

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04322

研究課題名(和文) 沿岸生態系の熱帯化における生態学的・社会的影響の評価と適応策の策定

研究課題名(英文) Analysis and adaptation strategy on ecological and social consequences of tropicalization in coastal ecosystems

研究代表者

熊谷 直喜 (Kumagai, Naoki)

国立研究開発法人国立環境研究所・気候変動適応センター・研究員

研究者番号：00714221

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：気候変動に伴う分布変化が生態系基盤となる生物群において生じると、関連する多くの生物へと波及し、生態学的・社会経済的に影響が及ぶ。本研究は、沿岸生態系の主要な一次生産者である大型褐藻と造礁サンゴを対象とし、気候変動影響に加えて地域環境や植食圧など生物間相互作用との関連を現地調査・解析することで、気候変動影響下における将来の分布変化や避難場所の特定を試みた。また生態系基盤種群の変化に伴う漁業など沿岸利用における変化を現地聞き取り調査し、熱帯化に伴う社会経済学的な影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、生態系の気候変動影響は単純な南北勾配ではなく、地域環境や生物間相互作用と関連したモザイク状のパターンとなることを示した。これは気候変動適応策を講ずる上で、地域的な避難場所の存在や地域単位の対策による生態系保全のポテンシャルを示す意義のある結果である。また社会経済学の現地調査は、このスケールでの研究調査の実施自体が目新しく、地元およびスペインの海外メディアに取り上げられる等の社会的反響があるなど、今後の解析結果への大きな社会的期待が寄せられた。

研究成果の概要(英文)：When distributional changes induced by climate change occur in ecologically fundamental groups, they spread to many associated organisms, with ecological and socio-economic consequences. This study attempted to identify future distributional changes and refuge areas under the climate change impacts by conducting field surveys and analyzing the relationship between climate change impacts and species interactions, such as local environment and herbivorous pressure, for brown macroalgae and reef-building corals, which are the main primary producers in coastal ecosystems. Further, we interviewed local coastal fishers including fisheries leaders on changes in coastal use, such as fisheries, associated with changes in the ecologically fundamental groups, and the socio-economic impacts of tropicalization were clarified.

研究分野：沿岸生態系における気候変動影響の検出・予測

キーワード：気候変動 熱帯化 社会生態学 群集シフト 造礁サンゴ 大型褐藻 磯焼け 沿岸漁業

1. 研究開始当初の背景

地球上の生物、とくに海洋生物の分布は気候変動によって再編成しつつある (García Molinos *et al.* 2015 Nature Clim. Chang.)。このような分布変化が生態系の基盤となる生物群において生じると、関連する多くの生物へと波及し、生態学的・社会経済的な影響が生じるだろう (Pecl *et al.* 2017 Science)。大型海藻と造礁サンゴは沿岸生態系の主要な一次生産者であり、生息空間を巡る競争関係にあるが、気候変動のもとで両者の世界的な分布が変化している (Yamano *et al.* 2011 Geophys. Res. Lett.; Vergés *et al.* 2014 Proc. R Soc. B)。代表者らは世界に先駆けて、日本の温帯全域を対象に、過去からの出現記録を用いた統計学的推定によって、熱帯からの海流に乗って分布を上げた魚類による海藻食害が主要な駆動因となり、海藻藻場からサンゴ群集への群集置換が進行することを初めて明らかにした (Kumagai *et al.* 2018 PNAS) (図 1)。しかし、温帯域では海藻は水産学、サンゴは生態学・地学という別の研究分野が担っており、実際の野外における海藻、サンゴ、魚類は同時に研究されてこなかったため、これらの生物間相互作用は直接的に検証されておらず、どのような環境条件・詳細な地理的位置において群集置換が生じるかは未解明である。また、生態系基盤である藻場からサンゴ群集への交替は大きな生態学的・社会経済的な影響をもたらすと予想され、持続可能な開発目標 (SDGs) の策定のためには、これらの変化に対する実践的な適応策の検討を行う必要がある。

