

温帯域における沿岸生態系（サンゴ群集，藻場）の変化と気候変動適応

Coastal ecosystem (coral communities, seaweed beds, and seagrass meadows) changes and climate change adaptation in Japanese temperate regions

阿部 博哉^{1*}・山野 博哉^{2,3}
Hiroya ABE^{1*} and Hiroya YAMANO^{2,3}

¹ 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

² 国立研究開発法人 国立環境研究所 生物多様性領域

³ 東京大学大学院 理学系研究科地球惑星科学専攻

¹ Center for Climate Change Adaptation, National Institute for Environmental Studies

² Biodiversity Division, National Institute for Environmental Studies

³ Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

摘 要

気候変動に伴う海水温の上昇による温帯域の沿岸生態系の熱帯化が世界各地で報告されている。本研究では日本の温帯域の沿岸生態系（特に造礁サンゴや大型海藻，海草類から構成される生物群集）を対象に，水温勾配に応じた現在の生物分布の特徴を把握するとともに，これまでに報告された変化や将来予測結果を整理し，気候変動適応策の検討や推進に向けた課題を議論することを目的とした。現地での潜水調査によってサンゴや大型海藻，海草の多くの種は，水温勾配に応じた分布の違いがみられた。分布域の変化はこれまでに多くの海域で報告されているとともに，将来的にもその変化が継続することが予測されている。生態系の変化は地域による違いが大きいものの，都道府県が発行する適応計画や温暖化対策計画といった行政文書ではサンゴ群集や藻場の現在もしくは将来の分布変化が記載されていない地域があり，各地域での利用や管理の実態を踏まえてそれぞれの都道府県で適切な対策を講じることが求められる。

キーワード：沿岸生態系，気候変動，将来予測，適応，熱帯化

Key words：coastal ecosystem, climate change, future projection, adaptation, tropicalization

1. はじめに

気候変動に伴う海水温の上昇は全球規模の顕著な現象であり，温帯域における沿岸生態系の熱帯化については世界各地で報告されている (Vergès *et al.*, 2019; Osland *et al.*, 2021; Zarzychny *et al.*, 2024)。サンゴ礁・サンゴ群集，海藻藻場，海草藻場は様々な生態系機能を通じて高い経済価値を有するが (Liquete *et al.*, 2013; Costanza *et al.*, 2014)，造礁サンゴ (以下，サンゴ) や大型海藻，海草は水温上昇に対する影響が大きいことが知られている (IPCC, 2019)。また，地球規模の環境ストレス (水温上昇，海洋酸性化等) だけでなく地域規模の環境ストレス (沿岸部の開発，富栄養化，食害生物の大量発生等) により生物群集の劣化が生じることが懸念され，その場合には適切な保全策・適応策を講じることが重要である。一方

で，生物の分布や現存量の変化によって新規の資源として利用できる可能性もある。これらの背景から，沿岸域の生態系の動向を適切に把握すると同時に，環境変動下での利用や保全を推進することが求められる (Abe *et al.*, 2022c)。本研究の目的は，日本の温帯域においてサンゴや大型海藻，海草から構成される生物群集を対象に，①水温勾配に応じた生物相の地理的な違いを把握すること，②これまでに生じたイベントや長期変化を整理すること，③将来の変化予測を整理すること，④適応策の検討・推進に向けた課題を議論することである。

2. 日本沿岸における現況の海洋環境と生物相の水平勾配

サンゴは太平洋側では千葉県や神奈川県以南，日

受付：2024 年 1 月 28 日，受理：2024 年 6 月 17 日

* 〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2, E-mail : abe.hiroya@nies.go.jp

