローブ生態系のバイオマスとネクロマスを含む全炭素貯留量平均値は $887.2 \text{ MgC ha}^{-1}$ であった。また、マングローブ生態系の貯留炭素の大部分は地下部にあり、その量は地上部のバイオマスや地下部表層の炭素貯留量からは推定できないことが明らかとなった。本実測データを基に、計測値のない地域を含む全球の炭素貯留量を推定するためのパラメータ解析を行ったところ、気温・降水・日照・風・潮位差・低標高地域の拡がり指数が規定因子となっていることが明らかとなり、得られたモデルを用いて全球推定マップを描いた。地上部バイオマスの推定モデルの変数では、年平均気温が高頻度で選択された。気候変動適応機能としては、サンゴ礁のコア分析に関する既報データ

の整理を行い、サンゴ礁は、およそ10,000年前から形成されており、6,000年以降に防波機能を持つ礁嶺部分が形成されていることが明らかとなった。化石サンゴの年代から推定される礁嶺の堆積速度は6-83cm/100年となり、IPCCによって予測されている海面上昇速度の43cm/100年（RCP2.6シナリオ）、84cm/100年（RCP8.5シナリオ）と比較すると、今後の温暖化の推移によっては、温暖化に伴う海面上昇に追従できる場合があることが明らかとなった。

③野外調査地西表島ユツン川流域で計測したマングローブの土壌炭素貯留量はおよそ100-200MgC/haで、全球の実測データ平均値744.9 MgC ha⁻¹と比べると少なめであった。西表島はマングローブ分布域の中では北限に近く、平均気温が比較的低いことなどが反映されていると考えられる。また、陸側から海側になるにつれて炭素貯留量が少なくなっていた。炭素含有量の深度プロファイルを見ると、内陸部では表層部分に高い炭素貯留量が見られるのに対し、海側では表層部分の炭素貯留量が少ない。これらのことから、潮汐変動による有機物流出が土壌炭素含有量を規定する重要な因子であることが明らかとなった。沿岸保護機能については、コア各層の放射性炭素同位体値と層深から算出された堆積速度は、マングローブ域で26-76cm/100年、サンゴ礁で62-69cm/100年となった。一方で、マングローブは場所によってはRCP2.6シナリオでも追従できない可能性があることが明らかとなった。

（４）緩和策と適応策に資する森林生態系機能とサービスの評価

①シカについては、現状維持シナリオにおいてもシカが2103年には東北地方の日本海側を除く本州・九州および四国で広く分布拡大することが予測された。将来、人口減少で居住地域が縮小するシナリオでは、居住地域の辺縁部でシカが分布拡大する傾向がみられた。一方、気候変動で積雪期間が短縮するシナリオでは、東北地方の日本海側にもシカが分布拡大する傾向がみられた。人口減少と積雪期間の短縮がどちらも起きた場合には、国土の9割以上がシカの潜在生息域になると予測された。このことは、積雪減少地域のみではなく、人口減少地域におけるシカの管理も必要であることを示唆しており、今後の野生鳥獣管理政策の策定に貢献できる。

②マツ枯れについては、将来の気候変動にともなって、マツ枯れ被害発生危険域は東ヨーロッパ、中央アジア、極東ロシアにまで拡大することが予測された。例えばRCP8.5シナリオの2070年代には、マツ枯れ被害危険域は現在の約2倍の面積に拡大し、マツ枯れに罹患しやすい世界のマツ21種の分布域のうち約50%を占めることが判明した。そのようなリスクを抑制するためには、マツ材の検疫体制の充実など、国際的な取り組みの必要性が示唆された。

③ライチョウについて潜在生息域を推定する統計モデルを北アルプス地域において構築した結果、ライチョウは尾根線に近く、ハイマツ群落や雪田草原群落、風衝地群落といった高山植物群落がバランスよく成立する場所で生息する確率が高いことが判明した。また潜在生息域の将来変化を予測評価した結果、経済成長を重視した将来の気候シナリオ下では、今世紀末（2081～2100年）の潜在生息域面積は、最悪の場合、現在の0.4%にまで減少すると予測された。

④生物多様性については、世界の維管束植物1,605種、鳥類4,796種、哺乳類1,137種、両生類509種、爬虫類381種の合計8,428種を対象に、気候変動対策にともなう土地利用改変と気候変動そのものが生物多様性にどの程度の影響を及ぼすのかについて、潜在生息域を推定する統計モデルを種ごとに構築して評価した。その結果、気候変動が進む今世紀後半には、気候変動対策として行うエネルギー作物の栽培や植林の拡大は、一部地域では生物多様性の損失をもたらすものの、気温上昇の抑制作用の恩恵が上回り、世界全体としては生物多様性の保全に強く貢献することが明らかとなった。つまり、エネルギー作物に依存した気候変動対策による自然生態系への副次的な悪影響が懸念されてきたが、本研究の結果は「土地改変による影響を考慮しても、気温上昇を2℃以内に抑えることで、生物多様性の損失を抑えられる」ということを明らかにした。

（５）沿岸生態系の緩和・適応策の経済評価

①浅海生態系の面積変化については、サンゴ生息域が大幅に消失するものの、海藻藻場をはじめ他の生態系の面積は大きく変化せず気候変動に適応する可能性が示された。

サンゴ生息域においては、現況から2030sにかけて、RCP2.6と8.5ともにおよそ80%まで面積は縮小するが、RCP2.6では2090年代には現況の75%まで縮小する可能性が示された。一方でRCP8.5においては2030年代以降も縮小し続け、2090年代に現況の約25%の面積となると予測された。海草藻場については、RCP2.6と8.5ともに、現況から2030年代にかけて分布面積が拡大し、RCP2.6においてはそれ以降に拡大を繰り返して2090年代には現況とほぼ同じ、RCP8.5は2030年代以降も拡大を続け、2090年代では現況よりも10%以上拡大する結果となった。海藻藻場の全球面積は現況から2090年代までRCP2.6と8.5ともにほぼ横ばいで、2090年代にはRCP8.5ではおよそ1%拡大、RCP2.6では1%程度縮小する予測結果となった。塩性湿地の全球総面積では、RCP2.6とRCP8.5ともに2090年代にかけて、海面変位により現況よりも面積が拡大する結果となった。両シナリオとも2030年代にかけての面積拡大率はおよそ4%で同等であったが、RCP2.6では2090年代まで横ばい、RCP8.5では少しずつ拡大し続けて2090年代では現況に比べておよそ6%拡大する可能性が示された。マングローブ分布域の将来変化においては、RCP2.6とRCP8.5いずれでも、現況から2090年代までおよそ1%以内で現況と大きく面積が変わらない可能性が示された。

②大気-生態系間のCO₂フラックスの全球推計は、RCP2.6からRCP8.5へと緩和策が弱くなるにつれて、水温上昇により浅海生態系におけるCO₂吸収速度が顕著に減少し、2100年にはRCP8.5において10億トンCO₂/年減少する予測となった。よって、浅海生態系によるCO₂吸収速度を維持するためには、生態系の分布面積の消失を抑えるだけではなく、厳しい緩和策によって温度上昇を抑えることも重要となる可能性がある。

大気-生態系間のCO₂フラックスと水温との関係から、198の各エリアにおける水温および生態系面積を掛け合わせることで、全球浅海域におけるCO₂フラックスを推定した。ロシア北岸が最大となり、およそ4億トンCO₂/年、次いでアラスカ北岸がおよそ2億トンCO₂/年の吸収速度であった。東南アジア、オーストラリア東岸、アメリカ大陸東岸、中央アジアではそれぞれ1億トンCO₂/年程度の吸収速度となっていた。日本を含むその他のエリアは吸収と放出がほぼ等しくなったが、全球的には吸収傾向が強い結果となった。将来予測においては、RCP2.6では現況と大きく変わらない結果となったが、RCP8.5では温暖化の影響によって東南アジアや中央アジアは吸収速度が低下した。前述のとおり、浅海生態系の分布面積は大きく変化しなかったが、CO₂吸収速度は顕著に低下した。その理由として、水温上昇によるCO₂の吸収速度への影響が大きい可能性がある。

③浅海生態系による波浪減衰および地形変化抑制効果においては、主要な生態系が全て存在する複合型のエリアでは、リーフの存在によって沖合から伝播する波高は大幅に減少するが、海岸浸食と海面上昇の影響によって汀線が数百メートル以上後退する可能性が示された。

八重山諸島を想定した岸沖断面地形によると、(a)複合型：リーフ・植生有り、(b)無植生型：リーフ有り・植生無し、(c)無リーフ型：リーフ無し・植生有り、(d)無生態系型：リーフ・植生無しの四つのいずれの条件においても、汀線付近が大きく侵食されており、現在の汀線位置が1622 mであるのに対し、将来の汀線位置は1126-28 mと約500 m陸側に後退すると予測された。つまり、リーフの有無によって汀線後退量はほとんど変化しなかった。

④浅海生態系の緩和策の経済評価において、社会経済モデルとの結合でCO₂吸収速度を金銭換算した結果、RCP2.6における炭素削減費用が最も高騰する場合に、吸収された炭素に大きな価値(1,000億USD/年以上)が生じる可能性が示された。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

1. 気候変動と関連して頻発するようになった自然災害に対する自然ベースの解決策(NbS)において、森林樹種の多様性が生態系機能に果たす役割を初めて解明した。
2. マングローブ生態系の炭素貯留量に関して、全球実測データが比較可能となり、炭素貯留機能について環境因子を用いた類型化分析をすることが可能となった。
3. サンゴ礁の防波機能に関して、防波構造を持つ礁嶺の堆積速度は6-83 cm/100yrで、将来の海面上昇

に追従できる可能性を示し、サンゴ礁保全の新たな必要性と有用性を示した。

4. 気候変動シナリオにおける気候変動と土地利用変化に基づき、現在の各種の生息地分布から将来の生息適地を予測する種分布モデルを確立し、動植物の5大分類群ごとにその影響を評価できる手法を確立した。また、温暖化影響が顕著なニホンジカの分布拡大、マツ枯れの世界規模での発生危険域の拡大、日本に分布南限があり温暖化影響が最も懸念される中部山岳高山帯の希少種であるニホンライチョウの潜在生息域の縮小を高解像度で予測した。
5. 水温と生態系面積を考慮した上での大気-生態系間CO₂ガス交換速度の全球推計を行い、生態系による吸収速度が2100年にRCP8.5において10億トン（CO₂/年）減少する可能性を示した。
6. 社会経済モデルとの結合によって生態系保全による追加的なCO₂吸収速度の金銭換算を行った結果、RCP2.6において吸収された炭素に1,000億(USD/年)以上の価値が生じる可能性が示された。

（2）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

1. 気候変動適応計画、第五次環境基本計画、第3期海洋基本計、第5期科学技術基本計画、港湾の中長期政策（PORT2030）のすべてにおいて、ブルーカーボンに関する事項が新たに明記された。
2. 横浜市「平成27～28年度横浜市ブルーカーボン検討委員会」の委員として、横浜市で社会実践されている海域を活用したカーボンのセットについて助言し、その内容が採択され実践された。
3. JST「研究開発の俯瞰報告書」環境・エネルギー分野（2019年）において、環境領域2「生物多様性・生態系の把握」および「生物多様性・生態系の管理・活用」の執筆を行った。
4. 生物多様性国家戦略2012-2020の国別目標B-5に関する関連指標群から「日本のサンゴ礁、藻場、干潟等における各種指定区域の面積」について本課題成果が反映された（H20以来の更新）。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

1. G7政府首脳に対する科学政策提言「Gサイエンス学術会議共同声明」のうち、生物多様性と生態系サービスに関わる宣言文策定に貢献（2020年5月28日に米国科学アカデミーより[共同声明](#)公開）
2. COVID-19によるUNFCCC COP26の延期に伴い、国際条約等の会議の進め方、衡平性の担保など、今後のサミットの在り方を依頼執筆した（[Nature Climate Change](#)）。（2020年6月1日公開）
3. Kuwae, T. “Blue Carbon in Shallow Coastal Ecosystems”, 気候変動枠組条約第24回締約国会議（UNFCCC COP24）サイドイベントで招待講演，ポーランド・カトヴィツェ，年月：2018年12月7
4. IPCC海洋・雪氷圏特別報告書, Expert Reviewer, 2018年12月～2019年2月.
5. IPCC AR6 WGIIならびにWGIII（IPCC第6次評価報告書）,Expert Reviewer,2019年11月～2020年2月
6. Kuwae & Hori (2019)” Blue carbon in shallow coastal ecosystems: carbon dynamics, policy, and implementation” で示した全球浅海生態系の大気中CO₂吸収速度推計値のベンチマーク化が期待される。
7. 海面上昇に追従できる可能性はサンゴ礁が健全であることが前提となっており、防波機能の維持という観点でもサンゴ礁の保全を推進することが必要であることを示した。
8. 日本学術会議・第24期学術の大型研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン2020）のうち学術大型研究計画40（統合生物学分野）および46（農学分野）の作成に貢献。
9. 日本学術会議・農学委員会林学分科会による気候変動下で期待される木質資源の有効利用についての提言に貢献した。今後の農林環境政策に反映されると期待される。（2020年度に公開予定）

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) A. S. Mori, Environmental controls on the causes and functional consequences of tree species diversity. J Ecol 106, 113-125 (2018).
- 2) Y. Kobayashi, K.-i. Okada, A. S. Mori, Reconsidering biodiversity hotspots based on the rate of historical

- land-use change. *Biol Conserv* 233, 268-275 (2019).
- 3) A. Sommerfeld et al., Patterns and drivers of recent disturbances across the temperate forest biome. *Nat Commun* 9, 4355 (2018).
 - 4) Y. Kobayashi, A. S. Mori, The Potential Role of Tree Diversity in Reducing Shallow Landslide Risk. *Environmental management* 59, 807-815 (2017).
 - 5) T. INOUE, A. KHOZU, and A. SHIMONO: *Tree Physiol.*, DOI: 10.1093/treephys/tpz088 (2020), Tracking the route of atmospheric nitrogen to diazotrophs colonizing buried mangrove roots.
 - 6) H. Ohashi, T. Hasegawa, A. Hirata, S. Fujimori, K. Takahashi, I. Tsuyama, K. Nakao, Y. Kominami, N. Tanaka, Y. Hijioka and T. Matsui: *Nature Communications*, 10, 5240 (2019) Biodiversity can benefit from climate stabilization despite adverse side effects of land-based mitigation.
 - 7) M. Hotta, I. Tsuyama, K. Nakao, M. Ozeki, M. Higa, Y. Kominami, T. Hamada, T. Matsui, M. Yasuda and N. Tanaka: *BMC Ecology*, 19, 23 (2019) Modeling future wildlife habitat suitability: serious climate change impacts on the potential distribution of the Rock Ptarmigan *Lagopus muta japonica* in Japan's northern Alps.
 - 8) Y. AKAJI, T. INOUE, H. TOMIMATU, A. KAWANISHI: *Trees*, DOI 10.1007/s00468-019-01840-7 (2019), Photosynthesis, respiration, and growth patterns of *Rhizophora stylosa* seedlings in relation to growth temperature.
 - 9) H. YAMANO, T. INOUE, H. ADACHI, K. TSUKAYA, R. ADACHI and S. BABA: *Estuar. Coast. and Shelf. Sci.*, 220(vol), 166-175 (2019), Holocene sea-level change and evolution of a mixed coral reef and mangrove system at Iriomote Island, southwest Japan.
 - 10) T. INOUE, A. SHIMONO, Y. AKAJI, S. BABA, A. TAKENAKA and H.T. Chan: *Annal. Bot.*, DOI: 10.1093/aob/mcz164J, (2019), Mangrove–diazotroph relation on root, tree and forest scales–Mangrove plants create high soil nitrogenase activity with unique diazotrophic communities.
 - 11) Saderne, V., N. R. Geraldi, P. I. Macreadie, D. T. Maher, J. J. Middelburg, O. Serrano, H. Almahsheer, A. Arias-Ortiz, M. Cusack, B. D. Eyre, J. Fourqurean, H. Kennedy, D. Krause-Jensen, T. Kuwae, P. Lavery, C. E. Lovelock, N. Marba, P. Masqué, M. A. Mateo, I. Mazarrasa, K. J. McGlathery, M. P. J. Oreska, C. J. Sanders, I. R. Santos, J. M. Smoak, T. Tanaya, K. Watanabe and C. M. Duarte: *Nature Communications*, 10.1038_s41467-019-08842-6 (2019) Role of carbonate burial in “Blue Carbon” ecosystems budgets.
 - 12) Watanabe, W., Seike, K, Kajihara, R., Montani, S., Kuwae, T: *Global Change Biology*, v25, 1063-1077 (2019) Relative sea-level change regulates organic carbon accumulation in coastal habitats.
 - 13) Okada, T., Y. Mito, E. Iseri, T. Takahashi, T. Sugano, Y. Akiyama, K. Watanabe, T. Tanaya, H. Sugino, K. Tokunaga, T. Kubo and T. Kuwae: *PeerJ*, 6:e6234 (2019) Method for the quantitative evaluation of ecosystem services in coastal regions.
 - 14) Macreadie, P. I., A. Anton, J. A. Raven, N. Beaumont, R. M. Connolly, D. A. Friess, J. J. Kelleway, H. Kennedy, T. Kuwae, P. S. Lavery, C. E. Lovelock, D. A. Smale, E. T. Apostolaki, T. B. Atwood, J. Baldock, T. S. Bianchi, G. L. Chmura, B. D. Eyre, J. W. Fourqurean, J. M. Hall-Spencer, M. Huxham, I. E. Hendriks, D. Krause-Jensen, D. Laffoley, T. Luisetti, N. Marbà, P. Masque, K. J. McGlathery, J. P. Megoñigal, D. Murdiyarsa, B. D. Russell, R. Santos, O. Serrano, B. R. Silliman, K. Watanabe, and C. M. Duarte: *Nature Communications*, 10(1), 1-13, (2019) The future of Blue Carbon science.
 - 15) 桑江朝比呂・吉田吾郎・堀正和・渡辺謙太・棚谷灯子・岡田知也・梅澤有・佐々木淳: *土木学会論文集B2 (海岸工学)*, 75, 10-20 (2019). 浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計
 - 16) Kadowaki K, Nishijima S, Kéfid S, Kameda KO, Sasaki T; *Ecological Indicators* 85:991–998 (2018) Merging community assembly into the regime-shift approach for informing ecological restoration. *Ecological Indicators* 85:991–998. DOI:10.1016/j.ecolind.2017.11.035
 - 17) Oita A, Nagano I, Matsuda H: *Ambio (Springer)* 47:318-326 (2018/3) Nitrogen footprint of food

- consumption reduced by balanced Japanese diet. *Ambio* (Springer) DOI:10.1007/s13280-017-0944-4
- 18) T.INOUE T: T.KUWAE and M.HORI eds. *Blue carbon in Shallow Coastal Ecosystems: Carbon Dynamics, Policy, and Implementation*, Springer, pp.373(2018), *Carbon Sequestration in Mangroves*.
 - 19) 熊野直子、田村誠、井上智美、横木裕宗：土木学会論文集G（環境）、74, 5（巻、号）、I_395-I_404(2018), フィリピン・ベトナムにおけるグリーンインフラの海面上昇への適応評価と費用効果
 - 20) 田多一史・中山恵介・桑江朝比呂：土木学会論文集B2-74（海岸工学）、I_1237—I_1242（2018）アマモ場におけるCO2分圧モデルの開発。
 - 21) Tokoro, T and T. Kuwae: *Frontiers in Marine Science*, 5:286 (2018) A new procedure for post-processing eddy-covariance data to better quantification of atmosphere-aquatic ecosystem CO2 exchange.
 - 22) Tanaya, T., K. Watanabe, S. Yamamoto, C. Hongo, H. Kayanne and T. Kuwae: *Biogeosciences*, 15, 4033-4045 (2018) Contributions of the direct supply of belowground seagrass detritus and trapping of suspended organic matter to the sedimentary organic carbon stock in seagrass meadows.
 - 23) 田多一史・中山恵介・駒井克昭・Jeng-Wei TSAI・佐藤之信・桑江朝比呂：土木学会論文集B3-74（海洋開発）、I_144-I_149（2018）成層を考慮したアマモ場における溶存無機炭素の変動解析。
 - 24) A. Hirata, K. Nakamura, K. Nakao, Y. Kominami, N. Tanaka, H. Ohashi, T.K. Takano, W. Takeuchi and T. Matsui: *PLOS ONE*, 12, e0182837 (2017) Potential distributions of pine wilt disease under future climate change scenarios.
 - 25) H. YAMANO, H.KAYANE, T.YAMAGUCHI, T.INOUE, Y. MOCHIDA, S. BABA: *Quaternary Research*, 88(3), 400-408, (2017), Revisiting late Holocene sea-level change from the Gilbert Islands, Kiribati, west-central Pacific Ocean.
 - 26) 田多一史, 所立樹, 渡辺謙太, 中山恵介, 桑江朝比呂：土木学会論文集B2-73（海岸工学）、I_1297-I_1301（2017）都市型浅海域における海水中CO2分圧の日周変化。
 - 27) 中山恵介, 駒井克昭, R. W. Elner, 桑江朝比呂：土木学会論文集B3-73（海洋開発）、I_618-I_623（2017）Roberts Bank tidal flatにおける干潟内流動と塩分濃度。
 - 28) 岡田知也, 三戸勇吾, 高橋俊之, 高濱繁盛, 秋山吉寛, 黒岩寛, 渡辺謙太, 棚谷灯子, 杉野弘明, 徳永佳奈恵, 久保雄広, 桑江朝比呂：土木学会論文集B2-73（海岸工学）、I_1561-I_1565（2017）干潟健全度指数と経済的価値による干潟のサービスの統合的評価手法。
 - 29) 中山恵介, 中西佑太郎, 中川康之, 茂木博匡, 田多一史, 桑江朝比呂：土木学会論文集B3-73（海洋開発）、I_821-I_826（2017）波・流れ場とアマモの連成モデルの構築。
 - 30) Oita A, Malik A, Kanemoto K, Geschke K, Nishijima S, Lenzen M: *Nature Geoscience*. 9:111-115 (2016/2) Substantial nitrogen pollution embedded in international trade. *Nature Geoscience*. 9:111-115 10.1038/ngeo2635
 - 31) H. Ohashi, Y. Kominami, M. Higa, D. Koide, K. Nakao, I. Tsuyama, T. Matsui and N. Tanaka: *Ecology and Evolution*, 6, 7763-7775 (2016) Land abandonment and changes in snow cover period accelerate range expansions of sika deer.
 - 32) AKHAND, A., A. CHANDA, S. MANNA, S. DAS, S. HAZRA, R. ROY, S. B. CHOUDHURY, K. H. RAO, V. K. DADHWAL, K. CHAKRABORTY, K. M. G. MOSTOFA, T. TOKORO, T. KUWAE, and R. WANNINKHOF: *Geophysical Research Letters*, 43, 11726-11735 (2016) A comparison of CO2 dynamics and air-water fluxes in a river-dominated estuary and a mangrove-dominated marine estuary
 - 33) 田多一史, 中山恵介, 所立樹, 渡辺謙太, 桑江朝比呂：土木学会論文集B2-72（海岸工学）、I_1363-I_1368 (2016). 湧水に着目したコムケ湖の水質変動特性の把握
 - 34) 田多一史, 中山恵介, 所立樹, 渡辺謙太, 桑江朝比呂：土木学会論文集B3-72（海岸開発）、I_982-I_987 (2016). 春季出水期におけるコムケ湖の水質変動解析と大気-海水間CO2フラックスの推定

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) A. SHIMONO and T. INOUE: The 67th Annual Meeting of the Ecological Society of Japan, Nagoya 2020 (ESJ67), 2020 “Rhizophore diazotrophic communities developing with mangrove forest formation.”
- 2) 津山幾太郎、松井哲哉：日本生態学会名古屋大会（2020）「ニホンライチョウの潜在生息域から見た分布変遷と脆弱性評価」
- 3) Banno, M., T. Tomii, T. Tanaya, and T. Kuwae: Ocean Sciences Meeting 2020 (2020) Novel Observation of Bathymetry in the Surf Zone using a UAV-mounted Green LiDAR
- 4) Furuta, N. Ecosystem Approaches as Nature-based Solutions for Climate Change Adaptation, G20 Climate Sustainability Working Group (CSWG): 2nd Meeting 2019 / Nagano, Japan, 16 April 2019
- 5) Furuta, N. The Role of Wetlands for Disaster Risk Reduction, International Symposium on the Conservation of the Coastal Areas of the Bay of Bengal, 7 March 2019 Dhaka, Bangladesh
- 6) 宮城豊彦、馬場繁幸、井上智美、赤路康朗、趙学群：第25回日本マングローブ学会大会（2019）「全球規模ダイレクトセンシングによるマングローブ林分分布状況把握の可能性と意義」
- 7) N. KUMANO, M.TAMURA, T.INOUE, H.YOKOKI: 2019 AGU Fall Meeting, Moscone west, San Francisco, 2019“Estimating the cost of coastal protection using mangrove forests against sea level rise in the Philippines and Vietnam.”
- 8) 米倉佑亮、大橋春香、西嶋翔太、平田晶子、夏川遼生、松井哲哉、松田裕之：日本生態学会神戸大会(2019)「全球スケールでの気候変動による鳥類の絶滅リスク」
- 9) 茂木博匡、柳田圭悟、近藤桂一、森佑貴、井上智美、山野博哉、桑江朝比呂：2019年度日本海洋学会秋季大会（2019）. 気候変動に伴う浅海生態系分布変化の予測
- 10) 古川恵太：沿岸域総合管理を用いたブルーエコノミーの展開について、日本沿岸域学会研究討論会、2018年7月17日
- 11) 米倉佑亮：21世紀のダム建設ブームと、生物多様性保全に向けた取り組み。日本生態学会第65回大会企画集会 2018年3月18日 9:00-11:00
- 12) Furuta, N. Advancing ecosystem-based solutions for disaster risk reduction – perspectives and lessons from Japan, 2018 International Symposium on Resilience of SEPL, Taipei, Taiwan on 26 February 2018.
- 13) H. MOKI, A. SOHMA, H. SHIBUKI, K. TOYODA, A. AKHAND, K. WATANABE, T. TOKORO, T. INOUE, H. YAMANO, M. MANNNO, Y. NAKAYAMA, H. MATSUDA and T. KUWAE: JpGU-AGU Joint Meeting 2018, Chiba, Japan, 2018““The Estimation of CO2 Flux in Subtropical Coastal Ecosystems Using a Numerical Model.”
- 14) M. TAMURA, N. KUMANO, T. INOUE, H. YOKOKI: Hanoi Forum 2018, Hanoi, Vietnam, 2018“ Impact and cost assessment of coastal protection mixing green infrastructure against sea level rise in Vietnam.”
- 15) Shoji, A., K. H. Elliott, S. Aris-Brosou, H. Mizukawa, S. Nakayama, Y. Ikenaka, M. Ishizaka, T. Kuwae, K. Watanabe and Y. Watanuki: The 45th Pacific Seabird Group Annual Meeting (2018) Migratory seabirds are responsible for mercury biotransport from marine to terrestrial ecosystems.
- 16) Akhand, A., K. Watanabe, T. Tokoro, A. Chanda and T. Kuwae: Japan Geoscience Union 2018 (JpGU2018) (2018) Air-water CO2 flux in a subtropical mangrove-seagrass-coral continuum: A comparative study.
- 17) Moki, H., A. Sohma, T. Shimuki, T. Toyoda, A. Akhand, K. Watanabe, T. Tokoro, T. Inoue, H. Yamano, M. Bannno, Y. Nakagawa, H. Matsuda and T. Kuwae: Japan Geoscience Union 2018 (JpGU2018) (2018) The estimation of CO2 flux in subtropical coastal ecosystems using a numerical model.
- 18) Moki, H., K. Taguchi, Y. Nakagawa, S. Montani and T. Kuwae: Asia Oceania Geosciences Society 15th Annual Meeting (2018), A new 3-D physical model for the drag force of submerged aquatic vegetation

- (SAV) in a shallow coastal waters.
- 19) Tada, T., K. Nakayama, K. Komai, J. W. Tsai, Y. Sato and T. Kuwae: ECSA, 57 (2018) Numerical modelling of the spatial variation of CO₂ fugacity in water at Komuke lagoon in Hokkaido, Japan
 - 20) Furuta N. Advancing Eco-DRR for Urban Resilience, Sharing output of Asian Wetland Symposium 2017: focusing on functions and roles of urban wetlands for disaster risk reduction. 13th Meeting of the Conference of the Parties to the Convention on Wetlands Side Event, 26th October 2018
 - 21) T. INOUE: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017“Function of mangrove plants-Roots and soil chemicals.”
 - 22) T. INOUE, S. BABA, F. ISHIHAMA, A. KAWANISHI, F. HAYASHI, N. OHSHIRO, M. KEZUKA, Y. MOCHIDA, H. T. CHAN, M. KAINUMA, N. KIMURA, H. YAMANO, T. KUWAE and H. MATSUDA: International Conference on Sustainable Mangrove Ecosystems, Bali, Indonesia, 2017“Carbon storage of mangrove ecosystems: estimated models and global maps applied their models.”
 - 23) T. INOUE: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017“Function of mangrove plants-Roots and soil chemicals.”
 - 24) H. YAMANO and T. INOUE: Environmental Scientists Network for Asia-Pacific Islands, Okinawa, Japan, 2017“Conservation and evaluation of the functions of coastal ecosystems for ecosystem-based management of tropical and subtropical islands.”
 - 25) 西嶋翔太：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。日本生態学会第63回大会自由集会「生態学×国際貿易—国境を越える人間生活の生態影響」 2016年3月22日
 - 26) 種田あずさ：窒素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 日本生態学会第63回大会自由集会「生態学×国際貿易—国境を越える人間生活の生態影響」 2016年3月22日
 - 27) Sakai A, Matsuda H: Japanese Coordinating Committee for MAB, a scientists network that connects local and governmental MAB activities. Scientific Networking Workshop. The 4th World Congress of Biosphere Reserve, 16 March 2016, Lima.
 - 28) S. BABA, T. INOUE : The International Symposium on Mangroves, Pambala, Kakkapalliya, Sri Lanka, 2016 “More collaboration needed to protect Mangrove ecosystems.”
 - 29) S. BABA, H.T. CHAN, M. KAINUMA, N. OSHIRO, M. KEZUKA, N. KIMURA, T. INOUE : International Conference on Climate Change, Biodiversity and Ecosystem Services for the Sustainable Development Goals (SDGs), Phetchaburi Province, Thailand, 2016 “Adaptation to climate change through mangrove rehabilitation involving local community participation.”
 - 30) H. Yamano : 13th International Coral Reef Symposium, Honolulu, Hawai’ i, 2016 “Marginal coral reefs and coral communities in Japan.”
 - 31) T. Matsui, A. Hirata, K. Nakao, H. Ohashi, N. Tanaka and K. Nakamura: 7th EAFES international congress, Daegu, Korea (2016)"Predicting pine wilt disease spreading under the climate change in East Asia"
 - 32) TOKORO, T and T. KUWAE: Oceanflux Greenhouse Gases Evolution (2016) Characteristics of coastal CO₂ flux estimated from comparison of eddy covariance method with conventional methods
 - 33) T. INOUE: Association of Tropical Biology and Conservation Conference 2015, Honolulu, Hawaii, 2015“Root functions of mangrove plants: Keys to the highly productive mangrove ecosystems.”
 - 34) S. BABA, T. INOUE: XIV World Forestry Congress, Durban, South Africa, 2015 “Opportunities and Challenges for the Future of Mangrove Forests and their Ecosystems: An Overview of Actions by ITTO and Other Organizations.”
 - 35) H. Ohashi, Y. Kominami, M. Higa, D. Koide, K. Nakao, I. Tsuyama, T. Matsui, N. Tanaka : The 5th International Wildlife Management Congress (2015) "Combined effect of land use and climate change may accelerate range expansion of sika deer in Japan”
 - 36) TOKORO, T and T. KUWAE : 7th International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces (2015)

Evaluation of the Eddy Covariance Method for the Assessment of the Blue Carbon

- 37) MOKI, H., K. WATANABE, K. TAGUCHI, Y. TSUJI, T. TOKORO, S. MONTANI and T. KUWAE : Meeting of Asia Oceania Geophysical Society (AOGS), Singapore (2015) Estimation of carbon accumulation rate in shallow coastal waters using a numerical model
- 38) BANNO, B., Y. KURIYAMA and N. HASHIMOTO : The Proceedings of the Coastal Sediments 2015 (2015) Equilibrium-based foreshore beach profile change model for long-term data

7. 研究者略歴

研究代表者

1) 松田 裕之

京都大学理学研究科生物物理学専攻・博士後期課程修了。理学博士、現在、横浜国立大学大学院 教授

研究分担者

2) 森 章

京都大学農学研究科地域環境科学専攻・博士後期課程修了。理学博士、現在、横浜国立大学大学院 准教授

3) 井上 智美

千葉大学自然科学研究科 博士後期課程修了、博士（理学）、現在、国立研究開発法人 国立環境研究所 主任研究員

4) 松井 哲哉

東京農工大学農学部環境保護学科卒、M.Sc.in Ecology（オタゴ大）、博士（農学、東京農工大）、現在、森林研究・整備機構森林総合研究所 国際連携・気候変動研究拠点 気候変動研究室長

5) 桑江 朝比呂

京都大学大学院農学研究科修士課程修了、博士（農学、京都大学）、現在、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所グループ長

II. 成果の詳細

II-1 気候変動と気候変動対策の生態系サービスへの影響評価

国立大学法人 横浜国立大学

大学院環境情報研究院

大学院環境情報研究院

統合的海洋教育研究センター

統合的海洋教育研究センター

学校法人 大正大学

松田裕之（サブテーマ代表）

持田幸良（H27年度）

古川恵太

水井涼太（H27-H31年度）

古田尚哉

<研究協力者> 西嶋翔太（H27年度）、米倉佑亮（H28～R元年度）、種田あずさ（平成27年度）、

平成27年度～令和元年度研究経費（累計額）：65,053千円

（平成27年度：14,057千円、平成28年度：13,150千円、平成29年度：18,987千円、平成30年度：9,363千円、令和元年度：10,495千円）（研究経費は間接経費を含む）

【要旨】

気候変動シナリオに基づく生態系への影響は、気温と降水量等の変化による気候変動影響と、気候変動対策を含む人間活動による土地利用変化について、RCP8.5のSSP5とRCP2.6のSSP1などのシナリオごとに、各種の生息適地面積の変化を予測し、その面積に応じた絶滅リスク評価式を適用することで、絶滅リスクを定量的に算出できるようになった。生物多様性損失をもたらす要因は気候変動と土地利用変化の他に乱獲、汚染、外来種、自然遷移があるが、これらのうち、IPCC及び本課題の主題である気候変動と、20世紀において最大要因とされた土地利用変化の2つを定量的にシナリオごとに評価できることは大きな前進と言える。他方、生物多様性条約及びIPBESで多用されている「過去の減少傾向が今後も続く」という「シナリオ」と、上記のIPCCで多用されるシナリオは前提が異なる。よって、IPBESでは高い絶滅リスクが予測される場合にも、気候変動シナリオではそれほどでもない場合が多いことが示唆された。

生態系は攪乱に対して復元力（Resilience）をもつが、攪乱の大きさが一時的にティッピングポイントを超えるとその後も元に戻らず、しばしば劇的に変化し（レジームシフト）、別の定常状態に移行する。生物種を分けず全体の個体数を検討していた既存研究に対し、種間相互作用を把握したうえで、ある生物種の個体数の小さな変化を調べることで生態系の異常をより正確に検知できる可能性を示した。さらに、生態系を再生するために生物種を導入する順序を適切に組み立てることが効果的であることも示唆された。

大気圏と水圏への反応性窒素の放出は、人間の健康と生態系に悪影響をもたらす可能性がある。この潜在的な被害に対する国の貢献度の尺度として、窒素フットプリント（NF）を国際貿易に基づいて評価し、中国、インド、米国、ブラジルでの消費が世界のNF排出量の46%を占め、NFの主要な純輸出国は農業、食品、繊維の重要な輸出国であり、重要な純輸入国はほとんど先進国が占めていることを明らかにした。また、日本人の食料によるNFが時代とともに増えていること、バランスよい食事がNFを減らすことができることを示した。

国際共同研究を通じて政策立案のためのモデルベースの生物多様性予測を検証する枠組みを検討した。生物多様性愛知目標などの達成度を評価するには、観測される必須生物多様性観測要素（EBV）をモデルでどう予測し、それを検証し、必要ならモデルを改良すると同時に、目標達成に必要な実行計画を練り直す。これらを順応的管理の枠組みで進めることの必要性を説いた。

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第5次評価報告書が公開され、第1作業部会の報告書では地球の気候システムの温暖化は疑う余地がなく、人間活動が20世紀半ば以降に観測された温暖化の主な要因であった可能性が極めて高い (95%以上の可能性) とされ、地表面気温だけではなくむしろ主に海洋の水温上昇としてその影響が現れていることが述べられている。

気候変動のメカニズム解明や、気候変動に関する国際連合枠組条約 (UNFCCC) の第2条に書かれた「危険な人為的干渉とならない温室効果ガスの濃度水準」がどのくらいであるのか、さらには気候変動によってどのような影響が生じるかに関する研究が鋭意進められているが、人類はそうした気候変動に対して常に無策であるわけではなく、気候変動が生じても持続可能な開発が担保されるような対策、いわゆる適応策の効果についても研究が進められている。

IPCCでも第4次報告書以来、第2作業部会の評価報告書では緩和策と適応策とは気候変動対策における車の両輪である、と位置づけられているが、つい最近まで両者は別の文脈で取り扱われることが多く、日本では適応策への取り組みが遅れていた。2013年になってようやく適応策に関する省庁横断的な取り組みが始まったところであり、両者の統合的な実施による効果的で効率的な気候変動対策の計画立案支援、ならびにカンクン合意に基づく発展途上国向けの気候変動適応計画の策定に関わる国際交渉に資する研究開発が期待されている。

こうした研究開発の持続的な推進のために、国際的な論文を発表しているような一流の研究者に加えて新進気鋭の若手研究者を含んだ研究体制を構築し、新規研究プロジェクトを遂行した。

[キーワード] リスク評価、レジームシフト、チソフットプリント、必須生物多様性観測要素、順応的管理、国際貿易

2. 研究開発目的

生態系はそれ自体が炭素蓄積や気候調整などの機能を持つと同時に気候変動がもたらす気温上昇、海面上昇、高波、山火事等の自然災害リスクの削減効果を持つ。そのため、生態系の保全は、気候変動問題に対する緩和策と適応策の両者に有効になりえる。他方、人間活動による現代の経済利益と、生物多様性および生態系サービスの喪失がもたらす将来世代も含めた生態リスク増大との間にはトレードオフが存在する。複数の政策シナリオによる今後の生態系サービス変化の将来予測、全球的及び局所的な緩和策と適応策の両得及び得失相反の関係を明らかにすることが、統合策への一助となる。サブテーマ1では、1～5の取り組みを統合した気候変動と気候変動対策の生態系サービスへの影響評価を明らかにする。

3. 研究開発方法

生態系サービスは人間の福利をもたらす。本プロジェクトでは、生態系保全を目的とするのではなく、人間の福利のための手段として、ほかの気候変動対策と同列に扱うことで、より包括的な環境政策の立案を目指した。

① 気候変動と気候変動対策が鳥類群集の絶滅リスクに及ぼす影響を評価した。生物多様性の損失は、経済のグローバル化により生息地の劣化から遠く離れた地域での人間の消費によって加速される可能性がある。絶滅リスクに対する地球規模の貿易の影響を、種の違いを考慮して地球規模で直接定量化した研究はなかった。S-9の事後成果である先行研究 (Nishijima et al. 2016) では、鳥類の絶滅リスクに基づく新しい生物多様性フットプリント指標を提案し、世界的な木材生産と木材貿易の生物多様性への影響を評価した。木材の収穫と伐採の脅威にさらされている536種の絶滅危惧鳥類を用いて、「準絶滅」確率、すなわち「初期の個体数と森林の生息地の損失率に基づいて、生息地の損失後に個体数がある閾値を下回る」確率を計算し、準絶滅リスクに基づく生物多様性フットプリント指標を提案した。準絶滅確率は以下の p で定義される。

$$p = \frac{q_0^{N_c+1} - 1}{q_0^{N_0+1} - 1}$$

ただし q は以下の式を満たす。

$$aN_0 = \frac{q}{1-q} + \frac{(N_0 + 1)q_0^{N_0+1}}{1 - q_0^{N_0+1}}$$

a , N_0 , N_c はそれぞれ生息地面積の残存率、現在の個体数、準絶滅の閾値（図3.1.1では50個体）である。この式では、既に生息地が十分減った後、さらに生息地が減らない場合（ $a=1$ ）、絶滅リスクは0になる。また、与えられた生息地面積で個体数が環境収容力に達していることが暗に想定され、乱獲等で減っている生物種については必ずしも妥当な評価にはならないと考えられる。IUCN（国際自然保護連合）のレッドリストには絶滅の要因も詳細に記述されており、今後の減少要因が生息地減少に該当するかどうかは個別に吟味可能である。

次に、二国間の木材貿易データを使用して、木材輸出業者の生物多様性への影響を木材輸入国に関連付けた。各国における森林被覆損失の最近の傾向が2100年まで続く場合、ブラジルの鳥類が木材の生産と貿易の影響を最も急速に受け、次にインドネシアが影響を受けることがわかった（図3.1.1）。ブラジルとインドネシアの2国だけでも、全球規模の鳥類の生物多様性フットプリントの約半分を占める。大規模な木材輸入国である中国、日本、米国は、海外の絶滅リスクを大幅に引き上げると同時に、それぞれの国内への影響を減らしている。その意味で、木材輸入国は原産国の鳥類多様性に対して大きな責任があるといえる。また、複数シナリオを比較し、各国が現在の消費レベルを満たすのに必要な量の木材を国内で生産しても、絶滅種の予測される総数が減少しないことを示した。これは、メキシコやフィリピンなどの熱帯木材輸入業者や、日本や中国が国内の木材生産量を増やすと、鳥の絶滅リスクが高まるためである。本研究で提案した生物多様性フットプリント指標は、鳥の種が木材の生産と取引に大きく影響される国を特定し、鳥の種の絶滅における木材取引の役割を定量化するのに役立つ。

この成果とサブテーマ(4)で確立した種分布モデル（Ohashi et al. 2019）に基づく気候変動シナリオ解析を用いて、木材生産だけでなく、気候変動シナリオに基づく人間活動の影響、気候変動と気候変動対策の影響を定量的に評価する。IUCNレッドリストデータベースから個体数情報がわかる鳥類群集を用いた。そのうえで、全球気候モデルとしてGFDL-CM3 (gf)、IPSL-CM5A-LR (ip)、NorESM1-M (no)、HadGEM2-ES (he)、MIROC-ESM-CHEM (mi)の5つを用いて、気候変動のみ（CC）、土地利用変化のみ（LU）、両者の相乗効果（Both）による各種ごとの平均準絶滅確率を求めた。それを大陸地域別（南米、南・東南アジア、サブサハラアフリカ、カリブ諸島、中央アメリカ、西・中央アジア、北アフリカ、東アジア、ヨーロッパ、北米、オセアニア）および絶滅危惧ランク別（絶滅危惧の高いものから順に絶滅危惧IA類CR、IB類EN、II類VU、準絶滅危惧NT、低懸念LC）に評価した。また、平均値だけでなく準絶滅確率の頻度分布も検討した。

②生態系は攪乱に対して復元力（Resilience）をもつが、攪乱が大きすぎるとその攪乱を止めても元に戻らず、別の定常状態に移行することがあると考えられる。これは、一つの外部条件に対して複数の定常状態を持つことを意味する。これを代替安定状態という。湖沼の富栄養と貧栄養の代替安定状態があることがよく指摘される。また、気候変動や生息地破壊によって、生態系が短期間に劇的に変化すること（レジームシフト）がある。生態系の劇的な変化は閾値（ティッピングポイント）を伴う反応であるため、環境変化の追跡から崩壊を予測することは難しい。また、代替安定状態に移行したなら、一度失われた生物群集は環境条件を改善しても回復しづらいことが指摘される。このような背景から、レジームシフトの予兆検知や一度崩壊した生態系の回復のための方策はよく知られていなかった。今回の研究

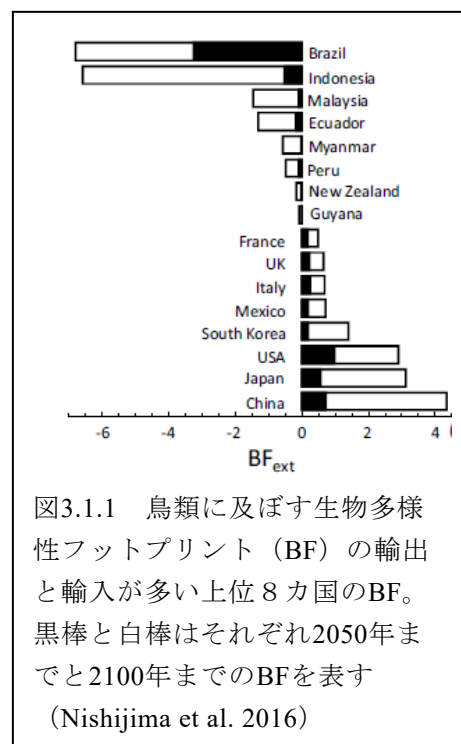


図3.1.1 鳥類に及ぼす生物多様性フットプリント（BF）の輸出と輸入が多い上位8カ国のBF。黒棒と白棒はそれぞれ2050年までと2100年までのBFを表す（Nishijima et al. 2016）

(Kadowaki et al.2018)では、生物種を分けず全体の個体数を検討していたこれまでのレゾームシフト理論に対し、生物間の相互作用を組み込むことで新しい理論的な枠組みを提示した。

用いた数理モデルは以下の通りである。

$$\frac{dN_i}{dt} = N_i \left[r_i - \sum_{j=1}^n c_{ij} N_j - \frac{m_i}{1 + \sum_{j=1}^n f_{ij} N_j} \right] + I_i \quad i \in [1:n], j \in [1:n], \quad (S1)$$

ここで N_i は種 i の個体数密度、 r_i は種 i の内的自然増加率、 c_{ij} は種 j が i に与える種間競争係数、 m_i は環境ストレスによる死亡率の増分、 f_{ij} は種 j が i に与える死亡率抑制効果、 I_i は外部からの移入率である。

この比較的簡単な数理モデルを用いて、群集全体のバイオマスの変化ではなく、特定の種に注目することで、生態系崩壊の兆しをいち早く察知する可能性を検討した。また、いったん改変された状態から復元する過程で、導入する種の順番を考慮することで、回復の成否が異なる場合があるか検討した。

③窒素フットプリント (NF) の解析 農業革命による化学肥料の多用は食糧問題の解決に大きく貢献したが、過剰に使用された反応性窒素が酸性雨や土壤劣化をもたらす。窒素負荷は気候変動、生物多様性喪失と並ぶ大きな環境負荷と言われる。大気圏と水圏への反応性窒素の放出は、人間の健康と生態系に悪影響をもたらす可能性がある。この潜在的な被害に対する国の貢献度の尺度として、国の窒素フットプリントは、国内で生産されているか国際的に生産されているかに関係なく、国内で消費される商品の生産、消費、輸送中に排出される反応性窒素の量として定義される。ここでは、NFの分析について、実際の（農業）生産、（食品）加工、流通、消費、廃棄などの過程ごとにNFを評価するボトムアップ解析と、窒素負荷の種類別に産業連関表によってその国別や産業別のやり取りを評価するトップダウン解析（N-Multi-region法）の両方を用いる。

本研究（Oita et al.2016）では、全球排出量データベース、IPCCによる排出係数および国内および国際貿易の国際産業連関表を用いて、188カ国の窒素フットプリント（NF）をアンモニア、窒素酸化物、亜酸化窒素の排出量の合計として計算する。環境フットプリントは、消費側の財とサービスの上流の流通を列挙して計算する。産業連関表の技法ができたことで、生態フットプリントや水フットプリントなど、さまざまな環境フットプリントが提案され、計算されている。

産業連関表は、行と列に同じ業種を並べた正方行列（ \mathbf{T} と置く）であり、 \mathbf{T} の各要素 T_{ij} は、業界 j で使用するために業界 i によって製造された製品の供給の金銭取引値である。これは中間取引の情報であり、取引先が「加工」してさらに別の取引先に売る。2次取引は理論的には \mathbf{T}^2 で表すことができ、3次取引以後も含めた取引の総和（ \mathbf{L} と置く）は、 \mathbf{I} を単位行列として、 $\mathbf{L} = \mathbf{I} + \mathbf{T} + \mathbf{T}^2 + \mathbf{T}^3 \dots = (\mathbf{I} - \mathbf{T})^{-1}$ と、逆行列を用いて表すことができる。

国ごとの負荷を計算するため、国ごとの産業連関表から国際貿易を考慮した多地域産業連関（MRIO）モデルを用いる。この際、国内の産業連関表の取引元が国内か海外のどこかが明記されていないと、多地域に拡張した時に輸入品を国産品と誤解したまま解析することになるので注意を要する。

具体的には図3.1.2のような手順で計算した。FAO作物生産関連データと家畜排泄物に含まれる窒素データ、IFA肥料データから始めて、a) IPCC窒素排出推計式（Nモデル）を使用した「溶脱される可能性のある窒素排出」（Nwp）、アンモニアと窒素酸化物（ $N_{NH_3+NO_x}$ ）の大気への排出、および亜酸化窒素（ N_{N_2O} ）の排出を計算した。b) aで求めた農畜産業由来の排出データをMRIO分類に変換した。c) 地球規模大気研究のための排出量データベース（EDGAR）を用いてbのアンモニア（ N_{NH_3} ）と窒素酸化物（ N_{NO_x} ）を区別し、同時に農畜産業を含む全産業からの大気への窒素排出（ N_{NH_3} 、 N_{NO_x} 、 N_{N_2O} ）をMRIO分類に変換した。d) cを用いて生産の窒素フットプリント（国の生産NFP）を拡張産業連関分析で計算した。次に、FAOの食料供給と食料廃棄データおよび下水処理における窒素除去データとEDGARベースのデータからの消費者の直接排出量とを統合して、消費の窒素フットプリント（国の消費NFP）を計算し、最後に生産と消費の両方のNFPを国の合計NFPとして計上した。

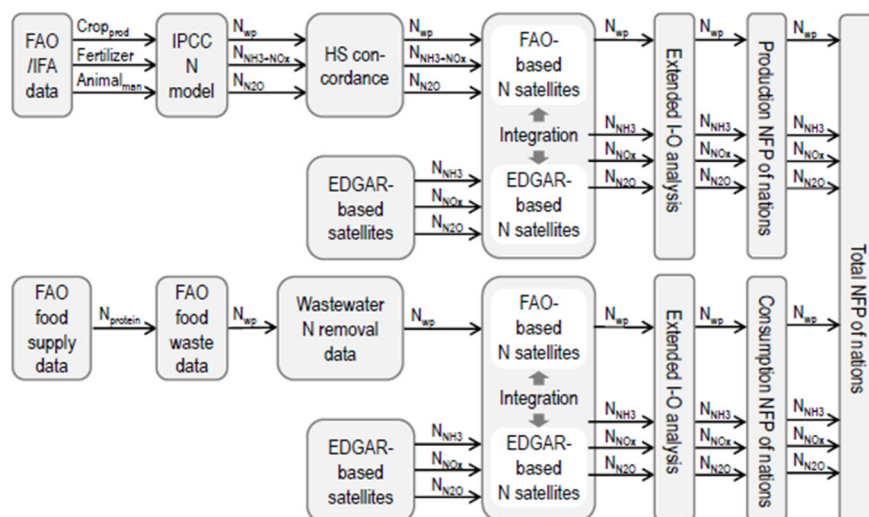


図3.1.2 窒素フットプリント計算の流れ図の概要。

消費者は、食材を選ぶことで、人間による環境中の反応性窒素の蓄積とその結果生じる環境問題に大きく影響し得る。NFは、個人の消費行動が窒素汚染にどのように影響するかを示す指標である。本研究(Oita et al.2018)では、1961年から2011年までの日本食の変化の影響と、代替食（推奨タンパク質食、菜食主義食、低NF食、バランスの取れた日本食）の食物NFへの影響を解析した。1961年（64.6g/日）以降の食生活の変更の結果、1989年（81.6g/日）まではたんぱく質摂取量が増加し、その後2001年までは横ばいで、さらに2011年（72.0g/日）にかけて減少した。1人あたりの年間の日本食のたんぱく質摂取量は、穀物由来が顕著に減り、肉と卵や乳製品が増えている（図3.1.3）。水産物は1990頃までは統計上増えていたが、その後は減少に転じた。摂取するたんぱく質の内訳も時代とともに大きく変わっている。1961年には、穀物と豆類が総タンパク質摂取量の60%以上を占めていたが、動物性タンパク質の主に魚介類から摂取していた。1975年までに、穀物と豆類の割合は総タンパク質摂取量の約半分%に低下し、乳製品、卵、肉が動物性タンパク質摂取量の42%に増えた。1989年と2001年には、穀物と豆類は総タンパク質摂取量の約40%だったが、肉、乳製品、卵は全体の約25%に増加し、動物性タンパク質の割合は全体たんぱく質摂取量の半分以上に増えた。2011年の調査では、野菜製品の寄与は安定したままだが、肉、乳製品、および卵の寄与は、動物性タンパク質摂取量のほぼ60%に増えた。

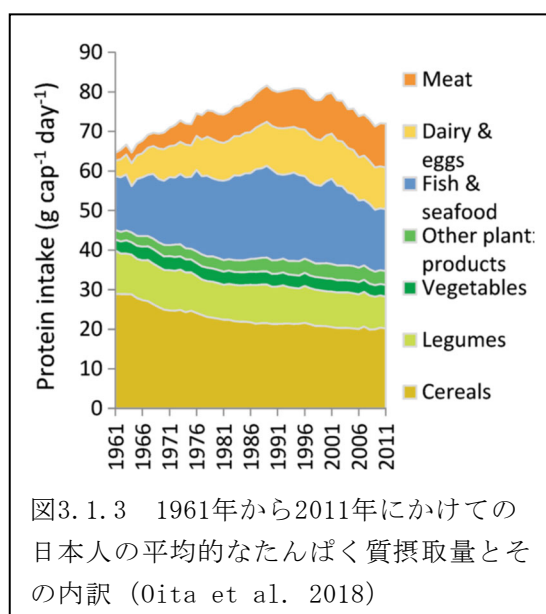


図3.1.3 1961年から2011年にかけての日本人の平均的なたんぱく質摂取量とその内訳 (Oita et al. 2018)

2011年のたんぱく質摂取量も、栄養学的には過剰とされている。ここでは窒素を単位量摂取する際の環境中への窒素排出量を考え、それを仮想窒素係数(VNF)と名付けた。VNFから、同じたんぱく質を摂取する際のNFの相違を示すことができる。さらに、全体としてのたんぱく質摂取量を考慮して、一人当たりの食生活によるNFを比較した。低NF食とは、肉、乳製品、卵、給餌養殖で育てた魚介類のタンパク質を豆類と非養殖または無給餌養殖の魚介類に代えた食事のことである。また、1975年の日本人の食生活をバランス食と呼ぶことにする。穀物依存度が少なく、動物性たんぱく質の中でも魚介類が占める割合が高い食事である。

④ 政策立案のためのモデルベースの生物多様性予測を検証する枠組みの開発

上記では、IPCCで標準的に用いられる気候変動と土地利用変化シナリオと生態学で用いる種分布モデルを駆使して、様々な気候変動シナリオに基づく生物多様性への影響の将来予測を行う研究例を紹介

した。他方で、そのような影響予測が政策提言にどのように反映され、さらに政策の成果を観測してモデルで用いた仮説の妥当性を検証し、モデルを改良し、さらに次の検証可能な目標を提案するという過程そのものの在り方を、松田も招待された国際共同研究として検討した (Myers et al. 査読中; 松田ら準備中)。これは、生態学では順応的管理 (Adaptive management) と呼ばれる。もともと予測に用いるモデルおよびそこに用いるパラメータ値が未実証であることを自覚し、政策を実施する中でモデルの検証方法も同時に考え、検証しながら必要に応じて政策を変更し (フィードバック制御)、モデルを改良し (順応学習)、次の政策提案に貢献するという過程である。気候変動とその対策における生物多様性影響評価について、その在り方自体を議論した。

政策と意思決定支援で採用されている生物多様性変化のモデルベースの予測は、土地利用変化や気候変動などの将来シナリオと政策上の選択肢の組み合わせである。現在、RCP8.5 (いわゆる4度シナリオ) をBAU (Business as Usual) とみなすかどうか議論の的となっているが、すでに気候変動対策はある程度進んでおり、20年前のBAUと現在のBAUは同じでないという理解も成り立つだろう。

将来シナリオと政策の選択肢に応じて、どのような影響があるかを数理モデルによって予測する。まず、そのモデル上の数値予測を的確に解釈し、その内容を社会に説明することが問われる。ただし、モデルはしばしば大幅に簡略化された仮定に基づいており、より精度の高いモデルを用いることで、予測力を高めることも重要だ。その結果、将来予測の解釈も変わることがある。モデルの予測力を高めるために、および予測の検証のために、隔測 (リモートセンシング) 情報などのデータを活用する必要がある。ECV (必須気候観測要素) に倣ったEBV (必須生物多様性観測要素) が提案されている (Pereira et al. 2013)。日本でも、自然植生のタイプ分け、森林等の被覆率、生物相 (群集の種組成) などは環境影響評価等の基礎的な情報となる。生物多様性の将来予測を的外れなものにしないために、複数の独立したデータを用いて、齟齬がないかを確認し、齟齬があればモデルを改良する。たとえば、被覆率は予想通りだが種組成が非現実的などということがないように点検する。

⑤ 気候変動に対する生物自身の「適応の失敗」 (biological maladaptation) の理論的可能性として、非対称種内競争に基づく季節性の変化と虫媒植物—訪花昆虫モデルを分析した。非対称種内競争などの頻度依存淘汰がある場合、適応進化は必ずしも種全体の平均適応度を最大にせず、形質の適応的变化により絶滅を招くことまでであるとされる (Matsuda and Abrams 1994)。また、種間相互作用を考慮した生物学的適応失敗の例として、気候変動に伴うマルハナバチの舌の長さの進化 (Miller-Struttman et al. 2015) を基に、送粉者1種と虫媒花2種 (浅型・深型) からなる数理モデルを開発し、解析を行った。

非対称種内競争を考慮した適応度モデルは以下の通りである。

$$f(\bar{z}, z) = \text{Exp}[-K(\bar{z}) + a(\bar{z}-z)],$$

$$K(\bar{z}) = -k(\bar{z}-z_0[T])^2,$$

ここで \bar{z} と z はある個体のある形質値とその集団平均値、 $f(\bar{z}, z)$ は集団平均値が z 、ある個体の形質値が \bar{z} のときのその個体の適応度、 a は非対称競争の強さ、 K は環境収容力、 $z_0[T]$ は環境収容力を最大にする最適な集団平均形質値で気温 T の関数、 k は z が z_0 から離れたときの環境収容力の減衰を決める係数である。量的集団遺伝学モデルにより、平均形質値 z は以下のように世代とともに変化すると仮定する。

$$\Delta z = g \left. \frac{\partial \log f}{\partial \bar{z}} \right|_{\bar{z}=z} = g[a - 2k(z - z_0)]$$

ここで g は形質値 z の集団中の相加遺伝分散、または表現型分散と遺伝率の積である。直観的には、自然淘汰に基づく平均形質値の世代間変化は、形質値の違いによる適応度の違い (適応勾配) が大きいほど、また遺伝率が高いほど、さらに集団中の表現型分散が大きいほど速く変化する。 $(\partial \log f / \partial \bar{z})_{\bar{z}=z}$ は一次近似であり、集団中の形質値 \bar{z} の分布の範囲で、対数適応度 $\log f$ がほぼ1次式で表されていることを前提としている。非対称競争がない ($a=0$) とき、 Δz は z が最適形質値 z_0 より大きいときは負、小さいときは正になり、 z は z_0 に収束し、集団の個体数は環境収容力を最大にする形質値になる。しかし、 a が正、つまりより大きな形質値が集団内で有利になるとき、平均形質値は $z=z_0+(a/2k)$ と、最適形質値より大きな値に収束する。

虫媒植物-訪花昆虫モデルでは、花の蜜腺までの奥行きを X 、昆虫の吻の長さを Y として、以下の数理モデルを用いた。

$$\frac{dX_i}{dt} = X_i \left(r_i - X_i + \frac{p_i b_i a_i Y}{1 + p_i a_i h_i X_i} - m_i \right),$$

$$\frac{dY}{dt} = Y f(L, X_1, X_2, Y) = Y \left(r_0 - Y + \frac{p_1 g_1 a_1 X_1 + p_2 g_2 a_2 X_2}{1 + p_1 a_1 h_1 X_1 + p_2 a_2 h_2 X_2} - m_i \right),$$

ただし X_i は種 i の個体数、 Y は昆虫の個体数、 r_i はそれらの内的自然増加率、 m_i は気候変動による植物の追加の死亡率、 g_i と h_i はそれぞれ植物 i を訪れたときの昆虫の利益と蜜を吸うのに要する処理時間、 b_i は訪花昆虫が来た時に得られる植物の授粉機会拡大の利益、 V は口吻長の適応進化の速さに関する相加遺伝分散、 f は昆虫の適応度、 p_i は花選択性を表し、 $p_i=1$ ならその花に遭遇したら必ず利用すること、 0 なら常に無視することを表す。

訪花昆虫にとっての最適な花選択性は、古典的な最適採餌理論によれば、以下のように必ず利用するか、必ず無視するかのいずれかになる。

$$p_i = \begin{cases} 1, & \text{if } g_i/h_i > g_j/h_j \text{ or } h_i < g_i h_j / g_j - 1/a_i p_i X_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

処理時間は花の奥行きを L_i と昆虫の口吻長 L とのに相性によると考えて、

$$h_i = c_i(L - L_i)^2 + k_i$$

と仮定する。ただし、 c_i と k_i は正の定数である。共進化は考えず、植物の花の奥行きは一定とし、昆虫の口吻長だけが適応的に変化すると仮定する。したがって、昆虫の適応度 f は3種の個体数とともに、口吻長に依存する。

口吻長の適応動態は、以下の式で表される。

$$\frac{dL}{dt} = V \frac{df}{dL} = 2V \left(\frac{p_1 g_1 a_1 X_1 + p_2 g_2 a_2 X_2}{1 + p_1 a_1 h_1 X_1 + p_2 a_2 h_2 X_2} \right) [p_1 a_1 c_1 (L - L_1) X_1 + p_2 a_2 c_2 (L - L_2) X_2],$$

ここで V は相加遺伝分散で、適応進化の速さを表す。植物1と2のどちらが昆虫にとって効率がよいかは、花の奥行きと口吻長次第で変わる。昆虫の花選択性 p_i は処理時間と2種の植物の個体数に左右され、個体数は気候変動による追加の死亡率に左右される。このとき、奥行きが深い植物1と浅い植物2を考え、口吻長をその中間にして両方利用する（Generalist）か、どちらかに特化する（Specialist）かの条件を探り、さらに、気候変動によりgeneralistとspecialistの条件が変わるかどうかを理論的に検討した。

