

# 生物多様性が豊かな場所： 沿岸生態系の過去、現在、未来

北海道大学 北方生物圏フィールド科学センター教授 仲岡 雅裕

## はじめに

地球表面の7割を占める海洋のおよそ9割は水深200m以上の深海で、かつ岸から遠く離れた外洋である。陸上動物である人類の海洋へのアクセスは、背丈より浅い沿岸のごくわずかな海域を除くと非常に限られており、それゆえ、海洋生態系および生物多様性の知見は陸域のそれに比べると圧倒的に少ない。海洋には既知のものだけでも23万種の生物が生息しているが<sup>1)</sup>、控えめに見積もっても、さらに10万種～200万種の未記載種があると推定されている<sup>2)</sup>。全種の記載が終了するには、現在の新種記載率を考えるとあと100年以上かかると考えられており<sup>3)</sup>、その間にも人間活動に伴う種の絶滅が続いていくと思われる。

海洋生態系の中でも、陸と海が接する沿岸海域には、サンゴ礁、藻場、マングローブ、塩性湿地など、大型の動植物を基盤とする特徴的な生態系が形成されている。このうち藻場は、コンブやワカメなどの海藻類を主体として岩礁にできる「海藻藻場」と、維管束植物であるアマモなどの海草類を主体として砂泥底に形成される「海草藻場」に大別される。後者は温帯域でアマモが優占種となるため「アマモ場」とも呼ばれている。藻場は周辺の無植生の海底と比べると一般的に種多様性が高い。また、生物量・生産量も高く、水質制御・底質安定化など多様な生態系機能を有しており、それらは水産資源の提供、台風などの巨大かく乱に対する防災機能、さらには二酸化炭素吸

収を通じた温暖化緩和機能（ブルーカーボン機能）など、人間に対してさまざまな生態系サービスを提供している<sup>4)</sup>。これらの生態系の単位面積当たりの生態系サービスの経済的価値は、森林の3倍から10倍にも達するとの試算もある<sup>5)</sup>。

沿岸域はそもそも人口密度が高く、さまざまな人間活動の影響を受けることから、生態系の損失や劣化が報告されてきた。例えば、Waycott et al. (2009)<sup>6)</sup>は世界各地の海草藻場の変化を報告した215の研究を解析し、海草藻場が1990年以降、1年あたり7%の率で減少していることを明らかにした。しかし、この論文にはアジアの研究例はわずか2例しか含まれていなかった。日本を含む東アジア～西太平洋の海域は、海洋生物多様性が世界で最も高いホットスポットとして知られているが<sup>7)</sup>、研究はまだ不十分であり、生物多様性保全に対する課題も山積している。

本章では沿岸生態系およびその生物多様性について、特に日本の温帯域の沿岸海域の主要構成要素である干潟と藻場を中心に、過去、現在、将来の変化について解説するとともに、今後の保全のための課題や新たな取り組みについて紹介したい。

## 日本の干潟と藻場の長期変動

日本の沿岸海岸の改変は、特に太平洋戦争後の高度経済成長期に、静穏な河口域・内湾域を中心に進んだ。全国レベルでの浅海域の生態系の状況の変化は、1970年代より始まった環境省（当時環境庁）の自然環境保全基礎調査から知ることができる。1978～1979年に実施された第2回自然環境保全基礎調査では、全国の干潟は1945年以降35%が、藻場は1973年以降1.1%が消失したことが明らかになった<sup>8)</sup>。さらに、1988～1992年に行われた第4回調査では、前回調査後の約13年間に干潟の7.5%、藻場の3.2%が消滅したことが報告された<sup>9)</sup>。しかし、第4回調査以降、全国の海岸線を網羅する調査は長らく行われなかった。

藻場については、ようやく2018～2020年に全国の藻場分布図を作成するための調査が行われ、その結果が2021年に公開された<sup>10)</sup>。それによると、全国の藻場面積は、第4回調査時より4割以上減少しており、特に海藻

表 1 日本の海草藻場と海藻藻場の面積の変化。1989-91 年は第 4 回自然環境保全基礎調査、2014-18 年は環境省藻場分布調査のデータに基づく。

	1989-91 (km <sup>2</sup> )	2014-18 (km <sup>2</sup> )	変化率 (%)
海草藻場	419	330	78.7
海藻藻場	2,359	1,299	55.1
合計	2,778	1,629	58.6

