

海洋酸性化と水質環境基準 pH、表層および底層 DO

京都大学 名誉教授
藤 原 建 紀

1. はじめに

1. 1. 海洋酸性化

大気中の二酸化炭素(CO_2)濃度は、図 1 に示すように、どんどん上昇しています¹⁾。この図は、気象庁によって、岩手県大船渡市綾里(りょうり)において測られている大気 CO_2 濃度です。気象庁では、ほかに南鳥島、与那国島、昭和基地(南極)においても温室効果ガス等の測定を行っています。

海洋酸性化とは、大気中の CO_2 が海洋に溶け込み、海水の水素イオン濃度(pH)を低下させることです。中性が $\text{pH} = 7$ で、これより pH が高ければアルカリ性、低ければ酸性です。海洋の pH は 8 程度ですから、海水はもともと弱アルカリ性なのですが、海洋酸性化では、「pH が低下すること」を酸性化と呼んでいます。

1990 年代末から 2000 年代はじめにかけて、海洋酸性化が海洋生物に影響を及ぼすことが指摘されはじめたことで、研究者の間で海洋酸性化への問題意識が急速に高まりました²⁾。海洋酸性化は、特に、炭酸カルシウムの殻や骨格を持つ生物(プランクトンの円石藻・翼足類・有孔虫、貝類、サンゴ、甲殻類など)の生育を阻害することが懸念されています。

海洋酸性化が実際に進んでいることは、現在までに、いくつかの長期的な時系列観測データから明らかになっています。西部北太平洋においては、Midorikawa *et al.* (2010)が、気象庁の東経 137 度線の観測定線において、1983 年から 2007 年の表面海水中的 pH の平均低下速度が、冬季に 10 年あたり -0.018 ± 0.002 、夏季に 10 年あたり -0.013 ± 0.005 であったと報告しています^{2,3)}。

1. 2. 沿岸酸性化

一方、東京湾や大阪湾などの内湾の河口域には、pH が低い水域があり、沿岸酸性化と呼ばれます。この pH が低いのは、大気 CO_2 濃度の上昇によるものではなく、主に水の有機物汚濁(富栄養)に関するものです。水中の有機物が分解するときに、酸素(O_2)が消費され、 CO_2 が生成されます。このため、有機物分解で溶存酸素濃度(DO)が低下した貧酸素水塊中には、大量の CO_2 が蓄えられております。このため、貧酸素水塊中の pH は著しく低くなっています^{4,5)}。

pH と DO の関係性は、日周期変動にも明瞭にみられます。図 2 は、これを、森林植物を例に説明したものです。昼間は、太陽の光で光合成(有機物生産)が起こり、 CO_2 を消費し、 O_2 が生成されます。一方、夜間は、植物の呼吸で、 O_2 と有機物が消費され、 CO_2 が放出されます。

この日周期変動を、海(神戸市東部深江港沖海域)で測ったものが図3です⁵⁾。1 時間に 1 回の自動測定です。図の灰色の縞は夜間(日没～日出)を表し、白色は昼間です。昼間には、 O_2 が増え CO_2 が減るので、DO が上昇し、pH、COD

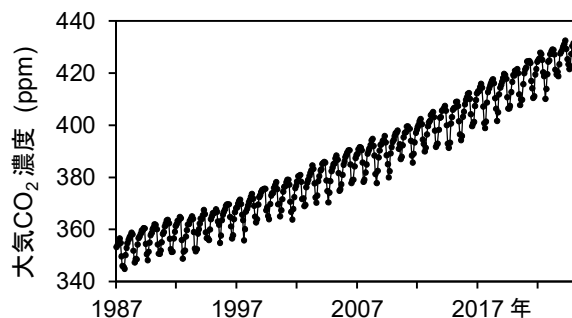


図 1 大気二酸化炭素濃度(綾里)、月別
1987 年～2025 年 6 月

(有機物量を表す)も上昇します。一方、夜間はこれの逆になります。DO、COD、pH の変動は、日周期変動だけでなく、数日の時間スケールでもよく連動して変動しています。

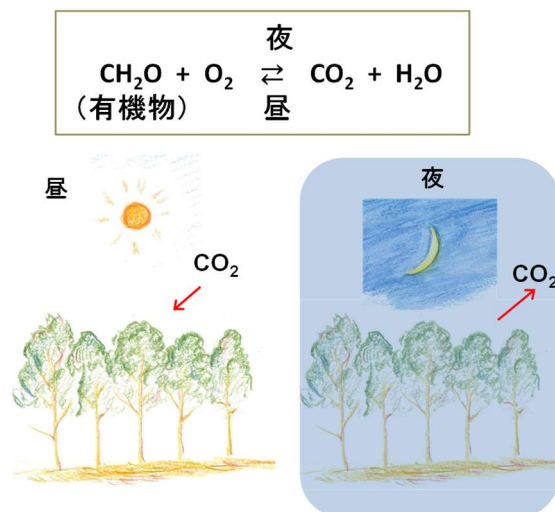


図2 有機物の生成・分解と、CO₂およびO₂の関係

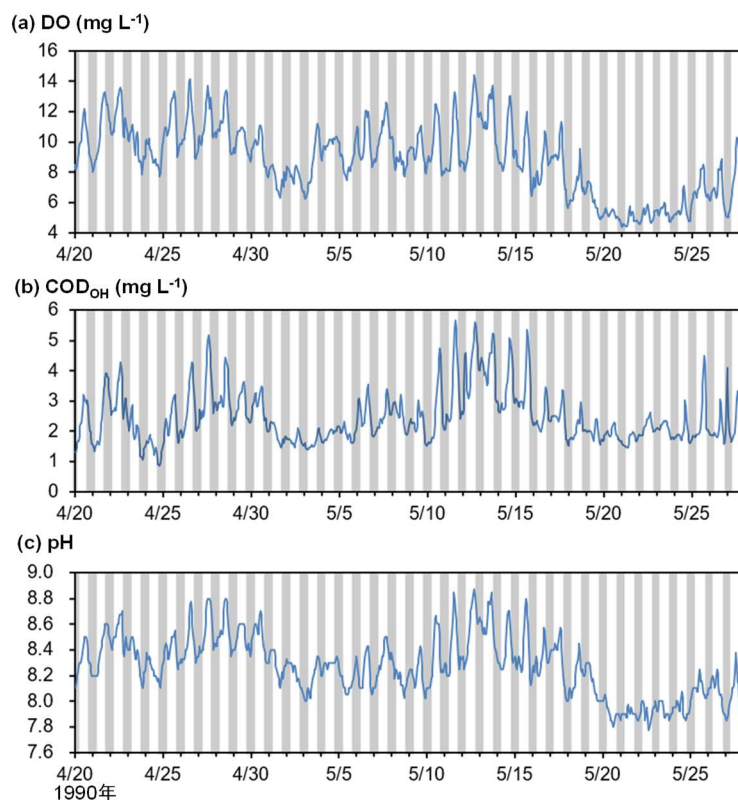


図3 神戸市東部深江港沖海域で測られた(a) DO、(b) COD_{OH}、(c) pH。
灰色および白色の縞は、それぞれ夜間、昼間を表す。

図4は、東京湾北部における表層の pH および DO 飽和度です⁵⁾。この測点では、2010 年から毎時の水深 1 m ごとの水質が自動測定され、配信されています。溶存酸素(DO)を飽和度で表示しているのは、DO 飽和度が 100%より大きいと、海水から大気へ O₂を放出しており、海水中で有機物が作られていると

考えられるからです。つまり DO 飽和度が 100%以上と以下は、それぞれ有機物生成と分解に対応しています。

図4では、年変動においても、pH と DO の間に対応関係がみられます。2023 年 6 月には pH と DO 飽和度が急に大きくなっていますが、これは本年(2025 年)と同じ様に、6 月にもかかわらず晴天の日が多く、光合成による有機物生成が盛んであったためです。

1. 3. pH の変動幅

pH の変動幅は、沿岸海域と外海では大きく異なります。図4の pH の標準偏差は 0.30 です。一方、外海の pH の標準偏差は 0.032 であり、1桁小さくなっています⁵⁾。また、海洋酸性化(大気 CO₂ 濃度の増加に起因するもの)による pH 低下量は、10 年あたり約 0.02 低下です^{2,3)}。つまり、沿岸海域では、大気 CO₂ 濃度の増加に起因する pH 低下よりも、遙かに大きな pH 変動があります。

沿岸海域での pH および DO の変動は複雑で、ときには enigmatic (謎めいた)と言われることもあるのですが、基本的には有機物の生成・分解にともなう CO₂ と O₂ の変動が根底にあります。ですから、pH だけをみるのではなく、他の水質(DO、COD 等)とか気象とかと比較したり、近くのモニタリングポストのデータと比べたり、幅広く観察し、変動原因を探索することが重要です。

1. 4. 沿岸海域の pH のモニタリング

図4では、日本のモニタリングポストのデータを使って図化しました。米国の大気海洋局(NOAA)、沿岸管理局、国立河口域研究保護区(National Estuarine Research Reserves)では、米国の海岸 30 地点において、10 分間隔で水温、pH、濁度、塩分、DO を測定し、リアルタイムで web 公開しています⁶⁾。これのホームページのタイトルは(Resilient estuaries and coastal watersheds — Where human and natural communities thrive. 回復力のある河口と沿岸流域 — 人間と自然のコミュニティが繁栄する場所)です。これは、日本の環境省の進める「多面的モニタリング」に共通しています⁷⁾。

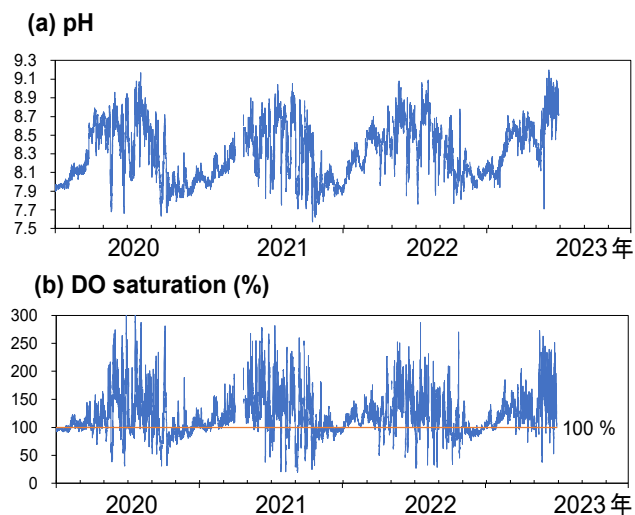


図4 東京湾、千葉市検見川沖モニタリングポストにおける (a) pH、(b) DO 飽和度 (%) 水深 1 m における毎時値。

2. pH の低い水域

東京湾の集水域において、pH の低い水域がどのように分布しているのか調べてみましょう。pH の低い水域は有機物分解の水域であり、DO 飽和度が 100%以下となっています⁸⁾。図5は、DO 飽和度から 100%を引いた値(Δ DO saturation)をバブルチャートで示したものです。青丸は DO 飽和度が 100%以上で有機物生成の場、白丸は 100%以下で有機物分解の場です。

DO 飽和度が低い(白丸が大きい)水域は、隅田川や荒川河口域(ただし河川内)のように、川と海が出会うところに集中しています。一方、DO 飽和度が高い(青丸が大きい)水域は、東京港口から東京湾全体です。

この図を塩分との散布図で示したものが図6です。
 Δ DO 飽和度とともに pH についても示しています。
 図6a の上部と横軸に、塩分の数値を書いています。
 塩分 1~12 の範囲に書いてある「河口域」は、河口から上流側を示しており、エスチュアリー (estuary) といわれる水域です。

図6でも DO 飽和度と pH はよく似た分布をしています。両者が最も高いのは、塩分 28 で、東京港口付近です。ここが有機物生成の中心水域です。一方、最も低いのは、塩分が 12 に近い河口付近です。つまり沿岸酸性化の中心となるのは河口付近です。

3. pH、表層 DO の長期変化

現在、環境省では生活環境の保全に関する水質環境基準の見直しが進められています⁷⁾。この水質基準の中核になる部分は 1971 年に定められ、水域の有機物汚濁をモニターする項目をいくつも含んでいます。

例えば、pH、「表層 DO」です。この2つの項目の経年変化が図化されることは極めてまれですので、東京湾北部に流入する荒川の河口域と、大阪湾の集水域でみましょう。

3. 1. 荒川河口域(東京湾)