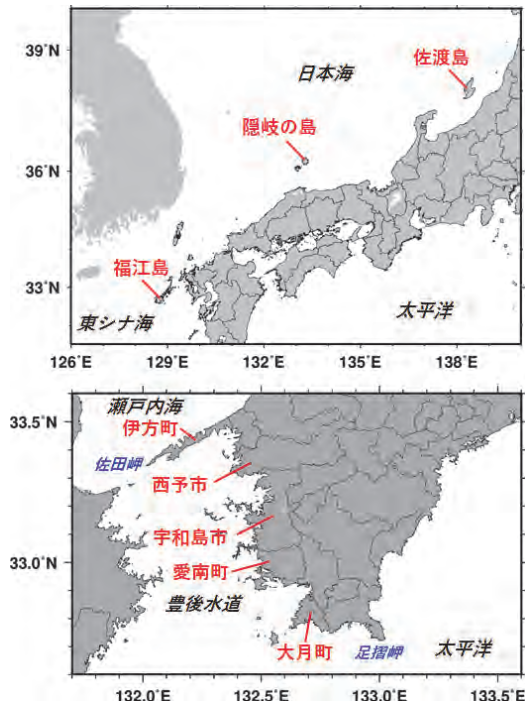


図1 研究対象域(長崎県福江島・島根県隠岐の島・新潟県佐渡島、四国南西岸)。

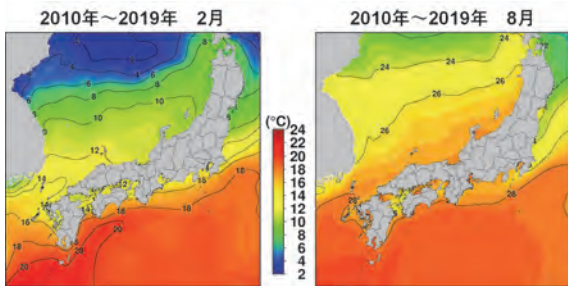


図2 日本周辺における2月及び8月の海面水温。CoralTempによる2010年代の結果を示している。

本海側では新潟県以南に分布している (Kitano *et al.*, 2020)。大型海藻や海草は日本の温帯域の広い範囲でみられる (Kumagai *et al.*, 2016; 大場・宮田, 2020)。サンゴや大型海藻、海草の成長や生残は最低・最高水温に大きく支配され、分布域は水温と強い関係がある (屋良ほか, 2009; Yara *et al.*, 2011; Takao *et al.*, 2015; 阿部ほか, 2021, 2022; Abe *et al.*, 2021b)。ここでは①東シナ海・日本海に位置する離島域(長崎県福江島、島根県隠岐の島、新潟県佐渡島)と②四国南西岸の2つのエリア(図1)において、2018年から2023年にかけての潜水調査により明らかにしたサンゴ・大型海藻・海草の分布状況と海面水温との関係について議論する。海面水温のデータはMUR SST (Chin *et al.*, 2017) 及び CoralTemp (Skirving *et al.*, 2020) を使用した。なお、現況の海面水温として2010年から2019年にかけての10年間の平均値を用いた。

はじめに、東シナ海・日本海に位置する福江島(北緯32.7度)、隠岐の島(北緯36.2度)、佐渡島(北緯38.0度)における海面水温に着目すると、夏季よりも冬季の水温の違いが大きいことが分かる。福江島と佐渡島の水温差は冬季には5℃程度であったものの、夏季には1℃~2℃程度であった(図2)。各離島におけるサンゴの分布状況をみると、福江島ではテーブル状のサンゴ(エンタクミドリイシ)を中心に多くの種数がみられたものの、隠岐の島では数種(キクメイシモドキ、ニホンアワサンゴ等)のみが確認された。筆者らの2023年の現地調査では佐渡島ではサンゴは確認できなかったものの、北限の造礁サンゴとしてキクメイシモドキの分布が報告されている (Kitano *et al.*, 2020)。大型海藻に関しては、福江島では南方系のホンダワラ類の小規模な群落が確

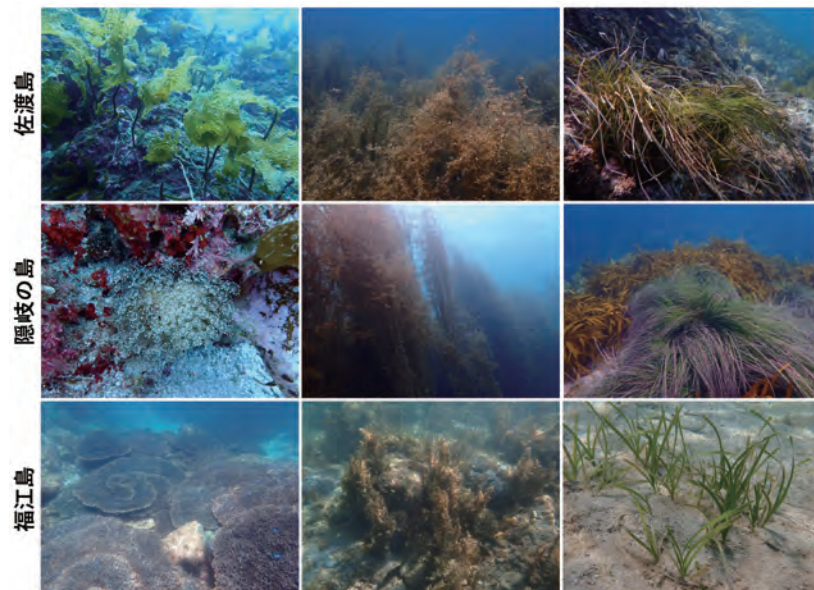


図3 東シナ海・日本海の離島(長崎県福江島、島根県隠岐の島、新潟県佐渡島)における夏季~秋季にかけてのサンゴ、大型海藻、海草を中心とした水中景観。撮影時期は2022年7月(福江島)、2023年7月及び10月(隠岐の島、佐渡島)(筆者による撮影)。

認められたが、隠岐の島や佐渡島では温帯性のホンダワラ類や多年生のコンブ類であるカジメ(クロメやツルアラメ)等の大規模な海藻群落を観察された。岩礁性の海草であるエビアマモは福江島では確認されなかったものの、隠岐の島や佐渡島では広い範囲に分布していた(図3)。