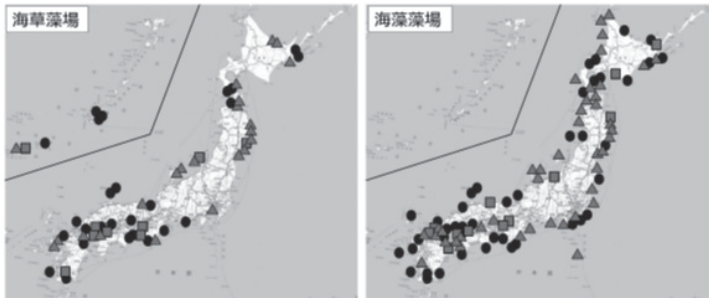


図 1 日本の主要な海草藻場と海藻藻場の面積の変化。第 4 回自然環境保全基礎調査（1989-91）と、環境省藻場分布調査（2014-18）の GIS データを比較して算出した。○は当該期間に 10%以上藻場面積が増加、△は 10%以上減少、□は変化しなかったサイトを示す。

藻場の減少率が、海草藻場よりも著しいことが明らかになった(表 1)。また、地域別にみると、東北太平洋岸の藻場の減少率が他の地域より高い(図 1)。これには後述する 2011 年の東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)に伴う津波や地形変化が関わっている可能性が考えられる。一方、他の地域では、北海道、瀬戸内海、南西諸島の海草藻場や日本海南東部の海藻藻場で面積が増加している場所が多かった(図 1)。しかし、以前の基礎調査が、航空写真による判別と現地調査や地域関係者からの聞き取りをもとに作成されたのに対し、最新の調査では高解像度の衛星画像をもとに藻場の判別を行っており、藻場面積推定法が全く異なる。このため、藻場分布域の変化の評価には十分な注意が必要である。例えば鹿児島湾では、衛星画像の誤判定により、

海草藻場の面積が現地調査より5倍以上も過大評価されている場所もある(仲岡、未発表)。正確な藻場面積の変化の評価には他の資料も含めたより慎重な検討が必要である。

## モニタリングサイト 1000 沿岸域調査による長期変動の解析

このように、全国を網羅する形で浅海域の変化を高解像度かつ高頻度で追跡することは非常に難しい。一方、特定の場所での定期的な調査による沿岸海域の生態系や生物多様性の長期モニタリングは、国や地方自治体の事業、大学や公立研究機関の研究、さらには地域住民も参加できるプログラムなど、多様な取り組みが行われるようになってきた。

一例として、環境省の事業として行われているモニタリングサイト 1000 沿岸域調査の成果を紹介したい。モニタリングサイト 1000 (重要生態系監視地域モニタリング推進事業)は、「全国に1,000か所以上の調査サイトを設置し、100年以上モニタリングを継続することで、基礎的な環境情報の収集を長期にわたって継続して、日本の自然環境の質的・量的な劣化を早期に把握することを目的」としている<sup>11)</sup>。海域では、先行して始まったサンゴ礁に続き、磯(岩礁潮間帯)・干潟・アマモ場・海藻藻場を対象とした沿岸域調査が2008年より開始された。全体で28(磯6、干潟10、アマモ場6、海藻藻場6)というサイト数は、全国を十分にカバーするには不十分であるが、各生態系で統一したプロトコルで調査が行われ、生物多様性や生態系の変動に関する貴重なデータが取得されている。

この中で特に顕著な変化が見られたのは、2011年に生じた東北地方太平洋沖地震に伴う津波や地盤沈下の影響を受けた沿岸サイトである。岩手県の船越湾と大槌湾に設定されたアマモ場サイトでは、地震に伴い発生した津波によるかく乱により、2011年の海草類の被度が前年の0~1%まで減少した(図2)。その後、アマモ場は水深の浅い部分を中心に回復しつつあるが、2018年の段階では平均被度は津波前の半分程度であり(図2)、2022年時点でも水深の深い部分では植生はわずかにパッチ状に確認されるのみである<sup>12)</sup>。一方、福島県の松川浦の干潟サイトにおいては、地震直後の2011年は底生生物の密度が前年の10%以下まで激減したが、翌2012年には地