図7は、荒川河口域の表層 DO 飽和度と pH です。1960 年代、DO 飽和度が 20%以下であり、「表層水」が貧酸素化していました。1970 年頃から 2000 年にかけて、DO 飽和度と pH が上昇しています。

3. 2. 大阪湾集水域

大阪湾の集水域の、水域ごとに平均した水質の長期変化を図8に示します。生物化学的酸素要求量(BOD)は、どの水域も、指数関数的に大きく減少しています。BOD の激減と連動し、pH および DO は、1970 年頃以後、継続して上昇しています。

これらの変化をみていると、2000 年以前と現在では、河川の水質は別の世界にあるように思われます。昔は、有機物分解の役割を河川が担っていたのが、現在は下水道が担うように移り変わってきたのでしょう。

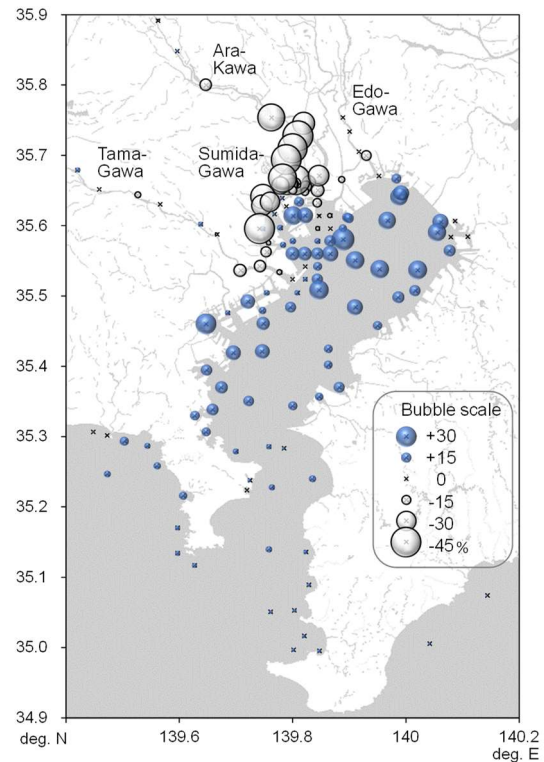


図5 有機物の生成・分解場所の分布
 表層 DO 飽和度 (%) から 100 %を引いた値のバブルチャート。

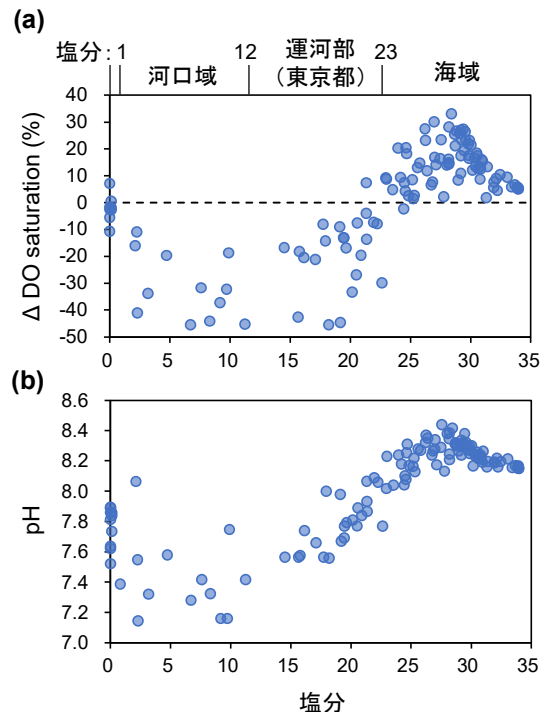


図6 東京湾の河川から海域における塩分と(a) DO 飽和度、(b) pH の散布図
 2017~2021 年度平均、表層。

4. おわりに

過去に例のない早さで梅雨明けした今年の夏の、現在の海の中の様子をみてみましょう(図9)⁹⁾。ここでも、水温、pH、DO 飽和度が連動して変化しています。晴天の日が多く、上層ではDO 飽和度およびpHの日周期変動が大きくなっています。また、下層においては、DO 飽和度およびpHの急変がしばしば起きています。これらの急変は、水温の急変と一致しており、「底層 DO」の急変が、冷水塊の移動によって起きていることを示しています。

生活環境項目と呼ばれる水質環境基準の中でも、pH と表層 DO は地味な存在ですが、基準値としての意味合いが薄れた現在でも、モニタリング項目としては重要な役割を果たしています。

2015 年頃から急激に進む気候変動(ジャンプ)の影響を受けて¹⁰⁾、今後、水質の変動は、より enigmatic になっていくと想定されます。そのとき、pH と DO は、互いに補完しあう水質指標として、より重要性を増していくことでしょう。

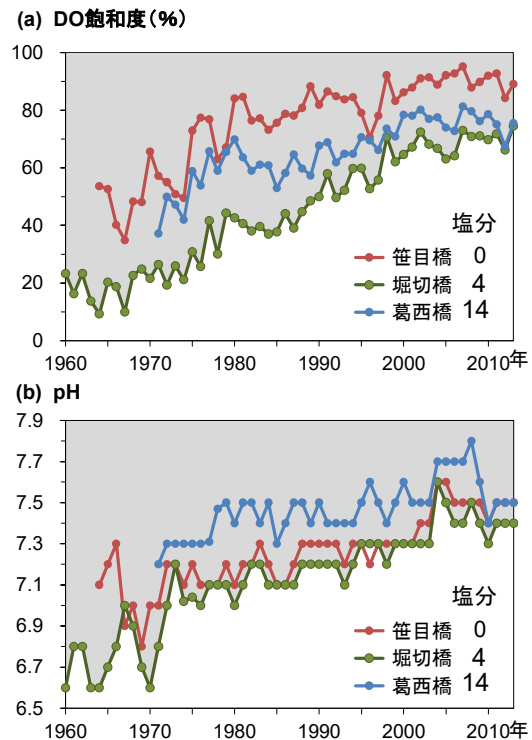


図7 荒川河口域(東京湾)の(a) DO 飽和度、(b) pH の経年変化

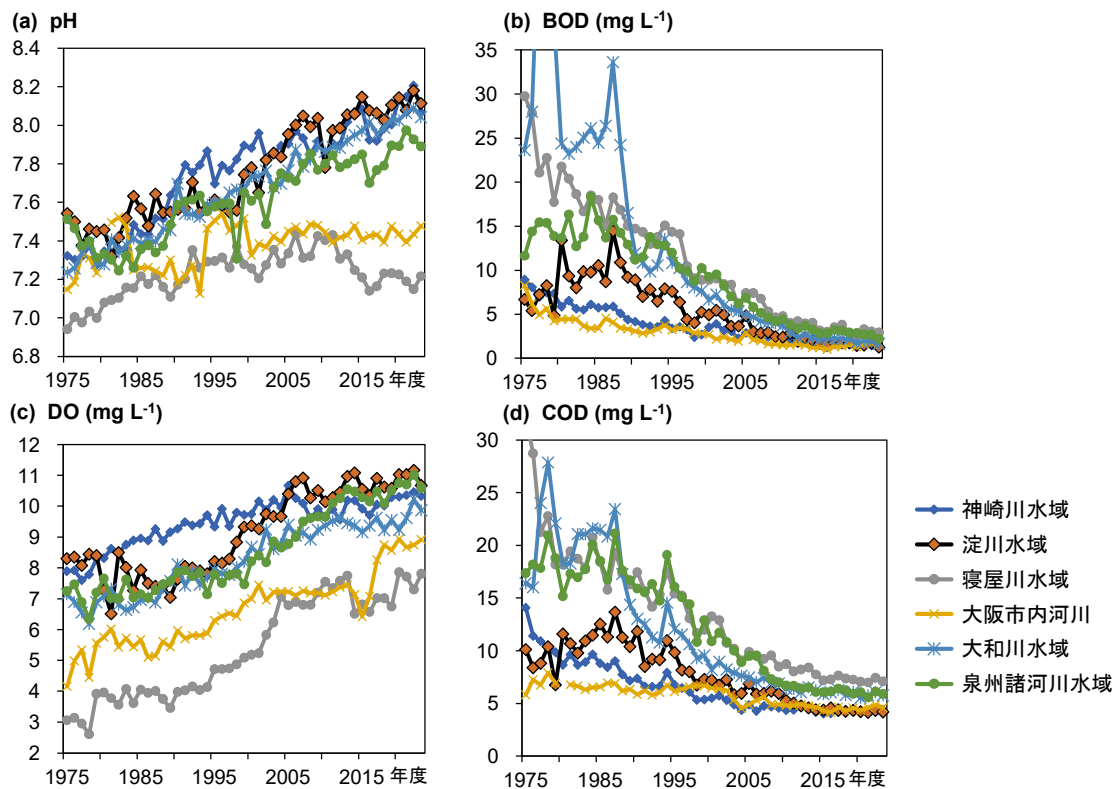


図8 大阪湾の集水域における水質の長期変化
1975～2023 年度まで継続している測点の値を、水域ごとに平均した。

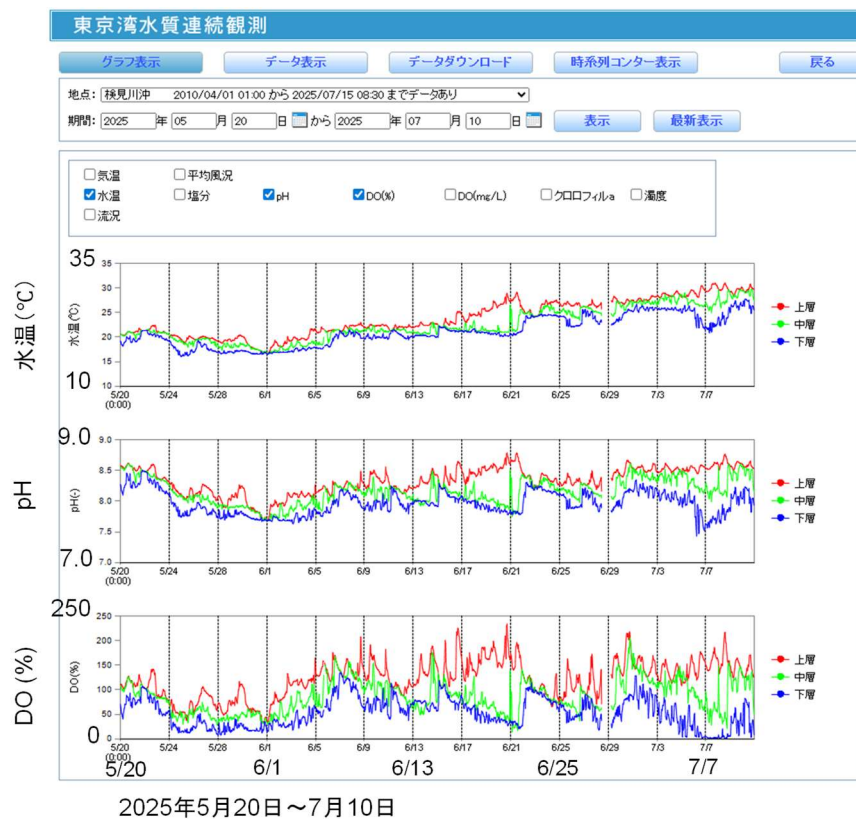


図9 東京湾千葉市検見川沖モニタリングポストにおける水溫、pH、DO 飽和度

参考文献

- 1) 気象庁, 大気中二酸化炭素濃度の観測結果.
URL. https://www.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/obs/co2_monthave_ryo.html (2025 年 7 月時点)
- 2) 気象庁, 海洋酸性化.
URL. https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/mar_env/knowledge/oa/acidification.html
- 3) Midorikawa, T., M. Ishii, S. Saito, D. Sasano, N. Kosugi, T. Motoi, H. Kamiya, A. Nakadate, K. Nemoto, and H. Y. Inoue, 2010. Decreasing pH trend estimated from 25-yr time series of carbonate parameters in the western North Pacific, Tellus Ser. B, 62, 649-659.
- 4) 藤原建紀, 2010. 内湾の貧酸素化と青潮. 沿岸海洋研究 48(1), 3-15.
- 5) 藤原建紀, 加地智彦, 鈴木元治, 2024. 東京湾における CO₂ および O₂ 海面フラックスの長期リアルタイム・モニタリング: 気候変動に対応できる沿岸環境・生態系モデルの基礎として. 水環境学会誌 47(4), 113-128.
- 6) 米国 NOAA HP. URL. <https://coast.noaa.gov/nerrs/> (2025 年 7 月時点)
- 7) 亀井 雄, 2024. 水質汚濁に係る生活環境の保全に関する環境基準の見直し ～地域のニーズに応じた水環境政策～. 化学物質と環境 (191), 1-4.
- 8) 藤原建紀, 鈴木元治, 2024. 貧栄養化にともなう有機物の難分解化, COD 上昇. 水環境学会誌 47(A)(10), 365-369.
- 9) 東京湾水質連続観測. URL. <https://www.tbeic.go.jp/MonitoringPost/Top> (2025 年 7 月時点).
- 10) 川崎太輝, 小野 健, 有田 駿, 畑中 拓, 藤原建紀, 2025. 急激な気温上昇と大阪湾の海水温の変動: モニタリングポストデータの解析. 水環境学会誌 48, 19-25.