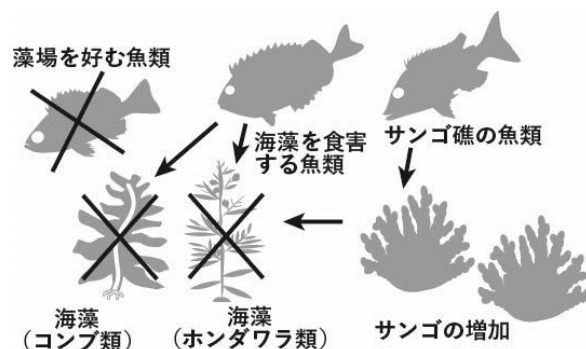


図 1 気候変動下での海藻藻場、サンゴ群集、魚類群集の関係

2. 研究の目的

四国南西部をモデル地域として、海藻とサンゴ、生息する魚類について、以下の研究目的に取り組む。本地域では 100 km 強の距離スケールの水温勾配に沿って、海藻藻場を主体とした温帯の生態系からサンゴ群集主体の熱帯化した生態系、さらにその中間的な生態系が見られ、また 1 km 程度の局所スケール内においてもモザイク状に藻場とサンゴが共存し、さらにこれらに対応した多様な魚類群集が見られる最適な研究場所である。

(1) 水温勾配等の環境条件に応じた生態系構造変化と生物間相互作用の影響、さらに気候変動による短期的・長期的な温度変化による水平分布の変化、地域環境条件と関連した鉛直分布の変化を解析し、三次元の分布変化を推定する。また、藻場やサンゴ群集の変化の駆動因でもあり変化の対象でもある魚類群集との生物間相互作用を明らかにし、海藻・サンゴ・魚類群集の分布解析を行う。

(2) 対象の生態系の生態系利用について、“熱帯化”の進行度合いや異なる生態系利用の方法による変化を定量化する。対象地域では、様々な形態・魚種の漁業やダイビング等のレジャー産業が行われ、また沿岸生態系管理においても、地元漁業者による管理(保全活動)の有無など多様な利用・管理区域が見られ、研究目的に適した調査地である。

3. 研究の方法

(1) 生息環境データ、海藻、サンゴ、魚類の分布記録の収集・整備

本研究課題の対象海域について重点的に、海水温や光透過度、流速などの環境データを収集・整備し、研究対象の生物群の出現記録(在・不在)、被度などの量的記録を論文、紀要、報告書等の文献から収集・整備した。

(2) 海藻、サンゴ、魚類の分布の野外調査・野外実験

対象生物群の分布の緯度勾配と空間的相互作用、それらの年変動を捉えるための調査・実験を行った。高知県の南西部から愛媛県の八幡浜にかけての7地域（図2）さらに各地域内に設けた沖合・岸寄の2サイトを設け、対象生物群の分布状況を調べるビデオトランセクト調査を春と秋に行った。カメラは鉛直方向（海藻、サンゴ）と水平方向（魚類）の2台を1セットとし、カメラに取り付けた水深データロガーと海面を牽引したGPSで3Dの位置情報を記録しながら遊泳し撮影した。これにより海藻とサンゴ、魚類の空間的な連続性、共存・排他関係の情報が得られ、種群間関係の推定に用いられる。また、遊泳調査中に、また大型褐藻からサンゴへの群集シフトの駆動要因として評価するため、大型褐藻2種群を用いた摂食実験を同地域で浅所・深場の2水深で実施した。（図3）

