

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。

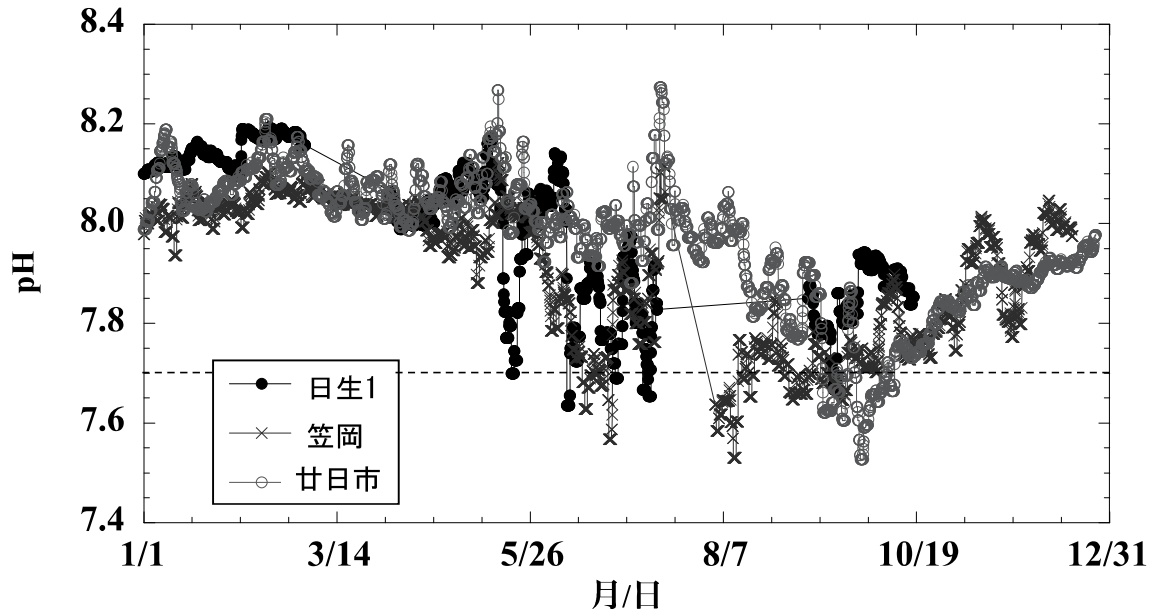


図2 2023年における日生1、笠岡、廿日市の pH 観測結果。各測点においてセンサーの不調により長期間欠測が生じている期間を細い実線で繋いでいる。

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。

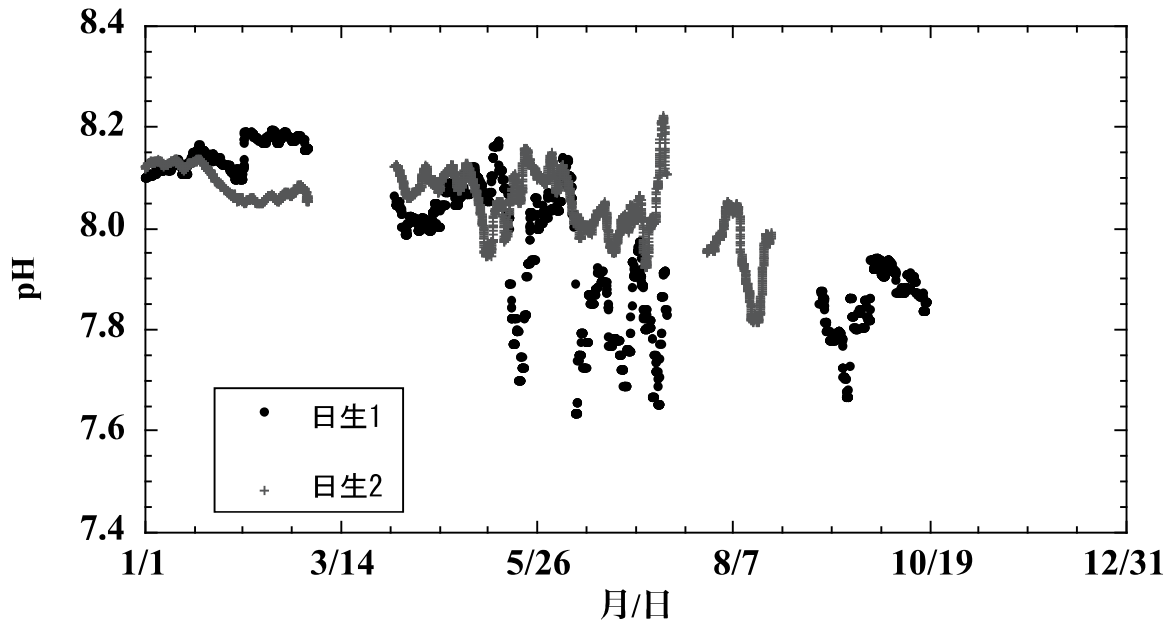


図3 日生 1 と日生 2 における 2023 年の pH 観測結果

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。

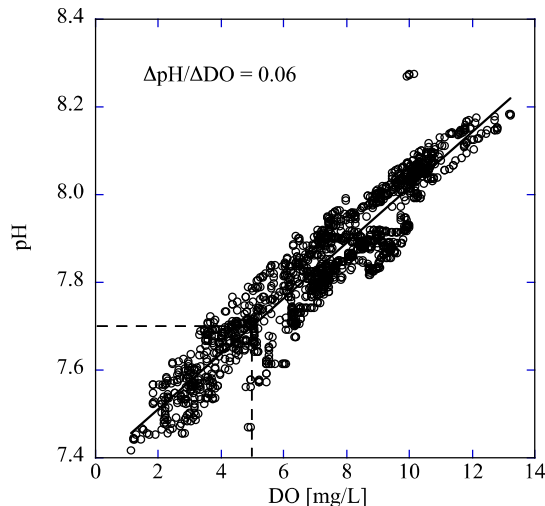


図 4 2022 年から廿日市測点で計測している、海底直上の pH と溶存酸素濃度との関係。回帰直線を黒実線で示し、その傾きを数値で記載している。またこの回帰直線から推定できる、底層水の pH を 7.7 以上にするために維持する必要がある底層溶存酸素濃度 (5mg/L 以上) の位置を黒鎖線で示す。

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 灘別水質の推移
https://www.env.go.jp/water/heisa/heisa_net/setouchiNet/seto/g2/g2cat01/suishitsu/suishitsusuii.html