続いて、四国南西岸における冬季(2月)と夏季

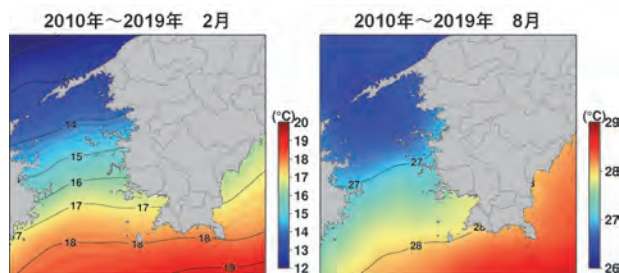


図4 四国南西岸における2月及び8月の海面水温。MUR SSTによる2010年代の10年平均の結果を示している。

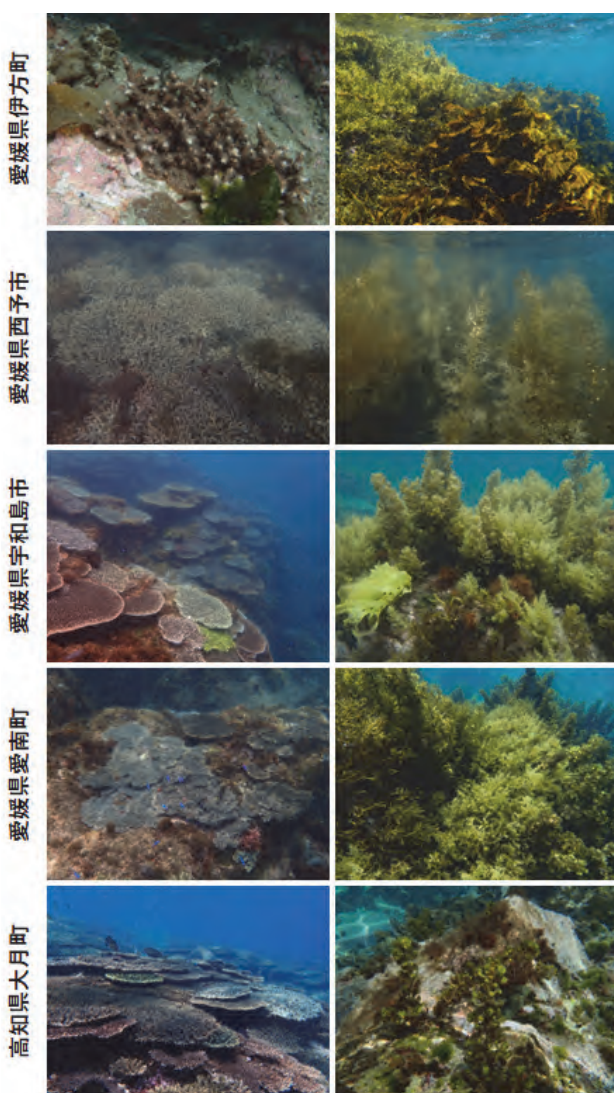


図5 四国南西岸におけるサンゴ及び大型海藻を中心とした水中景観。撮影時期は2019年5月下旬から6月上旬(筆者による撮影)。

(8月)の海面水温に着目すると、足摺岬から佐田岬にかけての水温勾配が顕著であることが分かる。特に2月は黒潮に近い南部の海域では水温が18℃以上であるものの、北に向かうにつれて水温が大きく低下し、瀬戸内海に面する佐田岬周辺では13℃程度であった。8月の水温勾配は2月と比べて小さいものの、南部では28℃を超える水温が観測されている(図4)。このような水温勾配に応じて、サンゴや大型海藻の分布状況は地域による大きな違いが生じている。サンゴに関しては、南側の海域ではクシハダミドリイシやエンタクミドリイシといったテーブル状のサンゴを中心に高い被度がみられるが、北側の海域では種数が非常に限られ、エダミドリイシやニホンアワサンゴが主体であった。大型海藻については、ヒイラギモクといった南方系のホンダワラ類が広い範囲で確認されたものの、温帯性のホンダワラ類や多年生のカジメ(クロメ)のようなコンブ類は南側ではほとんどみられなかった(図5)。

先行研究(阿部ほか, 2022)から生物の分布範囲と最高・最低水温のおおよその関係が示されているが、クシハダミドリイシ(14℃以上)、ニホンアワサンゴ(12℃以上 28.5℃未満)、カジメ(10℃以上 28℃未満)、ヒイラギモク(13℃以上)、エビアマモ(10℃以上 27.5℃未満)などは東シナ海・日本海の離島域(長崎県福江島、島根県隠岐の島、新潟県佐渡島)や四国南西岸で観察された分布状況と整合的であった。

3. 温帯域における沿岸生態系のイベントと過去からの長期変化

この章ではサンゴや大型海藻、海草について温帯域においてこれまでに生じたイベントや過去からの長期変化及び海面水温との対応を整理する。

先行研究において、サンゴの大量死や大型海藻の枯死・流出が複数件報告されている(表1)。例年よりも数℃近い低温が長期間継続した際にサンゴの斃死が観察されており(1996年冬季, 2018年冬季)、逆に夏季に高水温が続いた場合にはアラメ・カジメ類などの大型海藻が大量に消失しており(1998年夏季, 2013年夏季)、熱波や寒波が沿岸域のサンゴ群集や海藻藻場に大きな影響を与えることが分かる(表1及び図6)。また、2023年8月には日本海側を中心に広範囲で異常な高水温が観測されているが、沿岸生態系への具体的な影響は現時点で把握できていない。なお、黒潮域の水温については黒潮の流路の変動(大蛇行)の影響を強く受けることがあるため(猪原, 2019; Sugimoto *et al.*, 2020)、黒潮の離接岸に応じた水温変動及び生態系の大きな変化が生じている可能性がある。

