

沿岸環境関連学会連絡協議会・日本財団 合同シンポジウム

地球温暖化に伴う我が国沿岸域の異変 ～忍び寄る海洋酸性化の現状～

〈プログラム〉

- 13:00～13:10 1. 開会挨拶 沿岸環境関連学会連絡協議会 代表 今井一郎(北大水)
- 13:10～13:40 2. 趣旨説明 田中丈裕(NPO里海研)
- 13:40～15:40 3. 地球温暖化・海洋酸性化に関するこれまでの研究成果
(座長)古川恵太(NPO海辺研)
- 13:40～14:10 (1)世界における地球温暖化・海洋酸性化研究の現状
藤井賢彦(北大院地球環境)
- 14:10～15:10 (2)ワシントン州および米国西海岸における海洋酸性化の科学と政策における最近の進展
テリー・クリンガー/ライアン・ケリー(ワシントン大学)
- 15:10～15:40 (3)我が国沿岸域における海洋酸性化・貧酸素化の現状評価と対策の考え方
小埜恒夫(水産機構水資研)
- 〈休憩〉
- 15:50～16:50 4. パネルディスカッション および 総合討論
「海の異変にどう立ち向かうか？」ー地球温暖化、貧酸素化、そして海洋酸性化ー
コーディネーター：太田義孝(ワシントン大学)
パネリスト：藤井賢彦(前出)
小埜恒夫(前出)
テリー・クリンガー(前出)
ライアン・ケリー(前出)
柳 哲雄(九大工:NPO里海研副理事長)
鷲尾圭司(元水大・林崎漁協)
- 16:50～17:00 5. 閉会挨拶 松田 治(広大水・NPO里海研理事長)

参加費：無料(学会会員以外の方も参加無料です)

参加方法：参加をご希望の方は、以下のシンポジウム参加申し込みフォームから送信をお願いいたします(学会会員以外の方も参加可能です)。

沿岸環境関連学会連絡協議会ホームページ
<https://www.agri.tohoku.ac.jp/enkanren/>

主催：沿岸環境関連学会連絡協議会・日本財団

コピナー：田中丈裕(NPO里海研)・藤井賢彦(北大院地球環境)・
小埜恒夫(水産機構水資研)・古川恵太(NPO海辺研)

日時：2022年3月17日(木) 13:00～17:00

場所：日本財団ビル1階・パウルーム

※同時通訳付、対面・オンラインハイブリッド形式で実施
(今後の新型コロナウイルス感染状況次第ではオンライン開催のみになる可能性があります)

〈開催趣旨〉

我が国沿岸、津々浦々の浜で、様々な異変が相次いでいる。思い起こせば、スルメイカ漁の漁火が日本海南部の沿岸域から消えたのが海の異変の始まりであったろうか。そして、瀬戸内海系群を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。

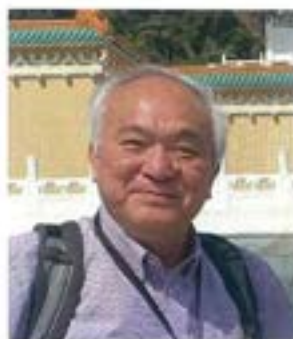
近年になって、北海道や東北では漁場が沖合に移動してサンマが獲れなくなった。サケが北の海で迷走して母川に帰ってこなくなり、サケ定置網にサケが獲れずにブリが大量に入網した。東北の太平洋岸では、2019年からシロザケの壊滅的な不漁が続き、一方で、タチウオが釣れ始め、漁獲サイズのイセエビが出現、キュウセンなどのペラ類が越冬するようになり、アイゴ成魚が現れて岩礁性藻場やワカメ養殖場を急襲している。

瀬戸内海では、北方系のカレイ類やアイナメ等が激減し、南方系のキジハタ等が増加した。水温低下に伴い深みに移動してい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している。タイワンガザミが漁獲ベースで年々増加し、春から夏にはハマチ、11月以降の冬場には10kgを超えるブリが漁獲されるようになった。2021年に入ってトゲシャコ、ヨコスジフエダイ、ホウボウなど南方系の魚介類がさらに増え続けている。瀬戸内海中部では、ウミホタルやハマトビムシが刺網にかかった魚を食べるようになり、売り物にならない魚が増えた。瀬戸内海では、貧栄養化等に喘ぐ中、漁場環境の激変がさらに加速化している。

これら異変の多くは、人為起源CO₂の過剰排出が引き起こす地球温暖化に伴う海水温の上昇が原因と考えられているが、もうひとつのCO₂問題“海洋酸性化”も大きな脅威である。海水温が下がる南極域や北極域で酸性化が進みやすい、河川水が流れ込み海中の成分が希釈される沿岸海域で起きやすい、など酸性化が進む要因が指摘されている。アメリカ西海岸のプージェット湾では、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。これまで日本を含む世界各国の研究機関によって北極海や北西太平洋（東経137度線）などで継続的な観測が実施され、海洋酸性化の進行が確認されている。また、飼育実験等により海洋酸性化が海生生物に影響を及ぼすことも明らかにされてきた。しかしながら、我が国沿岸における海洋酸性化の現状についての研究は緒についたばかりである。2020年度から「日本財団 海洋酸性化適応プロジェクト」がスタートした。ワシントン大学の協力を得ながら、カキ養殖に焦点を当て、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。本シンポジウムでは、これら研究プロジェクトで得られた成果を基に、深刻な影響が目前に迫りつつある海洋酸性化について、得られた知見を集約して情報を共有し、今後の対策に向けての検討に備えることを目的としている。