4. 結果及び考察

4. 1 生物多様性フットプリント指標を用いた解析

2つの先行研究（Nishijima et al. 2016, Ohashi et al. 2019）を応用した結果、現在までの予備的知見として、鳥類の準絶滅リスクは全体としてNishijima et al. (2016) に比べてかなり低いことがわかりつつある。最終評価は査読を経てからになるが、これはOhashi et al.(2019)とも異なる結果である。また、Ohashi et al. (2019)と同様の結果として、分布が島嶼や大陸の（南半球における）南限に位置するなど温暖化した場合の移住先が少ない鳥類が大きな影響を受けること、一部の種においては気候変動対策による土地利用変化の影響が大きいことがわかりつつある。Ohashi et al. (2019)と同様に土地利用変化に比べて気候変動の影響がより大きいと考えられることがわかりつつある。

この成果とサブテーマ(4)で確立した種分布モデル（Ohashi et al. 2019）に基づく気候変動シナリオ解析を用いて、木材生産だけでなく、気候変動シナリオに基づく人間活動の影響、気候変動と気候変動対策の影響を定量的に評価することができる。現在までの予備的知見として（Yonekura et al. 準備中）、GCMを用いたRCP8.5、SSP5に基づく気候変動と土地利用変化による半世紀後の鳥類の平均準絶滅確率は、北米で11%と最も高く、カリブ諸島、中央アメリカが世界平均（4.3%）より高かった（図4.1.1）。ただし、ごく一部の種の絶滅リスクが30%以上とかなり高いが、大半の種は準絶滅リスクが1%未満であり、平均値だけで議論することには限界がある。

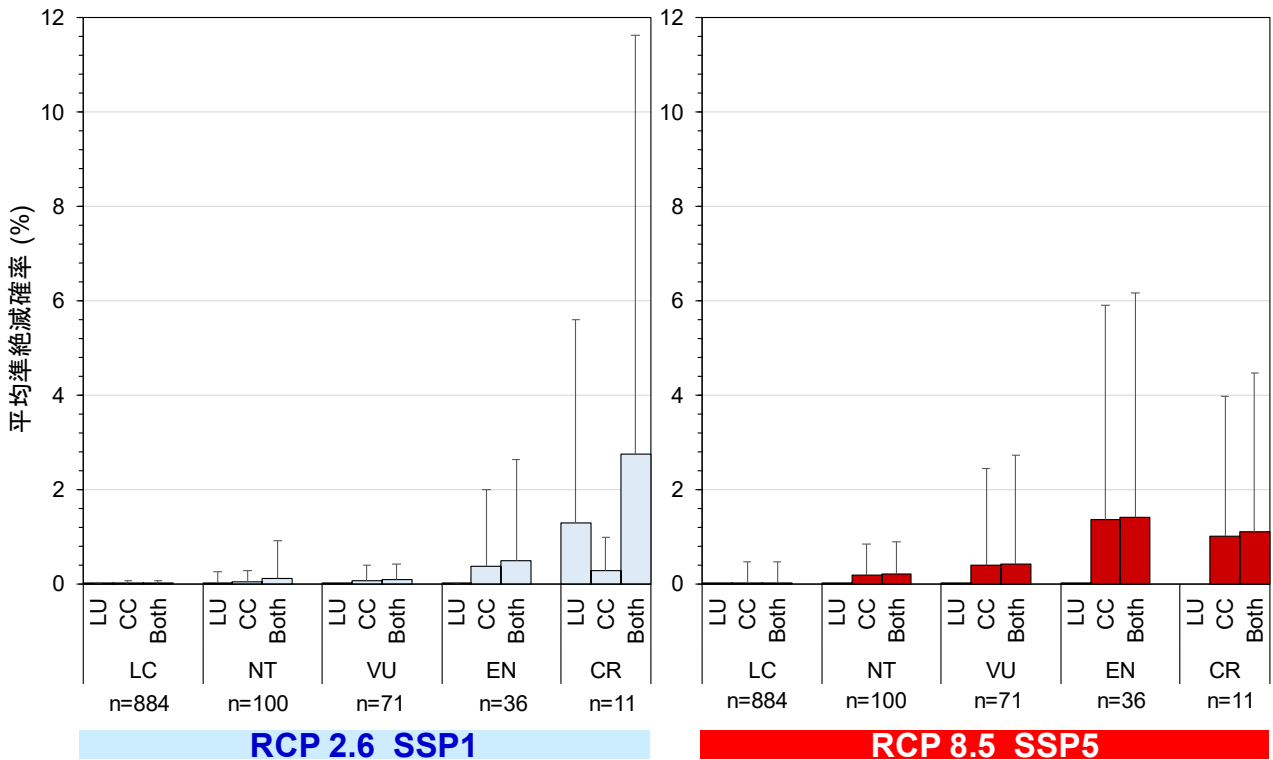


図4.1.1 GCMを用いたRCP8.5、SSP5に基づく気候変動と土地利用変化による半世紀後の生物地理区別の鳥類の平均準絶滅確率（誤差棒は標準偏差、絶滅の閾値は50個体、Yonekuraら、準備中）

第2の知見として、鳥類の準絶滅リスクは全体として先行研究（Nishijima et al. 2016）に比べてかなり低く、半世紀後までの絶滅リスクが0、すなわち生息地面積が減少しないとされるものが約87%あり、10%以上の準絶滅リスクがあるものが0.5%に留まるという結果になった（図4.1.2）。最終評価は査読を経てからになるが、これはOhashi et al.(2019)とも異なる結果である。また、Ohashi et al. (2019)と同様の結果として、分布が島嶼や大陸の（南半球における）南限に位置するなど温暖化した場合の移住先が少ない鳥類が大きな影響を受けること、一部の種においては気候変動対策による土地利用変化の影響が大きいことが分かりつつある。Ohashi et al. (2019) と同様に土地利用変化に比べて気候変動の影響が

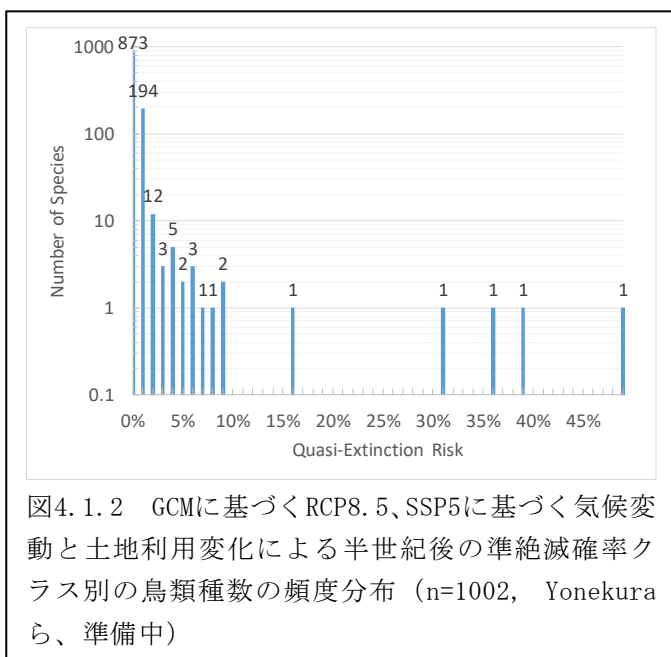


図4.1.2 GCMに基づくRCP8.5、SSP5に基づく気候変動と土地利用変化による半世紀後の準絶滅確率クラス別の鳥類種数の頻度分布（n=1002, Yonekuraら、準備中）

より大きいと考えられることがわかりつつある。

また、IUCNレッドリストで絶滅危惧ランクが高くて、必ずしも準絶滅確率が高いとは限らない。図4.1.3に示すように、CR種ではRCP2.6のほうが高い平均準絶滅確率になった。ここではそれぞれの種で、5つの全球気候モデルのうち準絶滅確率が最高になる値を選んでいる。これは気候変動対策による土地利用変化の影響がより大きいことを示唆する。前述の通り、種別のばらつきはかなり大きい。

気候変動シナリオでは気候変動と土地利用変化の影響を明示的に考慮し、種分布モデルを用いて将来の各生物種の生息適地の位置と面積を定量的に予測することができる。生物多様

性喪失の主たる要因は土地利用変化、気候変動、乱獲、汚染、外来種、(人間活動により自然攪乱を過剰に抑制したことなどによる)自然遷移と言われるが、そのうち最大の要因であった土地利用変化に加えて気候変動影響を定量的に予測することができるようになったことで、IPCCの議論と生物多様性条約のIPBESの議論を有機的に関連付けることができる。そして、Ohashi et al. (2019)と同じく、今後は気候変動が土地利用変化よりも大きな影響になると予測された。

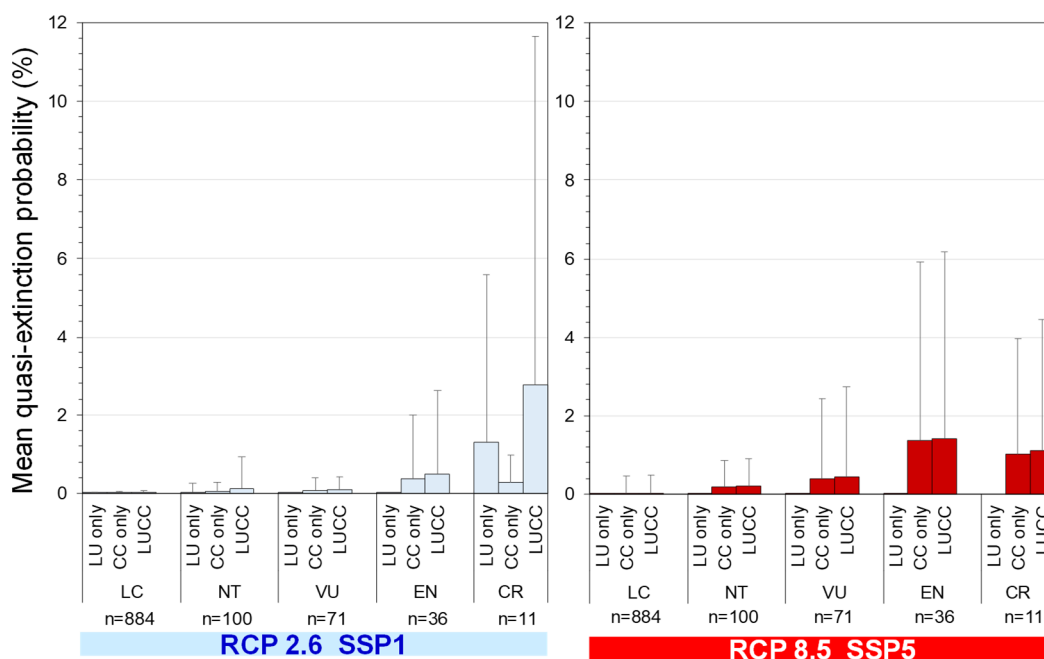


図4.1.3 1102種の鳥類のIUCNレッドリストのランク別のRCP8.5, SSP5とRCP2.6, SSP1に基づく気候変動と土地利用変化による半世紀後の平均準絶滅確率（誤差棒は標準偏差、絶滅の閾値は50個体、Yonekuraら、準備中）

我々の新たな予備的結果がNishijima et al (2016)ともOhashi et al. (2019)とも違うのは、Nishijima et al. (2016)では過去と同じ森林消失傾向が続くという前提で準絶滅リスクを計算していること、Ohashi et al. (2019)では準絶滅でなく生息適地面積の消失速度を計算していることによる。従来の絶滅危機種の判定基準や絶滅リスクに関する研究の多くは、Nishijima et al.(2016)と同様、過去の減少傾向が今後も続くと仮定した予測であった。しかし、気候変動シナリオに基づく土地利用変化は、上記で仮定した過去と同じ減少傾向が続くという前提とは異なる。Ohashi et al. (2019)はその点を考慮しているが、生息適地がある程度減っても、実際の種の絶滅には至らない場合が多かったため、評価の解釈に相違が出たと考えられる。

4. 2 生物個体数のわずかな変化から生態系崩壊の兆しを予測、理論を提案

2種系においても、種間および種内の円滑化が強い場合、種1と2の存在量の合計は、死亡率の増加に応じてヒステリシスを伴う総存在量の高い安定状態から低い代替安定状態への遷移は、途中までは存在量が高い状態を保っているがある死亡率が6.5あたりで急激に代替安定状態へと変化する（レジームシフト）。逆に代替安定状態から死亡率を下げていくと、すぐには元の状態に戻らず、往路とは異なる履歴を描く（ヒステリシス）（図4.1.4左）。しかし、本研究では2種の存在量を分けて監視すれば、種2の存在量は早い段階で異変が起き、相対的な種の存在量は早い段階から顕著で劇的な変化を示す。このような系全体での劇的な変化に先んじて種組成の変化が生じるのは、環境ストレスに対する感受性が種によって異なる場合である。

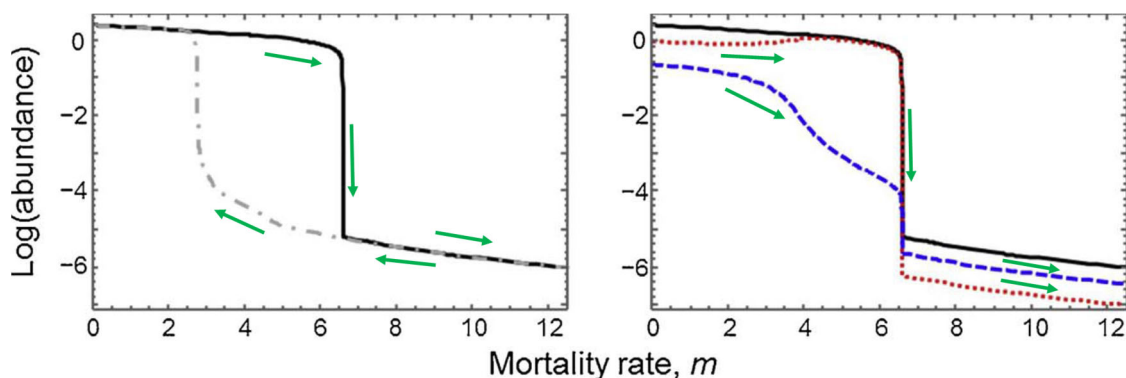


図4.1.4 左) 死亡率がゆっくりと増加する場合 (黒実線) と減少する場合 (灰色点線) の総存在量 (種1+種2) の変化。(右) 死亡率がゆっくりと増加する場合の総存在量 (黒実線) と種1 (赤点線) および種2 (青破線) の存在量 (対数) の変化。緑の矢印は時間変化を表す。 $r_1 = 1.5; r_2 = 1; c_{21} = 1; c_{12} = 0.5; c_{11} = c_{22} = 1; f_{11} = f_{22} = 10; f_{21} = f_{12} = 3; I_1 = I_2 = 0.01$ の場合の計算結果 (Kadowaki et al. 2018)。

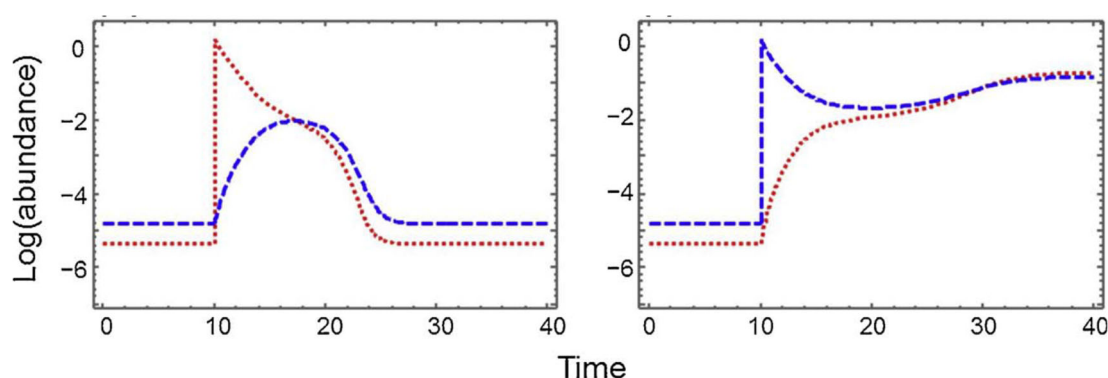


図4.1.5 種1と2を外部から移植する場合、種1 (赤点線) を (時刻10で) 先に導入すると復元は失敗し (左)、種2 (青破線) を導入すると復元に成功する (右)。(Kadowaki et al. 2018)

この数理モデルから、急激な変化と回復に関する2つの重要な洞察が導かれる。まず、種組成を考えて個々の種の存在量を監視することで、群集の急激な変化の予兆をいち早く察知できる。具体的には、生態系を記述する状態変数をいくつかに分けて監視すること、生物間相互作用が正のフィードバックを生み出す仕組みをもっていること、そして (本報告では省略するが) 調査を行う空間スケールの3つの要因が重要であることが分かった。すなわち、生態系を構成する種を明示的に区別したモニタリングを行い、生物種間相互作用を把握し、ある生物種の個体数の小さな変化を調べることで生態系の異常をより正確に検知できる可能性を示すことができた。

さらに、この理論を逆に考えて、種1と2を導入する順番を間違えると、もとの状態に回復しないことがあることも示された。環境ストレスへの耐性が低い、または内的自然増加率が低い種 (図4.1.5の種1) の再導入はコミュニティの復元に失敗する可能性がある。一方、環境ストレスへの耐性が高い、または内的自然増加率が高い種の再導入は成功する可能性がある (図4.1.5)。言い換えると、再導入すべき種固有の生態学的特性 (例えば、環境悪化への耐性、固有の人口増加率) に注意を払うことで、生態系回復の成否が分かる。総存在量の急激な変化だけを追うのでは



図4.1.6 柵の手前の有機汚泥を除去する印旛沼の復元実験 (Kadowaki et al. 2018)

なく、種ごとの特徴と種間相互作用を考慮する、群集生態学の視点が重要であり、生態系回復の実現可能性を高める指標種を定める。

印旛沼では湖全体で底質の有機汚泥を除去しているが、一部地域では浮葉植物の減少と水中植物の回復に成功したという（図4.1.6）。この例では有機汚泥除去による水質改善という非生物的行為だけで復元させたかにみえるが、水中の大形植物は貧栄養では浮葉植物より優位にあるが、有機汚泥が増えるとの関係は逆転するという。したがって、富栄養状態のまま浮揚植物の再導入を図ることは得策ではないだろう。このように、生態系復元において種間関係と種の特性を考慮することが重要と指摘した。

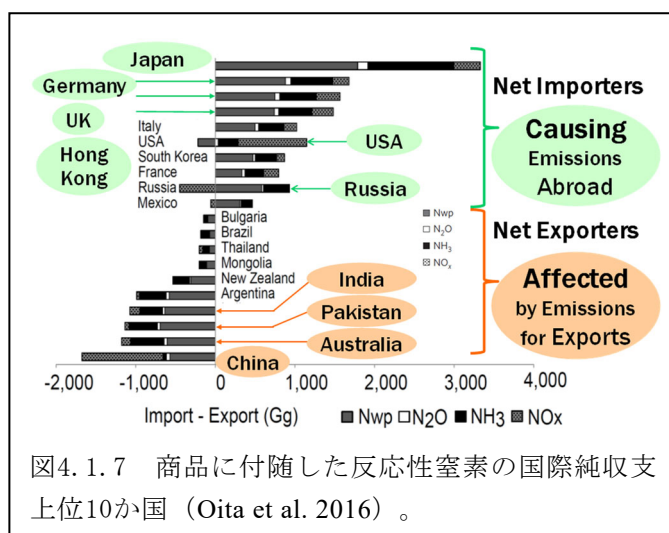


図4.1.7 商品に付随した反応性窒素の国際純収支上位10か国 (Oita et al. 2016)。

4.3 窒素フットプリントの解析

本研究 (Oita et al. 2016) で、全球排出量データベース、全球窒素循環モデルおよび国内および国際貿易の国際産業連関表を用いて、188カ国の窒素フットプリント (NF) をアンモニア、窒素酸化物、亜酸化窒素の排出量の合計として計算した。大気と水域に排出される可能性がある (潜在的な) 一人当たりのNFは、一部の開発途上国の7kgN/yr未満から一部の裕福な国の100kgN/yrまでの範囲と評価された。

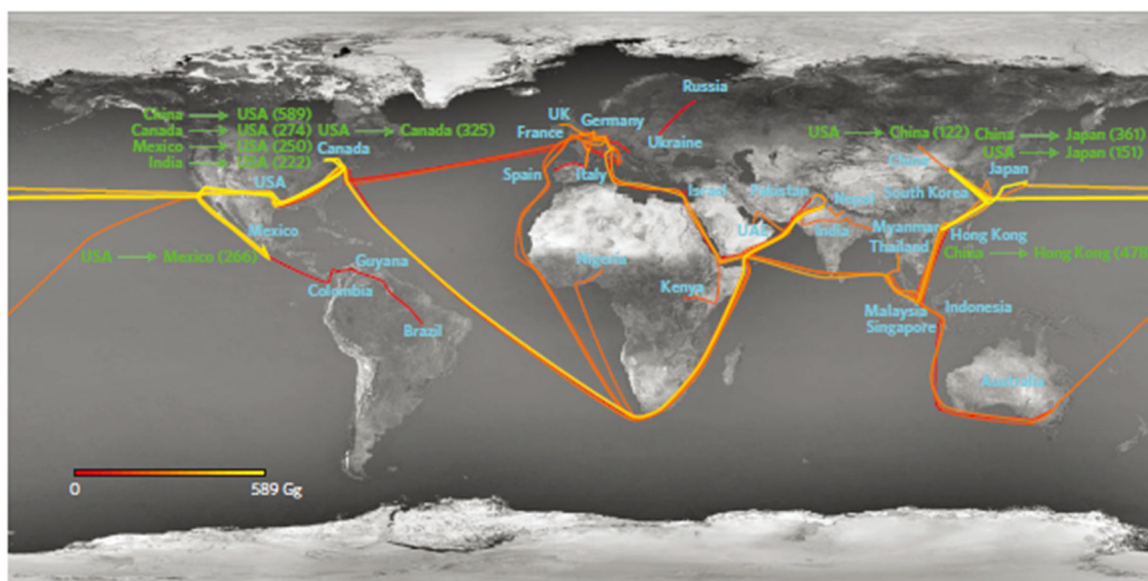


図4.1.8 輸出と輸入の多いそれぞれ10か国の消費国と最終販売国との国際取引に付随するNFの流れ。緑色の矢印は、特に2国間移動が多い10対の間での窒素排出量のやり取りを表す (Oita et al. 2016)。

人口の多い4か国が世界の反応性窒素排出量の47%を占める (中国20%、インド11%、米国10%、ブラジル6.1%)。他の10大排出国はロシア、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、全体の12%を占める。一方、中国、インド、米国、ブラジルでの消費が世界のNF排出量の46%を占め、世界の反応性窒素排出量の約4分の1は国際取引によるものであった。国際貿易を通じた排出は、農業を含む産業の総排出量の26%を占める。他の環境フットプリントでは、絶滅危惧種とCO₂が30%、希少水が24%であり、全体としては概ね同じ水準である。反応性窒素排出量の物質別では、溶脱される可能性のある窒素 (Nwp) が25%、NH₃が26%、NO_xが28%、そして温室効果ガスのN₂Oが27%という内訳だった。

国際取引される商品の生産によって生じた反応性窒素排出の国際収支は国によって大きく異なる (図

4.1.7)。純輸入国は、輸出品の生産に伴って国内で反応性窒素を排出するよりも、自らの消費のために海外で窒素負荷を引き起こしている。主要な正味輸出国は、多くの場合、開発途上で農業、食品、および繊維の輸出能力が高い国である。それに対して、重要な正味輸入国は先進国である。地域の窒素汚染の相当量は、他の国の消費者からの需要によって引き起こされている。NO_xとN₂Oに関する南北差は先行研究にもあるが、NwpとNH₃に関して同様の関係があることを示した。国際取引を通じたN₂Oの負荷はそれほど高くない。ロシアは輸入のほうが多いが、石油およびガス抽出

産業でNO_xを大量に排出し、そのために石油製品の大規模な輸出によってNFも輸出していることになる。最大のNF正味輸出国である中国は、NO_xを介して大量にNFを輸出している。これは、中国のNF輸出が石炭火力発電所の電力を用いた産業があるからだ。さらに中国にはNwpとNH₃を通じたNF輸出もあり、それらは野菜、果物、衣料品の輸出によるものである。二国間で最大のNFの取引は中国から米国の589GgN/年である(図4.1.8)。

1961年から2011年までの日本食の変化の影響と、代替食(推奨タンパク質食、菜食主義食、低NF食、バランスの取れた日本食)の食物NFへの影響を比較した結果、1人あたりの年間の日本食のNFは1961年から2011年にかけて55%増加した。

2011年の日本の一人当たりの食料NFは、日本のVNFを用いて年あたり15.2 kg Nと計算された。内訳は食料生産NF(12.3 kg N/人/年)と食物消費NF(2.9 kg N/年)であり、ほとんどを食料生産時のNFが占めている。肉は総食料NFの35%を占め、次に乳製品と卵(19%)、穀物(17%)、魚介類(9%)の順だった。日本の各食材のVNFがこの期間を通じて同じと仮定して計算すると、1人あたりの食料NFは、タンパク質摂取量の増加とともに1961年(9.8 kg N/年)から1989年(15.7 kg N/年)に増加し、1995年にピークに達する(16.4 kg N/年)。その後、NFは2000年まで横ばいで、その後、現在のレベルにわずかな減少がみられた。1961年から2011年にかけて、タンパク質摂取量が11%増えたのに対し、総食料NFは55%増えている。

食生活と食料NFの関係を見ると、食材の比率は今と同じとして、タンパク質摂取量を厚生労働省が推奨する水準(53g/日)にまで下げると、魚食主義(Pescetarian、肉を食べずに魚介類は食べる)の食事と同程度のタンパク質摂取量で食物NFを10.8 kgN/年に減らした。同程度のタンパク質摂取量を維持しながら、低NF食品のみを摂取することが、テストされたすべてのシナリオの中で最も効果的な選択であり、1人あたりの食品NFを8.3 kg N/年に削減できることが分かった。ほぼ同程度のタンパク質を摂取する1975年のバランスの取れた日本食もまた、食品のNFを12.6 kg N/年に減らす(図4.1.9)

1975年の日本食は、老化を遅らせ、現在と同じタンパク質摂取量を維持したまま、食物NFを減らすことができる。本来はタンパク質摂取量を今より減らすことも推奨されているので、摂

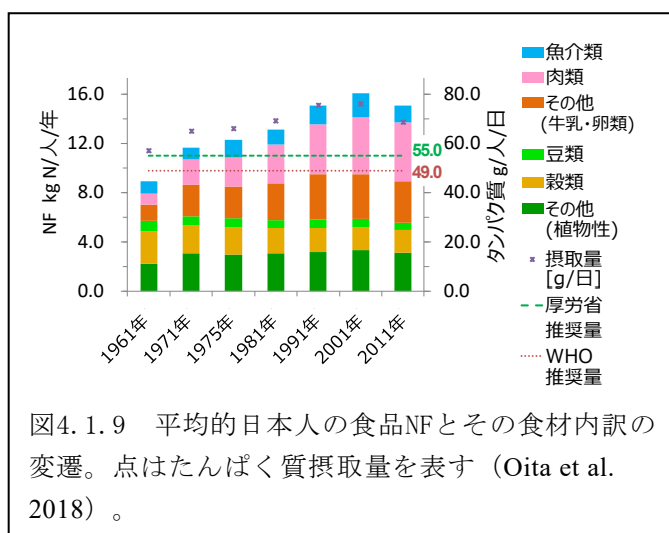


図4.1.9 平均的日本人の食品NFとその食材内訳の変遷。点はたんぱく質摂取量を表す(Oita et al. 2018)。

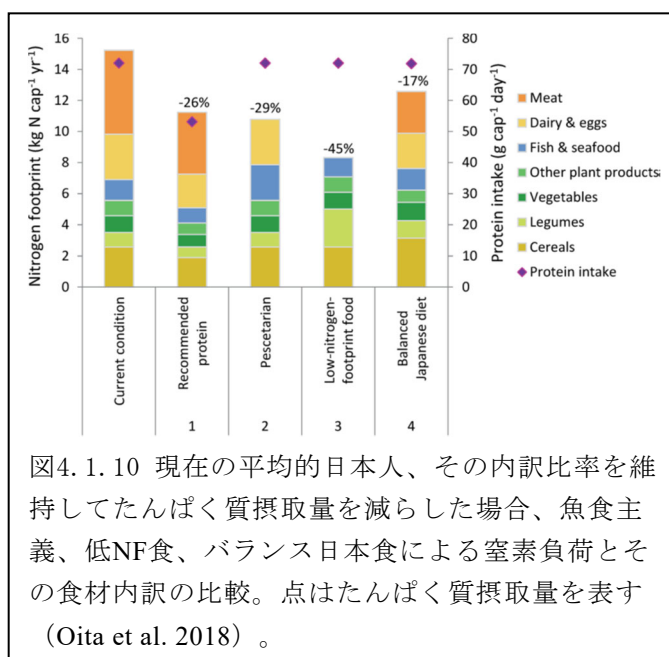


図4.1.10 現在の平均的日本人、その内訳比率を維持してたんぱく質摂取量を減らした場合、魚食主義、低NF食、バランス日本食による窒素負荷とその食材内訳の比較。点はたんぱく質摂取量を表す(Oita et al. 2018)。

食量をバランス日本食のまま減らせれば、さらにNFを減らすことができるだろう。比較した中で最もNFが低いものは低NF食であり、現在の日本食より45%も低い(図4.1.10)。たんぱく質摂取量を減らせればさらに下がる。

これらの結果は、消費者が窒素汚染への影響を減らすために有効な食材選択の参考になるだろう。

4. 4 政策立案のためのモデルベースの生物多様性予測を検証する枠組みの開発

生物多様性条約では、生物多様性愛知目標に掲げられた20の目標の達成度の評価が進められた。環境データと社会データから生態系サービスを評価する手法はいくつか提案されているが、それと気候変動シナリオを結びつけることで、生物多様性だけでなく、愛知目標に掲げる諸指標の将来予測を行うことができる。さらに、よりの確で検証可能な目標の検証のための指標や、さらには実現可能性を検討したうえで目標自体を提案することも可能だろう。

必須生物多様性観測要素(EBV)に関するモデル予測の検証は、隔測データを用いてEBVの予測値と比較し、政策実施後に観測されたEBVの変化(政策応答)を比較検討する。EBVを指標としてその変化を予測するモデルは、土地利用や気候変動など環境や人為的な変化の変化の実際の観察結果を用いる。次に、これらの予測を、隔測等で観測された現在または最近のEBVの測定値と比較し、モデルの予測力を評価する。その際に複数のモデルを用いてそれぞれの予測値と実測値を比較し、モデルの改良の際の参考とする。

重要な点は、フィードバック制御と順応学習の見直し間隔の違いである。通常、水産資源管理や野生鳥獣管理では、毎年の実施計画において直近の観測値から捕獲数などを見直す。その見直し方(フィードバック制御の方法)はあらかじめ管理計画で決めておく。捕鯨管理ではこれを捕獲限度量算定方式(Catch limit algorithm)という。捕獲数を決めるのではなく、更新される観測値に基づく捕獲数の算定方式を決めるところが重要である。そして、それに用いる前提を検証し(順応学習)、管理目標、効果指標、モデルの前提自身、政策の算定方式を数年ごとに見直す。その管理計画の見直しの際にはパブリックコメントに掛けるなど、広く意見を求める。

その際に、以前は合意していた関係者が次の目標では対立し、計画の見直しができない場合もあり得る。実際にそれに近いことが起こった例としては、1994年に国際合意したミナミマグロの資源回復目標が、その後国際裁判の法廷紛争となり、2003年に管理目標を見直すことで合意したが、実際の合意には数年かかったことがある。気候変動枠組み条約におけるポスト京都議定書も、この例と言える。

生物多様性については、数値目標を定めても、しばしば実現可能性に欠け、達成できないことがある。初めから、達成することを期待しないで高い理想を掲げていると思われる例さえある。けれども、現実と乖離した数値目標を掲げても、上記のようなフィードバックは機能しないだけでなく、モデルの予測力も鍛えられない恐れがある。愛知目標自体はほとんど数値目標がない定性的なものだが、指標は具体的で、達成度評価に耐えうるものである。持続可能な開発目標(SDGs)も同様に、17目標および169ターゲットは定性的だが、評価指標が提案されている。重要なことは、真に達成すべき目標が掲げられているならば、中間評価と最終評価の際に、それらの達成度が評価され、中間評価の総括を受けて実施政策が見直され、最終評価までにその目標達成を目指すことである。それが、次の目標への総括と改良に繋がる。同時に、予測力と検証力のあるモデル解析の技術も進むだろう。

類似研究として、古田らは、大規模で珍しい、まれにしか起こらない沿岸の災害の後の回復と復興において、生態系を活用した防災・減災(Eco-DRR)アプローチがどのように主流化されるかを検討した(Furuta & Shimatani 2018)。その際、東日本大震災(GEJE)後の河川や沿岸における災害管理の歴史的实践と復興過程を調査した。生態系アプローチが河川や海岸でどのように機能するかを明らかにし、関連する政策、技術指針および優良実践例を紹介した。この調査では、GEJEの後にEco-DRRの方策がどのように進展し、実装されたかを整理し、その実装過程で直面した諸課題を抽出した。米国におけるハリケーンサンディの復興過程も調査した。GEJEとサンディはいくつかの共通の機能を共有している。サンディの経験は、技術的な指針ではなく、計画に関与者が参加する参加型の計画であることの重要性を明らかにした。これらの2つの経験は、大規模でまれな災害に対処するには、技術指針や手引き

だけでは不十分であることを示し、分野横断的、専門的かつ相互作用のある参加型計画づくりが、より革新的な成果を導く上で重要な役割を果たす可能性があることを示唆している。

4. 5 生物学的適応の失敗の理論的研究

(1) 単一種非対称種内競争モデルの結果

気候変動の文脈で非対称競争が起こるのは季節性である。特に昆虫の交配の際には、早く羽化した雄が交配相手の雌を得やすいと言われる。すなわち、 z は雄の羽化の時期であり、生存率からみた最適な羽化の時期 z_0 より早く羽化するように進化する。今、 $z_0[T]=z_0^*+cT$ とし、 c を正または負の定数とする。 $c>0$ のとき、気温 T が上がると最適羽化時期はより遅くなり、 $c<0$ のときは早くなる。これらはそれぞれ羽化時期が秋にある場合と春にある場合に対応すると解釈される。

図4.1.11のように、生物の季節性が変化しない場合、春に関係する形質では温暖化が進むと集団適応度が上がるのに対し、秋に関係する形質では下がる。ところが種内競争によって温暖化とともに季節性がより早期にシフトすると、春に関係する形質では集団適応度が上がらない。秋に関係する形質では下がらない。よって、秋に関係する形質では適応進化は温暖化による悪影響を補償するが、春に関係する形質では生物学的な適応の失敗（Biological maladaptation）が起きることが理論的に予測された。

これは、本来温暖化によって適応度が上がると予想される場合にも、頻度異存淘汰が働く形質が気候変動にかかわる場合、生物自身が形質値を変え、予想に反して適応度が上がらない場合があり得ることを意味する。より早く羽化するほうが相対的に有利な場合、それが春の温度が上昇しつつある季節の場合には、「適応の失敗」が生じることが示唆された。

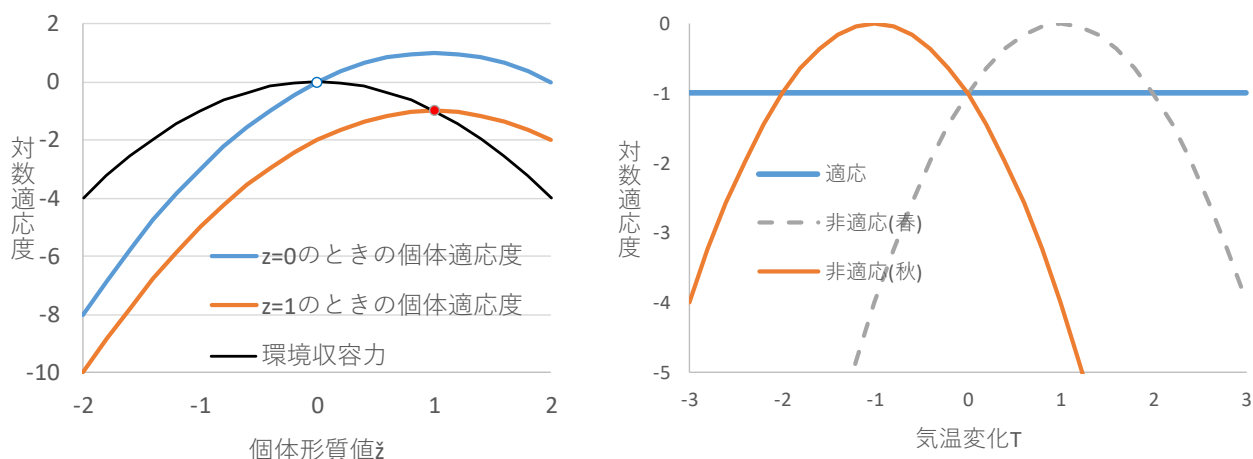


図4.1.11 非対称種内競争モデルの結果。(左) $z=0$ の○が環境収容力最大の「集団最適値」だが、 z が大きい突然変異が相対的に有利なために $z=1$ の●が進化的安定状態（ESS）となる。(右) $T=0$ のときは $z=1$ がESSだが、温暖化しても $z=1$ のままだと、 $c>0$ （春）のときには適応度はいったん上昇する。適応進化が起きると z が増えてしまい、対数適応度は元のまま（-1）になる。 $c<0$ （秋）のときは $z=1$ のままだとますます適応度が下がるが、適応進化が起きると z が減って適応度を維持する（Matsuda et al. 準備中）。

(2) 虫媒植物—訪花昆虫モデルの結果

気候変動により深型の利用可能量が減少すると、マルハナバチの舌が短小化し、浅型の虫媒花を利用するようになるため、深型の虫媒花は送粉サービスを受けられずに絶滅することが予測された（図(1)-3）。この結果は、相利共生系において、生物の適応進化が別の生物に悪影響を及ぼす可能性を示唆している。

虫媒植物—訪花昆虫モデルを解析した結果、気候変動により深型の利用可能量が減少すると、マルハナバチの舌が短小化し、浅型の虫媒花を利用するようになるため、深型の虫媒花は送粉サービスを受けられずに絶滅することが予測された（図(1)-3）。この結果は、相利共生系において、生物の適応進化

が別の生物に悪影響を及ぼす可能性を示唆している。

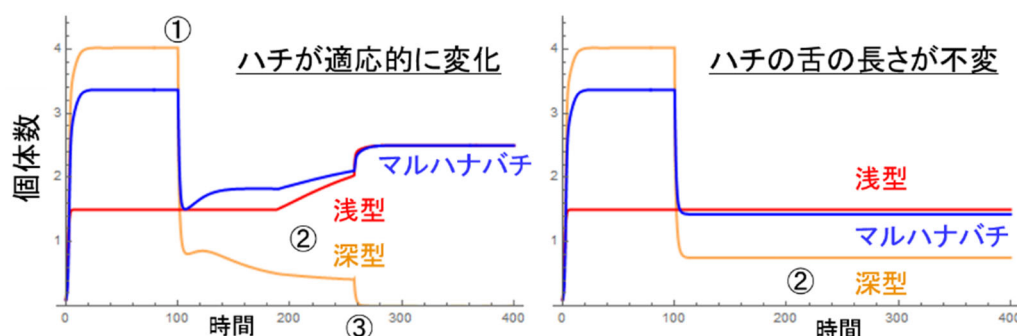


図4.1.12 マルハナバチと2種の虫媒花の個体数変化。ハチの舌長が適応的に変化する場合（左）としない場合（右）。気候変動により深型の虫媒花が減少すると（①）、ハチの適応度が高くなるように舌が短くなり、深型はさらに減少する一方で浅型は増加し（②）、ハチが浅型のみを利用することになった影響で深型の虫媒花が絶滅する（③）。右図ではハチと深型の個体数が減るものの共存する。 m_1 は0 ($t < 100$) から1.75にシフト（気候変動）、 V は左図が0.05で右図が0（適応進化しない）(Nishijima et al. 準備中)。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

サブテーマ(4)が切り拓いた、気候変動シナリオに基づく気候変動と土地利用変化が生物多様性に及ぼす影響を種分布モデルで評価する手法を踏まえ、S-9からの継続研究として、生息適地の面積変化ではなく、絶滅リスク評価という尺度で評価するめどをつけた。その結果、生物の絶滅の5大要因である土地利用変化、気候変動、乱獲、外来種、環境汚染のうち、前2者をシナリオごとに定量的に扱える目途が立ち、他の気候変動影響と比較できるようになった。その結果、一部の種においては、気候変動影響よりも気候変動対策による土地利用変化の影響のほうが大きく、2度シナリオのほうが高い準絶滅リスクをもち得ることが分かった。ただし、対策の影響のほうが大きいとされる生物は限られており、全体としては、過去においては最大の要因だった土地利用変化に対し、将来は気候変動が最大の要因となることが示唆された。これらの結果はサブテーマ(4)の結果と整合する。予備的だが独自の結果として、今まで当然とされていた「過去の減少傾向が今後も継続する」という前提での絶滅リスク評価が、大幅な過大推定である可能性が示されつつある。今後は、生物多様性への影響評価も、気候変動モデルと整合する土地利用変化シナリオに基づいて評価されるようになるだろう。乱獲、外来種、汚染、それらに加えて日本の生物多様性国家戦略で重視されている人間活動の縮小による自然遷移の影響をどう組み込むかが次の課題である。

日本の生物多様性国家戦略2012-2020には、「私たち日本人は、食料は約6割を、木材は約7割を海外から輸入しており、世界の生物多様性の恵みを利用して暮らしています。」「海外の自然資源を利用するわが国の消費が輸出国の生物多様性の損失の上に成り立っている面があることに一人ひとりが気付くとともに、(中略)国内だけでなく国外の生物多様性を保全しつつ、持続可能な利用がされるよう、日々の生活の中で配慮していくことが大切です。」「地球規模で生物多様性の損失が懸念される中、食料、木材などの資源の多くを輸入することは海外から多くの窒素等の物質を輸入していることを意味しています。」という記述がある。生物多様性フットプリントと窒素フットプリントにおいて、国際収支を議論できるようになったことで、これらの認識を定量的に根拠づけることができたと考えられる。ただし、生物多様性に関する予測評価から、生態系サービスの経済評価に踏み込んだ評価を行うことが課題である。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

1. 総合海洋政策本部に設置された参与会議の「総合的な沿岸域の環境管理の在り方PT」において、松田が沿岸域総合管理の考え方について説明し、2017年3月発表のPT報告書にその内容が反映された。(ST1)
2. 世界遺産気候変動の影響のモニタリング検討委員会、および屋久島世界遺産科学委員会において、世界自然遺産地域の気候変動の影響に関する長期展望について意見を述べた。(ST1)
3. ユネスコMAB計画の2015-2025年戦略およびリマ行動計画の委員として、気候変動対策をSDGsに向けた行動全般の中で位置づけ、各行動の実施主体を明記するよう意見を述べた。(ST1)
4. 長野県高山村の環境審議会座長として、松田がユネスコエコパークおよび首長誓約を含む環境条例策定と行動計画（案）の取りまとめに貢献した。また、高山村の気候変動に関する首長誓約（Covenant of Mayors）を2019年3月に行った際に座長として協力した

<行政が活用することが見込まれる成果>

1. IPBES アジア太平洋地域報告書, Review Editor, 2019 年

6. 国際共同研究等の状況

松田はUSGSのD.Berd教授から2017年6/6-10米国バージニアおよび2018年2/27-3/2米国アリゾナに旅費付き招聘され、結果4-3に示す共同研究を進めている。また、2016年12月にはJSTが主催した南アフリカ国プレトリアでのScience Forum South Africa2016にパネル登壇し、環境問題における市民科学の在り方等について議論した。さらに、ユネスコ「人間と生物圏（MAB）」計画の活動の一環として、JSPS招聘事業で英国MABの重鎮であるMartin Price教授の招聘事業が今年度採択され、さらに横浜国大としてMAB\SDGsに関するユネスコチェアを松田が代表者となって申請中である。

気候変動とその対策がもたらす生物多様性と生態系サービスへの影響に順応的管理の方法論については、国際的に一定の議論を進めることができた。特に、予防原則に基づく影響予測を事後検証しつつ計画を見直す順応学習のプロセスと、最新の生態学的指標に基づいて実行計画を修正するフィードバック制御のプロセスを明示的に位置づけることで、過剰な予防措置を見直す余地を主張できた。また、古田を通じて自然を活用した解決策（Nature-based solution）を重視するIUCNとの連携、松田がかかわるユネスコMAB計画、古川が進める国連会議におけるブルーエコノミーの取り組みを、サブテーマ(2)と(4)が進める陸域生態系の成果、(3)と(5)が進める沿岸生態系の成果をより有機的に国際機関に還元することを目指した。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Kadowaki K, Nishijima S, Kéfid S, Kameda KO, Sasaki T (2018) Merging community assembly into the regime-shift approach for informing ecological restoration. *Ecological Indicators* 85:991–998. DOI:10.1016/j.ecolind.2017.11.035
- 2) Oita A, Nagano I, Matsuda H (2018) Nitrogen footprint of food consumption reduced by balanced Japanese diet. *Ambio* (Springer) DOI:10.1007/s13280-017-0944-4
- 3) Oita A, Malik A, Kanemoto K, Geschke K, Nishijima S, Lenzen M (2016/2) Substantial nitrogen pollution embedded in international trade. *Nature Geoscience*. 9:111-115 10.1038/ngeo2635

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 松田裕之 (2019/7) 気候変動対策と自然保護は両立するか？. *グローバルネット*. 344:4-5.
- 2) 桜井良・秋庭はるみ・松田裕之 (2015/12) ヒューマン・ディメンションとレギュラトリ科学 -

野生動物管理における意思決定や政策評価のための科学の創生に向けて- 政策科学(立命館大学) . 23(1):47-52

- 3) 塩谷克典・松田裕之 (2015/7) 世界遺産屋久島におけるシカ管理計画. 日本の科学者. 50:474-479.

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 古川恵太：沿岸域総合管理を用いたブルーエコノミーの展開について、日本沿岸域学会研究討論会、2018年7月17日
- 2) 松田裕之：屋久島・口永良部島の世界遺産とユネスコエコパークの関係、日本生態学会シンポジウム「世界遺産とユネスコエコパークを問い直す」、2018年3月16日。神戸国際会議場
- 3) 米倉佑亮：21世紀のダム建設ブームと、生物多様性保全に向けた取り組み。日本生態学会第65回大会企画集会 2018年3月18日 9:00-11:00
- 4) 西嶋翔太：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。日本生態学会第63回大会自由集会「生態学×国際貿易—国境を越える人間生活の生態影響」 2016年3月22日
- 5) 種田あずさ：窒素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 日本生態学会第63回大会自由集会「生態学×国際貿易—国境を越える人間生活の生態影響」 2016年3月22日
- 6) Furuta, N. Advancing ecosystem-based solutions for disaster risk reduction – perspectives and lessons from Japan, 2018 International Symposium on Resilience of SEPL, Taipei, Taiwan on 26 February 2018.
- 7) Furuta, N. The Role of Wetlands for Disaster Risk Reduction, International Symposium on the Conservation of the Coastal Areas of the Bay of Bengal, 7 March 2019 Dhaka, Bangladesh
- 8) Furuta, N. Ecosystem Approaches as Nature-based Solutions for Climate Change Adaptation, G20 Climate Sustainability Working Group (CSWG): 2nd Meeting 2019 / Nagano, Japan, 16 April 2019
- 9) 古田尚也：震災の経験を踏まえた造園からの挑戦、平成30年度日本造園学会全国大会 ミニフォーラム 生物多様性の新しい世界目標 (ポスト愛知目標) を考える、2018年5月27日
- 10) Furuta N. Advancing Eco-DRR for Urban Resilience, Sharing output of Asian Wetland Symposium 2017: focusing on functions and roles of urban wetlands for disaster risk reduction. 13th Meeting of the Conference of the Parties to the Convention on Wetlands Side Event, 26th October 2018
- 11) Matsuda H: The role of population models in wildlife management; seeking feasibility, cost-effectiveness and consensus building, The 5th Meeting of International Wildlife Management Congress, 28 July 2015, Hiroyuki Matsuda, Sapporo Convention Center
- 12) 松田裕之：個体群生態学会におけるSDGsの取り組み: 生物科学学会連合公開シンポジウム「持続可能な社会を目指して生物科学は何ができるのか」, 東京大学理学部, 2018年10月1日
- 13) Sakai A, Matsuda H: Japanese Coordinating Committee for MAB, a scientists network that connects local and governmental MAB activities. Scientific Networking Workshop. The 4th World Congress of Biosphere Reserve, 16 March 2016, Lima.
- 14) Matsuda H, Islam R, Nishijima S: The tragedy of the mitigation policy on climate change., The 2016 (26th) annual meeting of the Japanese Society for Mathematical Biology, 9 September 2016, Japanese Society for Mathematical Biology, Fukuoka

(3) 知的財産権

特筆すべき事項はなし

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) Matsuda H: How did coastal fishers satisfy the global standard of nature protection in Shiretoko World Heritage? Role of Scientists for connection between Local and Global, The Power of Public Engagement for Cultivating Real Science & Society Breakthroughs, Science Forum South Africa 2016, 8 December

- 2016, Japan Science and Technology Agency, Pretoria 有識者ら約60名が参加
<https://www.jst.go.jp/report/2016/170303.html>
- 2) Matsuda H, Kondo H, Tani K, Sasaki S, Iwabuchi K: Evaluation method of the bird collision risks for speedup of the environmental impact assessment procedure for wind farms, 2nd Meeting of Work group on Bird Strike Science and Engineering, 15 November 2016, Work group on Bird Strike Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Shinagawa, Tokyo
 - 3) Matsuda H, Sakai A: Why we encourage multiple designations of biosphere reserves with others, The 1st Asian Conference on Biocultural Diversity, 27 October 2016, UNESCO, SCBD, Ishikawa Prefectural Government, UNU UNESCO, SCBD, Ishikawa Prefectural Government, UNU; Nanao, Ishikawa 実務経験者ら約50名が参加
 - 4) Matsuda H: MAB Strategy and Lima Action Plan, Involving multi-stakeholders for biocultural diversity: Asian Biosphere Reserves Involving multi-stakeholders for biocultural diversity: Asian Biosphere Reserves, 25 July 2016, United Nations University, Tokyo 実務経験者ら約20名が参加
 - 5) Matsuda H: Future Perspective of UNESCO's Man and the Biosphere Programme, Towards Sustainable Development in Harmony with Nature in Crocker Range Biosphere Reserve, Promenade Hotel, Kota Kinabalu, Malaysia, 9 December 2015, JICA, Saba 有識者ら約200名が参加
 - 6) 水産資源は枯渇しているか: 海洋法の周辺事項第6回, 外務省, 2020年3月25日 外務省職員ら約40名が参加
 - 7) 第2回マリン・エコラベル・ジャパン (MEL) 協議会ワークショップ—世界で輝く日本の水産物を目指して—, 赤坂インターシティコンファレンス, 2019年12月13日 業界関係者ら約200名が参加
 - 8) 日本にける水産エコラベルの現状、課題、展望: 第1回マリン・エコラベル・ジャパン (MEL) 協議会ワークショップ—日本発世界に認められる水産エコラベルの課題と挑戦—, 赤坂インターシティコンファレンス, 2019年2月6日 業界関係者ら約200名が参加
 - 9) 海の恵みと人の営み—知床世界遺産の試練: アースウォッチジャパンスペシャルトーク, 東京大学中島ホール, 2019年12月7日 NPG会員ら約50名が参加
 - 10) 「リスクと生きる: 環境リスク学入門」: 横浜国立大学公開講座, 横浜国立大学教育学部8-203教室, 2019年8月9日 市民ら約20名が参加
 - 11) 戦略的環境アセスメントにおけるステークホルダーとの関係性:Sustainable Remediationコンソーシアム研究会, フクラシア品川クリスタルスクエア, 2019年5月16日 実務経験者ら約40名が参加
 - 12) 鳥獣保護「管理」法とカワウ問題: 国立環境研究所 第24回琵琶湖分室セミナー, 琵琶湖環境科学研究センター, 2019年5月14日 近隣住民ら約30名が参加

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 松田裕之 (2020/1) 気候変動対策は生物多様性を損なわないのか: 最新研究で明らかになった対策の有無と生物が暮らせる地域の増減. 論座. :2020.1.24.
- 2) 松田裕之 (2018/6) レッドリストをどう生かす? 保護と利用の調和とは. Web RONZA. :2018.6.13.
- 3) 松田裕之 (2017/7) ブルーカーボン: 海洋生態系が吸収する二酸化炭素. Web RONZA. :2017.7.6.
- 4) 松田裕之 (2017/6) 世界遺産のシカを獲るのは是か非か: 日本列島で増え続けるシカ、その食害対策の昔と今. Web RONZA. :2017.6.26.
- 5) 松田裕之 (2017/5) 日本政府初の海洋生物レッドリストの問題点: 同じ基準でも環境省と水産庁で大きく違う掲載種数. Web RONZA. :2017.5.16.
- 6) 松田裕之 (2017/4) 自然保護と日本の国益: 「保護」と「保全」の違いにどう向き合うか. Web RONZA. :2017.4.20.

- 7) 松田裕之 (2017/2) 科学外交における科学者の役割：明確な規範が存在しない現状を憂える。Web RONZA. :2017.2.24.
- 8) 松田裕之 (2017/1) 環境影響評価で滞る風力発電：パリ協定に逆行する石炭火力発電の増設。Web RONZA. :2017.1.11.
- 9) 松田裕之 (2016/5) 日本の貿易による環境負荷：生物多様性－注意すべきは国内より海外に与える影響だ。Web RONZA. :3016.5.12
- 10) 松田裕之 (2016/3) 日本の環境影響評価はなぜ定着しないのか：審査委員もはき違える制度の趣旨。Web RONZA. :2016.3.30

(6) その他

8. 引用文献

- 1) Nishijima S, Furukawa T, Kadoya T, Ishihama F, Kastner T, Matsuda H, Kaneko N (2016/7) Evaluating the impacts of wood production and trade on bird extinction risks. *Ecological Indicators* 71: 368–376, DOI:10.1016/j.ecolind.2016.07.008
- 2) Furuta N. and Y. Shimatani (2018) Integrating ecological perspectives into engineering practices – perspectives and lessons from Japan, *International Journal of Disaster Risk Reduction*
- 3) Matsuda H, Abrams PA (1994) Runaway evolution to self-extinction under asymmetric competition, *Evolution* 48:1764-1772.
- 4) Miller-Struttmann NE, et al. (2015) Functional mismatch in a bumble bee pollination mutualism under climate change. *Science* 349: 1541-1544
- 5) Pereira HM et al. 2013. Essential biodiversity variables. *Science* 339: 277-278.
- 6) Furuta N. and Shimatani Y. Integrating ecological perspectives into engineering practices – Perspectives and lessons from Japan, *International Journal of Disaster Risk Reduction* 32 (2018) 87–94
- 7) Monty F, Murti R, Furuta N (2016) Helping nature help us: Transforming disaster risk reduction through ecosystem management. : Gland, Switzerland, IUCN. 82 pages

II-2 陸域生態系の強靱化による緩和策、適応策の統合評価

国立大学法人横浜国立大学
環境情報研究院 准教授 森章

その他の研究協力者

国立大学法人横浜国立大学 佐々木雄大、岡田慶一、小林勇太、高木勇輔、高鳥友樹、近藤駿太郎

国立大学法人北海道大学 小林真

公立大学法人兵庫県立大学 土居秀幸

平成27年度～令和元年度研究経費（累計額）：52,140千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成27年度：10,479千円、平成28年度：9,651千円、平成29年度：9,597千円、平成30年度：10,849千円、令和元年度：11,562千円）

[要旨]

持続可能な生態系管理の必要性は、国内外の政策分野や産業分野等において、ますます強調されつつある。たとえば、気候変動の緩和策という点では、陸域生態系の保全による炭素隔離は国際的な政策の関心事項となっている。甚大化する気候変動影響下での適応策という点では、自然災害の増大は重大な関心事項である。気候変動を緩和し、同時に将来的に加速する気候変動影響に適応するためにも、より良い自然とのかかわり方が求められている。本サブテーマでは、生物多様性に富む生態系が炭素隔離などの生態系機能をどのように担保し得るのか、土地利用の進展などを介した生態系の脆弱化を介して自然災害リスクがどのように高まり得るのかなど、緩和策と適応策としての陸域生態系の健全性の在り方、強靱化を評価した。とくに、大規模野外実験・大規模データ統合・理論研究に基づいた実証研究から、国内外の政策で推進されつつある自然を基軸としたアプローチの社会実装に必要な科学的根拠を提供することに念頭を置いた研究開発活動を実施した。成果の概要としては、生物多様性に富む陸域生態系が有する気候変動緩和と適応の双方の可能性を見出した。生物多様性と数多の生態系機能との関係性を精査する中では、たとえば森林の樹種多様性が一次生産を介して炭素隔離を促進し得ること、その広域的な普遍性を見出した。さらには、生物多様性を損なうような土地利用の進展や強度化は、極端気象に伴う自然災害リスクを高め得ることから、土地利用の在り方の再考の必要性を強調した。科学と政策の双方の面において、「気候変動により生物多様性が脅かされる」と認知されている一方で、「生物多様性が気候変動の緩和や適応に資する」との捉え方は稀である。この点において、生物多様性の役割を精査し得た本サブテーマの結果は、気候変動政策と生物多様性政策、言い換えれば気候変動枠組み条約（UNFCCC）と生物多様性条約（CBD）に係る政策的枠組みをつなぐ上での、一定の科学的根拠を提供したと言える。

[キーワード]

生物多様性、陸域生態系、自然撓乱、生態系機能、生態系サービス

1. はじめに

自然環境を持続可能な形で管理し利用することは、さまざまな社会環境問題の解決に重要との認識が高まりつつある。このような自然ベースの解決策（Nature-based solutions）は、気候変動の問題対処において、とくに費用対効果が高いことが期待されている(1-3)。言い換えると、自然生態系の保全と活用が、気候変動の緩和策と適応策の両者に必須と言える。

持続可能な生態系管理の必要性は、国内外の政策分野でもますます強調されつつある。たとえば、

2018年に国際連合食糧農業機関（FAO）が公表した「政策決定者のための気候変動の概要書」では、農林業セクターは地球規模の緩和策に多大な貢献をすることができるとしている。ここでの期待は、陸域における温室効果ガスの隔離である。このような国際的な関心の下、2016年には、国際自然保護連合（IUCN）が主導したボン・チャレンジでは、36の国・企業が1億ヘクタール以上の面積規模での森林再生を約束した。今後2050年までに、陸上から約2.2億ヘクタールもの森林が消失するとの予測がある中では、森林の保全による炭素隔離機能の保持は、気候変動の緩和に必須と言える。しかしながら、多くの国の目標は、商業性を念頭に置いた単一種植林の造成ゆえに、ボン・チャレンジのような森林再生の政策的取り組みによる炭素隔離の効果は限定的であることが懸念されている(4)。一方で、近年の科学研究の進展により、樹種多様性に富む森林では、一次生産が高まり炭素隔離能力が高まることが分かってきた(5)。生物多様性に富む生態系が炭素隔離を介した気候変動緩和につながる可能性(6-8)を検証することなど、緩和策としての陸域生態系の健全性の在り方、強靱化を精査する必要がある。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が公表した「気候変動と土地関係特別報告書」でも、持続可能な陸域生態系管理の必要性が強調されている(9)。将来的に加速する気候変動影響に適応するためにも、より良い自然とのかかわり方が求められている。とくに、気候変動に伴い深刻化する事象のうち、「極端現象」の頻度・強度の増加に伴う自然災害の増大は、最も重大な関心事項のひとつである。IPCCは、極端現象と自然災害に対応するための特別報告書も公表している。そこでは、気候に関わる物理的要因の変化だけでなく、極端気象現象への人間社会側の暴露と脆弱性の変化が相互作用することで、災害リスクが増幅していることが強調されている(10)。極端現象としては、例えば干ばつ、火事、洪水、虫の大発生などが挙げられる。これらは社会的に災害となり得る一方で、自然界には普遍的に生じる事象である（「自然撓乱」と呼ばれる）。しかしながら、多くの地域の土地管理政策においては、これら生態系撓乱は社会に負の影響をもたらすとされ、排除対象となってきた。その結果、逆に、極端現象時の災害規模（被害）を拡大させ、問題が複雑かつ深刻化してしまっている(11)。つまり、自然撓乱としての極端現象の発生時に、人間社会にとっての災害規模を規定するのは、気候変動の直接影響だけでなく、土地利用などを介した複合要因の効果が大きい。言い換えると、自然たる生態系を如何に改変してきたのが重要な項目である。この文脈でも、生物多様性が関与する潜在性は強調されてきた(12)。しかしながら、多様性保全による自然災害リスク低減の可能性については、科学的実証に欠けるのが現状である。

以上の背景をもとに、本サブテーマでは、陸域の生態系と生物多様性保全による生態系機能の安定化・強靱化の潜在性を、大規模野外実験・大規模データ統合・理論研究に基づいて精査することに取り組んできた。

2. 研究開発目的

本サブテーマでは、陸域生態系の人為活動による脆弱化は、陸域生態系を炭素シンクからソースへと変え得ること、自然撓乱が社会的な災害になるリスクがあること、にとくに着目した。前者は炭素吸収を促進する緩和策を、後者は極端現象に応じる適応策を、それぞれ無効化する可能性がある。

2-1.

「生物多様性が生態系機能を支える」といった現象の駆動要因について、過去30年間に渡り理論的検証が行われてきた(13)。とくに、世界中の大規模野外実験系において、植物多様性が高まることで一次生産を中心とした生態系機能が高まる／安定するのかどうかの実験が行われてきた(14, 15)。植物の一次生産は陸域の炭素吸収量を規定する主要因であり、炭素動態に関わる。ゆえに、緩和策として植生の反応は重要な関心事項である。しかしながら、干ばつ等の極端現象時に生物多様性がバッファとなることで、生産性を中心とする生態系機能が担保し得るのかについては、今後の研究課題とされてきた。そこで本研究では、北海道および中国内モンゴルの草地生態系をモデルに、降水量を操作する野外実験を行

い、生物多様性—生態系機能の関係性の変化を評価することを目的とした。

2-2.

先述のように、樹種多様性に富む森林は、一次生産を介した炭素隔離能力に優れ、気候変動の緩和に重要な役割を持つ(7)。ゆえに、森林率の増加だけを目標とするのではなく、樹種多様性に富む森林の創出が肝要と言える。「生物多様性条約」の枠組みでも、樹種多様性による炭素隔離と温暖化緩和の可能性に言及がある(16)。しかしながら、全球規模の定量化を欠いてきた。そこで本研究では、既存の広域データを探索統合した解析により、森林生態系が有する炭素隔離の役割と普遍性を定量化した。同時に、広域的な野外実験により、陸域生態系の炭素動態へのフィードバックに関わる有機物分解を評価した。これらにより、自然度の高い陸域生態系がどれだけ気候変動緩和に関わるのかの広域的な把握を行うことを目的とした。さらには、分解される有機物としての植物リター（落ち葉）の多様性にも着目した(17)。現在、陸域では生態系変化が進むことで、環境要因の均質化が生じている。たとえば、単一樹種の植栽による人工林造成は、植物多様性を損なうだけでなく、落ち葉を均質化して土壌生物も均質化する(18)。その結果として、有機物分解のプロセスを改変し生態系を脆弱化させている可能性がある(19)。この観点からも生態系の健全性と生態系機能としての有機物分解の関係性を精査した。

2-3.

