



An initiative of  
Economist Impact and The Nippon Foundation

# 海洋酸性化と 生物多様性の損失

因果関係の解明に向けたデータ連携の重要性



# 目次

本報告書について	1
主要な論点	2
概論	3
1. 海洋における生物多様性の危機	5
2. 海洋酸性化がもたらす影響の可視化に向けて	10
3. データ統合に向けた取り組みの必要性	13
4. 概念から実践へ	16
おわりに	18
脚注	19



## 本報告書について

『海洋酸性化と生物多様性の損失：因果関係の解明に向けたデータ連携の重要性』は、Economist Impact と日本財団による海洋環境保全イニシアティブ『Back to Blue』の一環として Economist Impact によって作成された報告書だ。その目的は、海洋酸性化と生物多様性損失の間にある因果関係解明の重要性、そして取り組みに伴う課題を海洋研究コミュニティと共有することにある。

本報告書の作成にあたっては、海洋科学など様々な分野の専門家を対象とし、詳細にわたる取材を行った。ご協力をいただいた下記の皆様（敬称略・所属組織のアルファベット順に記載）には、この場を借りて御礼を申し上げたい：

- オーストラリア連邦科学産業研究機構 [SCIRO] 主任研究員  
グローバル海洋観測システム [GOOS]  
共同議長  
Karen Evans
- 生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム [IPBES] 議長  
CORDIO East Africa  
創設メンバー 兼 ディレクター  
David Obura
- プリマス海洋研究所  
科学研究担当ディレクター  
全球海洋酸性化観測ネットワーク [GOA-ON] 共同議長  
持続可能な海洋酸性化研究 [OARS]  
共同責任者  
Steve Widdicombe
- UNESCO 政府間海洋学委員会 [IOC]  
海洋炭素プログラム・スペシャリスト  
持続可能な海洋酸性化研究 [OARS]  
共同責任者  
Kirsten Isensee
- エジンバラ大学  
地球科学学部 講師  
Sebastian Hennige
- ヨーテボリ大学  
生物環境科学学部 上級講師  
国際原子力機関 [IAEA]  
海洋酸性化国際調整センター コンサルタント  
Sam Dupont
- 東京大学 大気海洋研究所 教授  
藤井賢彦<sup>まさひろ</sup>
- 世界自然保護基金 [WWF]  
海洋プラクティス・リーダー  
Pepe Clarke

本報告書の執筆は Denis McCauley が、編集は近藤奈香が担当した。

## 主要な論点

- 『Back to Blue』はこれまでいくつかの報告書を通じて、海洋酸性化が生物・生態系にもたらす深刻な脅威と、一部の国の取り組み例を紹介してきた。本報告書では、生物多様性の損失という文脈から海洋酸性化を取り上げ、その影響に関するより統合的・包括的な研究の必要性について論じる
- 国・地域・地方レベルの海洋酸性化対策では、取り組みの重複や利益相反によって期待した効果が得られない事例も少なくない。海洋酸性化と生物種減少の因果関係を解明すれば、政府関係者の危機意識を高め、具体的な取り組みに向けた切迫感が醸成されるはずだ
- 生物種減少の主要因は、環境によって異なることが多い。海洋酸性化が生物学的プロセスに及ぼす影響を特定できれば、対策が各環境にもたらす負の影響を回避することができる
- 海洋研究は、実験室内における調査のみならず、実環境におけるデータ収集を積極的に進める必要がある。監視活動の連携強化に向けた化学・生物学分野の協力関係推進も重要だ
- 一部の研究者は、評価指標の共通化などを通じた化学・生物学研究の連携推進に向け、新たなアプローチを積極的に取り入れている。海洋酸性化と生物種減少の因果関係を明らかにする上で、こうした取り組みは極めて重要な意味を持つ

## 概論

世界では今、生物多様性の危機が深刻の度合いを増しつつある。過去数十年を通じた動植物種数の急速な減少を受け、一部の専門家は新たな大量絶滅\*の可能性を示唆している<sup>1</sup>。今回の危機が過去の事例と大きく異なるのはその原因だ。先史時代に発生した大量絶滅の引き金となったのは、自然発生的な環境変化（突発的かつ大規模なものもあれば、より緩やかなものもあった）だった。しかし現在直面する危機の根本原因となっているのは、陸上・水域における生物乱獲や過剰な農業生産といった人間活動だ。長期的に見て特に大きな脅威となっているのは、絶え間ない二酸化炭素 [CO<sub>2</sub>] の排出によって加速する気候変動である。

海水温上昇に伴うサンゴ礁の白化・死滅など、気候変動の影響は世界各地の海で明らかに見てとれる。許容量を超える CO<sub>2</sub> の排出と海水の化学反応は海洋酸性化を引き起こし、プランクトン・貝類などに深刻な脅威をもたらすだけでなく、海洋生物の成長・繁殖を妨げている。

海洋環境の化学反応・生物学的プロセス\*\*に生じる変化と海洋酸性化の因果関係は、過去の研究からも明らかだ。例えば海洋酸性化を背景とする生物多様性の損失は、海洋生態系とそれ

を食料源・収入源とするコミュニティにも大きな影響を及ぼしてきた。政策担当者や国際機関関係者の多くは、こうした危機的状況を認識している。例えば対策推進を義務づける『国連生物の多様性に関する条約』[CBD] に基づき、締約国の多くは行動計画を打ち出している。しかし、国・地域・地方レベルの重要な取り組みが、政策・活動の重複や利益相反などによってリソース不足に陥る、あるいは推進力を失うケースも少なくない。

海洋酸性化対策の重要性を訴える専門家は、政策担当者間で危機感が十分共有されていない現状を危惧している。海洋酸性化は気候変動がもたらす他の影響と比べて可視化が難しいため、研究者は生物種減少との因果関係解明を通じて認知を高めようとしている。こうした取り組みには、他にもメリットがある。各環境で海洋酸性化が生態系の負荷となっているかを判別できること、そして対策ミスによる意図せぬ悪影響の可能性を回避できることだ。