※以下敬称略

《 開会あいさつ 》



今井一郎（いまい いちろう）

北海道大学名誉教授・琵琶湖博物館 特別研究員、沿岸環境関連学会連絡協議会 代表、瀬戸内海広域漁業調整委員会会長、大阪海区漁業調整委員会会長、全日本漁港建設協会環境維持保全工法研究会顧問、国際エメックスセンター主席客員研究員、環日本海海洋環境検討委員会委員、第20回国際有害有毒藻類学会組織委員会委員長。専門は有害有毒赤潮の発生機構解明・予知・予防・防除、「有害有毒プランクトンの科学」「シャットネラ赤潮の生物学」「貝毒研究の最先端」など著書多数。大阪湾において海底耕耘による珪藻繁茂で有毒プランクトンの制御を進行中、今春で3連勝なるか？ 趣味は珍しくて美味しい物を食すこと、楽しく呑みながらが最高。

《 趣旨説明 》



田中丈裕（たなか たけひろ）

NPO 里海づくり研究会 理事・事務局長、大阪市生まれ、1979年に岡山県に入庁し、2008～2011年に水産課長、岡山県を退職後、海洋建設(株)水産環境研究所長を務めた後、2012年1月に“里海”の提唱者である九州大学名誉教授 柳哲雄氏、広島大学名誉教授 松田治氏らとともにNPO 里海づくり研究会を設立、現在に至る、40年以上に亘って漁業現場で実践活動・研究活動を継続中、ダイバー歴50年、地域活性化伝道師（内閣府）、みなとまちづくりマイスター（一般社団法人ウォーターフロント協会）。

《地球温暖化・海洋酸性化に関するこれまでの研究成果》



藤井賢彦（ふじい まさひこ）

北海道大学 大学院地球環境科学研究院 准教授、別府温泉地球博物館 Onsen アカデミックアドバイザー、横浜市出身、博士（地球環境科学）、国立環境研究所、米国メイン州立大学海洋科学部などを経て、2011年より現職。専門は環境科学・海洋学。著書に「海の温暖化～変わりゆく海と人間活動の影響～」、「水産海洋学入門 海洋生物資源の持続的利用」(共著)など。潜水土、温泉マイスター。趣味は旅行、読書、ダイビング、水泳、ジョギング、温泉、飲酒など。



小笠恒夫（おの つねお）

水産研究・教育機構 水産資源研究所 海洋環境部 寒流第一グループ 主幹研究員、茨城県出身、博士（水産学）、科学技術振興事業団特別研究員、地球フロンティア研究システム生態系変動予測領域研究員などを経て2002年より現職。North Pacific Marine Science Organization (PICES) Section on Carbon and Climate 共同議長、IPCC 第4次報告書執筆協力者、地球温暖化等に起因する海洋環境の変動と、その海洋生態系への影響に関する様々な研究に取り組む。趣味は旅行・ドライブ、好物はゆべし。



Terrie Klinger (テリー・クリンガー)

ワシントン大学の海洋環境問題学部の教授であり、ワシントン海洋酸性化センターの共同ディレクターを務めている。主たる研究領域は、沿岸の生態系、海洋生態系機能に対する気候と環境の変化の影響、および海洋変化の課題に対処するための管理戦略の開発である。カリフォルニア大学バークレー校で生物学の学士号を取得し、プリティッシュコロンビア大学で植物学の修士号を取得した後、カリフォルニア大学サンディエゴ校のスクリッps海洋研究所で学位を取得した。

Terrie Klinger is Professor of Marine and Environmental Affairs at the University of Washington and serves as Co-Director of the Washington Ocean Acidification Center. Her research focuses on nearshore ecology, the impacts of climate and environmental change on marine ecosystem function, and the development of management strategies to address the challenges of ocean change. She obtained a Ph.D. from the Scripps Institution of Oceanography at UC San Diego after earning a Master's degree in Botany from the University of British Columbia and a Bachelor's degree in Biology from UC Berkeley.



Ryan Kelly (ライアン・ケリー)

ワシントン大学の海洋環境問題学部の准教授。研究の興味は、ハードな科学データや政策立案者によるそれらのデータの使用にまで及ぶ。特に遺伝的および生態学的研究と法と政策の実装を繋ぐために、環境モニタリング、資源管理、絶滅危惧種、海洋酸性化に関する研究に従事。カリフォルニア大学ロスアンジェルス校で生態学及び進化生物学で学位を取得、コロンビア大学で生態・進化・環境生物学の修士、学位を取得した後、カリフォルニア大学バークレー校より法務博士を取得。

Associate Professor, University of Washington, School of Marine & Environmental Affairs.

《Research Interests》 My interests range from hard scientific data and policymakers' use of those data. My research joins genetic and ecological research with real-world implementation in law and policy, particularly with respect to environmental monitoring, resource management, endangered species, and ocean acidification. 《Research Experience》 March 2013 - Present: Principal Investigator, University of Washington. Research on environmental DNA, ocean acidification, environmental policy, and related topics. August 2008 - March 2013: Independent and collaborative work at Stanford University and U.C. Berkeley on ocean policy, marine genetics, and the intersection of scientific data and law. September 2006 - August 2008: Postdoctoral work, Stanford University's Hopkins Marine Station in the laboratory of Stephen R. Palumbi. This work compared the genetic and ecological patterns of Pacific nearshore invertebrates. August 2002 - May 2006: Doctoral research, Columbia University & American Museum of Natural History, New York.