土地利用の強度化などによる生態系の脆弱化が、災害リスク（自然撓乱が災害になるリスク）を増大させることで、気候変動適応に負の影響が生じ得るのかを評価した。たとえば、北米・豪州などでは、前世紀の山火事抑制政策の結果、燃料（樹木等）が広域的に大量に蓄積することとなり、干ばつ発生時の山火事の強度・規模が劇的に増加してしまった(20)。エルニーニョ・南方振動に応じて干ばつが発生し易い地域では、大規模山火事を誘発する(21)。近年では、これらの要因は社会情勢を不安定化させ、紛争や暴動の発生確率まで増加させること（災害の拡大）が明らかになりつつある(22)。そこで、全球の陸域を対象に、土地利用の強度化を時系列的に解析することで生態系の脆弱化の度合いを定量化し、干ばつ・山火事の発生が災害リスクにつながる可能性を検証した。さらに、国内では、台風等の豪雨時に生じる土砂災害が、気候変動にともない激化することも懸念されている。この観点から、国内を対象としたデータベース解析により、生態系と生物多様性の保全が災害低減に資する可能性を検証した。

3. 研究開発方法

3-1.

野外試験地において、降水量を人為的に操作する実験を行った。実施地は、北海道大学・天塩研究林、中国科学院のInner Mongolia Grassland Ecosystem Research Stationの草地生態系である(23)。2015年より世界中の野外試験地において統一プロトコルにて実施した干ばつ実験（Drought-Net: drought-net.colostate.edu）を、両所にて実施した。これは各実施地域の気候条件に応じた干ばつ操作により、陸域生態系の生産性（ひいては炭素固定能）が植物多様性によって如何に担保され得るのかを推定するプロジェクトである。北海道での実施理由は、干ばつに対する反応が未知の箇所（日本のような湿潤帯）でのデータが欠損していることである。中国での実施理由は、生物多様性—生態系機能の関係性実証のための実験区が大規模に組み立てられており(23, 24)、干ばつを操作的に発生させることが可能であることによる。今回の研究においては、上記プロトコルに基づく実験だけでなく、降水量増加の効果、生産性以外の炭素収支に関わる生態系機能（有機物分解など）を包括的に測定した。これにより、近年議論の中心である「多様性—生態系の多機能性(25, 26)」に、極端現象の文脈をはじめて導入した。多機能性の測定については、サブテーマ代表者のこれまでの方法(27)に準拠した。



図3-1. 北海道（左）および中国・内モンゴル（右）に設置された降雨量操作試験地の様子

3-2.

森林生態系が有する樹種多様性が炭素隔離と温暖化緩和に関わる可能性を検証するために、北海道から沖縄までに多く存在する日本の森林生態系の長期観測データ（環境省モニタリング1000：www.biodic.go.jp/moni1000.html）の森林サイトデータを用いて解析を行った。観測期間が8年以上かつ調査面積が1ヘクタール以上の観測サイトに対して、既存のバイオマス測定式(28)から年あたりの地上部生産速度を算出し、樹種との関係を空間性(29)を考慮して行った。亜熱帯から北方林に至る気候勾配の中での樹種多様性維持のメカニズムの変化を探るために、既存理論(30)に照らしわせて解析した。そして、これら異なる多様性維持メカニズム(30)が、異なる生態系機能維持メカニズム(31)にどのように関わるのかを解析した。得られた結果を炭素量に変換し、異なる気候帯での樹種多様性が炭素隔離を支える実量の定量化を行った。

有機物分解については、世界中で同じプロトコルにより同時におこなった木材分解実験（Global Wood Decomposition Experiment）を、上述の環境省モニタリング1000のうち北海道から沖縄までの4サイトを選び実施した。世界中の他の調査サイトと統一の基質（ラジアータパイン）を用いて、2年間野外培養による重量減少速度を求めた。また、同時に分解者としての生物多様性を操作することで、気候要因だけでなく、生物要因の相対寄与率を求める実験を行った。

植物リターの多様性の消失が有機物分解プロセスに与える影響評価のために、世界中の報告論文（約170）を統合したメタ解析を行った。さらに、リター多様性消失が有機物分解速度をどの程度低減させるのかを気候要因と比較した。温暖化が生じれば一般にリター分解は速まる。この根源的な気候影響と多様性変化の影響とを標準化した状態で比較するために、先行研究の方法(32)を改良して、両者の影響を定量化した。

3-3.

生態系改変に起因する災害リスク（自然撓乱が災害になるリスク）として、干ばつや豪雨、極端気象の原因となり得るエルニーニョによる遠隔相関（テレコネクション）に着目した(33)。Land-use harmonization (34)の土地利用データを用いて、自然植生から他の土地利用への改変速度となる指標（生態系改変速度指標：LUI）を開発した。また、土地利用の進展によりどれだけ生態系が脆弱化したのかを評価するために、生物多様性ホットスポット(35)に着目した。生物多様性ホットスポットに相当する

植物種多様性を有すると予測される地域を特定し、ホットスポット内外でのLUIの時系列変動パターンの違いを全球規模で解析した。これにより、過去から現在に至る気候変動と土地利用が、陸域の生物多様性に与えてきた影響を評価した。さらに、生態系の健全性がある程度担保されていると期待されている世界50か所の自然保護区とその近隣地域を対比させ、気候条件と関連した攪乱体制が人為影響でどのように変化しているのかを、ランドサットデータ（衛星画像）を用いて、全球規模で解析した。

エルニーニョ発生時の災害リスクと生態系改変の関係性について、時系列的な因果関係を明示する解析を行った。エルニーニョ時に気象条件に影響を受ける国〔テレコネクション国と定義(22)]を対象に、1980-2015年に発生した自然災害を対象とした時系列同調性解析を行い、エルニーニョに駆動される自然災害報告数（災害時の影響者人数：www.emdat.be）の増加率を求めた。また、土地改変指標の高い国と低い国の間で、災害増加率を比較し、エルニーニョ時の自然攪乱発生が自然災害に拡大するリスクに対する生態系改変の寄与を求めた。

適応策の基本概念となる生態系をベースにした災害リスク低減（Eco-based disaster risk reduction: Eco-DRR）に関連し、森林生態系の防災・減災機能における生物多様性の寄与を検証するため、林野庁による森林生態系多様性基礎調査（www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/tayouseichousa/）から日本全国の森林（4km x 4kmメッシュ交点）の樹種数データ、国土交通省の国土数値情報のうち土砂災害・雪崩メッシュデータ（nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A30a5.html）を用いて、樹木種多様性と表層崩壊に伴う土砂流出量の関係性を解析した。

4. 結果及び考察

4-1.

気候変動に応じて頻度・強度が増加すると考えられている極端気象（干ばつや豪雨など）に対して、一次生産性を主とする生態系の根源的な機能性がどのように担保されるのか、とくに生物多様性による効果を定量化した(36)。草本植物の多様性操作実験に関する既存研究の統合解析から、種多様性と極端気象時の生態系機能の安定性および抵抗性との間に正の相関関係が見られた。大規模データから、極端気象時の生態系の安定化に対する生物多様性の寄与する可能性が示されたことにより、生物多様性保全による適応策に対して信頼性の高い実証を提示することに成功した。

生物多様性と生産性や有機物分解などの生態系の多機能性との関係性(27)を干ばつ試験前の試験地データから解析した結果、草本植物の種多様性と生態系の多機能性の間に有意な正の相関が見られた。さらに、草本植物群集を在来種と外来種に区別した場合の、生態系の多機能性との関係性は、在来群集でより強い正の相関が見られ（図4-1）、生物多様性に立脚した生態系機能の維持を図る上で、在来種の保全の重要性が強調された（Okada et al. 投稿準備中、日本生態学会年次大会等で発表）。この生物多様性と生態系機能の関係性に対する極端気象の影響を、降雨量操作試験3年目のデータをもとに解析した。まず、降雨量操作前に見られた生物多様性と生態系機能の正の関係性が降雨量操作によって検出されなくなった。さらに、降雨量操作と生物多様性、生態系機能への影響プロセスを階層的に解析した。その結果、水分環境の湿潤化によって、優占草本種のバイオマス増加による不均質化が引き起こされ、生態系の多機能性に影響を及ぼしている構造が示唆された（図4-2左）。さらに、同様の傾向は植物機能形質を用いた解析でも確認された（図4-2右）。このことから、緩和策によって降雨量変化などの極端気象が減少することで、植物の直接的な生理応答だけでなく、群集構造の保全を介した生態系機能の維持効果が期待できることが示唆された（Kondo et al. 投稿準備中、日本生態学会年次大会等で発表）。

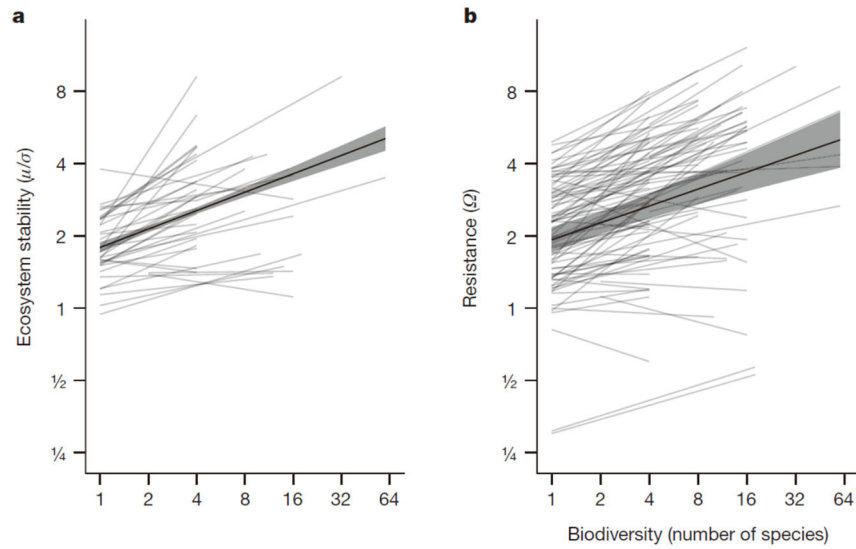


図 4-1. 草本植物の多様性操作試験地における干ばつ・豪雨時の一次生産性の安定性（左）および抵抗性（右）に対する種多様性（横軸）の関係（Isbell et al. 2015）

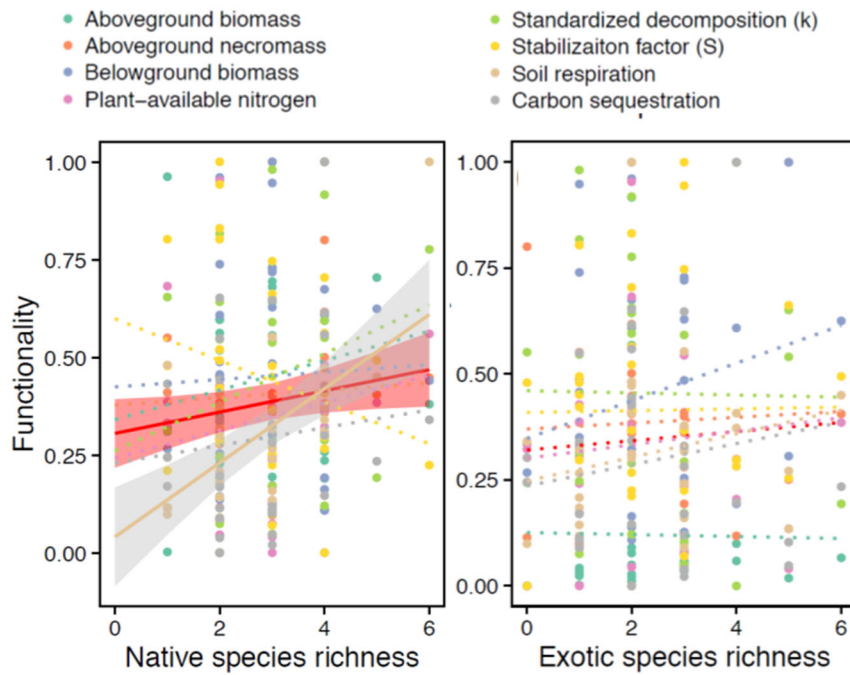


図 4-1. 各種生態系機能に対する同一群集内の在来種（左）および外来種（右）の種多様性の関係。様々な生態系機能（縦軸）に対する種多様性の効果は、特に在来種で顕著にみられた。

Fig.1) Taxonomic based model

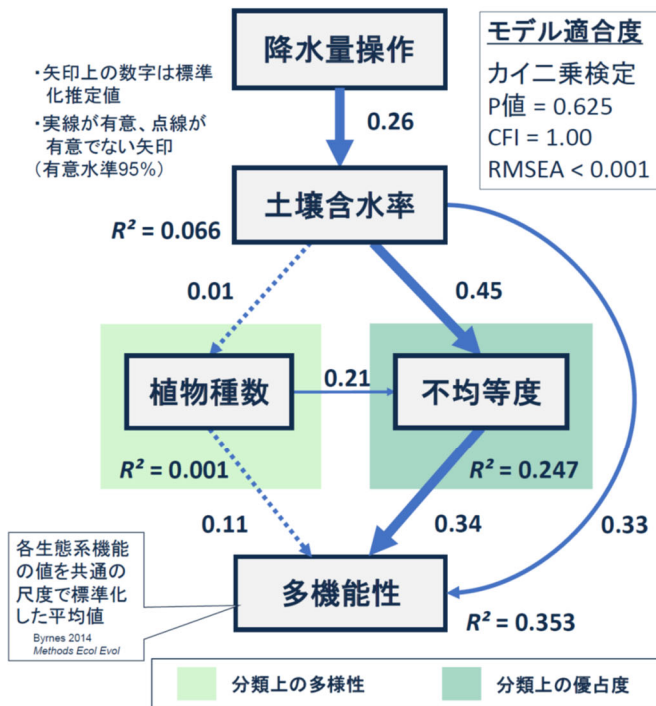


Fig.2) Functional based model

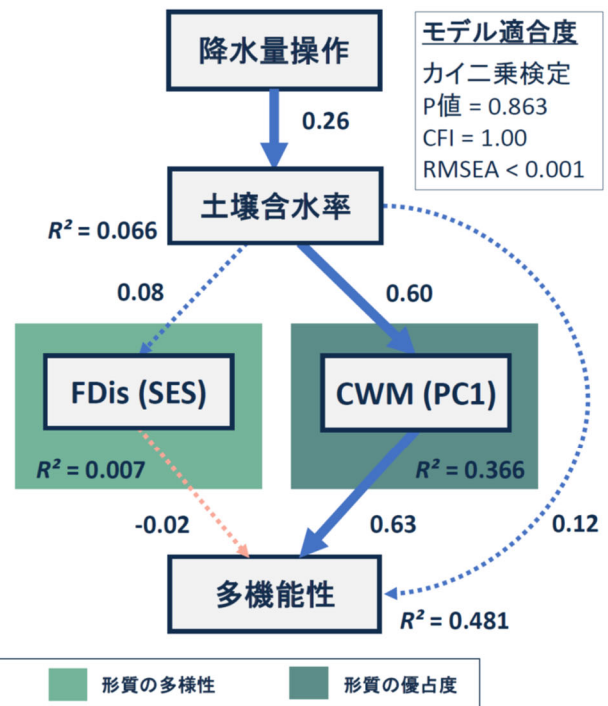


図 4 - 2. 降雨量操作が群集組成の変化および生態系の多機能性に及ぼす影響のパス解析. 降雨量操作による湿润化で群集構造の不均一化を引き起こし、生態系の多機能性に影響を及ぼしていることが示唆された (左図)。群集組成を機能形質の群集加重平均値に置き換えた場合でも同様の傾向がみられた (右図)。

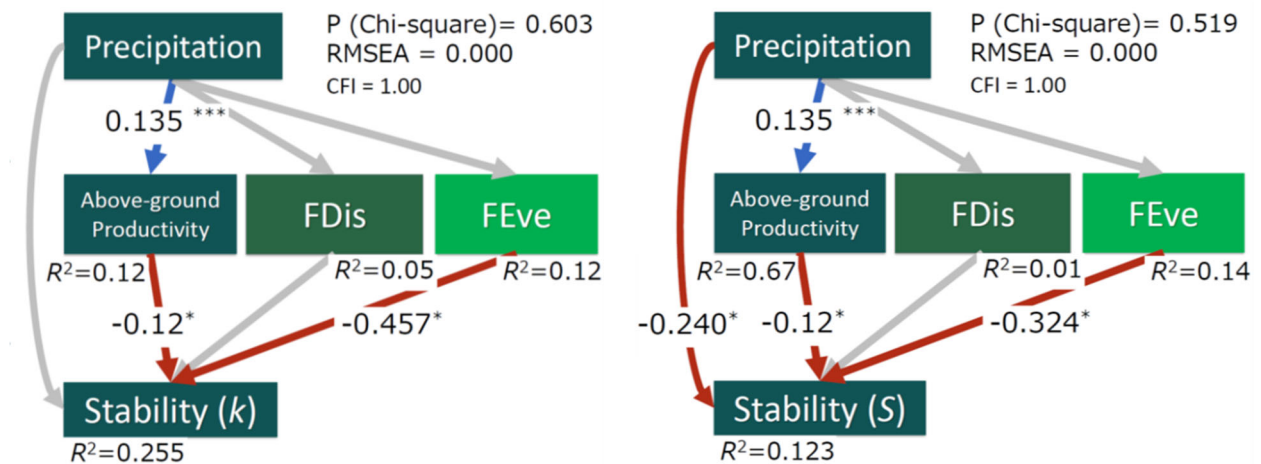


図 4 - 3. 分解機能の安定性に対する操作降雨量および草本群集の機能的多様性のパス解析。初期分解速度 (k , 左図) および炭素貯留性 (S , 右図) の安定性ともに、草本群集の機能的均等度 (FEve) が高まるほど低下した。

中国内モンゴルの干ばつ試験区では、分解機能の年変動と植物種多様性の解析を実施した。3年間継続した初期分解速度と炭素貯留性のデータから、分解機能の安定性に対する操作降雨量および植物群集の機能的多様性の関係性を階層的に解析した。その結果、降水量を減少させた環境下では、初期の草本群集の機能的多様性が高いほど、局所の分解機能はより変動することが示唆された (図 4 - 3)。これより、より多様な植物群集が形成する局所の不均一性が、群集全体の分解機能の安定性に寄与する可能性を示唆した (生態学会年次大会で発表)。一方、基礎的な生態系の多機能性の安定性を維持するメカニズムを解くために行った、同所の生物多様性-生態系機能の大規模実験地での長期調査からは、

草本群集を構成する各種が非同調的に年変動することが、生態系の多機能性の安定性に寄与していることを明らかにした(37)。これら草地試験による時空間的な群集動態や機能形質の解析から、生物多様性が気候変動に対して生態系の多機能性を安定化させることで、強靱化に寄与し得る知見を、多面的に明らかにした。

4-2.

日本の森林生態系の多様性（樹木種数）とバイオマス貯蓄量、一次生産速度を解析した結果、概して種数とバイオマス及び生産性に正の関係性が見られた（図4-4）。さらに、これらの多様性による機能的な貢献（ここでは、バイオマス貯蓄や生産性に対する）は、温度勾配で変化することが分かった。以上より、樹木多様性が森林の炭素隔離に貢献しうること、その効果が将来的な温暖化により変化する可能性が示唆された(38)。

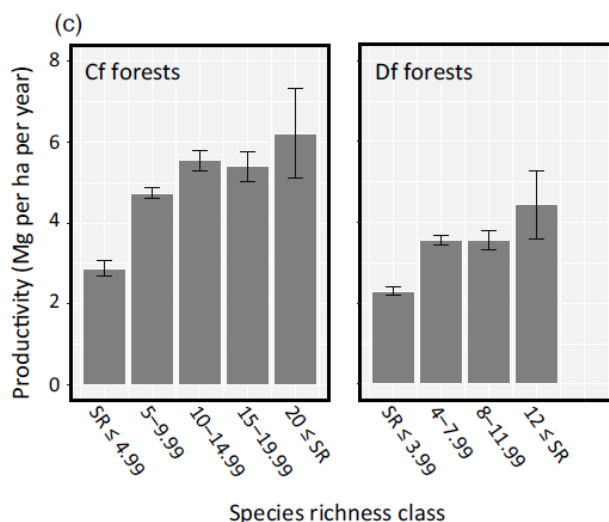


図4-4. 沖縄から北海道までの森林生態系において、単位面積当たりの年間の地上部一次生産能力（縦軸）と樹種数（横軸）との関係を示した。CfとDfはケッペンの気候区分による森林タイプの違いである。

2019年に報告された研究(39)では、地球上でまだ植林可能な約9億ヘクタールの場所で森林化を行うことで二酸化炭素2050億トンを吸収できることが示された [ただし、計算結果には異論がある(40)]。このような森林再生による温室効果ガスの吸収と気候変動緩和の可能性は注視すべき事項である。しかしながら、ここで留意したい。この研究報告(39)では、世界中の可能な場所を森林化するといった際に、どのような種構成の森林にするのかの文脈に欠ける。たとえば、単一樹種の植栽は、世界中で頻繁に実施される植林方法だが、木材生産といった産業目的以外では、必ずしも適した方法とは言えない。本研究(38)で示したように、樹種多様性に富む森林は、炭素隔離能力に優れ、気候変動の緩和において重要な役割を持つ。今後の森林率の増加においては、樹種多様性に富む森林の創出が肝要と言える。

有機物分解の野外試験については、世界中で得られた試験1年目データの予備解析から、気候要因に匹敵する分解者昆虫の効果を検出した（図4-5）。現在2年目の結果を世界中のサイトと統合中であり、この結果をさらに加え、健全性が高く頑健な生態系がどのように陸域の炭素動態に関わるのかをより詳細に解析する。植物リターの多様性については、既存研究を統合したメタ解析の結果、リター多様性が上がるほどに有機物リター分解速度が向上することが分かった（査読中）。そして、その効果は、2080年までに生じる気温上昇の効果に相当することも分かった（図4-6）。このことから、単一種人工林の造成や農地造成といった植生を単調化するような土地利用は、植物種多様性を低下させ、ひいては落葉リターを単調化することで生物圏の炭素循環を大きく変え得る可能性が示唆された。

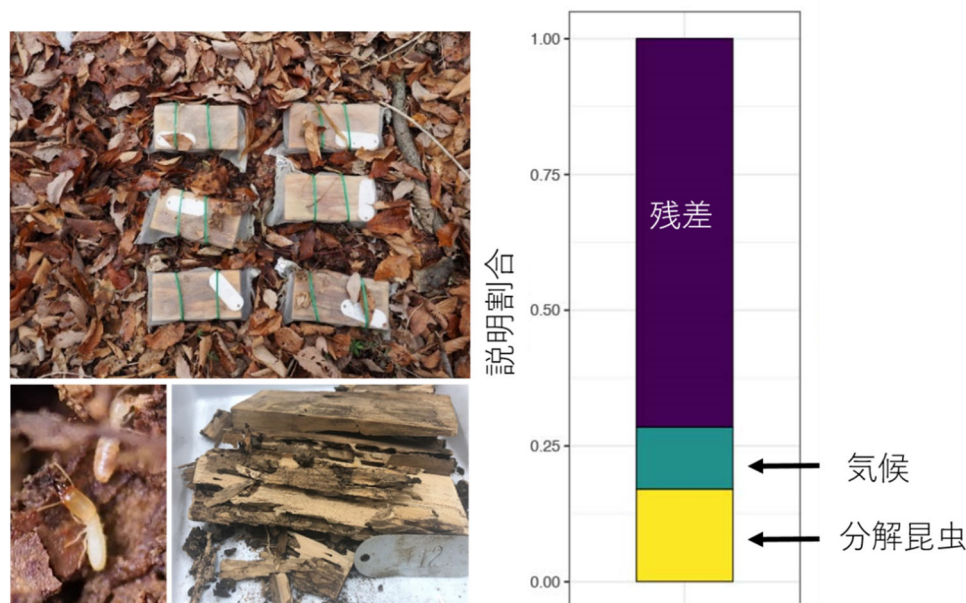


図4-5. 木材分解試験の様子と（左）、世界多地点における1年目の重量減少率に対する分解昆虫の有無、および気候要因の説明割合。気候要因と同等の昆虫分解者の効果を検出した。

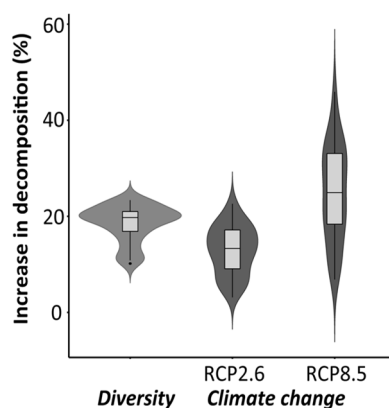


図4-6. 植物リター多様性（緑）と平均気温上昇（赤）が有機物リターの分解速度に与える影響評価。1種を多種化することは、将来的な温度上昇による効果に相当する。

4-3.

開発した生態系改変速度指標（自然植生から他の土地利用への過去10年間の改変；LUI）の時系列データと潜在性多様性地図(41)を応用した解析を行った(42)。その結果、生物多様性ホットスポットと同等のポテンシャルを持つ未認識の地域が抽出された（図4-7上）。この未認識スポットと生物多様性ホットスポットにおけるLUIの履歴には対照的な点が確認された。両者における過去500年間の土地利用の歴史を検証したところ、生物多様性ホットスポットとされる地域では、土地利用改変が比較的ゆっくりと行われてきたことが分かった（図4-7下）。このような地域の土地改変速度の履歴と残存する生物多様性の関係性を解析することで、将来的な環境変動シナリオに対応した生物多様性保全の適応策を講じ得る可能性がある。既存のシナリオに基づいた土地利用予測(34)を用いた解析では、2100年までに面積の70%以上が改変されてしまう潜在地域が多く抽出された。土地利用の管理に基づいた生物多様性保全の適応策の必要性和緊急性は高いと言える(42)。

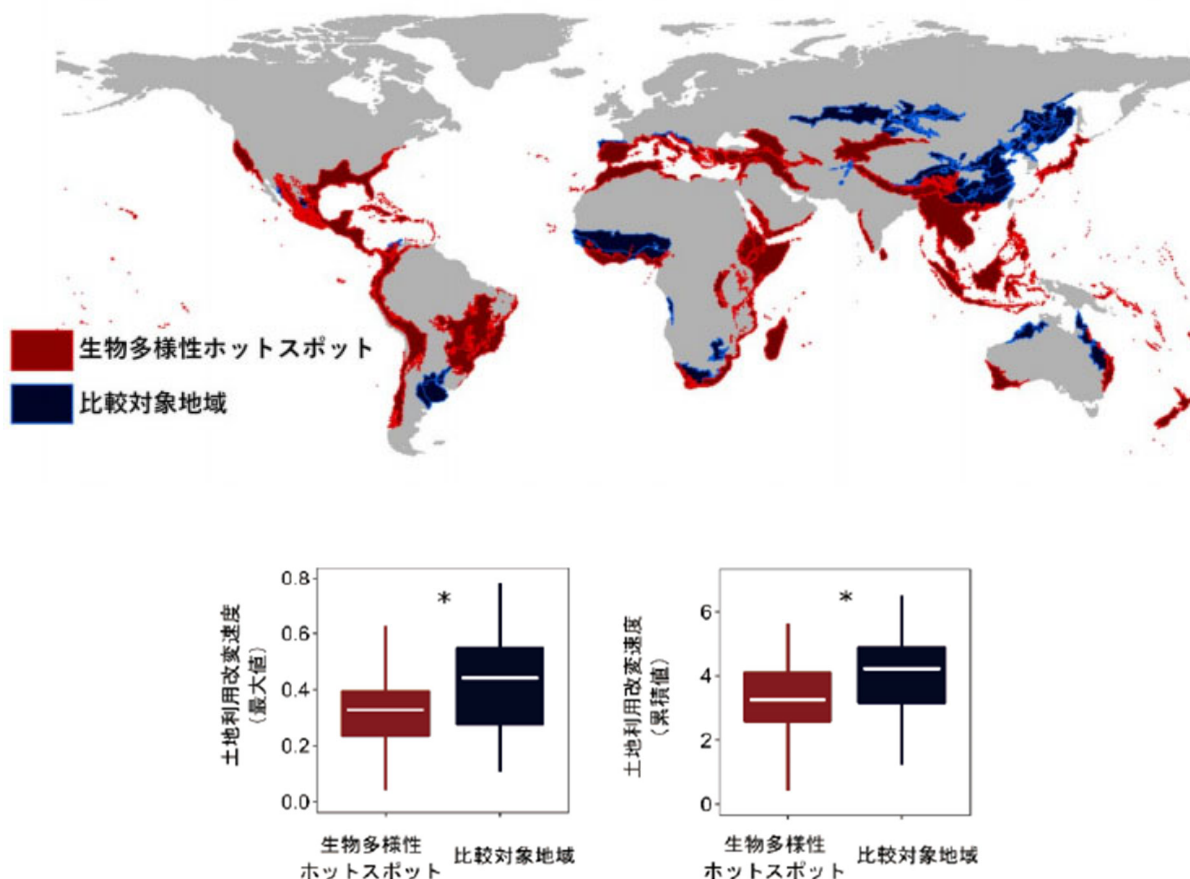


図4-7. 生物多様性ホットスポットと比較対象地域の地図（上）、および生物多様性ホットスポットと比較対象地域における過去500年間の土地利用変化速度の比較（下）

世界中の50保護区の温帯林を対象に、その内外で森林撈乱パターンをランドサットデータで比較した(43)。その結果、人為影響下にある保護区外の森林で撈乱パターンが単純化されていることが分かった。さらに、暖かく乾燥した地域では山火事や干ばつなどの大規模撈乱が卓越しているために、上記傾向が弱いことが示された。しかしながら、全体として気候と撈乱の結びつきがみられるので、今後の温暖化で山火事などの大規模撈乱が増えるかもしれないと考察された。現状の植生動態モデルなどでは森林撈乱は十分に考慮されておらず、今回の結果のような実際のパターンをモデルに組み込むことが今後の気候変動対応に重要であることが示唆された(43)。

気候の中で生じる中期的な振動（エルニーニョ・南方振動など）は、干ばつなどの極端現象の要因であるが、近年では、これらの気候パターンは社会情勢を不安定化させ、紛争や暴動の発生確率まで増加させること（撈乱の災害への拡大）が明らかになってきた(22)。この報告は、気候変動と社会情勢の関係性のパターン解析であり、その背景にあるメカニズムの詳細は未説明のままである。エルニーニョと自然災害の同調性解析から、テレコネクション国の中でも過去10年間におけるLUIが高い国のグループでは、エルニーニョに関連した災害の被影響者数や被害額の増加率が有意に高い傾向が見られた（図4-8：干ばつ災害の場合）。このことから、気候変動時の撈乱イベントが社会にとっての自然災害に拡大するプロセスに、土地改変に起因する生態系の脆弱化が関与している可能性が示唆された。一方、LUIの高い国グループにおけるエルニーニョ発生時の災害変数の増加傾向は、自然災害タイプ（干ばつ、洪水、山火事など）ごとに必ずしも一致せず、災害タイプによって生態系改変による脆弱化の影響やそのプロセスが異なることが示唆された。このことから、エルニーニョに気象が遠隔相関を受ける地

域では、土地改変速度を管理・制御することで、生態系をベースにした防災・減災の策を講じ得る可能性が高い。ただし、災害タイプごとに生態系改変速度と災害強度との関係性を特徴づけることで、生態系ベースの適応策が有効な自然災害を見極める必要がある（日本生態学会年次大会等で発表）。

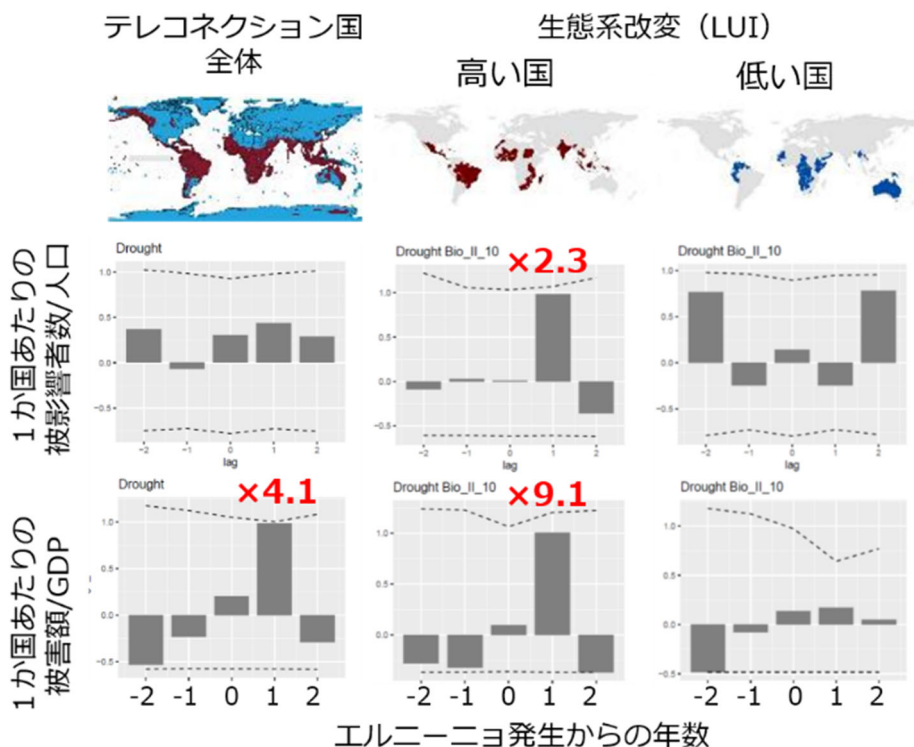


図4-8. 生態系改変速度の高い国と低い国のグループにおけるエルニーニョ発生時の干ばつ災害変数の同調的な増大。赤い数字はエルニーニョ発生年およびその翌年に検出された災害データの有意な増加とそれ以外の年と比較した増加率を示している。

日本の森林生態系を対象に、集水域ごとの森林の樹種数と表層崩壊との関係性を解析した。表層崩壊時の土砂流出量をハザード指標として、この変数を説明づけるモデルの構築を行った。説明変数として生物・非生物要因を用いた。この表層崩壊予測モデルの予測精度が、樹種が高いほどに高まることを見出した。このことから、樹木多様性を高く維持する土地利用が、災害予測に係る不確実性を削減し得ることが示唆された(44)。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

自然環境を持続可能な形で管理し利用することは、さまざまな社会環境問題の解決に重要な認識が高まりつつある。このような自然ベースの解決策（Nature-based solutions）は、気候変動の問題対処において、とくに費用対効果が高いことが期待されている(Cohen-Shacham et al. 2016, Griscom et al. 2017, Seddon et al. 2019)。言い換えると、自然生態系の保全と活用が、気候変動の緩和策と適応策の両者に必須と言える。このような国際的な政策の展開を支えるのは科学の役目である。この点において補完すべき科学的知見を特定し、野外での大規模操作実験、理論研究、野外観察、全球規模でのデータ統合といったさまざまなアプローチで研究を実施した。

陸域生態系では、自然をベースにした緩和策への政策的関心がとくに高い。先述のように、ボン・チャレンジでは、36の国・企業が約1.13億ヘクタールの森林再生を約束した。ただし、定義に基づく、単一樹種の植林地も森林に分類される。そして多くの国の目標は、商業性を念頭に置いた単一種植林の

造成ゆえに、森林再生の政策的取り組みによる炭素隔離の効果は限定的であることが懸念されている(Lewis et al. 2019b)。同様な森林再生の取り組みは、世界経済フォーラムによるトリリオンツリープログラムなど、ますます盛んになっている。しかしながら、生物多様性に富む健全な自然生態系の価値については注視されていない(2)。実際に、気候変動に伴う炭素収支変化を予測するモデルが多数開発されているが、そこでは『生物多様性』の文脈を欠く。これら動態植生モデルや生物地球化学モデルにおいては、森林被覆率の変化に主眼が置かれており、樹種多様性の変化は考慮されていない。上記の政策と科学における知見の欠損は、気候変動緩和という文脈では甚大であると考えられる。本サブテーマでは、炭素隔離と貯留という役割を鑑みたときに、健全かつ頑健な陸域生態系の役割、機能性を、さまざまなスケールとアプローチで定量的に評価したことに意義がある。

さらに、緩和策よりも学術的知見が乏しいと考えられる適応策において、陸域生態系の果たす可能性を精査した。とくに、気候変動下では極端気象現象への人間社会側の暴露と脆弱性の変化が相互作用することで、災害リスクが増幅していることが強調されている(IPCC 2012)。自然界で普遍に生じる干ばつ、火事、洪水、虫の大発生などの自然攪乱は、人為的な気候変動により自然災害となりつつある。そして、土地利用の失敗、生態系管理の失敗は、このような自然災害のリスクをさらに増大させる(Mori 2011b)。気候変動下で大規模な干ばつや山火事は増加傾向にある一方で、対処のための経済的・人的資源は有限であるので、生態系のどの要素を優先的に保全するのかを考察する必要がある(トリアージ)(12)。本サブテーマでは、過去の土地利用、生態系改変がもたらしてきた災害リスクの増加を実際に検出したことに意義がある。たとえば、生態系を基軸とした防災・減災(Eco-DRR)、あるいは、グリーン・インフラストラクチャーの枠組みでは、単に緑ある景観が災害抑止に資するだけでなく、如何なるプロセスをもって生態系が災害に寄与しているのかを解明する必要がある。とくに、自然が有する生物多様性が、災害抑制にどのように貢献するのかについては科学的知見が極めて乏しい。本研究は、「生物多様性-生態系機能」の研究によって培われた知見を応用し、生態系が災害リスクの削減につながる可能性評価を試みた数少ない研究成果である。しかしながら、自然災害と生態系保全の関係性、そしてそれが気候変動下での適応策に資する可能性については、まだまだ不確実性が高い。今後は、生態系と生物多様性保全による自然災害リスク低減の可能性についてさらなる科学的実証が求められる。

(2) 環境政策への貢献

環境省「第五次環境基本計画」において、気候変動対策と生物多様性の確保・自然共生は、重点戦略を支える環境政策の根幹とされた。しかしながら、気候変動セクターでは、生物多様性は気候変動により影響を受ける対象であるとされ、気候変動に向き合うための存在であるとは認識されていない。IPCCを含む国内外の各報告書等でも、温暖化や異常気象により生物多様性が脅かされるとの表現は頻出する。一方で、「生物多様性が気候変動の緩和や適応に資する」との考え方は稀である。この点において、生物多様性の役割を精査し得た結果は、気候変動政策と生物多様性政策、言い換えれば気候変動枠組み条約(UNFCCC)と生物多様性条約(CBD)に係る政策的枠組みをつなぐ上での、一定の科学的根拠を提供したと言える。

さらに、本サブテーマでは、生物多様性が生態系機能とサービスを支えていることを、さまざまな時空間スケールで実証した。たとえば、炭素隔離による温暖化緩和の可能性、災害低減の可能性などである。環境省・生物多様性及び生態系サービスの総合評価(JBO2)では、「生態系サービス評価の高度化」が課題として示されていた。2014年9月には、CBDの枠組みにおいて、各国の生物多様性国家戦略に生物多様性による災害リスク低減の可能性を組み込むことの提言がなされた。本サブテーマでは、これらの政策ニーズを支える複数の科学的知見を提供したと考える。

日本の林野では、2019年4月より、「森林環境税及び森林環境譲与税に関する法律」が施行された。この法律は、パリ協定の枠組みの下におけるわが国の温室効果ガス排出削減目標の達成、災害防止、水

源涵養などの機能を担う森林を、目的税を用いて整備保全することを目的としている。また、同時に「森林管理経営法」も施行された。この法律では、意欲ある経営者に林業を委ねるものである。これらの施策では、林業に適さない人工林は、樹種多様な自然度の高い森林へと誘導することを念頭に置いており、現在の単一種人工林の約3分の1が、樹種多様化の対象と考えられている。このような国土の在り方の変革を迎えている今、本サブテーマの成果は、気候変動の緩和機能をはじめとした森林生態系の役割、その公益性を定量化することにより、国内の人工林、天然林の役割分化やゾーニングにも資すると考えている。

<行政が既に活用した成果>

1. G7政府首脳に対する科学政策提言「Gサイエンス学術会議共同声明（G7各国学術会議の共同発出）」のうち、生物多様性と生態系サービスに関わる宣言文の策定に貢献した。（2020年5月12日に米国科学アカデミーより共同声明が公開される予定）
2. 国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）「研究開発の俯瞰報告書」環境・エネルギー分野（2019年）において、環境領域2「生物多様性・生態系の把握」および「生物多様性・生態系の管理・活用の執筆を行い、各省庁の環境政策立案の基本資料の提供に至った。
3. Methodological Assessment Report on Scenarios and Models of Biodiversity and Ecosystem services. The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). 2016年公開の上記報告書の執筆に貢献した。
4. 生物多様性が気候変動下で生態系機能を支える原著論文（2015年、Nature）は、環境省・生物多様性及び生態系サービスの総合評価（JBO2）、EUホライズン2020報告書、CBD支援の下で策定されたIUCN報告書、をはじめとする多くの政策報告書・提言書で引用されている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

1. 北海道知床国立公園における生態系復元のための専門会議において、科学委員として貢献してきた。森林化による炭素蓄積、温暖化緩和の効果定量化が今後の当地での土地管理計画に反映されると期待される。
2. 国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）「研究開発の俯瞰報告書」環境・エネルギー分野（2019年）の作成に貢献した。この報告書は、各省庁の環境政策立案の基本資料である。
3. Methodological Assessment Report on Scenarios and Models of Biodiversity and Ecosystem services. The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). 2016年公開の上記報告書の執筆に貢献した。
4. 日本学術会議・第24期学術の大型研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン2020）のうち学術大型研究計画40（統合生物学分野）および46（農学分野）の作成に貢献した。
5. G7政府首脳に対する科学政策提言「Gサイエンス学術会議共同声明（G7各国学術会議の共同発出）」は内閣総理大臣に手交される予定である。宣言内容は今後の我が国およびG7各国の科学、環境及び産業政策に反映されると期待される。
6. 日本学術会議・農学委員会林学分科会による提言作成に貢献した。気候変動下で期待される木質資源の有効利用についての提言である。今後の農林政策及び環境政策に反映されると期待される。
7. COVID-19によるUNFCCC COP26の延期に伴って、今後のサミットの在り方を問う論考を依頼執筆した（Nature Climate Change）。国際条約等の会議の進め方、衡平性の担保などは、UNFCCCだけに限らず今後の国際社会の議論の進め方の基礎となると期待される。

6. 国際共同研究等の状況

生態系機能安定性の野外検証実験：中国科学院 Dr. Yongfei Bai、Dr. Qingmin Panとの共同研究で、干ばつ下における生物多様性と生態系機能の安定性に関する操作実験を、中国・内モンゴルの草地試験地で平成27年度より実施した。同様の実験を北海道・天塩でも実施しているが、これらの2つの調査は世界的な干ばつ研究ネットワーク（Drought-Net, 代表：米国コロラド州立大学 Dr. Melinda Smith）に参画するものである。本課題では4年間の降雨量操作実験の実施を完了し、時間的安定性の解析に必要なデータが蓄積された（Okada et al. 投稿準備中）。得られたデータは同ネットワークで共有され、東アジア地域の貴重なデータを提供した。2019年5月にはワークショップに参加し（アメリカ・コロラド州）世界中のネットワークの参画者とともにデータ統合を完了した。前例のない全球を網羅した多地点データをもとに、干ばつが生物多様性と生産性に及ぼす影響に関する論文の国際学術誌への公表準備を進めている。干ばつに対する適応策としての生物多様性保全の効果に関して、確度の高い科学実証結果が提供されると期待される。有機物分解と分解者多様性の解析のために行った木材分解実験では、統一プロトコルを用いた世界115地点での2年間の調査が完了しており（Global Wood Decomposition Experiment, 代表：米国ジョージワシントン大学 Dr. Amy Zanne）、本課題からは中高緯度地域アジア圏唯一のデータを提供した。2018年12月に参加したデータ統合のためのプレミーティングでは（オーストラリア・シドニー）、初年度データの統合に貢献し全データ統合のための基盤が整備された。2020年に開催予定の全体ワークショップにおいて（COVID-19により延期中）、分解者多様性を加味した全球の木材分解速度モデルの構築を行い、国際学術誌への公表が進められる予定である。本成果によって、巨大な炭素貯留源である森林倒木の分解速度と生物多様性の傾向、特に主要な分解者であるシロアリの種分布と気候の全球的な関係が明らかになり、生態系における緩和策の効果を予測する上で説明力の大きい科学検証結果が提供されると期待される。さらに、上述のような「生物多様性—生態系機能」の関係性についての局所知見を政策提言に資するスケールへと昇華させる国際共同研究として、米国ミネソタ大学 Dr. Forest Isbellが率いるプロジェクトにも参加した（プロジェクト概念は、Isbell et al. 2017, Natureに詳しい）。総数30名に近い参加者がさまざまなデータを持ち寄り、全球規模での生物多様性応答とその結果としての生態系機能への帰結を探っている。

7. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表

<論文（査読あり）>

1. Mori AS (2020) Next-generation meetings must be diverse and inclusive. *Nature Climate Change* 10: in press.
2. Seidl R, Honkaniemi J, Aakala T, Aleinikov A, Angelstam P, Bouchard M, Boulanger Y, Burton P, De Grandpré L, Gauthier S, Hansen W, Jepsen J, Jöngiste K, Kneeshaw D, Kuuluvainen T, Lisitsyna O, Kobayashi M, Mori AS, Pureswaran D, Shorohova E, Shubnitsina E, Taylor A, Vladimirova N, Vodde F, Senf C (2020) Globally consistent climate sensitivity of natural disturbances across boreal and temperate forest ecosystems. *Ecography* 43: in press.
3. Mori AS (2019) Local and biogeographic determinants and stochasticity of tree population demography. *Journal of Ecology* 107: 1276-1287.
4. Kobayashi Y, Okada K, Mori AS (2019) Reconsidering biodiversity hotspots based on the rate of historical land-use change. *Biological Conservation* 233: 268-275.

5. Sasaki T, Lu X, Hirota M, Bai, Y. (2019) Species asynchrony and response diversity determine multifunctional stability of natural grasslands. *Journal of Ecology* 107: 1862-1875.
6. Mori AS, Isbell F, Seidl R (2018) β -diversity, community assembly and ecosystem functioning. *Trends in Ecology & Evolution* 33: 549-564.
7. Mori AS (2018) Environmental controls on the causes and functional consequences of tree species diversity. *Journal of Ecology* 106: 113–125.
8. Sommerfeld A, Senf C, Buma B, D'Amato A, Després T, Díaz-Hormazábal I, Fraver S, Frelich L, Gutiérrez A, Hart S, Harvey B, He H, Hlásny T, Holz A, Kitzberger T, Kulakowski D, Lindenmayer D, Mori AS, Müller J, Paritsis J, Perry G, Stephens S, Svoboda M, Turner M, Veblen T, Seidl R (2018) Patterns and drivers of recent disturbances across the temperate forest biome. *Nature Communications* 9: 4355.
9. Kobayashi Y, Mori AS (2017) The potential role of tree diversity in reducing shallow landslide risk. *Environmental Management* 59: 807-815.
10. Isbell F, Craven D, Connolly J, Loreau M, Schmid B, Beierkuhnlein C, Bezemer TM, Bonin C, Bruelheide H, De Luca E, Ebeling A, Griffin JN, Guo Q, Hautier Y, Hector A, Jentsch A, Kreyling J, Lanta V, Manning P, Meyer ST, Mori AS, Naeem S, Niklaus PA, Polley HW, Reich PB, Roscher C, Seabloom EW, Smith MD, Thakur MP, Tilman D, Tracy BF, Van Der Putten WH, Van Ruijven J, Weigelt A, Weisser WW, Wilsey B, Eisenhauer N (2015) Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature* 526: 574-577.

<査読付論文に準ずる成果発表>

査読有り政策報告書

1. Akçakaya, HR, Pereira, HM, Canziani G, Mbow C, Mori A, Palomo MG, Soberón J, Thuiller W, Yachi S (2016). Chapter 8. Improving the rigour and usefulness of scenarios and models through ongoing evaluation and refinement. The methodological assessment report on scenarios and models of biodiversity and ecosystem services. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform for Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany.

査読なし政策報告書

1. 森 章. (2019) 生物多様性・生態系の把握. 「研究開発の俯瞰報告書」環境・エネルギー分野. 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)

<その他誌上発表 (査読なし) >

著書

1. 森 章 (コーディネーター: 甲山隆司) (2018) 生物多様性の多様性. 共立スマートセレクション 23. 共立出版 (ISBN: 978-4-320-00922-6)
2. Mori AS (2018) Modern threats to the stability of biological communities. In: Dominick A. DellaSala, and Michael I. Goldstein (eds.) *The Encyclopedia of the Anthropocene* 3: 77-83. Oxford: Elsevier.
3. 森 章 (2016) 生態学における攪乱. 日本植物学会 (編集) 植物学の百科事典. 丸善出版, pp248-249.

(2) 口頭発表 (学会等)

1. 小林勇太,森章「樹木多様性に基づく土砂災害リスク削減の可能性」日本生態学会第63回全国大会 (2016年3月)
2. 岡田慶一,藤井紗織,森章「降水量操作下における植物多様性—分解の関係性」第63回日本生態学会大会 (2016年3月)
3. 高木勇輔「気候変動下における生物多様性と生態系の変化」2015年度天塩研究林利用者セミナー (2016年3月)
4. 小林勇太,岡田慶一,森章「気候変動シナリオに基づく土地改変と生物多様性の関係性を探る」日本生態学会第64回全国大会 (2017年3月)
5. 高木勇輔,岡田慶一,小林真,藤井佐織,森章「在来種と外来種が混在する自然群集における植物種数と多機能性の関係」日本生態学会第64回全国大会 (2017年3月)
6. 高木勇輔「降雨量操作下における生物多様性と多様性の関係」2016年度天塩研究林利用者セミナー (2017年3月)
7. 高鳥友樹「雨の量が変わると集まる植物が変わる?そのメカニズムは?」2016年度天塩研究林利用者セミナー (2017年3月)
8. K Okada, Y Kobayashi, AS Mori: 12th International Congress of Ecology, Beijing, China, A possible linkage between land-use intensity and natural disaster risks: A consideration for the Eco-DRR at global scale (2017年8月)
9. Y Kobayashi, K Okada, AS Mori: 12th International Congress of Ecology, Beijing, China, Linking terrestrial biodiversity and historical land-use transitions (2017年8月)
10. 小林勇太「生態系サービス主流化の課題」 S14セミナー『経済学・生態学をつなぐ自然資本—社会実装には何が必要か』, 横浜, (2018年1月)
11. 高木勇輔「自然群集における多様性と多機能性の関係: 気候変動の文脈を添えて」第38回関東地区生態学関係修士論文発表会 (2018年3月)
12. 高木勇輔「庁舎横の植物多様性: 降水量操作とともに」2017年度天塩研究林利用者セミナー (2018年3月)
13. 高鳥友樹「雨の量が変わると草の形の多様性はどうか?」2017年度天塩研究林利用者セミナー (2018年3月)
14. 岡田慶一, 松岡俊将, 土居秀幸, 小林真, 佐々木雄大, 森章「降水量変化に伴う植物-根圏菌類群集の多様性と生態系機能の関係」日本生態学会第67回全国大会 (2020年3月)
15. Tomoki TAKATORI, Kei-ichi OKADA, Shuntaro KONDO, Makoto KOBAYASHI, Takehiro SASAKI, Masaki UCHIDA, Akira S MORI. The 67th annual meeting of the Ecological Society of Japan. Responses of taxonomic and functional composition of herbaceous plant communities to rainfall changes (2020年3月)
16. 高鳥友樹「Responses of taxonomic and functional composition of herbaceous plant communities to rainfall changes」第40回関東地区生態学関係修士論文発表会 (2020年2月)
17. 高鳥友樹「雨が増えると草の多様性はどうか?」2019年度天塩研究林利用者セミナー (2020年2月)
18. 近藤駿太郎「雨が増えると草原が有する多様な役割はどうか?」2019年度天塩研究林利用者セミナー (2020年2月)
19. 岡田慶一「問寒別の草原・森から気候変動を考える: 降雨量操作実験と木材分解実験」2019年度天塩研究林利用者セミナー (2020年2月)

ポスター発表

1. 小林勇太,森章「樹木多様性に基づく土砂災害リスク削減の可能性」日本生態学会第63回全国大会 (2016年3月)

2. 岡田慶一,藤井沙織,森章「降水量操作下における植物多様性—分解の関係性」第63回日本生態学会大会（2016年3月）
3. 小林勇太,岡田慶一,森章「気候変動シナリオに基づく土地改変と生物多様性との関係性を探る」日本生態学会第64回全国大会（2017年3月）
4. 高木勇輔,岡田慶一,小林真,藤井佐織,森章「在来種と外来種が混在する自然群集における植物種数と多機能性の関係」日本生態学会第64回全国大会（2017年3月）
5. K Okada, Y Kobayashi, AS Mori: 12th International Congress of Ecology, Beijing, China, A possible linkage between land-use intensity and natural disaster risks: A consideration for the Eco-DRR at global scale (2017年8月)
6. Y Kobayashi, K Okada, AS Mori: 12th International Congress of Ecology, Beijing, China, Linking terrestrial biodiversity and historical land-use transitions (2017年8月)
7. 岡田慶一, 内田圭, 佐々木雄大, 藤井佐織, Lu Xiaoming, Bai Yongfei, 森章, 「植物多様性は分解機能の経時安定性に貢献するか? : 内モンゴル・ステップ草原での検証実験」日本生態学会第65回全国大会（2018年3月）
8. 高鳥友樹, 高木勇輔, 岡田慶一, 小林真, 森章, 「降水量操作下における植物群集の機能的多様性パターン」日本生態学会第65回全国大会（2018年3月）
9. 高木勇輔, 岡田慶一, 小林真, 藤井佐織, 佐々木雄大, 森章, 「自然群集における植物種数と多機能性の関係: 気候変動の文脈を添えて」日本生態学会第65回全国大会（2018年3月）
10. 山田靖子, 岡田慶一, 小林真, 日浦勉, 内田雅己, 森章, 「多種共存する樹木形質の種間・種内変異」日本生態学会第65回全国大会（2018年3月）
11. 岡田慶一, 佐々木雄大, Qingmin Pan, 森章「草本群集の多様性を介した干ばつ下における分解機能の安定性」第66回日本生態学会大会プログラム（2019年3月）
12. 山田靖子, 岡田慶一, 小林真, 日浦勉, 高木健太郎, 内田雅己, 森章「トドマツの葉の機能形質の種内・個体内変異」第66回日本生態学会大会プログラム,（2019年3月）
13. 高鳥友樹, 岡田慶一, 近藤駿太郎, 小林真, 佐々木雄大, 内田雅己, 森章「降雨量操作が植物群集構造に与える影響: 機能形質を用いたアプローチ」第66回日本生態学会大会プログラム（2019年3月）
14. 近藤駿太郎, 岡田慶一, 高鳥友樹, 小林真, 佐々木雄大, 内田雅己, 森章「降水量変動下における草本群集の多様性、機能形質と生態系機能」第66回日本生態学会大会プログラム（2019年3月）
15. 橘太希, 内田圭, Xiaoming Lu, Xuezheng Zhao, 岡田慶一, 近藤駿太郎, 森章, Yongfei Bai, 佐々木雄大「訪花昆虫を介した植物多様性による種子生産への影響: 植物の除去操作実験による検証」第66回日本生態学会大会プログラム（2019年3月）
16. 小林勇太, 森章. 「生態系の多様性の損失が地球規模の純一次生産に与える影響。」第66回日本生態学会（2019年3月）
17. 近藤駿太郎, 岡田慶一, 飯田佳子, 新山馨, 齊藤哲, 森章「照葉樹林の樹種多様性と地上部生産性の関係におけるスケール依存性」第67回日本生態学会全国大会（2020年3月）

(3) 知的財産権

「特に記載すべき事項はない。」

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

1. 富士通研究所において「生物多様性の形成プロセスと帰結」の講演を行った（2016年2月8日、観客約30名）
2. Vrije Universiteit Amsterdam（オランダ・アムステルダム自由大学）において「The causes and consequences of biodiversity」の講演を行った（2016年2月19日、観客約15名）

3. Université Laval, Centre d'études nordiques (カナダ・ラバル大学) において「The causes and consequences of biodiversity」の講演を行った(2016年3月8日、観客約15名)
4. UBS証券・ランチョンセミナーにおいて「攪乱生態学と生物多様性」の講演を行った(2016年7月28日、観客約60名)
5. 日本学術振興会主催"Biology of biodiversity" Commemorative Symposium for the 32nd International Prize for Biologyにおいて、「Disentangling the causes and functional consequences of biodiversity in natural systems」の講演を行った(2016年11月22日、東京大学、観客約200名)
6. 神奈川県立横須賀高等学校・横高アカデミアにおいて、「人間社会と環境問題の関わりあいについて：生物多様性の意味と意義から考える」の講演を行った(2017年1月25日、聴講生約30名)
7. Université Laval, Centre d'études nordiques (カナダ・ラバル大学) の年次大会の基調講演「Evaluating the causal linkages between biodiversity and the environment in the arctic tundra」において研究成果の一部を紹介した(2017年2月16日、観客約150名)
8. 企画集会「気候変動の緩和・適応策：生態系影響予測から人間活動との関係まで」(2017年3月16日、日本生態学会第64回大会企画集会、早稲田大学、観客約60名)を開催した
9. シンポジウム「気候変動と生物多様性の相互作用：生態系の機能性とサービスへの帰結」(2017年3月15日、日本生態学会第64回大会シンポジウム、早稲田大学、観客約200名)を開催した
10. 生物多様性に由来する生態系の防災・減災ポテンシャルと適応策への応用，環境省推進費S14主催公開シンポジウム：気候変動適応策と生態系を活用した防災・減災，東京，2018年12月

(5) マスコミ等への公表・報道等

1. Time Magazine, Mongabay, Science2.0, AZoCleantech, Minnesota Daily, ハフィントン・ポストにて、気候変動と生物多様性に関する論文 (Isbell et al. 2015, Nature) が紹介された (2015.10.14)
2. ウェブサイト「サイエンスニュース」にて、生物多様性の役割を解説 (2016.01.08)
3. 朝日小学生新聞にて、山火事に関するコメント掲載 (2017.06.04)
4. アメリカ生態学会とイギリス生態学会の合同オンライン特集号にて、「生物多様性と生態系機能」についての総説が選出掲載 (2017.08.02)
5. テレビ朝日「特捜X実録映像コップ」にてカリフォルニアでの山火事について解説 (2018.07.16)
6. NHK-BSP「ニッポンの里山」に取材協力 (2018.10.01)
7. TBSラジオ・セッション22に出演、山火事について解説 (2018.11.14)
8. 毎日新聞にて、山火事の取材対応 (2018.11.21)
9. テレビ朝日「報道ステーション」にて、山火事についての解説 (2019.01.23)
10. NHK山形 蔵王の樹氷を形成するアオモリトドマツの虫枯れについて取材協力 (2019.05.28)
11. 時事通信社、アマゾンでの森林火災について解説 (2019.09.04)
12. NewsPicks番組「Weekly Ochiai」に出演、プラネターリーバウンダリーについて解説と議論を行った (2019.10.03)
13. NHK BS BSスペシャル「大火災 森林・都市を襲うメガファイアの脅威」制作協力 (2019.12.20)
14. リコー社の広報誌「Headline」にてアマゾン森林火災についてのインタビュー掲載 (2020.01.09)
15. テレビ朝日「サタデーステーション」オーストラリアで続いている大規模な山火事について取材協力 (2020.01.10)

16. 東京新聞 2020年1月15日朝刊 山火事について自然と人為の要因の解説 (2020.01.15)
17. テレビ朝日「モーニングショー」オーストラリアでの山火事について取材協力
18. NHK山形 暖冬に伴う小雪が樹木に与え得る影響について解説 (2020.01.22)
19. TBSテレビ番組「ひるおび！」出演 気候変動や山火事などについて解説 (2020.01.22)
20. 講談社「週刊現代」気候変動や山火事についてコメント (2020.02.14)
21. 小学館・小学8年生 気候変動と山火事についてのインタビュー掲載 (2020.03.01)

(6) その他

1. 小林勇太、森章：(2016. 3) 「樹木多様性に基づく土砂災害リスク削減の可能性」、日本生態学会第63回全国大会 生物多様性分野において優秀ポスター賞受賞
2. 高鳥友樹, 高木勇輔, 岡田慶一, 小林真, 森章, (2018. 03. 16) 「降水量操作下における植物群集の機能的多様性パターン」、日本生態学会第65回全国大会 群落・遷移・更新分野において最優秀ポスター賞受賞

8. 引用文献

1. B. W. Griscom *et al.*, Natural climate solutions. *Proc Natl Acad Sci U S A* **114**, 11645-11650 (2017).
2. N. Seddon, B. Turner, P. Berry, A. Chausson, C. A. J. Girardin, Grounding nature-based climate solutions in sound biodiversity science. *Nature Climate Change* **9**, 84-87 (2019).
3. E. Cohen-Shacham, G. Walters, C. Janzen, S. Maginnis, "Nature-based solutions to address global societal challenges," (International Union for Conservation of Nature, Gland, Switzerland 2016).
4. S. L. Lewis, C. E. Wheeler, E. T. A. Mitchard, A. Koch, Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon. *Nature* **568**, 25-28 (2019).
5. J. Liang *et al.*, Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science* **354**, (2016).
6. M. Hisano, E. B. Searle, H. Y. H. Chen, Biodiversity as a solution to mitigate climate change impacts on the functioning of forest ecosystems. *Biol Rev* **93**, 439-456 (2018).
7. K. B. Hulvey *et al.*, Benefits of tree mixes in carbon plantings. *Nature Climate Change* **3**, 869-874 (2013).
8. C. J. Gardner, J. E. Bicknell, W. Baldwin-Cantello, M. J. Struebig, Z. G. Davies, Quantifying the impacts of defaunation on natural forest regeneration in a global meta-analysis. *Nat Commun* **10**, 4590 (2019).
9. IPCC, "Summary for Policymakers. IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems," (2019).
10. IPCC, "Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation," *A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge, UK, 2012).
11. A. S. Mori, Ecosystem management based on natural disturbances: hierarchical context and non-equilibrium paradigm. *J Appl Ecol* **48**, 280-292 (2011).
12. A. S. Mori, T. A. Spies, K. Sudmeier-Rieux, A. Andrade, Reframing ecosystem management in the era of climate change: Issues and knowledge from forests. *Biol Conserv* **165**, 115-127 (2013).
13. D. Tilman, F. Isbell, J. M. Cowles, Biodiversity and ecosystem functioning. *Ann Rev Ecol Evol Syst* **45**, 471-493 (2014).
14. P. B. Reich *et al.*, Impacts of biodiversity loss escalate through time as redundancy fades. *Science* **336**, 589-592 (2012).