気象庁(2024)によると、日本近海における2023年までの約100年間における海面水温の上昇率は

表 1 温帯域におけるサンゴ群集及び海藻藻場の減少に関するイベントの一例。
冬季は 1 月から 3 月前後の期間を意味している。

イベント	時期	海域	引用文献
造礁サンゴの低温白化・死亡	1996 年冬	駿河湾北東部	小坂ほか(2001)
	2018 年冬	紀伊半島西岸	野村・平林(2018)
大型海藻の枯死・流出	1998 年夏	長崎県沿岸	桐山(2009)
	2013 年夏	日本海西部沿岸	八谷ほか(2014); 吉田(2016)

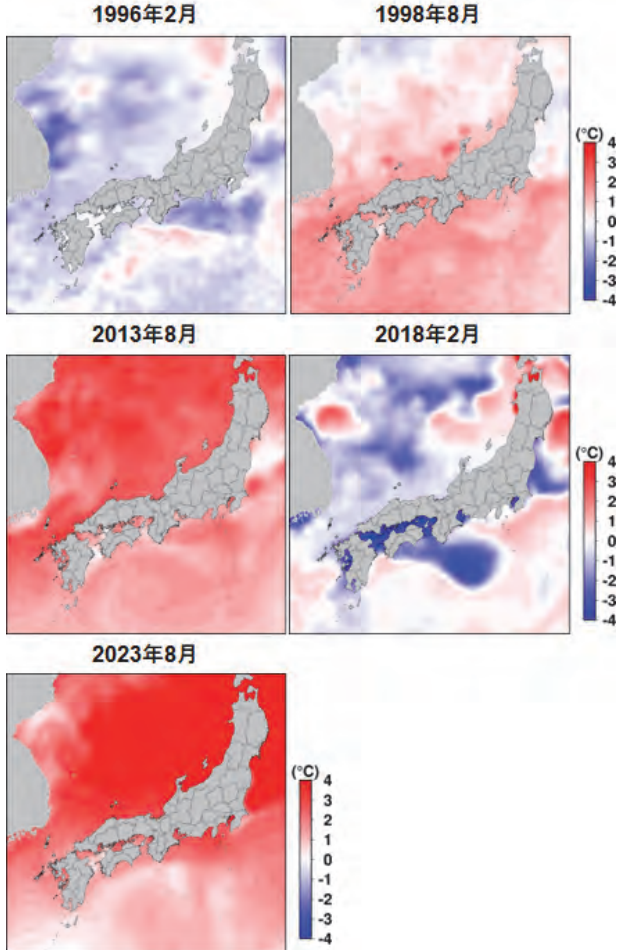


図 6 CoralTemp による日本周辺における海面水温の偏差。
2023 年 8 月を除いて、表 1 に示したイベントの発生時期に対応している。

1.28℃/100 年であり、全球平均よりも高い上昇率が観測されている。地域規模での長期変化の事例については、串本におけるサンゴの増減(野村, 2009)、長崎県周辺の藻場の衰退(桐山, 2009)、四国南西岸における海藻藻場の変化(Tanaka *et al.*, 2012)などがある。また、温帯域の分布南限における大型海藻や海草の変化についても観測されており、分布南限付近である鹿児島県長島におけるアントクメの減少(Terada *et al.*, 2021)やアマモの分布南限における鹿児島湾でのアマモの減少・消失(新北・寺田, 2023)といった事例が報告されている。また、サンゴや大型海藻に関しては全国規模での分布変化も整理

されており、サンゴの分布北上(Yamano *et al.*, 2011; Kumagai *et al.*, 2018)、大型海藻の温帯性種の減少、南方系種の増加(Kumagai *et al.*, 2018; 熊谷, 2020)が顕著な現象である。

4. 温帯域における沿岸生態系の将来予測

これまでに示したように、日本の温帯域においてはサンゴや大型海藻類の分布域の変化が観測されている。また、海草に関しては代表的な種であるアマモの分布南限での衰退が危惧される。日本周辺における海面水温の将来変化は排出シナリオや気候モデルの種類、対象とする季節、年代、海域によって大きく異なるものの、2010 年代と比べると今世紀末の昇温幅は RCP2.6 で約 1℃～2℃、RCP8.5 で約 3℃～5℃である(Nishikawa *et al.*, 2021; 阿部ほか, 2022)。今後も日本周辺の海水温の上昇などの気候変動の影響は継続すると予測されていることから、物理環境の変化に対応したサンゴや大型海藻、海草の将来予測事例も多数報告されており、以降に日本での研究事例を簡単に整理する。