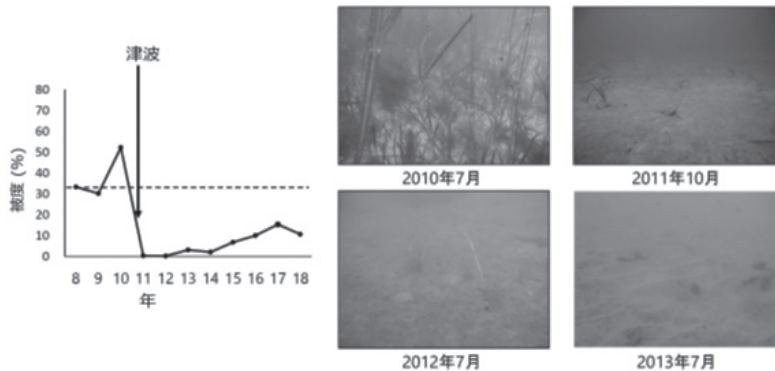


図2 モニタリングサイト 1000 沿岸域調査のアマモ場サイトである船越湾の海藻類の被度の経年変化 (左) と 2010～2013 年の景観写真 (右)。グラフの点線は 2008～2010 年の平均被度を示す。仲岡ほか (2018)<sup>14)</sup> より作成。

震前より密度が高くなる「過回復」が見られた<sup>13)</sup>。さらに、宮城県の志津川の海藻藻場サイトでは、2011 年の海藻類の被度は地震前より微減であったが、2012 年以降も減少が続き、地震の「時間的遅れを伴った影響」が検出された<sup>13)</sup>。これにより、津波によるかく乱よりも地盤沈下に伴う光量不足が海藻類により大きい影響を与えていることが示唆された。このように、地震の影響はサイトや対象生態系により大きく異なるが、いずれも震災前のデータが定期的なモニタリングにより取得されていることで明らかになったものであり、モニタリングを継続することがいかに重要であるかを示している。

開始より 15 年を経て、他にも沿岸生態系にさまざまな変化が生じていることがモニタリングサイト 1000 のデータからわかってきた。2022 年の報告<sup>12)</sup>によると、アマモ分布域の南限に近い鹿児島県指宿に設定されたアマモ場サイトは、2018 年以降アマモ植生が見られない状況が続いている。同様に、鹿児島県の薩摩長島サイトは大型コンブ類の一種であるアントクメの分布南限に近いことが知られているが、外洋に面した調査点では 2017 年以降アントクメが消失したままとなっている。また、伊豆下田の海藻藻場サイトでは、アラメ・カジメ等の林冠構成種が 2020 年より減少したのち、

2022年には完全に消失しているほか、石垣島伊土名のアマモ場サイトでは、海草類の種多様性に変化はないものの、被度が2021年より著しく減少している。これらの変化には、近年の水温上昇やそれに伴う植食動物による食害の増加が関与していると考えられている。

## 沿岸生態系の将来予測

前節最後に述べたように、ここ数年来、沿岸海域で、気候変動と直接的・間接的に関連していると思われるさまざまな変化が報告されるようになってきた。特にアイゴやウニ、さらにはアオウミガメなどの植食動物の増加や摂食活動の活発化による藻場の衰退、いわゆる「磯焼け」の発生が各地から報告されている。また、サンゴや熱帯性魚類をはじめとする南方系海洋生物の分布域の北上、コンブやサケなど北方系海洋生物の減少のニュースも頻繁に耳にする。このような状況で海洋生態系は今後どのように変化していくのであろうか？

1950～2100年代の海洋生物群集の分布情報と、海水温上昇および海流輸送に関する情報を取り入れたモデル解析では、現在進行しつつある海藻藻場からサンゴ群集への置換には、サンゴの増加に伴う直接的競合よりも、草食魚の海藻食害による効果が高いことがわかっており、置換の確率は今後2035年にかけて増加することが予測されている<sup>14)</sup>。