因果関係の証明には、実験施設でのシミュレーションだけでなく、実環境での大規模なデータ収集が必要となる。海洋環境における化学反応・生物学的プロセスの監視活動（現在のところ

\* 大量絶滅=ある時期に多種類の生物が同時に絶滅すること

\*\* 生物学的プロセス=生物が生きるために不可欠で、環境と相互作用するための能力を形成するプロセス（過程）

別々に行われている)の連携強化も求められるだろう。一定の因果関係を証明するためには、数十年単位のデータが必要となる。しかし新たなアプローチを模索する専門家グループは、その大部分を今後数年内に証明可能だと考えている。

本報告書では、海洋研究の最新アプローチを応用することで、どのようにして海洋酸性化と生物多様性損失の因果関係を解明できるのかを検証する。検証結果の証明には、概ね数十年単位の時間が必要となることも多い。しかし海洋酸性化を他の負荷要因から切り離すことができる調査環境では、短期間で相関関係を示すことも可能だ。政策的対応が急務となっている現在、調査結果の早急な解明は大きな意味を持つだろう。

# 1. 海洋における生物多様性の危機

生物多様性損失の危機は、世界規模で悪化しつつある。International Union for Conservation of Nature [国際自然保護連合 = IUCN] の推計によると、現在絶滅の危機に晒されている生物・植物種は全体の 28% に上るとい<sup>2</sup>。IUCN が監視・評価体制の強化を進めた 1990 年代中期以降、その数は着実に増加している。

Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム = IPBES] の議長で、海洋研究組織 CORDIA East Africa の創設メンバー兼 ディレクターを務める David Obura 氏によると、生物多様性の損失が生態系にもたらす危機はさらに深刻だ。「生物種・植物種の相互作用は、生態系機能を根本的に支えている。生物多様性が失われる、あるいは一定水準まで悪化すれば、生態系は生物絶滅よりも遥かに前の段階で機能不全に陥ってしまう。」こうした状態に陥れば、人類もその恩恵を受けることができなくなるという。

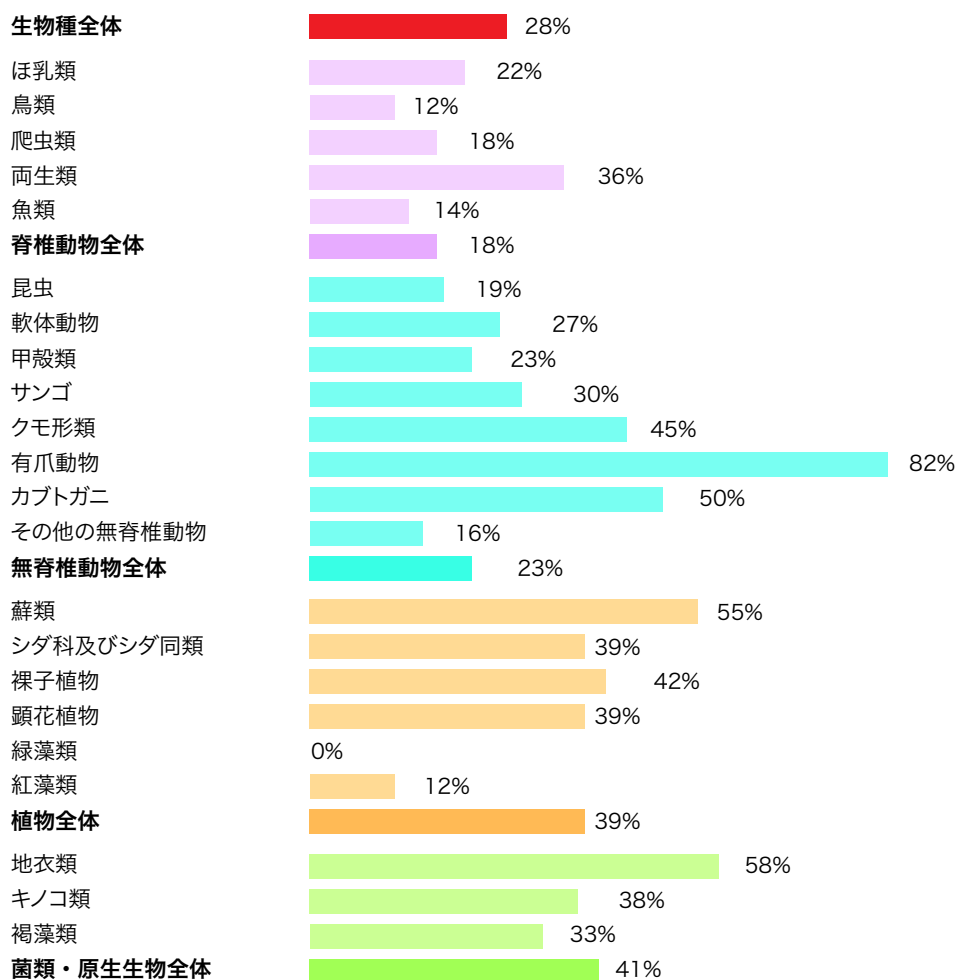
今日の世界で、生物多様性に最大の脅威をもたらしているのは人間活動だ。陸上環境における農地の拡大、森林破壊、生物の乱獲、侵略

的外来種の持ち込み、公海における水産資源の乱獲、そして沿岸部における農業排水・化学物質汚染などはその一例だ。また産業革命以降の CO2 排出増加に伴う気候変動も、陸上・海洋環境で深刻な影響を及ぼしている。