変わりゆく日本の海、世界の海 ～瀬戸内海の今と未来を考える～

NPO 法人 里海づくり研究会 理事・事務局長
田 中 丈 裕

1. はじめに

2000 年代以降、温暖化に伴い瀬戸内海系群を資源量ではるかに凌駕する東シナ海系群のサワラ越冬群の北上により、北陸や東北でサワラが大量に漁獲され始めた。近年では、全国津々浦々の浜で未曾有の異変が相次いでいる。2010 年代後半から北海道や東北でサンマ、サケ、スルメイカが獲れなくなった。2021 年 4 月から 6 月にかけて開催された水産庁「不漁問題に関する検討会」は、これらの不漁要因を分析したうえ、そのとりまとめの中で、温暖化等により今後とも 3 魚種以外で不漁が発生する可能性も否定できないとした¹⁾。温暖化どころか“地球沸騰化”という言葉が流布し始めた。筆者が住む瀬戸内海中央部に位置する岡山の海では、2018 年頃から様々な異変が明瞭に現れ始めた。全国沿岸で起きている異変、さらには海外にも目を向けて世界の海の現状を俯瞰し、瀬戸内海のこれまでとこれからを考えてみたい。

2. 我が国沿岸各地で相次ぐ異変

2021 年 11 月、全漁青連が全国の青年漁業者を対象に、最近の海の状況についてアンケート調査を実施した。水温の異常、漁期のずれ、不漁や魚種組成の変化など多くの異変情報に加え、「資源管理だけでは資源は戻らない。」、「漁業が継続できなくなるのではないかな。」など不安の声や、「藻場・干潟の造成」、「徹底した原因究明」と「収入安定対策」などを求める浜のリーダー達の切実な訴えが寄せられた。北海道や東北では漁場が沖合に移動してサンマが獲れなくなり、サケ定置網にサケが獲れずにブリが大量に入網し、「イカの街」函館からスルメイカの姿が消えた。2021 年には北海道がトラフグ・マフグ漁獲量全国1位に躍り出た。マイワシの大豊漁、ブリ、カツオ、マグロ類などの好調な漁模様、ズワイガニ漁大幅アップ、北海道でサバ漁獲量が前年の 100 倍(羅臼町)、群来(ニシン)の再来等も報じられているが、ホタテ稚貝大量死、アコヤガイ大量死、イワシ大量死、ハタハタ記録的不漁、イカナゴ資源激減による休漁、アサリ・アワビ極端な不漁続き、ウニ類・ホヤ漁獲不振・大量死、コンブ類の激減、20 種以上の魚介類が北上、国内の店頭に並ぶ魚介類が減少し年中同じ種類に、琵琶湖のアユ激減、宍道湖シジミ資源量の減少など、海や漁業に関する異変が毎日のようにテレビや新聞等で盛んに報道され、その数は 2023 年 6 月～2024 年 6 月で218 件、2024 年 6 月～2025 年 6 月では 1,060 件にも及んだ。

3. 変わりゆく世界の海

2019 年の夏、イギリス科学出版社エルシビアにより Predicting Future Ocean²⁾ という本が出版された。これは、2011～2019 年まで 9 年間で費やし、世界の 17 の大学が協力連携して、人為起源 CO₂ の過剰排出を原因とする地球規模の気候変動が、「海にどのような影響を及ぼすか」を研究予測した日本財団ネレウスプログラムの成果をとりまとめたもので、49 章、554 ページにも及ぶ大著である。ネレウスプログラムの統括リーダーであり、人類学者で海洋政策の専門家であるワシントン大学の太田義孝教授(当時、現在はロードアイランド大学教授)が、その中から 16 章を翻訳し、2021 年 8 月下旬に「海洋の未来³⁾」として出版した。その内容はかなりショッキングなものである。地球規模で起こっている気候変動が海に与える影響は、

海水温の上昇や海面上昇、海洋酸性化、海中溶存酸素濃度低下といった直接的な変化とともに 2 次的で累積的な影響によってますます増加する。その変化への生物的な適応や漁業の動向は、異常熱波など突発的な打撃によって不可逆的な事態に陥るといふ。2011 年に西オーストラリアで発生した海洋熱波は、オーストラリア沖の温帯性ケルプの森を崩壊させ、生態系を破壊した。2014～2017 年に長期的に継続した海洋熱波は、世界のサンゴ礁の 75%を白化させ、死亡率 30%に至らしめた。2018～2021 年にかけて 100 億匹以上のズワイガニがベーリング海東部から姿を消したが、これも 2018～2019 年の海洋熱波と深く関連付けられている⁴⁾。本書では、水産資源は個体群単位で高緯度海域に移動し、漁獲枠の割当量や公平性の認識に関する政策上の問題が生ずるとし、企業の社会的責任(CSR)や譲渡可能個別漁獲割当(ITQ)制度などの解決策がこの公平性を脅かすと論じている。そして、「未来の海は、気候変動の影響により持続可能な海ではなくなる。」という結論を導き出し、そのうえで「格差の海」に向かうにあたって「再分配」と「社会公正」の重要性を強調する。「格差の海」に立ち向かうべく、2019 年には日本財団ネクサスプログラムが発足、ワシントン大学を中心に世界の 20 の大学が連携し、すべての人が豊かで美しい海に抱かれるために、「海の未来の予測から踏み出し、海の未来から格差を取り除く方向に舵を切る」という言葉で、この本は締めくくられている。

4. 瀬戸内海のこれまで

瀬戸内海の漁場環境は、1970 年代から半世紀の間、人の手によって大きく変えられてきた。富栄養化に伴うクラゲ大量発生は浮遊生態系を細く小さくし、1980 年代までに干拓等による干潟・藻場の喪失がボディブローのように効いて底生生態系を細く小さくしていった。1990 年代後半から顕著になった貧栄養化によって養殖ノリ色落ち被害が拡大、水温上昇とも相まって磯焼けが進行し、珪藻が小型化して上位の食物連鎖につながらなくなり、海底の砂漠化と付着動物・底生動物の激減を招くとともに、浮遊生態系・底生生態系が矮小化し、著しく物質循環が停滞している(図 1)。

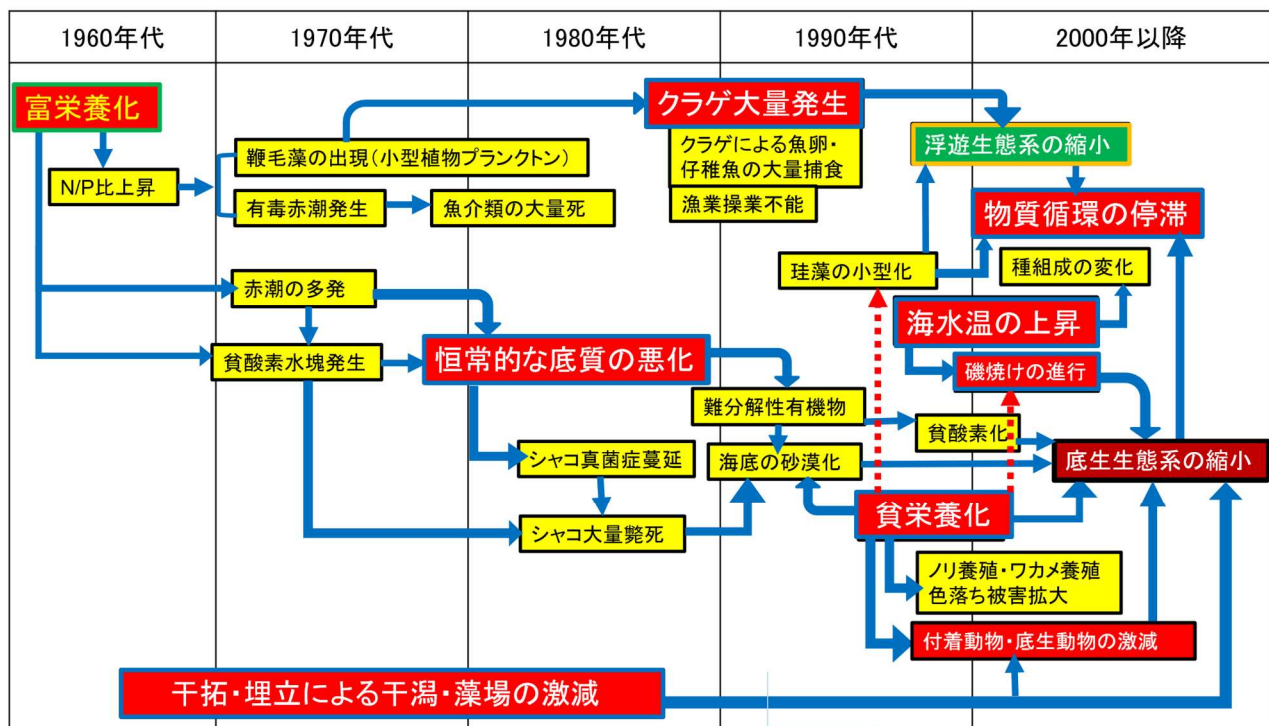


図 1. 瀬戸内海的环境変化とその主要因

海水温の上昇によって北方系のカレイ類やアイナメ等が減少し、南方系のキジハタ等が増加した。マダイが浅瀬で越冬するようになり、春から秋に大量に漁獲されるため市場単価が急落、クロダイは養殖ノリやカキ種苗、貝類を食い荒らす害魚に転落し、最近では盛んに消費拡大への試みがなされている。台湾ガザミが漁獲ベースで年々増加し、春から夏にはハマチ、冬場には 10kg を超えるブリ、ヒラマサが漁獲されるようになった。トゲシャコ、ヘリトリマンジュウガニ、イケガツオ、ヨコスジフエダイなど南方系の魚介類が獲れ始め、ソウジハギ、ヒョウモンダコ、スベスベマンジュウガニなど有毒性の魚介類も混獲されるようになった。2021 年頃からエビ類、シタビラメ類、アナゴ、タコ類、ガザミなどこれまで季節の旬を彩った多様な魚介類が次々に姿を消していつている。2020 年からは「足切れ」マダコが市場に出始め、その割合は年々増加、2024 年以降はマダコそのものが獲れなくなり、たこば漁師は休業を余儀なくされている。獲れるのはマダイ、クロダイ、ハモ、キジハタのみで、捕食圧の強い魚種だけが生き残っている感がある。2018 年頃からウミホタルが建網にかかった魚を食べるようになり、2019 年から流し網にかかったサワラの腹部にハマトビムシが食い付いて傷を付け、売り物にならない(図 3)。潜水器漁師によれば、2018 年からホトギスガイが成長しないまま足糸を異常に伸ばして絨毯状に覆い尽くし、その下でナミガイなど二枚貝類が死んでいるという。これらの現象の主要因は海水温の上昇と貧栄養化であると考えられるが、果たしてそれだけだろうか？広島湾では、「富栄養化時代の負の遺産」として広大な堆積範囲と堆積厚で難分解性有機物が居座って、これが硫化水素の発生源となって貧酸素を引き起こしているという。このままでは硫化水素の生成と底層の貧酸素は今後も永久的に繰り返され、底泥の改善に真剣に取り組まなければ底生生態系の回復は望めないとの指摘がなされ⁵⁾、表層の貧栄養化と底層の貧酸素化という深刻な現状が浮き彫りにされた。

2021 年 6 月 3 日、改正瀬戸内法が通常国会で可決、成立、6 月 9 日に公布された⁶⁾。「地域合意を前提とした栄養塩類の供給を可能とする栄養塩類管理制度の創設」、「自然海浜保全地区の指定対象の拡充」、「海洋プラスチックごみを含む漂流ごみ等の発生抑制等に関する責務規定」、「気候変動による環境への影響に関する基本理念の改正」の 4 つを柱とする大改正である。しかし、今のところ瀬戸内海全域で有効な貧栄養化対策が講じられているとは言い難い。