日本を含んだ全球規模での植生変化の将来予測は Moki *et al.* (2023) で示されている。全国規模の評価も多く事例があり(屋良ほか, 2009; Yara *et al.*, 2011, 2012; Komatsu *et al.*, 2014; Takao *et al.*, 2015; 阿部ほか, 2022; Yuan *et al.*, 2023)、南方系種の分布域の拡大(分布北限が高緯度側にシフト)や、温帯性種の分布域の縮小(分布南限が高緯度側にシフト)が定量的に予測されている。また、阿部ほか(2022)では国立公園におけるサンゴ・大型海藻・海草の将来予測とともに分布変化に対応した公園ごとの管理策を提示している。地域規模の事例は少ないものの、四国南西岸を対象に、サンゴや大型海藻、それらの食害生物の変化に応じた生物多様性保全・漁業・観光業の各分野での市町村ごとの適応策が示されている(Abe *et al.*, 2021b)。分布域の将来予測の手法についてみると、予測因子として海面水温のみを用いたものだけでなく(屋良ほか, 2009; Yara *et al.*, 2011; Abe *et al.*, 2021b; 阿部ほか, 2022)、水温と酸性度に関する指標(Yara *et al.*, 2012)、水温と魚類の食害の影響(Takao *et al.*, 2015)、海流や食害(Kumagai *et al.*, 2018)を組み込んだものなどが採用されている。

5. 都道府県の行政文書における生態系の変化・保全・適応策の記載

行政文書の記載内容を解析することで、地域ごとの生態系の利用や認識、懸念などを把握することができる(阿部ほか, 2021; Abe *et al.*, 2022a)。自治体の行政文書に記載がある生物・生態系もしくは現象は少なからず地域の資源や課題として認識されているものと考えた。また、生物が分布しているのにもかかわらず行政文書に記載されていない場合や将来のリスクが適切に認識されていない場合などのギャップを抽出することは、今後の方策を考える上で重要である。本研究では、海に面している39の都道府県が策定した気候変動適応計画や地球温暖化対策計画において、生態系の変化や適応策(保全策を含む)がどのように記載されているかを整理した。

気候変動適応計画や地球温暖化対策計画においてサンゴや大型海藻、海草に関する記述は都道府県により頻度や内容の違いはあるものの、それぞれの地域で観測、予測、懸念されている現象が明らかとなった(表2, 表3)。表2及び表3ではスペースの都合上、7つの県の記載状況を整理している。サンゴに関しては分布域の変化についてのみ言及している県が多かったものの、徳島県や高知県では食害生物や白化、保全活動に関する記載がみられ、サンゴ群集への関心の高さがうかがえる。大型海藻・海草

の場合は変化とともに対策(保全策・適応策)まで記載されていることが特徴的であった。大型海藻や海草は藻場を構成する生物群集であり、温帯域においては沿岸域の漁業の場として重要視されている。そのため、サンゴと比較してより具体的な変化や対策の記載が多かったものと考えられる。

6. 沿岸生態系を対象とした適応策と今後の課題

本稿では日本の温帯域におけるサンゴ、大型海藻、海草の変化に着目したが、亜熱帯域や亜寒帯域でも気候変動等の影響が深刻である。サンゴや大型海藻に着目すると、亜熱帯域ではサンゴの白化(川越, 2017; Kayanne, 2017)、亜寒帯域ではコンブ類の減少(Sudo *et al.*, 2020)が顕著な現象であり、観光資源や漁業資源として極めて重要な生態系への影響が懸念される。

生物多様性保全を目的とした広い空間スケールでの保護区の選定・デザインに関する研究はこれまでにいくつか実施されている(Makino *et al.*, 2014, 2015; Yamakita *et al.*, 2017, 2022)。また、地域内でも気候変動影響の受けやすさには違いがあることが想定されるため、優先的に保全や利用を推進する場所を高い空間解像度(100 m程度～数km以内)で特定したり、地域規模のストレスを軽減したりすることが重要な課題である(Abe *et al.*, 2021a, 2022b)。自然生態

表2 都道府県の行政文書(気候変動適応計画・温暖化対策計画)におけるサンゴ群集(造礁サンゴ)の変化、保全策・適応策に関する記載の一例。

都道府県	記載概要(記載内容が変化もしくは保全・適応のどちらに該当するか)
千葉	サンゴの白化現象の頻度増大やサンゴの分布の北上が予測されている(変化)
新潟	北限域での造礁サンゴの出現頻度が高くなりつつある(変化)
静岡	サンゴ群体の分布拡大・北上(変化)
兵庫	瀬戸内海の高藻藻場がサンゴ群集に移行する可能性(変化)
徳島	高水温によるサンゴの食害生物の大量発生、サンゴの減少、より高温性の種への移行、サンゴ保全活動(変化)
高知	海水温の上昇によるサンゴの大規模な白化現象、サンゴ群集の減少、モニタリングと対応策の検討(変化、保全・適応)
福岡	熱帯性サンゴ礁生態系への移行が予測されている(変化)

