



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)。

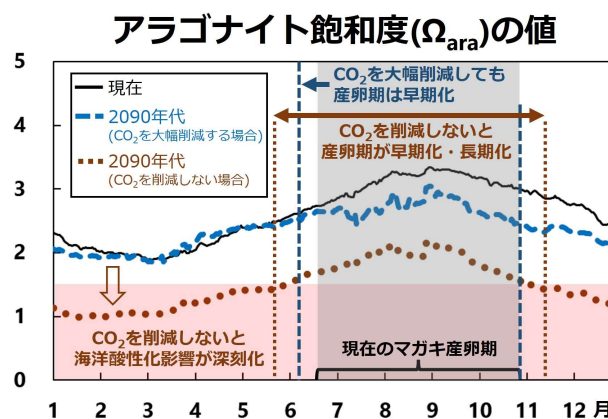


図 1 現在(黒実線)と2090 年代(Representative Concentration Pathways (RCP) 2.6 シナリオ: 青破線、RCP 8.5 シナリオ: 茶点線) の日生海域における Ω_{ara} の数値シミュレーションの結果。酸性化がマガキに影響を及ぼす可能性のある水準($\Omega_{\text{ara}} < 1.5^{24)}$ を赤色領域、現在の産卵期を灰色領域、2090 年代の産卵終了時期及び開始時期を縦線(RCP 2.6 シナリオ: 青破線、RCP 8.5 シナリオ: 茶点線)で示す^(9), 10)の図を改変)。RCP は気候変動に関する政府間パネル(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見なせることから、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た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な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.