気候変動を背景とする海洋生物の減少は、既に危機的レベルにある。WWF International [世界自然保護基金] の海洋プラクティス・リーダー Pepe Clarke 氏は、「例えばサンゴ礁の破壊は世界各地で急速に進んでいる」と指摘する。この危機的状況を示すデータは枚挙にいとまがない。ある研究によると、1957 ~ 2007 年を通じてサンゴ礁全体の約 50% が失われた<sup>3</sup>。その影響の一つとして挙げられるのが、サンゴ礁魚類の減少だ。サンゴ礁魚類の総水揚量は 2001 年の約 230 万トンピークに減少へ転じており、努力量あたり漁獲量 [CPUE] \* も 1971 年以降着実に低下しつつある<sup>4</sup>。こうした状況から深刻なあおりを受けているのが新興国、特にサンゴ礁魚類を主要な食料源・収入源とする島嶼国だ。Obura 氏によると、「生物多様性の損失は、経済力の低い国・コミュニティへとりわけ大きな影響を及ぼしている。生態系破壊に対策を講じるための経済資源が十分でなく、危機的な状況に陥っている」という。

\* 努力量あたり漁獲量 [CPUE] = “努力量”は操業 1 時間あたりの水揚量、はえ縄であれば 1000 鈎あたりの漁獲尾数(重量)、あるいはそれに相当する他の目安で示される

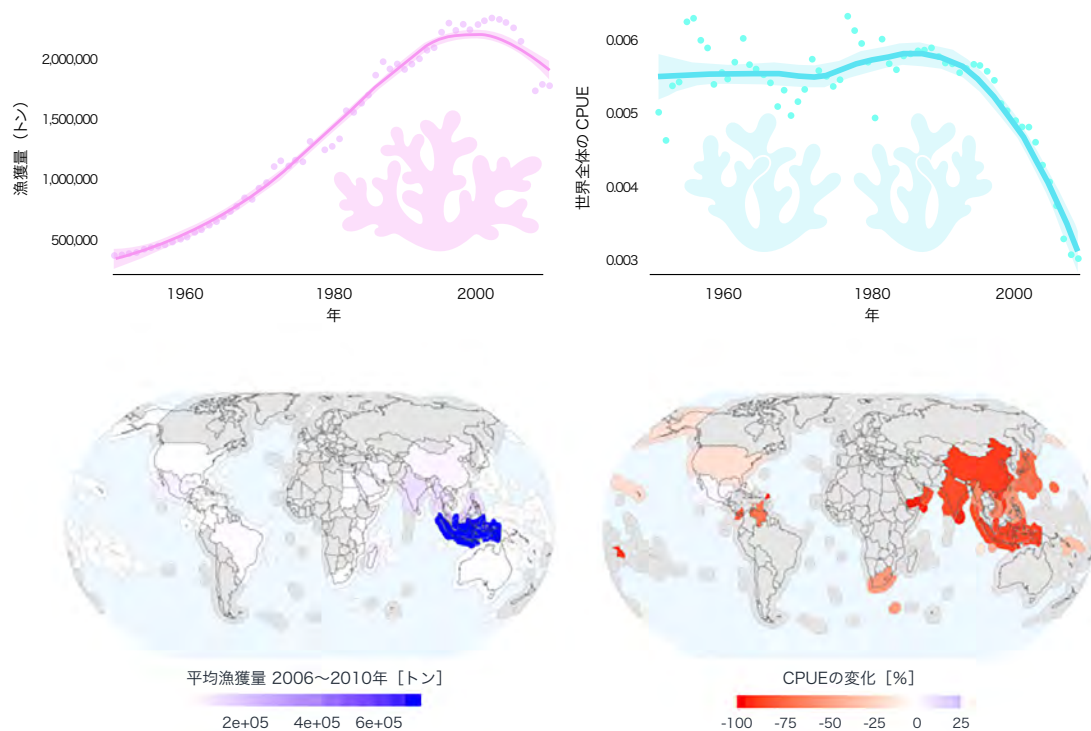
表1：主要生物グループに占める絶滅危惧種の割合（2023年現在）



資料：IUCN Red List (2023) 参照：<https://www.iucnredlist.org/resources/summary-statistics>



図2：サンゴ礁魚類の減少



資料：著者の好意により次の論文より転載 - TD Eddy, VWY Lam et al, "Global decline in capacity of coral reefs to provide ecosystem services", One Earth (17 September 2021) 参照：[https://www.cell.com/one-earth/fulltext/S2590-3322\(21\)00474-7](https://www.cell.com/one-earth/fulltext/S2590-3322(21)00474-7)

サンゴ礁と比べて社会的関心が低く、研究テーマとなることも少ないが、海洋環境の食物連鎖で重要な位置を占める生物種でも問題は深刻化している。円石藻類\*はその一例だ。地中海で

行われたある調査では、円石藻類に属する27種で細胞濃度低下と多様性損失の進行が確認された<sup>5</sup>。

\* 円石藻類=植物プランクトン的一种で、食物連鎖上位の生物種が外殻や骨格を形成する際に不可欠となる炭酸カルシウムの生成を担う

## 海洋酸性化と生物多様性の損失

円石藻類の例を含め、海洋環境における生物多様性損失との関連性がほぼ確実視されている要因の一つは海洋酸性化だ。暖房や発電、輸送機関など、人間活動にまつわる化石燃料の燃焼によって排出されるCO<sub>2</sub>の増加が、その直接的要因と考えられている。海が1年に吸収する大気中のCO<sub>2</sub>は、全体の20～30%程度だ<sup>6</sup>。炭素は海洋における生物学的プロセスの一端を担っており、多くの生物種の成長に不可欠な存在となっている。大気中から吸収し、長い時間をかけて分離するこのプロセスは、地球温暖化の軽減に一役買っている。しかし現在、排出量の増加によって海が分離しきれないCO<sub>2</sub>が海水の水素イオン濃度指数 [pH] 低下を招き、海の水質を酸性に近づけるといふ現象（すなわち海洋酸性化）が急速に進行しているのだ<sup>7</sup>。

海洋酸性化の影響が特に顕著なのは、貝類などの石灰化生物で生じる殻・骨格生成と成長の阻害だ。しかしスウェーデン ヨーテボリ大学生物環境科学学部の上級講師 Sam Dupont 氏によると、「この現象は問題の一端に過ぎない」という。「過去に経験のない状況（海洋酸性化もその一つ）へ対応するためには多大なエネルギーを必要とする」が、生物の多くは十分なエネルギーを蓄えていないためにダメージを受けてしまう。「ダメージはまず成長障害や卵数の減少といった形で現れ、より深刻なケースでは死滅につながる」という。