表3 都道府県の行政文書(気候変動適応計画・温暖化対策計画)における藻場(大型海藻、海草)の変化、保全策・適応策に関する記載の一例。

都道府県	記載概要(記載内容が変化もしくは保全・適応のどちらに該当するか)
千葉	藻場消失現象の発生と磯根資源への影響、藻場消失の原因究明、藻場再生(変化、保全・適応)
新潟	藻場や漁場の整備、藻場面積の減少、気候変動に伴う藻場生態系の変化に対応した操業方法、藻場の回復技術及び適応の検討(変化、保全・適応)
静岡	海藻相の構成種の変化・減少、藻場の衰退、磯焼け、生育適地減少の予測、藻場回復の取り組み(変化、保全・適応)
兵庫	海草類の再生、海藻藻場の変化、藻場造成(変化、保全・適応)
徳島	海水温の上昇による藻場の構成種や現存量の変化、藻場造成技術の開発、モニタリング(変化、保全・適応)
高知	大型海藻の消失、磯焼け対策、藻場を構成する温帯性種の衰退と亜熱帯性種の分布範囲の拡大、藻場等の保全(変化、保全・適応)
福岡	藻場の保全活動、藻場生態系の劣化(変化、保全・適応)

系分野での気候変動適応の考え方は環境省(2019)によって整理されているが、日本の沿岸域の環境・生態系の影響を迅速に把握できるような網羅的なモニタリング体制を構築するとともに、気候変動影響に対応した沿岸域の資源の効率的な利用・保全を随時進めていく必要がある。

謝 辞

本研究の一部は国立環境研究所気候変動適応研究プログラム及び持続可能地域共創研究プログラム、JSPS 科研費(JP17069)、公益財団法人住友財団環境研究助成(2230150)の支援を受けて実施された。

引用文献

- Abe, H., Kitano, Y. F., Fujita, T. and Yamano, H. (2022a) Distribution, use, management, regulation, and future concerns of reef-building corals based on administrative documents in Japan. *Marine Policy*, 141, 105090. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105090>
- Abe, H., Kumagai, N. H. and Yamano, H. (2022b) Priority coral conservation areas under global warming in the Amami Islands, Southern Japan. *Coral Reefs*, 41, 1637–1650. <https://doi.org/10.1007/s00338-022-02309-9>
- Abe, H., Kumagai, N. H., Yamano, H. and Kuramoto, Y. (2021a) Coupling high-resolution coral bleaching modeling with management practices to identify areas for conservation in a warming climate: Keramashoto National Park (Okinawa Prefecture, Japan). *Science of the Total Environment*, 790, 148094. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148094>
- 阿部博哉・三ツ井聡美・鈴木はるか・北野裕子・熊谷直喜・山野博哉(2021)足摺宇和海国立公園周辺海域における沿岸生態系の利用・保全状況とサンゴ群集・海藻藻場の分布. 日本サンゴ礁学会誌, 23, 1–19. <http://dx.doi.org/10.3755/jcrs.23.1>
- 阿部博哉・三ツ井聡美・山野博哉(2022)国立公園における造礁サンゴ・大型海藻・海草の管理と利用：気候変動への適応策検討に向けた課題の抽出. 保全生態学研究, 27, 1–19. <http://dx.doi.org/10.18960/hozen.2120>
- Abe, H., Mitsui, S. and Yamano, H. (2022c) Conservation of the coral community and local stakeholders' perceptions of climate change impacts: Examples and gap analysis in three Japanese national parks. *Ocean and Coastal Management* 218, 106042. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106042>
- Abe, H., Suzuki, H. Kitano, Y. F. Kumagai, N. H. Mitsui, S. and Yamano, H. (2021b) Climate-induced species range shift and local adaptation strategies in a temperate marine protected area, Ashizuri-Uwakai National Park, Shikoku Island, western Japan. *Ocean and Coastal Management*, 210, 105744. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105744>
- Chin, T. M., Vazquez-Cuervo, J. and Armstrong, E. M. (2017) A multi-scale high-resolution analysis of global sea surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 200, 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.029>
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., J. Anderson, S. Kubiszewski, I., Farber, S. and Turner, R. K. (2014) Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
- 猪原 亮(2019)2017–2018年の黒潮大蛇行における高知県沿岸域の海況. 黒潮の資源海洋研究, 20, 9–16.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019) Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. <https://www.ipcc.ch/srocc/>
- 環境省(2019)国立公園等の保護区における気候変動への適応策検討の手引き. https://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/library/files/tekiou_tebiki.pdf
- 川越久史(2017)モニタリングサイト1000からみた2016年のサンゴの大規模白化. 日本サンゴ礁学会誌, 19, 21–28. <http://dx.doi.org/10.3755/jcrs.19.21>
- Kayanne, H. (2017) Validation of degree heating weeks as a coral bleaching index in the northwestern Pacific. *Coral Reefs*, 36, 63–70. <http://dx.doi.org/10.1007/s00338-016-1524-y>
- 桐山隆哉(2009)長崎県沿岸の近年における大型褐藻群落の衰退現象に関する研究. 長崎県水産試験場研究報告, 35, 15–78.
- 気象庁(2024)海面水温の長期変化傾向(日本近海). https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html
- Kitano, Y. F., Hongo, C., Yara, Y., Sugihara, K., Kumagai, N. H. and Yamano, H. (2020) Data on coral species occurrences in Japan since 1929. *Ecological Research*, 35, 975–985. <http://dx.doi.org/10.1111/1440-1703.12136>
- Komatsu, T., Fukuda, M., Mikami, A., Mizuno, S., Kantachumpoo, A., Tanoue, H. and Kawamiya M. (2014) Possible change in distribution of seaweed, *Sargassum horneri*, in northeast Asia under A2 scenario of global warming and consequent effect on some fish. *Marine Pollution Bulletin*, 85, 317–324. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.04.032>
- 小坂 剛・小松恒久・大久保明彦・上野信平(2001)低水温被害を受けた駿河湾のエダミドリイシ群集