15. B. J. Cardinale *et al.*, Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proc Natl Acad Sci U S A* **104**, 18123-18128 (2007).
16. CBD, "Forest resilience, biodiversity, and climate change - A synthesis of the biodiversity/resilience/stability relationship in forest ecosystems," *Technical Series* (Convention on Biological Diversity, Montreal, Canada, 2009).
17. I. T. Handa *et al.*, Consequences of biodiversity loss for litter decomposition across biomes. *Nature* **509**, 218-221 (2014).
18. A. S. Mori *et al.*, Concordance and discordance between taxonomic and functional homogenization: responses of soil mite assemblages to forest conversion. *Oecologia* **179**, 527-535 (2015).
19. A. S. Mori *et al.*, Biotic homogenization and differentiation of soil faunal communities in the production forest landscape: taxonomic and functional perspectives. *Oecologia* **177**, 533-544 (2015).
20. S. L. Stephens *et al.*, Temperate and boreal forest mega-fires: characteristics and challenges. *Front Ecol Environ* **12**, 115-122 (2014).
21. W. M. Jolly *et al.*, Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nat Commun* **6**, 7537 (2015).
22. S. M. Hsiang, K. C. Meng, M. A. Cane, Civil conflicts are associated with the global climate. *Nature* **476**, 438-441 (2011).
23. J. Wu *et al.*, Testing biodiversity-ecosystem functioning relationship in the world's largest grassland: overview of the IMGRE project. *Landscape Ecology*, (2015).
24. Y. Bai, X. Han, J. Wu, Z. Chen, L. Li, Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature* **431**, 181-184 (2004).
25. F. Isbell *et al.*, High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. *Nature* **477**, 199-202 (2011).
26. A. Hector, R. Bagchi, Biodiversity and ecosystem multifunctionality. *Nature* **448**, 188-190 (2007).
27. A. S. Mori *et al.*, Low multifunctional redundancy of soil fungal diversity at multiple scales. *Ecol Lett* **19**, 249-259 (2016).
28. M. I. Ishihara *et al.*, Efficacy of generic allometric equations for estimating biomass: a test in Japanese natural forests. *Ecol Appl* **25**, 1433-1446 (2015).
29. R. A. Chisholm *et al.*, Scale-dependent relationships between tree species richness and ecosystem function in forests. *J Ecol* **101**, 1214-1224 (2013).
30. A. S. Mori *et al.*, Community assembly processes shape an altitudinal gradient of forest biodiversity. *Global Ecol Biogeogr* **22**, 878-888 (2013).
31. M. Loreau, A. Hector, Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature* **412**, 72-76 (2001).
32. D. U. Hooper *et al.*, A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature* **486**, 105-108 (2012).
33. A. S. Mori, Climatic variability regulates the occurrence and extent of large fires in the subalpine forests of the Canadian Rockies. *Ecosphere* **2**, art7 (2011).
34. G. C. Hurtt *et al.*, Harmonization of land-use scenarios for the period 1500–2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. *Climatic Change* **109**, 117-161 (2011).
35. N. Myers, R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier, G. A. da Fonseca, J. Kent, Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* **403**, 853-858 (2000).
36. F. Isbell *et al.*, Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature* **526**, 574–577 (2015).
37. T. Sasaki, X. Lu, M. Hirota, Y. Bai, E. Allan, Species asynchrony and response diversity determine

- multifunctional stability of natural grasslands. *J Ecol* **107**, 1862-1875 (2019).
38. A. S. Mori, Environmental controls on the causes and functional consequences of tree species diversity. *J Ecol* **106**, 113-125 (2018).
 39. J. F. Bastin *et al.*, The global tree restoration potential. *Science* **365**, 76-79 (2019).
 40. S. L. Lewis, E. T. A. Mitchard, C. Prentice, M. Maslin, B. Poulter, Comment on "The global tree restoration potential". *Science* **366**, (2019).
 41. H. Kreft, W. Jetz, Global patterns and determinants of vascular plant diversity. *Proc Natl Acad Sci U S A* **104**, 5925-5930 (2007).
 42. Y. Kobayashi, K.-i. Okada, A. S. Mori, Reconsidering biodiversity hotspots based on the rate of historical land-use change. *Biol Conserv* **233**, 268-275 (2019).
 43. A. Sommerfeld *et al.*, Patterns and drivers of recent disturbances across the temperate forest biome. *Nat Commun* **9**, 4355 (2018).
 44. Y. Kobayashi, A. S. Mori, The Potential Role of Tree Diversity in Reducing Shallow Landslide Risk. *Environmental management* **59**, 807-815 (2017).

II-3 緩和策と適応策に資する沿岸生態系機能とサービスの評価

国立研究開発法人国立環境研究所

生物・生態系環境研究センター 環境ストレス機構研究室

井上智美

生物・生態系環境研究センター センター長室

山野博哉

<研究協力者>

国際マングローブ生態系協会

馬場繁幸

平成27(開始年度)～令和元年度研究経費（累計額）：81,546千円（研究経費は間接経費を含む）
 （平成27年度：17,010千円、平成28年度：16,459千円、平成29年度：15,859千円、平成30年度、15,859千円、令和元年度：16,359千円）

【要旨】

気候変動は人類が直面している緊急課題の一つである。沿岸域は、温暖化に伴う海面上昇や高浪の影響をダイレクトに受けるため、気候変動影響が顕在化しやすい。そのような中、沿岸生態系を活用した防災対策（グリーンインフラ）に注目が集まっている。沿岸生態系には防風・防波・浸食防止といった沿岸保護機能に加えて、非常に高い炭素貯留機能も持ち合わせていることから、気候変動の緩和と適応の双方から期待されている。気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究（S-14）テーマ2「熱帯、温帯、寒帯における生態系保全による緩和策と適応策の統合評価」の中で、本サブテーマでは、緩和策と適応策に資する沿岸生態系機能とサービスの評価を担当した。具体的には、海面上昇、高浪・高潮被害が深刻化している熱帯・亜熱帯の沿岸域に焦点をあて、沿岸生態系の分布情報整備を行った。また、沿岸生態系が持つ気候変動緩和・適応機能を評価し、他サブテーマ（サブテーマ5）が担当する費用便益評価と統合評価に活用できるように整理した。

沿岸生態系の情報整備としては、i)全球海岸線データの作成、ii)全球沿岸域標高データの作成と低標高・低傾斜地域の抽出、iii)全球河川流域データ解析、iv)沿岸生態系分布図（マングローブ・藻場・サンゴ礁）の作成、v)マングローブ生態系構成樹種データベースの作成、vi)全球マングローブ生態系炭素貯留量の実測値データベースの作成、vii)琉球列島のサンゴ礁造礁速度データベースの作成を行った。整備したデータは、統合評価と費用便益評価を目的とするサブテーマ5に提供するとともに、多くの活用が可能なように国立環境研究所配信のwebsite（熱帯・亜熱帯沿岸生態系ポータル）に掲載した。

生態系分布と沿岸地形データ解析により、台風や高潮・高波の襲来といった災害時に被害を受けやすい低標高・低傾斜地形を抽出し、沿岸生態系を活用したグリーンインフラが効率的に行える地域を示すことが出来た。また、マングローブ生態系の構成樹種データを基に類似度解析を行い、全球のマングローブ生態系を3つに類型化した。これにより、緩和機能（炭素貯留）や適応機能（沿岸保護機能）をカテゴリごとに評価できるようになった。

気候変動緩和機能としては、マングローブ生態系の炭素貯留量について既報データの整理を行い、実測値データベースを作成した。これにより、計測値の地域が東南アジアと中南米に偏っていること、中東地域やオセアニア地域での計測値が少ないことが明らかとなった。マングローブ生態系のバイオマスとネクロマスを含む全炭素貯留量平均値は887.2 MgC ha⁻¹であった。また、マングローブ生態系の貯留炭素の大部分は地下部にあり、その量は地上部のバイオマスや地下部表層の炭素貯留量からは推定できないことが明らかとなった。本実測データを基に、計測値のない地域を含む全球の炭素貯留量を推定するためのパラメータ解析を行ったところ、気温・降水・日照・風・潮位差・低標高地域の拡がり指数が規定因子となっていることが明らかとなった。

気候変動適応機能としては、サンゴ礁のコア分析に関する既報データの整理を行い、サンゴ礁は、およそ10,000年前から形成されており、6,000年以降に防波機能を持つ礁嶺部分が形成されていること

が明らかとなった。化石サンゴの年代から推定される礁嶺の堆積速度は6-83cm/100年で、IPCCによって予測されている海面上昇速度の43cm/100年（RCP2.6シナリオ）、84cm/100年（RCP8.5シナリオ）と比較すると、今後の温暖化の推移によっては、温暖化に伴う海面上昇に追随できる場合があることが明らかとなった。

また、野外調査地（西表島ユツン川河口）にて、一連の沿岸生態系（マングローブ—藻場—サンゴ礁）に沿って、炭素貯留機能（緩和機能）と堆積速度（適応機能）の計測を行った。マングローブ生態系では、潮汐の影響が土壌炭素貯留量を規定する主要因子となっていることが明らかとなった。

[キーワード]

沿岸生態系、生態系分布、気候変動緩和、気候変動適応

1. はじめに

気候変動は人類が直面している緊急課題の一つである（IPCC第5次報告書）。沿岸域は、温暖化に伴う海面上昇や高浪の影響をダイレクトに受けるため、気候変動影響が顕在化しやすい。地盤高の低い太平洋諸国等では、年々陸側に移動する海岸線に国土消失の危機感を募らせており、ハリケーンや台風の襲来地域では増加傾向にある高浪被害に対して何らかの防災対策を講じる必要性に迫られている。有効な手段の一つとして防潮堤の設置（グレーインフラ）があるが、今後も進行することが予測される気候変動に対して、影響が懸念される全ての沿岸に防潮堤を設置することは、資金面においても社会的背景を加味した実行可能性においても現実的ではない。そこで、沿岸生態系を活用した防災対策（グリーンインフラ）に注目が集まっている。元来、沿岸生態系は陸から海に向けて森林、塩性湿地、干潟、藻場、サンゴ礁といった様々なタイプの生態系が組み合わさって形成しており、一連の生態系そのものに防風・防波といった沿岸保護機能がある。さらに、沿岸生態系には比較的高い炭素貯留機能がある事が指摘されていることから、気候変動緩和の観点からも注目されている。2009年に国連環境計画UNEPによりまとめられた報告書によると、地球上の生物が固定する炭素のうち、海洋生物の吸収するCO₂は全炭素量の55%を占める。中でもマングローブ生態系や塩性湿地生態系は地下部の炭素貯留機能が高く、条件が揃えば数千年オーダーで炭素を貯留していることが明らかになりつつある。また、沿岸生態系に涵養される豊富な漁業資源や多様な生物相、観光資源となるレクリエーション機能といった気候変動緩和適応以外の生態系機能も高いため、生物多様性保護などの側面からも期待されている。

以上のことから、沿岸生態系の保全は気候変動の緩和と適応の双方に効果的であり、沿岸生態系の緩和適応機能を活用した気候変動緩和適応策の具体的指針を作成するための科学的知見の収集と整理が急務である。

2. 研究開発目的

気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究（S-14）テーマ2では、「熱帯、温帯、寒帯における生態系保全による緩和策と適応策の統合評価」を成果目標に掲げている。本サブテーマでは、緩和策と適応策に資する沿岸生態系機能とサービスの評価を担当する。具体的には、海面上昇、高浪・高潮被害が深刻化している熱帯・亜熱帯の沿岸域に焦点をあて、沿岸生態系の分布情報整備を行う。また、沿岸生態系が持つ気候変動緩和・適応機能を評価し、サブテーマ5が担当する費用便益評価と統合評価に活用できるように整理する。さらに、沿岸生態系の気候変動応答メカニズムの解明のための知見収集を行う。

3. 研究開発方法

3.3.1 全球統一海岸線データ整備と地形データ整備

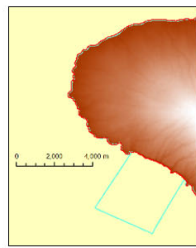
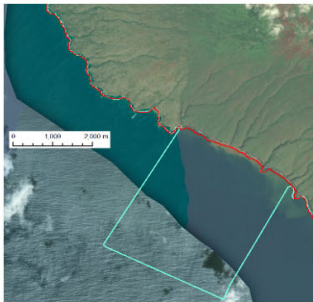
沿岸生態系の分布と地形を解析する際にベースとなる海岸線データを全球で整備するため、無償入手可能な地形データを精査し、ESRI標高データ（90mメッシュ）を選定した。同データを基に、標高0mを海岸線として全球海岸線ポリゴンデータを作成した。また、重点地域として解析を進めた熱帯亜熱帯地域(40°S-40°N)については、より詳細な解像度を持つ、NASA JPLのSRTM(Shuttle Radar Topography Mission)のSRTM Water Body Dataset（30mメッシュ）を基に海岸線ポリゴンデータを作成した。SRTM Water Body Datasetに欠損またはエラーが見られる箇所は、SRTM標高データもしくはESRIデータで補完修正した（図3.3.1）。陸水域については海岸線からの距離が20km以内のグリッドを対象とした。標高データについては、空間分解能30mのSRTMデータをベースとし、欠損箇所を同じ空間分解能30mのGDEMデータで補完した。また、画素単位でも欠損地と思われる場所が存在したため、これもGDEMデータを用いて補完した。

陸上の浸水評価のための高解像度の沿岸標高・海底地形データは、手法開発のためのモデル地域としてフィジー周辺のデータを整備した。海底地形データは、UNESCO-IOCのプロダクトであるGEBCO(General Bathymetric Chart of the Oceans)のGridded Bathymetry DataのGEBCO_2019（以下、

「SRTM1標高0m等値線」と「SRTM Water Body Dataset:海岸線」

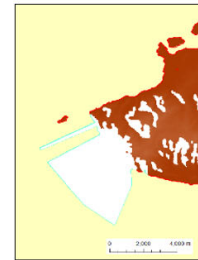
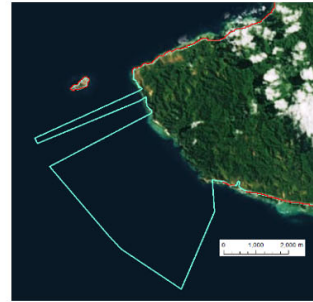
茶色グラデーション：SRTM1 (>0) 赤：SRTM1標高0m等値線
 黄色：SRTM1 (=0) 水色：SRTM Water Body Dataset

ハワイ島



SRTM1にNoData値なし

インドネシア



SRTM1にNoData値が存在
 (白抜け箇所)

SRTM1標高0m等値線で
 SRTM Water Body Datasetを修正

SRTM1標高0m等値線でSRTM Water Body
 Datasetを修正できず
 → ESRIで修正

図3.3.1 海岸線欠損部位修正スキーム

GEBCO) を用いた。GEBCOは全球15秒(約500m)のグリッドデータで、陸上データはSRTM-15が用いられており、海底地形と解像度が揃えてある。陸上の浸水評価を正確に行うためには、高解像度の地形データが必要であるため、陸上SRTMデータ/海底地形GEBCOを組み合わせた。両者の解像度は異なっているため、線形補完を行い結合させたため、空間解像度は任意となる。

3.3.2 生態系分布データの収集・整理

生態系分布データ整理のため、マングローブ生態系、サンゴ礁、海草、塩性湿地等の分布データを収集した(表3.3.1)。全球マングローブ生態系分布GISデータについては、本課題が開始する以前から国立環境研究所と国際マングローブ生態系協会(International Society for Mangrove Ecosystems)との共同で整備していた全球マングローブ生態系分布データ¹⁾を解析に使用できる形式で更新した。元データ

	データ名	データ提供元
河口域	Global Estuary Database (2003)	UNEP-WCMC
藻場	Global Seagrass Species Richness (2003)	UNEP-WCMC
	Global Distribution of Seagrasses (2005): polygon	UNEP-WCMC
	Global Distribution of Seagrasses (2005): point	UNEP-WCMC
サンゴ	Global Distribution of Coral Reefs - 1 Km Data (2003)	UNEP-WCMC
	Global Distribution of Coral Reefs (2010)	UNEP-WCMC
	アジア太平洋サンゴ	環境省
マングローブ	World Atlas of Mangroves	ISME
塩生湿地	Global Wetlands 1993	UNEP-WCMC
全球植生	Global Land Cover-Share of year 2014-Beta release 1.0	FAO
	Global Map Data Land cover ver.2	ISCGM

は本課題で更新

表3.3.1 収集整理し解析に用いた生態系分布データ

は国ごとに作られたデータであったため、それぞれの国とテリトリによって異なっていた属性項目を統一化し、上記で作成した海岸線に合わせて成型した。GISデータの属性項目はID、地点、調査年、森林タイプ、データ元、面積、緯度経度、品質管理、備考の9項目23細目とした。また、サンゴ礁と藻場の分布データについても、作成した海岸線に合わせて成型した。

生態系を構成する生物種の情報を整理するため、マングローブが存在する111の国とテリトリ別に、それぞれの国・テリトリに存在する主要74樹種を、文献（学術論文・報告書・書籍）・ウェブサイト情報・調査データから網羅的に収集した。収集したデータは、[文献ID-著者-記載年-緯度経度-樹種-林齢-地形-土地利用状況]に関連付けてデータベースとして整理した（RDB形式）。また、藻場の構成植物については、UNEP-WCMCのWorld Atlas of Seagrasses²⁾に掲載されている59種について、168の国・テリトリ別に整理を行った。

3.3.3 沿岸生態系の類型化

3.3.3.1 地形の類型化

QGISのQGhainageプラグインを使用して、海岸線上に500m間隔でポイントを生成した。次に、QGISのBuffer機能を使って、生成したポイントを中心とする半径100mのバッファポリゴンを生成し、Clip機能を使って、生成したバッファポリゴンと海岸線データの重なる領域をクリップポリゴンとして切り出した。収集したDEMデータを用いて、クリップポリゴン内の標高と傾斜角を計算し、地形類型マップを作成した。また、沿岸生態系分布を規定する重要な因子である河川影響については、河川影響指数 = (河川の集水域面積) / (河川からの距離)²として、海岸線に沿って類型化を行った。

3.3.3.2 生態系の組み合わせと生物種構成

マングローブ・サンゴ礁・藻場の分布データを結合し、全球沿岸生態系の組み合わせ情報を整理した。また、約5kmの範囲内に3つの生態系が共存する場所を抽出してGIS地図情報として整理した。さらにマングローブ生態系については、高波・高潮に対する防波機能評価の際に必須となる、海岸線から内陸部への生態系の幅を算出して整理した。生物種構成の類型化は、マングローブ生態系と藻場について行った。整備した生物構成データベースを基に、国・テリトリ単位で類似度指数（Jaccard）を算出し、多次元尺度法MDSによる空間配置図を作成した。

3.3.4 緩和機能-炭素貯留機能と適応機能-沿岸保護機能評価

沿岸生態系の炭素貯留機能と沿岸保護機能を統合評価するためのデータフォームを作成し、既存文献の整理を行った。マングローブ生態系の炭素貯留データについては、Web of Scienceを用いて1970年-現在までの文献（科学論文・書籍・報告書）についてキーワード検索をし、文献内に記載されているマングローブ生態系の炭素貯留量を、[文献ID-著者-記載年-緯度経度-樹種-林齢-地形-土地利用状況-計測方法-炭素貯留量]に関連付けてデータベースとして整理した（RDB形式）。なお、データは地上部バイオマスC、地上部ネクロマスC、地下部バイオマスC、地下部ネクロマスCに分けて整理した（バイオマスC：調査時点で生きている植物体の炭素重量、ネクロマスC：調査時点で枯死している植物由来有機物の炭素重量）。既存文献から抽出したマングローブ生態系炭素貯留データの位置情報（緯度経度）から、全球マングローブ炭素貯留機能の実測データマップを作成した。さらに、マングローブ炭素貯留量の推定モデルを地上部バイオマス・地下部ネクロマス別に検証した（一般化線形モデル、ガンマ分布、リンク関数：対数、説明変数：気温・海水温・降水・日照・低標高拡がり指数・河川影響指数・海岸線からの概算距離（生態系の幅）・波のうねり・潮汐差・風エネルギー・嵐頻度）。各パラメータ値は、全球マングローブ分布GISデータを10kmメッシュで区切り、各メッシュの中心点における値を抽出した。なお、気象データはWorldCLIMの再解析データ、日照はJRA55の再解析データ、嵐頻度はJTWC/NOAA NHCデータ、波のうねりはECMWFの再解析データ、潮位差はMatsumoto et al.,2000データを用い、低標高の拡がり指数、海岸線からの概算距離（生態系の幅）と河川影響指数は本課題で検討した手法によって算出した数値を用いた。また、推定の不確実性を評価するため、実測データ集から7割

World Atlas of Mangroves

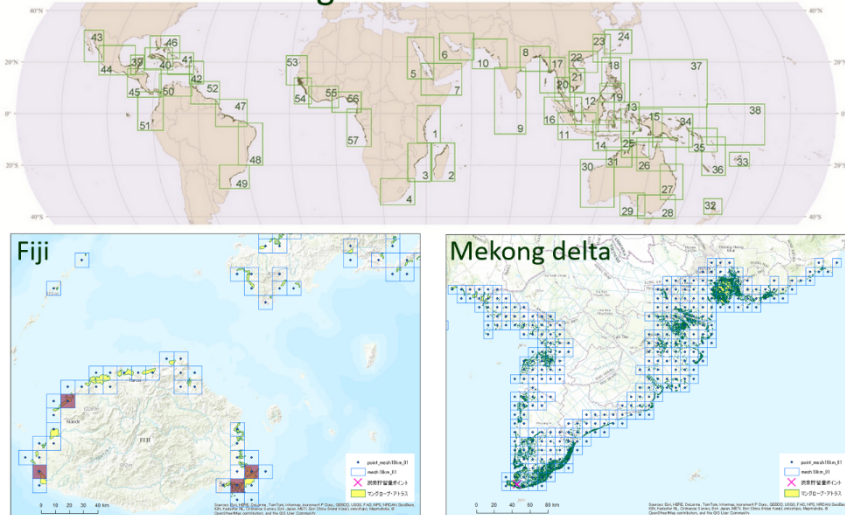


図3.3.2 マングローブ生態系の炭素貯留量推定解析

上段：全球のマングローブ生態系分布GISデータ

下段：パラメータ解析のため、マングローブポリゴンを含む10kmメッシュごとに
変数値を付与

のデータをランダムに選択して推定を行うプロセスを100回繰り返し、説明変数の選択頻度、推定値の変動、各変数の外挿の程度を算出した。

沿岸保護機能評価としては、琉球列島のサンゴ礁の造礁機能評価について、サンゴ礁の堆積速度に関する既報データを収集し、造礁速度と海面上昇の比較を行うことで、海面上昇への追従可能性を検討した。

3.3.5 野外調査

国内の調査候補地である沖縄県西表島の全沿岸を踏査し、マングローブ・藻場・干潟・サンゴ礁の一連生態系のトランセクト調査が可能なサイトとしてユツ川流域と沿岸を選定した。約1kmのマングローブ—藻場—サンゴ礁にライントランセクトを設置し、トランセクト上のマングローブ3地点・藻場2地点・サンゴ礁2地点でコア採掘を行った。コアの堆積層の観察と有機物炭素の放射性同位体の計測を行



マングローブ

海藻藻場

サンゴ礁

図3.3.3 野外調査のサンプリング（西表島）

い、堆積速度を算出した。また、マングローブ生態系については、コアの各層から土壌をサンプリングし、炭素含有量を計測した。なお、調査地の土壌がサンゴ由来の炭酸カルシウムを豊富に含んでいたため、炭素含有量の計測においては、事前に炭酸カルシウムを希塩酸にて除去してから計測を行った。

国外調査地としては、生態系機能に関する実測データが不足している太平洋地域を対象に選定を行い、ツバルとキリバス共和国で調査を行った。各国の沿岸生態系を踏査して現地生態系の状況を調査すると共に調査研究を開始するための相手国政府とのMOU締結を行ったのち、緩和・適応機能に関する調査を行った。

4. 結果及び考察

本サブテーマで作成した全てのデータセットは沿岸生態系の気候変動緩和・適応機能統合評価および費用便益評価を担当するサブテーマ5へ提供した。

4.3.1 全球統一海岸線と沿岸生態系分布図

熱帯・亜熱帯の海岸線ポリゴンデータを図4.3.1に示す。元データのSRTM Water Body Dataset (30mメッシュ) はエラーや欠損箇所が多かったが、本課題において全て修正・補完を行った。本データによって、全球統一の海岸線をベースにした解析が可能となった。

図4.3.1の海岸線に整合させた沿岸生態系分布図の例を図4.3.2に示す。生態系ごとにポリゴン化されており、生態系機能の広域評価に加えて地域ベースでの防災を目的とした適応計画に活用することが可能となった。

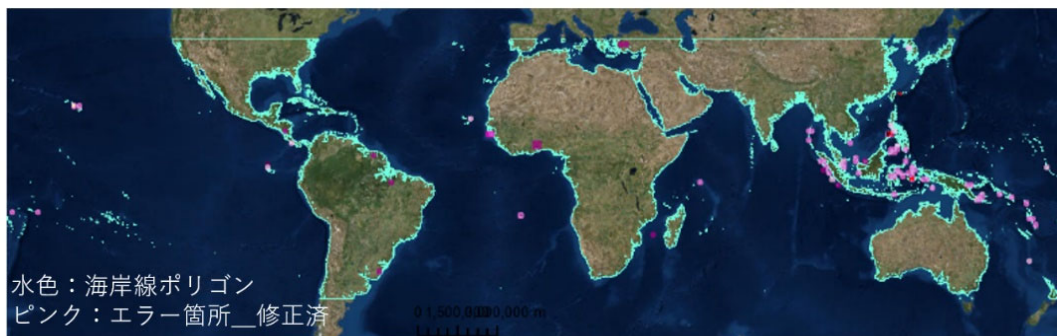


図4.3.1 熱帯・亜熱帯海岸線

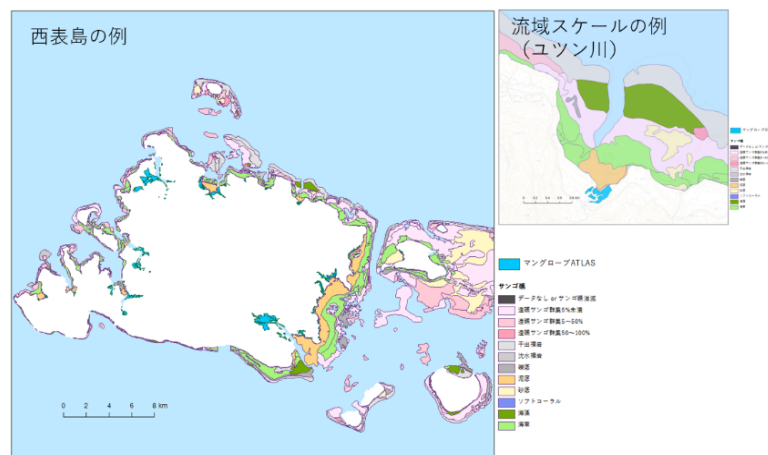


図4.3.2 沿岸生態系分布図

4.3.2 生態系分布および地形による類型化

生態系の組み合わせによる類型化の結果を図4.3.3に示す。アフリカ西沿岸、インド西沿岸、オーストラリア南部や南アメリカには3つの沿岸生態系（マングローブ・藻場・サンゴ礁）が揃っている地域が少ないことが明らかとなった。大きな河川の河口デルタにはマングローブ生態系が発達する一方で、陸域河川からの土砂供給が多い地点では透明度が低下するためサンゴ礁が発達しにくい。そのためメコン川河口域など、大きな河川の河口部にはマングローブ生態系が発達するもののサンゴ礁が発達しにくくなっていることが窺える（図4.3.3b）サブテーマ5において、生態系の組み合わせによる類型別に統合評価を行うためのモデル開発が行われたが、本データにより全球での評価が可能となった。

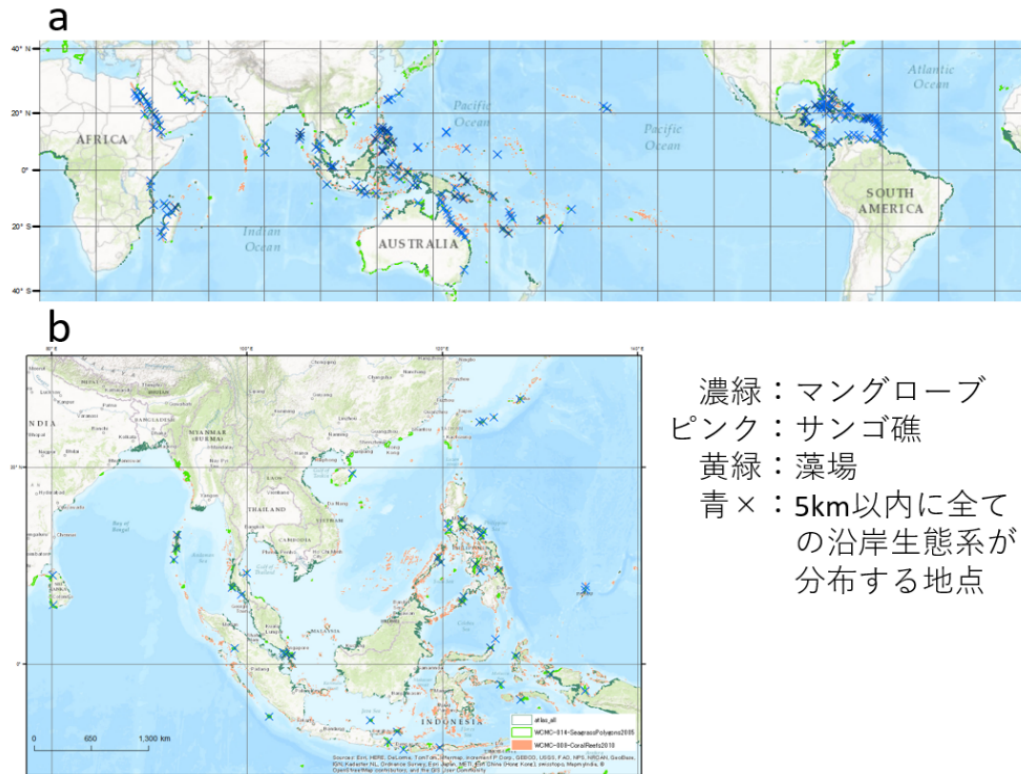


図4.3.3 沿岸生態系の組み合わせによる類型化

a: 全球図

b: 東南アジア地域の拡大図

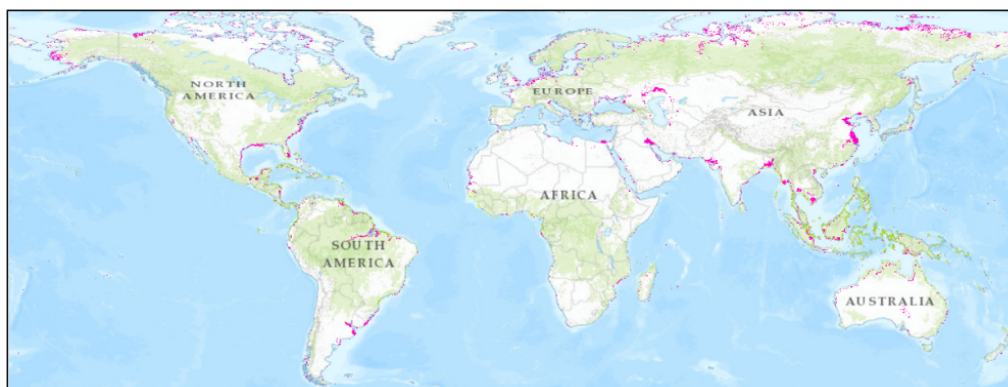


図4.3.4 沿岸低標高地域の抽出図

ピンク：標高<10m地域

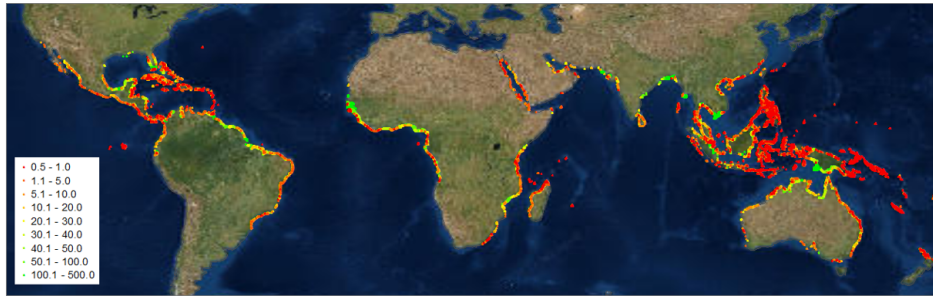


図4.3.5 沿岸低標高地域の広がり：海岸線から標高<10mの概算距離（km）類型図



図4.3.6 河川流域面積による類型化

赤みが強い場所は流域面積が大きい

沿岸域の標高・傾斜角による類型化により抽出した低標高（<10m）地域を図4.3.4に示す。また、SRTM15データを元に作成した熱帯・亜熱帯域における海岸線から標高10m地点までの概算距離による類型化の結果を図4.3.5に示す。熱帯・亜熱帯地域において、平均地盤標高・平均地盤傾斜低い場所にはマングローブ林が分布している傾向が読み取れる（図4.3.3濃緑）。台風や高潮・高波の襲来といった災害時に被害を受けやすい地形にはマングローブ林が分布しており、生態系を用いた適応策（グリーンインフラ）は効率的であることが示された。図4.3.6は河川流域面積による沿岸類型化図である。河川による陸域からの土砂や養分供給は、河口域の生態系の一次生産速度を規定する重要因子であるため、本課題で作成した沿岸河川影響指数データは生態系を構成するマングローブや塩性湿地植物の炭素固定速度を推定するプロセスモデルの説明変数として活用できる。

本課題で作成した海岸線データとマングローブ生態系分布図を用いて全球のマングローブ生態系の幅（海岸線から陸域マングローブ域のエッジまでの距離）を0.1km単位で計測した結果を図4.3.7に示す。

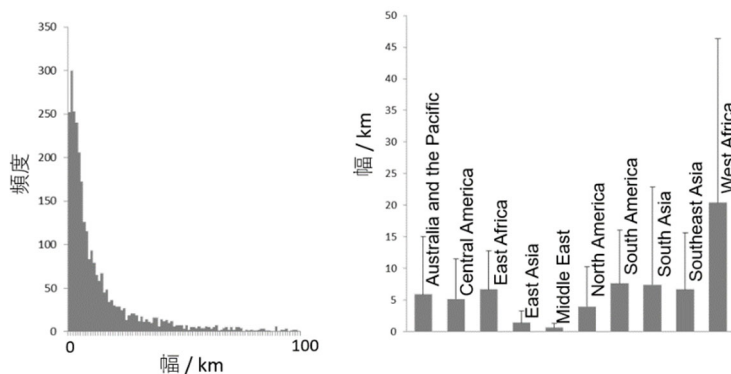


図4.3.7 マングローブ域の幅（海岸線から陸域分布エッジ）

左：マングローブ域の幅分布頻度

右：地域別の平均幅、エラーバーは標準偏差を示す

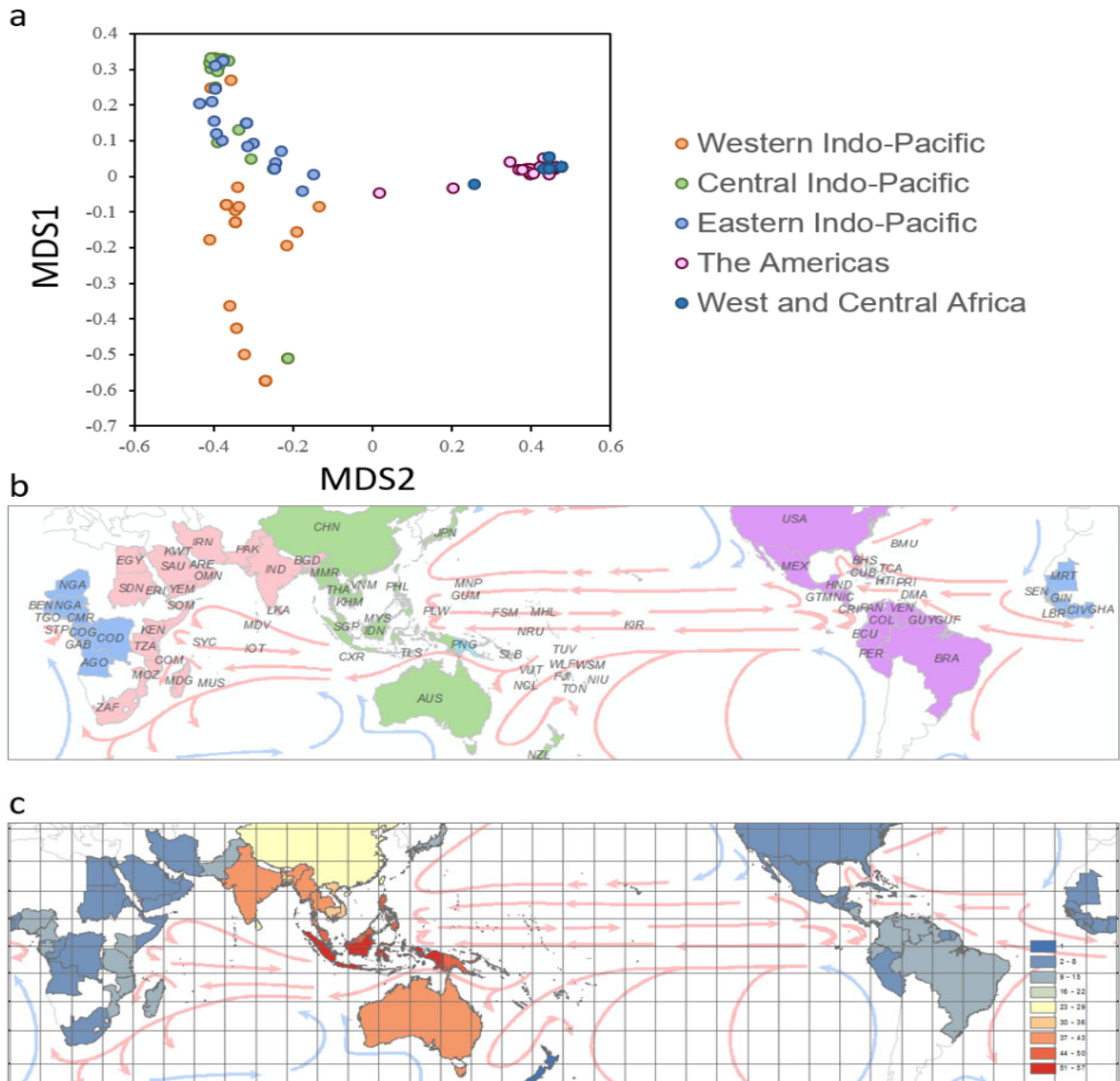


図4.3.8 マングローブ生態系の国単位構成樹種による類型化

- a: 国単位マングローブ樹種構成の類似度指数 (Jaccard) 多次元尺度法MDSによる群集の空間配置図
- b: aに示された地域の色分けと海流 (赤は暖流、青は寒流を示す)
- c: 国単位の構成樹種数の色分け (青→赤で樹種数が多くなる)

なお、計測は国毎に1/5,000,000-1/6,000,000で表示した分布図の読取 (作業員1名) で行ったため主観的作業であることに留意する必要がある。マングローブ生態系の平均幅は6.8km、中央値は3.1kmで、計測値レンジは0-179km (最大値はGambia) であった (図4.3.7左図)。地域別に集計をすると、ばらつきが大きい西アジア地域や中東地域のマングローブ生態系の幅は他の地域に比べると小さいことが窺える

(図4.3.7右図)。

また、国別マングローブ構成樹種データ(74樹種111か国)については、5162データを整理した。国毎の樹種構成からJaccardの類似度指数を算出し、多次元尺度法(MDS)による群集の空間配置図を図4.3.8aに示す。各点は国を示し、点の色は国が位置する地域(図4.3.8b)を示す。点同士の距離は、樹種構成の類似度を示す。本結果より、樹種構成パターンを3つに分けた。まず、図4.3.8aのx軸方向については、Western-、Central-、Eastern-Indo-Pacific地域とThe AmericasおよびWest and Central Africa地域との間に明瞭な違いが見られた。この2つの地域間(西エリアと東エリア)では、出現樹種の重なりが全くなかった。また、図4.3.8aのy軸方向については、明瞭な国単位の区切りはないが、Indo-pacific地域の中で構成樹種数が圧倒的に多いインドネシア・フィリピンから、オーストラリアやインド、太平洋地域へ移るにつれて出現樹種数が減少していくことが明らかとなった。このようなマングローブ生態系の樹種構成のパターンについては、観察ベースで概括的に認識されていたが、本課題によって具体的なデータに元づいた解析が行われ、地域ごとの特徴を示すことが出来た。歴史的には、暖かい環境に適応進化したマングローブ植物は、氷河期に東南アジア地域に取り残されたのち、地球が温暖になるにつれ分布域を拡大している途中にあると見ることが出来る。マングローブ樹種の多くは海流散布で分散して分布を拡げるため、気候変動による温暖化などの影響による分布域の変遷を予測するためには、現在の分布域と海流および気温を考慮する必要がある。また、分散したのちに樹林群として成立する可能性を評価するためには、樹種ごとの気温に対する生理生態学的な応答特性についての知見も必要である。マングローブ樹種単位での分布国類似度を解析すると、属レベルでのまとまりが見られないことから、氷河期以降の分散拡大は既に種分化したのちに起きていると考えられる(図4.3.9)。このことは、気温などの生育環境に対する応答は属レベルではなく、種レベルで異なっている可能性を示唆する。本課題の解析により、図4.3.9で出現国構成が似通っており、生理生態的特性が似ている可能性がある樹種の組み合わせを示すことが出来た。現状では、マングローブ樹種の生理生態的特性に関する科学的知見は非常に少ないが、東南アジア地域の主要構成樹種であるヒルギ科などの知見が報告されつつある。本課題で整理された構成樹種パターンは、マングローブ樹林群の持つ防災機能評価にも有効であると考えられる。マングローブ植物は樹種によって地上根の形状(支柱根・膝根・筍根・板根など)が異なっており、地上根の形状は樹林内を通過する風波の抵抗係数を規定する必要な因子であるため、樹木の形状をパラメータとして取り入れた物理工学的な防波機能評価モデルと組み合わせることで、マングローブ生態系の持つ防波機能をより正確に評価することが可能となる。沿岸生態系を活用した具体的な適応計画を立てるためには、地域ごとの生態系の特性を考慮できるかどうかを実行可能性に直結する。本課題で得られたデータセットは広域評価のみならず地域レベルの活用においても有効であると考えられる。また、生態系分布と地形による類型化データは台風の進路予測データと合わせると、マングローブ生態系を活用した気候変動適応策の地域ポテンシャルや沿岸脆弱域を評価することに貢献できる。

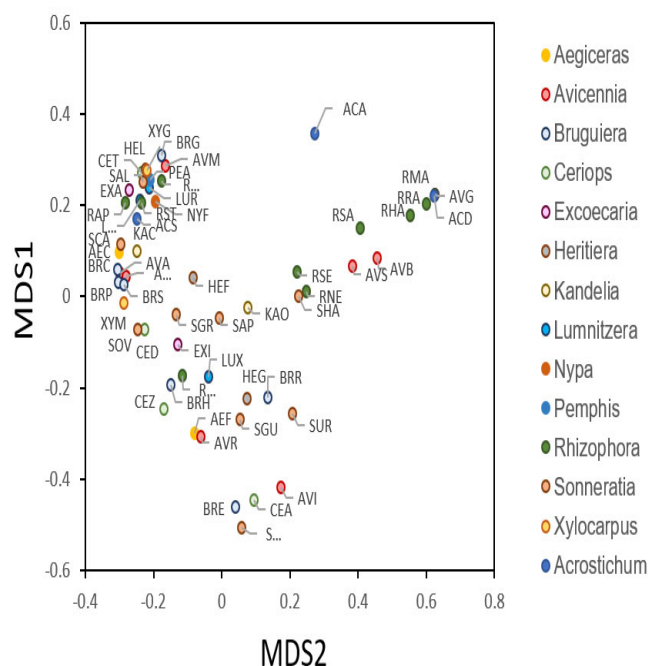


図4.3.9 マングローブ樹種単位の分布国による類型化。樹種単位マングローブ樹種構成の類似度指数(Jaccard)多次元尺度法MDSによる群集の空間配置図

4.3.3 気候変動緩和機能__炭素貯留機能

マングローブ生態系の炭素貯留量を実測した既報文献（科学論文・書籍・報告書）を1970年-2019の期間でキーワード検索して整理したところ、249件の報告値をRDB形式のデータベースとして整理することが出来た。まず、生態系の全炭素含有量（地上部と地下部の全てのバイオマスおよびネクロマス）として計測している報告地は56地点あった（図4.3.10 a）。データは7か国で計測されており（バングラデシュ、中国、インドネシア、ドミニク共和国、メキシコ、パラオ、ミクロネシア）、多くは東南アジアに偏っていた。平均値は887.2 MgC ha⁻¹、標準偏差は409.4 MgC ha⁻¹で、最大値はインドネシアのSulawesiで

2202.8MgC ha⁻¹（優占樹種：Rhizophora 属）、最小値はドミニク共和国Granja Bajoの266.4 MgC ha⁻¹（優占樹種：Rhizophora mangle/Avicennia

germinans）であった。生態系の全バイオマスの炭素量を計測している報告地は178地点あった（図4.3.10 b）。データは16か国で計測されており（オーストラリア、バングラデシュ、インド、中国、台湾、日本、ベトナム、インドネシア、マレーシア、フィリピン、ドミニク共和国、メキシコ、マダガスカル、モザンビーク、パラオ、ミクロネシア）、多くは東南アジアに偏っていた。平均値は152.9

MgC ha⁻¹、標準偏差は121.6 MgC ha⁻¹で、最大値はミクロネシア連邦のYap島で681.6MgC ha⁻¹（優占樹種：Sonneratia属/Buruguiera 属）、最小値はインドネシアのジャワ島の2.8



図4.3.10 マングローブ生態系炭素貯留量の実測マップ
○印は実測データに基づく報告値があることを示し、
○の大きさは単位面積あたりの炭素貯留量を示す

MgC ha⁻¹（優占樹種：Sonneratia属/Rhizophora属）であった。地上部バイオマスの炭素量を計測している報告値は171地点あった（図4.3.10 c）。データは17か国で計測されており（オーストラリア、バングラデシュ、インド、中国、台湾、日本、ベトナム、インドネシア、マレーシア、フィリピン、ドミニク共和国、メキシコ、ブラジル、マダガスカル、モザンビーク、パラオ、ミクロネシア）、東南アジアや

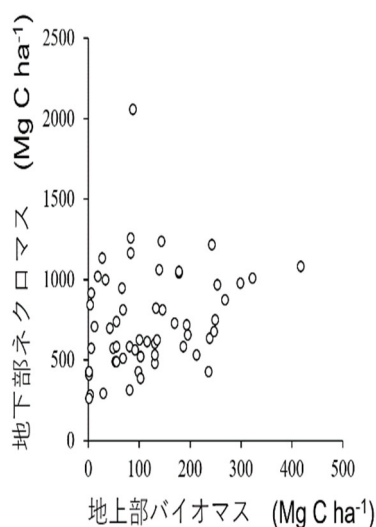


図4.3.11 マングローブ生態系の地上部バイオマスCと地下部ネクロマスCとの関係

中米の報告地があった。平均値は102.0 MgC ha⁻¹、標準偏差は79.0 MgC ha⁻¹で、最大値はミクロネシア連邦のYap島で418.5MgC ha⁻¹（優占樹種：Sonneratia属/Buruguiera属）、最小値はメキシコのXamachの1.4 MgC ha⁻¹（優占樹種：Rhizophora mangle/Avicennia germinans）であった。地下部バイオマスの炭素量を計測している報告値は159地点あった（図4.3.10 d）。データは16か国で計測されており（オーストラリア、バングラデシュ、インド、中国、台湾、日本、ベトナム、インドネシア、マレーシア、フィリピン、ドミニク共和国、メキシコ、マダガスカル、モザンビーク、パラオ、ミクロネシア）、東南アジアや中米の報告地が多かった。平均値は51.1 MgC ha⁻¹、標準偏差は52.3MgC ha⁻¹で、最大値はフィリピンのBoholで266.8MgC ha⁻¹（優占樹種：Rhizophora stylosa植林地）、最小値はインドネシアのジャワの0.4 MgC ha⁻¹（優占樹種：Sonneratia属/Rhizophora属）であった。地下部ネクロマスの炭素量を基盤まで採掘して計測している報告値は66地点あった（図4.3.10 e）。データは8か国で計測されており（バングラデシュ、インドネシア、シンガポール、ケニア、ドミニク共和国、メキシコ、パラオ、ミクロネシア）、東南アジアと中米に偏っていた。平均値は744.9 MgC ha⁻¹、標準偏差は401.5MgC ha⁻¹で、最大値はミクロネシア連邦のポナペ島で2116.0MgC ha⁻¹（優占樹種：Rhizophora apiculata）、最小値はケニアのGazi湾で16.8 MgC ha⁻¹（優占樹種：Avicennia marine）であった。地下部ネクロマスに関しては、基盤まで採掘するのに労力を要することから地下100cmまでの炭素含有量を計測しているものがあつた。地下100cmまでに限定すると報告地は76地点あつた（図4.3.10 f）。データは17か国で計測されており（オーストラリア、バングラデシュ、中国、日本、香港、ベトナム、マレーシア、フィリピン、ドミニク共和国、メキシコ、マダガスカル、モザンビーク、ギニア、ケニア、パラオ、ミクロネシア）、東南アジアと中米に偏っていた。平均値は282.2MgC ha⁻¹、標準偏差は187.9MgC ha⁻¹で、最大値はシンガポールで847.1MgC ha⁻¹（優占樹種：記載なし）、最小値はケニアのGazi湾で21.3 MgC ha⁻¹（優占樹種：Avicennia marine）であった。

全体として、報告地の多い地域が東南アジア・中米に偏っており、中東やオセアニア・太平洋地域の報告地が少なかった。また、数値のばらつきが大きく、ローカルな要因に規定されていることが窺える。共通して見いだされる特徴としては、マングローブ生態系に貯留されている炭素の大部分が地下部ネクロマスであることである。本解析により、地下100cmの採掘だけでは全体量を推定できないことも明らかとなった。また、目視で確認できる地上部バイオマスと地下部のネクロマスには明瞭な相関関係は見いだされないことから、地上部バイオマスから地下部の炭素貯留量を推定することも難しいことが明らかとなった（図4.3.11）。

本課題で整理したマングローブ生態系の炭素貯留量に関する実測データを用いて、計測値のない地域の炭素貯留量推定モデルのパラメータ解析を行った（図4.3.12）。説明変数としては、平均気温（℃）、平均降水量（mm）、日照（W/m²）、風（kW/m）、うねり（kW/m）、平均潮位差（m）、低標高域の拡がり指数（m）が選択され、河川index、海岸線からの概算距離（生態系の幅）、海水温は選択されなかった。本推進費課題のような広域全球スケールでの評価を目的とした推定計算の場合は、

気温、日照、降水や潮汐といった概括的なパラメータの方が推定結果が収束しやすく、地形を特徴づける詳細パラメータは適していなかった。しかし、ローカルな地形とそれに付随する環境因子（水文や養分環境など）が植物の生産性を規定しており、それが炭素貯留量に反映されていると考えられる。例えば、地域スケールでの適応策を計画するような場合、詳細スケールの特徴を現す地形パラメータによる推定モデルが重要になってくると考えられる。

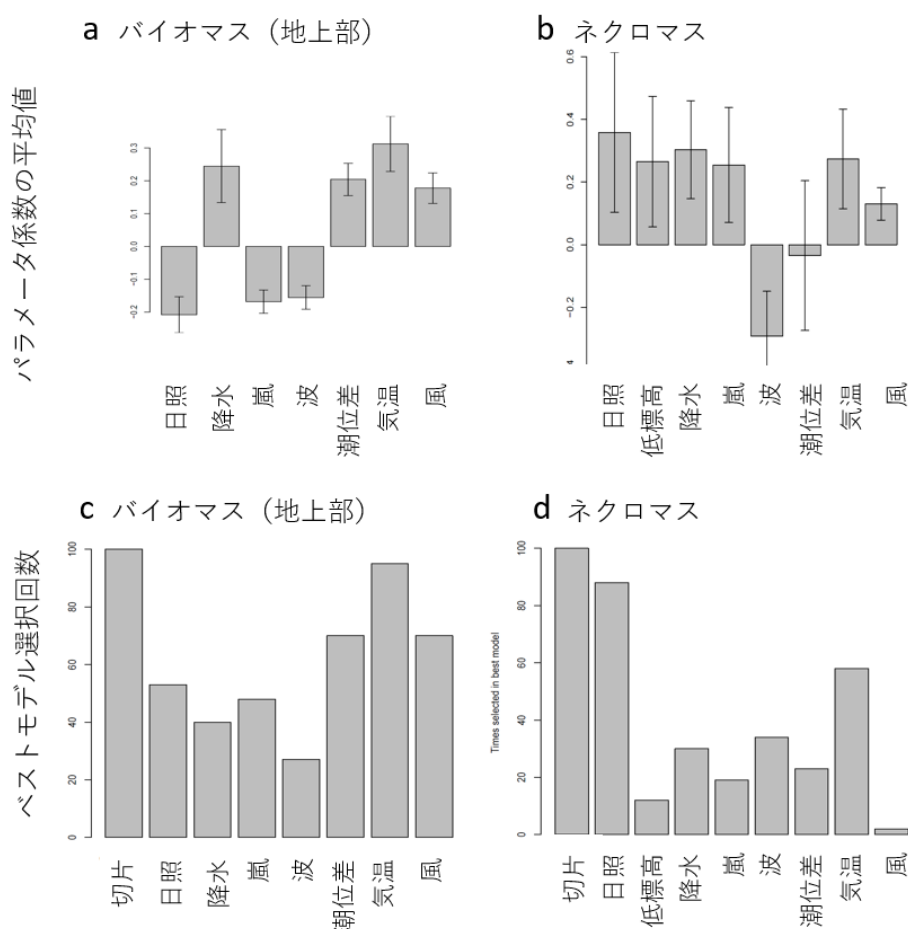


図4.3.12 マングローブ生態系炭素貯留量推定モデルのパラメータ係数平均値 (a, b) とベストモデルに選択された回数 (c, d)

本研究結果において、地上部バイオマスの炭素貯留量を推定するモデルパラメータとしては、ベストモデルに選択された回数の多い順に、切片、気温、調査/風、日照、嵐、降水、波となった（図4.3.12 c）。パラメータ係数の平均値は気温、潮位差、降水が正の値を示し、日照、嵐、波は負の値を示した（図4.3.12 a）。正の係数で最も大きかったのは気温であった。気温が高くなると植物の代謝機能が上がるため、光合成に伴う炭素同化速度が速くなるためであると推察される。また、降水量も正の係数値となったが、塩分濃度が上がりがちなマングローブ生態系において、淡水供給が植物の炭素同化速度を規定していることが窺える。これに対して日照は負の値を示した。実際には光強度が上がるにつれて植物の炭素同化速度（光合成の明反応）は増加するが、強い日照下では光合成系に光阻害が生じ、同化速度の減少に転じることが多い。また、強い日照を受ける地域では土壤水の蒸散による塩類集積などで塩分ストレスが増大して植物の生理機能を低下させることが起こりえる。以上のような要因により、日照のパラメータ係数が負になった可能性がある。植物の同化速度は気温に対しても光強度に対してもどこかに極大値を持っているため、詳細な検証の際にはこれらのパラメータに対する植物の応答機構を加味

する必要がある。

地下部ネクロマスの炭素貯留量を推定するモデルパラメータとしては、ベストモデルに選択された回数の多い順に、切片、日照、気温、波、降水、潮位差、嵐、低標高地の拡がり指数、風となった（図4.3.12 d）。パラメータ係数の平均値はいずれも標準偏差が大きかったが、日照、低標高地の拡がり、降水、嵐、気温、風が正の値を示し、波と潮位差は負の値を示した（図4.3.12 b）。正の効果を示したパラメータのうち、日照、降水、気温は、植物や藻類の炭素同化速度と正の関係にあるものであった。また、残りの正のパラメータである低標高地の拡がり指数については、土壤に蓄積した有機炭素が流れにくい地形の効果が反映されていると考えられる。嵐頻度、風については、地上部から土壤への落葉・落枝の供給が定期的にかかることが土壤の炭素貯留量に正の効果をもたらしていると考えられる。一方で、波と潮位差は負の効果を示しており、潮汐変動に伴って海域へ有機物が流出する効果が土壤炭素貯留量に反映されていることが窺える。

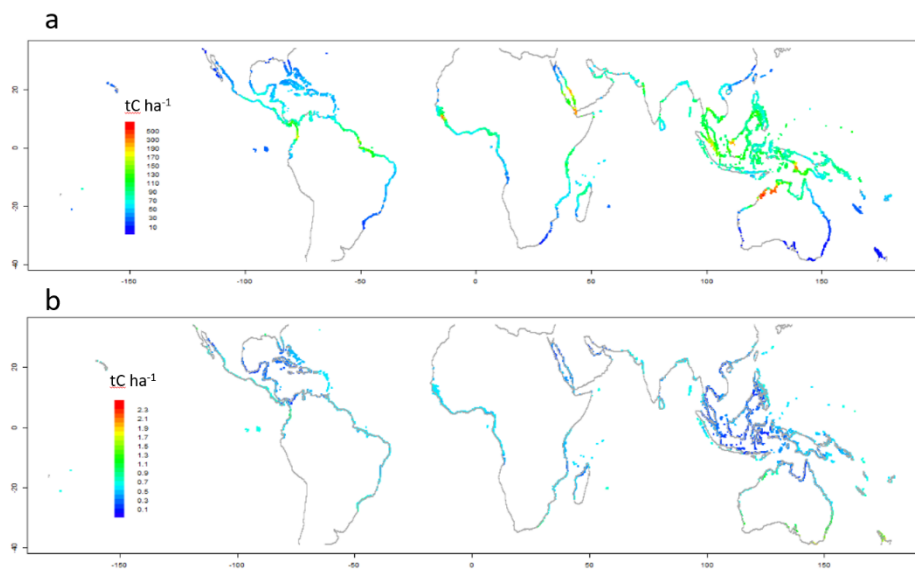


図4.3.13 マングローブ生態系地上部バイオマスCの推定値 (a) と推定値の誤差変動 (b)

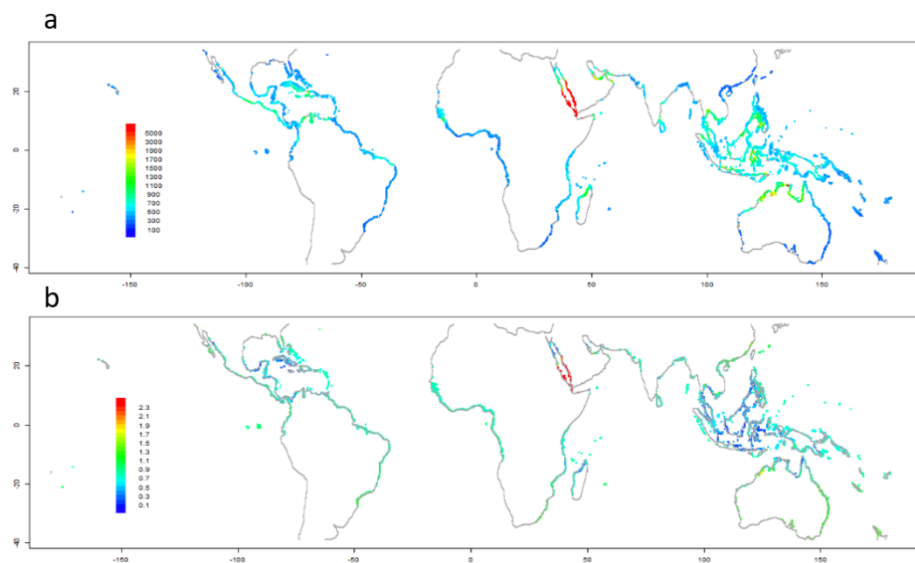


図4.3.14 マングローブ生態系ネクロマスCの推定値 (a) と推定値の誤差変動 (b)

実測データ解析で得られたパラメータと係数を用いて全球のマングローブ生態系の炭素貯留量を推定した結果を図4.3.13と図4.13.14に示す。地上部バイオマスについては、推定値の誤差変動が小さく推定

値の不確か性が小さかった（図4.3.13 b）。また、全体の傾向として赤道近くのバイオマスCが高く、高緯度・低緯度になるにつれて小さくなっていった（図4.3.13a）。これは、気温の正の効果が大きかったことが反映されていると考えられる。一方で、地下部ネクロマスについては、中東などの一部の地域の推定値の誤差変動が大きく、推定値の不確か性が高かった（図4.3.14. b）。中東地域の実測データがないことと、似通った環境を持つ地域の計測値もないことが一因であると考えられる。また、中東地域の強い日照と高い気温による土壌の塩類集積は、植物への強い塩分ストレスを引き起こすため、現地での植林事業などでは植物の生育不良が度々観察されている。今回のモデルではいずれのパラメータも正の係数を持っているため、炭素貯留量が高く推定され過ぎている可能性があることに留意する必要がある。

4.3.3 気候変動適応機能—海面変動とサンゴ礁造礁機能

琉球列島のサンゴ礁のコア採掘調査と水中露頭調査から得られた化石サンゴの平均海水面からの高度と年代に関する既報データを整理した（図4.3.15）。

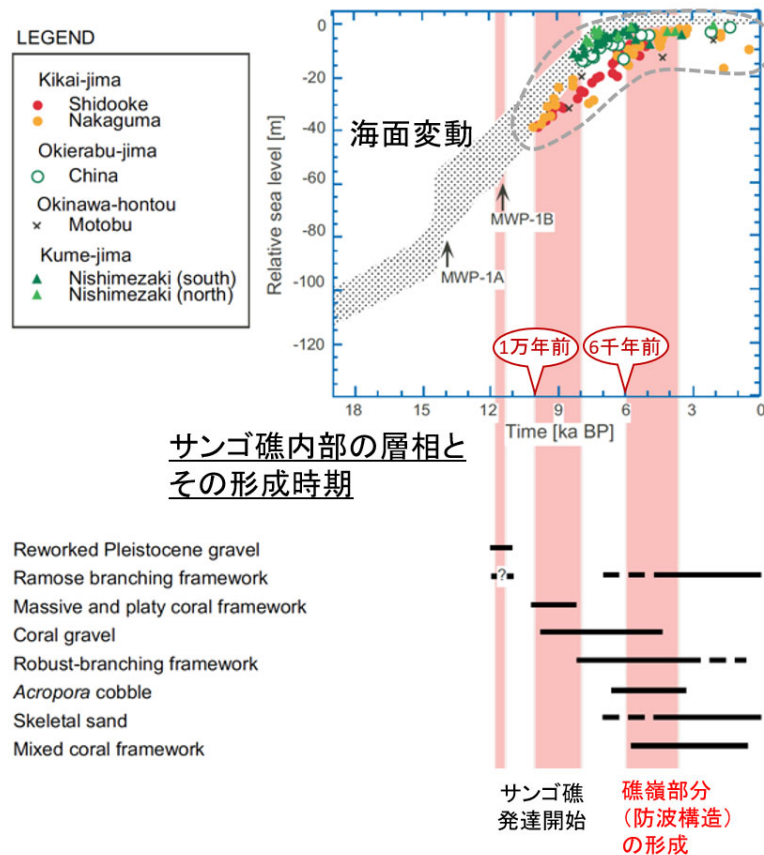


図4.3.15 琉球列島のサンゴ礁の形成と海面変動

琉球列島のサンゴ礁は、およそ10,000年前から形成されており、6,000年以降に防波機能を持つ礁嶺部分が形成されていることが明らかとなった。化石サンゴの年代から推定される礁嶺の堆積速度は6-83cm/100年となり、IPCCによって予測されている海面上昇速度の43cm/100年（RCP2.6シナリオ）、84cm/100年（RCP8.5シナリオ）と比較すると、今後の温暖化の推移によっては、温暖化に伴う海面上昇に追従できる場合があることが明らかとなった。本課題のデータ整理により、サンゴ礁の礁嶺堆積速度は場所によってかなりばらついていることが明らかとなった。地域スケールの環境因子がサンゴ礁の造礁速度を規定していることが窺える。今後、この規定因子とその影響を定量的に明らかにすることで、気候変