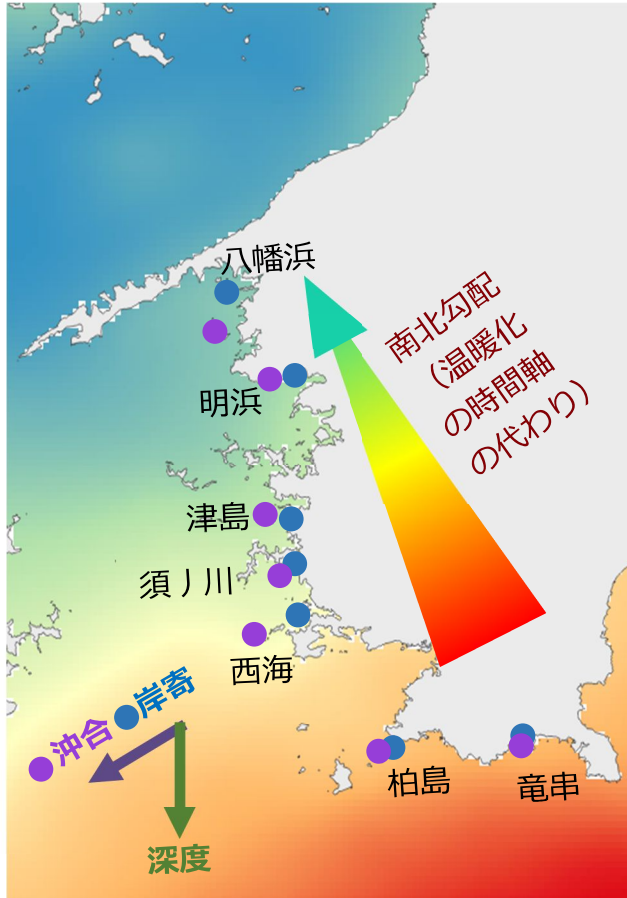


図2 野外調査・実験の調査地



図3 海藻への摂食圧の野外実験(設置した海藻と集まってきた植食魚類)

(3) 社会経済学的研究

海藻藻場やサンゴ群集が提供する生態系サービス(生物多様性、水産的価値、沿岸地域の生活など)を特定し経済的価値を評価するために、各調査地に対応した沿岸漁業や漁業資源利用についての記録の収集整備を進めた。

web 情報を用いた社会調査の拡充を試みた。ここでは Yahoo! Japan 社が提供する DS. Insight および DS. API を用いて、本研究課題に関連する生物群・生物種について、位置・時間情報を伴った人々の関心・想起構造を明らかにしようとした。これらのシステムは、人々の Yahoo! 検索データを用いて、居住地や訪問地毎にある用語の検索頻度を示したり、場所と生物名など検索用語間の関連を示すなど、検索件数さえ十分に確保できるならば、本研究課題にとって大きく貢献すると期待された。

社会経済学の現地調査をスペイン・Vigo 大学との国際共同研究として行った。調査地を、野外潜水調査と同等の地域の6市町(愛媛県西予市、宇和島市、愛南町、高知県宿毛市、大月町、土佐清水市)とし、個々の漁業者および漁協長への聞き取り調査を通じて、熱帯化の進行度合いや生態系管理および漁業形態(採取・養殖など)と関連した傾向を明らかにしようとした。

4. 研究成果

(1) 海藻やサンゴ、魚類の地理的分布・生息水深に関係する海水温や光透過度、流速などの環境データを収集・整備した。さらに、海水温の将来予測値として、気候モデルの将来予測値(RCP2.6、RCP8.5)を整備し、同様に高解像度化した。研究対象の生物群の出現記録(在・不在)を論文、紀要、報告書などの文献から収集・整備し、全国の海藻の現存量と造礁サンゴの出現記録に関してデータベース化した上でデータペーパーを出版した(Arita et al. 2020; Kitano et al. 2020)。

(2) 大型褐藻と造礁サンゴ群集の野外の潜水調査・植食圧実験は、2019、2020、2022年に大型褐藻の繁茂期に相当する5-6月の春期と衰退期に相当する10-11月の秋期において実施した。主要な生物グループとして、温帯性のコンブ類(カジメ(クロメ)、アントクメ)、温帯性ホンダワラ類、熱帯性ホンダワラ類、造礁サンゴ類(主に熱帯にも生息するミドリイシ類)、温帯性魚類、熱帯性魚類に着目した。南北の水温勾配から予想される通り、温帯性グループはいずれも北へゆくほど出現頻度が高く、熱帯性グループほど南にかけて多く出現する傾向がみられた。また、魚類による摂食圧はほぼブダイによるものであったが南方ほど大きく、その他の植食者であるウニ類(ガンガゼ類)の出現頻度も南でより高い傾向にあった。一方、鉛直方向の分布に関しては、水深が深いほど水温が低いことから、熱帯化に伴い温帯性種が深場へ分布移動すると予想したが、実際には南方へゆくほど温帯性海藻では分布が浅場へ集中する傾向がみられた。魚による摂食圧は深場より浅場で大きい傾向があったものの、深場では光合成に必要な光が十分に得られないなど、複合的な要因によって鉛直方向の分布が制約されていると推察された。その他、沖合-岸寄の地域環境の違いは海藻の分布と関連することが経験的に知られているが、本研究においても沖合ではサンゴ、岸寄では海藻が多い傾向が確認された。