古川恵太 (ふるかわ けいた)

NPO 海辺つくり研究会 理事長、東京海洋大学産学・地域連携推進機構 客員教授、徳島大学環境防災研究センター客員教授、東アジア海域環境管理パートナーシップ (PEMSEA) 技術会議共同議長、東京湾再生官民連携フォーラム モニタリングPT長、笹川平和財団海洋政策研究所 特別研究員 (非常勤)、国土技術政策総合研究所、笹川平和財団海洋政策研究所を経て現在に至る。沿岸生態系の保全・再生や沿岸域総合管理の専門家として、東京湾再生についてのプロジェクト等において幅広く活躍中。

《 パネルディスカッションおよび総合討論 》



太田義孝（おおた よしたか）

ワシントン大学 教授。専門は海洋人類学、海洋管理に関わる公共政策。世界各地の海で魚資源の管理と漁業文化についての学際的研究に従事。自然科学と社会科学をつなぐ政策ディレクターとして政策と社会をつなぐ。海の未来を総合的に予測する日本財団ネレウスプログラム（2011～2019）の統括リーダーであり、同プログラムの成果“Predicting Future Ocean”の主な部分を翻訳、編集して2021年8月に「海洋の未来」を出版。2019年にはワシントン大学を中心に世界の20の大学が連携して取り組む日本財団ネクサスプログラムを発足させ、「人と海」を守るため全力で奮闘中。



柳 哲雄（やなぎ てつお）

NPO 里海づくり研究会議 副理事長・九州大学名誉教授、NPO 瀬戸内海研究会議 理事長、(公財)国際エメックスセンター 理事、「里海」という言葉と概念の生みの親。環境省中央環境審議会水環境部瀬戸内海小委員会 専門委員など多くの行政委員を歴任。気象、海洋物理、沿岸海洋学、陸水学、環境動態解析、水工学、環境動態解析の専門家。「海洋観測入門」、「海の科学」、「風景の構造」、「里海論」、「里海創生論」、「里海管理論」、「Japanese Commons in the Coastal Seas」など著書多数。里海づくりに世界各地を奔走中。



鷺尾圭司（わしお けいじ）

元 水産大学校理事長、林崎漁協顧問、日本伝統食品研究会 会長、NPO 里海づくり研究会議 理事、京都大学博士課程から兵庫県林崎漁協企画研究室長に着任。漁場環境調査やノリ養殖指導、資源管理、魚食普及に尽力。明石を中心に漁業と魚食文化の発信を続け、イカナゴくぎ煮、節分の恵方巻の仕掛け人。2000年京都精華大学人文学部環境社会学科教授、学部長。2009年水産大学校理事長に就任し、2021年まで代表を務めた。総合海洋政策本部参与として政府の海洋政策にも尽力。

《 閉会あいさつ 》



松田 治（まつだ おさむ）

NPO 法人里海づくり研究会議 理事長・広島大学名誉教授、(公財)国際エメックスセンター副理事長、NPO 法人瀬戸内海研究会議顧問、かがわ里海づくり協議会(香川県)アドバイザー、「漁場生産力回復手法の開発」推進委員(水産技術研究所)、栄養塩管理方針の検討委員会座長(全国水産技術協会)、広島湾再生推進会議アドバイザー、広島湾さとうみネットワーク議長など。その他、中央環境審議会瀬戸内海部会委員、農林水産省生物多様性戦略検討会委員、環境省海域の物質循環健全化計画検討委員会座長などを歴任。専門は水圏環境学・水域物質循環論・沿岸環境管理。農学博士。「瀬戸内海を里海に」、「森里海連環学」、「海洋問題入門」など著書多数。第25次 南極地域観測隊越冬隊員。

我が国沿岸環境の長期的変遷と近年の海の異変 ～趣旨説明を兼ねて～

田中 丈裕 (NPO 法人 里海づくり研究会議)

キーワード：漁場環境・貧栄養化・底質悪化・地球温暖化・海洋酸性化・貧酸素化

1. はじめに

我が国の漁業生産量は1984年の1,282万tをピークに減少の一途を辿り、2019年には420万tとピーク時の33%になってしまった¹⁾。2000年頃までの増減にはマイワシの漁獲動向が大きく影響した。遠洋漁業の生産量は1980年代後半から著しく減少し続けており、沖合漁業の不振とも相まって、沿岸漁業と海面養殖業の重要性が増している。海面養殖業は、消費者ニーズの高い養殖魚種の生産の発展や養殖技術の普及・発展等に伴い2013年以降は増加傾向にあるが、沿岸漁業は2000年代に入っても漸減傾向が続いている。

そして、今もなお、全国の海面漁業生産量の10%、海面養殖業の33%を占める瀬戸内海の漁業生産量も、1984～1986年の85万t前後から2016年には約33万tと40%未満にまで減少している²⁾。

このような漁業生産量の著しい減少には、少なからず人為的な環境変化が影響しており、このことは我が国を代表する閉鎖性海域である瀬戸内海と有明海の歴史が如実に物語っている。

2. 漁場環境の変遷

2.1. 瀬戸内海³⁾

瀬戸内海中央部に位置する岡山の海から、1970年代に遡ってその変遷を振り返る。この頃は、どこの漁協行っても、笹や大皿に山盛りになされた茹でシャコを指さし「シャコ食べていかれ～」と言われたものである。毎日、浜に据え付けられた大釜で一日中シャコが茹でられ出荷されていた。岡山県漁業の二本柱であるカキ養殖・ノリ養殖もこの頃ピークを迎えていた。春の魚島時(うおじまどき)にはマダイ、サワラ、トラフグ、コウイカなど様々な魚介類が水揚げされ、夏にはマナガツオ、ヒラというように季節ごとに浜は活況を呈していた。カキ養殖筏のカキ連にはムラサキイガイがびっしりと付着し、初夏になるとカキ漁師達は大釜に湯を沸かして浸漬したり、ガスバーナーで炙ったりして駆除作業に追われたものである。海の中は、どこを潜っても多様な付着生物に彩られ、目を見張るようなカラフルな光景と、その圧倒的な量に驚かされた。夜間に海に潜ぎ出せば、どこでもかしこでも底びき網(小型機船底びき網)を曳いており、今では考えられない