動影響のより具体的な評価が可能となることが示された。

4.3.3 野外調査__マングローブ～サンゴ礁の機能評価

西表島ユツン川沿岸のマングローブ～サンゴ礁コアプロファイルを図4.3.16に示す。各層の放射性炭素安定同位体値と層深から算出された堆積速度は、マングローブ域で26-76cm/100年、サンゴ礁で62-69 cm/100年となった。IPCCの温暖化による海面上昇予測値と比較すると、ユツン沿岸のサンゴ礁はRCP2.6シナリオでは海面上昇に追従可能であることが明らかとなった。一方で、マングローブは場所によってはRCP2.6シナリオでも追従できない可能性がある。

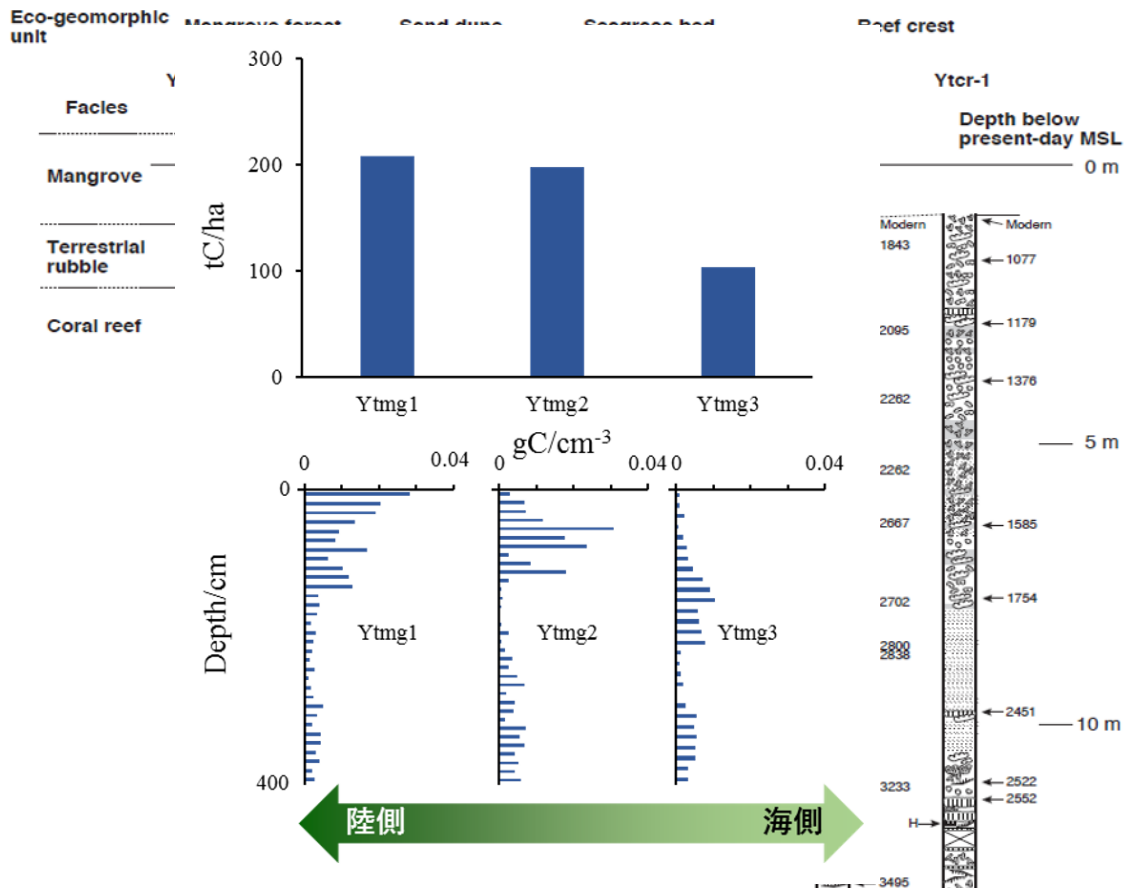


図4.3.17 西表島ユツン川沿岸におけるマングローブの地下部ネクロマスC
上：単位面積当たりの炭素貯留量
下：各コアの深度別炭素貯留量（単位体積あたり）

図4.3.16 西表島ユツン川沿岸におけるマングローブ～サンゴ礁コアプロファイル

西表島ユツン川沿岸のマングローブの地下部ネクロマス炭素貯留量を図4.3.17に示す。炭素貯留量はおよそ100-200MgC/haで、前述のデータベース解析から得られた全球の実測データ平均値744.9 MgC ha⁻¹と比べると少なめであった。西表島はマングローブ分布域の中では北限に近く、平均気温が比較的低いことなどが反映されていると考えられる。また、陸側から海側になるにつれて炭素貯留量が少なくなっていた（図4.3.17上段）。炭素含有量の深度プロファイルを見ると、内陸部では表層部分に高い炭素貯留量が見られるのに対し、海側では表層部分の炭素貯留量が少ない（図4.3.17下段）。これらのことから、潮汐変動による有機物の流出が土壤炭素含有量に影響を及ぼしていることが窺える。

本調査地のようなマングローブ樹林群が形成する干潟域は、海から内陸部に向かって潮汐の影響が大きく変化する。それに付随して、植物の成長速度や土壤への有機物供給速度、土壤微生物による分解速

度といった、生態系の炭素貯留量にかかわる各プロセスが変化していると考えられる。今後、より具体的に沿岸生態系機能を評価していくためには、様々なスケールでどのパラメータが生態系機能の規定因子となっているかを明らかにしていくことが有効であると考えられる。

4.3.3 情報発信ポータルサイトの立ち上げとデータ配信

情報発信ポータルとして「熱帯・亜熱帯沿岸生態系ポータルサイト Tropical Coastal Ecosystems Portal (<http://www.nies.go.jp/TroCEP/index.html>)」を立ち上げ、本課題で整理したデータを公開した。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

・これまで国や地域ごとに別々の形式で整理されていたマングローブとサンゴ礁生態系分布データの統一形式化と全球海岸線整備により、沿岸生態系の全球評価に必須である基本ツールが得られた。

・これまで一部のデータのみで試算されていたマングローブ生態系の炭素貯留量に関して、既存文献の網羅的な整理によって、全球実測データの比較が可能となった。これにより、マングローブ生態系機能（炭素貯留機能）について、環境因子を用いた類型化分析をすることが可能となった。

・マングローブ生態系の炭素貯留量について、実測データに基づいた推定モデルを作成し、実測値のない地域を含めた全球範囲の推定を行った。これにより、マングローブ生態系の気候変動緩和機能について、地域別に評価・予測することが可能となった。

・全球のマングローブ生態系の構成樹種を整理し、国毎の分布パターンを明らかにすることができた。これにより樹種によって異なる生態系機能の評価が可能となり、詳細な地域評価へ応用できる。

・サンゴ礁の防波機能に関して、防波構造を持つ礁嶺の堆積速度は6-83 cm/100yrで、将来の海面上昇に追従できる可能性があることが明らかとなり、サンゴ礁保全の新たな必要性と有用性を示した。

(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の国別目標B-5に関する関連指標群から「日本のサンゴ礁、藻場、干潟等における各種指定区域の面積」について、サンゴ礁の面積はS-14(2)-3「沿岸生態系分布図（2016）」を使用して算出された（H20以来の更新となった）。

<行政が活用することが見込まれる成果>

・熱帯・亜熱帯沿岸生態系ポータルサイト（Tropical Coastal Ecosystems Portal <http://www.nies.go.jp/TroCEP/index.html>）を開設し、S14(2)-3で作成した生態系分布マップと生物情報の国別データを公開することで、環境政策における沿岸生態系情報活用の推進に貢献した。同サイトは環境省ホームページ「我が国の環境政策に関するポータルサイト、日本の環境政策」からもリンクされて発信している。

・環境省「適応策に資する吸収源検討会」委員として、平成28年度委員会に出席し、S14(2)-3の研究成果であるマングローブ生態系炭素貯留推定モデルの結果を示し、今後の緩和適応策に関する検討に貢献した。

・環境省、琉球大学とともに Environmental Scientists Network for Asia-Pacific Islands (ESNAP)会合を開催し、太平洋島嶼国における沿岸生態系を活用した緩和適応策の重要性について S14(2)-3 研究成果の講演を行い、今後の ESNAP の方向性の検討に貢献した。

・海面上昇に追従できる可能性はサンゴ礁が健全であることが前提となっており、サンゴ礁が将来の海面に追従できない場合は汀線が大幅に後退する。生物多様性や水産資源の保全に加えて、防波機能の維持という観点でもサンゴ礁の保全を推進することが必要であることを示した。

6. 国際共同研究等の状況

- 1) 協力案件名 : Mangrove plantation for coastal protection to enhance mangrove biodiversity and to generate income for the local community, Gujarat, India (インド国グジャラート州における海岸侵食防止と地域住民の収入確保のためのマングローブ植林)
カウンターパート : Daheda Sangh (インド現地 NGO) (インド)
- 2) 協力案件名 : Rehabilitation of degraded mangroves to restore biodiverse mangrove ecosystems, Sabah, Malaysia (マレーシア・サバ州における生物多様性に富んだマングローブ生態系再生のための劣化したマングローブ林の回復)
カウンターパート : Sabah Forestry Department, Malaysia (マレーシア)
- 3) 協力案件名 : Mangrove rehabilitation to introduce mangrove planting techniques and to mitigate coastal erosion
カウンターパート : Ministry of Environment, Land and Agriculture Development, the Republic of Kiribati (キリバス共和国)
2016年にキリバス共和国とのMOUを締結
- 4) 研究協力案件名 : Evaluating the functions of coastal ecosystems for climate change mitigation and adaptation (沿岸生態系機能評価に関する現地調査と分析)
カウンターパート : Dr. Nick Rollings, The University of the South Pacific, Suva, Fiji フィジー
2016年にフィジー国とのMOUを締結
- 5) 研究協力案件名 : To co-organize International conference on sustainable mangrove ecosystem: Managing a vital resource for achieving SDGs and Paris Agreement, April, 2017, Bali, Indonesia (2017年4月にインドネシアのバリで開催される持続可能なマングローブ生態系に関する国際会議—持続可能な開発に関する目標とパリ協定を達成するための活力ある資源の管理—開催への協力)
約250名26カ国が参加
カウンターパート : International Tropical Timber Organization (ITTO, Ministry of Environment and Forestry, Indonesia) インドネシア

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) T.INOUE T: T.KUWAE and M.HORI eds. Blue carbon in Shallow Coastal Ecosystems: Carbon Dynamics, Policy, and Implementation, Springer, pp.373(2018), Carbon Sequestration in Mangroves.
- 2) H. YAMANO, H.KAYANE, T.YAMAGUCHI, T.INOUE, Y. MOCHIDA, S. BABA: Quaternary Research, 88(3), 400-408, (2017), Revisiting late Holocene sea-level change from the Gilbert Islands, Kiribati, west-central Pacific Ocean.
- 3) 熊野直子、田村誠、井上智美、横木裕宗 : 土木学会論文集G(環境)、74, 5(巻,号), I_395-I_404(2018), フィリピン・ベトナムにおけるグリーンインフラの海面上昇への適応評価と費用効果

- 4) Y. AKAJI, T. INOUE, H. TOMIMATU, A. KAWANISHI: *Trees*, DOI 10.1007/s00468-019-01840-7 (2019), Photosynthesis, respiration, and growth patterns of *Rhizophora stylosa* seedlings in relation to growth temperature.
- 5) H. YAMANO, T. INOUE, H. ADACHI, K. TSUKAYA, R. ADACHI, S. BABA: *Estuar. Coast. and Shelf. Sci.*, 220(vol), 166-175 (2019), Holocene sea-level change and evolution of a mixed coral reef and mangrove system at Iriomote Island, southwest Japan.
- 6) T. INOUE, A. KHOZU, and A. SHIMONO: *Tree Physiol.*, DOI: 10.1093/treephys/tpz088 (2019), Tracking the route of atmospheric nitrogen to diazotrophs colonizing buried mangrove roots.
- 7) T. INOUE, A. SHIMONO, Y. AKAJI, S. BABA, A. TAKENAKA and H.T. Chan: *Annal. Bot.*, DOI: 10.1093/aob/mcz164J, (2019), Mangrove–diazotroph relation on root, tree and forest scales–Mangrove plants create high soil nitrogenase activity with unique diazotrophic communities.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 山野博哉：グリーン・パワー，(10), 28 (2015)
「生物多様性情報学の時代6 分布の変化を明らかにする」
- 2) 山野博哉：科学, 85 (10), 923-925 (2015)
「サンゴ礁から俯瞰する世界」
- 3) 山野博哉：水生生物に及ぼす気候変動の影響：用水と廃水，59, 68-73 (2017)
- 4) 島谷幸宏他編：図説日本の湿地、朝倉書店、84-85 (2017) 「2-23 熱帯・亜熱帯の森マングローブ（執筆担当：井上智美）」
- 5) 小池 一之、山下 脩二、岩田 修二、漆原 和子、小泉 武栄、田瀬 則雄、松倉 公憲、松本 淳、山川 修治編：自然地理学事典 サンゴ礁の島々に迫る危機、朝倉書店、404-405 (2017)
「地球温暖化に伴う海面上昇（執筆担当：山野博哉）」
- 6) 山野博哉、水生生物に及ぼす気候変動の影響：用水と廃水，59, 68-73 (2017)
- 7) 山野博哉、俯瞰と超学際：広がる環境問題の理解と解決のためのアプローチ：科学、188、153-156 (2018)
- 8) 山野博哉、これからどうなる？ 世界と日本のサンゴ礁：自然保護、1562、32-33 (2018)
- 9) 山野博哉、学術研究に基づいた自然環境分野の気候変動適応：国立公園、1761、13-15 (2018)

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) T. INOUE: Association of Tropical Biology and Conservation Conference 2015, Honolulu, Hawaii, 2015
“Root functions of mangrove plants: Keys to the highly productive mangrove ecosystems.”
- 2) S. BABA, T. INOUE: XIV World Forestry Congress, Durban, South Africa, 2015
“Opportunities and Challenges for the Future of Mangrove Forests and their Ecosystems: An Overview of Actions by ITTO and Other Organizations.”
- 3) 井上智美：朝日地球環境フォーラム (2015)
「マングローブは地球の未来を救うでしょうか」
- 4) 井上智美、小山里奈、松尾奈緒子：第 21 回日本マングローブ学会平成 27 年度大会(2015)
「オヒルギ *Bruguiera gymnorrhiza* の窒素獲得機構」
- 5) 藤本潔、小野賢二、渡辺信、谷口真吾、井上智美：第 21 回日本マングローブ学会平成 27 年度大会(2015)
「マングローブ主要構成種の地下部生産・分解プロセスと立地環境の関係」
渡辺信、宮城豊彦、内山床一郎、井上智美：第 21 回日本マングローブ学会平成 27 年度大会(2015)
「ドローン・s f m技術がマングローブ研究に及ぼすインパクト」
- 6) 馬場繁幸、井上智美、貝沼真美、大城のぞみ、毛塚みお、宮城豊彦、持田幸良：第 21 回日本マングローブ学会平成 27 年度大会(2015)

- 「今、なぜ、マングローブポータルサイトの開設か」
- 7) 小野賢二、藤本潔、渡辺信、谷口真吾、井上智美：第 21 回日本マングローブ学会平成 27 年度大会(2015)
「西表島船浦湾マングローブ林におけるヤエヤマヒルギとオヒルギの細根生産量」
 - 8) 宮城豊彦、馬場繁幸、井上智美：第 21 回日本マングローブ学会平成 27 年度大会(2015)
「世界のマングローブ林の何処が脆弱なのか」
 - 9) 井上智美：国立研究開発法人国立環境研究所、日本学術会議環境学委員会環境科学分科会、大気環境学会植物分科会主催シンポジウム「環境変動と生物」(2015)
「環境変動のマングローブ生態系への影響」
 - 10) 井上智美、山野博哉：つくばエキスポセンター サイエンスシティつくば再発見(2015)
「熱帯・亜熱帯の海辺の森～マングローブの魅力～」
 - 11) 山野博哉：日立財団環境サイエンスカフェ(2015)
「サンゴから見た世界－地球温暖化と海洋酸性化－」
 - 12) 井上智美、富松元、川西あゆみ：第 64 回日本生態学会大会 (2017)
「マングローブ植物 (メヒルギ)の呼吸温度依存性」
 - 13) S. BABA, T. INOUE : The International Symposium on Mangroves, Pambala, Kakkapalliya, Sri Lanka, 2016
“More collaboration needed to protect Mangrove ecosystems.”
 - 14) S. BABA, H.T. CHAN, M. KAINUMA, N. OSHIRO, M. KEZUKA, N. KIMURA, T. INOUE : International Conference on Climate Change, Biodiversity and Ecosystem Services for the Sustainable Development Goals (SDGs), Phetchaburi Province, Thailand, 2016
“Adaptation to climate change through mangrove rehabilitation involving local community participation.”
 - 15) H. Yamano : 13th International Coral Reef Symposium, Honolulu, Hawai’i, 2016
“Marginal coral reefs and coral communities in Japan.”
 - 16) T. INOUE: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017
“Function of mangrove plants-Roots and soil chemicals.”
 - 17) T. INOUE, S. BABA, F. ISHIHAMA, A. KAWANISHI, F. HAYASHI, N. OHSHIRO, M. KEZUKA, Y. MOCHIDA, H. T. CHAN, M. KAINUMA, N. KIMURA, H. YAMANO, T. KUWAE and H. MATSUDA: International Conference on Sustainable Mangrove Ecosystems, Bali, Indonesia, 2017
“Carbon storage of mangrove ecosystems: estimated models and global maps applied their models.”
 - 18) T. INOUE: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017
“Function of mangrove plants-Roots and soil chemicals.”
 - 19) H. YAMANO and T. INOUE: Environmental Scientists Network for Asia-Pacific Islands, Okinawa, Japan, 2017
“Conservation and evaluation of the functions of coastal ecosystems for ecosystem-based management of tropical and subtropical islands.”
 - 20) 井上智美、川西あゆみ、富松元：日本生態学会第 64 回大会 (2017)
「マングローブ植物 (メヒルギ) の呼吸特性」
 - 21) 赤路康朗、井上智美、富松元、川西あゆみ：中国四国地区生物系三学会合同大会 (2018)
「生育温度がヤエヤマヒルギ実生の生残・成長・光合成に与える影響」
 - 22) H. MOKI, A. SOHMA, H. SHIBUKI, K. TOYODA, A. AKHAND, K. WATANABE, T. TOKORO, T. INOUE, H. YAMANO, M. MANNNO, Y. NAKAYAMA, H. MATSUDA and T. KUWAE: JpGU-AGU Joint Meeting 2018, Chiba, Japan, 2018
“The Estimation of CO2 Flux in Subtropical Coastal Ecosystems Using a Numerical Model.”
 - 23) 熊野直子、田村誠、井上智美、横木裕宗：第 26 回地球環境シンポジウム (2018)
「フィリピン・ベトナムにおけるグリーンインフラの海面上昇への適応評価と費用効果」

- 24) M. TAMURA, N. KUMANO, T. INOUE, H. YOKOKI: Hanoi Forum 2018, Hanoi, Vietnam, 2018
“Impact and cost assessment of coastal protection mixing green infrastructure against sea level rise in Vietnam.”
- 25) 下野綾子、井上智美: 第一回環境 DNA 学会 (2018)
「マングローブ根圏に形成される窒素固定細菌群集」
- 26) 赤路康朗、井上智美: 日本生態学会第 66 回大会 (2019)
「日中および夜間の生育温度上昇に対するヤエヤマヒルギ実生の形態的・生理的变化」
- 27) 井上智美、高津文人、下野綾子: 日本生態学会第 66 回大会 (2019)
「マングローブ植物への新たな窒素供給経路の検証—呼吸根通気システムと窒素固定菌」
- 28) 宮城豊彦、馬場繁幸、井上智美、赤路康朗、趙学群: 第 25 回日本マングローブ学会大会 (2019)
「全球規模ダイレクトセンシングによるマングローブ林分分布状況把握の可能性と意義」
- 29) N. KUMANO, M.TAMURA, T.INOUE, H.YOKOKI: 2019 AGU Fall Meeting, Moscone west, San Francisco, 2019
“Estimating the cost of coastal protection using mangrove forests against sea level rise in the Philippines and Vietnam.”
- 30) 森岡たまき、小山里奈、黒岩恵、井上智美、松尾奈緒子、大手信人: 日本生態学会大会第 67 回大会 (2020)
「低酸素状態のマングローブ根圏で硝化は起きているのか?-植物と土壤微生物の相互作用」
- 31) 井上智美、野口航、赤路康朗: 日本生態学会大会第 67 回大会 (2020)
「マングローブ植物の葉と根の呼吸温度依存特性」
- 32) A. SHIMONO and T. INOUE: The 67th Annual Meeting of the Ecological Society of Japan, Nagoya 2020 (ESJ67), 2020
“Rhizophore diazotrophic communities developing with mangrove forest formation.”
- 33) Y. AKAJI, T. INOUE, T. TANIGUCHI, S. BABA: The 67th Annual Meeting of the Ecological Society of Japan, Nagoya 2020 (ESJ67), 2020
“Arbuscular mycorrhizal fungi associated with the roots and soils of two Rhizophoraceae species.”
- 34) L. A. KOYAMA, T. INOUE and N. MATSUO: OrgN2020, International workshop on organic nitrogen and plant nutrition - from molecular mechanisms to ecosystems, Monte Verità, 2020
“Capacity of two mangrove species, *Bruguiera gymnorhiza* and *Rhizophora stylosa*, to use nitrate as a N source.”

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 沿岸における生態系サービスや海洋健全度に関するセミナー(2016年10月14日、(国研) 港湾空港技術研究所 1F 大会議室、観客 60 名)
- 2) シンポジウム「サンゴの大規模白化の影響と私たちができること」(2017年3月5日、TKP 東京駅前会議室 カンファレンスルーム 1、観客 60 名)
- 3) Environmental Scientists Network for Asia-Pacific Islands (2017年3月20日、沖縄県自治会館、観客 40 名)
- 4) 一般公開シンポジウム「中学生・高校生によるマングローブ研究発表となんでも相談」(主催: 日本マングローブ学会、2019年12月8日、東京農業大学世田谷キャンパス、観客約100名)にて司会進行・質問回答
- 5) 地域の科学講座(主催: 自愉企画)における講師「熱帯の海の森」(2019年11月4日、参加者約10名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 熱帯・亜熱帯沿岸生態系ポータルサイト開設に関する記者発表（2015年7月21日、筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ同時配付）
- 2) EICネット（2015年7月21日、国立環境研究所、熱帯亜熱帯沿岸生態系データベース公開）
- 3) ECO学習ライブラリー（2015年7月2日、TroCEP公開について）
- 4) Tropical Coastal Ecosystems portal開設海外記者発表（2015年8月21日、外務省記者クラブ配布）
- 5) 井上智美：朝日新聞（2015年10月28日、全国版、18頁）
- 6) 山野博哉：NHK総合ニュースウォッチ9（2016年8月25日、サンゴの現状や白化の原因について解説）
- 7) 山野博哉：サンゴ広がる白化 98年以来の被害懸念、朝日新聞（2016年8月29日、全国版夕刊）
- 8) 山野博哉：沖縄「石西礁湖」海水温の上昇でサンゴ礁9割白化、読売新聞（2016年9月1日、全国版）
- 9) 山野博哉：NHKWORLD(国際放送)「NEWS ROOMTOKYO」（2016年9月8日、「ニュースウォッチ9」8/25分の再放送(国際放送のため国内ではURLから視聴可)
- 10) 山野博哉：熱くなる海サンゴが悲鳴 ー迫る地球温暖化ー ”海の森”消滅危機 グレートバリアリーフ 鮮やかな楽園廃墟に 温暖化で頻発懸念（2017年1月1日、共同通信から配信）
- 11) 山野博哉：THE PAGE 国内最大のサンゴ礁で白化現象、「将来サンゴが消える可能性も」と専門家、（2017年1月13日、地球温暖化とサンゴの白化現象について解説
<https://thepage.jp/detail/20170112-00000007-wordleaf>）

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) M.SPALDING, M. KAINUMA, L COLLINS : World Atlas of Mangroves, Earthscan,pp.319(2010)
- 2) E. P. GREEN, F. T. SHORT : World Atlas of Seagrasses, University of California Press, pp. 297(2003)

II-4 緩和策と適応策に資する森林生態系機能とサービスの評価

国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所

国際連携・気候変動研究拠点 気候変動研究室

森林防災研究領域

植物生態研究領域

北海道支所

松井哲哉（サブテーマ代表）

小南裕志

田中信行（平成27年度）

津山幾太郎

<研究協力者> 大橋春香（平成27～令和元年度）、平田晶子（平成27～令和元年度）、中尾勝洋（平成27～令和元年度）、中村克典（平成27～平成29年度）、田中信行（平成28年度～令和元年度）

平成27年度～令和元年度研究経費（累計額）：65,053千円

（平成27年度：13,650千円、平成28年度：12,005千円、平成29年度：12,966千円、平成30年度：12,966千円、令和元年度：13,466千円）（研究経費は間接経費を含む）

[要旨]

気候変動に対する森林生態系機能とサービスの評価には、様々な生物種の潜在生息域を推定するモデルを開発し、気候変動による影響を定量的に評価する手法が有効である。本研究は、持続可能な森林生態系機能とサービスにとって重要な2つのトピック、すなわち、森林への病虫獣害と生物多様性保全に着目して研究をおこなった。病虫獣害については、すでに森林生態系に甚大な被害を与え、今後の気候変動によってさらなる被害地域の拡大が懸念されるニホンジカ（シカ）とマツ材線虫病（マツ枯れ）に着目し、それぞれ潜在生息域予測モデルおよび被害危険域予測モデルを開発して影響評価をおこなった。生物多様性保全については、絶滅危惧種であるニホンライチョウ（ライチョウ）の保全策策定に資する潜在生息域の気候変動影響評価および、世界の多様な生物種の潜在生息域に関する気候変動および土地利用変化による影響評価をおこなった。

国内のシカの分布範囲面積は1978年から2003年までの25年間で1.7倍に拡大し、全国各地で農林業被害や生態系への影響が問題となっている。そこで、過去の土地利用と積雪期間の変化がシカの分布変化に及ぼした影響を、シカにとっての棲みやすさ（生息好適度）と周辺地域でのシカの分布状況を考慮して解析した。さらに、今後100年間の土地利用と積雪期間の変化がシカの分布に及ぼしうる影響を予測した。その結果、シカの生息域は、土地利用だけでなく気候変動に伴う積雪期間の変化によっても影響を受けて変化することが初めて定量的に明らかとなった。すなわち、過去25年間で人の居住域が拡大した地域はシカにとって棲みにくい環境になった一方で、積雪期間が短縮した地域はシカにとって棲みやすい環境になったことが明らかになった。また、今後100年間の土地利用および気候変動シナリオを組み合わせて予測したところ、人口減少に伴い居住域の縮小が進み、気候変動により積雪期間が短縮するため、シカの分布域は2103年には国土の9割以上に拡大する可能性が示唆された。

マツ枯れに抵抗性が低い世界の感受性マツの天然分布域を対象に、現在および将来の気候変動シナリオ下でのマツ枯れ危険域と、気候条件がマツにとって不適となる地域を推定した結果、現在の気候条件では東アジアや南ヨーロッパのマツ分布域が危険域として推定された。さらに、今後の気候変動にともなって危険域は東ヨーロッパや中央アジア、極東ロシアにまで拡大すると予測され、危険域は感受性マツ天然分布域の50%にまで拡大し、しかもその約40%はマツの分布に適さない気候条件になってしまうという可能性が示された。

ライチョウは中部山岳の高山帯のみに隔離分布し、高山植生に強く依存した生活をおくっており、その個体数は2,000羽弱まで減少していると推定されている。本研究では、ライチョウ生息地の中心部である北アルプスにおいて、高山植生の分布を予測するサブモデルを構築し、その後ライチョウの分布と高山植生の分布との関係性に基いて統計モデルを構築して、ライチョウの潜在生息域を予測した。その結果、ライチョウは稜線に近く、ハイマツ群落や雪田草原群落、風衝地群落といった高山植物群落が

バランス良く成立する場所で生息確率が高いことが判明した。次に、ライチョウが気候変動によって受ける影響について、現在と今世紀末（2081-2100年）の潜在生息域を比較することで評価した結果、経済成長重視を想定した気候シナリオに基づくと、ライチョウの潜在生息域は高山植生の減少により、今世紀末には現在の0.4%にまで大きく減少すると予測され、ライチョウ生息地の中心である北アルプスにおいても、気候変動の影響が大きく及ぶ可能性が示唆された。

パリ協定が目指す「2℃目標」の達成が全球規模で生物多様性保全にもたらす効果を、「気候変動そのものによる影響」と「気候変動対策に伴う土地改変による影響」の2つの側面から総合的に評価した。具体的には世界の維管束植物1,605種、鳥類4,796種、哺乳類1,137種、両生類509種、爬虫類381種の合計8,428種を対象に、生物ごとの移動可能距離を考慮した潜在生息域予測モデルを種ごとに構築し、将来の気候変化や土地利用変化シナリオをモデルにあてはめて生物の潜在生息域の変化を予測した。その結果、今世紀後半には、気候変動対策として行うエネルギー作物の栽培や植林の拡大は、一部地域では生物多様性の損失をもたらすものの、気温上昇の抑制作用の恩恵が上回り、地球全体としては生物多様性の保全に大きく貢献することが明らかとなった。また、生物多様性保全と気候変動対策の相乗効果を得るためには、例えば強い土地利用規制や食品ロスの削減など、持続可能な社会の構築に向けた取り組みが必要であることが示唆された。近年、気候変動分野ではエネルギー作物に依存した気候変動対策による副次的な悪影響が懸念されてきたが、本研究は「土地改変による影響を考慮しても、気温上昇を2℃以内に抑えることで、生物多様性の損失を抑えられる」ということを明らかにした。

【キーワード】 森林生態系、シカ、マツ枯れ、ライチョウ、生物多様性

1. はじめに

森林生態系は、水資源保全や炭素蓄積源などの生態系機能とサービスを有することに加え、多様な生物の生息場所でもある。気候変動の時代に生きる我々が将来にわたって森林生態系サービスを持続的に享受するためには、森林の適切な管理による気候変動緩和策の推進や森林生態系の健全性を維持するための適応策の策定は不可欠である。そのためには森林生態系機能とサービスに関する気候変動影響評価の見解の充実が喫緊の課題である。

過去の環境総合推進費S-4やS-8において、日本における代表的な自然生態系、すなわち高山帯、亜高山帯、冷温帯および暖温帯を対象とした気候変動影響評価が実施された。その結果、高山帯のハイマツや亜高山帯のシラビソ林では森林の潜在生育域は大きく縮小すると予測された。また山地上部のブナ林などの冷温帯では、西日本において大きく縮小や消滅し、北海道では北上や拡大すると予測された。一方、暖温帯に生育するアカガシなどの常緑広葉樹林では、潜在生育域は山地上部や寒冷な東北地方にまで拡大する可能性が予測された。しかしながら、持続可能な森林生態系機能とサービスにとって懸案事項である病虫害や生物多様性保全と、気候変動や気候変動対策との関係性については不明な点が多かった。そこで本研究では以下の4項目について、研究をおこなった。

(1) ニホンジカ（シカ）の潜在生息域予測モデルの構築と将来シナリオ下での分布予測

野生鳥獣による森林生態系への被害の典型的な事例として、シカの高密度化による問題が知られている（図1.4.1）。近年、シカによる森林被害が全国各地で報告されており、社会問題となっているが、シカの分布と、気候や土地利用等の環境要因との関係性は十分に解明されているとはいえない。

過去のシカの分布域は、1978年時点に国土の27.7%であったが、2003年には47.9%へと1.7倍に増加した。このような生息域の急激な拡大にともない、各地で農林業被害や生態系への影響が顕在化してきた。したがって、今後新たな分布域になる可能性が高い地域では、将来の被害防止に備えた早期の対策が急務とされている。

既存の研究成果から、冬期のシカの行動は積雪によって大きく制限を受けることが報告されている。今後、気候変動が進行した場合には、積雪の減少にともないシカの行動可能な範囲が拡大し、森林生態系に深刻な影響が生じる地域が拡大することが予想される。そのために、シカの分布拡大を予測し

うるモデルを構築し、気候変動後のシカの潜在分布域を高精度で予測することが急務である。



図1.4.1：防鹿柵の周囲を徘徊するシカの親子（左）、シカによる森林被害（樹皮はぎ）の事例（右）
（撮影：大橋春香）

（2）マツ材線虫病（マツ枯れ）に関する気候変動影響評価と危険域の地図化

気候変動による影響予測・評価が急務である病虫害の1例として、マツ材線虫病が挙げられる（図1.4.2）。「マツ枯れ」や「松くい虫」とも呼ばれるマツ材線虫病によるマツの集団枯損は、北米原産のマツノザイセンチュウ(*Bursaphelenchus xylophilus*)がマツノマダラカミキリ (*Monochamus* 属)によって媒介されてマツの樹体内で通水阻害を引き起こすことで発症する。日本では、明治時代に米国からの輸入木材とともに運ばれてきたマツノザイセンチュウが日本国内でマツノマダラカミキリによって運ばれ拡散した結果と考えられ、1979年には最大のマツ枯れ被害（243万 m^3 ）が報告された。近年では岩手県や長野県のような高緯度・高標高地域でも被害が拡大している。海外では、台湾、中国大陸、韓半島などの東アジアやポルトガル、スペインといった西ヨーロッパから集団枯損が報告されている。マツ枯れの発生は気温と密接な関係があることから、今後の気候変動によって被害域が高緯度や高標高地域に拡大することで、マツ林への被害がさらに拡大することが懸念されている。



図1.4.2：マツ枯れによる壊滅的な被害の様子（左、撮影：松井哲哉）、マツノザイセンチュウ(中、撮影：松橋彩衣子)、および媒介者であるマツノマダラカミキリ（右、撮影：中村克典）

（3）絶滅危惧種ニホンライチョウ（ライチョウ）の潜在生息域の気候変動影響評価

気候変動の影響を受けやすい稀少野生生物の例として、本州の中部山岳に生息するライチョウ（図1.4.3）が挙げられる。ライチョウは日本の高山生態系の象徴であり、寒冷な環境に適応進化してきた生物である。それゆえ気候変動による気温上昇に特に脆弱と考えられており、適応策の開発が急務である。

ライチョウは既に、長野県の八ヶ岳及び蓼科山では約200年前に、北陸地方の白山では約70年前に、中央アルプスでは約50年前に地域絶滅しており、現在の個体数は約2,000羽以下にまで減少している。高山帯に生息するライチョウの生活史は、高山植生との結びつきが非常に強い。例えばハイマツ群落は営巣場所や捕食者からの逃避場所として利用される。また雪田群落は主に夏期に雌鳥と雛が採餌する場

所として利用され、風衝地群落は採餌や砂浴びを行う場所として利用される。しかし、こうした高山植生は、今後の気候変動によって大きく縮小することが予測されていることから、それに伴ってライチョウの生息域の縮小と個体数の減少に拍車がかかることが危惧されている。そのため、ライチョウの潜在生息域を特定し、気候変動による変化を面的に予測することは、効果的なライチョウ保全策を検討する上で危急的な課題と言える。

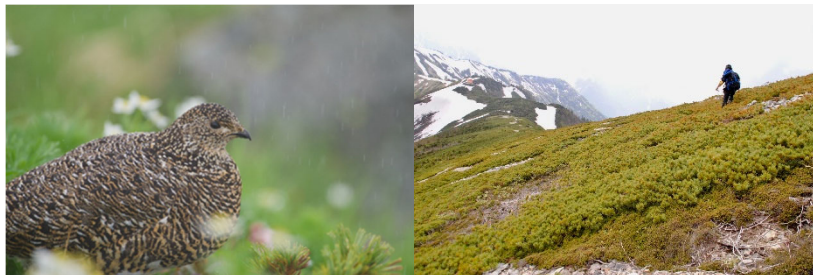


図1.4.3：夏期のライチョウのメス（左）および生息地の様子（右、北アルプス爺ヶ岳）。背の低いハイマツが密生する、ライチョウの縄張り周辺的环境（撮影：津山幾太郎）

（４）生物多様性と気候変動緩和策との間のトレードオフやコベネフィットに関する評価

生物多様性は、人類が生存するために欠かせない様々な恩恵をもたらしている。しかし、過去100年間の人間活動による土地利用改変により、地球上の生物多様性は歴史上類がないほど急激に失われてきた。今後、世界人口の増加に伴い、資源（食料、木材等）を生産するために改変される土地面積はさらに増大し、生物多様性を脅かす可能性がある。他方、急激な気候変動も生物多様性にとっての脅威であるため、気候変動対策の推進は生物多様性保全にとって望ましいとされてきた。しかし、吸収源対策の要であるエネルギー作物栽培や植林地拡大といった、土地利用のさらなる改変が生物多様性にもたらす負の影響については、これまで生態学的な評価がなされていなかった。したがって、気候変動対策と生物多様性保全効果との間のトレードオフやコベネフィットの評価は急務である。

2. 研究開発目的

本研究においては、以下の4項目について生態学的な解析をおこなった。

（１）シカの潜在生息域予測モデルの構築と気候変動影響評価

シカの分布と気候や土地利用等の環境要因との関係性を明らかにするために、シカの分布情報、気候情報、土地利用などの環境情報をGISで整備したうえで統計的な解析を行い、潜在生息域予測モデルを構築する。その上で、気候変動や土地利用変化を想定した様々な将来シナリオの下でシカの潜在生息域の変化を予測することを目的とした。

（２）マツ枯れに関する気候変動影響評価と危険域の地図化

マツ枯れについては、世界の感受性マツの天然分布域を対象に、気候変動シナリオの下でのマツ枯れ危険域と、気候条件そのものがマツの生育にとって不適となる地域とを複合的に推定することを目的とした。

（３）ライチョウの潜在生息域の気候変動影響評価

ライチョウについては、生息域のコアエリアである北アルプス中南部を対象として、ライチョウの潜在生息域を高山植生との関係性から推定する統計モデルを構築し、現在と将来の潜在生息域を予測・比較することで、気候変動に脆弱または持続的な生息域を特定することを目的とした。

（４）生物多様性と気候変動緩和策との間のトレードオフやコベネフィットに関する評価

気候変動対策と生物多様性保全との間のトレードオフやコベネフィットを評価するため、5つの分類群（維管束植物、鳥類、哺乳類、両生類、爬虫類）にまたがる8,428種の生物種の潜在生息域を予測する統計モデルを構築し、完成したモデルに将来の気候や土地利用など複数条件を当てはめて、気候変動対策「あり」と「なし」のそれぞれの場合における生物多様性の損失程度を世界規模で比較・評価し

た。

3. 研究開発方法

(1) シカの潜在生息域予測モデルの構築と気候変動影響評価

シカについての解析は以下のようにおこなった。1978年と2003年のシカの全国分布調査の結果を元に、潜在生息域を推定する統計モデル（生息適地モデル）を構築し、シカの生息好適度を上記の2時期について予測・検証した上で、シカ分散確率を考慮した新たな「存続・移入モデル」を構築し、来世紀はじめ（2103年）のシカの在不在について予測をおこなった（図3.4.1）。

具体的には、環境省自然環境保全基礎調査のデータを用いて、1978年のシカ在メッシュで2003年にシカが在となる確率（存続確率）と、1978年のシカ不在メッシュで2003年にシカが在となる確率（移入確率）を、距離の二乗で重み付けをおこなった半径60km以内の1978年のシカ在メッシュ数と、1978年・2003年の土地利用および気候から予測される生息好適度により説明するモデルを構築した。生息好適度の計算には、気候、土地利用、地形といった変数を用いた。

上で構築したモデルに将来の気候変動シナリオを当てはめることで、今世紀末のシカの潜在生息域を予測し、リスク評価をおこなった。具体的には人口減少に伴う土地管理放棄を想定した10の土地利用シナリオと5つの気候シナリオを用いて将来のシカ分布域を予測した。気候変動シナリオ4種類

（CSIRO-Mk3.0, MRI-CGCM2.3.2a, GFDL-CM2.1, MIROC3.2 (high resolution)）および将来の人口減少を考慮した土地利用シナリオ9種類¹⁾を用いて、気候変化も土地利用も変化しない「現状維持シナリオ：BL」、土地利用のみ変化する「人口減少シナリオ：LU」、気候のみ変化する「温暖化シナリオ：CL」、土地利用も気候もすべて変化する「人口減少+温暖化シナリオ：LUCL」の4つのシナリオ群について将来のシカの潜在生息域の予測とシナリオ間の結果の比較をおこなった。

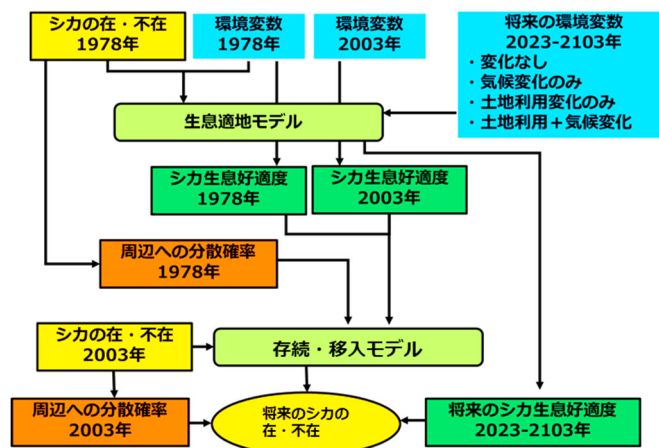


図3.4.1：シカの気候変動および土地利用の変化影響を評価するためのモデル開発フロー

(2) マツ枯れに関する気候変動影響評価と危険域の地図化

日本のアカマツ林における被害発生状況と気温との関係から推定された、マツ枯れの発生予測指数であるMB指数は、月平均気温が15℃を超える月について、平均気温と15℃との残差を積算した値であり、指数が22以上の地域はマツ枯れ被害の危険域とみなされる²⁾（図3.4.2）。MB指数の基準値は日本のアカマツ林における被害状況を基に計算されたが、本研究ではこの指標を全球スケールでのマツ枯れ危険域予測に適用した。文献調査によって、マツ枯れへの抵抗性の低いマツ属樹種（以下、感受性マツとする）を抽出し、感受性マツの天然分布域を対象に、現在および将来のマツ枯れ危険域の評価をおこなった。世界のMB指数を計算するために、WorldClim (<http://www.worldclim.org/>)より、現在の月別平均気温と将来のGCM、RCPごとの予測値をダウンロードして整備し、現在と将来のMB指数を30秒×30秒（赤道付近で約1km²）解像度で計算した。

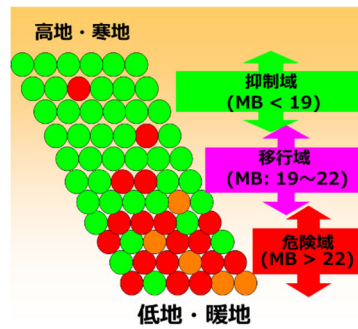


図3.4.2：気温上昇と共に増加するマツ枯れ危険域の模式図。MB指数とは月平均気温が15℃を超える月について、平均気温と15℃との残差を積算した値である。丸印はマツの個体を表し、緑は健全、赤・橙は罹病を示す（図提供:中村克典）

次に、感受性マツを対象に、マツの分布情報と対応して気温や降水量といった気候条件に加えマツの分布に大きく関与すると考えられる乾燥度をMtclimモデルによって推定し、これらとの関係性を機械学習アルゴリズムMaxEntモデルを用いて解析し、マツの潜在生育域を予測できるモデルを樹種ごとに構築した。解析の空間解像度は30秒×30秒（赤道付近で約1 km²）である。これにより、現在および将来の複数の気候シナリオ（2050年代、2070年代、4つの排出経路（RCP）、5つの気候モデル）を用いた、潜在生育域の変化を可視化することが可能となった。気候モデルにはWorld Climate Research ProgramによるCMIP5（Coupled Model Intercomparison Project Phase 5）の5つの気候モデル（GFDL-CM3、HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-LR、MIROC-ESM-CHEM、NorESM1-M）を用いた。

さらに、MB指数による気候的なマツ枯れ被害発生危険域と、気候変動による感受性マツの潜在生育域の変化予測の結果とを重ね合わせることで、気候変動にともなうマツ枯れ危険域の変化を評価した（図3.4.3）。マツ枯れリスクは、以下の4つのカテゴリに区分した。1：マツ枯れ危険域かつマツの分布に不適な気候条件となる地域、2：マツ枯れ危険域、3：マツの分布に不適な気候条件となる地域、4：変化なし。

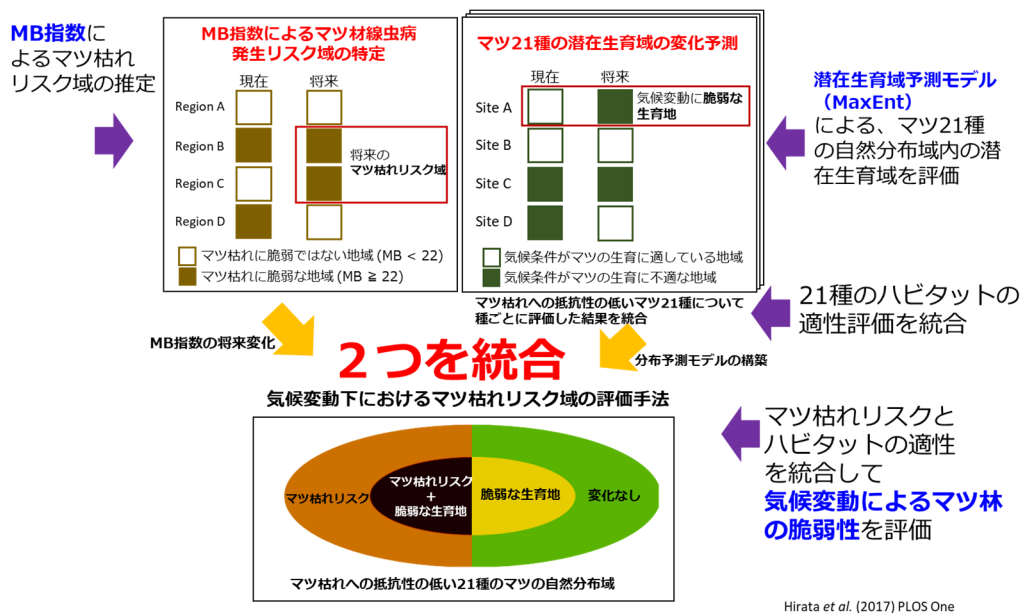


図3.4.3：気候変動下におけるマツ枯れ危険域評価の流れ（出典：Hirata et al. 2017）

(3) ライチョウの潜在生息域の気候変動影響評価

ライチョウについては、その生息の有無が高山植生に質的・量的に強く依存していること、高山植生の質と量は、マクロスケール（1km解像度）の気候条件と、ミクロスケール（100～300m解像度）の地形条件によって規定されることを仮定し、潜在生息域予測モデルを構築した（図3.4.4 左）。構築した潜在生息域予測モデルに基づき、現在のライチョウの潜在生息域を300m解像度で予測するとともに、同モデルに将来の気候シナリオを当てはめることで、今世紀末における潜在生息域を予測し、気候変動に脆弱または持続的な生息域を特定した。

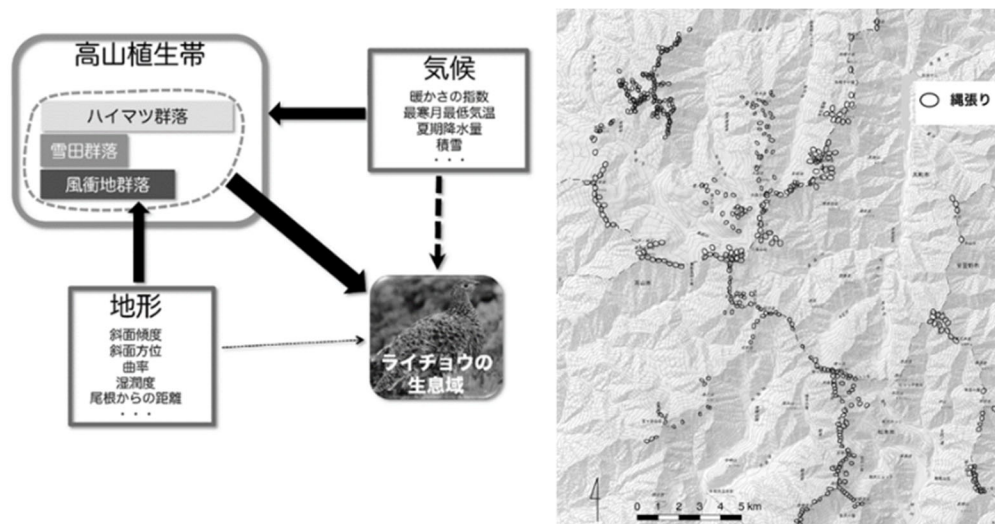


図3.4.4：ライチョウの潜在生息域予測モデルの概念図（左）と北アルプス中南部におけるライチョウの縄張りの分布（右）（出典：Hotta *et al.* 2019, 津山・堀田 2019）

解析範囲は、ライチョウの約1/3が生息するとされる北アルプス中南部の20km×30kmの範囲（北緯36.25°～36.5°、東経137.5°～137.7°）とした。当該地域において、1971年から2010年にかけて行われたライチョウの生態調査の結果をデータベース化し、ライチョウの縄張り491個の位置を抽出した（図3.4.4 右）。環境要因には、高山植生データとして、環境省自然環境保全基礎調査第6回および7回の植生調査から、ライチョウの生息に重要と考えられる3つの群落（ハイマツ群落、雪田群落、風衝地群落）を抽出して用いた。気候データは、現在の気候条件として3次メッシュ気候値を、今世紀末（2081～2100年）の気候条件には経済成長重視を想定した気候シナリオ（CMIP3のSRES・A1bを前提にした24個の全球気候モデル(GCMs)による計算結果）を用いた。これらの気候データから、高山植生の成立にとって重要と考えられる4つの気候要因（暖かさの指数(WI)、最寒月最低気温、夏期降水量、最大積雪水量）を算出した。地形データには、国土地理院提供の10m数値標高モデルを用い、地形解析ソフトSAGAを用いて100m解像度の斜面傾度、斜面方位、曲率、湿潤度を算出した。加えて、ハイマツの樹高を規定すると考えられる尾根線からの距離を算出し、モデル構築に用いた。

ライチョウの潜在生息域予測モデルは、以下の3つのサブモデルを統合して構築した。すなわち、1) ライチョウの生息の有無を指標する縄張りの在・不在を、3つの高山植物群落の被覆率と尾根からの距離で説明するサブモデル、2) 高山植生帯の在・不在を4つの気候要因から説明するサブモデル、3) 3つの高山植物群落の被覆率を2)のモデルから得られた高山植生帯の成立確率と地形要因から説明するサブモデル、である。1)と2)には一般化加法モデルを、3)には機械学習の一種であるランダムフォレストを用いた。

(4) 生物多様性と気候変動緩和策との間のトレードオフやコベネフィットに関する評価

生物多様性研究については、まず世界規模で生物の分布の情報を収集・公開しているGBIF

(<https://www.gbif.org/>) から入手したデータを整理し、世界の陸域生物8,428種類それぞれについて、

複数の気候条件や土地利用条件との関係性から潜在生息域を推定可能な統計モデルを構築した。そのモデルに将来の気候条件や土地利用条件、生物の分布拡大速度などの各種条件をあてはめることで、気候緩和策を講じた場合と講じなかった場合それぞれにおける、生物多様性の変化を世界規模で推定した(図3.4.5)。

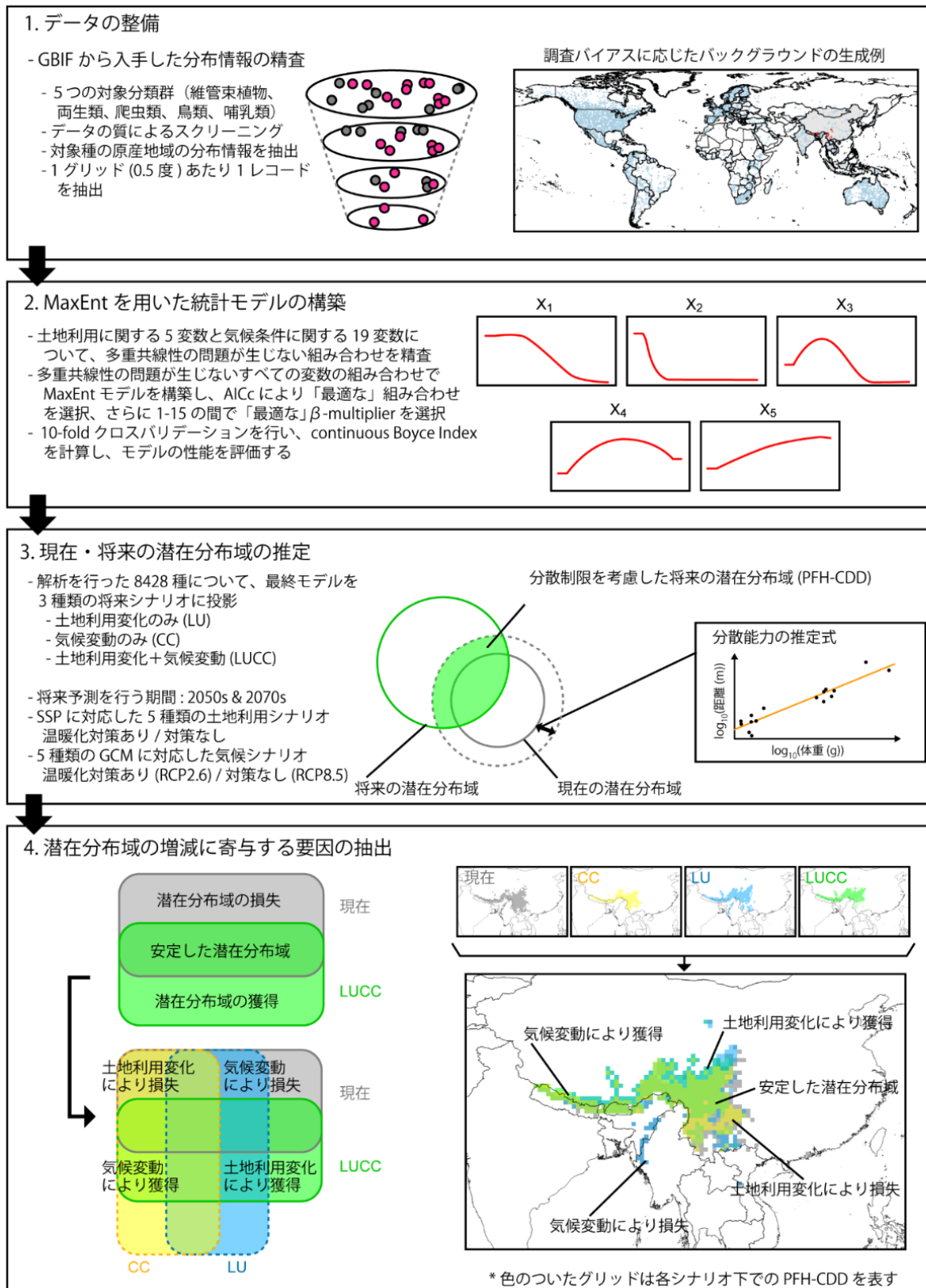


図3.4.5：生物多様性影響評価シミュレーションのフロー（出典：Ohashi *et al.* 2019より改変）

具体的には、本研究では世界全域を対象として3種類のシミュレーションモデル（社会経済モデル、

土地利用モデル、生物多様性モデル)を組み合わせることで上記の問いに答えることを試みた。将来の社会経済の状態および土地利用変化の予測には、国立環境研究所が開発した統合評価モデル(AIM)のうち、2つのサブモデル(経済モデルAIM/CGE、土地利用モデルAIM/PLUM)を用いた。これらのモデルは、将来の人口やGDP、エネルギー技術の進展度合い、再生可能エネルギーの費用、食料の選好、土地利用政策など様々な社会経済条件を考慮して、将来の地球全体の土地利用を $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ の解像度で予測することができる。この土地利用の予測結果に対する生物多様性の応答を評価するため、5つの主要な生物群(植物、両生類、爬虫類、鳥類、哺乳類)にまたがる8,428種の生物種を対象に、世界規模で生物の潜在的な生息域を予測するための統計モデル(潜在生息域予測モデル)を構築し、シミュレーションをおこなった。

今回開発したモデルを用いて、気候変動対策が生物多様性に及ぼす影響の評価を行うにあたって、将来の気候条件には「気候変動対策を特に取らないケース：RCP8.5」と「パリ協定における長期的気候目標(通称2°C目標)を達成可能な水準で気候変動対策を強く推進するケース：RCP2.6」の2つのケースを想定した。将来の社会経済的条件の違いによる影響は、長期気候変動研究で一般的に用いられるShared Socioeconomic Pathways(通称SSPs; 共通社会経済シナリオ)を用いて評価した。

4. 結果及び考察

(1) シカの潜在生息域予測モデルの構築と気候変動影響評価

本研究では、人の居住域と積雪期間の変化が1978年と2003年のシカの分布の違いに及ぼした影響を定量的に分析した。シカの分布の持続性と新規加入を、近隣セルでのシカの分布と生息好適度で説明する統計モデルを構築した結果、過去25年間で、気候変化と土地利用変化がシカの分布に影響を及ぼしてきたことが明らかになった。積雪の減少に伴い、北日本および山岳地域を中心とする、国土の71.6%の地域でシカの生息好適度が上昇していた。また、都市化による森林面積の減少により、都市周辺など、国土の28.4%でシカの生息好適度が低下していた。

さらにシカの潜在生息域の将来変化予測には、気候のみが変化した場合(CL)、人口が減少して土地利用が変化した場合(LU)、気候と土地利用の双方が変化した場合(LUCL)、どちらも変化しなかった場合(現状維持:BL)の4通りについてシミュレーションを行い、結果の比較・評価をおこなった。その結果、気候も土地利用も変化しないと想定した場合(BL)においても、シカは来世紀はじめの2103年には東北地方の日本海側を除く、本州・九州および四国で広く分布拡大することが予測された(図4.4.1、図4.4.2)。また将来、人口減少で居住地域が縮小すると想定した場合には、人の居住域の辺縁でシカの分布が増加し、気候変動にともなう気温上昇で積雪期間が短縮すると想定した場合には東北地方の日本海側でもシカが増加する傾向が見られた。さらに、人口減少と積雪期間の短縮がどちらも起きた場合には、国土の9割以上がシカの潜在生息域になると予測された。

以上の結果は、過去25年間で人の居住域が拡大した地域はシカにとって棲みにくい環境になった一方で、積雪期間が短縮した地域はシカにとって棲みやすい環境になったことを意味する。さらに今後の人口減少にともない人の居住域の縮小が進み、気候変動の進行により積雪期間が短縮するため、現在シカがほとんど生息していない多雪地域や過疎地域でもシカが生息するようになり、2103年にはシカの分布域が国土の9割以上にまで拡大する可能性を示唆した。以上のことから、将来シカの分布拡大が予想される地域においては今から重点的にシカのモニタリング調査を行い、対策のための体制を整備することが重要であると考えられる。

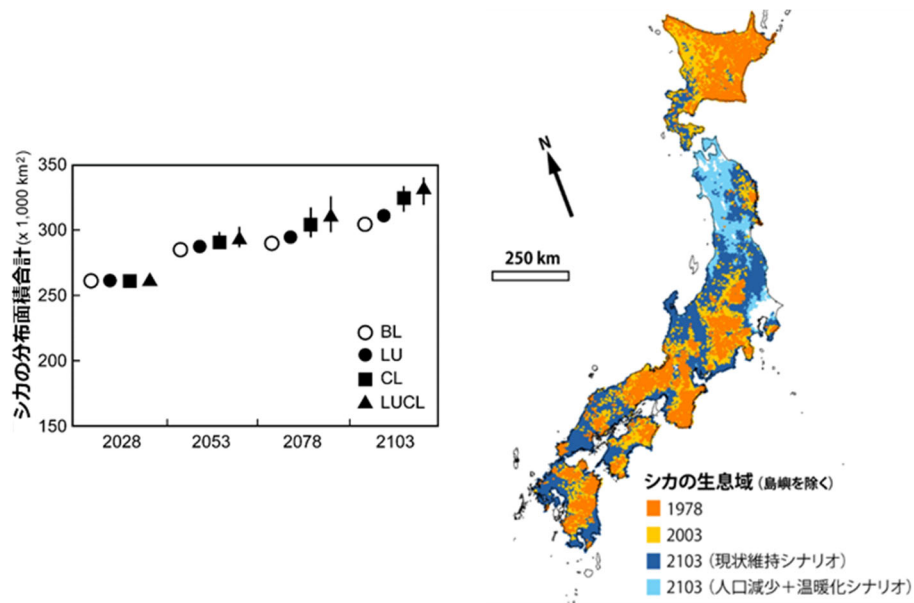


図4.4.1：将来(2028, 2053, 2078, 2103年)のシカの分布面積予測（左図）、BL：現状維持シナリオ、LU：人口減少シナリオ、CL：温暖化シナリオ、LUCL：人口減少+温暖化シナリオ。およびシカ潜在生息域の変化推定（右図）。来世紀初頭の2103年にはシカの潜在生息域が国土の9割にまで拡大すると予測された。（出典：Ohashi *et al.* 2016より改変）

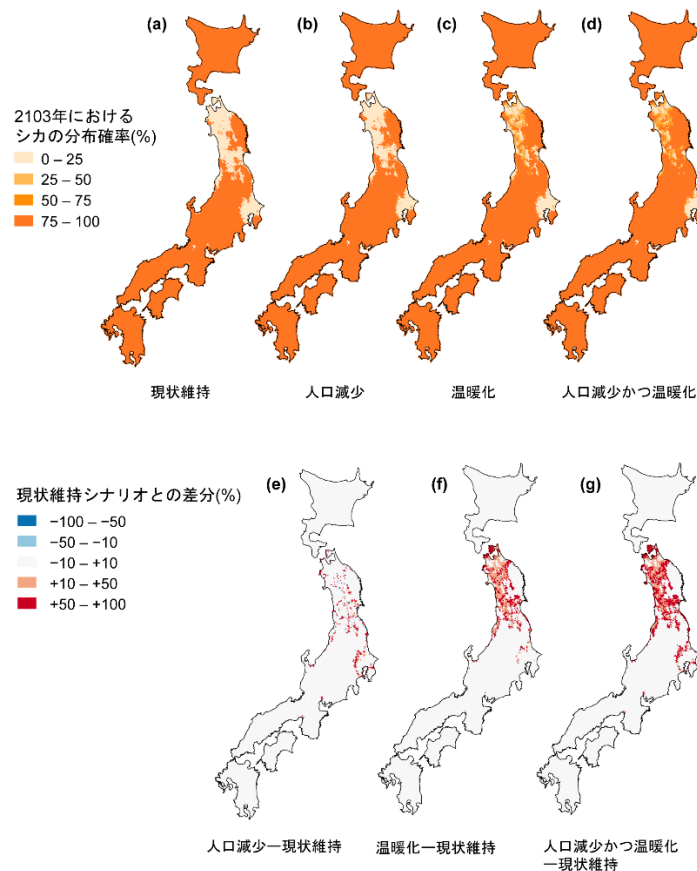


図4.4.2：シナリオごとの、将来のシカの分布予測図。(a) 現状維持シナリオ、(b) 人口減少シナリオ、(c) 温暖化シナリオ、(d) 人口減少かつ温暖化シナリオ、(e) 人口減少シナリオと現状維持シナリオとの差分、(f) 温暖化シナリオと現状維持シナリオとの差分、(g) 人口減少かつ温暖化シナリオと現状維持シナリオとの差分（出典：Ohashi *et al.* 2016より改変）