例えば米国北西部のオレゴン州・ワシントン州では、2007～08年にかけてカキの幼生が大量に死滅し、養殖業者に大きな打撃を与えた。研究者グループは海水の酸性度上昇をその原因として特定している<sup>8</sup>。動物プランクトンの一種で鮭・クジラなど大型海洋生物の餌となる有殻翼足類も、深刻な影響を受ける生物種の一つだ。CO<sub>2</sub>濃度が高く、かつアラゴナイト\*の濃度が低い海域、つまり海洋酸性化が進む水域では、有殻翼足類の殻・骨格強度低下が確認されている<sup>9</sup>。

## 認知の高まりと対策の遅れ

国際社会では、海洋酸性化が生物多様性にもたらす脅威について認識が高まりつつある。2022年12月に開催された第15回生物多様性条約締約国会議 [CBD-COP15] では、生物多様性損失の防止と生態系の回復に向けて2030年までに達成すべき23の目標を採択。目標8は「気候変動と海洋酸性化が生物多様性へもたらす影響の最小化と、軽減・適応・災害リスク軽減措置を通じたレジリエンスの強化」を謳っている<sup>10</sup>。

国連はこの目標を掲げることで海洋酸性化と生物多様性損失の相関関係を認め、締約国に対策の推進を義務づけたのだ。同目標の達成に向け、締約国は生物多様性関連法案における海洋酸性化対策の明記、影響軽減に向けた取り組みと、具体的目標の策定、進捗状況の監視を求められている。

\* アラゴナイト＝殻・骨格の硬度を維持するために不可欠な鉱物

依然として数は限られるものの、具体的措置を実行に移す政府・自治体も見られる。OA Alliance [旧名：The International Alliance to Combat Ocean Acidification = 海洋酸性化の克服に向けた国際連合] の調査によると、本報告書の執筆時点で13カ国の政府が行動計画を策定済みだ<sup>11</sup>。

取り組みが必ずしも進んでいない理由はどこにあるのだろうか。『Back To Blue』が昨年発表した報告書『海洋酸性化の克服に向けたアプローチ：危機の深刻化と行動計画の重要性』で指摘したとおり<sup>12</sup>、背景の一つは行動計画の策定に必要な資金・リソースが不足する現状だ。

計画実施・監視に向けた取り組みでは、この問題がさらに深刻となっている。財源の豊富な国々でも、水産資源の乱獲や化学汚染といった問題が優先されがちだ。ヨーテボリ大学のDupont氏は、「打ち出すべき対策はわかっているが、政策担当者に実行を促すのは容易でない。一部の生物種が20年以内に死滅するという警告だけでは、人々の危機感を高めることは難しい」と指摘する。

海洋酸性化と生物多様性損失の直接的関係を疑いの余地なく証明できれば、危機意識の醸成を促すことができるだろう。

## 2. 海洋酸性化の可視化に向けて

海洋酸性化については、過去 20 年を通じて数多くの研究が行われている。しかし、生物多様性損失との関係性を明らかにすることは決して容易でない。因果関係を明確に示す実例はほとんど存在しないからだ。

海洋酸性化が海における化学反応と生物にもたらす影響は、数々の研究により明らかになりつつある。しかしエビデンスの多くは、(実地調査ではなく) 実験施設でのシミュレーションという特殊な条件で得たものだ。「海洋酸性化が単一の生物種にもたらす影響は、人工的に CO2 濃度を高めた海水を実験用水槽で再現すれば検証できる。しかし、生態系の相関関係(特に食物連鎖)にもたらす複雑な変化をこうした実験で解明するのは難しい」と指摘するのは、東京大学 大気海洋研究所教授の藤井賢彦氏。日本の政策担当者・政府関係者から予算・リソースを確保するためには、実環境での調査結果を示す必要があるという。

オーストラリア連邦科学産業研究機構 [CSIRO] の主任研究員 Karen Evans 氏は、「海洋酸性化が海洋生物や生態系に負の影響をもたらしていること、そして海水の CO2 濃度上昇によってさらに問題が深刻化することは、これまでの研究データからも明らかだ」と指摘する。「しかし、様々な環境負荷要因の相互作用や、生物種それぞれの対応能力は依然として解明が進んでいない。」

### 生物種減少と主な要因

Evans 氏の言う“負荷要因”は(特に沿岸部では)無数に存在し、各環境によって異なることが多い。海洋酸性化以外の主な要因は以下の通り:

- **海水温上昇**: 地球温暖化の進行によって、海水の温度も上昇しつつあり、代謝や必要酸素量の変化、低負荷環境への移動に伴う生態系の変容など、海洋生物へ深刻な影響を及ぼす恐れがある
- **貧酸素化**: 沿岸部では、海水温上昇と河川からの栄養素流入によって貧酸素化が進行し、生物の生理的・生物学的プロセスに影響を及ぼす恐れがある。事態を更に複雑化させるのが沖合や深海部でも進む貧酸素化だ。湧昇 [upwelling] と呼ばれる現象によってこうした貧酸素化した水塊が海表面層まで上昇することの影響も深刻だ
- **富栄養化**: 栄養素が河口部流域に蓄積(農業排水が大きな要因)することで、藻類や植物プランクトンなどが異常増殖。こうした生物の腐敗・有機物分解に伴い大量の CO2 が発生し、pH の低下と酸性度の上昇を招く





海洋酸性化が海洋生物にもたらす影響を解明するには、こうした現象や他の負荷要因が複合的にもたらす複雑な相互作用を理解する必要があります。英プリマス海洋研究所の科学研究担当ディレクターで全球海洋酸性化観測ネットワーク [GOA-ON] の共同議長を務める Widdicombe 氏によると、「CO<sub>2</sub> 濃度の上昇が海水に及ぼす影響については、すでに多くのことがわかっている。しかし沿岸部については、炭酸塩の化学反応に関するパラメータを左右する要因が少なからず存在するため、未知の部分が多い」という。