操業密度で、それでも誰もが1日5万円以上の水揚げを達成していた。富栄養化が進行して有毒赤潮が頻発するようになった1970～1980年代、養殖ハマチの大量斃死などで瀬戸内海は「瀬死の海」とまで言われた。アサリなど二枚貝類の減少と、1980年から蔓延し始めシャコの真菌症がその後の暗雲を予感させたが、その一方で、豊富な栄養塩と一次生産の拡大によってイワシ類が増え、漁船漁業、養殖業ともに過去最高の生産量に達した。世界に名だたる閉鎖性水域と比べても数倍から20倍もの単位面積当たり生産量を誇った⁴⁾時代であった。

1990年代に入ると、徐々に栄養塩が減少し、海水温が上昇し始める。ノリ養殖の漁期が短くなり、イワシ類の漁獲が目に見えて減少し始めた。1950～1980年代に干拓・埋立て干潟・藻場を奪われた悪影響がボディ・ブローのように顕在化し、二枚貝類の減少に拍車がかかった。シャコの真菌症がますます拡大して大きな個体が獲れなくなり、貧酸素による大量斃死も発生するようになった。底魚資源も低迷し始め、漁獲量は明らかに減少傾向に転じていった。カキ連からムラサキイガイを駆除する光景も目にしなくなり、花が咲いたようなカラフルな付着動物群はいなくなり、モノクロの世界に変貌していったのも1990年代後半からである。漁獲量は減少傾向に転じ、明らかに生物多様性が低下していった。

2000年代に入って、栄養塩の減少と海水温の上昇はより顕著になっていった。岡山県で大規模な養殖ノリ色落被害に襲われたのは2006年1月であった。ノリ養殖の主要漁場である児島湾周辺で、前年の12月30日までノリを摘採し生産していた漁師が正月休み明け1月4日に沖に出たら、漁場全体が金髪のような色になったノリで覆われていた。前代未聞の出来事で、大変な大騒動になった。栄養塩を少しでも供給するために、国土交通省と多くの利水者に日参し、吉井川上流にある苦田ダムから放流をお願いしたのはこの年からで、2020年度まで毎年のように続けていただいた。しかし、貧栄養化は養殖ノリだけの問題だけではない。瀬戸内海を始め我が国沿岸の海は貧栄養化に喘いでいる。漁師達は「海に生き物の匂いがしない。」「磯の香りがしない。」「フナムシさえ見なくなった。」などと

口々に言い募る。二枚貝類だけでなくその他の底生動物・付着動物も著しく減少して、物質循環の担い手が減少していることも問題であるが、そもそも循環すべき栄養塩が少なくなり過ぎれば、一次生産が損なわれ沿岸生態系そのものが崩壊してしまう。

2.2. 有明海^{5), 6)}

かつての有明海は、奇跡のシステムとも称された生物生産機能により、その生物生産力は瀬戸内海と並び最高水準にあると言われた。ピーク時には海面漁業、養殖業を合わせ26万t以上に及び、その単位面積当たり生産量は、往事の瀬戸内海のそれを凌駕するほどであった。特に全国の干潟の38%を占める広大な干潟における二枚貝類の生産力は爆発的で、その生産量は1980年代には海面漁業の約80%を占めた。「有明海の環境異変」は1989年の諫早干拓事業に始まると言われ、1997年に潮受け堤防が建設され2008年に竣工した。総生産量は、1990年代以降一貫して減少傾向にあるものの、ノリ養殖業がその減少に歯止めをかけており、2018年の総生産量の約90%を占めるが、そのノリ養殖も近年では色落ち問題に悩まされている。1万t以上獲れていた魚類も近年は2~3千tと減少が著しいが、タイラギ、アサリ、サルボウ等の二枚貝類の激減が深刻であり、ピーク時に11万tであった生産量が数千tになった。現時点においても貧酸素水塊の発生、赤潮の発生、ベントスの減少等の問題が鎮座しており、未だ回復の兆しは見えない。

3. 近年における全国的な海の異変

我が国沿岸、津々浦々の浜で、未曾有の異変が相次いでいる。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、水産庁は「不漁問題に関する検討会」を設置し、これらの不漁要因を分析した。そのとりまとめ⁷⁾ (2021年6月)の中で、地球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ている。2021年11月、全漁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⁸⁾。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。

瀬戸内海中部でも、カレイ類やアイナメ等の北方系の魚介類が激減し、キジハタ等の南方系魚介類が

増加したが、その他にも様々な異常が散見される。2020年からは「足切れ」マダコが市場に出回り始め、ある漁協では、1日に水揚げされたマダコのうち「足切れ」が4割以上を占めた。昔から一潮百匁(375g)と言われるほど成長が速いマダコも、飽食状態を維持することで脱皮ごとに成長するガザミも、キジハタやカサゴ、ナマコ等も大きくならない。ヒラメは大きな個体ほど薄っぺらい。アナゴは痩せていて腹を割いても胃は空っぽ。漁師達は海底に餌になる生き物がいないと口を揃える。2018年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、売り物にならない魚が増え始めた。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くようになった。貧栄養化が進行しているにもかかわらず、局所的なオカメブンプクやナミダボヤの異常増殖、アナアオサの大量発生などの富栄養化の現象が散見される。潜水器漁師によれば、2018年からホトトギスガイ群落が広範囲に絨毯を敷き詰めたように海底を覆い、その下で二枚貝類が死んでいるという。