(2) マツ枯れに関する気候変動影響評価と危険域の地図化

マツ枯れに関する文献^{2,3,4)}を調査した結果、マツ材線虫病に感染の可能性が高いマツ属樹種は、世界に生育するマツ属樹種121種のうち、21種類であった(表4.4.1)。よって、これら21樹種の分布情報をもとに、Critchfield and Little (1966)⁵⁾による世界のマツ属の分布図にもとづきGIS地図化した(図4.4.3)。

表4.4.1：マツ枯れに感受性の高いマツ属(*Pinus*)21種の学名および和名と、主な分布域(出典：Hirata *et al.* 2017より改変)

アジア	ヨーロッパ	北米
<i>P. koraiensis</i> (チョウセンゴヨウ)	<i>P. sylvestris</i> (ヨーロッパアカマツ)	<i>P. ponderosa</i> (ポンドローザマツ)
<i>P. densiflora</i> (アカマツ)	<i>P. mugo</i> (ムゴマツ)	<i>P. strobiformis</i> (ストローブマツ)
<i>P. parviflora</i> (ゴヨウマツ)	<i>P. pinaster</i> (フランスカイガンショウ)	<i>P. muricata</i> (ビショップマツ)
<i>P. thunbergii</i> (クロマツ)	<i>P. nigra</i> (ヨーロッパクロマツ)	<i>P. radiatas</i> (ラジアータマツ)
<i>P. luchuensis</i> (リュウキュウマツ)		<i>P. leiophylla</i> (レイオフィラマツ)
<i>P. massoniana</i> (バビショウ)		<i>P. engelmannii</i>
<i>P. yunnanensis</i> (ウンナンマツ)		<i>P. oocurpa</i> (オオカルパマツ)
<i>P. insularis</i> (カシヤマツ)		<i>P. hartwegii</i> (ルデイスマツ)
		<i>P. ayacahuite</i>



図4.4.3：マツ枯れ罹患率の高いマツ属21種類の自生分布域(黒色部分)。マツ属は、主に北半球に自生する樹木であり、感染リスクの高い種類はユーラシア大陸を中心に分布する(出典：Hirata *et al.* 2017)。

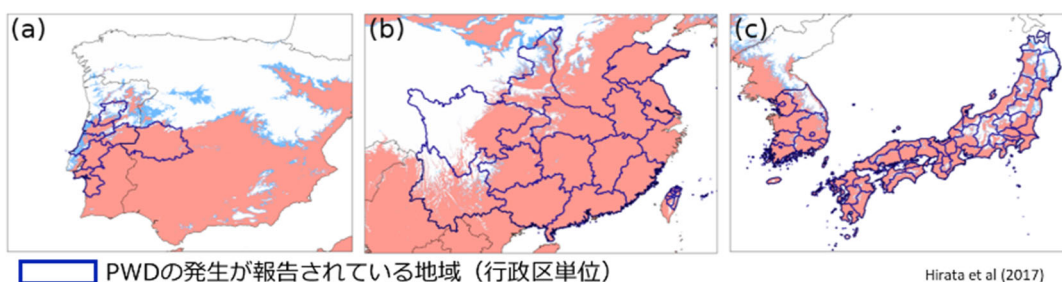


図4.4.4：現在のマツ枯れ被害の発生状況(青色の行政区)とMB指数が22以上の危険地域(ピンク色)との重なり(出典：Hirata *et al.* 2017より改変)。

気候変動によるマツ枯れ危険域の将来変化をMB指数により予測した結果、現在の気候条件下では、東アジアや南ヨーロッパの感受性マツ分布域がMB指数22以上のマツ枯れ危険域と判定された。これまでに、韓国、台湾、中国大陸、スペイン、ポルトガルなどで、マツ枯れの被害が報告されているが、被害発生地域はMB指数による評価においても、気候的危険域であることが示された(図4.4.4)。

さらにMB指数によって示されたマツ枯れ被害発生の危険域は、将来の気候変動にもなると東ヨーロッパ、中央アジア、極東ロシアにまで拡大すると予測された(図4.4.5 左)。特に将来の気温上昇量が大きいRCP8.5の場合は、ヨーロッパにおける広がりが顕著であった。

さらに、気候変動がマツの生育自体に影響を与える可能性を加味すると、マツ枯れ危険域は感受性マツ天然分布域の50%にまで拡大し、しかもその約40%はマツの分布に適さない気候条件になってしまう可能性が示された（図4.4.5 右）。図中の黒色に塗られた地域は、松枯れ危険域であると同時に、マツの分布には不適な気候条件になってしまうと予測された地域である。これらの地域では、マツは現在よりも厳しい気候条件におかれるため、生育条件の悪化にともなって生理機能が低下するなど、マツ枯れに対する脆弱性は高まる可能性がある。

現在も世界各地でマツ枯れ被害木の駆除（伐倒・燻蒸・焼却・破碎）や防除（薬剤空中散布・樹幹注入・樹種転換・抵抗性マツの植林・防除帯の設置など）が実行されているが、完全なる駆除は難しい。よって今後はマツ枯れ危険域の将来予測を参考にしながら、より重点的に守るべきマツ林をあらかじめ決めた上で防除を行うなどの適応策が必要になると考えられる。

以上のように本研究の結果は、マツ枯れ拡大の阻止に取り組んでいる国々にとって重要な基礎情報となるほか、気候変動にともなう被害拡大に警鐘を鳴らし、今後の被害防除にも役立てられる。

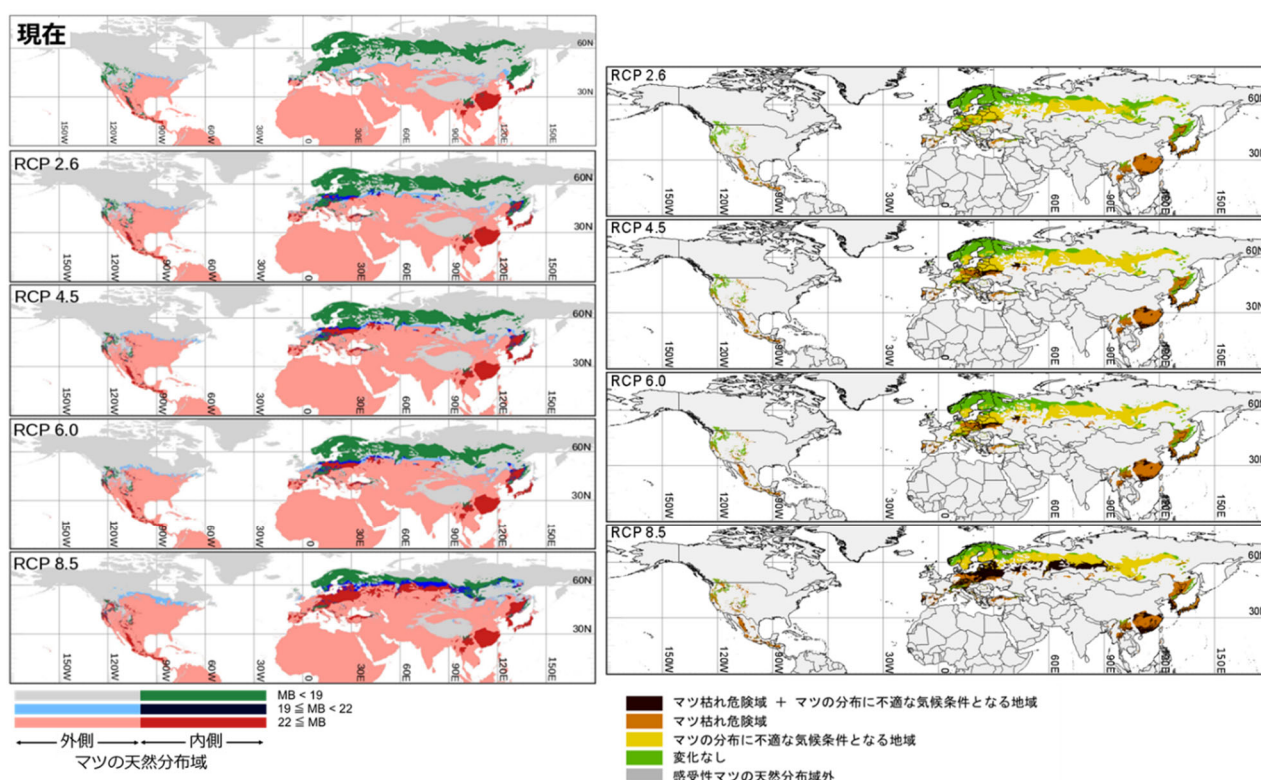


図4.4.5：MB指数によるマツ枯れ危険域の変化（左：2070年代）、およびマツ枯れ危険域（茶）、マツの分布に適さない気候条件（黄）、および両条件が重なる地域（黒）の分布（右：2070年代、RCP8.5の場合）。いずれも5つの気候モデル（GCM）の出力結果の平均値を使用した（出典：Hirata *et al.* 2017より改変）。

（3）ライチョウの潜在生育域の気候変動影響評価

解析の結果、ライチョウの生息環境は3つのタイプの高山植物群落バランス良く生育していることが重要であることがわかった。それらの群落が成立する環境条件として重要なのは、夏期と冬期の気温が低く、夏期降水量が少なく多雪であることが判明した。

将来、気候変動が進行した場合、全球気候モデル（GCMs）によってばらつきはあるものの、高山植生帯の成立する環境は今世紀末に現在の0.7%まで減少すると予測された（24個の

GCMsに基づく予測結果の中央値)。3つのタイプの高山植物群落の被覆率は、気候変動後は減少すると予測された。各群落の被覆率の減少度合いは、地形への依存度によって異なり、例えば雪田群落はハイマツ群落に比べてより顕著であることが示唆された。

上述の結果を用いて、現在と今世紀末のライチョウの潜在生息域を予測した結果、気候変動によってライチョウの生息に不可欠な高山植物群落の被覆率が減少することにより、今世紀末に現在の0.4%まで減少すると予測された（図4.4.6）。

本研究の結果、北アルプス中南部はライチョウ生息域のコアエリアであるにもかかわらず、気候変動による負の影響を強く受けることが示唆された。今後、人為的な移動補助も含めた効果的なライチョウ保全策を進めるためには、ライチョウの分布域全域を対象とした影響評価が急務と言える。

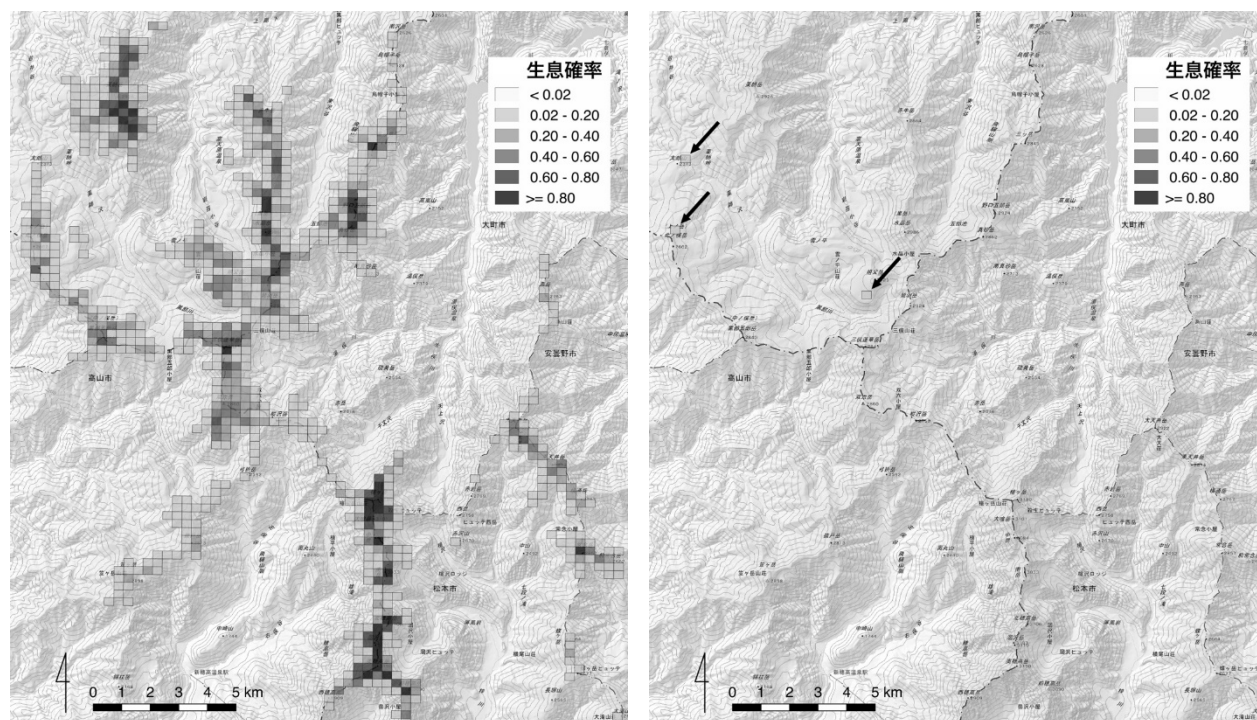


図4.4.6：「北アルプス中南部における、現在（左）と今世紀末（右）のライチョウの潜在生息域（生息確率が0.02以上のメッシュが該当）。今世紀末は24GCMsの予測結果の中央値で、矢印で示したメッシュが潜在生息域を示す。（出典：Hotta *et al.* 2019, 津山・堀田 2019より改変）

（4）生物多様性と気候変動緩和策との間のトレードオフやコベネフィットに関する評価

気候変動対策による大規模な土地変化が野生生物にもたらす負の影響を考慮したとしても、気候変動対策を積極的に進めて2℃目標を達成することにより、地球規模の生物多様性の損失を抑えられることが、将来シミュレーションの結果判明した（図4.4.7）。特に今世紀後半（2070年代以降）には、気候変動対策の効果が顕著に生物多様性保全に現れることが明らかになったものの、ヨーロッパでは大規模な土地利用の改変に伴う生物多様性損失の可能性が予測された。

結果の頑健性を調べるために、5つの共通社会経済経路（SSPs）、5つの全球気候モデル（GCMs）の情報を用いた感度解析を実施したところ、全てのケースにおいて上記の結果は支持された。複数の社会経済条件を用いた実験についてさらに詳細にみると、「持続可能シナリオ」で最も生物多様性の損失が少なく、「地域分断シナリオ」や「化石燃料依存シナリオ」といったシナリオでは損失が大きくなる傾向が確認された。これは、持続可能シナリオで想定されている、強い土地利用規制や食品ロスの削減等の持続可能な社会の構築に向けた取り組みが、野放図な農地の拡大を抑制し、結果として森林等の原

生的な自然環境の保全につながるためだと考えられた。この結果は、生物多様性保全と気候変動対策の同時達成には複数の分野にまたがった社会経済構造の変革が重要な役割を果たすことを示唆している。

本研究で開発した手法により、社会経済—土地利用—生物多様性の因果関係を世界規模で統合的に分析することが可能となった。この手法を用いて、さまざまな社会経済的条件が生物多様性に及ぼす直接的・間接的な影響を評価し、複数の持続可能な開発目標を達成するための方策を探索することが可能である。

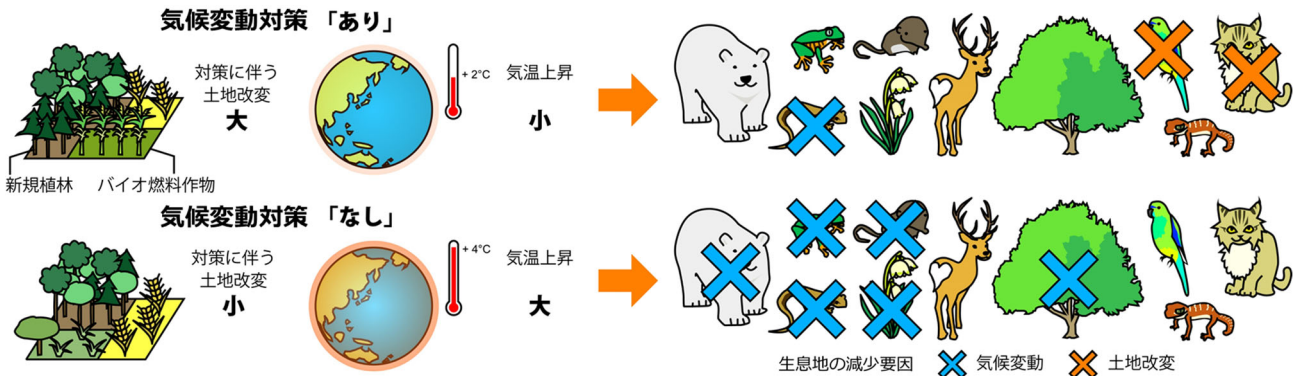


図4.4.7：生物多様性研究の概要。本研究では、気候変動対策「あり」と「なし」、それぞれの場合における将来の生物多様性保全の効果を比較した。その結果、気温上昇が抑えられる対策「あり」のケース（上）のほうが、大幅な気温上昇によって多くの生物種の生息地が失われる対策「なし」のケース（下）よりも、生物多様性保全効果が高いことが明らかとなった。

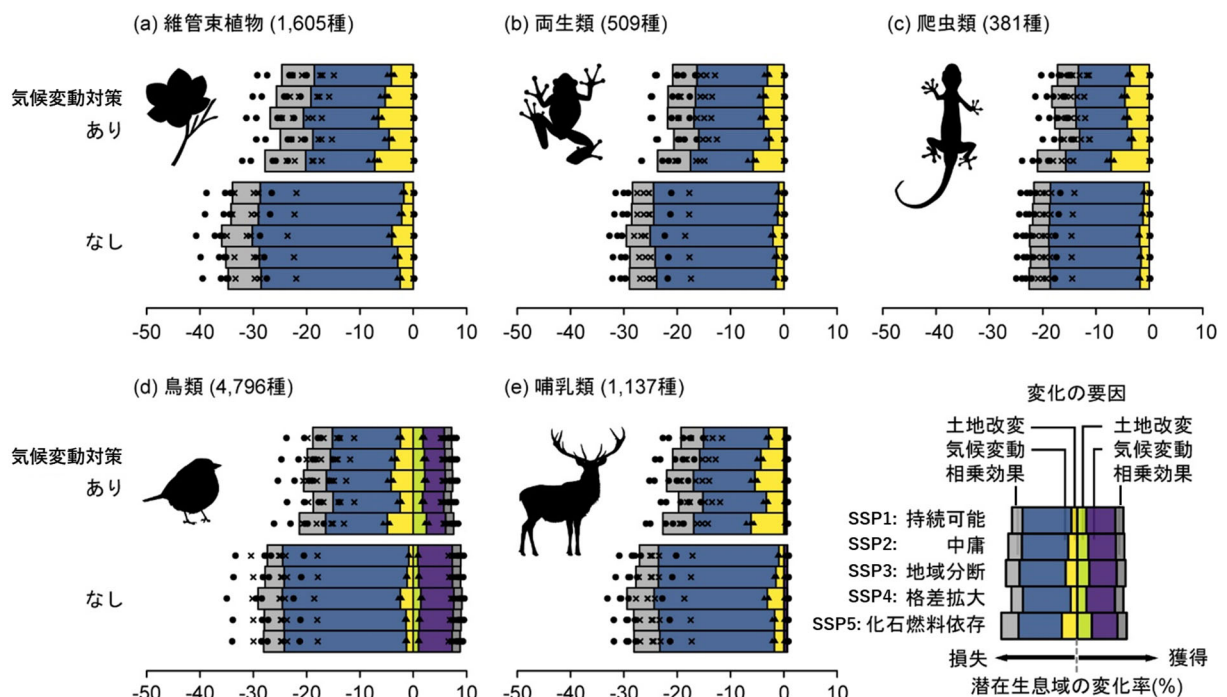


図4.4.8：生物多様性への影響予測結果：気候変動対策「あり」と「なし」それぞれのケースについて、5つの共通社会経済経路（SSPs）と5つの気候モデル（GCMs）のもとで予測した今世紀後半（2070年代）の生物分類群ごとの潜在生息域の変化割合（%）。バツ印、三角印、丸印はそれぞれ「気候変動のみ」「土地利用のみ」「両者の相乗効果」の出力値を気候変動対策「あり」「なし」ごと、SSPごとに示し、変化要因の寄与度を色分けして横棒グラフで示した。移動可能距離の大きい鳥類以外の分類群では潜在生息域が減少するが、いずれも減少の程度は気候変動対策「あり」の場合の方が「な

し」の場合よりも抑制される。（出典：Ohashi *et al.* 2019より改変）

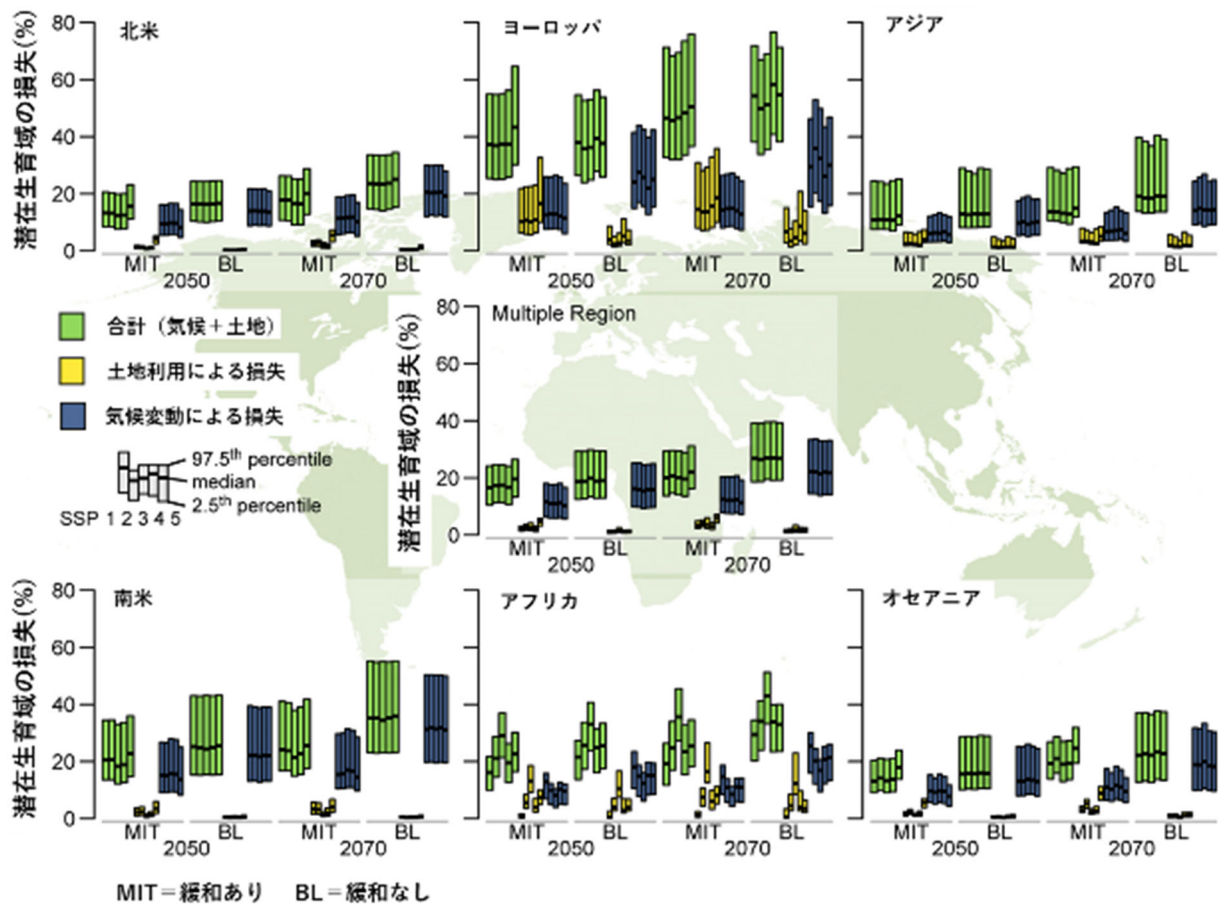


図4.4.9：地域別の生物多様性への影響予測結果：気候変動対策「あり」（MIT）と「なし」（BL）それぞれのケースの2050年代と2070年代について、潜在生息域の損失割合（%）を地域別に示した。ヨーロッパでは、気候変動対策「あり」のシナリオで土地利用による潜在生息域の損失割合が高く、土地利用と気候変動を合計した値も高い（出典：Ohashi *et al.* 2019より改変）

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- ・ニホンジカ（シカ）の分布を規定する要因について、気候要因と土地利用要因の両方が複合的に関係していることが明らかになった。そして気候変動のみならず、土地利用の変化をも考慮した、シカ分布域の将来変化の予測がはじめて可能となった。将来の居住地の縮小と積雪期間の短縮が、多雪地域・過疎地域へのシカの分布拡大を助長し、2103年にはシカの潜在生息域が国土の9割以上に拡大する可能性がはじめて予測された。
- ・生態系サービスに多大な負の影響を及ぼすマツ材線虫病（マツ枯れ）の、気候変動に伴う世界規模での発生危険域の拡大を、病害の発生リスクと宿主樹種の生育環境の脆弱性の両面から、定量的に予測することがはじめて可能となった。危険域は気候変動にともなって、今世紀末には東ヨーロッパ、中央アジア、極東ロシアにまで拡大する可能性が、はじめて定量的に示された。
- ・中部山岳高山帯のアイコンであり、絶滅危惧種でもあるニホンライチョウ（ライチョウ）の分布を、高山植生や地形などとの関係性にもとづき予測するモデルの構築に世界ではじめて成功した。これにより、将来の気候変動にもとづく潜在生息域の変化を高解像度で予測することが可能となった。
- ・気候変動緩和策においては、新規植林やバイオ燃料用作物栽培など土地改変が必要であるが、他方、

野生生物の生息環境は失われ、生物多様性が低下する可能性が指摘されてきた。そこで本研究では、パリ協定が目指す「2℃目標」の達成が世界の生物多様性保全にもたらす影響を、「気候変動そのものによる影響」と「気候変動対策に伴う土地改変による影響」の2つの側面から総合的に評価し、気温上昇を2℃以内に抑えることは生物多様性の損失を抑制する効果があることを明らかにした。

(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>

- ・ニホンジカの分布拡大に関する本研究の成果は、今後政府から公表される予定である「第2次気候変動影響評価報告書」などへの被引用を通じて、行政による野生動物影響評価モニタリング等の計画策定に活用されることが見込まれる。
- ・世界のマツ材線虫病危険域予測に関する本研究の成果は、今後のIPCCやIPBESの報告書などへの被引用を通じて、関係各国によるマツ枯れ被害対策の策定等に活用されることが見込まれる。
- ・ニホンライチョウの潜在生息域の将来変化に関する本研究の成果は、今後政府から公表される予定である「第2次気候変動影響評価報告書」などへの被引用を通じて、行政によるライチョウ保全策の策定等に活用されることが見込まれる。
- ・世界の生物多様性保全に関する本研究の成果は、今後のIPCCやIPBESの報告書などへの被引用を通じて、関係各国による気候変動対策や生物多様性保全策の策定等に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) Identifying long-term stable refugia for relict plant species in East Asia、東アジアの遺存植物の安定的生育地を特定する研究プロジェクト、Cindy Q. Tang 雲南大学・中華人民共和国、López-Pujol, Jordi・バルセロナ植物研究所・スペイン王国、Krestov, Pavel V.・ウラジオストク植物園・ロシア連邦ほか、全9カ国45名が協同してデータ収集、解析、論文執筆をおこなった（誌上発表、論文（査読あり）、9番目、Tang *et al.* 2018, Nature Communications）。S-14-2(4)からは松井哲哉と大橋春香が参加した。
- (2) East Asia Biodiversity Conservation Network (EABCN)、東アジア地域における植物を中心とする生物多様性保全を目指す研究機関のネットワークとして、東アジア5カ国の6研究所（ロシア科学アカデミー極東支部・植物園研究所（ウラジオストク）、中国応用生態研究所（瀋陽、シェンヤン）、華南植物園（南京）、モンゴル国立大学（ウランバートル）、韓国国立樹木園（ポチヨン）、日本の森林研究・整備機構森林総合研究所（つくば））が参加する機関で、2014年に韓国ピョンチャンで開催された生物多様性条約第12回締約国会議（CBD-COP12）において、了解覚書（MOU）が調印された。EABCNは東アジアの植物相の統合リスト作り、気候変動影響検出モニタリングなどの共同研究を開始するとともに、東アジアの植物の中で特に興味深いストーリーをもつ種を紹介する書籍「Important Plants of East Asia」の刊行を行ってきた（その他誌上発表、11～13番目）。また、2015年6月には、茨城県つくば市の国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所においてワークショップを開催し、各機関の実施している気候変動影響モニタリングが紹介され、気候変動影響検出についてさまざまな角度から議論がなされた。S-14-2(4)からは松井哲哉、中尾勝洋、大橋春香、田中信行が参加した。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) A. Hirata, Y. Kominami, T. Matsui and Y. Hijioka, *Journal of Agricultural Meteorology*, 76,(2020)
(<https://doi.org/10.2480/agrmet.D-19-00046>)
Evaluation of the estimation of shortwave solar radiation in Japan using the mountain microclimate simulation model.
- 2) H. Ohashi, T. Hasegawa, A. Hirata, S. Fujimori, K. Takahashi, I. Tsuyama, K. Nakao, Y. Kominami, N. Tanaka, Y. Hijioka and T. Matsui: *Nature Communications*, 10, 5240 (2019)
Biodiversity can benefit from climate stabilization despite adverse side effects of land-based mitigation.
- 3) M. Hotta, I. Tsuyama, K. Nakao, M. Ozeki, M. Higa, Y. Kominami, T. Hamada, T. Matsui, M. Yasuda and N. Tanaka: *BMC Ecology*, 19, 23 (2019)
Modeling future wildlife habitat suitability: serious climate change impacts on the potential distribution of the Rock Ptarmigan *Lagopus muta japonica* in Japan's northern Alps.
- 4) H. Ohashi, K. Fukasawa, T. Ariga, T. Matsui and Y. Hijioka: *Transactions in GIS*, 23, 786-804 (2019)
High-resolution national land use scenarios under a shrinking population in Japan.
- 5) H. Kim, I.M.D. Rosa, R. Alkemade, P. Leadley, G. Hurtt, A. Popp, D.P. Van Vuuren, P. Anthoni, A. Arneeth, D. Baisero, E. Caton, R. Chaplin-Kramer, L. Chini, A. De Palma, F. Di Fulvio, M. Di Marco, F. Espinoza, S. Ferrier, S. Fujimori, R.E. Gonzalez, M. Gueguen, C. Guerra, M. Harfoot, T.D. Harwood, T. Hasegawa, V. Haverd, P. Havlik, S. Hellweg, S.L.L. Hill, A. Hirata, A.J. Hoskins, J.H. Janse, W. Jetz, J.A. Johnson, A. Krause, D. Leclere, I.S. Martins, T. Matsui, C. Merow, M. Obersteiner, H. Ohashi, B. Poulter, A. Purvis, B. Quesada, C. Rondinini, A. Schipper, R. Sharp, K. Takahashi, W. Thuiller, N. Titeux, P. Visconti, C. Ware, F. Wolf and H.M. Pereira: *Geoscientific Model Development*, 11, 4537–4562 (2018)
A protocol for an intercomparison of biodiversity and ecosystem services models using harmonized land-use and climate scenarios.
- 6) T. Shitara, Y. Nakamura, T. Matsui, I. Tsuyama, H. Ohashi and T. Kamijo: *Plant Ecology*, 219, 1105-1115 (2018)
Formation of disjunct plant distributions in Northeast Asia: a case study of *Betula davurica* using a species distribution model.
- 7) J.H. Yun, K. Nakao, I. Tsuyama, T. Matsui, C.H. Park, B.Y. Lee and N. Tanaka: *Ecological Research*, (2018)
Vulnerability of subalpine fir species to climate change: using species distribution modeling to assess the future efficiency of current protected areas in the Korean Peninsula.
- 8) T. Matsui, K. Nakao, M. Higa, I. Tsuyama, Y. Kominami, T. Yagihashi, D. Koide and N. Tanaka: *Ecological Research*, 33, 289–302 (2018)
Potential impact of climate change on canopy tree species composition of cool-temperate forests in Japan using a multivariate classification tree model.
- 9) C.Q. Tang, T. Matsui, H. Ohashi, Y.F. Dong, A. Momohara, S. Herrando-Moraira, S. Qian, Y. Yang, M. Ohsawa, H.T. Luu, P.J. Grote, P.V. Krestov, L. Ben, M. Werger, K. Robertson, C. Hobohm, C.Y. Wang, M.C. Peng, X. Chen, H.C. Wang, W.H. Su, R. Zhou, S. Li, L.Y. He, K. Yan, M.Y. Zhu, J. Hu, R.H. Yang, W.J. Li, M. Tomita, Z.L. Wu, H.Z. Yan, G.F. Zhang, H. He, S.R. Yi, H. Gong, K. Song, D. Song, X.S. Li, Z.Y. Zhang, P.B. Han, L.Q. Shen, D.S. Huang, K. Luo and J. López-Pujol: *Nature Communications*, 9, 4488 (2018)
Identifying long-term stable refugia for relict plant species in East Asia.
- 10) 大橋春香、深澤圭太、有賀敏典、松井哲哉、肱岡靖明: *野生生物と社会*, 5, 41-46 (2017)
人口減少社会に向けたシナリオアプローチ
- 11) A. Hirata, K. Nakamura, K. Nakao, Y. Kominami, N. Tanaka, H. Ohashi, T.K. Takano, W. Takeuchi and T. Matsui: *PLOS ONE*, 12, e0182837 (2017)

Potential distributions of pine wilt disease under future climate change scenarios.

- 12) 中園悦子、田中信行： 関東森林研究, 67-1, 1-4(2016)
空中写真判読による紫尾山常緑広葉樹の33年間の林冠変化
- 13) 田中信行、井関智裕、北村系子、斎藤均、津山幾太郎、中尾勝洋、松井哲哉： 森林立地, 58, 9-15 (2016)
北海道におけるブナの潜在生育域と分布北限個体群の実態
- 14) WJ. Li, MC. Peng, M. Higa, N. Tanaka, T. Matsui, CQ. Tang, XK. Ou, RW. Zhou, CY. Wang and HZ. Yan: Journal of Mountain Science, 13, 8, 1411-1422 (2016)
Effects of climate change on potential habitats of the cold temperate coniferous forest in Yunnan Province, southwestern China.
- 15) C.Q. Tang, Y.-F. Dong, S. Herrando-Moraira, T. Matsui, H. Ohashi, L.-Y. He, K. Nakao, N. Tanaka, M. Tomita, X.-S. Li, H.-Z. Yan, M.-C. Peng, J. Hu, R.-H. Yang, W.-J. Li, K. Yan, X. Hou, Z.-Y. Zhang and J. López-Pujol: Scientific Reports, 1-18 (2017)
Potential effects of climate change on geographic distribution of the tertiary relict tree species *Davidia involucrata* in China.
- 16) H. Ohashi, Y. Kominami, M. Higa, D. Koide, K. Nakao, I. Tsuyama, T. Matsui and N. Tanaka: Ecology and Evolution, 6, 7763-7775 (2016)
Land abandonment and changes in snow cover period accelerate range expansions of sika deer.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 中尾勝洋(2019) 森林と地球環境変動(共立出版) 第6章:149-167
「地球温暖化に伴う植生帯の移動」
- 2) 松井哲哉、平田晶子、グリーンエージ、45, 4-6. (2018)
「気候変動に伴うマツ材線虫病の世界的な拡大の危険性」
- 3) 松井哲哉、みどりのこえ、55, 1 (2017)
「マツ枯れ被害と温暖化影響」
- 4) 松井哲哉、季刊森林総研, 37, 16-17 (2017)
「温暖化でブナ林はどのようにかわるのか」
- 5) 松井哲哉、田中信行、津山幾太郎、生物の科学 遺伝, 72, 70-78 (2018)
「日本の寒帯・亜寒帯性針葉樹の分布と気候変動影響」
- 6) 松井哲哉、グリーンエージ、44, 4-7 (2017)
「日本列島の森林生態系と気候変動」
- 7) 田中信行、海外の森林と林業、95, 38-42 (2016)
「東アジアにおける気候変化の植物への影響検出モニタリングに関するワークショップ」
- 8) 松井哲哉、中尾勝洋、津山幾太郎、比嘉基紀、大丸裕武、小南裕志、大橋春香、安田正次、中園悦子、小出大、田中信行、日本不動産学会誌、29, 52-58 (2015)
「気候変動が天然林の潜在生育域に与える影響の評価と温暖化適応策」
- 9) 松井哲哉、田中信行、中尾勝洋、小出大、埴田宏、地図でわかる樹木の種苗移動ガイドライン、文一総合出版、25-34 (2015)
「種苗用樹木分布図」
- 10) 津山幾太郎、中尾勝洋、松井哲哉、田中信行：北海道の林木育種、58, 1, 7-12 (2015)
「気候変動と針葉樹の分布」
- 11) East Asia Biodiversity Conservation Network (EABCN) : Important Plants of East Asia II, 134-135 (2015)
“*Pinus densiflora* Siebold & Zucc.” (T. MATSUI and K. NAKAMURA)
- 12) East Asia Biodiversity Conservation Network (EABCN) : Important Plants of East Asia II, 138-139, (2015)

“*Pinus pumila* (Pall.) Regel” (T. MATSUI)

- 13) East Asia Biodiversity Conservation Network (EABCN) : Important Plants of East Asia II, 136-137, (2015)

“*Pinus parviflora* Siebold & Zucc.” (T. MATSUI)

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 平田晶子、小南裕志、大橋春香、松井哲哉、脇岡靖明：日本生態学会大会名古屋大会 (2020)
「気候変動下で全球の森林分布可能域はどのように変動するか」
- 2) 津山幾太郎、松井哲哉：日本生態学会名古屋大会 (2020)
「ニホンライチョウの潜在生息域から見た分布変遷と脆弱性評価」
- 3) 大橋春香、長谷川知子、平田晶子、藤森真一郎、高橋潔、津山幾太郎、中尾勝洋、小南裕志、田中信行、脇岡靖明、松井哲哉：日本生態学会大会名古屋大会講演要旨集 (2019)
「生物多様性保全と気候変動緩和をどのように両立するか：種分布モデルを用いた全球解析」
- 4) T. Matsui : Finland-Japan Joint Seminar in 2019 at Kagoshima University. Kagoshima, Japan, 2019
“Natural forest vegetation in Japan and studies on climate change impact assessment”
- 5) H. Ohashi, Y. Kominami, M. Higa, D. Koide, K. Nakao, I. Tsuyama, T. Matsui, N. Tanaka : Finland-Japan Joint Seminar in 2019 at Kagoshima University. Kagoshima, Japan, 2019
“Habitat of sika deer expanded by global warming”
- 6) S. Fujiori, K. Takahashi, H. Dai, T. Hasegawa, J.Y. Liu, T. Matsui, H. Ohashi, Y. Xie: Annual Meeting of the IAMC 2019 (Integrated Assessment Modeling Consortium), 2019
“Exploring the Implications of Asian Climate Change Mitigation Actions to Sustainable Development Goals.”
- 7) D. Leclère, M. Obersteiner, M. Barrett, S.H.M. Butchart, A. Chaudhary, A. De Palma, F.A.J. Declerck, M. Di Marco, J.C. Doelman, M. Durauer, R. Freeman, M. Harfoot, T. Hasegawa, S. Hellweg, J.P. Hilbers, S.L.L. Hill, F. Humpenöder, N. Jennings, T. Krisztin, G.M. Mace, H. Ohashi, A. Popp, A. Purvis, A.M. Schipper, A. Tabeau, H. Valin, H. Van Meijl, W.J. Van Zeist, P. Visconti, R. Alkemade, R. Almond, G. Bunting, N.D. Burgess, S.E. Cornell, F. Di Fulvio, S. Ferrier, S. Fritz, S. Fujimori, M. Grooten, T. Harwood, P. Havlík, M. Herrero, A.J. Hoskins, T. Kram, H. Lotze-Campen, T. Matsui, C. Meyer, D. Nel, T. Newbold, G. Schmidt-Traub, E. Stehfest, B. Strassburg, D.P. Van Vuuren, C. Ware, J.E.M. Watson, W. Wu and L. Young: World Biodiversity Forum 2020, Davos, Switzerland, 2020
"Reversing Terrestrial Biodiversity Declines Due To Habitat Loss: A Model Ensemble Approach"
- 8) 大橋春香、長谷川知子、平田晶子、藤森真一郎、高橋潔、津山幾太郎、中尾勝洋、小南裕志、田中信行、脇岡靖明、松井哲哉：日本生態学会神戸大会(2019)
「気候変動緩和策は土地改変による負の影響を差し引いても生物多様性保全に貢献しうる」
- 9) 平田晶子、小南裕志、松井哲哉、脇岡靖明：日本森林学会新潟大会(2019)
「気候変動にともなう全球スケールでの森林分布域の変化予測」
- 10) 平田晶子、小南裕志、比嘉基紀、松井哲哉、脇岡靖明：日本生態学会神戸大会(2019)
「拡散モデルを用いた気候変動にともなうマツ材線虫病の全球拡大予測」
- 11) 米倉佑亮、大橋春香、西嶋翔太、平田晶子、夏川遼生、松井哲哉、松田裕之：日本生態学会神戸大会(2019)
「全球スケールでの気候変動による鳥類の絶滅リスク」
- 12) 黒江美紗子、大橋春香、田中竜太、松井哲哉：日本生態学会神戸大会(2019)
「積雪深度が変えるニホンジカの冬季生息地選択」
- 13) 黒江美紗子、大橋春香、田中竜太、松井哲哉：哺乳類学会2018年度大会伊那(2019)
「積雪地におけるニホンジカの冬季生息場所特性」
- 14) T. Matsui, K. Nakao, M. Higa, I. Tsuyama, Y. Kominami, T. Yagihashi, D. Koide and N. Tanaka: 11th International Beech Symposium. Viterbo, Italy, 2018

"Potential impact of climate change on canopy tree species composition of beech forests in Japan"

15) A. Kavgaci, H. Ohashi, T.K. Takano, A. Hirata, M. Arslan, N. Tanaka and T. Matsui: International Beech Symposium, Viterbo, Italy, 2018

"Modeling the potential habitat distribution of Fagus orientalis forests under current and past climate conditions"

16) I. Tsuyama, M. Hotta, K. Nakao, M. Ozeki, M. Higa, Y. Kominami, T. Hamada, T. Matsui, M. Yasuda and N. Tanaka: International Grouse Symposium, Logan, Utah, USA, 2018

"Climate change impact assessment on the southern limit populations of the rock ptarmigan, Lagopus muta japonica."

17) M. Hotta, M. Higa, I. Tsuyama, K. Takano, M. Ozeki, K. Nakao, T. Matsui and K. Hatanaka: International Grouse Symposium, Logan, Utah, USA, 2018

"Characteristics of the ptarmigan data observed by trekkers"

18) N. Tanaka, K. Kitamura and T. Matsui: The Annual Symposium of the International Association for Vegetation Science (IAVS), Montana, USA, 2018

"Climate change impact on potential habitats of buna (Fagus crenata) and a current migration process in the northernmost population in Japan"

19) J.Y. Takakura, W. Wu, T. Hasegawa, H. Ohashi, N. Hanasaki, T. Matsui, S. Fujimori, T. Masui and K. Takahashi: Workshop on multi-sector energy and environmental dynamics, Snowmass, USA, 2018

"Environmental Policies for Biodiversity/soil Conservation and Their Effects on Bioenergy Potentials"

20) T. Shitara, Y. Nakamura, T. Matsui, I. Tsuyama, H. Ohashi and T. Kamijo: International Association for Vegetation Science 61st Annual Symposium, Bozeman, Montana, USA, 2018

"How did disjunct distributions form during the Quaternary climate change in Northeast Asia? - A case study of Betula davurica Pall. using a species distribution model-"

21) M. Higa, T. Matsui, K. Nakao, N. Tanaka and Z. Wang: 2018 International Association for Vegetation Science 61st Annual Symposium, Bozeman, Montana, USA, 2018

"Factors determining distributions of the vegetation boundary between evergreen and deciduous broad leaved forests in eastern Asia"

22) 堀田昌伸、比嘉基紀、津山幾太郎、高野宏平、尾関雅章、中尾勝洋、松井哲哉、竹内祥生、畑中健一郎: 日本生態学会第65回全国大会札幌 (2018)

「山小屋や登山者によるライチョウの生息状況把握」

23) H. Ohashi, T. Hasegawa, A. Hirata, S. Fujimori, K. Takahashi, I. Tsuyama, K. Nakao, Y. Kominami, N. Tanaka, Y. Hijioka and T. Matsui: AIM International Workshop, Tsukuba, 2018

"Biodiversity can benefit from long-term climate mitigation regardless of land-based measures"

24) 湯龍龍、大橋春香、松井哲哉、田中信行、伊坪徳宏: 日本LCA学会研究発表会(2018)

「陸生生物種を対象とした気候変動による生物多様性影響評価手法開発」

25) 堀田昌伸、高野宏平、津山幾太郎、比嘉基紀、尾関雅章、中尾勝洋、松井哲哉、畑中健一郎: 日本鳥学会2017年度大会、筑波大学 (2017)

「登山者情報をもとにしたライチョウの生息状況把握の有効性」

26) T. Matsui, T. Yagihashi, K. Nakao, I. Tsuyama, M. Higa and N. Tanaka: Open Seminar at Beijing University, China, 2017

Climate change impact on Fagus crenata forests and adaptation measures.

27) K. Nakao, I. Tsuyama, T. Matsui and M. Higa: 2017 ESA Annual Meeting, Portland, OR, USA, 2017

"Assessing the limits of protected areas relocations as climate change adaptive options for conserving Japanese tree species under three RCPs"

28) I. Tsuyama, M. Higa, K. Nakao, T. Matsui, M. Horikawa and N. Tanaka: IBC2017, ShenZhen, China, 2017

"How will subalpine conifer distributions be affected by climate change in Japan?"

29) K. Nakao, M. Higa, I. Tsuyama, C.T. Lin, C.R. Chiou, T.Y. Chen, T. Matsui and N. Tanaka: IBC2017, ShenZhen, China, 2017

"Climate change impact on the potential habitats of dominant evergreen broad-leaved tree species in the Taiwan-Japan archipelago"

30) 福井俊介、上條隆志、設楽拓人、松井哲哉: 植生学会第22回大会 (2017)

「チョウセンゴヨウの過去の分布変遷と将来の脆弱性評価」

31) 堀田昌伸、高野宏平、津山幾太郎、比嘉基紀、尾関雅章、中尾勝洋、松井哲哉、畑中健一郎: 日本鳥学会2017年度大会、筑波 2017

「登山者情報をもとにしたライチョウの生息状況把握の有効性」

32) 湯龍龍、大橋春香、松井哲哉、田中信行、伊坪徳宏: 第12回日本LCA学会研究発表会(2017)

「植物を対象としたCO2の生物種絶滅リスク係数の開発」

33) 田中信行、北村系子、津山幾太郎、中尾勝洋、松井哲哉、井関智裕、斎藤均: 第64回日本生態学会大会(2017)

「ブナの潜在生育域の気候条件と分布北限個体群の実態」

34) 大橋春香、米倉佑亮、平田晶子、高野宏平、西嶋翔太、松井哲哉: 第64回日本生態学会大会 (2017)

「気候変動が全球スケールでの生物の絶滅リスクに及ぼす影響:緩和策の効果と副作用の評価」

35) 大橋春香、松井哲哉、小泉透: 第128回日本森林学会大会 (2017)

「森林生態系多様性基礎調査データを用いたニホンジカによる森林への影響評価」

36) 松井哲哉、平田晶子、中尾勝洋、小南裕志、田中信行、大橋春香、高野宏平、竹内渉、中村克典: 第64回日本生態学会大会 (2017)

「気候変動によりマツ材線虫病リスク域は全球スケールで拡大するか？」

37) 松井哲哉: 日本生態学会第64回全国大会 (2017)

「日本の植生関連の種分布予測モデル研究の流れと展望」

38) 津山幾太郎: 日本生態学会第64回全国大会(2017)

「コマツガの分布を規定する要因は何か? ~第四紀氷期の気候が現在の分布域に及ぼす影響~」

39) 中尾勝洋: 日本生態学会第64回全国大会 (2017)

「常緑広葉樹の分布限界を決める気候、地史、人為~種分布モデルから見えてきたもの」

40) 小南祐志、大橋春香、津山幾太郎、松井哲哉、平田晶子、田中信行: 雪氷研究大会 (2017)

「粘性圧縮モデルによる温暖化時の広域積雪深推定と生態系影響評価」

41) 福井俊介、上條隆志、松井哲哉: 植生学会第21回大会 (2016)

「気候特性と松枯れから見たゴヨウマツ分布域の脆弱性評価」

42) N. Tanaka and T. Matsui: 7th EAFES international congress, Daegu, Korea (2016)

"Initiative on establishing vegetation monitoring in response to climate change in East Asia"

43) 津山幾太郎: 札幌大学・森林総合研究所合同講座発表 (2016)

「気候変化と植物の分布」

44) D. Koide, M. Higa, K. Nakao, H. Ohashi, I. Tsuyama, T. Matsui and N. Tanaka: 7th EAFES international congress, Daegu-Korea (2016)

"Spatiotemporal projection of suitable climatic conditions for tree regeneration and growth using niche differences between adult and juvenile trees"

45) T. Matsui, A. Hirata, K. Nakao, H. Ohashi, N. Tanaka and K. Nakamura: 7th EAFES international congress, Daegu, Korea (2016)

"Predicting pine wilt disease spreading under the climate change in East Asia"

46) T. Matsui, K. Nakao, E. Nakazono, I. Tsuyama, M. Higa, D. Koide, Y. Kominami and N. Tanaka: 7th EAFES international congress, Daegu, Korea (2016)

"Climate change impact assessment, monitoring and adaptation plans for Japanese natural forests"

47) T. Matsui : Japan-Korea International Workshop 2016, Climate Impact and Economic Assessment Considering Uncertainty, 2016

"Climate change impact assessment studies on Japanese natural forests"

48) 小出大、比嘉基紀、中尾勝洋、大橋春香、津山幾太郎、松井哲哉、田中信行：日本生態学会63回大会（2016）

「ブナにおける稚樹と親木のハビタットの違いに基づく更新適域の時空間変動予測」

49) 松井哲哉、中尾勝洋、中村克典、大橋春香、田中信行：第127回日本森林学会大会（2016）

「温暖化シナリオによるマツ材線虫病被害リスク地図化の試み」

50) H. Ohashi, Y. Kominami, M. Higa, D. Koide, K. Nakao, I. Tsuyama, T. Matsui, N. Tanaka : The 5th International Wildlife Management Congress (2015)

"Combined effect of land use and climate change may accelerate range expansion of sika deer in Japan"

51) H. Ohashi, Y. Kominami, M. Higa, D. Koide, K. Nakao, I. Tsuyama, T. Matsui, N. Tanaka : 国際シンポジウム「気候変動と生物のレンジシフト」(2015)

"Additive effect of climate change and land abandonment may accelerate range expansions of Sika deer"

52) K. Takahashi, I. Takayabu, N. Ishizaki, H. Shioyama, T. Matsui, N. Tanaka, S. Emori : IPCC Workshop on Regional Climate Projections and their Use in Impacts and Risk Analysis Studies (2015)

"Projection of potential habitats for beech (Fagus crenata) forests in Japan considering three different dynamic downscaling scenarios"

53) 田中信行：植物生理国際ワークショップ（2015）

「温暖化と森林への影響評価」

54) 大橋春香、深澤圭太、有賀敏典、肱岡靖明、松井哲哉：野生生物と社会学会第21回大会（2015）

「集中か？分散か？将来の人口の空間分布が日本の土地利用に及ぼす影響を予測する～野生動物と人間の軋轢問題の解消に向けて」

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 2018 GEOWeek 「Risk assessment of pine wilt disease under future climate change scenarios」(2018年10月29-30日、参加者500名以上)の日本ブースにおけるポスター発表
- 2) 森林研究・整備機構 森林総合研究所一般公開「マツ枯れ温暖化リスク域に関する成果の紹介」(2018年7月28日、参加者約数百名)
- 3) 筑波大学公開講座「森林の多様性とその恵み」(主催：筑波大学、2017年1月29日、筑波大学東京キャンパス文京校舎、観客約40名)にて講演
- 4) 札幌大学・森林総合研究所合同講座発表(2016年12月13日)「気候変化と植物の分布」(参加者72名)
- 5) 筑波大学自然保護寄附講座公開講座「温暖化による日本の森林への影響：とくにブナ林分布への影響について」(主催：筑波大学大学院、2016年11月27日、つくば国際会議場、参加者約30名)
- 6) 第14回環境研究シンポジウム(レジリエントな社会・国土を創る環境研究)において発表「過疎と温暖化の進行がシカの分布拡大を促進する」(2016年11月22日、参加者数百名)
- 7) 山と自然のサイエンスカフェ@信州「温暖化で信州の森はどう変わるか」(2016年5月20日、ステーションビルMIDORI長野3F)「りんごのひろば」、参加者約40名)
- 8) 生態系における地球温暖化研究を適応策の実装化につなげる(2016年3月21日、日本生態学会第63回大会行事。仙台国際センター、観客約70名)

- 9) 筑波大学自然保護寄附講座公開講座「温暖化による日本の森林への影響：とくにブナ林分布への影響について」（主催：筑波大学大学院、2015年12月5日、参加者約40名）
- 10) グリーン・パワー（森林文化協会）、「北限ブナ、ニセコ山系で「北進中」の新たな個体群を発見」（2015年5月号、取材協力）

（5）マスコミ等への公表・報道等

- 1) 毎日新聞（2020年2月19日、全国版、15頁、「+2℃の世界 ニホンジカ生息域拡大に対策」）
- 2) 大学ジャーナルONLINE（電子版）（2019年12月12日、「温暖化対策で本当に生物多様性は失われるか 世界規模で比較」）
- 3) 農業協同組合新聞（電子版）（2019年12月26日、「生物多様性保全と温暖化対策は両立できる 森林総研などが予測」）
- 4) プレスリリース（2019年12月3日、森林研究・整備機構森林総合研究所、国立環境研究所、立命館大学、京都大学、東京農業大学）「生物多様性保全と温暖化対策は両立できる — 生物多様性の損失は気候安定化の努力で抑えられる —」
- 5) 産経WEB（2019年7月15日、「ライチョウ、今世紀末にも絶滅 北アルプス、温暖化の影響で」）
- 6) 読売新聞オンライン（2019年7月11日、「ライチョウ、今世紀末に絶滅の恐れ・・・温暖化影響」）
- 7) 長野日報（2019年7月11日、「北アのライチョウ 温暖化で絶滅危機」）
- 8) 毎日新聞（2019年7月11日、「北アのライチョウ、絶滅危機 今世紀末、温暖化の影響」）
- 9) プレスリリース（2019年7月10日、長野県環境保全研究所、森林総合研究所、高知大学、アジア航測、東京農業大学）「ニホンライチョウ、温暖化で絶滅の危機 ～北アルプスでニホンライチョウの生息に適した環境は今世紀末にほぼ消失のおそれ～」
- 10) 信濃毎日新聞（信毎Web）（2019年7月10日、「北アルプスのライチョウ絶滅の危機 今世紀末、温暖化の影響」）
- 11) JIJI PRESS（2019年7月10日、「Rock Ptarmigan's habitat seen disappearing in Japan's North Alps」）
- 12) 日本経済新聞（2019年7月10日、「北アのライチョウ絶滅危機 今世紀末、温暖化の影響」）
- 13) 静岡新聞（2019年7月10日、「北アルプスのライチョウ絶滅危機 今世紀末、温暖化の影響」）
- 14) 神戸新聞（2019年7月10日、「北アルプスのライチョウ絶滅危機 今世紀末、温暖化の影響」）
- 15) 財経新聞（電子版）（2018年10月29日、「イチョウのような生きた化石たちはどう生き延びたのか、千葉大などの研究」）
- 16) プレスリリース（2018年10月26日、千葉大学、森林総合研究所、東京農業大学、東京情報大学、「東アジアには「生きた化石」が気候変動を生き延びられる安定した逃避場所があった」
<https://www.ffpri.affrc.go.jp/press/2018/20181026/index.html>）
- 17) NHKニュースおはよう日本（2017年11月20日朝7時台、シカの10分程度の特集の中で、分布予測成果の図が1分ほど紹介された）

（6）その他

- 1) 大橋春香、深澤圭太、有賀敏典、松井哲哉、肱岡靖明：森林総合研究所研究最前線 2019「将来の人口減少で森林の分布はどう変わるか」
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/research/saizensen/2019/20190708-02.html>（2019年7月）
- 2) 平田晶子、中村克典、中尾勝洋、小南裕志、田中信行、大橋春香、高野宏平、竹内渉、松井哲哉：森林総合研究所研究最前線 2017「気候変動によりマツ材線虫病の危険域は世界的に拡大する」
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/research/saizensen/2017/20170911-01.html>（2017年9月）
- 3) 大橋春香、小南裕志、比嘉基紀、小出大、中尾勝洋、津山幾太郎、松井哲哉、田中信行：森林総合研究所研究最前線 2016「過疎と温暖化の進行がシカの分布拡大を促進する」

<http://www.ffpri.affrc.go.jp/research/saizensen/2016/20161013-20161001.html>. (2016年10月)

8. 引用文献

- 1) 花崎直太、高橋潔、肱岡靖明：環境科学会誌、25, 223-236 (2012)
日本の温暖化影響・適応策評価のための気候・社会経済シナリオ
- 2) 中村克典、田畑勝洋：樹木医の手引き 第4版、日本緑化センター, 353-421 (2014)
松くい虫（マツ材線虫病）の診断と防除
- 3) H. Evans, D. McNamara, H. Braasch, J. Chadoeuf, C. Magnusson: EPPO Bulletin.26, 199–249 (1996)
Pest Risk Analysis (PRA) for the territories of the European Union (as PRA area) on *Bursaphelenchus xylophilus* and its vectors in the genus *Monochamus*.
- 4) Y. Mamiya: Annual Review of Phytopathology, 21, 201–220, (1983)
Pathology of the pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus*.
- 5) W. Critchfield, E.J. Little: US Department of Agriculture, Forest Service (1966)
Geographic distribution of the pines of the world.; 1966.

II-5 沿岸生態系の緩和・適応策の経済評価

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所
港湾空港技術研究所

桑江 朝比呂
茂木 博匡
渡辺 謙太
伴野 雅之
中川 康之
栗山 善昭
所 立樹
棚谷 灯子
田村 仁
相馬 明郎

大阪市立大学大学院 工学研究科 都市系専攻

平成27年度～令和元年度研究経費（累計額）：64,696千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成27年度：14,380千円，平成28年度：13,662千円，平成29年度：8,686千円，平成30年度：13,754千円，令和元年度：14,213千円）

【要旨】

海洋生物によって取り込まれた炭素（ブルーカーボン）の隔離・貯留など、気候変動の緩和効果において生態系の活用が期待されている。また近年では高波浪や海面上昇などによる沿岸部での被害にも懸念が持たれており、維持管理コストが安価な自然資本（グリーンインフラ）の活用も注目されている。しかし、沿岸浅海域は物理・生物・化学的にも複雑に構成される海域であり、そこでの応答は非線形かつ不確実性が大きい。そこでプロセスベースの動態モデルの活用が必要不可欠であるが、これまでに緩和・適応の両方に焦点を当てたモデルは開発されていないことが現状である。また、緩和・適応において生態系がもたらす効果を金銭換算するには、社会経済モデルとの結合も必須となる。そこで本研究では浅海生態系（サンゴ生息域、海草藻場、海藻藻場、塩性湿地、マングローブ）における将来の緩和・適応効果を全球スケールで予測できるプロセスベースの動態モデルを開発し、それら生態系がもたらす緩和・適応効果を定量化し、さらには社会経済動態モデルとのカップリングによってその効果の金銭換算を行った。その結果、浅海生態系の全球分布面積の将来予測については、サンゴ生息域が大幅に消失するものの、海藻藻場をはじめ他の生態系の面積は大きく変化せず気候変動に適応する可能性が示された。浅海生態系のCO₂吸収については、RCP2.6からRCP8.5へと緩和策が弱くなるにつれて、水温上昇により浅海生態系におけるCO₂吸収速度が顕著に減少し、2100年にはRCP8.5において10億トン(CO₂/年)減少する予測となった。よって、浅海生態系によるCO₂吸収速度を維持するためには、生態系の分布面積の消失を抑えるだけでなく、厳しい緩和策によって温度上昇を抑えることも重要となる可能性がある。波浪減衰・地形変化においては、主要な生態系が全て存在する複合型のエリアでは、リーフの存在によって沖合から伝播する波高は大幅に減少するが、海岸浸食と海面上昇の影響によって汀線が数百メートル以上後退する可能性が示された。最後に、浅海生態系の緩和策の経済評価において、社会経済モデルとの結合でCO₂吸収速度を金銭換算した結果、RCP2.6における炭素削減費用が最も高騰する場合に、吸収された炭素に大きな価値（1,000億[USD/年]以上）が生じる可能性が示された。

【キーワード】

プロセスベースの数理動態モデル，生態系モデル，波浪減衰・地形変化モデル，生態系面積変化モデル，社会経済モデル

1. はじめに

海洋生物による炭素の隔離・貯留（ブルーカーボン）など、気候変動の緩和効果において生態系の活用が期待が持たれている。中でも、海岸線から水深およそ100mまでの沿岸浅海域は全海洋域の僅か0.2%にも関わらず、そこに分布する海草藻場、海藻藻場、塩性湿地、マングローブなどの浅海生態系は海洋内の炭素貯留速度の73～79%を占めている^{1),2),3)}。また、これらの浅海生態系を陸域の生態系と比較してみると、面積は極めて小さいが、単位面積当たりの炭素貯留速度が極めて大きいことから、全球の炭素貯留速度においてはマングローブ（23TgC/年）や海草藻場（18TgC/年）は陸域の温帯湿地（20TgC/年）に匹敵する⁴⁾。よって、海洋生態系の中でも浅海生態系による気候変動の緩和効果は、特に期待できる可能性がある。

また近年では低気圧の大型化や頻発化から、高波浪などによる沿岸部での被害にも懸念が持たれており、このような極端気象の発生頻度は今後の気候変動の進捗によっては増大する可能性もある。さらに、海面上昇が加わることで、その被害は将来的により甚大なものになる可能性もある。また、今後十分に緩和策を進めても、今日までに放出された温室効果ガスによって気候変動が進行し、そこから生じる影響も無視できないものとなりうる。よって、緩和策と共に気候変動に伴う環境変化への適応策も重要なものとなる。沿岸域の防災・減災において、堤防や護岸などの人工資本（グレーインフラ）の効果は高いが、将来を見据えた長期の維持管理を考慮すると、経済的な負担が大きいという欠点が生じる。そこで現在注目されているのが浅海生態系を含む自然資本（グリーンインフラ）である。防災・減災効果ではグレーインフラに劣る可能性があるが、自然回復力を有することから維持管理コストが安価であり、さらには気候変動緩和効果や生態系内での懸濁物質の堆積やサンゴの成長による海面上昇のオフセット効果などの多機能性も充実している⁵⁾。よって、気候変動適応策においても浅海生態系の効果は期待できる可能性がある。

しかし、沿岸浅海域は物理・生物・化学的にも複雑に構成される海域であり、そこでの応答は非線形であり、不確実性も大きなものとなる。そこで最適手法の一つとして挙げられるのがプロセススペースの動態モデルであるが、これまでに緩和・適応の両方に焦点を当てたモデルは開発されていないことが現状である。また、緩和・適応において生態系がもたらす効果を金銭換算するには、社会経済モデルとの結合も必要不可欠となる。

2. 研究開発目的

沿岸浅海域の生態系による将来の緩和・適応効果を全球スケールで予測できる生態系モデルと波浪減衰・地形変化モデルを開発し、生態系がもたらす緩和（CO₂吸収速度）・適応効果（波浪減衰・浸食抑制効果）を定量化するとともに、社会経済動態モデルとのカップリングによってその効果を経済評価する。

3. 研究開発方法

○生態系モデル

浅海生態系によるCO₂吸収速度をはじめとした気候変動の緩和効果を定量的に予測するためには、プロセススペースの数理動態モデルが最適な有効手法の1つとして考えられる。本研究では、沿岸浅海域における5つの生態系（サンゴ、海草、海藻、マングローブ、塩性湿地）に着目した。これまでにプロセススペースで海草・海藻・塩性湿地を想定できる内湾生態系モデルは開発されているので⁶⁾、本研究ではこの既往モデルに新たに熱帯域の浅海生態系（サンゴ・マングローブ）を導入することで、沿岸浅海域における主要な生態系を全て考慮した新たな生態系モデルを開発した（[図3.5.1](#)）。

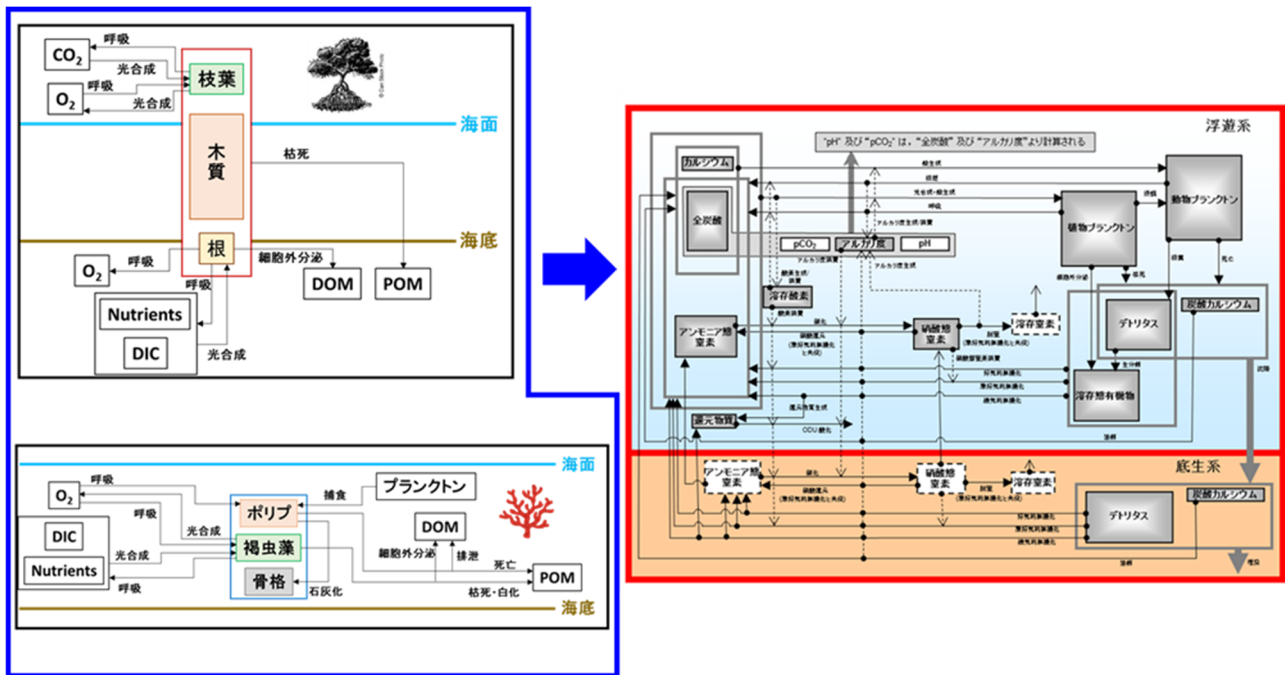


図 3.5.1 生態系モデルの概念図. マングローブ生態系 (左上) とサンゴ生態系 (左下) を既存の生態系モデル (右) ⁶⁾ に導入し, 新たな生態系モデルを開発した. なお, 既存のモデルには大型藻類生態系と干潟生態系は既に導入されている.