負荷要因それぞれの影響を解明することは極めて重要な意味を持つ。対策が意図せぬ結果につながる可能性があるからだ。例えば自然生息地の回復は、生物の生き残り・適応に高い効果を発揮すると考えられている。しかしヨーテ

ボリ大学の Dupont 氏は、「回復措置は科学的かつ適切に行う必要がある。活用法を誤れば、マイナスの結果を招きかねない」と指摘する。藻場回復を目的として最近行われたある取り組みはその一例だ。同氏によると、「様々な面で重要な意味を持つプログラムだったが、海洋酸性化の影響をかえって増幅させることが判明した」という。

因果関係を解明するためには、海洋酸性化と生物学的プロセスの統計学的相関関係を明らかにする必要がある。地方・コミュニティなどミクロレベルで両者の関係を解明すれば、海水の酸性度を効果的に軽減できるだろう。また国などのマクロレベルでは、“今そこにある”脅威として海洋酸性化の深刻さを浮き彫りにし、政策担当者などの主要ステークホルダーに対策の緊急性を訴えることができるはずだ。

## 海洋酸性化研究の新たなアプローチ [1]：CO<sub>2</sub> シープの分析

海洋酸性化が生物種にもたらす影響をエビデンスとして確立できる自然環境は、研究者にとって極めて重要な意味を持つ。実験施設でも自然環境が備える条件はある程度整えられるが、多様な生物種の複雑な相互反応を再現することは難しいからだ。この課題を克服すべく、東京大学の藤井賢彦氏が所属する研究者グループは、二酸化炭素が噴き出す海底火山の周辺部（“CO<sub>2</sub> シープ”と呼ばれる）で実地調査に取り組んでいる。CO<sub>2</sub> が比較的高濃度で含まれ、pH 値が低い CO<sub>2</sub> シープでは、酸性化が進行した海洋環境の未来を垣間見ることができる。

CO<sub>2</sub> シープは、沿岸部・島嶼部の活火山周辺で多く見られる。これまで多くの研究が行われてきたシチリア ヴルカーノ島沿岸部など、一部の CO<sub>2</sub> シープでは pH 値が 6 を下回ることもあるという<sup>13</sup>。（海面表層の世界的な平均 pH 値は現在 8 程度と言われている<sup>14</sup>。）科学者が発見した CO<sub>2</sub> シープは世界全体に約 70 存在し（最も多いのは地中海海域）、日本の沿岸地域にもいくつかの CO<sub>2</sub> シープが見られる<sup>15</sup>。藤井氏が所属する研究グループは、海洋酸性化が生物多様性に及ぼす影響を検証するため、姫島（大分県）・昭和硫黄島（鹿児島県）の海域で調査を進めている。

### データ蓄積の重要性

藤井氏の研究チームが収集したデータは、現在のところ公開されていない。しかし pH 値のより高い周辺海域と比べ、CO<sub>2</sub> シープでは生物多様性の著しい減少（サンゴ礁やサンゴ礁魚類など）が確認できたという。

他の CO<sub>2</sub> シープで研究を進めているグループも、CO<sub>2</sub> 濃度の高い海域における生物多様性の減少を報告しているが、適応する生物種も一部見られる。ヴルカーノ島沿岸部の CO<sub>2</sub> シープはその一例だ。同地域の調査チームによると、藻類の多くは今世紀末に予測される CO<sub>2</sub> 濃度にも耐えうる能力を備えていた<sup>16</sup>。しかし、円石藻類・腹足類動物・コケムシ動物門・カンザシゴカイ科の動物など、食物連鎖で重要な役割を担う生物種の多くでは、個体数の減少が確認されている<sup>17</sup>。海洋酸性化が長期的影響を及ぼした地域では、生態系の複雑性（つまり生物多様性）が損なわれるというのが同調査チームの結論だ。

生物種による海洋酸性化の影響差を解明することは極めて重要な意味を持つ。藤井氏は CO<sub>2</sub> シープの調査を進めることで、理由の一端を明らかにできると考えている。「CO<sub>2</sub> シープは、海洋酸性化を自然環境の中で再現できる数少ない場所だ。現在の温室効果ガス排出が継続した場合の、海洋環境の将来的変化を予測することができる。」

### 3. データ統合に向けた取り組みの必要性

海洋酸性化と生物多様性損失の因果関係を解明する上で現在大きな課題となっているのは、監視・データ収集・分析活動の連携強化だ。化学・生物学研究の領域においては特に急務となっている。

沿岸部・公海では、これまで数十年にわたって科学的調査が行われてきた。例えば世界各国の沿岸部には、海洋生物とその生息環境を定期的に監視・分析する測定所が数百単位で設置されている。また公海では、遠征調査や調査船の派遣、係留索具の活用などを通じた研究活動が進められている。しかし、ユネスコとその傘下の政府間海洋学委員会 [IOC] が統括する研究機関 グローバル海洋観測システム [GOOS] によると、こうした研究の対象となる海域は全体のわずか7%にすぎない<sup>18</sup>。






「海洋酸性化と生物多様性損失の因果関係を解明するためには、pH 値の変化動向だけでなく、関連する生物学的情報も必要だ」と指摘するのは GOOS 共同議長も兼任する CSIRO の Evans 氏。「現段階で収集対象となっている生物学的データはごくわずかで、海洋環境における化学反応と関連付けた分析も行われていない」という。

問題は海洋酸性化の観測と生物多様性のモニタリングといった二つの調査が、全く別々に進められていることだ。互いの研究成果を体系的に活用する取り組みはほとんど見られない。

## 研究指標の共通化に向けて

全球海洋酸性化観測ネットワーク [GOA-ON] の生物学ワーキング・グループに属する海洋研究者は、こうした現状の変革に取り組んでいる。同グループが最初に取り組んだのは、海洋酸性化の生物学的影響をあらゆる地域・時系列にまたがって評価・比較するための共通指標を開発することだ<sup>19</sup>。