瀬戸内海の姿の長期的な変化を端的に著わすならば、「タイの海」(1930～1950 年代)→「イワシの海」(1950～1980 年代)→「クラゲの海」(1990 年代以降)への変貌である⁷⁾(図 2)。クラゲは魚卵、仔稚魚など何でも食い尽くすため、大量発生すれば水産資源への影響は計り知れず、また漁具が損壊するなどして漁業操業が不能となる。ユウレイクラゲがこれに絡みつくとともに厄介である。温暖化によってミズクラゲ発生期間が長期化しており、さらに深刻さを増している。一方で、ほんの数年前まで瀬戸内海において広域的な問題として捉えられていたミズクラゲの大量発生は、2023 年以降になって顕著に現れる県が散発的になり、また同じ県内でも一部の地域だけの問題となるなど、断続的かつ局所的になってきている。ミズクラゲ対策としては、浮桟橋の裏側などが温床となっているポリブの一斉駆除が効果的とされるが、逆に対応策が難しくなってきた側面がある。ミズクラゲに比して冷水性のアカクラゲはほとんど見られなくなり、ヒ

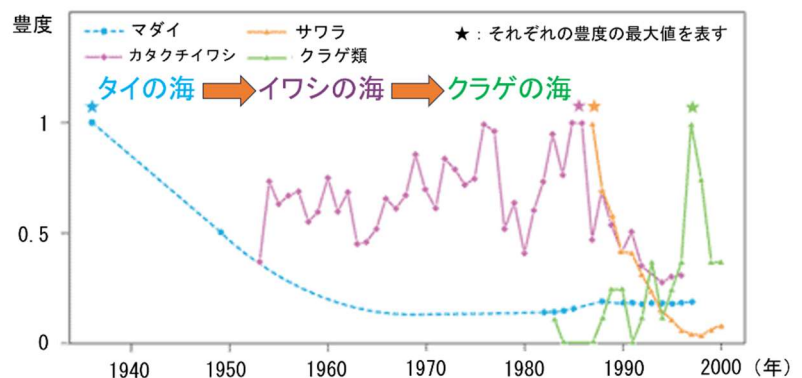


図 2. 瀬戸内海のマダイ、イワシ、サワラ、クラゲ豊度の推移
(永井:2005 を改編)

ゼンクラゲ、エビクラゲなど南方系のクラゲが出現し始めた。瀬戸内海は、今も現在進行形で変わり続けている。

5. 瀬戸内海のこれから ～私たちは何をすべきか？～

今、瀬戸内海で起きている海の異変の主因は、地球温暖化に伴う海水温の上昇と貧栄養化である。温暖化は世界的な問題であり、ただちに改善することはできない。しかし、貧栄養化は人の手で、地域の取り組みで解決できる課題である。

水産研究・教育機構等の長年に亘る調査研究により、貧栄養化が養殖ノリ色落ち被害だけでなく、海藻藻場の回復を難しくさせ、植物プランクトンの小型化を招きイワシ資源に悪影響を与えていることも明らかにされた。また、海底耕耘や現行の下水処理施設の管理運転は一定の効果はあるとしたものの、それだけでは十分でないことも示唆された⁸⁾。漁師たちは口を揃えて海底に餌になる生き物がなくなったと訴え、付着動物も激減している(図3)。栄養塩レベルの低下が一次生産を低下させ、生態系に影響を与えていることは今や明白である。貧栄養化の原因のひとつは、汚濁指標 COD を下げるため溶存態難分解性有機物の存在に気付かぬまま続けられた窒素・リンの過剰削減である。農業の営みを通じて大地に蓄積され地下水を通じて供給されてきた栄養塩が、耕作放棄地の増加により枯渇してきたことも大きいと考えられ、海に流れ込む河川水の栄養塩濃度に加え陸域負荷量そのものも減少傾向にある^{9, 10)}。

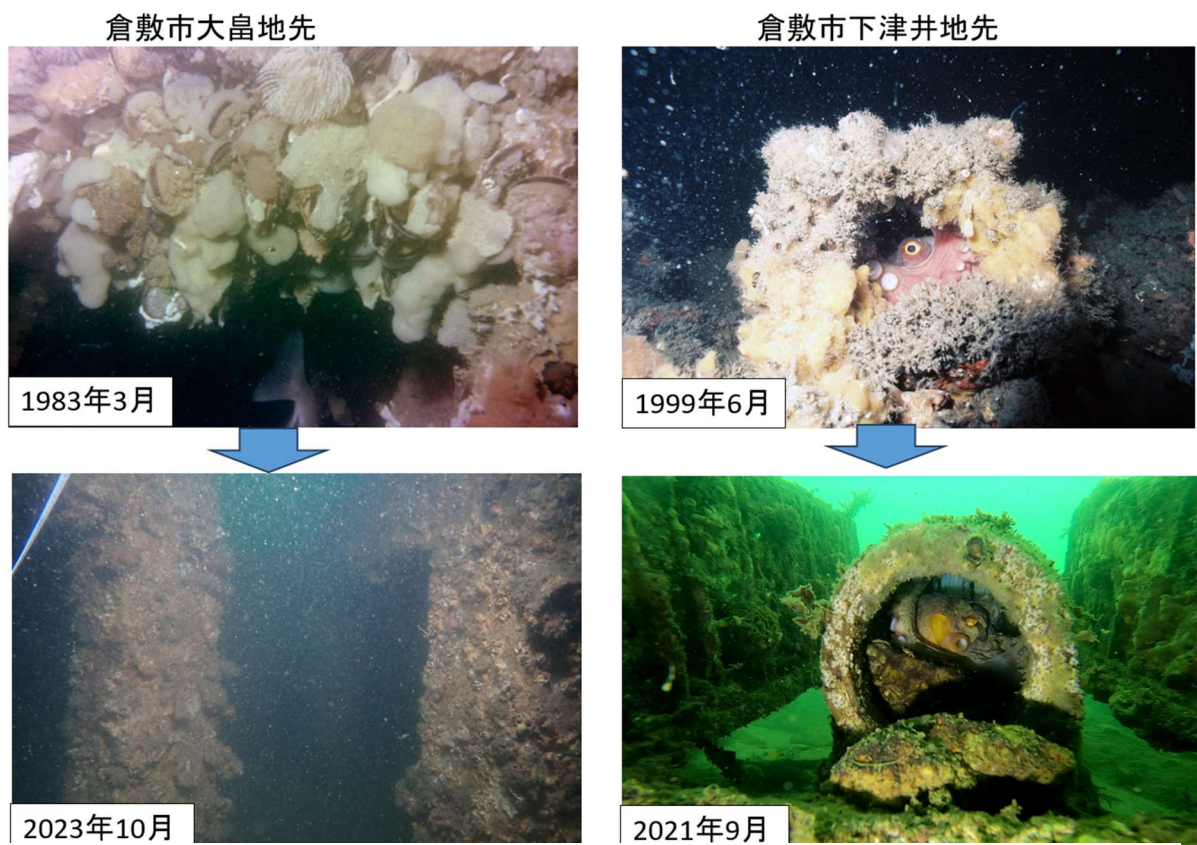


図3. 岡山県倉敷市地先の同一箇所における付着動物量の過去と現在の比較

(写真提供：海洋建設(株)水産環境研究所)

2025年2月、環境省は「水質汚濁に係る生活環境の保全に関する環境基準」を改正し、有機汚濁を主因とした利水上の支障が生じていない場合、CODの環境基準の達成状況の評価は必ずしも行わなくてよいこととした¹¹⁾。これ以上、栄養塩濃度を低下させないための舵取りの変更である。兵庫県は、2022年10月に瀬戸内海の関係府県に先駆けて「栄養塩類管理計画」を策定し、工場等からの栄養塩供給、下水処

理場の季節別運転、海底耕耘や「かいぼり」、漁場への施肥など、様々な栄養塩類供給量を増やすための取組みを続けている¹²⁾。今こそ、栄養塩レベルの適正化を瀬戸内海の広域的な取り組みとして最重要課題として掲げ、その実現に向けて、漁業関係者、関係府県等の地域行政、水圏に関わる多くのステークホルダーが連携して、施肥やモニタリング手法の確立など具体的対策を練り上げ、取り組むべき時ではなからうか。

また、浮遊生態系(生食連鎖)と底生生態系(腐食連鎖)の回復にも目を向けねばならない。貧栄養化対策を基本として、浮遊生態系の回復には栄養塩レベルの適正化に加えて N/P 比の管理とクラゲ対策、底生生態系の回復にはカキ養殖業で産み出されるカキ殻を利用して底生生態系を回復させる方法¹³⁻¹⁵⁾などあらゆる方法や技術を駆使して小型動物群を回復させることが重要である。

6. さらなる脅威 ～デッドリートリオ～

近年、世界中の海洋学者の間で「デッドリートリオ(死のトリオ)」という言葉が囁かれるようになった。「温暖化」、「海洋酸性化」、「貧酸素化」である。海水温が上昇すると魚の酸素消費は増えるのに海水に溶け込む酸素は減少し、大型の魚は棲めなくなるとも言われる²⁾。また、表層水温が上昇して成層が発達するため、底層では貧酸素化が進み底生性魚介類の生息を危うくする。

海洋酸性化は、もうひとつの CO₂ 問題とも言われ、海水温が下がる南極域や北極域で進んでいるが、日本近海でも少しずつ進行している。

しかし、海の酸性化には、大気中の CO₂ 濃度の増加に伴い海水中の CO₂ 濃度が増加することによる海洋酸性化と、陸水とそれに含まれる有機物の流入と分解による沿岸酸性化がある¹⁶⁾。アメリカ西海岸のピュージェット湾では、2005～2009 年に、プランクトン等の死骸が分解される際に発生する CO₂ が海底から湧昇して表層近くが酸性化し、ワシントン州とオレゴン州の養殖施設でカキ幼生が大量死する事態も起きている¹⁷⁾。これは、沿岸酸性化による被害の典型的事例である。

2020 年度から日本財団と NPO 法人里海づくり研究会が協働し「海洋酸性化適応プロジェクト」がスタートした。カキ養殖に焦点を絞り、最もリスクを負う漁業現場のアクションに繋げるためのリサーチである。まずは我が国沿岸における酸性化の実態を把握するとともに、モニタリングシステムを構築し、適応策を講じるための手法と体制の確立を目論んでいる。東京大学、福井県立大学、愛媛大学等の大学、水

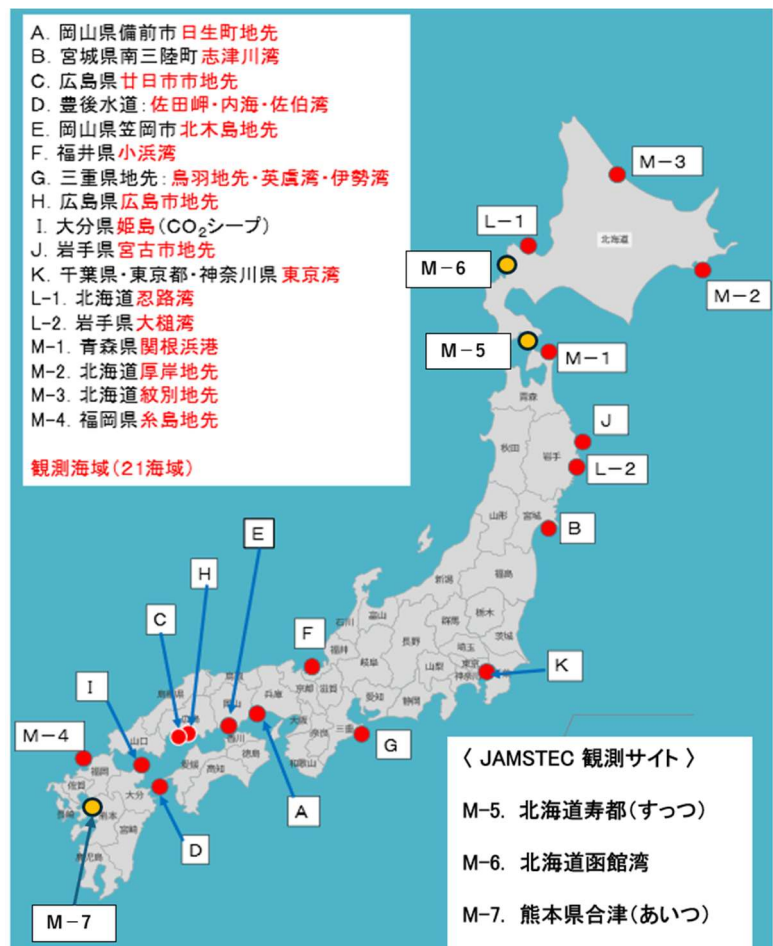


図4. 2024 年度 海洋酸性化適応プロジェクト観測海域:21海域
JAMSTEC 独自の観測海域:3 海域 計 24 海域

産研究・教育機構、関係県水産研究所、JAMSTEC、NPO等の地域法人、漁業団体、関係漁協、民間企業など参画している組織・団体は30を越えている。観測海域は、初年度の2020年度に2海域でスタートしたが、観測サイトを年々増設し2024年度には北海道から九州まで24海域に及んでいる。2024年度の観測では、24海域のうち7割を超える海域において、発生時期・持続期間などは異なるものの、短期間ながらカキ浮遊幼生にとって危険レベルまで酸性化が進んでいることが確認され、沿岸酸性化に対して脆弱な可能性があることが分かってきた。今のところ、我が国においては酸性化による海生生物に悪影響は確認されていないが、線状降水帯の頻発やゲリラ豪雨の増加等によって沿岸酸性化はさらに進行し、全球的な海洋酸性化とも相まってリスクが増大することが予想され、今後とも長期的にモニタリングを継続していくことが必要である。詳細はまたの機会に譲るが、本プロジェクトは、我が国沿岸における酸性化の実態をほぼ解明しつつあり、適応策を提案すべく着実に成果を挙げつつある¹⁸⁻²⁰⁾。