これらの結果を合わせて、大型褐藻からサンゴへの群集シフトに関する緯度勾配・統合的な解析を行った。具体的には四国南西部沿岸の約100 kmの直線距離内7地域間に見られる大きな水温勾配を温暖化の時系列に見立てつつ、これに加えて水深や沖合・岸寄環境、摂食圧の影響をZero-inflatedモデルを用いて解析した。その結果、群集構成を決める要因として、水温勾配だけでなく、沖合・岸寄環境や摂食圧のいずれもが重要であることが分かった。

(3) 沿岸生態系に関連した漁業利用を示す資料として水産庁の漁業センサスに着目し、愛媛県における1973-2018年の採集漁業(貝・海藻)および養殖漁業の経営体数の記録を整備し、本研究の現地調査地に対応した八幡浜市から愛南町にかけて年代変化を比較した。仮説としては、熱帯化に伴い採集漁業から養殖漁業への転換を予想したが、北方地域では採集漁業が減少した一方で養殖漁業が増加しており、南方地域ではその逆のパターンが得られた。

DS.Insightを用いたweb調査では、沿岸生態系に生息する生物種名の検索情報の取得を試みた。この際にデータの取得を効率的に進めるため、統計解析環境Rへの実装を行った。検索の結果、対象種の検索ボリュームが少ない等の理由で統計的に検証可能な分析は実施できなかった。一方でより広い分類群や流通名に対象を上げると、自然生態系と関連のない事例が多く取り上げられてしまうなど手法の限界も見られた。また、研究対象地域を含めた国内の沿岸熱帯化が進行する地域を対象に、ダイビング等の海中観光の盛んな地域、および比較対象として隣接するがダイビング等は行われていない地域をペアとして、関連キーワード(サンゴ、磯焼け等)をDS.Insightで検索を試みた。しかし検索の結果、対象用語の検索ボリュームが少なく、ペア地域間で統計的な傾向は見いだせなかった。

現地聞き取り調査の実施については、地域の協力者や管轄の各漁協、行政機関の協力・賛同を得て、漁協長を含む沿岸漁業を営む現役漁業者124名を対象として行った。聞き取り調査は規定の項目に関して、選択式と自由記述式を組み合わせを行い、漁業への気候変動影響など環境影響、それらに対して講じてきた対策、収入への影響、将来起こり得る影響に関する展望などについて質問した。聞き取りの結果、南方地域ほど熱帯化影響が深刻であり、これまでの気候変動影響に対しても、採取・養殖のための場所や手法の検討や新たな系統の導入、新たな水産種を対象にする等の対策を実施することで対応してきた歴史があること等が分かった。

(4) まとめ：本研究の成果の一部は国内外の学術会議や査読付き国際誌で公表した他、2019年にはカナダで開催されたPICES Annual Meetingに招聘され基調講演を行うなど国際的に評価された。社会経済学の現地調査についてはCOVID-19影響によって調査の実施が2022年度末まで遅延したため、本研究課題終了時点でまだ詳細な解析結果が得られていないが、研究調査の実施自体が地元およびスペインのメディアに取り上げられる等の社会的反響があった。