4. 海洋酸性化適応プロジェクトについて

最近の異変の多くは、人為起源CO₂の過剰排出が引き起こす地球温暖化に伴う海水温の上昇と考えられており、これに貧栄養化、富栄養化時代の負の遺産である難分解性有機物に起因する恒常的な底質悪化⁹⁾などの原因が加わり複雑な様相を呈する。もうひとつのCO₂問題“海洋酸性化”も大きな脅威である。炭酸マグネシウムの殻や骨格を形成するプランクトン、サンゴ、貝類、甲殻類、棘皮動物など石灰化生物の生存が脅かされることが強く懸念され¹⁰⁾、これには産業上重要な魚介類も多く含まれる。しかし、我が国沿岸における酸性化影響はほとんどわかっておらず、適応策等についての研究は緒にさえついていないのが現状である。2020年度から「日本財団 海洋酸性化適応プロジェクト」がスタートした。国内の研究機関から漁協等の漁業関係者まで20を超える多様な主体が連携協力し、先進研究をリードしてきたワシントン大学の協力を得ながら、カキ養殖に焦点を当て、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。

5. 本日のシンポジウムの目的と内容

本日のシンポジウムは、深刻な影響が目前に迫りつつある海洋酸性化を中心に、地球温暖化、貧酸素化などとの複合的な相互作用をも視野に入れた内容となっており、これまでに得られた知見を集約し

て情報を共有し、今後の対策に向けての検討に備えることを目的としている。

まず、藤井賢彦氏からは、地球温暖化・海洋酸性化とは？に始まり、これらによる海洋環境、海生生物への影響等について世界に目を向けて解説し、今後の課題を整理する。ワシントン大学では、ピュージェット湾において 2005 年から海洋酸性化によるカキ幼生の大量斃死等の漁業被害が顕在化した¹¹⁾ことを踏まえ、海洋酸性化に関する先進的な研究が進められており、テリー・クリンガー教授とライアン・ケリー教授から、海洋酸性化に関する最新の科学とこれらに基づく政策についてご講演いただく。小笠恒夫氏からは、海洋酸性化適応プロジェクトにより実施した約1年半余りの海洋観測等の成果と併せ、他の研究プロジェクトでこれまでに得られた知見をも総括し、海洋酸性化と貧酸素化等による現時点での影響評価と今後の対策について基本的考え方を提示する。パネルディスカッションおよび総合討論では、昨年8月に発刊された「海洋の未来」の編者・著者で、気候変動による海への影響に対応するための国際プロジェクト「日本財団ネクサスプログラム」の統括責任者でもあるワシントン大学の太田義孝教授をコーディネーターに迎え、海洋学全般の立場から柳哲雄氏、水産学および漁業現場を代表して鷲尾圭司氏がパネリストに加わり、「海の異変にどう立ち向かうか？」について幅広く総合的な議論を展開する。

すでに現状において地球規模の気候変動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？むやみに恐れることなく、現状と対策について広く国民にも正しく伝えていかねばならない。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、連携していかねばならない。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の対等な連携体制を構築し維持していくことは必須である。本日のシンポジウムが漁業界と学会、「漁師の知恵」と科学を繋ぐ一助になれば望外の喜びである。

参考文献

- 1) 水産庁、令和3年度水産白書
- 2) 農林水産省、平成28年漁業・養殖業生産統計年報
- 3) 田中丈裕、海の異変にどう立ち向かうか～多様な主体による取り組み、国立公園、No.798、19-22、2021。
- 4) 岡市友利、小森星児、中西弘、瀬戸内海の生物資源と環境—その将来のために—、恒星社厚生閣、東京、1996。
- 5) 宇野木早苗、有明海の自然と再生、築地書館、東京、2006。
- 6) 速水祐一、有明海における環境問題—長期的変化を中心に—沿岸海洋研究、第59巻、第1号、33-45、2021。
- 7) 不漁問題に関する検討会、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～、2021。
- 8) JF 全漁連、沿岸漁業における「新たな資源管理について」、2021。
- 9) T.Yamamoto,K.Orimoto,S.Asaoka,H.Yamamoto and S.Onodera, A conflict between the legacy of eutrophication and cultural oligotrophication in Hiroshima Bay, *Oceans* 2021, 2, 546-565.
- 10) 藤井賢彦、海洋酸性化、沿岸域学会誌、第32巻、第4号、15-19、2020。
- 11) Feely, R. A., C. L. Sabine, J. M. Hernandez-Ayon, D. J. Lanson, B. Hales, Evidence for upwelling of corrosive "acidified" water onto the continental shelf, *Science*, 320, 1490-1492, 2008.

世界における地球温暖化・海洋酸性化研究の現状

藤井 賢彦（北海道大学 大学院地球環境科学研究所）

キーワード：地球温暖化・海洋酸性化・緩和策・適応策

1. はじめに

海洋は温室効果ガスの増加に伴う過剰な温室効果によって地球上に蓄積された熱の9割¹⁾、主要な温室効果ガスであるCO₂の1/4²⁾を吸収してきた。しかし、その海洋が近年、悲鳴を上げている兆候が世界中で見られる。

日本人が1人あたりの年間CO₂排出量を10 t-CO₂³⁾とすると、このうちの3.1 t-CO₂程度は森林等の陸上生態系、2.3 t-CO₂程度は海洋にそれぞれ吸収され、残りの4.6 t-CO₂程度が大気中に残留する。この、海洋に吸収されたCO₂が海洋酸性化、大気中に残留したCO₂が地球温暖化の主要な原因となっている。

人間活動に伴って排出されるCO₂をはじめとする温室効果ガスが気候変動の主因であり、かつ気候変動が海洋生態系や人間社会に深刻な影響を及ぼしているのであれば、対策を講じる必要があるのは明らかである。その際に求められるのは、現状を正しく把握し、将来を高い精度で予測し、得られた科学的根拠に基づいた対策を適正かつ迅速に講じていくことである。

気候変動が海洋生物に及ぼす影響は多岐にわたり、多くの報告や予測に関する成果が公表されている。中でも、地球温暖化、海洋酸性化、貧酸素化の3つのハザード⁴⁾は世界的で起こっており、また今後、人為起源CO₂の排出をどの程度削減していくかによって数十年後の様相が大きく変わるため、世界中で対策が求められる。これらの現象は単独に起こっているわけではなく、複雑に相互作用している⁵⁾。本講演では、このうち、地球温暖化と海洋酸性化が単独あるいは複合的に海洋生物に及ぼす影響について紹介する。