7. おわりに

人為的なCO₂過剰排出による気候変動が止まらない限り、危機が去ることはない。デッドリトリオは、世界の国々、世界の人々が努力しパリ協定を達成しない限り、今世紀末には世界の海に大きな脅威を与えることになる。これらの深刻な影響を回避するためには、CO₂排出抑制とともに、顕在化することが予想される異変への適応策も両輪で進める必要がある。アマモ等の海草藻場や海藻藻場は、炭素を吸着するブルーカーボンとして、効果的な緩和策になることが期待されるが、CO₂を吸収するだけでなく大量の酸素を産み出し、水温上昇を抑制し、付着生物、葉上動物、葉間動物および底生生物を増殖させて生物相を多様化させ、栄養塩を供給する物質循環の核となる。また、アマモ場は、陸水とともに流入する大量の有機物をトラップして分解することによって沿岸酸性化をも軽減することも分かってきた²¹⁾。世界各地で藻場を再生または造成することは、全球的な緩和策として有効であるとともに、地先海域ごとの緩和策、地域の適応策になるのは明らかであり、世界的な取り組みとして拡大し加速化しなければならない。

すでに現状において、地球規模の気候変動による海への影響は国民の食卓に及んでいる。これから貴重なタンパク源である水産物事情はどうなっていくのか？世界的な食糧危機を迎えはしないか？などの不安が押し寄せる。これから大切なことは、むやみに恐れることなく、現状を正しく認識し、今後の対応策等について広く国民にも正しく伝えていくことである。そして、今後とも続くであろう「海の異変」を適切に把握し、緩和策・適応策を検討し実践していくためには、より多くの人達と共有し、連携していかなければならない。とりわけ、「暮らしを守り子育てしていくために」海と対峙する漁師さん達と科学者との緊密な連携体制を確保することは不可欠である。2024年度から、全国の若い漁師さんが漁業者モニターとなり「漁師の知恵と科学の融合」を目指した「日本財団 海洋環境変化対応プロジェクト²²⁾」が始まった。さらに、その先には、市民科学の推進などを含めた多様な主体による総力戦での臨戦態勢を構築し、維持していくことが重要であろう。

参考文献

- 1)不漁問題に関する検討会(2021):不漁問題に関する検討会とりまとめ～中長期的なリスクに対して漁業を持続するための今後の施策の方向性について～。
https://www.jfa.maff.go.jp/j/study/attach/pdf/furyou_kenntokai-19.pdf
- 2) Andre´s M. Cisneros-Montemayor・William W.L. Cheung・Yoshitaka Ota(2019): Predicting Future Oceans, Sustainability of Ocean and Human Systems Amidst Global Environmental Change. Elsevier.
- 3)アンドレス・シスネロス＝モンテマヨール、ウィリアム・チェン、太田義孝 編著、太田義孝 翻訳(2021): 海洋の未来 持続可能な海を求めて。勁草書房、東京。
- 4)Cody S. Szuwalski et.al(2023): The collapse of eastern Bering Sea snow crab. Vol 382、Issue 6668、

- 306-310.
- 5)山本民次(2021):瀬戸内法の再改定と広島湾に環境改善策の提案. 豊かな海、No.54、23-31.
- 6)浜名功太郎(2021):瀬戸内海環境保全特別措置法改正の経緯とその内容. 国立公園、No.798、2-6、
(一財)自然公園財団.
- 7)永井達樹(2005):瀬戸内海の富栄養化とクラゲ類の増大について. 日本プランクトン学会報、52 巻 1 号、
27-31.
- 8)国立研究開発法人 水産研究・開発機構ほか(2023):平成30年度～令和4年度水産庁漁場環境改善
推進事業のうち栄養塩、赤潮・貧酸素水塊に対する被害軽減技術等の開発「栄養塩の水産資源に及
ぼす影響の調査」
- 9)国立研究開発法人 水産総合研究センターほか(2016):平成 27 年度漁場環境・生物多様性保全対策
事業のうち赤潮・貧酸素水塊対策推進事業「漁場生産力向上のための漁場改善実証事業」.
- 10)齋藤光代ほか(2021):流域圏の土地利用変遷および洪水流出を考慮した大阪湾への長期栄養塩流出
量の推定.瀬戸内海, No.82,65-67.
- 11)環境省(2025):水質汚濁に係る生活環境の保全に関する環境基準の見直しについて.
https://www.env.go.jp/press/press_04359.html
- 12)兵庫県(2022):ひょうごの環境 兵庫県栄養塩類管理計画～豊かで美しい里海を目指して～
https://www.kankyo.pref.hyogo.lg.jp/jp/mizu_dojo/leg_249/22996
- 13)田中丈裕・清野聡子・山本民次(2015):沿岸環境修復技術としての貝殻利用の最前線Ⅰ-物質循環の
促進向上に向けて-. 月刊海洋, Vol.47,No.2.
- 14)田中丈裕・清野聡子・山本民次(2015):沿岸環境修復技術としての貝殻利用の最前線Ⅱ-物質循環の
促進向上に向けて-. 月刊海洋, Vol.47,No.3.
- 15)岡山県(2022):カキ殻を利用した総合的な底質改良ガイドライン[改訂版].
- 16)藤原 建紀: 海洋酸性化と水質環境基準 pH、表層および底層 DO, 瀬戸内海, 2025.
- 17)Feely R. A., C. L. Sabine、J. M. Hernandez-Ayon, D. Ianson, B. Hales (2008): Evidence for upwelling
of corrosive "acidified" water onto the continental shelf. Science, 320, 1490-1492.
- 18)Masahiko Fujii et al. (2023):Assessing impacts of coastal warming, acidification and deoxygenation on
Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) farming, a case study in the Hinase area, Okayama Prefecture and
Shizugawa Bay, Miyagi Prefecture, Japan. Biogeosciences, 20,4527-4549.
- 19)Tsuneo Ono et al.: Short-term variation of pH in seawaters around coastal areas of Japan: Characteristics and
forcings、Biogeosciences、21、177-199、<https://doi.org/10.5194/bg-21-177-2024>、2024.
- 20)NPO 法人 里海づくり研究会(2025):令和 6 年度年度 海洋酸性化適応プロジェクト報告書
- 21)小埜 恒夫: 瀬戸内海における海域別の pH 変動特性, 瀬戸内海, 2025.
- 22)日本財団 海洋環境変化対応プロジェクト
<https://www.nippon-foundation.or.jp/what/projects/ocean-monitoring>



瀬戸内海における海域別の pH 変動特性

水産研究・教育機構水産資源研究所 主幹研究員

小 埜 恒 夫

1. はじめに

人間は古来から自然に干渉して自らの生活圏を拡大してきた生物だが、近年では化石燃料の使用等により大気中の CO_2 濃度を増加させ、それによって地球の気候そのものに影響を与えるほどに人間の力は強まっている。このため、漁業のような直接的な海への働きかけだけでなく、市民の日常の行動の一つ一つが排水・排熱等を通して海や大気に及ぼす影響について考えなければいけなくなっているのが、近年の環境問題の大きな特徴であると思う。

大気中 CO_2 濃度の増加が気候変動に加えて引き起こすもう一つの問題として、海の酸性化がある。これは、増加した大気中 CO_2 の一部を海が吸収し、さらに吸収された CO_2 が炭酸や重炭酸などの酸性物質に変化することで、海水の pH が徐々に低下していく現象である。海水の pH が低下し過ぎると、貝やウニ、サンゴ等、炭酸カルシウムの殻を持つ生物が殻を作り難くなるため、沿岸の生態系や磯根資源に影響を与える可能性が指摘されている。幸いなことに日本沿岸ではまだ、酸性化が海洋生物に大規模な影響を与えているという事例は検出されていないが、北米西岸などではすでに酸性化の影響と思われる貝類の大量斃死が発生していることから、将来的に日本でも同様の事象が起きる可能性についての懸念が、貝類養殖業者等を中心として高まってきている。

こうした社会的懸念を背景として、現在の日本沿岸域における酸性化の進行状況や pH 変動の仕組みを観測によって明らかにし、さらに可能であれば、酸性化の進行を遅らせるための有効な手段を見出すことを目的として、日本財団の助成事業「海洋酸性化適応プロジェクト(OAAP)」が 2020 年度から開始された。このプロジェクトは NPO「里海づくり研究会」がプロジェクトリーダーを務め、水産研究・教育機構、海洋開発研究機構、東京大学、愛媛大学、福井県立大学等の公的研究教育機関、県や市の水産研究所、地域漁業関連団体等の幅広い主体が参画して、日本全国の沿岸域の pH モニタリングを行っている。瀬戸内海では、日生海域に 2 点、北木島と廿日市地先に各 1 点の観測点(図 1)を設け、各測点の水深 1m にセンサーを係留して、日生と廿日市では 2020 年夏、笠岡では 2022 年夏から、pH とそれに関連した環境項目の計測を実施中である。本稿ではこれら3海域における pH 変動の特徴や現在の酸性化の進行状況について、これまでに得られた観測結果をもとに概説する。



図 1 OAAP プロジェクトにおける瀬戸内海の観測点の位置図。日生では片上湾口のマガキ養殖場に近い「日生 1」と、鹿久居島アマモ場内の「日生 2」の 2 点で観測を実施している。

2. 瀬戸内海における pH の周年変動: 海域ごとの低 pH 出現時期と出現頻度

日生・笠岡・廿日市の3ヶ所の観測データが揃った最初の年である2023年における、各海域の pH の周年観測の結果を図2に示す。なお図が複雑になるのを避けるために、この図では日生の2点のうち日生1の観測結果だけを示し、次の章で日生1と日生2の間の pH 変動の違いについて詳述する。