指標セットは五つの特性に分類され、海洋生態系のあらゆる生物種に適用される。同グループのメンバーである Widdicombe 氏によると、これらの特性が例外なく海洋酸性化の影響を受けることは、過去の調査結果から明らかだという：

 石灰化	 一次生産	 成長力	 生物多様性	 遺伝子的適応
海洋酸性化が炭酸カルシウムの殻・骨格に及ぼす影響は、五つの特性の中で最も研究されているテーマだ。生物種全体に占める石灰化生物の生物量・個体数・割合の変化は、海洋酸性化と他の負荷要因を分別する指標として活用できる	海洋植物・藻類は、海における食物連鎖を根底から支える存在だ。その成長力・エネルギー消費量を同じ海域における CO2 濃度変化と比較することで、重要な手がかりを得ることができる	海洋酸性化に伴う炭酸イオンの濃度変化によってエネルギー消費量が増加すれば、食物連鎖上位の生物の生物量・生殖力に影響をもたらす可能性がある	左記三つの特性・過程に生じる変化は、生物多様性と生態系の構造に大きな影響を及ぼしかねない。海洋酸性化は、直接的（石灰化の阻害、成長力・生殖力の低下など）あるいは間接的（行動習性の変化、免疫力低下など）な形で生物種の損失につながる恐れがある	対応方法は生物種によって異なる。しかし海洋酸性化が遺伝子レベルの変化を引き起こすことは間違いない。分子レベルで海洋酸性化の影響を特定・評価すること、そして将来的な変化を生態系・生物種単位で予測することは、現代のテクノロジーでも可能だ

資料:S Widdicombe, K Isensee, Y Artioli, JD Gaitan-Espitia, C Hauri, JA Newton, M Wells, S Dupont, "Unifying biological field observations to detect and compare ocean acidification impacts across marine species and ecosystems: What to monitor and why", Ocean Science (2023年1月25日) 参照: <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2022/egusphere-2022-907/>

IOC で海洋炭素プログラム・スペシャリストと生物学ワーキング・グループ共同議長を兼任する Kirsten Isensee 氏によると、特性・指標を（既存の枠組みを超えて）より広く定義できれば、監視・研究グループによる世界規模の連携が可能になり、計測・調査結果の互換性も向上する。「我々は調査の比較基準を、生物種別のものから変化の度合いに重点を置いたものへ変更した。これにより、海洋酸性化・生物学の専門家双方が共通の土台に立って評価を行えるようになる」という。

Widdicombe 氏によると、こうした新たなアプローチは、今後の研究活動だけでなく既存データの分析にも有効だという。「一部の地域では、生物学・炭素化学反応の領域で比較可能な監視データがすでに 10～15 年分蓄積されている。新たなアプローチでデータを分析し直せば、これまで見過ごされてきた相関関係に光を当てられるはずだ。」



## 海洋酸性化研究の新たなアプローチ [2]：冷水サンゴ

熱帯サンゴ礁の悲劇的な状況は、世界規模で大々的に報道されている。しかし深海部で冷水サンゴの減少が進んでいることは（海洋研究コミュニティを除けば）ほとんど知られていない。

その主な要因は、環境によって様々だ。例えば水深の浅い海域に生息する熱帯サンゴ礁の場合は、海水温上昇や大規模な白化現象が主な要因となっている。一方、低水温海域で主な原因となっているのは海洋酸性化だ。深海部のユニークな環境（米国 カリフォルニア州南部など）では、冷水サンゴの生息域周辺で見られる生態系の損失と海洋酸性化の因果関係がより明白になる。英国エジンバラ大学地球科学学部の講師 Sebastian Hennige 氏によると、「こうした地域の生態系を分析すれば、海水の CO<sub>2</sub> 濃度変化が冷水サンゴに及ぼす将来的影響、ひいては深海部のサンゴ礁が今世紀末時点で置かれる状況を予測することができる」という。

冷水サンゴは炭酸カルシウムで骨格の主成分を生成し、深海部で最大幅数 km・高さ 300 m に及ぶサンゴ礁を形成する。その底部は死滅したサンゴの骨格で構成されており、生息するサンゴと多様な生態系を支えている。Hennige 氏によると「冷水サンゴが織りなす複雑な三次元の構造体は、息を呑むほど美しい」という。死滅したサンゴでできた構造体には、イソギンチャク・ウニ・ハマグリ・ヒトデ・小エビなどが生息し、大型の生物種（魚・カニ・イセエビなど）に餌場を、エイ・サメなどには産卵の場を提供する。

### “サンゴ” 粗しょう症

深海部のサンゴ礁では、海洋酸性化により炭酸塩鉱物アラゴナイトの飽和度が低下し、それを成分とする骨格（そして他の海洋生物では殻）の弱体化・溶解が進んでいる。Hennige 氏の研究チームは、骨粗しょう症 [osteoporosis] にちなみ、この現象を“サンゴ”粗しょう症 [coralporosis] と名付けた<sup>20</sup>。「サンゴ粗しょう症は急速に深刻化しており、死滅したサンゴの骨格で作られた底部の構造体が脆弱化・崩壊の危機に瀕している。サンゴ自体が生き残る可能性はあるが、ここに生息する他の生物は大きな脅威へ晒されるだろう。近い将来、生態系全体が壊滅する可能性も否定できない」と Hennige 氏は危機感をあらわにしている。

沿岸部と異なり、深海部では生態系・生物への負荷要因が限られている。そのため研究者は、深海部における生物多様性損失の主要因が海洋酸性化であることをほぼ確信している。理由の一つは、サンゴ礁の海洋酸性化の影響に晒された部分が死滅しつつあることだ。Hennige 氏によると、「生きた生物種が調査対象の場合、貧酸素化や海水温上昇といった要因と海洋酸性化を切り離して分析することは難しい。例えば海水温上昇は、熱帯サンゴ礁により大きな影響を及ぼしている。しかし死滅したサンゴはこうした要因の影響を受けないため、骨格の空洞が海洋酸性化によるものだと断定できる」という。