○波浪減衰・地形変化モデル

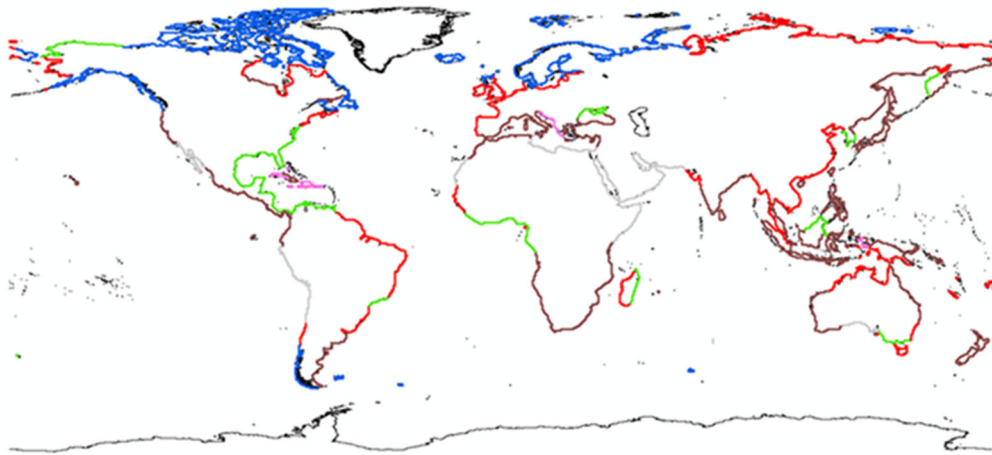
浅海生態系による波浪減衰・浸食抑制効果を予測するために本研究で適用した波浪減衰・地形変化モデルは, 自然生態系による波浪減衰を考慮して, 一次元の地形断面場を伝播する波浪を求めるモデルと海面上昇に伴う海浜地形断面の変化を求めるモデルである. ここでの波浪減衰モデルとは, 入射波に対する汀線までの波浪変形の計算を可能とするモデルである. 断面一次元のエネルギー平衡方程式であり, 砕波, 底面摩擦, 浅海生態系による減衰効果を考慮している. 地形変化モデルにおいては, 現況における初期地形を平衡断面と仮定し, 海面上昇に伴う新たな平衡断面への遷移を長期的な地形変化として求めた. 具体的には, 自然生態系による波浪減衰を考慮した将来の波の遡上高から移動限界水深までを漂砂の移動可能範囲とし, **Brunn**則と同様の概念により, 断面全体の土砂量の増減が均衡するように地形を幾何的に遷移させた.

○社会経済モデルとの結合

テーマ5におけるAIM/CGEモデル⁷⁾によって推定された炭素価格 (≒限界削減費用) を本研究に導入し, 浅海生態系によるCO₂吸収速度を金銭換算した. なお, ここでは将来的な浅海生態系分布の消失面積を0とすることで生態系保全を仮定し, 保全による追加的なCO₂吸収速度を金銭換算した. 社会経済モデルとの結合においては社会経済シナリオ (SSP1~5) も考慮した.

○計算領域の設定

本研究では全球の沿岸浅海域が対象となるので, 地形や生態系分布は全球の浅海域ごとに異なるため, その特徴を考慮したうえで沿岸浅海域を区分して計算領域を設定することが最適手法の一つと考えられる. その際に計算負荷が過大になることを回避するため, 計算領域をある程度広域に設定する必要がある. 本研究では, 全球の海岸域をデルタ地帯やフィヨルドなどのような海岸地形タイプに基づき類型化した既往研究⁸⁾に基づき, 図3.5.2のように全球浅海域を198のエリアに区分し, 全球推計を実施した.



— : Small delta — : Tidal system — : Lagoon — : Fjord — : Karst — : Arheic

図3.5.2 地形タイプの類型化⁸⁾に基づいて198のエリアに区分した本研究の計算領域。それぞれの配色の線分が一つの計算領域を表す。

○地形データ

全球沿岸浅海域の地形データにおいては、海陸の地形情報を全球的に網羅したShuttle Rader Topography Mission 15 PLUS (SRTM-15PLUS)データを採用した (WebGIS: <http://www.webgis.com/srtm3.html>)。なお、本データの空間解像度はおよそ450mとなっている。このデータに基づき、陸側の予測範囲は、浅海生態系面積の将来的な拡大を考慮した際に十分にカバーできるように、標高50mまでとした。一方で海側については、沿岸浅海域と定義される最大高潮面から有光層までの水深100mまで⁹⁾を対象範囲とした (図3.5.3)。

○生態系分布・面積データ

前述したとおり、本研究で着目した浅海生態系はサンゴ、海草藻場、海藻藻場、塩性湿地、マングローブである。これらの植生分布・面積データについては、サンゴ、海草藻場、塩性湿地およびマングローブはUNEP-WCMCから入手した (図3.5.4, 表3.5.1)。一方で、海藻藻場については現時点で分布データが存在しないため、既往研究で報告されている全球総面積¹⁰⁾を採用した。なお、これら浅海生態系面積の中では海藻藻場面積が最大となっている (表3.5.1)。

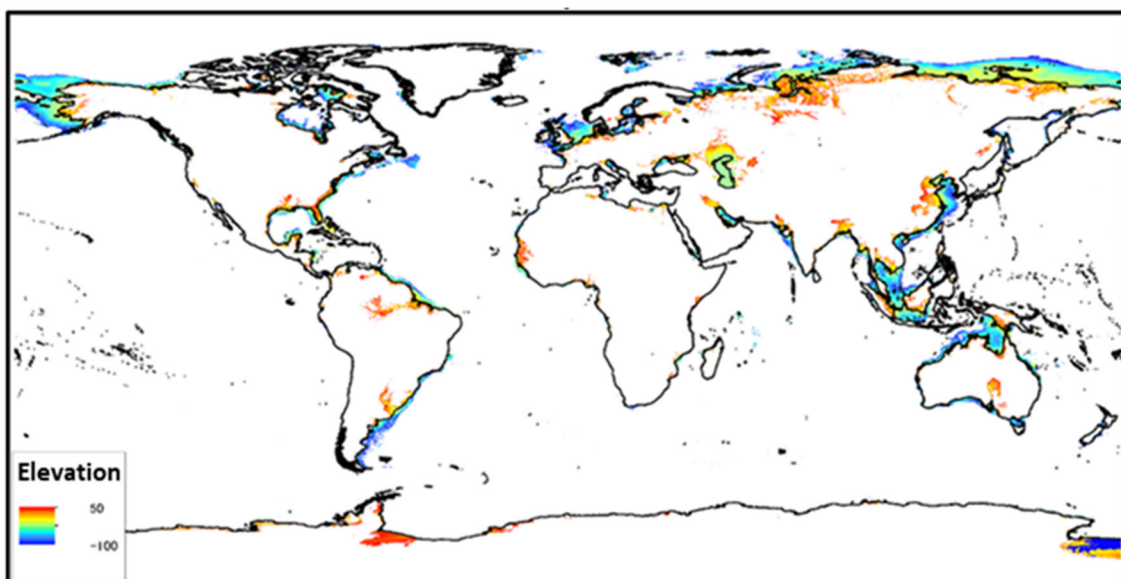


図3.5.3 本研究の計算対象となる標高エリア (標高50～-100m)

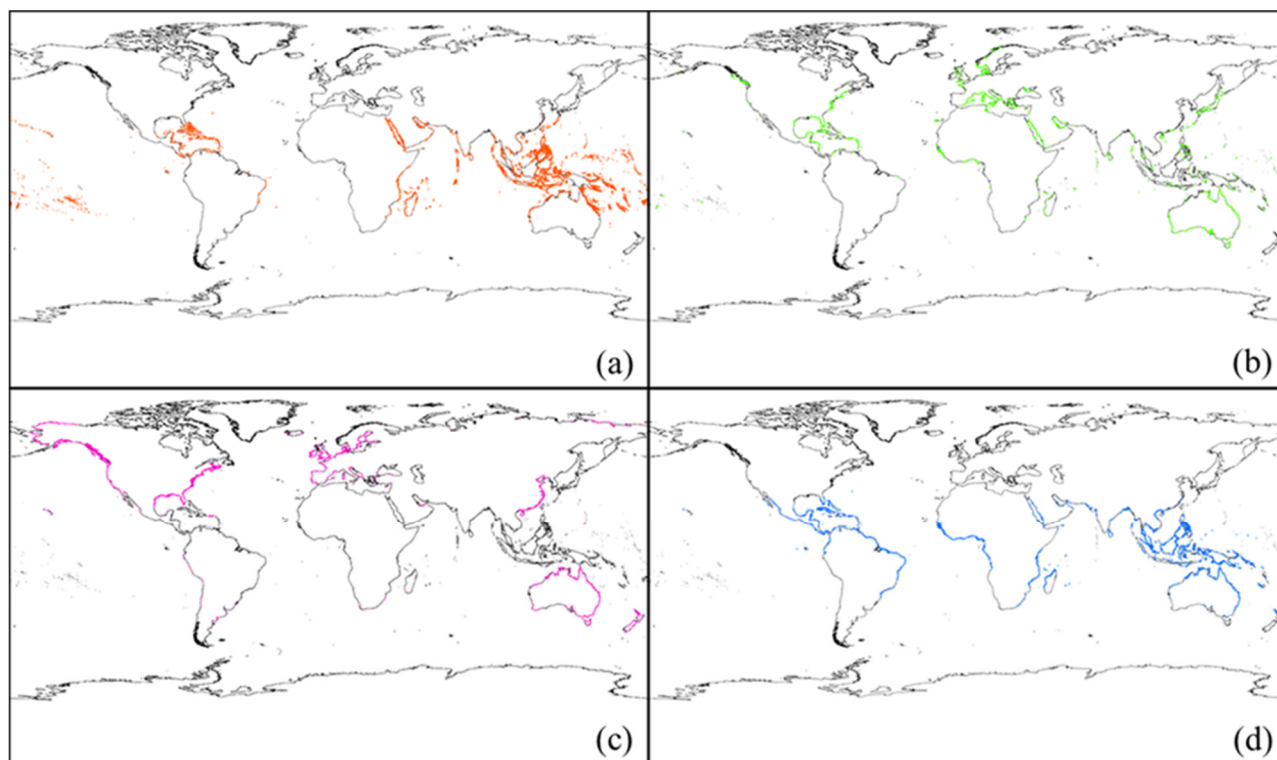


図3.5.4 浅海生態系の分布域：(a)サンゴ, (b)海草藻場, (c)塩性湿地, (d)マングローブ

表3.5.1 浅海生態系の全球総面積

	Extension [km ²]	References
Coral habitats	108,000	11)
Seagrass meadows	309,000	12)
Macroalgal beds	4.5.4,000	10)
Salt marshes	54,700	13)
Mangroves	154,000	14)

○気候変動影響の外力値

生態系モデルと波浪減衰・地形変化モデルによる生態系の気候変動緩和・適応効果の予測において、気温や海上風速、水温や海面変位などの大気や外洋との境界における物理的外力値と、クロロフィルa濃度や栄養塩などの生物化学的外力値が必要となる。本研究ではこれらの外力値としてCMIP5におけるGCMの計算結果を適用した。本研究では現況計算および将来予測計算の2つの期間の計算を実施している。将来予測ではRCP実験の外力値を使用した。現況計算では産業革命以降から現在に至るhistorical実験による外力値を使用した。なお、外力値となるGCMの計算結果を適用する際に、大気境界の外力値としては198のそれぞれの計算エリア（図3.5.2）に該当するデータ、外洋との境界の外力値としては、計算エリアに隣接するデータを抽出し、それらを平均することで生態系モデルおよび波浪減衰・地形変化モデルの予測計算に適用した。

○生態系分布面積変化の推定手法

生態系のCO₂吸収に伴う気候変動緩和効果については、生態系の将来的な分布面積変化によってその吸収速度は変化する。そこで本研究では浅海生態系の面積変化予測も実施した。サンゴ生息分布域の変化においては既往の研究で、年間最暖月の海表面水温（Sea surface temperature : SST）が30℃以上となった場合に白化現象が引き起こると報告されている^{15),16),17)}。一方で、海水温が低く、サンゴが分布

していないエリアで、年間の最寒月SSTと最暖月SSTが18℃以上かつ30℃未満に到達した場合、新たなサンゴ生息域となるという報告もある¹⁸⁾。本研究では、これら二つの報告に基づき、現況から将来にかけてのサンゴの生息面積変化を推定した。海草藻場と海藻藻場においては、クロロフィルa濃度を関数としてまず現況の光合成可能最大水深を求めた。そして、将来のクロロフィル濃度と海面変位量を考慮して、現況との光合成可能最大水深の変化率から、将来の分布面積を予測した。マングローブと塩性湿地は潮間帯に分布する生態系であるため、潮汐データと海面変位データおよび地形データから潮間帯の幅を推定し、現況と将来の変化率から面積変化を予測した。

○全球展開のための仮想計算領域の設定

本研究で開発した生態系モデルを用いて全球沿岸域の大気-生態系間のCO₂フラックスを推定する際には、198に分割した各エリア（図3.5.2）において計算を実施することが理想だが、モデル構造が複雑であることから計算負荷があまりにも大きく現実的でない。そこで本研究では日本沿岸域における生態系と地形を基に、三つの仮想的な計算領域を作成し（図3.5.5）、RCP2.6と8.5のシナリオにおけるGCMの計算結果を大気および外洋境界値に適用し計算を実施した。その結果、大気-生態系間のCO₂フラックスは水温との間に明確な関係性が確認できた（「結果及び考察」で詳述）。よって、198の各エリアにおける水温を係数として単位面積当たりのCO₂フラックスを計算し、さらに前述した生態系面積と掛け合わせることで、全球スケールにおけるCO₂フラックスを推計した。

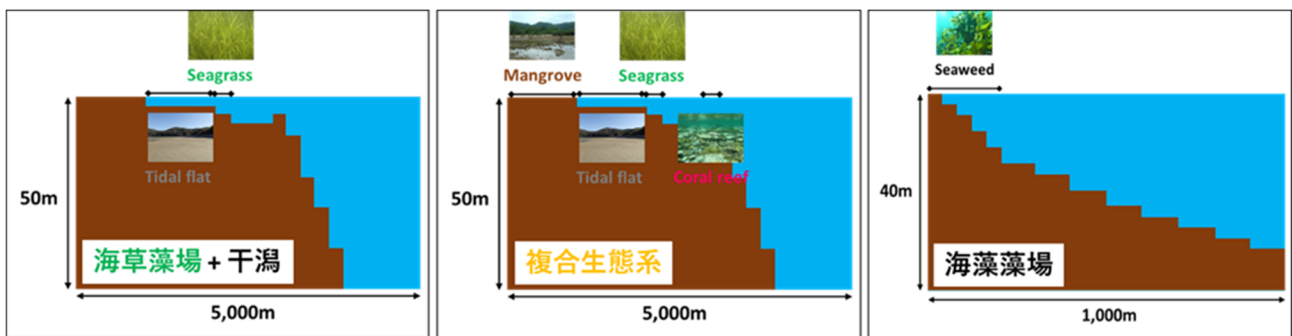


図3.5.5 日本の沿岸浅海域を基に設定したモデル地形および生態系

○沖合波高の計算・解析

波浪減衰モデルの外洋境界値となる沖合波高については、第三代全球波高モデル（WAVE WATCH III）によって計算された波高データの出現確率を解析し、50%確率の平均波高と0.137%の極大波高を採用した（図3.5.6）。またWAVE WATCH IIIの入力条件となる海上風速については、GCMの計算結果を適用した。

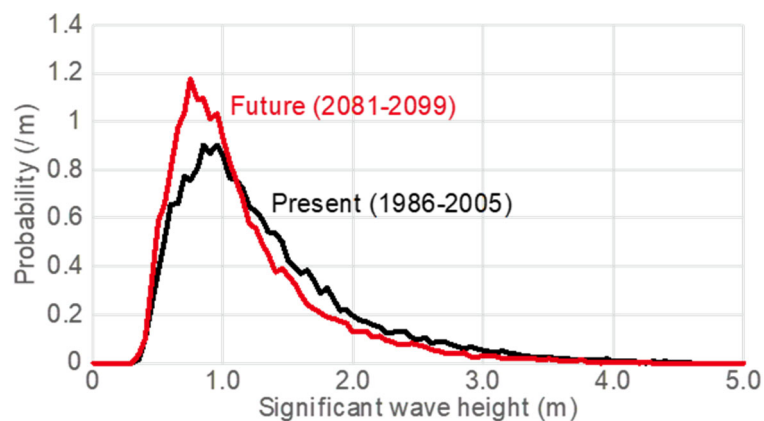


図3.5.6 現況と将来における波高の出現確率分布

4. 結果及び考察

○生態系の面積変化

サンゴ生息域は大幅に減少する予測となったが、他の生態系の分布面積は大きく変化せず、海草や塩性湿地においてはむしろ拡大する結果を示した。よって、生態系全体の面積としては現況から大きく変化せず、気候変動に適応する可能性が示された。

図4.5.1は現況から将来にかけての全球における浅海生態系の分布面積の変化である。まずサンゴ生息域においては、現況から2030sにかけて、RCP2.6と8.5ともにおよそ80%まで面積は縮小するが、RCP2.6ではその後緩やかな拡大・縮小がみられ、2090sには現況の75%まで縮小する可能性が示された。一方でRCP8.5においては、2030s以降も右肩下がりでも縮小し、2090sに現況の約25%の面積となり、RCP2.6に比べるとサンゴは広域にわたって消失し、生息面積が大幅に縮小する可能性が示された。

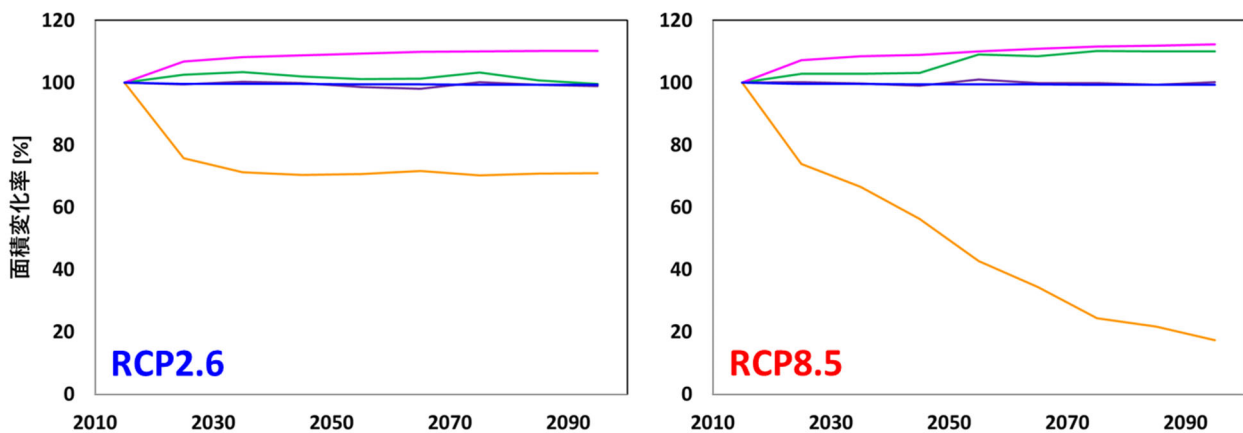


図4.5.1 水温および海面水位などを関数として推定した浅海生態系の分布面積変化
(— : サンゴ生息域 — : 海草藻場 — : 海藻藻場 — : 塩性湿地 — : マングローブ)

図4.5.2はサンゴ生息分布エリアにおける年間最暖月のSSTである。RCP2.6における水温の将来変化はほぼ横ばいで、半分以上のエリアでサンゴが白化する水温閾値(30℃)を下回る予測となっていた(図4.5.2a)。一方でRCP8.5においては2100年まで全エリアにおいてSSTが上昇し続け、2050年あたりを境に、半分以上のエリアが閾値を上回る予測となっていた(図4.5.2b)。

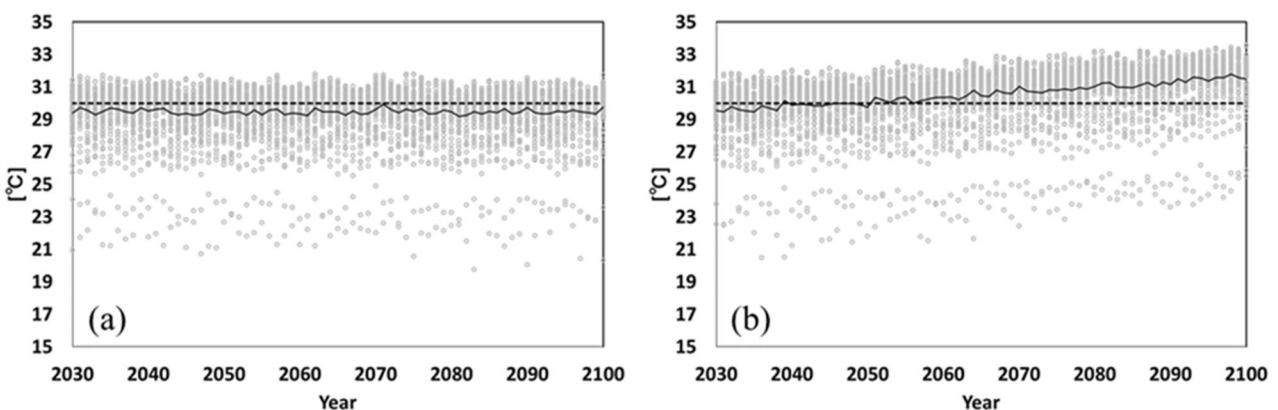


図4.5.2 サンゴ生息分布エリアにおける年間最暖月SST : (a)RCP2.6, (b)RCP8.5

(灰色プロット : 各計算領域におけるSST, 黒い実線 : 全計算領域のSSTの平均値, 黒い点線 : サンゴ白化の閾値となるSST30℃ライン)

海草藻場の全球総面積の将来変化については、RCP2.6と8.5ともに、現況から2030sにかけて分布面積が拡大し、RCP2.6においてはそれ以降にわずかに縮小した(図4.5.1)。2070sには再度拡大するがそれ

以降再び縮小し、2090sには現況とほぼ変わらない面積となった。一方で、RCP8.5は2030s以降も拡大を続け、2090sでは現況よりも10%以上拡大する結果となった。

海藻藻場の全球面積は現況から2090sまで、RCP2.6と8.5共に-2~+1%程度の範囲内で面積変化を繰り返しているが、2040年あたりからはRCP8.5において拡大傾向が強くなり、2090sにはおよそ1%拡大する可能性が示された。一方で、RCP2.6は2090sには現況よりも1%程度縮小する予測結果となった(図4.5.1)。

海草藻場と海藻藻場の分布面積変化の予測においては、クロロフィル濃度を関数として、光合成可能最大水深を算出した。ここで、本研究で使用したGCMの一つであるGFDL-ESM2Mにおけるクロロフィル濃度の予測結果から求めた海草と海藻の成長可能最大水深(Z_c)の将来変化を図4.5.3に示す。海草藻場と海藻藻場の Z_c はそれぞれ21~23mと62~66m程度の範囲内で、現況から将来にかけて変化していた。また、2050年あたりからRCP2.6よりもRCP8.5の方がやや大きくなり、両シナリオの差は海草藻場において最大でおよそ1.6m(図4.5.3a)、海藻藻場において最大でおよそ3.7mとなっていた(図4.5.3b)。本研究では、海草藻場と海藻藻場の将来的な面積変化は、RCP2.6よりもRCP8.5において拡大傾向が強い結果となっていた(図4.5.1)。これまでの研究で、気候変動に伴うクロロフィル濃度の将来的な変化は、温暖化による表層の水温上昇によって成層化が強化され、湧昇などによるより深い層からの栄養塩供給が減少し、植物プランクトンの生産速度も低下することから、クロロフィル濃度が低下する可能性が指摘されている。その結果、海洋の透明度が高くなるので、本研究ではRCP8.5において面積の拡大傾向が顕著であった可能性がある。

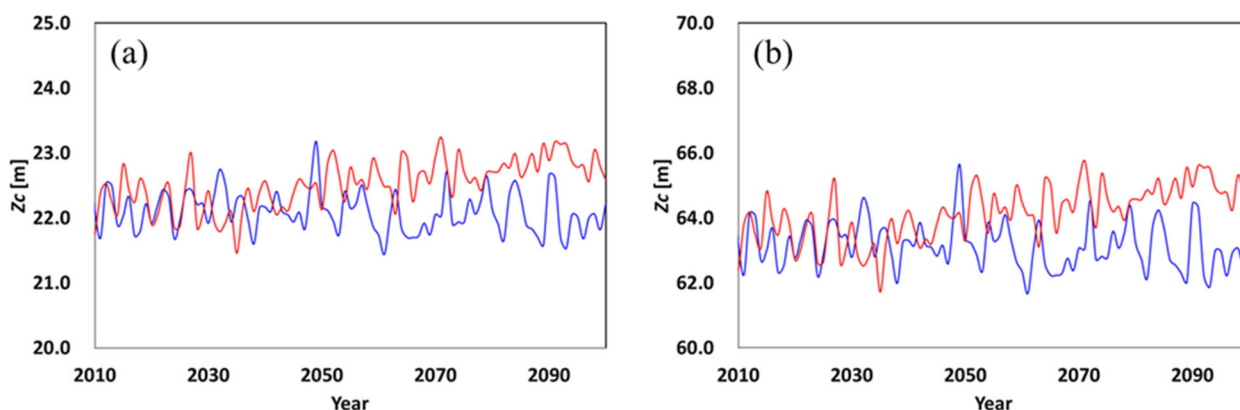


図4.5.3 全球沿岸域において平均した(a)海草と(b)海藻の光合成可能最大水深(青:RCP2.6,赤:RCP8.5)

塩性湿地の全球総面積では、RCP2.6とRCP8.5ともに2090sにかけて、海面水位の変化により現況よりも面積が拡大する結果となった(図4.5.1)。両シナリオとも2030sにかけての面積拡大率はおよそ4%で同等であったが、それ以降RCP2.6では2090sにかけて大きく変化しなかった。一方で、RCP8.5では2030s以降も面積は少しずつ拡大し、2090sでは現況に比べておよそ6%拡大する可能性が示された。

マングローブ全球分布面積においては、RCP2.6で現況から2050sにかけて海面水位変化の影響により生態系面積はおよそ0.7%縮小したが、それ以降はやや回復し、2090sでは現況と比べて0.5%縮小する結果となった。RCP8.5では2040sにかけておよそ0.6%縮小したが、RCP2.6と同様にそれ以降はやや回復し、2090sでは現況と比べておよそ0.3%の縮小となった。マングローブ分布域の将来変化においては、現況から2090sまでおよそ1%以内での変化に留まり、現況と大きく変わらない可能性が示された(図4.5.1)。

塩性湿地とマングローブが海面水位変動の影響を受けているにも関わらず、面積が大きく変動しないあるいは拡大したのは、海面水位の変化と岸沖方向の地形勾配の関係によるものである。図4.5.4は、塩性湿地における地形勾配と海面水位との関係の模式図である。平均海面を基準として、陸側の地形勾配が海側の地形よりも比較的緩やかとなるエリアで海面上昇が生じた場合、潮間帯に分布する塩性湿地では、海面上昇による浸水幅(生態系面積消失域)よりも、海面上昇によって新たに出現する潮間帯

(生態系面積拡大域)の方が広がる(図4.5.4a)。一方で海面が低下した場合、海面上昇時とは逆に、拡大域よりも消失域の方が大きくなる(図4.5.4b)。陸側の地形勾配が海側の地形よりも比較的急峻となる場合は、緩やかな場合とは逆に、海面上昇時は拡大域よりも消失域が大きくなり(図4.5.4c)、海面下降時は拡大域の方が大きくなる(図4.5.4d)。塩性湿地では、2030sにかけて急激な面積拡大が予測された(図4.5.1)。これは、2030sにかけて急激な海面低下が予測されている地域があること、またその地域における海岸線から陸側の地形勾配よりも海側の地形勾配が顕著に緩やかであることから(図4.5.4dに該当)、急激な面積拡大へと繋がった。海草藻場および海藻藻場の分布面積変化においても海面水位変化の影響を受けるが、塩性湿地とマングローブの潮間帯の生態系に比べると岸沖方向の分布幅が広いと、海面変位の影響は受けにくい。

○大気-生態系間のCO₂フラックス

大気-生態系間のCO₂フラックスの全球推計は、全てのシナリオにおいて2100年までに生態系による吸収速度が顕著に低下した。図4.5.5は、生態系モデルの結果より解析した大気-生態系間のCO₂フラックスと水温との関係である。全ての生態系において、水温上昇と共にCO₂吸収速度が小さくなる傾向が示された。特に、主に熱帯域を中心に分布する浅海生態系(サンゴ、マングローブ)においてその減少勾配が大きかった。水温上昇と共に生態系によるCO₂吸収速度が低下したのは、1.水温上昇に伴う大気CO₂溶解速度の低下、2.水温上昇に伴う生物の呼吸速度の増大、および3.バクテリアによる有機物分解速度の増大のためであると考えられる。

大気-生態系間のCO₂フラックスと水温との関係から式を導出し、198の各エリア(図3.5.2)における水温および生態系面積を掛け合わせることで、全球浅海域におけるCO₂フラックスを推定した(図4.5.6)。現況では、ユーラシア大陸北岸におけるCO₂吸収速度は、最大でおよそ4億トン[CO₂/年]に到達することが確認された(図4.5.6a)。南半球に比べて、北半球では高緯度域まで沿岸浅海域に生態系が分布していることから(特に塩性湿地、図3.5.4c)、より低い水温の影響によって活発なCO₂吸収が行われていることが考えられる(図4.5.5)。また、東南アジア、オーストラリア東岸、アメリカ大陸東岸、中央アジアではそれぞれ1億トン[CO₂/年]程度の吸収速度となっていた。日本を含むその他のエリアは、ユーラシア大陸北岸に比べると吸収と放出がほぼ等しくなるニュートラルに近い状態となっていたが、全て吸収傾向となっており、放出が卓越するエリアは確認されず、全球的には吸収傾向が強い結果となった(図4.5.6b)。将来予測においては、現況との差分(将来-現況)によって示す(図4.5.6c-f)。2050sにおいては、RCP2.6とRCP8.5ともに東南アジアやアラスカ北岸、アメリカ大陸東岸、地中海、中央アジアで吸収速度の低下が確認された。ユーラシア大陸北岸のみ2050sにおいて現況よりも吸収速度の増加が確認できたが、2090sには低下し、現況とほぼ変わらない吸収速度となった。一方で2050sに放出傾向を示していたエリアは、RCP2.6では2090sでも大きく変わらなかったが、RCP8.5ではさらに吸収速度が低下する結果となった。しかし吸収速度が顕著に低下したエリアでも、放出傾向に転じることはなく、どのシナリオにおいても現況から将来にかけて生態系による吸収を維持し続ける結果となった。なお、日本を含むその他のエリアにおいては、現況からの大きな変化はなかった。次に大気-生態系間のCO₂フラックスの全球推計を図4.5.7に示す。全てのシナリオにおいて、2050年代までCO₂吸収速度は低下するが、RCP2.6においてはその後大きく変化せず、2100年には現況と比べて1億トン(CO₂/年)程度低下するとなった。一方で、その他のシナリオにおいては吸収速度が低下し続け、RCP4.5と6.0はそれぞれ5億トン(CO₂/年)と6億トン(CO₂/年)、RCP8.5は10億トン(CO₂/年)低下する予測となった。前述のとおり、浅海生態系の分布面積は大きく変化しなかったが、CO₂吸収速度は顕著に低下した。浅海生態系の分布面積が気候変動に適応しても、水温上昇にもたらされるCO₂の吸収速度への影響が大きい可能性がある。よって、浅海生態系によるCO₂吸収速度を維持するためには、生態系分布面積を維持するだけでなく、厳しい緩和策とともに温度上昇も抑えることが重要となりうる。

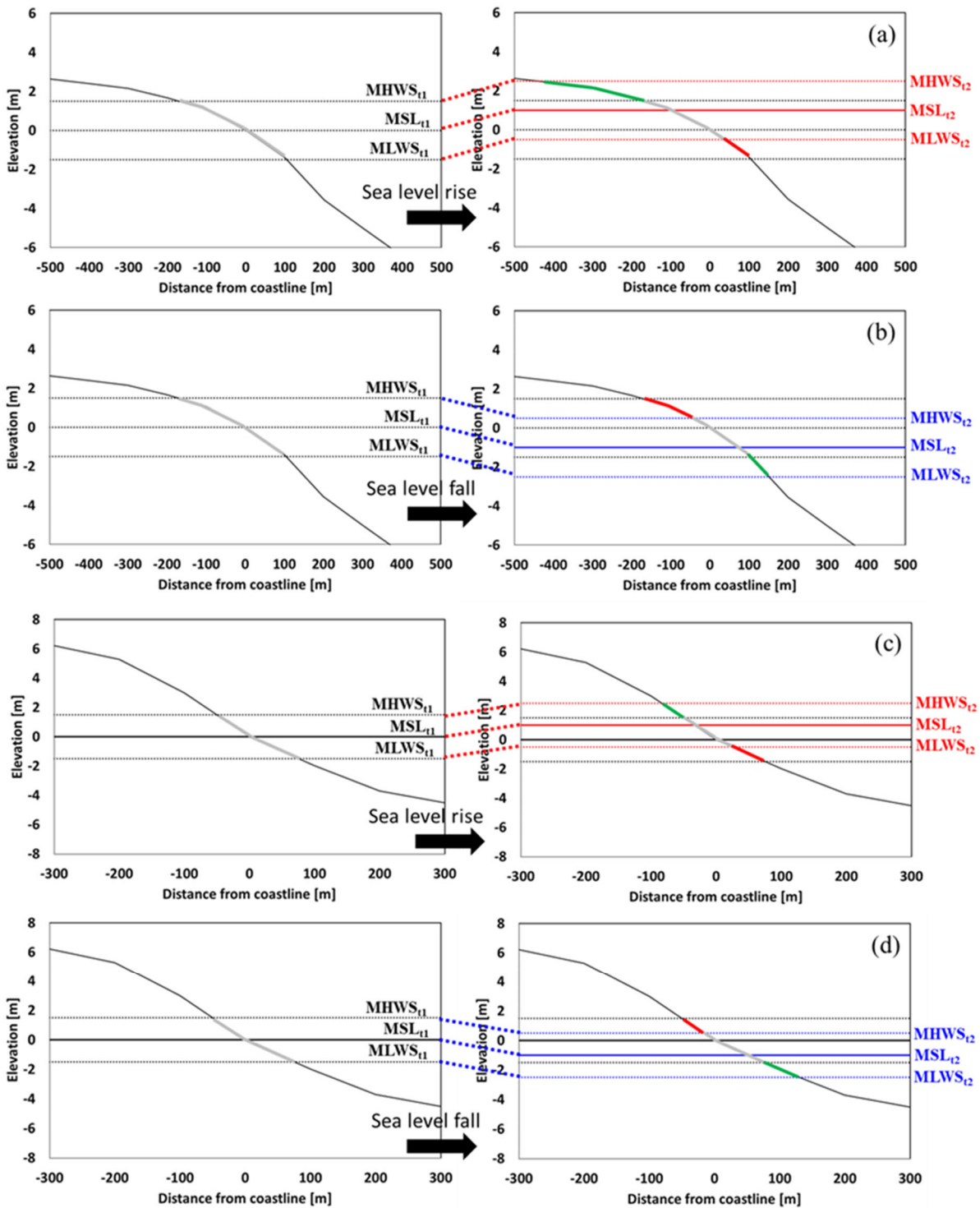


図4.5.4 塩性湿地における地形勾配と海面水位変化との関係の模式図：(a)海岸線から海側よりも陸側の勾配が緩やかな地形で海面上昇が生じた場合，(b)海面下降が生じた場合，(c) 海岸線から海側よりも陸側の勾配が急峻な地形で海面上昇が生じた場合，(d) 海面下降が生じた場合，地形分布図の緑は海面水位の変動によって塩性湿地が拡張する範囲，赤は消失する範囲を表す．（ MSL_{t1} ：現況の平均海面， $MHWS_{t1}$ ：現況の大潮時における満潮海面， $MLWS_{t1}$ ：現況の大潮時における干潮海面， MSL_{t2} ：将来の平均海面， $MHWS_{t2}$ ：将来の大潮時における満潮海面， $MLWS_{t2}$ ：将来の大潮時における干潮海面）

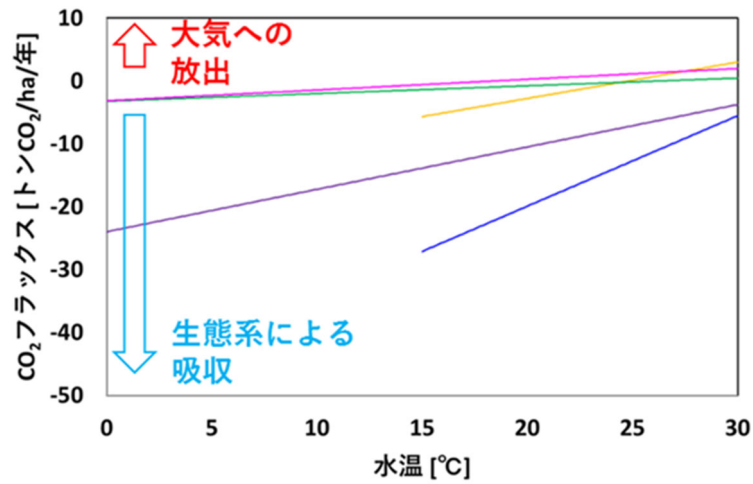


図4.5.5 シミュレーション結果から作成した大気-生態系間のCO₂フラックスと水温との関係
 (—: サンゴ生息域 —: 海草藻場 —: 海藻藻場 —: 塩性湿地 —: マングローブ)

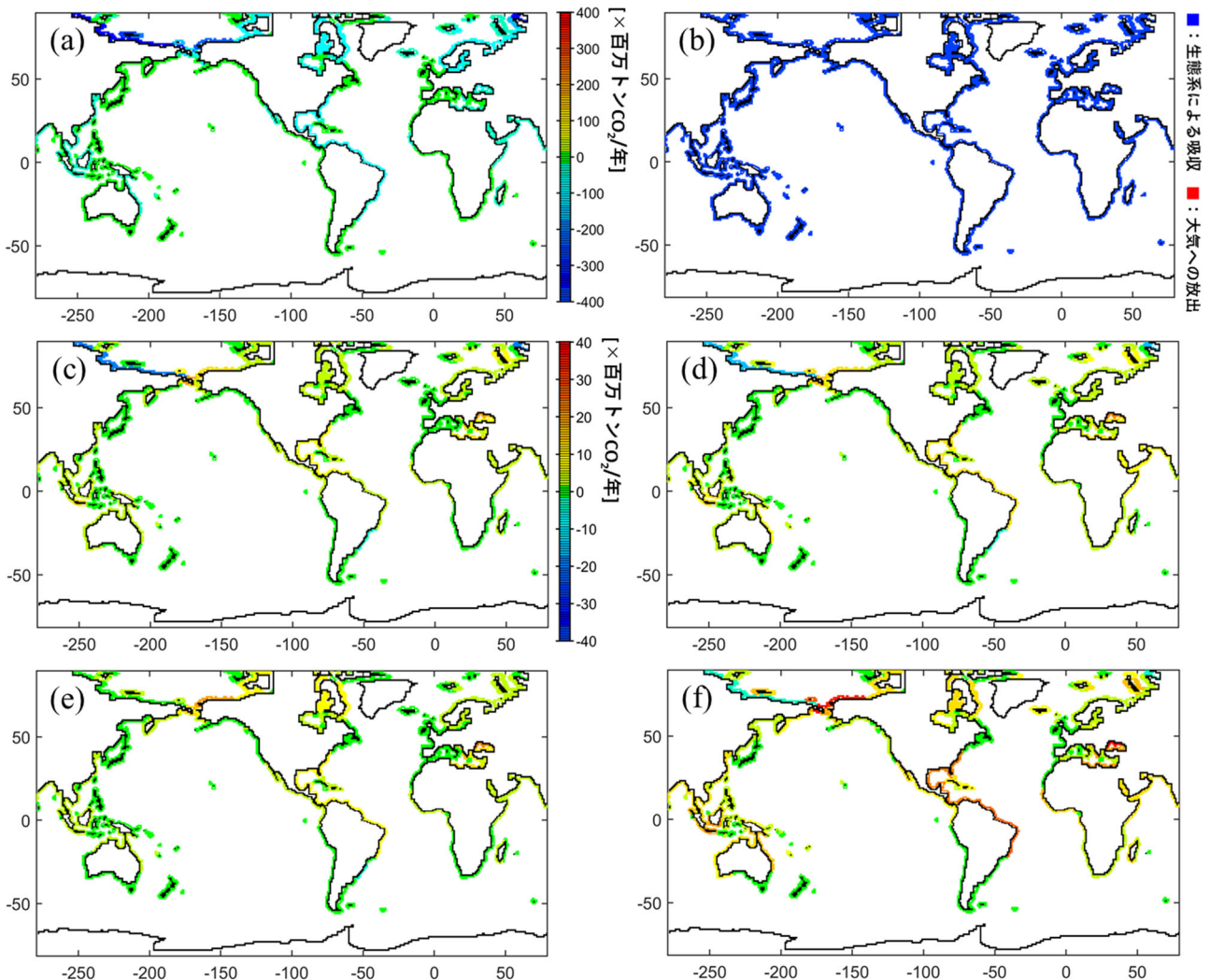


図4.5.6 各エリアにおける大気-生態系間のCO₂フラックス全球分布の将来変化予測：(a)現況（+：大気への放出，-：生態系による吸収），(b)現況における吸収か放出傾向を示すインデックス，(c)～(f)将来予測と現況との差（現況-将来），(c)RCP2.6 2050s，(d)RCP8.5 2050s，(e)RCP2.6 2090s，(f)RCP8.5 2090s（+：将来的な生態系によるCO₂吸収速度の低下，-：CO₂吸収速度の増加）

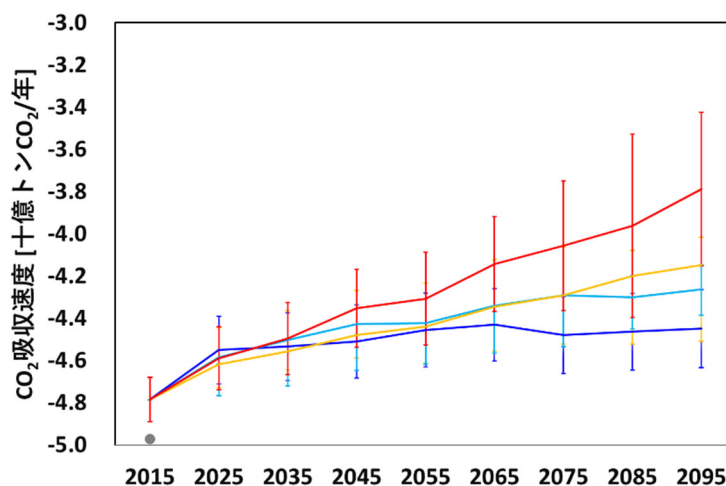


図4.5.7 浅海生態系におけるCO₂ガスの吸収速度の全球推計
(- : RCP2.6, - : RCP4.5, - : RCP6.0, - : RCP8.5)

○生態系による波浪減衰および地形変化抑制効果

波浪減衰・地形変化モデルによる計算においては、八重山諸島を想定した岸沖断面地形を作成し、現況から将来の海面上昇によって生じる地形変化および波の遡上端分布の変化を求めた(図4.5.8)。本研究においては、沖にサンゴ礁によるリーフ($x_0 = 4700 \text{ m} \sim 4800 \text{ m}$)が存在し、海中部に海草($x_0 = 4000 \text{ m} \sim 4200 \text{ m}$)、汀線前後の海中と地上部にマングローブ($x_0 = 0 \text{ m} \sim 3000 \text{ m}$)が自生する環境を想定し、①複合型：リーフ・植生有り、②無植生型：リーフ有り・植生無し、③無リーフ型：リーフ無し・植生有り、④無環境型：リーフ・植生無しの四つの条件に対して検討を行った。

本手法によって得られた将来の海浜地形は、いずれの条件においても、汀線付近が大きく侵食されており、現在の汀線位置が $x_0 = 1622 \text{ m}$ であるのに対し、将来の汀線位置は $x_0 = 1127 \text{ m}$ (複合型)、 $x_0 = 1128 \text{ m}$ (無植生型)、 $x_0 = 1126 \text{ m}$ (無リーフ型)、 $x_0 = 1128 \text{ m}$ (無環境型)となることが予測された。つまり、将来の汀線位置は現在と比較して約500 m陸側に後退する。この大幅な汀線の後退は、将来の汀線付近の海岸侵食と海水準上昇に伴う浸水域の拡大の両方が同時に進行することによるものである。一方で、自然生態系の有無による汀線後退量の変化は1~2m程度であり、ここでの計算では植生の影響はほとんどみられなかった。

また、リーフの有無によって汀線後退量はほとんど変化しなかった。理由の一つとしては、リーフが存在する条件においても海面上昇によってリーフの相対的な天端高が下がることで、リーフの波浪減衰効果が小さくなったことが挙げられる。

○浅海生態系によるCO₂吸収速度の経済評価

図4.5.9は、社会経済モデルによって予測した炭素価格を用いて推定した、生態系保全によって追加的に吸収された炭素の金銭換算である。生態系保全による追加的な炭素吸収速度は、RCP2.6から8.5へと温室効果ガスの排出量が大きくなるにつれ、共に増大した。しかし、RCP8.5をはじめ6.0と4.5では炭素価格(≒限界削減費用)は極めて低く、追加的炭素吸収速度を金銭換算しても、その利益も極めて小さい結果となった。一方で、RCP2.6では炭素価格が顕著に高く、特に化石燃料に依存するSSP5とSSP2では突出して高くなり、追加炭素吸収速度の金銭換算も1250億USD以上の価値が生じていた。よって、厳しい緩和策と、化石燃料に依存によって炭素価格が高くなる状況によって、浅海生態系によって吸収された炭素に大きな価値が生じる可能性が示された。

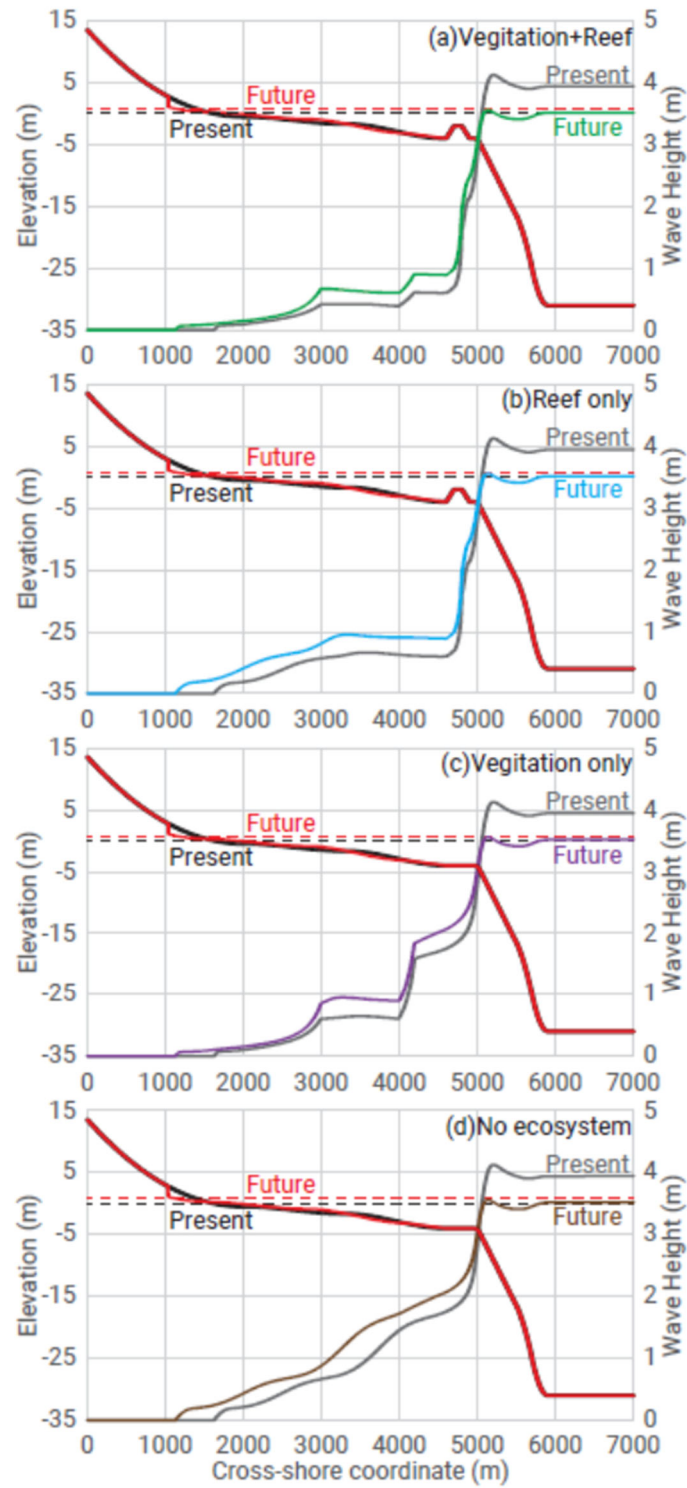


図4.5.8 現在および将来の海浜地形と波高分布（a：複合型，b：無植生型，c：無リーフ型，d：無環境型），図中入射波は有効波高を使用。

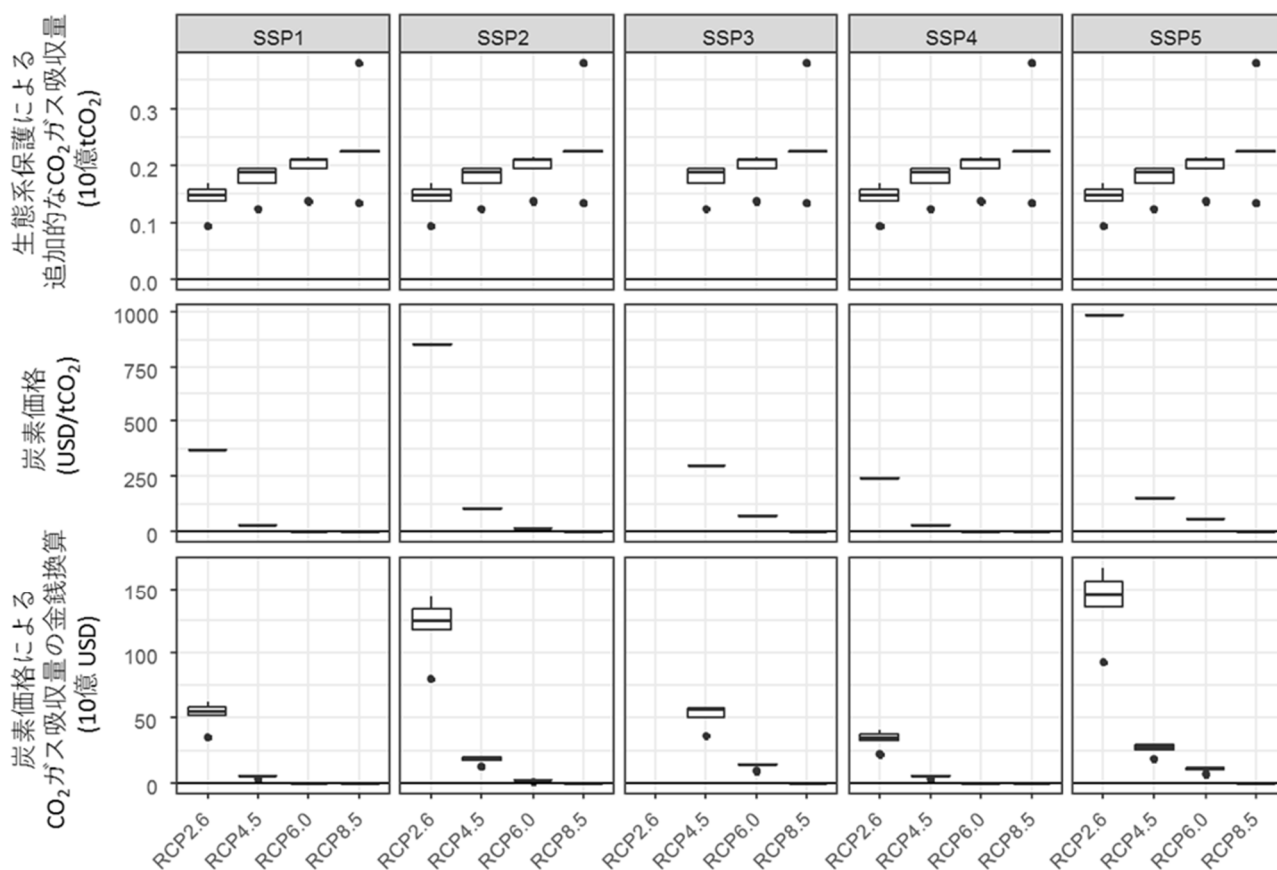


図4.5.9 2090sにおける（上）生態系保護による追加的なCO₂ガス吸収量と（中）炭素価格（≒限界削減費用），および（下）炭素価格によるCO₂ガス吸収量の金銭換算

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- 沿岸浅海域の主要生態系（サンゴ・海草・海藻・塩性湿地・マングローブ）の生物化学プロセスを考慮した生態系モデルおよび各生態系の植生抵抗などを考慮した波浪減衰・地形変化モデルを構築した。
- この新規開発モデルを用いて、沿岸生態系の緩和効果（大気-生態系間CO₂ガス交換速度）の現況と将来予測の計算結果、および水温上昇とともに生態系によるCO₂吸収速度が低下する傾向を定量的に明示した。
- さらに生態系の全球分布面積変化を予測し、水温と生態系面積を考慮した上での大気-生態系間CO₂ガス交換速度の全球推計を行い、生態系による吸収速度が2100年にRCP8.5において10億トン（CO₂/年）減少する可能性を示した。
- 各生態系による波高減衰効果の現況と将来予測の試算結果を定量的に明示し、沿岸生態系の適応効果を算出した。
- 社会経済モデルとの結合によって生態系保全による追加的なCO₂吸収速度の金銭換算を行った結果、RCP2.6において炭素削減費用が最も高騰する場合に、吸収された炭素に1,000億(USD/年)以上の価値が生じる可能性が示された。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

- 気候変動適応計画，第五次環境基本計画，第3期海洋基本計画，第5期科学技術基本計画，港湾

の中長期政策（PORT2030）のすべてにおいて、ブルーカーボンに関する事項が新たに明記。

- 2) 生物多様性国家戦略2012-2020の国別目標B-5に関する関連指標群から「日本のサンゴ礁、藻場、干潟等における各種指定区域の面積」について、サンゴ礁の面積はS-14(2)-3「沿岸生態系分布図（2016）」を使用して算出された（H20以来の更新となった）。
- 3) 横浜市「平成27～28年度横浜市ブルーカーボン検討委員会」の委員として、横浜市内で社会実践されている海域を活用したカーボンのセットについて、その科学技術的根拠や望ましい進め方について助言し、その内容が採択され実践された。（ST5）
- 4) ユネスコMAB計画の2015-2025年戦略およびリマ行動計画の委員として、気候変動対策をSDGsに向けた行動全般の中で位置づけ、当方の提案に基づき各行動の実施主体欄が追加された。
- 5) 長野県高山村の環境審議会座長として、ユネスコエコパークおよび首長誓約を含む環境条例策定と行動計画（案）の取りまとめに貢献し、成案となった。
- 6) UNFCCC-COP25やそのSBSTAにおけるブルーカーボンによる緩和や適応への対応に関する日本政府サブミッション案、環境省地球環境局や自然環境局、国交省総合政策局や港湾局へ適宜助言した。
- 7) 環境省「平成27年度、森林等の吸収源問題に関するワーキング・グループ」の委員として、沿岸や水産に関する吸収源の現状や課題について情報を提供し、とりまとめ資料に対し助言した。
- 8) 環境省「平成27年度適応策に資する吸収源検討会」の委員として、ブルーカーボンによる緩和効果と適応効果の最新情報を提供し、とりまとめ資料に対して助言した。
- 9) 熱帯・亜熱帯沿岸生態系ポータルサイト（Tropical Coastal Ecosystems Portal <http://www.nies.go.jp/TroCEP/index.html>）を開設し、S14(2)-3で作成した生態系分布マップと生物情報の国別データを公開し、環境省ホームページ「我が国の環境政策に関するポータルサイト、日本の環境政策」からリンクされて発信している。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- 10) Kuwae, T., "Blue Carbon in Shallow Coastal Ecosystems", 気候変動枠組条約第24回締約国会議（UNFCCC COP24）サイドイベントで招待講演，ポーランド・カトヴィツェ，年月：2018年12月7
- 11) IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere（IPCC海洋・雪氷圏特別報告書），Expert Reviewer，2018年12月～2019年2月。
- 12) Kuwae and Hori (2019)の書籍"Blue carbon in shallow coastal ecosystems: carbon dynamics, policy, and implementation"で示された全球の浅海生態系における大気中二酸化炭素の吸収速度の推計値は世界初のとりまとめであるため、本推計値をベンチマークとした検討が今後国内関連省庁や海外において進展すると期待される。
- 13) 熱帯・亜熱帯沿岸生態系ポータルサイト（Tropical Coastal Ecosystems Portal <http://www.nies.go.jp/TroCEP/index.html>）を開設し、S14(2)-3で作成した生態系分布マップと生物情報の国別データを公開することで、環境政策における沿岸生態系情報活用の推進に貢献した。同サイトは環境省ホームページ「我が国の環境政策に関するポータルサイト、日本の環境政策」からもリンクされて発信している。
- 14) 環境省、琉球大学とともにEnvironmental Scientists Network for Asia-Pacific Islands (ESNAP)会合を開催し、太平洋島嶼国における沿岸生態系を活用した緩和適応策の重要性についてS14-2(3)研究成果の講演を行い、今後のESNAPの方向性の検討に貢献した。
- 15) ニホンジカの分布拡大に関する本研究の成果は、今後政府から公表される予定である「第2次気候変動影響評価報告書」などへの被引用を通じて、行政による野生動物影響評価モニタリング等の計画策定に活用されることが見込まれる。
- 16) ニホンライチョウの潜在生息域の将来変化に関する本研究の成果は、今後政府から公表される予定である「第2次気候変動影響評価報告書」などへの被引用を通じて、行政によるライチョウ保全策の策定等に活用されることが見込まれる。

- 17) 桑江ほか (2019)の論文で示された、浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計値は国内初のとりまとめであるため、本推計値をベンチマークとした検討が今後国内関連省庁において進展すると期待される。

6. 国際共同研究等の状況

- 1) 国際航路協会 (PIANC) における5カ国を超えるワーキンググループ (WG188) において, “Carbon Management for Port and Navigation Infrastructure”, に関する内容を取りまとめ, 2019年4月に出版した. <https://www.pianc.org/publications/envicom/wg188> 本出版において, ブルーカーボンに関する部分を分担執筆した.
- 2) Carbon Neutral Cities Alliance, (CNCA) のカウンターパートである横浜市ならびにカナダ国バンクーバー市との共同ワークショップへの参加. 都市の特性に着目したブルーカーボンに関する調査研究を議論 (2018年7月)
- 3) 協力案件名 : Projecting global value of climate change mitigation and adaptation by coastal ecosystems
本S14-2(5) において必要となる全球における緩和・適応効果のモデリングの検証データを入手し, 全球における様々な生態系の解析を進めるため, 研究分担者 (桑江朝比呂) が, 2017年3月に各国のブルーカーボン研究者に参加を呼びかけた. 各国で取得したデータを提供していただき, 解析を実施中.
- 4) 協力案件名 : Accumulation rates of inorganic carbon in sediments of seagrass meadows and mangrove forests: a meta analysis
カウンターパート : Carlos M. Duarte, Vincent Saderne (King Abdullah University of Science and Technology (KAUST)) (サウジアラビア)
多国のブルーカーボン研究者からなる共同プロジェクトに2016年より参加し, 国内で取得したデータを提供, 解析を実施中.
- 5) 協力案件名 : Memorandum of Understanding (MoU) between the Port and Airport Research Institute (PARI) and Jadavpur University (JU): Technical cooperation in the fields of biogeochemistry in Indian Estuaries
カウンターパート : Sugata Hazra, Abhra Chanda (Jadavpur University) (インド)
港湾空港技術研究所とJadavpur Universityによる2017年1月のMoU締結にもとづく, インド河口域のブルーカーボンの動態や環境技術, 環境工学に関する共同研究. インドの河口域マングローブ林で現地観測を共同で実施中.