近年、生物の分布情報と環境諸情報の関連性を高度な統計学的手法で分析して各種の推定分布域を評価する生物種分布モデル（SDM）が発展し、それをを用いた海洋生物の分布変動の将来予測も行われるようになってきた。SDMを東北から北海道に分布する寒流系コンブ類11種に適用した研究では、温暖化の進行が最も著しいシナリオ（RCP8.5）下<sup>15)</sup>では、今世紀末には対象種の分布域が1980年代の0～25%になること、また、温暖化が比較的緩やかに進行するシナリオ（RCP4.5）でも、4種のコンブが日本沿岸から消失する可能性があることが予測された<sup>16)</sup>。また、日本沿岸の熱帯性魚類にSDMを適用した研究では、現在、本州中部以南の暖かい海域に生息する草食魚のアイゴやイスズミ、有毒魚のソウシハギやアオブダイの分布域が、RCP8.5では本州北端まで拡大する可能性がある一方、温室効果ガスを大幅

に削減するシナリオ（RCP2.6）では、生息適地が現在から大きく変化しないことが予測された<sup>17)</sup>。これらの研究は、もしこのまま温暖化が進行すると、沿岸域の生態系が大きく変容するだけでなく、人類が享受している水産資源の減少や、有毒生物による健康被害の増加も懸念される事態となることを示唆している。一方、今後徹底した温暖化緩和策が進めばそのような事態は回避される可能性があることも示している。

### 沿岸生態系の保全に向けた課題と新しい動き

このような地球規模の環境変動に対する海洋生態系の変化に対して、その緩和策や適応策に関するさまざまな取り組みが検討・実施されている。どのような取り組みを行うにしても、まず何よりも重要なことは、生態系や生物多様性の変化を広域かつ定期的にモニタリングして、現状とその変化を正確に把握することである。しかし、日本における海洋生態系・生物多様性モニタリングの状況は、これまで述べたように空間的にも時間的にも十分な状況とは言えない。ここでは、その課題の解決につながる新たな技術的進展や活動について紹介したい。

リモートセンシング技術の向上は、前述の環境省の最新の藻場分布図に利用されたように、沿岸生態系の変化を広域かつより高い頻度で追跡する手段として期待されている。衛星画像だけでなく、各種ドローン類（空中、水上、水中）や音響探査機器も、高性能化や低価格化が進んでいる。また、もう一つの新技术として注目されるのが環境 DNA を利用した生物多様性モニタリングで、すでに微生物から大型哺乳類まで多様な生物を対象とした手法が開発されている。日本では 2018 年に環境 DNA 学会が設立され、2019 年より全国規模の観測ネットワークである ANEMONE が、魚類を対象に統一した手法で観測と情報のデータベース化および公開を進めている<sup>18)</sup>。

ただし、リモートセンシングも環境 DNA も、生物多様性や生態系を測る間接的な手法であり、人の目による海洋生物の直接的な観測結果との比較検証が不可欠である。それゆえ、野外生物調査との効率的な組み合わせを可能とする体制づくりが求められる。こうした中、研究機関や行政機関の人的な資源の制約を超えて野外生物調査を広める方法として着目されているのが、

研究者が一般市民と連携して広くかつ持続的に生物多様性モニタリングデータを取る「市民科学」である。海外では沿岸海域を対象とした多数のプログラムがすでに実施されており、それらは海洋生物多様性の現状評価や今後の予測などの科学成果に結びつくばかりではなく、海洋保護区設計の基礎資料となるなど、応用的な面でも貢献している<sup>19),20)</sup>。大阪湾では、研究者・市民・国・地方自治体が連携して、20か所以上の海岸で15年間にわたり生物の観測を続けているプログラムがある<sup>21)</sup>。同様の取り組みは他の地域でも行われているが、持続的な実施に向けて、特に活動費の継続的な確保が制約になっていることが多い。