本研究課題はCOVID-19禍により大きく遅延し、必要な野外調査データを取り終えるところで終了してしまっただけで、今後、本課題で取得したデータを用いた解析・モデリングを進めることで、気候変動の将来気候シナリオに応じた、対象の生態系の変化とそれに伴う生態系サービス変化についての将来予測を行い、変化に対する適応策を提案したい。気候変動影響下の生態系サービス変化についての適応策の議論は始まったばかりであり、今後具体的な予測結果に基づく適応策の提案ができれば画期的な試みとなるだろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kumagai Naoki H.	4. 巻 68
2. 論文標題 Geographic changes in distribution of macroalgal community under climate changes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Japanese Journal of Phycology	6. 最初と最後の頁 91～97
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Arita Koichi, Suzuki Haruka, Yamano Hiroya, Yabe Tohru, Kumagai Naoki H.	4. 巻 35
2. 論文標題 Quantitative records of habitat forming seaweeds found in Japanese temperate and subtropical zones (fucooids and kelps)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ecological Research	6. 最初と最後の頁 967～974
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/1440-1703.12138	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kitano Yuko F., Hongo Chuki, Yara Yumiko, Sugihara Kaoru, Kumagai Naoki H., Yamano Hiroya	4. 巻 35
2. 論文標題 Data on coral species occurrences in Japan since 1929	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ecological Research	6. 最初と最後の頁 975～985
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/1440-1703.12136	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 ABE Hiroya, MITSUI Satomi, SUZUKI Haruka, KITANO Yuko F., KUMAGAI Naoki H., YAMANO Hiroya	4. 巻 23
2. 論文標題 Use and conservation of coastal ecosystems and distribution of reef-building coral communities and macroalgae beds in the Ashizuri-Uwakai National Park and its surrounding area	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Japanese Coral Reef Society	6. 最初と最後の頁 1～19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3755/jcrs.23.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Abe, H., Suzuki, H., Kitano, Y. F., Kumagai, N. H., Mitsui, S., Yamano, H.	4. 巻 210
2. 論文標題 Climate-induced species range shift and local adaptation strategies in a temperate marine protected area, Ashizuri-Uwakai National Park, Shikoku Island, western Japan.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ocean and Coastal Management	6. 最初と最後の頁 105744
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ocecoaman.2021.105744	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Kumagai Naoki H., Garcia Molinos J., Yamano Hiroya, Takao Shintaro, Fujii Masahiko, Yamanaka Yasuhiro
2. 発表標題 Ocean currents and herbivory drive macroalgae-to-coral community shift under climate warming.
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kumagai Naoki H., Garcia Molinos J., Yamano Hiroya, Takao Shintaro, Fujii Masahiko, Yamanaka Yasuhiro
2. 発表標題 Community shifts from macroalgae to corals under climate warming: Underlying processes and adaptation strategies
3. 学会等名 PICES 2019 Annual Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 熊谷直喜
2. 発表標題 夏期の海中林枯死とサンゴ白化の発生機構の比較解析
3. 学会等名 日本藻類学会第45回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊谷直喜
2. 発表標題 サンゴ群集と海藻藻場の境目から見える底質の役割 (シンポジウムS14海洋ベントス生態学のフロンティアー底質に着目してー)
3. 学会等名 日本生態学会第68回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊谷直喜
2. 発表標題 気候変動に伴う沿岸生態系と利用の変化 (シンポジウムS08海洋生物多様性ビッグデータを基にしたマクロ生態学と海洋空間計画)
3. 学会等名 日本生態学会第69回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊谷直喜, 高橋悠紀, 中村洋平
2. 発表標題 四国南西岸の南北勾配に沿った大型褐藻・サンゴの分布変化の解析
3. 学会等名 日本藻類学会第47回大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 熊谷直喜
2. 発表標題 サンゴ礁生態系保全のための気候変動適応策 (シンポジウム: 地球温暖化をめぐる水環境の現状・課題と対応)
3. 学会等名 水環境学会第25回大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	G・MOLINOS JORGE (G MOLINOS JORGE) (30767281)	北海道大学・北極域研究センター・准教授 (10101)	
研究分担者	中村 洋平 (NAKAMURA YOHEI) (60530483)	高知大学・教育研究部総合科学系黒潮圏科学部門・准教授 (16401)	
研究分担者	久保 雄広 (KUBO TAKAHIRO) (80761064)	国立研究開発法人国立環境研究所・生物多様性領域・主任研究員 (82101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------