- の変遷(1992~2000年). 東海大学紀要, 52, 57–67.
- 熊谷直喜(2020)気候変動に伴う藻場群集の地理的分布変化. 藻類, 68, 91–97.
- Kumagai, N. H., García Molinos, J., Yamano, H., Takao, S., Fujii, M. and Yamanaka, Y. (2018) Ocean currents and herbivory drive macroalgae-to-coral community shift under climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115, 8990–8995. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1716826115>
- Kumagai, N. H., Yamano, H., Fujii, M. and Yamanaka, Y. (2016) Habitat-forming seaweeds in Japan (fucoids and temperate kelps). *Ecological Research*, 31, 759–759. <http://dx.doi.org/10.1007/s11284-016-1404-5>
- Liquete, C., Piroddi, C., Drakou, E. G., Gurney, L., Katsanevakis, S., Charef, A. and Egoh, B. (2013) Current status and future prospects for the assessment of marine and coastal ecosystem services: a systematic review. *PLoS ONE*, 8, e67737. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067737>
- Makino, A., Klein, C. J., Possingham, H. P., Yamano, H., Yara, Y., Ariga, T., Matsuhashi, K. and Beger, M. (2015) The effect of applying alternate IPCC climate scenarios to marine reserve design for range changing species. *Conservation Letters*, 8, 320–328. <https://doi.org/10.1111/conl.12147>
- Makino, A., Yamano, H., Beger, M., Klein, C. J., Yara, Y. and Possingham, H. P. (2014) Spatio-temporal marine conservation planning to support high-latitude coral range expansion under climate change. *Diversity and Distributions*, 20, 859–871. <https://doi.org/10.1111/ddi.12184>
- Nishikawa, S., Wakamatsu, T., Ishizaki, H., Sakamoto, K., Tanaka, Y., Tsujino, H., Yamanaka, G., Kamachi, M. and Ishikawa, Y. (2021) Development of high-resolution future ocean regional projection datasets for coastal applications in Japan. *Progress in Earth and Planetary Science*, 8, 7. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00399-z>
- 野村恵一(2009)和歌山県串本海域における近年のサンゴ群集変化. 日本サンゴ礁学会誌, 11, 39–49. <https://doi.org/10.3755/jcrs.11.39>
- 野村恵一・平林 勲(2018)2018年冬季に紀伊半島西岸で観察された異常低水温によるサンゴ群集の大量斃死. 串本海中公園マリンバビリオン, 特別号 7.
- 大場達之・宮田昌彦(2020)日本海草図鑑 改訂版. 北海道大学出版会.
- R. E., Lewis, A. B. and Seminoff, J. A. (2021) Tropicalization of temperate ecosystems in North America: The northward range expansion of tropical organisms in response to warming winter temperatures. *Global Change Biology*, 27, 3009–3034. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.15563>
- 新北成実・寺田竜太(2023)鹿児島湾のアマモ場: 2021年の分布状況と長期的な衰退. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 89, 510–520. <https://doi.org/10.2331/suisan.23-00020>
- Skirving, W., Marsh, B., De La Cour, J., Liu, G., Harris, A., Maturi, E., Geiger, E. and Eakin, C. M. (2020) CoralTemp and the Coral Reef Watch coral bleaching heat stress product suite version 3.1. *Remote Sensing*, 12, 3856. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12233856>
- Sudo, K., Watanabe, K., Yotsukura, N. and Nakaoka, M. (2020) Predictions of kelp distribution shifts along the northern coast of Japan. *Ecological Research*, 35, 47–60. <http://dx.doi.org/10.1111/1440-1703.12053>
- Sugimoto, S., Qiu, B. and Kojima, A. (2020) Marked coastal warming off Tokai attributable to Kuroshio large meander. *Journal of Oceanography*, 76, 141–154. <https://doi.org/10.1007/s10872-019-00531-8>
- Takao, S., Kumagai, N. H., Yamano, H., Fujii, M. and Yamanaka, Y. (2015) Projecting the impacts of rising seawater temperatures on the distribution of seaweeds around Japan under multiple climate change scenarios. *Ecology and Evolution*, 5, 213–223. <http://dx.doi.org/10.1002/ece3.1358>
- Takao, S., Yamano, H., Sugihara, K., Kumagai, N. H., Fujii, M. and Yamanaka, Y. (2015) An improved estimation of the poleward expansion of coral habitats based on the inter-annual variation of sea surface temperatures. *Coral Reefs*, 34, 1125–1137. <https://doi.org/10.1007/s00338-015-1347-2>
- Tanaka, K., Taino, S., Haraguchi, H., Prendergast, G. and Hiraoka, M. (2012) Warming off southwestern Japan linked to distributional shifts of subtidal canopy-forming seaweeds. *Ecology and Evolution*, 2, 2854–2865. <http://dx.doi.org/10.1002/ece3.391>
- Terada, R., Abe, M., Abe, T., Aoki, M., Dazai, A., Endo, H., Kamiya, M., Kawai, H., Kurashima, A., Motomura, T., Murase, N., Sakanishi, Y., Shimabukuro, H., Tanaka, J., Yoshida, G. and Aoki, M. (2021) Japan's nationwide long-term monitoring survey of seaweed communities known as the “Monitoring Sites 1000”: Ten-year overview and future perspectives. *Phycological Research*, 69, 12–30. <http://dx.doi.org/10.1111/pre.12395>
- Vergés, A., McCosker, E., Mayer-Pinto, M., Coleman,