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり) >

- 1) AKHAND, A., A. CHANDA, S. MANNA, S. DAS, S. HAZRA, R. ROY, S. B. CHOUDHURY, K. H. RAO, V. K. DADHWAL, K. CHAKRABORTY, K. M. G. MOSTOFA, T. TOKORO, T. KUWAE, and R. WANNINKHOF: Geophysical Research Letters, 43, 11726-11735 (2016) A comparison of CO₂ dynamics and air-water fluxes in a river-dominated estuary and a mangrove-dominated marine estuary
- 2) 田多一史, 中山恵介, 所立樹, 渡辺謙太, 桑江朝比呂 : 土木学会論文集B2-72 (海岸工学) , I_1363-I_1368 (2016). 湧水に着目したコムケ湖の水質変動特性の把握
- 3) 田多一史, 中山恵介, 所立樹, 渡辺謙太, 桑江朝比呂 : 土木学会論文集B3-72 (海岸開発) , I_982-I_987 (2016). 春季出水期におけるコムケ湖の水質変動解析と大気-海水間CO₂フラックスの推定

- 4) 田多一史, 所立樹, 渡辺謙太, 中山恵介, 桑江朝比呂: 土木学会論文集B2-73 (海岸工学), I_1297-I_1301 (2017) 都市型浅海域における海水中CO2分圧の日周変化.
- 5) 中山恵介, 駒井克昭, R. W. Elner, 桑江朝比呂: 土木学会論文集B3-73 (海洋開発), I_618-I_623 (2017) Roberts Bank tidal flatにおける干潟内流動と塩分濃度.
- 6) 岡田知也, 三戸勇吾, 高橋俊之, 高濱繁盛, 秋山吉寛, 黒岩寛, 渡辺謙太, 棚谷灯子, 杉野弘明, 徳永佳奈恵, 久保雄広, 桑江朝比呂: 土木学会論文集B2-73 (海岸工学), I_1561-I_1565 (2017) 干潟健全度指数と経済的価値による干潟のサービスの統合的評価手法.
- 7) 中山恵介, 中西佑太郎, 中川康之, 茂木博匡, 田多一史, 桑江朝比呂: 土木学会論文集B3-73 (海洋開発), I_821-I_826 (2017) 波・流れ場とアマモの連成モデルの構築.
- 8) 田多一史・中山恵介・桑江朝比呂: 土木学会論文集B2-74 (海岸工学), I_1237-I_1242 (2018) アマモ場におけるCO2分圧モデルの開発.
- 9) Tokoro, T and T. Kuwae: *Frontiers in Marine Science*, 5:286 (2018) A new procedure for post-processing eddy-covariance data to better quantification of atmosphere-aquatic ecosystem CO2 exchange.
- 10) Tanaya, T., K. Watanabe, S. Yamamoto, C. Hongo, H. Kayanne and T. Kuwae: *Biogeosciences*, 15, 4033-4045 (2018) Contributions of the direct supply of belowground seagrass detritus and trapping of suspended organic matter to the sedimentary organic carbon stock in seagrass meadows.
- 11) 7) 田多一史・中山恵介・駒井克昭・Jeng-Wei TSAI・佐藤之信・桑江朝比呂: 土木学会論文集B3-74 (海洋開発), I_144-I_149 (2018) 成層を考慮したアマモ場における溶存無機炭素の変動解析.
- 12) Saderne, V., N. R. Geraldi, P. I. Macreadie, D. T. Maher, J. J. Middelburg, O. Serrano, H. Almahasheer, A. Arias-Ortiz, M. Cusack, B. D. Eyre, J. Fourqurean, H. Kennedy, D. Krause-Jensen, T. Kuwae, P. Lavery, C. E. Lovelock, N. Marba, P. Masqué, M. A. Mateo, I. Mazarrasa, K. J. McGlathery, M. P. J. Oreska, C. J. Sanders, I. R. Santos, J. M. Smoak, T. Tanaya, K. Watanabe and C. M. Duarte: *Nature Communications*, 10.1038_s41467-019-08842-6 (2019) Role of carbonate burial in “Blue Carbon” ecosystems budgets.
- 13) Watanabe, W., Seike, K, Kajihara, R., Montani, S., Kuwae, T: *Global Change Biology*, v25, 1063-1077 (2019) Relative sea-level change regulates organic carbon accumulation in coastal habitats.
- 14) Okada, T., Y. Mito, E. Iseri, T. Takahashi, T. Sugano, Y. Akiyama, K. Watanabe, T. Tanaya, H. Sugino, K. Tokunaga, T. Kubo and T. Kuwae: *PeerJ*, 6:e6234 (2019) Method for the quantitative evaluation of ecosystem services in coastal regions.
- 15) Macreadie, P. I., A. Anton, J. A. Raven, N. Beaumont, R. M. Connolly, D. A. Friess, J. J. Kelleway, H. Kennedy, T. Kuwae, P. S. Lavery, C. E. Lovelock, D. A. Smale, E. T. Apostolaki, T. B. Atwood, J. Baldock, T. S. Bianchi, G. L. Chmura, B. D. Eyre, J. W. Fourqurean, J. M. Hall-Spencer, M. Huxham, I. E. Hendriks, D. Krause-Jensen, D. Laffoley, T. Luisetti, N. Marbà, P. Masque, K. J. McGlathery, J. P. Megonigal, D. Murdiyarso, B. D. Russell, R. Santos, O. Serrano, B. R. Silliman, K. Watanabe, and C. M. Duarte: *Nature Communications*, 10(1), 1-13, (2019) The future of Blue Carbon science.
- 16) 桑江朝比呂・吉田吾郎・堀正和・渡辺謙太・棚谷灯子・岡田知也・梅澤有・佐々木淳: 土木学会論文集B2 (海岸工学), 75, 10-20 (2019). 浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計

<その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) 茂木博匡: 港湾, 92, 34-35 (2015). 気候変動と沿岸生態系—ブルーカーボンと沿岸海洋炭素循環モデル—
- 2) 桑江朝比呂: 水環境学会誌, 39, A, 4, 120-124 (2016). 再生された干潟における生態系の発達と自律安定
- 3) 桑江朝比呂: 用水と廃水, 58, 60-66 (2016). 河口浅海域におけるブルーカーボン—二酸化炭素の吸収および炭素隔離—

- 4) 茂木博匡：港湾, 93, 20-21 (2016). ブルーカーボンに関する研究と世界の動き
- 5) 桑江朝比呂：グリーンパワー, 58, 6-7 (2017). 地球温暖化の抑制に海の力を
- 6) 桑江朝比呂：みなと総研, 16, 7-9 (2017). 沿岸浅海域におけるブルーカーボン
- 7) 桑江朝比呂：みなと総研, 16, 16-17 (2017). 世界で行われている藻場再生, 優秀な日本の技術を広めるのが課題
- 8) 堀正和, 桑江朝比呂編著: 地人書館 (2017). ブルーカーボン—浅海におけるCO2隔離・貯留とその活用—
- 9) 桑江朝比呂：ブルーカーボン—浅海におけるCO2隔離・貯留とその活用—, 地人書館 (2017). 沿岸浅海域における気候変動の緩和と人為影響
- 10) 桑江朝比呂, 堀正和：ブルーカーボン—浅海におけるCO2隔離・貯留とその活用—, 地人書館 (2017). ブルーカーボンの今後—地球環境問題への挑戦
- 11) (分担執筆) 所立樹・渡辺謙太：ブルーカーボン—浅海におけるCO2隔離・貯留とその活用—, 地人書館, 33-64 (2017) 大気からのCO2の吸収—吸収源としての沿岸浅海域の実証と新たな吸収メカニズムの解明.
- 12) (分担執筆) 桑江朝比呂：ブルーカーボン—浅海におけるCO2隔離・貯留とその活用—, 地人書館, 145-167 (2017) 沿岸浅海域における気候変動の緩和と人為影響.
- 13) (分担執筆) 桑江朝比呂・堀正和：ブルーカーボン—浅海におけるCO2隔離・貯留とその活用—, 地人書館, 211-241 (2017) ブルーカーボンの今後—地球環境問題への挑戦 .
- 14) 棚谷灯子, 桑江朝比呂：日本マリンエンジニア学会誌, 52, 701-704 (2017), 海洋生態系の活用による気候変動の緩和と適応
- 15) 田中文弘, 古川恵太, 桑江朝比呂, 今井一郎：日本水産学会誌, 83, 1042-1053 (2017), 第32回沿岸環境関連学会連絡協議会ジョイント・シンポジウム「我が国沿岸域におけるアマモ場再生への道～これまでとこれから～」
- 16) 桑江朝比呂：Ocean Newsletter, 4-5 (2017) 日本最東端南鳥島への渡島.
- 17) 桑江朝比呂：バードリサーチ水鳥通信, 2017年7月号, 5 (2017) ヨーロッパトウネンもバイオフィルムを食べている.
- 18) 岡田知也, 桑江朝比呂：土木技術, 72(10), 39-45 (2017) 港湾の”自然再生”を目指して-生物共生型港湾構造物とは何か-.
- 19) 桑江朝比呂：土木学会誌, 103(1), 42-43 (2018), 23歳の実験生態系-干潟実験施設-.
- 20) 渡辺謙太, 所立樹, 茂木博匡, 門谷茂, 桑江朝比呂：沿岸海洋研究, 55, 97-100 (2018), 海草藻場における炭素循環.
- 21) 桑江朝比呂：土木技術, 73(1), 78-81 (2018) 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究グループ.
- 22) Kuwae, T., and A. N. Findikakis: IAHR, 4, 98, (2019) Editorial: Green Coastal Infrastructure, Hydrolink
- 23) 桑江朝比呂: 情報誌港湾, 95, 12, 6-11 (2018) ブルーカーボン生態系と調和する港湾インフラ.
- 24) 桑江朝比呂: 2018年度土木学会水工学に関する夏期研修会講義集, B-8-1-10 (2018) 海岸におけるグリーンインフラの活用.
- 25) 桑江朝比呂: HEDORO 132, 29-34 (2018) ブルーカーボン生態系を活用した気候変動対策.
- 26) 桑江朝比呂: エネルギー・資源 39. 141-144 (2018) 気候変動対策としての「ブルーカーボン」.
- 27) Kuwae, T., J. Kanda, A. Kubo, F. Nakajima, H. Ogawa, A. Sohma, and M. Suzumura: Springer Nature, 295–319 (2019) CO2 uptake in shallow coastal ecosystems: the effect of biogeochemical and socio-economic factors. In: Kuwae T, Hori M (eds) Blue carbon in shallow coastal ecosystems: carbon dynamics, policy, and implementation.

- 28) Hori, M., J.C. Bayne, T. Kuwae: Springer Nature, 1–31 (2019) Blue carbon: Characteristics of the ocean's sequestration and storage ability of carbon dioxide. In: Kuwae T, Hori M (eds) Blue carbon in shallow coastal ecosystems: carbon dynamics, policy, and implementation.
- 29) Kuwae, T and M. Hori: Springer Nature, 343–373 (2019) Future of blue carbon: challenges to global environmental issues. In: Kuwae T, Hori M (eds) Blue carbon in shallow coastal ecosystems: carbon dynamics, policy, and implementation.
- 30) Nobutoki, M., S. Yoshihara and T. Kuwae: Springer Nature, 321–346 (2019) Carbon offset utilizing coastal waters: Yokohama Blue Carbon Project. In: Kuwae T, Hori M (eds) Blue carbon in shallow coastal ecosystems: carbon dynamics, policy, and implementation.
- 31) Tokoro, T., K. Watanabe, K. Tada and T. Kuwae: Springer Nature, 153–184 (2019) Air–water CO₂ flux in shallow coastal waters: theory, methods, and empirical studies. In: Kuwae T, Hori M (eds) Blue carbon in shallow coastal ecosystems: carbon dynamics, policy, and implementation.
- 32) Akhand, A., A. Chanda, S. Das, S. Hazra and T. Kuwae: Springer Nature, 185–221 (2019) CO₂ fluxes from mangrove ecosystem. In: Kuwae T, Hori M (eds) Blue carbon in shallow coastal ecosystems: carbon dynamics, policy, and implementation.
- 33) 桑江朝比呂: 土木学会誌, 104, 22-23 (2019). 港湾や海岸におけるグリーンインフラ
- 34) 桑江朝比呂, 渡辺謙太: 海洋調査, 21-24 (2019). 浅い海は二酸化炭素の吸収源: ブルーカーボンとその計測
- 35) 桑江朝比呂: 金属, 89(7), 69-77 (2019). リサイクル材や浚渫土砂を活用した自然資本の保全や創造
- 36) 桑江朝比呂: 雑誌「月間ビジネスアイ エネコ」2019年6月号, 14-17 (2019). ブルーカーボンの取り組みの現状と課題, その可能性
- 37) 桑江朝比呂: 国際環境経済研究所 2019.5.24オンライン記事 (2019). ブルーカーボンとは.
<http://ieei.or.jp/2019/05/special201608027/>
- 38) 堀正和, 桑江朝比呂: 沿岸域学会誌, 32, 63 (2019). 「ブルーカーボン」令和元年度出版・文化賞受賞にあたって
- 39) 岡田知也, 秋山吉寛, 黒岩寛, 内藤了二, 渡辺謙太, 棚谷灯子, 桑江朝比呂: 国土技術政策総合研究所資料, 1077 (2019). 干潟の環境価値の得点化とその活用
- 40) 赤塚真依子, 高山百合子, 伊藤一教, 渡辺謙太, 桑江朝比呂, 源利文: 大成建設技術センター報 52, 48 (2019). 環境DNAを活用した海草場モニタリングの成立性について
- 41) 桑江朝比呂: 沿岸域学会誌, 32(4), 9-14 (2020). ブルーカーボンの活用. 沿岸域学会誌

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) TOKORO, T and T. KUWAE : 7th International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces (2015) Evaluation of the Eddy Covariance Method for the Assessment of the Blue Carbon
- 2) MOKI, H., K. WATANABE, K. TAGUCHI, Y. TSUJI, T. TOKORO, S. MONTANI and T. KUWAE : Meeting of Asia Oceania Geophysical Society (AOGS), Singapore (2015) Estimation of carbon accumulation rate in shallow coastal waters using a numerical model
- 3) BANNO, B., Y. KURIYAMA and N. HASHIMOTO : The Proceedings of the Coastal Sediments 2015 (2015) Equilibrium-based foreshore beach profile change model for long-term data
- 4) NAKAGAWA, Y., K. NADAOKA, H. YAGI, Y. NIHEI and H. UCHIKAWA : The Proceedings of the Coastal Sediments 2015, San Diego, USA (2015) Stochastic Model of Fluid Mud Transport under Wave and Current
- 5) KURIYAMA, Y., Y. UNO and K. HONDA : The Proceedings of the Coastal Sediments 2015, San Diego, USA (2015) Hindcast of Bathymetry Change in Oarai Port, Japan, Caused by the 2011 Tsunami
- 6) 桑江朝比呂, 伴野雅之, 中川康之, 相馬明郎, 茂木博匡, 渡辺謙太, 所立樹, 栗山善昭: 海岸工学講演会 (招待講演) (2015). ブルーカーボン研究の将来: 気候変動の緩和と適応の両得

- 7) 桑江朝比呂：海洋理工学会平成27年度秋季大会プログラム，pp. 21-27（招待講演）（2015）. 堆積物-水界面における渦相関法を用いた酸素フラックスの直接測定
- 8) 桑江朝比呂：名城大名城大学大学院総合学術研究科秋季総合コアプログラム（招待講演）（2015）. 気候変動の緩和と適応のオプションとしてのブルーカーボン
- 9) 桑江朝比呂：横浜国立大学統合的的海洋教育・研究センターシンポジウム（招待講演）（2015）. 東京都市周辺の沿岸生態系が二酸化炭素を吸収する
- 10) 桑江朝比呂：東京湾シンポジウム（招待講演）（2015）. 東京湾におけるブルーカーボン研究
- 11) 茂木博匡，田口浩一，中川康之，畑恭子，桑江朝比呂：平成27年度日本海洋学会秋季大会公演要旨集（2015）. 沿岸メソスケールにおけるアマモ流動阻害効果の解析
- 12) 棚谷灯子，渡辺謙太，山本将史，本郷宙軌，茅根創，桑江朝比呂：第18回サンゴ礁学会（2015）. 亜熱帯性海草藻場の有機炭素蓄積特性
- 13) 桑江朝比呂：東京湾シンポジウム（招待講演）（2016）. 比較順位法を用いた干潟がもつサービスの経済評価の検討
- 14) AFKHAND, A., A. CHANDA, S. MANNA, S. HAZRA, and T. KUWAE: 2016 AGU Fall meeting (2016) Temporal Variability (Diurnal, Seasonal and Decadal Scale) of CO₂ Dynamics and Air-Water CO₂ Flux in a Tropical Macro-Tidal Estuary, East Coast of India
- 15) MOKI, H., K. TAGUCHI, Y. NAKAGAWA, K. HATA, and T. KUWAE: 7th India-Japan Symposium on Science and Technology for Sustainability (ISAJ Symposium-2016) (2016) The Development of a Hydrodynamic Model to Investigate the Effects of Submerged Aquatic Vegetation (SAV) Drag Force on the Current Field
- 16) 棚谷灯子，渡辺謙太，桑江朝比呂：日本サンゴ礁学会第19回大会（2016）. 安定同位体比を用いたサンゴ由来有機物の堆積物への蓄積特性の検討
- 17) 桑江朝比呂，伴野雅之，柳嶋慎一，中川康之，栗山善昭，棚谷灯子，井上智美，山野博哉，馬場繁幸：日本サンゴ礁学会第19回大会（2016）. マルチコプターを用いた空撮によるマングローブ-干潟-海草場-サンゴ礁の地形測量の試み
- 18) 上中剛生，中國正寿，渡辺謙太，桑江朝比呂，山本修一：日本地球化学会年会（2016）. 有機物組成からみた風蓮湖堆積物へのアマモ由来有機物の寄与
- 19) TOKORO, T and T. KUWAE: Oceanflux Greenhouse Gases Evolution (2016) Characteristics of coastal CO₂ flux estimated from comparison of eddy covariance method with conventional methods
- 20) TANAYA, T., K. WATANABE, and T. KUWAE: 13th International Coral Reef Symposium (2016). Evaluation of the contribution of coral-derived organic matter to total sedimentary organic matter by elemental and isotopic analysis
- 21) YAMAMOTO, S., H. KAYANNE, C. HONGO, T. TANAYA, K. WATANABE, and T. KUWAE: 13th International Coral Reef Symposium (2016) Dissolution of carbonate sediment at seagrass meadow estimated by total alkalinity flux and pore water profiles
- 22) 川名優孝，刑部真弘，清水悦郎，三上己紀，桑江朝比呂：産学連携学会第14回大会（2016）. 産学官民連携による新しい研究連携組織の構築について
- 23) 田多一史，所立樹，渡辺謙太，山本将史，中山恵介，桑江朝比呂：日本地球惑星科学連合2016年大会（2016）. 日本の浅海域における海水中CO₂分圧に係る現地観測とパス解析
- 24) 山本将史，茅根創，本郷宙軌，棚谷灯子，渡辺謙太，桑江朝比呂：日本地球惑星科学連合2016年大会（2016）. 渦相関法と間隙水鉛直プロファイルを用いたサンゴ礁海草帯堆積物のアルカリ度フラックスの観測
- 25) 棚谷灯子，渡辺謙太，山本将史，本郷宙軌，茅根創，桑江朝比呂：日本地球惑星科学連合2016年大会（2016）. 亜熱帯性海草藻場における有機炭素蓄積量の制御条件としての海草現存量
- 26) 渡辺謙太，棚谷灯子，門谷茂，桑江朝比呂：日本地球惑星科学連合2016年大会（2016）. サイズ分画と同位体分析による海草場堆積物の有機炭素貯留特性の評価

- 27) 桑江朝比呂, 神田穰太, 久保篤史, 中島典之, 小川浩史, 相馬明郎, 鈴木昌弘: 日本地球惑星科学連合2016年大会(招待講演)(2016). 人間活動の影響を受けた河口浅海域における大気中CO₂の吸収に関する現地観測と生態系モデリング
- 28) NAKAYAMA, K., Y. MARUYA, K. MATSUMOTO, K. KOMAI, and T. KUWAE: the 10th International Conference on the Applications of Stable Isotope Techniques to Ecological Studies (IsoEcol 2016) (2016) Nutrient contributions from the ocean across a river basin using stable isotope analysis in Shiretoko Peninsula
- 29) 渡辺謙太, 清家弘治, 安達寛, 柴沼成一郎, 長坂洋光, 所立樹, 田多一史, 門谷茂, 桑江朝比呂: 日本生態学会第64回大会(2017). 北海道東部の潟湖における有機炭素貯留特性
- 30) 堀正和, 桑江朝比呂: 日本生態学会第64回大会(2017). 沿岸浅海域のブルーカーボン推定—大気から海底貯留までのプロセス評価—
- 31) 渡辺謙太, 所立樹, 茂木博匡, 門谷茂, 桑江朝比呂: 海洋生物研究会(招待講演)(2017). 海草藻場における炭素循環
- 32) KUWAE, T: Blue Carbon Workshop- the role of coastal ecosystems in climate change mitigation and adaptation (2017) (招待講演) Projecting global value of climate change mitigation and adaptation by coastal ecosystems
- 33) 桑江朝比呂: 第87回(平成29年) マリンエンジニアリング学術講演会(招待講演)(2017). 海草藻場における炭素循環
- 34) INOUE, T., S. BABA, F. ISHIHAMA, A. KAWANISHI, F. HAYASHI, N. OHSHIRO, M. KEZUKA, Y. MOCHIDA, H.T. CHAN, M. KAINUMA, N. KIMURA, H. YAMANO, T. KUWAE, and H. MATSUDA: International Mangrove Conference in Bali, Indonesia (2017). Carbon storage of mangrove ecosystems: global maps of reported data and estimated models
- 35) Kuwae T: The 85th Anniversary-Commemorative International Symposium of the Japanese Society of Fisheries Science (基調講演)(2017) Air-water CO₂ gas exchanges and Blue carbon dynamics in estuarine and shallow coastal systems.
- 36) Takai, N., H. Takeuchi, N. Mano, S. Ueda, and T. Kuwae: The 85th Anniversary-Commemorative International Symposium of the Japanese Society of Fisheries Science (2017) The outbreak process of the bacterial cold-water disease among ayu *Plecoglossus altivelis altivelis*, examined by carbon and nitrogen stable isotope analyses.
- 37) Akhand, A., A. Chanda, S. Das, S. Hazra, and T. Kuwae: Sundarban: Technology and advancement. 8th India-Japan Symposium on Science and Technology for Sustainability (ISAJ Symposium-2017) (2017) CO₂ flux estimation from Indian.
- 38) Sohma, A., Shibuki, H., Nakajima, F., and Kuwae, T: The International Society for Ecological Modelling Global Conference 2017 (ISEM 2017) (2017) Ecosystem modelling to estimate blue carbon in a human-dominated estuarine and shallow coastal system.
- 39) Shoji, A., K. H. Elliott, S. Aris-Brosou, H. Mizukawa, S. Nakayama, Y. Ikenaka, M. Ishizuka, T. Kuwae, K. Watanabe and Y. Watanuki: The 6th International Bio-Logging Science Symposium (2017) Migratory seabirds are responsible for mercury biotransport from marine to terrestrial ecosystems.
- 40) 中西佑太郎, 中山恵介, 中川康之, 田多一史, 茂木博匡, 桑江朝比呂: 第30回(2017年度) 水文・水資源学会研究発表会(2017) 波・流れ場とアマモの連成モデルの開発.
- 41) 林はるか, 大門純平, 桑江朝比呂, 綿貫豊: 日本鳥学会2017年度大会(2017) 春のウトウ親鳥が食べる餌の海域による差.
- 42) 渡辺謙太, 清家弘治, 所立樹, 門谷茂, 桑江朝比呂: 日本地球惑星科学連合2017年大会(2017) 海草藻場における炭素隔離・貯留過程の解析.
- 43) 岡田知也, 三戸勇吾, 菅野孝則, 秋山吉寛, 杉野弘明, 徳永佳奈恵, 久保雄広, 桑江朝比呂: 2017年度モニタリングサイト1000シギ・チドリ類調査交流会広島(2017) 沿岸域における生態系サービ

スの統合的評価手法 (IMCES) の開発.

- 44) 具志良太, 中村進一, 富田和之, 桑江朝比呂, 棚谷灯子, 岩村俊平, 岡田亘, 高橋由浩: 日本サンゴ礁学会第20回大会 (2017) 浦添第一防波堤に導入されたサンゴの加入・成育を促すタイドプールについて.
- 45) 庄子晶子, K. Elliott, S. Aris-Brousou, 水川葉月, 中山翔太, 池中良徳, 石塚真由美, 桑江朝比呂, 渡辺謙太, 綿貫豊: 日本鳥学会2017年度大会 (2017) 海鳥を介した汚染物質輸送.
- 46) 茂木博匡・相馬明郎・渋木尚・豊田健志・井上智美・山野博哉・伴野雅之・中川康之・松田裕之・桑江朝比呂: 日本海洋学会秋季大会 (2017) 沿岸域複合生態系によるCO₂吸収効果のモデル解析.
- 47) Tokoro, T., M. Hori, T. Kuwae, Y. Isaka, H. Ahn, and M. Nakaoka : Proceedings of 45th UJNR (U.S.-Japan Cooperative Program in Natural Resources) (2017) Development of Free-Ocean Real-Time Experiment System (FORTES) for in-situ CO₂ manipulation in eelgrass beds.
- 48) Tokoro, T., M. Nakaoka, Y. Isaka, H. Ahn, M. Hori, and T. Kuwae : CERF 2017 (2017) Development of Free-Ocean Real-Time Experimental System for an in-situ CO₂ manipulative experiment in eelgrass beds.
- 49) Shoji, A., K. H. Elliott, S. Aris-Brosou, H. Mizukawa, S. Nakayama, Y. Ikenaka, M. Ishizaka, T. Kuwae, K. Watanabe and Y. Watanuki: The 45th Pacific Seabird Group Annual Meeting (2018) Migratory seabirds are responsible for mercury biotransport from marine to terrestrial ecosystems.
- 50) Akhand, A., K. Watanabe, T. Tokoro, A. Chanda and T. Kuwae: Japan Geoscience Union 2018 (JpGU2018) (2018) Air-water CO₂ flux in a subtropical mangrove-seagrass-coral continuum: A comparative study.
- 51) 大門純平, 伊藤元裕, 長谷部真, 庄子晶子, 林はるか, 佐藤信彦, 越野陽介, 島袋羽衣, 高橋晃周, 渡辺謙太, 桑江朝比呂, 綿貫豊 : 平成29年度日本水産学会春季大会要旨集 (2018) 地域的な餌魚の利用可能性と海鳥雛の肥満度.
- 52) 高井則之, 小林夢香, 植田眞吾, 鷹崎和義, 川田暁, 桑江朝比呂: 平成29年度日本水産学会春季大会要旨集 (2018) 福島県沼沢湖におけるヒメマスとプランクトンの栄養関係.
- 53) 庄子晶子, K. Elliott, S. Aris-Brosou, 水川葉月, 中山翔太, 池中良徳, 石塚真由美, 桑江朝比呂, 渡辺謙太, 綿貫豊: 日本生態学会第65回 (2018) 海鳥による水銀物質輸送.
- 54) 渡辺謙太, 清家弘治, 梶原瑠美子, 所立樹, 田多一史, 門谷茂, 桑江朝比呂: Japan Geoscience Union 2018 (JpGU2018) (2018) 沿岸植生域の堆積環境変化と再配置が有機炭素貯留速度に与える影響.
- 55) Tanaya, T., T. Tokoro, H. Yamano, Y. Watabe and T. Kuwae: Japan Geoscience Union 2018 (JpGU2018) (2018) Carbonate production rate estimated based on both the biological calcification and the carbonate chemistry change of seawater in an isolated reef: its controlling factors.
- 56) Moki, H., A. Sohma, T. Shimuki, T. Toyoda, A. Akhand, K. Watanabe, T. Tokoro, T. Inoue, H. Yamano, M. Banno, Y. Nakagawa, H. Matsuda and T. Kuwae: Japan Geoscience Union 2018 (JpGU2018) (2018) The estimation of CO₂ flux in subtropical coastal ecosystems using a numerical model.
- 57) Moki, H., K. Taguchi, Y. Nakagawa, S. Montani and T. Kuwae: Asia Oceania Geosciences Society 15th Annual Meeting (2018), A new 3-D physical model for the drag force of submerged aquatic vegetation (SAV) in a shallow coastal waters.
- 58) 棚谷灯子, 所立樹, 山野博哉, 渡部要一, 桑江朝比呂, 日本サンゴ礁学会第21回大会 (2018) 石灰化生物量およびアルカリ度の変化に基づく炭酸塩地盤形成速度とその規定要因の推定: 離島における低潮線保全
- 59) Moki, H., A. Sohma, H. Shibuki, K. Toyoda, A. Akhand, K. Watanabe, T. Tokoro, T. Inoue, H. Yamano, M. Banno, Y. Nakagawa, H. Matsuda and T. Kuwae, 2018年 個体群生態学会 (2018) The estimation of CO₂ flux in Japanese coastal ecosystems using a numerical model
- 60) 茂木博匡, 相馬明郎, 渋木尚, 豊田健志, A. Akhand, 渡辺謙太, 所立樹, 井上智美, 山野博哉, 伴野雅之, 中川康之, 松田裕之, 桑江朝比呂, 東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会 2018年

度海洋生態系モデリングシンポジウム（2018）数値モデルによる日本の沿岸生態系のCO₂吸収効果の推定

- 61) 小西颯人, 相馬明郎, 渋木尚, 豊田健志, 茂木博匡, 桑江朝比呂, 平成30年度海洋理工学会 (2018) 炭素吸収・貯留・隔離機能の評価を目的としたマングローブ生態系モデル開発の試み
- 62) 鈴木昌弘, 桑江朝比呂, 平成30年度 産総研エネルギー・環境シンポジウム (2018) 水辺環境 (水質) とブルーカーボン: 浅海生態系の修復と創生技術
- 63) Tada, T., K. Nakayama, K. Komai, J. W. Tsai, Y. Sato and T. Kuwae: ECSA, 57 (2018) Numerical modelling of the spatial variation of CO₂ fugacity in water at Komuke lagoon in Hokkaido, Japan
- 64) Moki, H., K. Taguchi, Y. Nakagawa, S. Montani and T. Kuwae: AOGS (2018) A New 3-D Physical Model for the Drag Force of Submerged Aquatic Vegetation (SAV) in a Shallow Coastal Waters
- 65) Akhand, A., K. Watanabe, T. Tokoro, A. Chanda and T. Kuwae: 日本地球惑星科学連合2018年大会 (2018) Air-water CO₂ flux in a subtropical mangrove-seagrass-coral continuum: A comparative study
- 66) 渡辺謙太, 清家弘治, 梶原瑠美子, 所立樹, 田多一史, 門谷茂, 桑江朝比呂, 日本地球惑星科学連合2018年大会 (2018) 沿岸植生域の堆積環境変化と再配置が有機炭素貯留速度に与える影響
- 67) 茂木博匡, 相馬明郎, 渋木尚, 豊田健志, A. Akhand, 渡辺謙太, 所立樹, 井上智美, 山野博哉, 伴野雅之, 中川康之, 松田裕之, 桑江朝比呂, 日本地球惑星科学連合2018年大会 (2018) 亜熱帯域沿岸生態系におけるCO₂フラックスのモデル解析
- 68) 棚谷灯子, 所立樹, 山野博哉, 渡部要一, 桑江朝比呂, 日本地球惑星科学連合2018年大会 (2018) 離島における生物による石灰化量および炭酸系の変化に基づく炭酸塩地盤形成速度とその規定要因の推定
- 69) Akhand, A., K. Watanabe, T. Tokoro, A. Chanda and T. Kuwae: EGU (2018) Characterizing dissolved and particulate carbon dynamics along with air-water CO₂ flux in a subtropical coupled mangrove-seagrass ecosystem
- 70) 渡辺謙太, 桑江朝比呂, 日本地球惑星科学連合2019年大会 (2019) 沿岸潟湖の有機炭素貯留に人工的な湖口開削が与える影響
- 71) 渡辺謙太, 桑江朝比呂, 日本地球惑星科学連合2019年大会 (2019) 沿岸潟湖の有機炭素貯留に人工的な湖口開削が与える影響
- 72) 茂木博匡, 柳田圭悟, 近藤桂一, 森佑貴, 井上智美, 山野博哉, 桑江朝比呂: 2019年度日本海洋学会秋季大会 (2019). 気候変動に伴う浅海生態系分布変化の予測
- 73) 戸田慎治, 相馬明郎, 渋木尚, 茂木博匡, 桑江朝比呂: 海洋理工学会令和元年度秋季大会 (2019). 亜熱帯海草生態系の気候変動緩和機能とメカニズム解明の試み
- 74) 棚谷灯子, 金城信之, 青山宗平, 長谷川巖, 鈴木高二朗, 中川康之, 桑江朝比呂: 日本サンゴ礁学会第22回大会 (2019). 防波堤における通水部の流れ場とサンゴの着生の関係
- 75) 赤塚真依子, 高山百合子, 伊藤一教, 渡辺謙太, 桑江朝比呂, 源利文: 土木学会年次学術講演会 (2019). 海草の季節変化における環境DNA検出に及ぼす分析阻害の影響検討
- 76) 高井則之, 伊藤洸, 福島英登, 松宮政弘, 上田眞吾, 桑江朝比呂: 令和元年度日本水産学会秋季大会要旨集 (2019). 藻場の海藻と中深層性エビ類の食物連鎖関係
- 77) 渡辺謙太, 桑江朝比呂: 日本地球惑星科学連合2019年大会 (2019). 沿岸潟湖の有機炭素貯留に人工的な湖口開削が与える影響
- 78) Banno, M., T. Tomii, T. Tanaya, and T. Kuwae: Ocean Sciences Meeting 2020 (2020) Novel Observation of Bathymetry in the Surf Zone using a UAV-mounted Green LiDAR
- 79) 清家弘治, 伴野雅之, 渡辺謙太, 桑江朝比呂, 荒井将人, 佐藤一: 日本地球惑星科学連合2020年大会 (2020). 底生生物によるろ過食が水柱の基礎生産者量に与える影響: 開放性砂浜海岸・潮下帯の例

(3) 知的財産権

特筆すべき事項はなし

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 港湾空港技術研究所夏の一般公開（2015年7月25日，観客総数818名）で研究施設の公開と解説（干潟水槽・ブルーカーボンなど，参加者約400名）
- 2) 港湾空港技術研究所「豊かな海をつくる 海と空の研究所探検ツアー」（主催：シーパラこども海育（うみいく）塾，2015年7月27日，港湾空港技術研究所，参加者約60名）
- 3) 一般公開シンポジウムにて講演（桑江朝比呂）「ブルーカーボン研究のこれまでとこれから，地球温暖化対策への切り札?!」（主催：横浜エフエム株式会社，（株）三菱総研，横浜市，第3回ヨコハマブルーカーボンアカデミーセミナー，2015年8月29日，三菱総研，対象者：一般市民応募者，学識経験者，NPO法人，行政関係者など，参加者約50名）
- 4) 一般公開シンポジウムにて講演（桑江朝比呂ほか）「東京湾におけるブルーカーボン研究」（第16回東京湾シンポジウム，2015年10月23日，横浜赤レンガ倉庫，対象者：行政関係者，一般市民応募者，学識経験者，NPO法人など，参加者約200名）
- 5) 港湾空港技術特別講演会 in高松にて講演（桑江朝比呂）「沿岸生態系の形成・活用」（2015年11月17日，参加者約120名）
- 6) 一般公開シンポジウムにて講演（桑江朝比呂）「東京都市周辺の沿岸生態系が二酸化炭素を吸収する」（横浜国大統合的海洋教育・研究センター第13回シンポジウム，2015年12月7日，横浜開港記念館，対象者：一般市民応募者，学識経験者，NPO法人，行政関係者など，参加者約120名）
- 7) 市民講座にて講演（桑江朝比呂）「ブルーカーボン研究の最前線」（市民講座「BSフジテレビ素敵なスマートライフ（一社）ブルーカーボン研究連携機構設立セミナー」，2016年3月12日，銀座三越，対象者：一般市民，学識経験者，NPO法人，行政関係者など，参加者約50名）
- 8) アマモサミット in備前にて講演（桑江朝比呂）「アマモ場による CO2の吸収や炭素隔離（ブルーカーボン）」（2016年6月3日，日生市民会館，対象者：一般市民，学識経験者，NPO法人，行政関係者など，参加者約150名）
- 9) 第15回海の森づくりシンポジウムにて講演（桑江朝比呂）「CO2吸収源としての河口浅海域の活用」（2016年6月4日，日本大学理工学部，対象者：一般市民，学識経験者，NPO法人，行政関係者など，参加者約50名）
- 10) 港湾空港技術研究所夏の一般公開（2016年7月23日，観客総数1271名）で研究施設の公開と解説（干潟水槽・ブルーカーボンなど，参加者約600名）
- 11) 港湾空港技術研究所「豊かで安全な海をつくる/海と空の研究所探検ツアー」（主催：シーパラこども海育（うみいく）塾，2016年7月25日，港湾空港技術研究所，対象者：一般市民応募者，参加者約60名）
- 12) 大島丸オンボードセミナーにて講演（桑江朝比呂ほか）「浅い海は気候変動対策に役立つ / 海ゴミ問題 / 干潟の鳥は何を食べているか」（2016年9月10日，東京都立国際高校大島丸内，対象者：東京都立国際高校生徒，参加者約10名）
- 13) 琉球大学・港湾空港技術研究所研究連携協定締結記念イベントにて講演（桑江朝比呂ほか）「沖縄に分布するサンゴ等生態系の保全と活用に関する研究」（2016年9月29日，琉球大学，対象者：一般市民，学識経験者，NPO法人，行政関係者など，参加者約100名）
- 14) 第17回東京湾シンポジウムにて講演（桑江朝比呂ほか）「比較順位法を用いた干潟がもつサービスの経済評価の検討」（2016年10月21日，横浜赤レンガ倉庫，対象者：行政関係者，一般市民応募者，学識経験者，NPO法人など，参加者約200名）
- 15) 日本微生物生態学会横須賀2016併催市民講演会&サイエンスエンターテイメント「サイエンスは最高のエンターテイメントや Day!」にて講演（桑江朝比呂）「君はペリーが見た史上最強の東京湾とその生態系を知っているか」（2016年10月22日，横須賀市文化会館，対象者：一般市民，NPO法人など，参加者約500名）
- 16) 港湾空港技術特別講演会 in新潟 2016にて講演（桑江朝比呂）「グレーインフラとグリーンインフ

- ラを活用した海岸防衛と気候変動対策」（2016年11月9日，朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター，参加者約150名）
- 17) シンポジウムにて講演（桑江朝比呂）「ブルーカーボンと自治体や日本」（主催：ヨコハマ海洋環境みらい都市研究会（UDC-SEA），2016年11月30日，横浜開港記念館，対象者：学識経験者，NPO法人，行政関係者など，参加者約20名）
 - 18) ブルーカーボン研究会設立記念講演会にて講演（桑江朝比呂）「ブルーカーボンをめぐる国内外の研究・施策・実践の動向」（2017年2月10日，AP新橋虎ノ門，対象者：民間企業，学識経験者，NPO法人，行政関係者など，参加者約200名）
 - 19) 一般社団法人日本プロジェクト産業協議会（JAPIC）にて講演（桑江朝比呂）「ブルーカーボンをめぐる国内外の研究・施策・実践の動向」（2017年3月15日，鉄鋼会館，対象者：民間企業，学識経験者，行政関係者など，参加者約40名）
 - 20) 港湾空港技術研究所施設見学（干潟実験施設，アマモ水槽，海底流動水槽などについて）（年間約30回，毎回約10～30名）
 - 21) インターネット上での研究成果の発信（港湾空港技術研究所沿岸環境研究グループHPの全体ページ，ならびにFace BookやTwitterを活用した，研究成果の発信（桑江朝比呂））
 - 22) 桑江朝比呂：GEカレッジホール（2017）海における3つの色：ブルーカーボン，グレーインフラ，グリーンインフラ．
 - 23) 桑江朝比呂：笹川平和財団ビル（2017）地球温暖化対策としてのブルーカーボンの可能性～研究と実践の最前線～．
 - 24) 桑江朝比呂：信州大学長野キャンパス（2017）東京湾の過去・現在・未来 東京湾の環境をシミュレーション．
 - 25) 桑江朝比呂：RCC文化センター（2017）再生された干潟における生態系の発達と自律安定．
 - 26) 桑江朝比呂：鉄鋼会館（2017）ブルーカーボンをめぐる国内外の研究と国際交渉の動向．
 - 27) 桑江朝比呂：東京港建設事務所（2017）沿岸生態系の活用：ブルーカーボンとグリーンインフラ．
 - 28) 桑江朝比呂：TKP虎ノ門（2017）趣旨説明，沿岸浅海域における気候変動の緩和と人為影響，ブルーカーボンの今後（3題）．
 - 29) 桑江朝比呂，棚谷灯子，伴野雅之，波利井佐紀：那覇第2地方合同庁舎（2017）サンゴ礁生態系の保全と活用．
 - 30) 桑江朝比呂：鉄鋼会館（2017）ブルーカーボン（沿岸生態系）による緩和策と適応策の経済評価．
 - 31) 桑江朝比呂：神戸大学（2017）趣旨説明，沿岸浅海域における気候変動の緩和と人為影響，ブルーカーボンの今後（3題）．
 - 32) 桑江朝比呂：東京都中小企業振興公社中小企業会館（2017）ブルーカーボンとグリーンインフラ．
 - 33) 桑江朝比呂：鉄鋼会館（2017）ブルーカーボン（沿岸生態系）による緩和策と適応策の経済評価 その2．
 - 34) 桑江朝比呂：経団連会館（2017）生態系保全と気候変動対策を繋ぐブルーカーボン．
 - 35) 桑江朝比呂：日本消防会館（2017）ブルーカーボン生態系を活用した気候変動対策．
 - 36) 桑江朝比呂：尚友会館（2017）グリーンインフラの費用対効果．
 - 37) 桑江朝比呂：三菱UFJリサーチアンドコンサルティング（2018）海岸におけるグリーンインフラ：ブルーカーボンを活用した気候変動の緩和と適応．
 - 38) 桑江朝比呂：神戸地方合同庁舎（2018）省令改正により重要となる「生態系や環境への配慮や活用」ブルーカーボンとグリーンインフラ．
 - 39) 桑江朝比呂：大さん橋ホール（2018）きれいで豊かで二酸化炭素を吸収する海はつくれるか．
 - 40) 桑江朝比呂「ブルーカーボンの動向」（カーボンリサイクルイノベーション（CRI）研究会，第4回CRI研究会，2019年7月22日，AP虎ノ門，約50名）にて講演
 - 41) 桑江朝比呂，敦賀港湾事務所ミニ講演会，敦賀港湾事務所，（2018），「グリーンインフラとブルーカーボン」

- 42) 桑江朝比呂, 博多湾NEXT会議設立総会, 天神ビル, (2018), 「海の新たな可能性, ブルーカーボン」
- 43) 桑江朝比呂, ブルーカーボン講演会, TKP品川, (2018), 「ブルーカーボン生態系によるCO2吸収ー我が国における吸収見込量の試算ー」
- 44) 桑江朝比呂, 博多湾NEXT会議設立総会, 港空研, (2018), 「海の新たな可能性, ブルーカーボン」
- 45) 桑江朝比呂, 棚谷灯子, 鈴木高二朗, 沖縄港湾空港技術講演会, 沖縄総合事務局, (2018), 「省令改正により重要となるサンゴ共生型港湾構造物」
- 46) 桑江朝比呂, 海洋立国懇話会, 剛堂会館ビル, (2018), 「海におけるグリーンインフラとブルーカーボンの活用」
- 47) 桑江朝比呂, 第 54 回水工学に関する夏期研修会, 山口大学工学部, (2018), 「海岸におけるグリーンインフラの活用」
- 48) 鈴木昌弘, 桑江朝比呂, 平成30年度 産総研 エネルギー・環境シンポジウム, 機械振興会館ホール, (2018), 「水辺環境(水質)とブルーカーボン: 浅海生態系の修復と創生技術」
- 49) 桑江朝比呂, 全国アマモサミット2018in阪南・シンポジウム, 阪南市立サラダホール, (2018), 「浅海生態系におけるCO2吸収量の全国推計」
- 50) 桑江朝比呂, 気候変動枠組条約第24回締約国会議 (UNFCCC COP24) サイドイベント, ポーランド・カトヴィツェ, (2018), 「Blue Carbon in Shallow Coastal Ecosystems」
- 51) 桑江朝比呂, シンポジウム気候変動適応策と生態系を活用した防災・減災, 東大生産研究所, (2018), 「海岸におけるグリーンインフラストラクチャー」
- 52) 桑江朝比呂, APIC環境部会, 鉄鋼会館, (2018), 「COP24 参加報告Katowice, Poland」
- 53) 桑江朝比呂「国のブルーカーボン検討状況及び国内外のブルーカーボンの動向」(横浜市 自治体ブルーカーボン推進連絡会議, 2019年7月23日, 横浜市役所, 約20名)にて講演
- 54) 桑江朝比呂「国のブルーカーボン検討状況及び国内外のブルーカーボンの動向」((一社)産業環境管理協会 気候変動による自然資本への影響と保全・対策に関するシンポジウム, 2019年11月14日, 東海大学校友会館, 約100名)にて講演
- 55) 桑江朝比呂「陸はどのような影響を海に与えているかー炭素の目からー」(環境研究機関連絡会, 環境研究交流セミナー, 2019年12月13日, つくば国際会議場, 約80名)にて講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 毎日新聞 (2015年4月17日, 夕刊, 14頁, 「沿岸植物CO2吸収に貢献港湾空港技術研プランクトンより多く」) (桑江朝比呂)
- 2) 港湾空港タイムス (2015年4月20日, 1頁, 「港空研海草場が炭素貯留世界で初めて実証」) (桑江朝比呂)
- 3) 港湾新聞 (2015年5月12日, 2頁, 「海草場で炭素が効率的に貯留される仕組みを港空研初解明 CO2の吸収に海草場生態系の保全・再生が効果的」) (桑江朝比呂)
- 4) エフエム横浜生放送出演 (松田裕之・桑江朝比呂) (2015年5月22日, 「E-ne! ~good for you~ SPECIAL ヨコハマブルーカーボンって何?」)
- 5) 港湾空港タイムス (2015年10月19日, 4頁, 「港湾空港技術研究所最前線ブルーカーボンによる気候変動緩和機能の活用」) (桑江朝比呂)
- 6) エフエム横浜生放送出演 (桑江朝比呂) (2015年10月23日, 「E-ne!~good for you~SPECIAL ヨコハマ・ブルーカーボンのこれから」)
- 7) 港湾新聞 (2015年10月27日, 2頁, 「【連載】港空研の中長期展望⑤インタビュー沿岸生態系の形成・活用に関する研究」) (桑江朝比呂)
- 8) 港湾新聞 (2015年11月17日, 1頁, 「港空研初実証沿岸域に生息するアマモが海中だけでなく大気

- 中のCO₂を吸収)」(桑江朝比呂)
- 9) 日刊建設工業新聞(2016年2月29日, 2頁, 「ブルーカーボン研究連携機構が発足 3月10~13日記念セミナー」)(桑江朝比呂)
 - 10) 日刊建設工業新聞(2016年3月14日, 2頁, 「ブルーカーボンテーマに講演研究連携機構が設立記念セミナー」)(桑江朝比呂)
 - 11) 神奈川新聞(2016年4月3日, 21頁, 「脱温暖化×地産地消海の恵み熱視線横浜市ワカメ養殖推進, CO₂削減排出量埋め合わせ, 先駆的事業」)(桑江朝比呂)
 - 12) 港湾新聞(2016年6月21日, 2頁, 「みなと総研が第30回港友研究会『気候変動の緩和策と適応策としての沿岸生態系の保全や再生』5/16」)(桑江朝比呂)
 - 13) 読売新聞(2016年9月21日, 全国版朝刊, 11頁, 「【論点】「海の森」の力見直したい」)(桑江朝比呂)
 - 14) 港湾空港タイムス(2016年10月31日, 1頁, 「国総研東京湾シンポジウム開催」)(桑江朝比呂)
 - 15) 港湾新聞(2016年11月1日, 2頁, 「国総研が第17回東京湾シンポジウム開催」)(桑江朝比呂)
 - 16) 建設通信新聞(2017年2月14日, 2頁, 「浅海域に炭素定着ブルーカーボン研設立記念で講演会」)(桑江朝比呂)
 - 17) 日刊水産経済新聞(2017年2月16日, 1頁, 「ブルーカーボン研究会設立温暖化対策へ藻場拡大」)(桑江朝比呂)
 - 18) 港湾空港タイムス(2017年2月20日, 1頁, 「藻場拡大へブルーカーボン研究会設立港湾・海域の温暖化対策」)(桑江朝比呂)
 - 19) 港湾新聞(2017年2月21日, 1頁, 「2/10ブルーカーボン研究会設立記念講演会盛大に開催関係者集結」)(桑江朝比呂)
 - 20) 通常国会オンライン中継(2017年3月7日, 参議院予算委員会, ブルーカーボンについて質疑(質問者:朝日健太郎議員))
 - 21) 中国新聞(2017年3月19日, 16頁, 「酸性化加速の恐れ」)(港湾空港技術研究所)
 - 22) 中国新聞(2017年3月21日, 3頁, 「藻場新たな価値に光アマモCO₂吸収に期待」)(桑江朝比呂)
 - 23) 港湾新聞(2017年4月25日, 1頁, 「3/17 ブルーカーボン研究会第2回開催気候変動対策から水産・港湾環境解決へ」)
 - 24) 朝日新聞朝刊(2017年4月25日, 25頁, 「お知らせ 関心高まるブルーカーボン」)
 - 25) 中国新聞(2017年4月25日, 3頁, 「藻場 新たな価値に光 アマモCO₂吸収に期待」)
 - 26) 港湾新聞(2017年5月, 1頁, 「3/17 ブルーカーボン研究会第2回開催気候変動対策から水産・港湾環境解決へ」)(桑江朝比呂)
 - 27) 赤旗 ほんだな(2017年7月2日, 「ブルーカーボン」)
 - 28) 朝日新聞WEBRONZA(2017年7月6日, 「ブルーカーボン:海洋生態系が吸収する二酸化炭素 世界でも稀な日本の産官学連携の取り組みに注目を」)
 - 29) 港湾新聞(2017年9月12日, 2頁, 「港空研がブルーカーボンセミナー開催 科学・施策・実践に関する最先端の動向 7月18日」)
 - 30) 港湾空港タイムス(2017年11月27日, 1頁トップ, 「第3研究会 ブルーカーボン活用方策検討 年度内目途 展開可能性, 定量的評価等」)
 - 31) 港湾新聞(2018年2月6日, 2頁, 「11/22 水底質浄化技術協会 第43回水底質浄化技術セミナー」)
 - 32) 雑誌 釣り情報(2018年2月15日, 96-97頁, 「魚眼海眼(第234回)横浜ブルーカーボン①」)
 - 33) 雑誌 月間ビジネスアイ エネコ(2018年3月1日, 8-11頁, 「温暖化対策で注目されるブルーカーボン “海洋国家”日本も高いポテンシャル」)
 - 34) 雑誌 釣り情報(2018年3月1日, 94-95頁, 「魚眼海眼(第235回)横浜ブルーカーボン②」)
 - 35) 毎日新聞朝刊(2018年3月6日, 28頁, 「日本の海 CO₂削減に貢献 干潟, 藻場など 年間173万トン吸収」)
 - 36) 港湾新聞(2018年3月13日, 1頁トップ, 「ブルーカーボン研究会 わが国初CO₂吸収量見込みを試

算 2030年には最大で約910万トンCO₂/年の吸収)」

- 37) 建設通信新聞 (2018年3月15日, 1頁, 「海洋生態系CO₂吸収量 30年に全体の25% ブルーカーボン研が試算」)
- 38) 雑誌「日経コンストラクション」 (2018年5月14日, 687号, 32-35頁, 「海中に眠るビジネス ブルーカーボンに商機」)
- 39) 日経クロステック (2018年5月28日, 「グリーンインフラ”海岸に自然と人工物のハイブリッド”が当たり前 社会実装へカウントダウン8」)
- 40) 日経クロステック (2018年5月30日, 「グリーンインフラ 気候変動対策の切り札”ブルーカーボン生態系”社会実装へカウントダウン9」)
- 41) 雑誌日経ビジネス (2018年6月11日, 1945号, 132-134頁, 「テクノトレンド023 海中の藻場造成に多様な商機ブルーカーボンに建設業が注目」)
- 42) 港湾新聞 (2018年6月19日, 2頁, 「6/1 ブルーカーボン研究会が第6回研究会と第2回講演会開催」)
- 43) 朝日新聞土曜版 (2018年8月25日, 全国版, 4頁, 「be report “ブルーカーボン”を増やす 二酸化炭素吸収を担う”海の森”」)
- 44) 読売新聞 (2018年9月17日, 神奈川版, 25頁, 「海洋生物と共生 探る 生態系保全へ研究続く」)
- 45) 日本経済新聞朝刊 (2018年11月19日, 全国版, 38頁, 「海藻のCO₂吸収量は? 港空研 温暖化対策調査を拡大 今冬, 福岡や山口でも」)
- 46) loomberg (2018年11月30日 「A Steel Company Plans to Save the Ocean With Its Molten Waste」)
- 47) ブルームバーグ (2018年11月30日 「“海の砂漠化”, 鉄鋼スラグが救世主に—人工の藻場でコンブよみがえる」)
- 48) 毎日新聞朝刊社説 (2019年1月18日, 全国版, 5頁, 「次の扉へ 海の温暖化と酸欠 日本こそ対応策の先頭に」)
- 49) 読売新聞夕刊 (2019年2月12日, 全国版, 13頁, 「海草育てCO₂削減 “ブルーカーボン”国内で動き長い海岸線 高い吸収力 米豪など算定対象に」)
- 50) 朝日小学生新聞 (2019年5月21日, 3頁, 「海草でストップ温暖化 アマモなどが吸収する二酸化炭素 ブルーカーボン研究が盛んに」)
- 51) 毎日新聞オンライン速報 (2019年6月11日, 国土交通省, 「CO₂削減に「ブルーカーボン」活用 藻場やマングローブ林を吸収源に」)
- 52) 毎日新聞朝刊 (2019年6月12日, 6頁, 「藻場=CO₂吸収源 「ブルーカーボン」国交省議論」)
- 53) 毎日新聞朝刊 (2019年7月10日, 3頁, 「質問なるほど ブルーカーボン, どんな仕組み? 海の植物がCO₂吸収 日本沿岸で年173万トン」)
- 54) 日本経済新聞朝刊 (2019年8月18日, 30頁, 「海の森林, 温暖化防ぐ? 藻場再生, CO₂吸収源に」)

(6) その他

2019 年度日本沿岸域学会 出版・文化賞, 日本沿岸域学会, 堀正和・桑江朝比呂「ブルーカーボン—浅海におけるCO₂隔離・貯留とその活用—」, 2017年6月に地人書館から出版した書籍

8. 引用文献

- 1) Nellemann C, Corcoran E, Duarte CM, Valdes L, De Young C, Fonseca L and Grimsditch G (2009): Blue Carbon. A Rapid Response Assessment. United Nations Environmental Programme, GRID-Arendal, Birkeland Trykkeri AS, Birkeland.
- 2) Duarte CM, Middelburg JJ and Caraco N (2005): Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle., Biogeosciences Discuss, Vol.1, pp.659-679.Herran SD, Dai H, Hijioka Y and Kainuma

- M (2017): SSP: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways., *Glob. Environ. Change*, Vol.42, pp.268-283, doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.06.009.
- 3) Kuwae T and Hori M (2019a): *Blue Carbon in Shallow Coastal Ecosystems: Carbon Dynamics, Policy, and Implementation.*, Springer Nature, pp.373.
 - 4) Bridgham SD (2014): Carbon dynamics and ecosystem processes., In: Batzer DP, Sharitz RR (eds), *Ecology of freshwater and estuarine wetlands.*, University of California Press, Berkeley, pp.277-309.
 - 5) 桑江朝比呂, 吉田吾郎, 堀正和, 渡辺謙太, 棚谷灯子, 岡田知也, 他 (2019): 浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計, *土木学会論文集B2 (海岸工学)*, Vol.75, No.1, pp.10-20.
 - 6) Sohma A., Sekiguchi Y., Kuwae T and Nakamura Y (2008): A benthic–pelagic coupled ecosystem model to estimate the hypoxic estuary including tidal flat—Model description and validation of seasonal/daily dynamics. *Ecological modelling*, 215(1-3), pp.10-39, doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.02.027.
 - 7) Fujimori S, Hasegawa T, Masui T, Takahashi K, Harran SD, Dai H, Hijioka Y and Kainuma M (2017): SSP: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways., *Glob. Environ. Change*, Vol.42, pp.268-283, doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.06.009.
 - 8) Durr HH, Laruelle GG, van Kempen MC, Slomp PC, Meybeck M and Middelkoop H (2011): Worldwide typology of nearshore coastal systems: Defining the estuarine filter of river inputs to the oceans., *Estuaries Coasts*, Vol.34, pp.441-458, doi:10.1007/s12237-011-9381-y.
 - 9) Kuwae T and Hori M (2019b): *Blue Carbon in Shallow Coastal Ecosystems: Carbon Dynamics, Policy, and Implementation.*, Springer Nature, pp.7.
 - 10) Krause-Jensen D and Duarte CM (2016): Substantial of macroalgae in marine carbon sequestration., *Nature Geoscience*, Vol.9, No.10, 737-742, doi:10.1038/NGEO2790.
 - 11) UNEP-WCMC (2017a): Global Distribution of Coral Reefs., <http://data.unep-wcmc.org/datasets/1>.
 - 12) UNEP-WCMC (2017b): Global Distribution of Seagrasses., <http://data.unep-wcmc.org/datasets/7>.
 - 13) UNEP-WCMC (2017c): Global Distribution of Saltmarshes., <http://data.unep-wcmc.org/datasets/43>.
 - 14) UNEP-WCMC (2017d): Global Distribution of Mangroves., <http://data.unep-wcmc.org/datasets/5>.
 - 15) Kayanne H, Harii S, Yamano H, Tamura M, Ide Y and Akimoto F (1999): Changes in living coral coverage before and after the 1998 bleaching event on coral reef flats of Ishigaki Island, Ryukyu Islands., *Journal of the Japanese Coral Reef Society*, Vol.1, pp.73-82 (in Japanese with English abstract).
 - 16) Guinotte JM, Buddemeier RW and Kleypas JA (2003): Future coral reef habitat marginality: temporal and spatial effects of climate change in the Pacific basin., *Coral Reefs*, Vol.22, pp.551-558.
 - 17) Yara Y, Vogt M, Fujii M, Yamano H, Hauri C, Steinacher M, et al. (2012): Ocean acidification limits temperature-induced poleward expansion of coral habitats around Japan., *Biogeosciences*, Vol.9, pp.4955-4968, doi:10.5194/bg-9-4955-2012.
 - 18) Kleypas JA, Buddemeier RW, Archer D, Gattuso JP, Langdon C and Opdyke BN (1999): Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs, *Science*, Vol.284, pp.118-120.

Integrated approach for ecosystem-based mitigation and adaptation to climate change

Principal Investigator: Hiroyuki MATSUDA

Institution: Yokohama National University
79-7, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama City, Kanagawa
240-8501, JAPAN

Tel: +81-45-339-4362 / Fax: +81-45-339-4368

E-mail: hymatsuda@gmail.com

Cooperated by: National Institute of Environmental Studies, Forest Products Research Institute, Port and Airport Research Institute

[Abstract]

Key Words: Biodiversity; Blue carbon; Disturbance; Ecosystem model; Ecosystem services; Footprint analyses; Habitat suitability model; Land use change; Scenario analyses; Socioeconomic model, (349 words)

Ecosystem conservation can be effective in mitigation and adaptation to climate change. There is a trade-off between the economic benefits of current generation and the increased ecological risk for future generations. We will predict future changes in ecosystem services under multiple policy scenarios, clarify the relationship between global mitigation measures and local adaptation measures and their trade-offs, and contribute to integration measures. We will develop methods for predicting and assessing the impact of climate change and land use change on biodiversity and ecosystem services. Ecosystems can contribute to both mitigation and adaptation measures to climate change. In parallel, increasing natural disasters is a major concern in society to face the impacts of changing climate. Ecosystems are also affected by both climate change itself and land use change to prevent climate change. We will focus on the heterogeneity of impacts in the tropical, temperate, and cold regions, and between developed and developing countries. Using biodiversity and nitrogen footprint indexes, we will clarify which country's affluent life is affecting the environment of other countries.

Therefore, we will develop a global database for coastal ecosystems and evaluate the disaster mitigation and carbon storage effects of coastal ecosystems. We will also attempt economic evaluation of them. On land, we have developed a method to evaluate the impact of climate change and land use change on the habitable land area of each species, and climate change and land use change under the RCP2.6 and RCP8.5 scenarios by region and taxon. We will predict the quantitative impact of synergistic effects between the two. Based on climate change and land use changes under the RCP8.5 and RCP2.6 scenarios, a species distribution model for predicting suitable future habitats and assessment of the impact of each flora and major taxa. Established a method that can fauna. We find that climate change has a greater impact on biodiversity than changes in land use, and that RCP8.5 has a greater impact than RCP2.6. Regarding the future prediction of the global distribution area of coastal ecosystems, although the area of coral habitat has largely disappeared, the area of seaweed beds and other ecosystems has not changed significantly under the RCP2.6. Based on field experiments, data syntheses, and theoretical works, we provide the scientific basis that is necessary for policy makers and land managers. In this regard, our findings could help bridge many efforts for climate change policies and biodiversity policies.