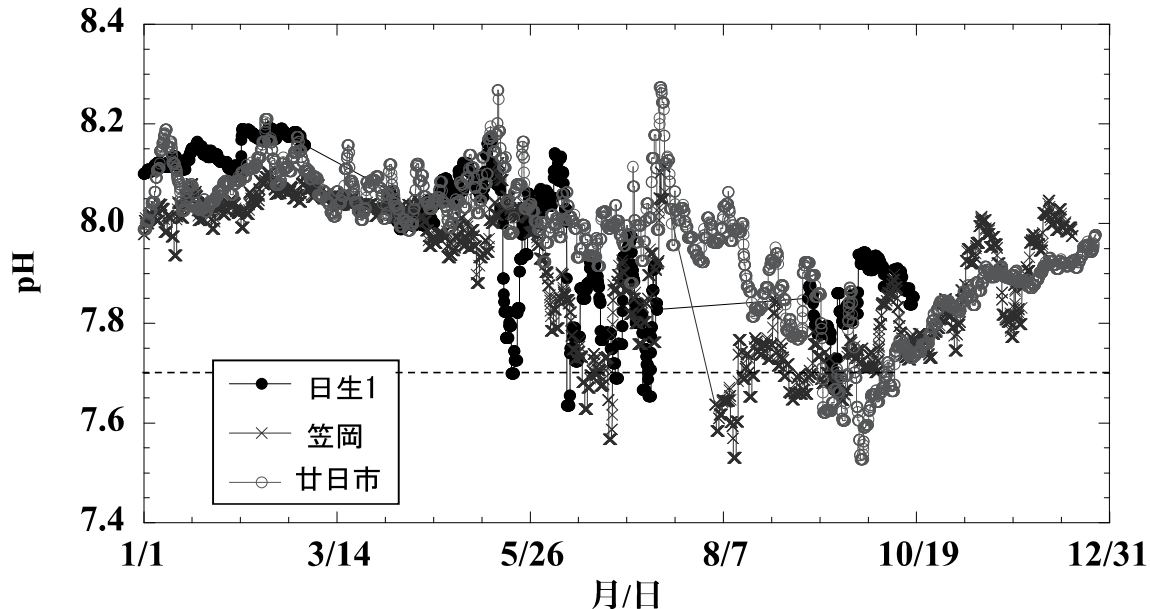


図2 2023年における日生1、笠岡、廿日市の pH 観測結果。各測点においてセンサーの不調により長期間欠測が生じている期間を細い実線で繋いでいる。

過去に北米西岸においてマガキ幼生の低 pH 耐性を調べるための飼育試験が行われており、海水のアラゴナイト飽和度(やや専門的になるが、海洋生物の炭酸カルシウム殻の安定性を表す指標値)が 1.5 以下になるとマガキ幼生の生残率が低下する、という結果¹⁾が得られている。瀬戸内海の水温・塩分条件下で、海水のアラゴナイト飽和度がこの値に達する時の pH 値を計算すると、概ね 7.7(図2中の破線)となる。OAAP による観測の結果わかったことは、現在の瀬戸内海では一年のほとんどの期間で pH が 7.7 を上回っているが、時々 pH が 7.7 を下回る時があり、しかも海域ごとに、この pH が 7.7 を下回る時期と pH 低下の継続時間が異なっている...ということである。

まず日生海域では、初夏から夏にかけて、数日～1週間くらいの時間スケールで短期的に大きく pH が低下する現象が繰り返し生じており、この最中に pH が短期的ながら 7.7 を下回っている。実はこのような短期的な pH の低下現象は、OAAP における瀬戸内海以外の多くの沿岸観測点でも共通して観測されており、それらの海域での詳細なデータ解析の結果から、降雨の後に周辺河川から沿岸に有機物が放出され、それが海水中で分解して CO₂ を発生させることで、短期的な pH の低下が生じることが分かっている。²⁾³⁾ つまり、現在の日生で低 pH を発生させている原因は、大気中の CO₂ 増加による海の酸性化ではなくて、河川からの有機物流入である。

いっぽう廿日市では、このような夏季の短期的な pH 低下イベントが発生していない。廿日市観測点は主要な淡水の供給源である広島湾の太田川から 15km 以上離れているために、降水後の河川からの有機物供給の影響が弱く、従って短期的な pH の低下現象が見られないのだと考えられる。この結果 8 月までの pH は安定して 7.7 よりも十分高い値を保っているが、秋になると pH が急激に低下して、9 月後半から 10 月前半にかけての 2～3 週間、連続して pH が 7.7 以下まで低下してしまっている。2022 年から追加的に

行った廿日市観測点の海底直上での pH 観測により、廿日市観測点では春から夏にかけて、表面水温が上昇することで強い成層構造が発達し、この間に海底で有機物の分解により発生した CO_2 が表層に拡散できず、底層に溜まり続けていることが分かった⁴⁾。秋に表層水温が低下して再び鉛直混合が起きようになると、夏の間に底層に溜まり続けていた CO_2 が一気に表層に供給されて、比較的長期間の低 pH 状況を作り出していると考えられる。つまり、現在の廿日市で低 pH を発生させている原因は、やはり大気中の CO_2 増加による海の酸性化ではなくて、夏季の海底における長期間の有機物の分解である。

まとめると、現在の瀬戸内海においては「大気中 CO_2 の増加に起因する海の酸性化」の影響はまだ見られない代わりに、大気とは関係のない、河川や海底に溜まった有機物を原因とした短期的な酸性化が存在している。笠岡では初夏から夏にかけては短期的な pH 低下イベントが観測され、加えて秋にも 2~3 週間の連続した pH の低下が確認されているが、これも笠岡は夏には河川由来の有機物の分解、秋には夏季の間に底層で継続された有機物分解の双方の影響を受けている結果だと解釈できる。こうした沿岸特有の、大気中 CO_2 の増加とは無関係に生じている(そして、人間活動が活発化する前から存在していた天然の現象である可能性もある)酸性化現象を、現在ではまとめて「沿岸酸性化」と呼んでいる。

OAAP では pH のモニタリングと並行して、各海域でマガキの D 型幼生の形態異常のモニタリングを継続的行なっており、その結果幸いにして、pH が 7.7 を下回るような時期においても、各海域のマガキ幼生に形態異常個体の発生は確認されていない。現時点では各海域ともに pH の低下期間はたかだか数日~数週間のスケールなので、この程度の低 pH の持続期間なら、マガキはまだ酸性化に耐えられていると解釈できそうである。ただし、将来「大気中 CO_2 の増加に起因する海の酸性化」の影響が大きくなってきたときには、将来の各点の pH は図 2 の形状を保ったまま、全体が徐々に下方に下がっていくような変化をしていくと考えられる。この場合、pH が 7.7 を下回る期間や頻度は徐々に増加していくことになり、そのどこかの段階で、マガキや他の沿岸生物に酸性化の影響が発現する可能性は排除できない。

逆に考えると、もし我々が「沿岸酸性化」の強さを制御して、pH の季節変動や短期的な変動の振幅を小さく抑え込むことができれば、このまま酸性化が進行して pH の年平均値が徐々に低下してしまった場合でも、大気中 CO_2 の増加による酸性化と沿岸酸性化の合わさった結果として生じている、pH が 7.7 を下回る頻度やその継続期間は、現在と同レベルに抑え込める可能性がある。このためには、各海域に現在供給されている河川由来や海底堆積物由来の有機物の動態を、詳細に解析していく必要がある。

3. 瀬戸内海における「沿岸酸性化」の抑制のために考えられる方策

3-1 河川由来有機物の供給量減少による沿岸酸性化の抑制 -アマモ場の効果-

前章で述べた、現在の瀬戸内海で見られる二つのタイプの「沿岸酸性化」のうち、日生で見られる「初夏~夏の降雨後に生じる短期的な pH の低下」の方は、何らかの方法で河川から流入する有機物を対象海域に到達する前にブロックできれば軽減できる可能性がある。実はまさにこのようなことが、日生の 2 つの観測点の間で起きていることが、本プロジェクトの調査結果から示唆されている。

1 章で述べたように、日生では片上湾口のマガキ養殖海域(日生 1 観測点)と、片上湾対岸の鹿久居島地先に発達するアマモ場内(日生 2 観測点)の 2 箇所でモニタリングを実施している。実は観測の結果、日生 1 観測点で初夏から夏にかけて頻繁に観測されていた短期的な pH の低下現象が、日生 2 観測点ではほぼ全く見られないことが明らかになっている(図 3)。日生海域では西端の片上湾に幾つかの河川が流れ込んでおり、降雨時にはここから日生 1 観測点に有機物が供給されていると考えられるが、日生 1 観測点と日生 2 観測点はたった 3km ほどしか離れていないので、単に距離の問題だけで日生 2 観測点に有機物が到達できなくなっているとは考えにくい。アマモ場は海水中の粒子を効率的に捕集して海底に堆積

させる効果があることが知られているので、日生 1 観測点と日生 2 観測点の間に存在しているアマモが片上湾から輸送されてきた有機物を捕集してしまうことによって、日生 2 観測点における降雨後の有機物の集中的な分解と、それによる短期的な pH の低下を防いでいるのではないかという仮説を研究グループでは立てており、現在その仮説を立証するための集中観測を、日生海域やその他のアマモ場海域で実施中である。

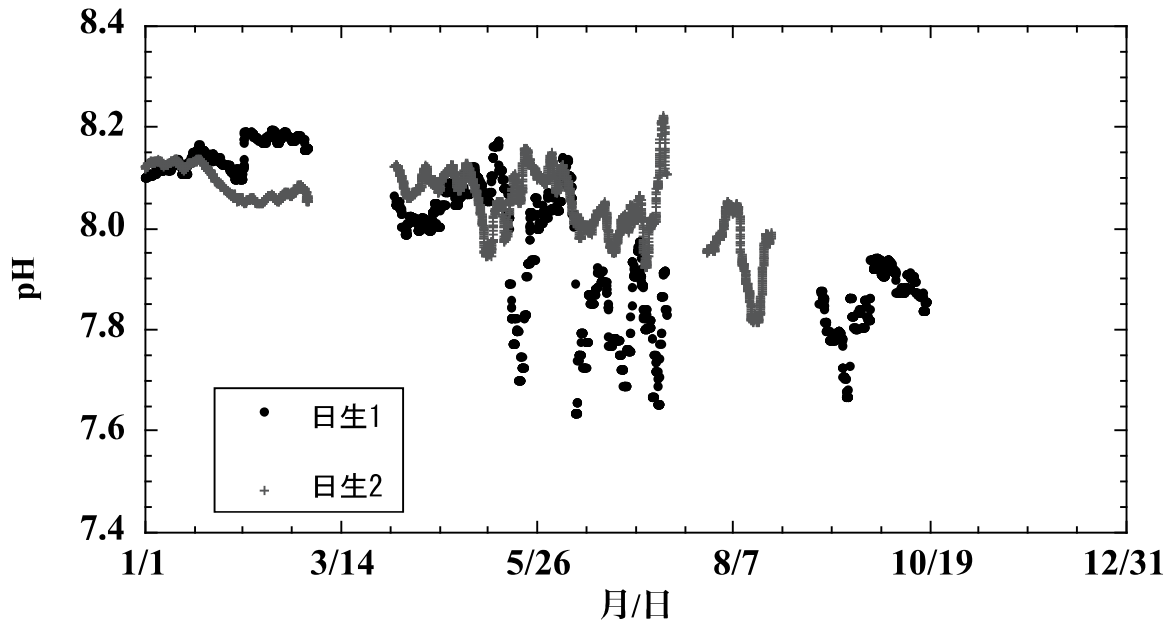


図3 日生 1 と日生 2 における 2023 年の pH 観測結果

もしアマモ場に河川から放出される有機物粒子の捕集効果があることが立証されれば、今後は酸性化の影響を抑制したい海域と河口域との間に計画的にアマモ場を造成していくことで、海域における降雨後の短期的な pH 低下現象の発生を抑制し、酸性化によって pH の年平均値が徐々に低下してしまった場合でも、極端に低い pH の発生頻度や継続期間については現在と同程度に保てる可能性がある。またアマモ場以外にも、干潟やヨシ原等も同様な有機物捕集効果を持つと考えられるので、それらの利用も併せて考えていくことで、将来の有効な酸性化対策技術を構築できるかもしれない。

3-2 海底堆積物由来の有機物の分解は抑制できるか？

こうして河川由来の有機物についてはある程度抑制の方策が見えてきているが、廿日市や笠岡で見られる秋口の pH 低下の原因である、夏の成層期間中に広い海底の全面で生じている有機物の分解を抑制することは非常に難しい。

ただ、元々瀬戸内海は、過去に海底に堆積した有機物の分解で引き起こされる「底層の貧酸素」に長年悩まされてきた海域であり、その解決のためにこれまでも様々な方策が試みられてきた。これらの方策が、同じ海底有機物の分解で生じている廿日市タイプの沿岸酸性化の抑制にも有効である可能性がある。実際に底層の溶存酸素濃度を改善すると底層の pH をどの程度上昇させられるのかを見積もるために、本プロジェクトにより 2022 年から廿日市観測点の底層で観測されてきた pH の値を、同時に観測された底層の酸素飽和度に対してプロットすると図 4 のような直線関係が得られた。この図の回帰直線からは、廿日市観測点の底層溶存酸素濃度を 2mg/L 改善できれば、底層水の pH も連動して 0.12 程度上昇することがわかる。また底層水の pH を 7.7 以上に維持し、この海域における酸性化の影響を完全に除去するためには、

底層溶存酸素濃度を 5mg/L 以上に維持できれば良いこともこのグラフは示している。近年の環境省による広域総合水質調査の結果によれば、広島湾の平均的な底層溶存酸素濃度は既に通年 7mg/L を上回っている⁵⁾ので、これは十分達成可能な数値の筈である。今後は既に広域的には達成されている底層溶存酸素濃度の改善状況を、廿日市観測点が位置しているような地先の海域まで徹底していくような方策を施していくことで、沿岸酸性化による沿岸生物への潜在的な影響を除去していくことが可能になると期待される。