こうしたアプローチが異なった環境・生物種にも適用可能かどうかは、依然として不明だ。しかし現在、多くの海洋科学者が因果関係の証明に向けて研究活動を続けている。

## 4. 概念から実践へ

IOC 生物学ワーキング・グループは、統合的なデータ収集・分析を通じた因果関係の証明に向けて、概念実証 [proof of concept = POC] に取り組んでいる。共同議長の Isensee 氏によると、2 年計画で実施されるプロジェクトでは、化学物質・生物に関する既存のデータセットを活用した取り組みが行われるという。「極めて早い段階で、生物多様性損失と海洋酸性化の相関関係を明らかにできる」というのが同氏の見方だ。

同プロジェクトの結果は、国連各組織だけでなく生物学研究者コミュニティとも共有される予定だ。「これは知的拡充・マーケティングを目的とした活動だ。我々のアプローチに対する研究者・その他ステークホルダー（政府関係者など）の認知を高め、取り組みへの参加を促すことを目指している。より多くの研究プログラムに、トップダウンでアプローチの導入を後押しして欲しい」と語るのは Widdicombe 氏。

同ワーキング・グループが次のステップとして考えているのは、生物学調査チームの研究、分析ツールの開発、データ収集・評価手法の標準化に向けた取り組みの拡大だ。ヨーテボリ大学の Dupont 氏がコンサルタントを務める Ocean Acidification International

Coordination Centre [海洋酸性化国際調整センター] などの国際機関は、その支援役として重要な役割を担うだろう。International Atomic Energy Agency [国際原子力機関 = IAEA] の関連組織である同センターは、海洋酸性化に関するデータ共有・研修などの活動を通じた、国際的連携の推進をミッションとしている。IOC は概念実証プロジェクトの一環として作成された研修用資料をこうした組織と共有する予定だ。

Widdicombe 氏と研究チームは、監視活動関係者の教育・研修を世界規模で推進することの難しさを認識している。特に新興国では、財源確保が大きな課題となるだろう。「データ計測・収集に高額なツールや経験豊富な専門家が必要なアプローチを採用しなかったのはそのためだ。新興国の監視チームは、既に生物学的データの収集を行っている。我々は、海洋酸性化とのデータ比較を容易にする取り組みを推進するつもりだ」と同氏は語る。

もう一つの鍵を握るのは、両分野でデータへのアクセス性を向上させる取り組みだ。Isensee 氏によると、海洋酸性化・生物学それぞれに関するデータ共有が可能なポータルサイトは既に運営されている。しかし「相関関係を

検証する研究者が、両分野のデータをワンストップで入手できるサービスが必要だ」という。国レベルのデータ共有サイトと自動連携すれば、GOA-ONなどの既存サービスがこうした役割を果たせるというのが同氏の考えだ。

### 求められるアクション

こうした取り組みが抱える課題の一つは、決定的な証拠が明らかになるまでに数年（生物種によっては数十年）単位の時間がかかることだ。ただし、結果が明らかになるまで対策実施を控える必要はない。「実態解明に向けて、更なる研究が必要だ。しかし対策は今すぐに打ち出すことができる。政策担当者は、明確なエビデンスが確立されるまで行動を控えがちだが、我々にそんな時間の猶予はない」とDupont氏は語る。

『1. 海洋環境と生物多様性の危機』（P. 8～9）で触れたとおり、既に幾つかの組織が豊富なリソースを投入し、海洋酸性化に特化した対策を打ち出している。海洋生物への影響が最初に

明らかとなった米国北西部で州政府が行う取り組みはその一例だ。北米をはじめとする地域では、その他にもいくつかの政府・自治体が計画の策定を進めている。海洋酸性化に特化したプログラムが存在しない地域も少なくない。しかしこうした地域でも、包括的取り組みの一環として対策が多く進められている<sup>21</sup>。

海洋酸性化と生物多様性損失の因果関係が十分解明されていない現状を考えれば、対策が結果として不適切なものだと判断される可能性も否定できない。Widdicombe氏が指摘するように、「潜在リスクが深刻なケースでは、十分な知見を確立してから行動を起こす必要」がある。「しかし多くの場合、今アクションを起こすことによってもたらされる負のリスクはそれほど大きくない。こうした環境では対策を早急に進めるべきだ」というのが同氏の見方だ。

## おわりに

本報告書では、海洋酸性化と生物多様性損失の因果関係解明に向けた、より包括的・統合的な研究活動の必要性について論じてきた。こうした取り組みは科学研究の推進だけでなく、政策担当者ひいては社会全体で危機意識を醸成するために重要な意味を持つ。気候変動がもたらす影響（異常気象など）と異なり、海水の pH 値低下や化学反応の変化は可視化や体感が難しい。海洋酸性化が愛すべき海洋生物の減少につながることを科学的に証明できれば、危機意識そして対策を求める市民の声は高まるはずだ。

また具体的なインパクトを実現するためには、因果関係に関する調査をさらに加速させ、人類に多くの恵みをもたらす生態系に海洋酸性化が及ぼす影響をより正確に予測する必要がある。

GOA-ON は、海洋酸性化の影響評価指標の一つとして、生態系サービスの変化を挙げている。海洋酸性化が及ぼす生物多様性への影響が

明確化された後、さらに解明される必要があるのは、生物多様性の減少がもたらす漁業・養殖産業、食料供給、海洋ツーリズム、雇用、地方・地域あるいは国の経済への損失だ。

世界自然保護基金 [WWF] の Pepe Clarke 氏は取り組みの緊急性を訴え、「我々はこの問題に関する基礎研究が社会やビジネスにどのような意味を持つのかを明確化させる必要がある。それによって、研究結果が政治的にも社会的にも重要であることを提示することができるからだ」と指摘する。サンゴ礁生態系など生物多様性損失のあおりを受けるコミュニティ・地域・国にとって、こうした取り組みは特に重要な意味を持つ。また他のコミュニティ・企業にとっても、「10～15年後、同じ状況に直面した場合、どのような影響があり、どのような対策が可能かを“自分ごと”として理解し、適応するための道筋を考える」機会となるはずだ。