2. 地球温暖化

地球温暖化が海洋生物に及ぼす影響として、長期的な傾向である水温上昇や海面上昇、数日から数年にわたって急激な水温上昇が発生する「海洋熱波」⁶⁾、そして暴風雨等の極端気象の増加に伴う陸域から河川を介した淡水・物質流入過程の変化等が考えられる。

海洋生物の多くは変温動物であり、己にとって好適な水温環境で生育・生息している。そのため、水温が好適な環境を逸脱すると、生物の生息・生育域や生態系機能が変化する。水温は最も基本的な環境因子であ

り、多くの海域で計測されているので、海洋生物の水温影響に関する研究報告例は比較的多い。

長期的な水温上昇傾向に伴い、沿岸生物の生育・生息域が高緯度へ移動することが知られている。日本近海の多くは温帯に属するが、近年、温帯域に熱帯・亜熱帯性の海洋生物が加入する、温帯の「熱帯化」⁷⁾と呼ばれる現象が報告されている。例えば、造礁サンゴの本来の生息域は熱帯・亜熱帯であるが、近年の水温上昇傾向に伴い、温帯域でも生息に好適な水温環境が生まれたことにより、生息域が高緯度側へ拡大している⁸⁾。それに応じて、チョウチョウウオ類等、その生活をサンゴ礁に依存する熱帯・亜熱帯生物もその生息域を拡大している⁹⁾。海藻・海草に関しても、水温上昇に伴い、温帯域では在来種の衰退や、南方種やサンゴ群集への遷移が報告されている^{12,13)}。亜寒帯域においても、コンブ類等、冷水性の海藻の衰退が報告されている¹⁴⁾。いずれも、今後も続く現象と見られ、将来予測も行われている。その多くの結果が、CO₂をはじめとする温室効果ガスを大幅に削減しない限り、沿岸生態系や、水産業や観光業等を通じてその恩恵を受けている社会に深刻な影響を及ぼすと警告すると共に、今後、温室効果ガスの大幅削減を実現できれば影響を大きく緩和できることを示唆している^{15)~18)}。

3. 海洋酸性化

海洋に吸収された人為起源CO₂は海水と反応して水素イオンを発生させ、pHを低下させる。つまり、海水中のCO₂が増えれば増えるほど、海水が元々持っている弱アルカリ性の性質は徐々に中性あるいは酸性の方向に変化する。この現象を海洋酸性化と呼ぶ。酸性化が進行すると海水中の炭酸イオンが減少するので、炭酸カルシウムの殻や骨格を持つ海洋生物（以下、石灰化生物と呼ぶ）は殻や骨格を形成しづらくなる。また、多くの石灰化生物は幼生期において酸性化に対して特に脆弱であることがわかっている¹⁹⁾。

中深層のCO₂濃度が高い海水が沿岸湧昇で表層に供給されやすい米国太平洋北西岸の実海域では、海洋酸性化の影響と見られる養殖マガキ幼生の大量死²⁰⁾や、アメリカイチョウガニの後期幼生（メガロバ幼生）の外骨格の溶解や感覚器官の損傷²¹⁾が報告されており、

いずれも重要な水産対象種であることから社会の関心を集めている。日本近海では海洋生物に対する海洋酸性化影響を直接示唆した報告例はまだないが、海域や時期によっては pH 等の海洋酸性化指標の値が石灰化生物の幼生期にとって危険水準となる閾値を下回る値が連続観測の結果から報告されている²³⁾。今後はそのような海域や時期で石灰化生物の幼生の形態観察等を通じて、海洋酸性化影響の発現の有無を調べる必要がある。

地球温暖化同様、海洋酸性化の将来予測も行われており、日本近海を対象にした多くの研究結果が、今後、人為起源 CO₂ の大幅削減を行わないと温暖化との複合影響によりサンゴの生息適地が消滅する²³⁾²⁴⁾、北海道の重要な水産資源であるホタテガイやエゾバフンウニの生息が脅かされる²⁵⁾²⁶⁾、といった可能性を示唆している。

4. 今後の課題

本講演で紹介する海洋物理・生物化学統合モデリングの結果の多くは、低解像度モデル（空間解像度 100 km 程度、時間解像度 毎月程度）あるいは中解像度モデル（空間解像度 10 km 程度、時間解像度 毎日程度）を用いたものである。これらのモデルは計算機負荷が比較的小さく数値実験を数多くこなせる利点がある一方、空間解像度が荒いため、そのままでは得られた結果を湾・漁区レベルに落とし込めない。また、最近の飼育実験結果²⁶⁾は、エゾアワビ幼生等への海洋酸性化影響の多寡は1日のうちでも大きく変化することを示唆している。つまり、例えば地域に特徴的な養殖業等への気候変動適応策の立案に資するためにはモデルの高解像度化（空間解像度 数 100 m 程度、時間解像度 毎時程度）が必要となる²³⁾²⁷⁾。さらに、モデルの高解像度化にともない、モデルの初期値・境界値・参照値となる観測データの解像度も上げていく必要がある。

また、これまでの研究の多くは特定の生物種・生活史・環境要因のみを対象としてきたものが多かった。今後は、本講演で紹介する地球温暖化・海洋酸性化複合影響のみならず、沿岸域であれば局所的な人間活動との複合影響や、さらには気候変動にともなう食物連鎖の変化等、生態系としての気候変動応答を考慮していく必要があると考えられる。

参考文献

1) Cheng, L., L., K. E. Trenberth, J. Fasullo, T. Boyer, J. Abraham, and J. Zhu, Improved estimates of ocean heat content from 1960 to 2015, *Sci. Adv.*, 3, e1601545 (2017).