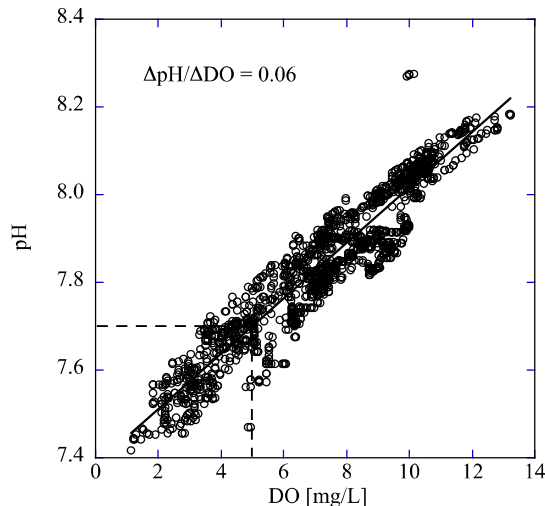


図 4 2022 年から廿日市測点で計測している、海底直上の pH と溶存酸素濃度との関係。回帰直線を黒実線で示し、その傾きを数値で記載している。またこの回帰直線から推定できる、底層水の pH を 7.7 以上にするために維持する必要がある底層溶存酸素濃度(5mg/L 以上)の位置を黒鎖線で示す。

4. 終わりに

海洋酸性化は 21 世紀初頭に海外から入ってきた、まだ新しい環境概念である。最初にこの概念が成立した北米西岸では、海洋循環の特性によって元々沿岸域の CO_2 濃度が日本に比べて大幅に高かったため、大気中 CO_2 濃度の増加による海水の pH 低下の影響を早く受けやすい環境にあった。しかし今回の OAAP の観測などでも明らかになってきたように、日本の沿岸域 pH の年平均値そのものはまだ十分高い状態にあり、現時点における主要な低 pH リスクの要因は、大気中 CO_2 濃度の増加による年間を通じた海水の pH 低下(いわゆる「海洋酸性化」)ではなく、沿岸域に供給された有機物の分解による短期的な pH の低下(「沿岸酸性化」)の方である。日本が海洋酸性化という概念を受容した時に、このような北米と日本の元々の環境条件の差があまりよく理解されないまま、いわゆる「海洋酸性化」と「沿岸酸性化」がよく分離されない形で認知が進んでしまっているように思う。いわゆる「海洋酸性化」は世界全体が協力して人類活動による CO_2 の放出量を削減する以外に対処の方法がない問題であり、地域社会が独自に対策を考えることが難しいが、「沿岸酸性化」は各地域固有の現象であり、地域の漁業関係者や自治体・市民の工夫によって様々な対策を取り得る点で、本質的な違いがある。現在の瀬戸内海において主要な低 pH リスクの要因となっている沿岸酸性化は、健全な河口域生態系(ヨシ原、干潟、アマモ場)の復活や、これまで様々に取り組まれてきた貧酸素化対策の延長線上で、リスクを低減させることが可能と考えられることを、本稿では OAAP プロジェクトの様々な調査結果に基づいて示してきた。現実の海洋環境は pH だけで決まっているものではなく、水温や栄養塩供給量、生物生産力などの様々な環境要素の最適化と、pH 環境の最適化を、複眼的に考慮していかなければいけないが、これまで得られてきた知見により、瀬戸内海の海洋環境を総合的に考える際の変数の一つとして「pH」も適切に組み込めるようになっていくことを、研究者として願っている。

この章の前半で述べたように、現時点での日本沿岸における低 pH リスクの主な発生要因は「沿岸酸性化」の方だが、日本でも数十年後、すくなくとも今世紀末には、「沿岸酸性化」の影響よりいわゆる「海洋酸性化」の影響の方が強くなる時がやってくる。このときには海水の pH の年平均値そのものが生物にとって危険なレベルまで低下してくるので、その時までにはどれだけ「沿岸酸性化」を軽減させていたとしても、全く効力がなくなる。このような未来の状況を回避するためには、各地域で「沿岸酸性化」への対策を打って現在の低 pH リスクに対処していくのと並行して、世界全体の協力のもとに人類活動による CO₂ の放出量を削減していく努力を継続的に進めていく必要があることも、やはり忘れてはいけない。

参考文献

- 1) Waldbusser, G. G., et al.: Saturation-state sensitivity of marine bivalve larvae to ocean acidification, *Nature Climate Change*, 5, 273-280, 2015.
- 2) Ono, T., et al.: Short-term variation of pH in seawaters around coastal areas of Japan: Characteristics and forcings, *Biogeosciences*, 21, 177-199, <https://doi.org/10.5194/bg-21-177-2024>, 2024.
- 3) 小埜: 日本沿岸域の酸性化進行状況に関するモニタリング結果. *環境と測定技術*, 51(11), 16-21, 2024.
- 4) 里海づくり研究会議: 2023 年度海洋酸性化適応プロジェクト報告書。
https://nippon.zaidan.info/nf_lib/nf_libServlet/nf_lib1050?np=1019&jigyo_id=0000098720
- 5) せとうちネット 瀬別水質の推移
https://www.env.go.jp/water/heisa/heisa_net/setouchiNet/seto/g2/g2cat01/suishitsu/suishitsusuii.html



海の酸性化や地球温暖化が 沿岸生態系に及ぼす影響とその対策

東京大学大気海洋研究所大槌沿岸センター 教授
藤 井 賢 彦

1. はじめに

人間活動に伴って大気中に大量に放出される CO_2 は温室効果を持つため、地球温暖化の直接的な原因となる。実際、世界中で海面水温の長期的な上昇傾向が観測されており、日本近海海面水温は世界平均の 2 倍程度の速さで上昇している¹⁾。海洋生物の多くは外温動物であり、それぞれにとって好適な水温帯がある。もし周りの海水温が自分にとっての適水温よりも高い場合、遊泳能力が高い生物はより好適な水温環境を求めて移動できるが、遊泳能力が低い、あるいはない生物の場合はそうはいかない。

大気中に残留した人為起源 CO_2 の一部は海洋に溶け込み、弱アルカリ性の海水の性質を中性・酸性の方向に変化させる。この現象を「海洋酸性化」と呼ぶ。海洋酸性化が進むと、海水中で炭酸カルシウムが作られにくくなる、あるいは溶けやすくなるため、炭酸カルシウムの殻や骨格を形成する貝類や造礁サンゴ等の石灰化生物が悪影響を受ける可能性がある。実際、風向きによって沿岸湧昇が卓越し、 CO_2 濃度の高い海水が深層から表層に供給されやすい米国西海岸沿岸では、養殖マガキの幼生が大量死した事例^{2),3)}や、アメリカイチョウガニ(ダンジネスクラブ)の幼生の感覚器官や外骨格が損傷した事例⁴⁾がある。マガキ幼生の大量死の事例が報告されて以降、将来的な海洋酸性化の進行が沿岸社会にとって重要な養殖業に及ぼす影響に対する懸念が拡がり、ワシントン州やオレゴン州では産官学民が連携し、その原因究明と対策立案が精力的に行われてきた。

地球温暖化と海洋酸性化は世界規模で進行している現象であるが、地球温暖化の進行に伴い、海洋熱波や豪雨等、より局所的に発生する極端現象の頻度と強度も増大すると予測されている⁵⁾。水温がその海域の平年値と比べて顕著に高い状態が数日以上持続する現象を海洋熱波と呼ぶが、海洋熱波は地球温暖化に伴う海洋生物の分布や多様性の変化を加速する。しかも、海洋熱波の終息後にその海域の生態系が元通りになるとは限らない⁶⁾。豪雨に伴う河川流量の増加は陸域から河川を介した沿岸域への淡水や物質の過剰流入をもたらす。淡水の流入により沿岸域の海水が希釈されることで海水の緩衝作用が弱まることに加え、流入した物質中に含まれる有機物が沿岸域で分解される際に海水中の CO_2 濃度が高まることで、沿岸域の海水の pH や炭酸カルシウムの一形態であるアラゴナイトの飽和度(Ω_{ara})の局所的な低下が起こる。この現象を沿岸酸性化と呼び、世界的な人為起源 CO_2 の大量排出が pH や Ω_{ara} の低下を引き起こす海洋酸性化と区別される⁷⁾。

2. マガキ養殖に対する酸性化と地球温暖化の複合影響

米国西海岸同様、日本でも貝類養殖が盛んだが、日本近海では、後述のような、火山活動に伴って海底から CO_2 が噴出しているようなごく特殊な海域を除けば、酸性化が石灰化生物に何らかの影響を及ぼした事例は今のところ見つかっていない。しかし、今後、人間社会がどのような CO_2 排出経路を選択するにせよ、海洋酸性化は当面の間は進行し続けると考えられる。加えて、地球温暖化の進行による豪雨の頻度

と強度の増大に伴い、沿岸酸性化の影響が深刻になることで、将来的には日本近海の石灰化生物に対しても酸性化影響が顕在化する可能性がある。そのためには、日本近海の酸性化の進行状況について、現状を把握した上で将来を予測し、それらの結果を踏まえて、どのような対策をいつまでに講じるかを考えておく必要がある。

そこで、日本の沿岸社会にとってホタテガイと並んで特に重要な貝類養殖種であるマガキに対する酸性化の影響を調べるために、2020 年度に日本財団海洋酸性化適応プロジェクト (Ocean Acidification Adaptation Project; OAAP) が始動し⁸⁾、日本で初めてとなる、実際のマガキ養殖海域を対象とした酸性化の連続モニタリングと将来予測、対策提言をシームレスに扱う統合的な研究を、瀬戸内海をはじめとする様々な日本沿岸で展開している。

岡山県備前市日生海域では、OAAP 立ち上げ初期の段階から地元の漁業協同組合等と協働して複数の観測機器をマガキ養殖場内に設置し、酸性化の指標である pH と Ω_{ara} について連続観測を行っている。その結果、日生海域では河口に近い観測点で pH や Ω_{ara} の値がマガキ幼生の形態異常や大量死といった悪影響を及ぼす可能性のある水準まで度々低下すること、その低下時期の多くはマガキの産卵・幼生期と重なること、降雨直後に急激に低下することが初めて観測された^{9),10)}。河口に近い沿岸域では、海洋酸性化と沿岸酸性化の影響が重なり合うため、酸性化は外洋域よりも速いペースで進行することが懸念される。

一方、マガキ幼生の顕微鏡観察の結果からは形態異常は認められておらず、実際にはマガキ幼生の深刻な酸性化影響はまだ確認されていない。しかし、人為起源 CO_2 の大量排出は当面続くと考えられ、そのため、酸性化や地球温暖化は今後も進行すると懸念される。これらの現象が将来のマガキ養殖に及ぼす影響を予測するために、数値モデルを用いたシミュレーションを行った。その結果、人為起源 CO_2 の大量排出を抑制しない場合、今世紀末までに、(1) Ω_{ara} が年間を通じて現在よりも大幅に低下する、(2) 地球温暖化に伴う水温上昇がマガキ産卵期の早期化・長期化をもたらす、そのため、酸性化に対して比較的脆弱なマガキ幼生期も早期化・長期化する、といった事柄が予測された^{9),10)}(図 1)。

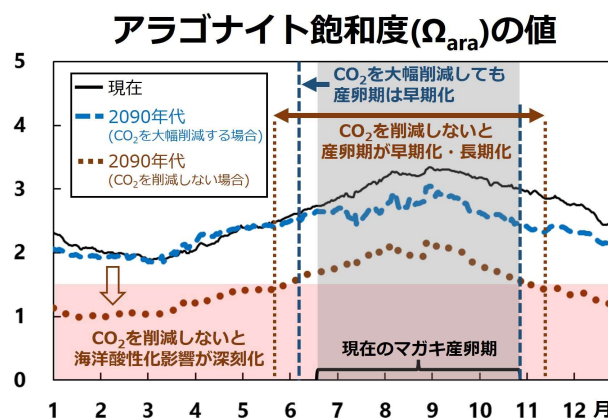


図 1 現在(黒実線)と2090 年代(Representative Concentration Pathways (RCP) 2.6 シナリオ: 青破線、RCP 8.5 シナリオ: 茶点線) の日生海域における Ω_{ara} の数値シミュレーションの結果。酸性化がマガキに影響を及ぼす可能性のある水準($\Omega_{\text{ara}} < 1.5^{24)}$ を赤色領域、現在の産卵期を灰色領域、2090 年代の産卵終了時期及び開始時期を縦線(RCP 2.6 シナリオ: 青破線、RCP 8.5 シナリオ: 茶点線)で示す^(9), 10)の図を改変)。RCP は気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)で採用された、将来の CO_2 を含む温室効果ガスの排出シナリオ。将来の人間活動の違いを想定した 4 つのシナリオがあり、2.6 シナリオはパリ協定に準拠した、温室効果ガスの大幅削減を想定した低排出シナリオ、8.5 シナリオは従来の社会や経済の枠組みの延長線上での経済成長を想定した、温室効果ガスの排出が最も多いシナリオである。