## 脚注

- 1 See, for example, G Ceballos, P Ehrlich and R Dirzo, "Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines", PNAS (2017年7月20日)  
参照: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1704949114>
- 2 IUCN Red List (2023年) 参照: <https://www.iucnredlist.org/resources/summary-statistics>
- 3 TD Eddy, VWY Lam et al, "Global decline in capacity of coral reefs to provide ecosystem services", One Earth (2021年9月17日) 参照: [https://www.cell.com/one-earth/fulltext/S2590-3322\(21\)00474-7](https://www.cell.com/one-earth/fulltext/S2590-3322(21)00474-7)
- 4 TD Eddy, VWY Lam et al
- 5 P Zivere, M Passaro et al, "Decline in Coccolithophore Diversity and Impact on Coccolith Morphogenesis Along a Natural CO<sub>2</sub> Gradient", The Biological Bulletin (2014年6月) 参照: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/BBLv226n3p282>
- 6 Economist Impact, "An ocean crisis in the making", Back to Blue (2022年11月)  
参照: <https://backtoblueinitiative.com/ocean-acidification/>
- 7 pHは0から14までの値で示される。平均海面のpH値は過去1世紀の間に8.2から8.1以下に下落。下落幅の約半分は、過去40年に生じたものだ : Economist Impact, "An ocean crisis in the making"
- 8 A Barton, G Waldbusser, R Feely et al, "Impacts of Coastal Acidification on the Pacific Northwest Shellfish Industry and Adaptation Strategies Implemented in Response" (2015年) 参照: <https://ir.library.oregonstate.edu/downloads/5425kc600>
- 9 N Bednaršek, R Feely et al, "Global Synthesis of the Status and Trends of Ocean Acidification Impacts on Shelled Pteropods", Oceanography (2023年10月30日)  
参照: <https://tos.org/oceanography/article/global-synthesis-of-the-status-and-trends-of-ocean-acidification-impacts-on-shelled-pteropods>
- 10 "COP15: Nations Adopt Four Goals, 23 Targets for 2030 in Landmark UN Biodiversity Agreement", Convention on Biological Diversity (CBD) press release (2022年12月19日) 参照: <https://www.cbd.int/article/cop15-cbd-press-release-final-19dec2022>
- 11 OA Alliance website 参照: <https://www.oaalliance.org/member-examples> 行動計画の多くは、太平洋北西部の州政府によって策定されたものだ。またヨーロッパ15カ国の政府と欧州連合 [EU] が締結したオスバル条約も行動計画を打ち出している。
- 12 Economist Impact, Ocean acidification: Time for action (2023年11月) 参照: <https://backtoblueinitiative.com/ocean-acidification/> and <https://backtoblueinitiative.com/ocean-acidification-time-for-action/>
- 13 A. Aiuppa, JM Hall-Spencer et al, "Volcanic CO<sub>2</sub> seep geochemistry and use in understanding ocean acidification", Biogeochemistry (2020年12月9日) 参照: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10533-020-00737-9>
- 14 Economist Impact, "An ocean crisis in the making"
- 15 A. Aiuppa, JM Hall-Spencer et al
- 16 このCO<sub>2</sub>濃度は、気候変動政府間パネル [IPCC] が示した最も深刻な代表濃度経路シナリオ [Representative Concentration Pathways] RCP8.5で示した数値に基づくもの。より低いレベルの排出量や長期的減少を想定した他の三つ (RCP2.6・RCP4.5・RCP6.0) とは異なり、RCP8.5 (高位参照シナリオ) は、2100年時点の最大排出量を念頭に置いている。  
参照: Economist Impact, "An ocean crisis in the making"
- 17 A. Aiuppa, JM Hall-Spencer et al
- 18 UNESCO, "The "three horsemen" of climate-linked biodiversity loss: why improving ocean observing is crucial for life below water" (2023年10月18日)  
参照: <https://www.unesco.org/en/articles/three-horsemen-climate-linked-biodiversity-loss-why-improving-ocean-observing-crucial-life-below>
- 19 S Widdicombe, K Isensee et al, "Unifying biological field observations to detect and compare ocean acidification impacts across marine species and ecosystems: What to monitor and why", Ocean Science (2023年1月25日)  
参照: <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2022/egusphere-2022-907/>
- 20 SJ Hennige, U Wolfram et al, "Crumbling Reefs and Cold-Water Coral Habitat Loss in a Future Ocean: Evidence of 'Coralporosis' as an Indicator of Habitat Integrity", Frontiers in Marine Science, vol 7 (2020年9月17日)  
参照: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2020.00668/full>
- 21 Economist Impact, Ocean acidification: Time for action

**ロンドン**

The Adelphi, 1-11 John Adam St,  
London WC2N 6HT,  
United Kingdom  
Tel: (44.20) 7576 8000  
Fax: (44.20) 7576 8500  
Email: london@economist.com

**ジュネーブ**

Rue de l'Athénée 32  
1206 Geneva  
Switzerland  
Tel: (41) 22 566 2470  
Fax: (41) 22 346 93 47  
Email: geneva@economist.com

**ニューヨーク**

750 Third Avenue  
5th Floor  
New York, NY 10017  
United States  
Tel: (1.212) 554 0600  
Fax: (1.212) 586 1181/2  
Email: americas@economist.com

**ドバイ**

Office 1301a  
Aurora Tower  
Dubai Media City  
Dubai  
Tel: (971) 4 433 4202  
Fax: (971) 4 438 0224  
Email: dubai@economist.com

**香港**

1301  
12 Taikoo Wan Road  
Taikoo Shing  
Hong Kong  
Tel: (852) 2585 3888  
Fax: (852) 2802 7638  
Email: asia@economist.com

**シンガポール**

8 Cross Street  
#23-01 Manulife Tower  
Singapore  
048424  
Tel: (65) 6534 5177  
Fax: (65) 6534 5077  
Email: asia@economist.com