こうした状況に対して、藻場の再生・保全活動に関しては、ブルーカーボンを用いた炭素排出権取引による活動資金の調達が新たな取り組みとして着目を集めている。化石燃料の利用により大気中に排出された温室効果ガスである二酸化炭素のうち、海洋生態系が吸収するものをブルーカーボンと呼ぶ。沿岸生態系のマングローブやアマモ場は単位面積当たりの二酸化炭素吸収・隔離量が森林生態系のそれよりも高いことが知られており<sup>22)</sup>、また海藻類も難溶性有機炭素を生成することで炭素の隔離に貢献していることが指摘されている<sup>23)</sup>。これにより、森林におけるグリーンカーボン認証制度と同様に、マングローブや藻場を保全または再生して吸収・隔離された炭素をクレジットとして、排出権取引を行う自主的な市場制度が世界各地で始まっている<sup>24)</sup>。日本では、この取引を公的かつ中立に認証・運営する組織としてジャパンブルーエコノミー技術研究組合(JBE)が2019年に設立され、2020年度より「Jブルークレジット®」を発行し、購入を希望する企業・団体等と、保全再生活動によりクレジットを創出したNPO・市民団体の間での取引が開始された<sup>25)</sup>。これにより、保全や再生活動に必要な活動資金を継続的に得られることが期待されている。また、JBEによる認証制度では、クレジットを継続的に獲得するためには、藻場の面積やその生物多様性の変化を毎年の調査・モニタリングで報告することが義務付けられている<sup>26)</sup>。今後、得られたモニタリングデータが事業の枠組みを超えて広く共有されるようになれば、海洋生物多様性や生態系データの充実化を通じて、沿岸海域の保全や持続的利用に関するさまざまな活動や政策決定に生かされることが期待される。



## おわりに

ここまでで説明したように、沿岸海域は生物多様性が高い場所であるが、気候変動その他の人間活動による負荷を受け続けている。これに対して、世界各地で海洋保護区による保全や持続的な資源・生態系管理などのさまざまな施策が講じられ、その結果、希少種の個体数の回復や、藻場やマングローブの再生が進んだ例も報告されるようになってきた<sup>27)</sup>。しかし、日本を含むアジアの海域においては、広域かつ長期の変動に関するデータが不十分で、人間活動の負荷の影響評価や、保全再生活動の効果の検証が進んでいないのが現状である。これに対して、前節後半で述べたように、海洋生態系・生物多様性モニタリングを支援する技術的発展や、社会的活動が進みつつある。

自然生態系や生物多様性の保全の気運を高めるためには、人為的影響が与えてきた負の影響の「暗い」側面を過度に強調するのではなく、保全活動の「明るい」成果をより発信することが、保全に取り組む人の意欲を向上させ、また、多くの人に関わってもらうために重要である。海洋科学分野におけるこうした取り組みは、#OceanOptimism と呼ばれ、若い世代を中心に SNS での呼びかけなどを通じて広まりつつある<sup>28)</sup>。このような流れを通じて、ここで紹介した新たな取り組みが生物多様性の損失に歯止めをかけ回復に貢献することを期待して、本稿を閉じたい。

### [参考文献・注]

- 1) Fujikura, K., Lindsay, D., Kitazato, H., et al. (2010) Marine biodiversity in Japanese waters. PLoS ONE 5(8): e11836 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011836>
- 2) Costello, M.J., Wilson, S., Houlding, B. (2011) Predicting total global species richness using rates of species description and estimates of taxonomic effort. Syst Biol 61: 871-883. <https://doi.org/10.1093/sysbio/syr080>
- 3) Costello, M.J., May, R.M., Stork, N.E. (2013) Can we name earth's species before they go extinct? Science 339: 413-416. <https://doi.org/10.1126/science.1230318>
- 4) 仲岡雅裕・松田裕之 (2011) 地球環境変動と生態系サービス、人間活動の関連性の解明に向けて (小路淳・堀正和・山下洋編) 水産学シリーズ 169 浅海域の生態系サービス. 海の恵みと持続的利用. 恒星社厚生閣、pp. 129-143