3. CO₂噴出域周辺の海洋環境

上述のように、火山活動に伴って海底から CO₂ が噴出している海域 (CO₂ シープ) が世界中で見つかっている。CO₂ シープの周辺の海水は CO₂ 濃度が高く、pH や Ω_{ara} が低いのが特徴である。中でも、浅海域にある CO₂ シープは、人間活動とも密接に関係する沿岸域にあること、深海域に比べると調査が容易であること、今後も人為起源 CO₂ の大量排出が続いてしまった場合の、海洋酸性化が進行した将来の海洋環境を先取りしていると思わせることから、近年、浅海 CO₂ シープ周辺の海洋環境と生態系の関係を調べる研究が盛んに行われている¹¹⁾。

日本近海でも浅海 CO₂ シープが幾つか見つかっており、うち沖縄県硫黄島¹²⁾、東京都式根島¹³⁾、大分県姫島^{14), 15), 16)}、鹿児島県昭和硫黄島^{15), 17)}では海洋酸性化の観点から調査研究が行われてきた。硫黄島は亜熱帯域、昭和硫黄島と式根島は亜熱帯～温帯移行域、姫島は温帯域に属し、様々な生物相に対する影響を調べることができる。

姫島の浅海 CO₂ シープは瀬戸内海国立公園及びおおいだ姫島ジオパークの中に存在している。CO₂ シープから離れた通常海域では主に 3～4 種類の大型藻類が茂みを作るガラモ場が広がっている一方、pH や Ω_{ara} の顕著な低下が認められる CO₂ シープから数 m～10m 以内の海域では藻類の多様性が低いことが分かった^{15), 16)}。姫島 CO₂ シープにおける pH や Ω_{ara} の値と生物多様性の関係性については引き続き調査中であるが、これまでの調査結果は、酸性化の進行が海洋生物の多様性の損失をもたらす可能性¹⁸⁾を支持するものである。

4. 対策は？

これまでの一連の結果は、人為起源 CO₂ の大量排出がそのまま続くと、日本沿岸でも今世紀末までに石灰化生物に対して酸性化と地球温暖化の複合影響が顕在化したり、生物多様性が減少したりする可能性を示唆している。つまり、将来的に何らかの対策が必要になる可能性を強く示唆している。酸性化と地球温暖化に対する対策はこれまで、主に「緩和策」と「適応策」の 2 つに分類されてきた。緩和策は起こっている問題の原因を取り除く根治療法、適応策は起こっている問題が当面は続くと考えてその影響の回避を試みる対症療法である。

4.1. 緩和策

地球温暖化と酸性化に共通の主因が人為起源 CO₂ の過剰排出である以上、まずはその排出をなるべく迅速かつ大幅に削減することが先決であり、王道である。CO₂ の削減は世界のどこで行なっても効果があり、故に世界中で行うべき対策である。そのためには市民一人ひとりの努力も重要だが、エネルギー転換等、排出量の大きな部門の脱炭素化が鍵を握る。

世界的な人為起源 CO₂ の排出削減に向けた取り組みに加えて、大型藻類や海草類を利用することで、沿岸酸性化を局所的に緩和する方法も提案されている¹⁹⁾。例えば、河口域や貝類養殖場の近くに藻場や干潟を復元または造成することで、河川から沿岸への淡水や有機物を含む物質の流入を抑制できる、つまり沿岸での pH や Ω_{ara} の局所的な低下を緩和できる可能性がある。いずれにせよ、海藻・海草が持つ海洋生態系のゆりかごとしての役割や、食物連鎖網を介した役割といった多面的機能も十分に踏まえた上で対策を講じる必要がある。

4.2. 適応策

緩和策を講じたとしても、酸性化と地球温暖化は当面の間は進行し続ける。従って、緩和策と共に、適応策も並行して実施していく必要がある。ここでは主にマガキ養殖を例として適応策について考える。

マガキの産卵は水温に依存しており、日本のマガキに対しては、水温 10℃を基準として、積算水温が 600℃に達すると産卵を開始し、秋季に水温が 20℃を下回ると産卵を終了する²⁰⁾。宮城県以南では夏から秋にかけてマガキが産卵するに十分高い水温環境が維持されるため、日本沿岸のマガキ養殖域の多くではその海域での自然産卵によって生まれた稚貝を育てる養殖形態が一般的である。しかし、上記の将来予測の結果^{9), 10)}は、将来のマガキ養殖の酸性化と地球温暖化の複合影響を軽減するために、緩和策と共に、マガキ養殖のやり方を変更する適応策を講じていく必要性も示唆している。

米国西海岸の主要なマガキ養殖域であるワシントン州やオレゴン州の沿岸では、比較的低水温のためマガキが産卵せず、従って稚貝を他所から調達して育てる養殖形態が一般的である。実際、沿岸湧昇が卓越し、pHと Ω_{ara} が低い米国西海岸のカキ養殖業者の中には、pHと Ω_{ara} が比較的高い海域に属するハワイの陸上孵化場で育てたマガキの種苗を購入しているところもあり²⁾、既に社会実装済みであることから、日本でも将来、海洋環境変化が生じた際の適応策として有望な選択肢のひとつとして考えられる。その他、酸性化に対して特に脆弱な幼生期には人工的に用意した低 CO_2 (高 pH、高 Ω_{ara})環境で飼育する、高水温や高 CO_2 (低 pH・低 Ω_{ara})環境に強い種苗を選択することで酸性化と地球温暖化への耐性の向上を図る、漁業・養殖業の対象種や形態を地域毎に変更する、といった適応策も視野に入れる必要があるだろう。

さらに、上述のように、世界規模で進行している地球温暖化は今後、極端現象の頻度や強度をも増大させると予測されている⁵⁾。極端現象の影響は比較的局所的かつ短期的に生じるので、地域の実情に即した迅速な対策が益々重要になっていくと考えられる。

今後の極端現象が貝類養殖に及ぼす深刻な影響として、海洋熱波に伴う高温障害の頻発や豪雨に伴う沿岸酸性化等が考えられる。また、マガキを養殖する際、マガキの成長を促すために、初秋前にカキ筏を沖合に移す「沖出し」が行われる²¹⁾が、暴風雨等の極端現象の頻度や強度が増大すると、沖出しが妨げられるだけでなく、養殖筏そのものへの物理的な被害リスクも増大する恐れがある。暴風雨や落雷といった極端現象に伴う停電は陸上での種苗生産や水産加工に、交通網の寸断は水揚げした水産物の出荷に、それぞれ大きな打撃を与える可能性がある。極端現象はしばしば激甚災害をもたらすことから、気候変動適応策だけでなく災害適応策の観点からも、地域の実情に合った対策を講じることが望ましい。例えば、適切な集水域管理は流域における防災の観点から不可欠であるが、沿岸酸性化の影響を軽減する上でも有用と考えられる²²⁾。

5. まとめ

本稿では酸性化と地球温暖化に特化した、沿岸域では他にも貧酸素化や富栄養化等、時空間規模の異なる様々な現象が複合的に折り重なって海洋環境を変化させ、海洋生物に影響を及ぼしている。複合影響の場合は単独の影響で示された危険水準よりも閾値が上がる事が報告されている²³⁾。世界規模の現象の影響自体を局所的な対策で軽減するのは難しいので、沿岸酸性化や富栄養化等、局所的なストレス要因を地域で軽減する努力をして、複合影響の要因をなるべく減らすことが有効である。このような対策も、地域のできる適応策のひとつとして視野に入れておくことが望ましい。

地域での対策の立案や実施には向こう数年から数十年の時間を要するため、数十年後の海洋環境をも先読みした対応が求められる。本稿で紹介した内容が瀬戸内海を含む地域での対策を講じる上で、少しでも参考になれば幸いである。

参考文献

1) 気象庁ウェブサイト:

https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html.

- 2) Barton, A, et al.: The Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, shows negative correlation to naturally elevated carbon dioxide levels: Implications for near-term ocean acidification effects, *Limnol. Oceanogr.*, 57(3), 698-710, 2012.
- 3) Barton, A, et al.: Impacts of coastal acidification on the Pacific Northwest shellfish industry and adaptation strategies implemented in response, *Oceanogr.*, 28(2), 146-159, 2015.
- 4) Bednaršek, N, et al.: Exoskeleton dissolution with mechanoreceptor damage in larval Dungeness crab related to severity of present-day ocean acidification vertical gradients, *Sci. Total Environ.*, 716, 136610, 2020.
- 5) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner, H.-O., et al. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056pp, 2022.
- 6) Harvey, B.: 海洋熱波が海洋生態系におよぼす影響, *Ocean Newsletter*, 474, 2020.
- 7) National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Ocean Acidification Program ウェブサイト: <https://oceanacidification.noaa.gov/>.
- 8) 田中 丈裕: 変わりゆく日本の海、世界の海 ～瀬戸内海の今と未来を考える～, 瀬戸内海, 2025.
- 9) Fujii, M., et al.: Assessing impacts of coastal warming, acidification, and deoxygenation on Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) farming: a case study in the Hinase area, Okayama Prefecture, and Shizugawa Bay, Miyagi Prefecture, Japan, *Biogeosci.*, 20(22), 4527-4549, 2023.
- 10) 藤井 賢彦ら: 沿岸の温暖化・酸性化・貧酸素化がマガキ養殖に及ぼす影響の評価と予測: 岡山県備前市日生海域と宮城県南三陸町志津川湾における事例研究, *月刊海洋*, 56(4): 263-274, 2024.
- 11) Aiuppa, A, et al.: Volcanic CO₂ seep geochemistry and use in understanding ocean acidification, *Biogeochem.*, 152, 93-115, 2021.
- 12) Inoue, S., et al.: Spatial community shift from hard to soft corals in acidified water, *Nat. Clim. Change*, 3, 683-687, 2013.
- 13) Agostini, S., et al.: Geochemistry of two shallow CO₂ seeps in Shikine Island (Japan) and their potential for ocean acidification research, *Reg. Stud. Mar. Sci.*, 2, 45-53, 2015.
- 14) 大沢 信二, 三島 壮智: 姫島火山の沿岸海底から放出されている遊離ガスの化学・同位体組成, *火山*, 62(1), 31-36, 2017.
- 15) Fujii, M., et al.: Biogeochemical properties of shallow-water CO₂ seeps on Himeshima Island and Showa Iwojima Island, Japan, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 2025, 改稿中.
- 16) 山本 智之 (2025), 姫島の「CO₂シープ」, グリーンパワー, 森林文化協会, <https://www.shinrinbunka.com/wgp/uminosanseika/29067.html>
- 17) Shinohara, H., et al.: Geochemistry of volcanic gases and hot springs of Satsuma-Iwojima, Japan: Following Matsuo, *Geochem. J.*, 27(4-5), 271-285, 1993.
- 18) Economist Impact: Ocean acidification and biodiversity loss: Connecting the dots with data, 22pp, 2024, <https://backtoblueinitiative.com/ocean-acidification-and-biodiversity-loss/>.
- 19) 小埜 恒夫: 瀬戸内海における海域別の pH 変動特性, 瀬戸内海, 2025.
- 20) 大泉 重一: 採苗生態. 改訂版 浅海完全養殖 (今井 丈夫監修), 恒星社厚生閣, 東京, 164-166, 1971.

- 21) 小宮山秀樹: マガキ沖出し時期の指標項目の検討, 岡山水試報, 岡山, 17, 64-65, 2002.
- 22) Scanes, E., et al.: Climate change rapidly warms and acidifies Australian estuaries, Nat. Comm., 11(1), 1803-1811, 2020.
- 23) Yorifuji, M., et al.: Interactive effects of ocean deoxygenation and acidification on a coastal fish *Sillago japonica* in early life stages, Mar. Poll. Bull., 198, 115896, 2024.
- 24) Waldbusser, G. G., et al.: Saturation-state sensitivity of marine bivalve larvae to ocean acidification, Nat. Clim. Change, 5(3), 273-280, 2015.