- M. A., Wernberg, T., Ainsworth, T. and Steinberg, P. D. (2019) Tropicalisation of temperate reefs: Implications for ecosystem functions and management actions. *Functional Ecology*, 33, 1000–1013. <http://dx.doi.org/10.1111/1365-2435.13310>
- Yamakita, T., Sodeyama, F., Iguchi, A., Kitano, Y. F., Teshima, K. M., Shimura, A., Nakabayashi, A., Nagai, S., Nakamura, T., Aizawa, H. and Yasuda, N. (2022) Consideration of genetic structure in the ecologically or biologically significant marine areas criteria: a review of convention on biological diversity regional workshops and a case study of coral reef conservation planning. *Frontiers in Marine Science*, 9, 823009. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.823009>
- Yamakita, T., Sudo, K., Jintsu-Uchifune, Y., Yamamoto, H. and Shirayama, Y. (2017) Identification of important marine areas using ecologically or biologically significant areas (EBSAs) criteria in the East to Southeast Asia region and comparison with existing registered areas for the purpose of conservation. *Marine Policy*, 81, 273–284. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.03.040>
- Yamano, H., Sugihara, K. and Nomura, K. (2011) Rapid poleward range expansion of tropical reef corals in response to rising sea surface temperatures. *Geophysical Research Letters*, 38, L04601. <http://dx.doi.org/10.1029/2010GL046474>
- 屋良由美子・藤井賢彦・山中康裕・岡田直資・山野博哉・大島和裕(2009)地球温暖化に伴う海水温上昇が日本近海の造礁サンゴの分布と健全度に及ぼす影響評価. 日本サンゴ礁学会誌, 11, 131–140. <http://dx.doi.org/10.3755/jcrs.11.131>
- Yara, Y., Oshima, K., Fujii, M., Yamano, H., Yamanaka, Y. and Okada, N. (2011) Projection and uncertainty of the poleward range expansion of coral habitats in response to sea surface temperature warming: A multiple climate model study. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies*, 13, 11–20. <http://dx.doi.org/10.3755/galaxea.13.11>
- Yara, Y., Vogt, M., Fujii, M., Yamano, H., Hauri, C., Steinacher, M., Gruber, N. and Yamanaka, Y. (2012) Ocean acidification limits temperature-induced poleward expansion of coral habitats around Japan. *Biogeosciences*, 9, 4955–4968. <http://dx.doi.org/10.5194/bg-9-4955-2012>, 2012
- 八谷光介・桐山隆哉・清本節夫・種子田 雄・吉村拓(2014)2013年に発生した長崎県壱岐市郷ノ浦町地先におけるアラメ・カジメ場の衰退過程について：夏季の高水温による発生と秋季の食害による拡大. *Algal Resources*, 7, 79–94. https://doi.org/10.20804/jsap.7.2_79
- 吉田太輔(2016)島根県沿岸における藻場の状況と磯焼けに関する聞き取り調査. 島根県水産技術センター研究報告, 9, 37–42.
- Yuan, F. L., Yamakita, T., Bonebrake, T. C. and McIlroy, S. E. (2023) Optimal thermal conditions for corals extend poleward with oceanic warming. *Diversity and Distributions*, 29, 1388–1401. <https://doi.org/10.1111/ddi.13765>
- Zarzyczny, K. M., Rius, M., Williams, S. T. and Fenberg, P. B. (2024) The ecological and evolutionary consequences of tropicalisation. *Trends in Ecology & Evolution*, in press, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.10.006>



阿部 博哉／Hiroya ABE

2016年に北海道大学大学院環境科学院博士後期課程修了。博士(環境科学)。現在は国立環境研究所気候変動適応センターに研究員として所属。専門は沿岸海洋学。サンゴ群集・大型海藻の成育環境の現地観測や数値シミュレーションによる

将来予測、行政文書やブログのテキスト分析、現地関係者への聞き取り調査等を通じて、沿岸域の気候変動適応に関する研究を実施している。



山野 博哉／Hiroya YAMANO

国立環境研究所生物多様性(上級首席研究員)及び東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻(教授)に所属。兵庫県出身。東京大学大学院理学系研究科地理学専攻修了、博士(理学)。科学技術振興事業団プロジェクト研究員、国立環境研究所研究員を経て現職。専門は自然地理学で、環境変化に対するサンゴ礁の応答と保全に関する研究に取り組んでいる。