2) Friedlingstein, P., M. O'Sullivan, M. W. Jones et al., *Global Carbon Budget 2020*, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3269–3340 (2020).

3) 環境省 (accessed February 12 2022), https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/emissions/results/JNGI2019_2-1.pdf

4) Gruber, N., P. W. Boyd, T. L. Frölicher, and M. Vogt, Biogeochemical extremes and compound events in the ocean, *Nature*, 600, 395–407 (2021).

5) 藤井賢彦, 芳村毅, 小笠恒夫, 海洋酸性化・貧酸素化・地球温暖化の海洋生態系への影響評価, *月刊海洋*, 53 (6), 299–303 (2021).

6) 藤井賢彦, 北海道沿岸域における地球温暖化・海洋酸性化・貧酸素化指標の連続観測と将来予測, *環境と測定技術*, 48 (12), 19–30 (2021).

7) 藤井賢彦, 気候変動が日本沿岸の海洋生態系や社会に及ぼす影響, *水環境学会誌*, 45 (3) (2022) (印刷中).

8) Miyama, T., S. Minobe, and H. Goto, Marine heatwave of sea surface temperature of the Oyashio region in summer in 2010–2016. *Front. Mar. Sci.* 7, 576240. doi:10.3389/fmars.2020.576240 (2021).

9) Vergés, A., P. D. Steinberg, M. E. Hay, A. G. B. Poore, A. H. Campbell et al., the tropicalization of temperate marine ecosystems: climate-mediated changes in herbivory and community phase shifts, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 281 (1789), 20140846. doi:10.1098/rspb.2014.0846 (2014).

10) Yamano, H., K. Sugihara, and K. Nomura, Rapid poleward range expansion of tropical reef corals in response to rising sea surface temperatures, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L04601, doi:10.1029/2010GL046474 (2011).

11) Nakamura, Y., D. A. Feary, M. Kanda, and K. Yamaoka, Tropical fishes dominate temperate reef fish communities within western Japan, *PLoS One*, 8(12), e81107, doi:10.1371/journal.pone.0081107 (2013).

12) Tanaka, K., S. Taino, H. Haraguchi, G. Prendergast, and M. Hiraoka, Warming off southwestern Japan linked to distributional shifts of subtidal canopy-forming seaweeds, *Ecology and Evolution*, 2(11), 2854–2865, doi:10.1002/ece3.391 (2012).

13) Kumagai, N. H., J. Garcia Molinos, H. Yamano, S. Takao, M. Fujii, and Y. Yamanaka, Ocean currents and herbivory drive macroalgae-to-coral community shift under climate warming, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 115(36), 8990–8995, doi:10.1073/pnas.1716826115 (2018).

14) Sudo, K., K. Watanabe, N. Yotsukura, and M. Nakaoka,

- Predictions of kelp distribution shifts along the northern coast of Japan, *Ecological Research*, 35(1), 47-60, doi: 10.1111/1440-1703.12053 (2020).
- 15) 屋良由美子, 藤井賢彦, 山中康裕, 岡田直資, 山野博哉, 大島和裕, 地球温暖化に伴う海水温上昇が日本近海のサンゴ分布及び健康度に及ぼす影響評価, *日本サンゴ礁学会誌*, 11, 131-140. doi:10.3755/jcrs.11.131 (2009).
- 16) 柴野良太, 藤井賢彦, 山中康裕, 山野博哉, 高尾信太郎, 北海道における沿岸水温環境とホタテガイ漁獲量の時空間変動解析, *水産海洋研究*, 78(4), 259-267 (2014).
- 17) Takao, S., N. H. Kumagai, H. Yamano, M. Fujii, and Y. Yamanaka, Projecting the impacts of rising seawater temperatures on the distribution of seaweeds around Japan under multiple climate change scenarios, *Ecology and Evolution*, 5(1), 213-223, doi: 10.1002/ece3.1358 (2015).
- 18) Sudo, K., S. Maehara, M. Nakaoka, and M. Fujii, Assessing impacts of tropicalization on coastal fish that affect coastal ecosystem services of Japan, *Front. Built Environ*, 7, 788700, doi:10.3389/fbuil.2021.788700 (2022).
- 19) Onitsuka, T., H. Takami, D. Muraoka, Y. Matsumoto, A. Nakatsubo, R. Kimura, T. Ono, and Y. Nojiri, Effects of ocean acidification with pCO₂ diurnal fluctuations on survival and larval shell formation of Ezo abalone, *Haliotis discus hannai*, *Marine Environmental Research*, 134, 28-36 (2018).
- 20) Feely, R. A., C. L. Sabine, J. M. Hernandez-Ayon, D. Janson, B. Hales, Evidence for upwelling of corrosive "acidified" water onto the continental shelf, *Science*, 320, 1490-1492 (2008).
- 21) Bednaršek, N., R. A. Feely, M. W. Beck, S. R. Alin, S. A. Siedlecki, P. Calosi, E. L. Norton, C. Saenger, J. Štrusg, D. Greeley, N. P. Nezlin, M. Roethler, and J. I. Spicer, Exoskeleton dissolution with mechanoreceptor damage in larval Dungeness crab related to severity of present-day ocean acidification vertical gradients, *Science of The Total Environment*, 716, 136610 (2020).
- 22) 濱野上 龍志, マガキ (*Crassostrea gigas*)の海洋酸性化影響評価: 岡山県日生地先海域と宮城県志津川湾における事例研究, 北海道大学大学院環境科学院修士論文, 87pp, 2022.
- 23) Yara, Y., M. Vogt, M. Fujii, H. Yamano, C. Hauri, M. Steinacher, N. Gruber, and Y. Yamanaka, Ocean acidification limits temperature-induced poleward expansion of coral habitats around Japan, *Biogeosciences*, 9, 4955-4968, doi:10.5194/bg-9-4955-2012 (2012).
- 24) Yara, Y., H. Yamano, M. Steinacher, M. Fujii, M. Vogt, N. Gruber, and Y. Yamanaka, Potential future coral habitats around Japan depend strongly on anthropogenic CO₂ emissions, In: S. Nakano, T. Yahara, and T. Nakashizuka (eds.), *Aquatic Biodiversity Conservation and Ecosystem Services*, 41-56, Springer, Tokyo (2016).
- 25) Fujii, M., S. Takao, T. Yamaka, T. Akamatsu, Y. Fujita, M. Wakita, A. Yamamoto, and T. Ono, Continuous monitoring and future projection of ocean warming, acidification, and deoxygenation on the subarctic coast of Hokkaido, Japan, *Front. Mar. Sci.*, 8, 590020, doi: 10.3389/fmars.2021.590020 (2021).
- 26) 藤井賢彦, 高尾信太郎, 山家拓人, 赤松知音, 藤田大和, 脇田昌英, 山本彬友, 小埜恒夫, 北海道沿岸域における地球温暖化・海洋温暖化・貧酸素化指標の連続モニタリングと将来予測シミュレーション, *月刊海洋*, 53(6), 318-331 (2021).
- 27) Bernardo, L. P. C., 藤井賢彦, 小埜恒夫 (2021): 高解像度海洋生態系モデルを用いた海洋酸性化・貧酸素化複合影響予測, 2021年度水産海洋学会研究発表大会, 長崎, 2021年11月21日, 44.