- 5) Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., et al. (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- 6) Waycott, M., Duarte, C.M., Carruthers, T.J.B. et al. (2009) Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *PNAS* 106: 12377-12381. <https://doi.org/10.1073/pnas.0905620106>
- 7) Tittensor, D.P., Mora, C., Jetz, W., et al. (2010) Global patterns and predictors of marine biodiversity across taxa. *Nature* 466: 1098-1101. <https://doi.org/10.1038/nature09329>
- 8) 東洋航空事業株式会社 (1980) 環境庁委託第 2 回自然環境保全基礎調査海域調査報告書 (海岸調査/干潟・藻場・サンゴ礁分布調査/海域環境調査) (全国版)
- 9) 環境庁自然保護局・財団法人海中公園センター (1994) 第 4 回自然環境保全基礎調査 海域生物環境調査報告書 (干潟、藻場、サンゴ礁調査) . 第 1 巻 干潟
- 10) 環境省自然環境局生物多様性センター . 藻場分布調査 . <https://www.biodic.go.jp/moba/index.html> (2023/11/11 閲覧)
- 11) 環境省自然環境局生物多様性センター モニタリングサイト 1000. <https://www.biodic.go.jp/moni1000/purpose.html> (2023/11/11 閲覧)
- 12) 環境省自然環境局生物多様性センター (2023) 2022 年度モニタリングサイト 1000 アマモ場・藻場調査報告書
- 13) 仲岡雅裕・鈴木孝男・坂西芳彦・早川淳 (2018) 東北地方太平洋沖地震後の沿岸生態系の回復過程の比較検証 . モニタリングサイト 1000 沿岸域調査 (磯・干潟・アマモ場・藻場) 2013-2017 年度とりまとめ報告書 . 環境省自然環境局生物多様性センター , 山梨 . pp. 224-228
- 14) Kumagai, N. H., García Molinos, J., Yamano, H., et al. (2018). Ocean currents and herbivory drive macroalgae-to-coral community shift under climate warming. *PNAS* 115: 8990-8995. <https://doi.org/10.1073/pnas.1716826115>
- 15) IPCC は 2013 年の第 5 次報告書より、将来の気候の予測や影響評価の代表濃度経路シナリオ (RCP: Representative Concentration Pathways) に基づいて行っている。RCP に続く数値が大きいくほど 2100 年における放射強制力 (地球温暖化を引き起こす効果) が大きい。第 5 次評価書に基づく将来予測では、RCP2.6、4.5、6.0、8.5 が代表例としてよく使われている。
- 16) Sudo, K., Watanabe, K., Yotsukura, N. and Nakaoka, M. (2020) Predictions of kelp distribution shifts along the northern coast of Japan. *Ecol Res* 35: 47-60. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12053>
- 17) Sudo, K., Quiros, T.E.A.L., Prathep, A. et al. (2021) Distribution, temporal change and conservation status of tropical seagrass beds in southeast asia: 2000-2020. *Front Mar Sci* 8: 637722. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.637722>
- 18) ANEMONE. ANEMONE について. [https://anemone.bio/anemone\\_ja/](https://anemone.bio/anemone_ja/) (2023/11/12 閲覧)
- 19) Edgar, G.J., Stuart-Smith, R.D., Willis, T. et al. (2014) Global conservation outcomes depend on marine protected areas with five key features. *Nature* 506: 216-220. <https://doi.org/10.1038/nature13022>
- 20) Edgar, G.J., Stuart-Smith, R.D., Heather, F.J. et al. (2023) Continent-wide declines in shallow reef life over a decade of ocean warming. *Nature* 615: 858-865. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05833-y>
- 21) 大阪湾生き物一斉調査 . 大阪湾生き物一斉調査情報サイト . <http://kouwan.pa.kkr.mlit.go.jp/kankyo-db/life/index.aspx> (2023/11/12 閲覧)
- 22) Fourqurean, J.W., Duarte, C.M., Kennedy, H. et al. (2012) Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature Geosci* 5: 505-509. <https://doi.org/10.1038/ngeo1477>
- 23) Krause-Jensen, D., Duarte, C.M. (2016) Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geosci* 9: 737-742. <https://doi.org/10.1038/ngeo2790>
- 24) Friess, D.A., Howard, J., Huxham, M., et al. (2022) Capitalizing on the global financial interest in blue

## 42 生物多様性の現在：何が問題なのか

- carbon. PLoS PLoS Clim 1(8): e0000061. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000061>
- 25) Kuwae, T., Watanabe, A., Yoshihara, S., et al. (2022) Implementation of blue carbon offset crediting for seagrass meadows, macroalgal beds, and macroalgae farming in Japan. *Mar Pol* 138: 104996. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.104996>.
- 26) ジャパンブルーエコノミー技術研究組合 (2023) Jブルークレジット® 認証申請の手引き Ver.2.3. ジャパンブルーエコノミー技術研究組合
- 27) Duarte, C.M., Agusti, S., Barbier, E. et al. (2020) Rebuilding marine life. *Nature* 580: 39–51. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2146-7>
- 28) Knowlton, N. (2021) Ocean optimism: moving beyond the obituaries in marine conservation. *Ann Rev Mar Sci* 13:479-499. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-040220-101608>