ワシントン州と米国西海岸における海洋酸性化の科学と政策における最近の進歩

テリー・クリンガー（ワシントン大学）

ライアン・ケリー（ワシントン大学）

キーワード：海洋酸性化、沿岸酸性化、ピュージェット湾、生物学的対応、政策対応

1. はじめに

過去15年間で、海洋酸性化(OA)は科学的な問い(それは、どのくらいの速度で、どこで起こっているのか)から、米国およびその他の地域での政策対応を促すのに十分な科学的合意として進化してきました。ここでは、米国西海岸、特にワシントン州の経験に焦点を当て、過去数年間のOA関連の科学的進歩を紹介します。次に、世界中の沿岸域が直面している主要な政策問題を取り上げ、それについて何ができるか、そのような努力はどのように機能するのかということに関して情報を提供します。そして、日本の参考になるよう、ワシントンおよび西海岸沿いの他の場所での関連する政策プロセスと対応をレビューします。

2. 米国における問題発生と理解に進展

2008年、海洋学者が、季節的な湧昇に関連する米国西海岸に沿った腐食性の酸性化した水塊の発生を確認しました¹⁾。2009年、カキ生産者は、オレゴン州の採苗場で低pH水によりカキ幼生が高い割合で死亡したことを報告しました²⁾。これらの調査結果は、海洋酸性化によってもたらされる脅威をよりよく理解するための行動を促進することとなり、ワシントン州と西海岸において、海洋環境と海洋酸性化に対する生物学的反応に関する研究が優先されるようになりました。

問題の理解がどのように進んだか、そして理解のギャップが残っているかを判断するために、2012年と2021年にワシントンに存在する情報を調査しました。2012年に環境モニタリングプログラムが確立され、生物学的反応が説明されました。限定的な種について実験室での試験が行われ、海洋酸性化に起因する幼生の死亡率を減らすためにカキの養殖法が改善されました。他の側面、例えば、海洋酸性化の予測モデル、生態学的影響、および再生活動などによる適応策の実施については比較的研究されていませんでした。2021年までに、環境モニタリングが拡充され、海洋酸性化の予測モデルが開発され、生物学的および生態学的応答の研究が進みました。一方、再生活動の実践による海洋酸性化への適応と、炭素および栄養塩管理による海洋酸性化の緩和に関する研究の進展は中程度でした。

3. モニタリング、モデリング、および生物学的反応

次に、モニタリング、モデリング、および生物学的反応に関する最近の研究のいくつかの代表的な例を紹介します。たとえば、ワシントン州環境局の新しい研究によると、ピュージェット湾のアラゴナイト飽和度(Ω :オメガ)と二酸化炭素分圧(pCO_2)は季節や場所によって異なり、 pCO_2 値が最も高い11月のピュージェット湾全体で Ω の値が非常に低くなっています³⁾。ピュージェット湾とワシントンの外海岸の予報モデルは、太平洋岸北西部とピュージェット湾の循環と水の特異性(海洋酸性化条件を含む)について、3日間予報を毎日表示できるようになりました。これらの予報はオンラインで無料で入手でき⁴⁾、貝類養殖者などが腐食状態の警告として使用しています。

一連の新しい研究により、以前は研究されていなかった、または十分に研究されていなかった種間の生物学的反応が解明されました。環境DNA(eDNA)を使用した新しい研究により、長く海洋酸性化条件にさらされることにより、植物プランクトンの渦鞭毛藻の多様性を高め、珪藻の多様性を減らし、食物網や有害藻類の異常発生に影響を与える可能性があることが示唆されています⁵⁾。ピュージェット湾でのプテロポッド(石灰化した動物プランクトン)の最近の研究では、現在の海洋酸性化状態がそれらの殻の深刻な溶解を引き起こす可能性があることを明確に示しています⁶⁾。興味深いことに、他の動物プランクトン種、特にカイアシ類は、ピュージェット湾の低pHの水域で豊富に存続することがわかっており⁷⁾、海洋酸性化条件に対するある程度の耐性を持っているようです。最近の実験室における研究では、ピュージェット湾の重要な飼料魚種であるニシンの胚は、熱波条件にさらされた場合でも海洋酸性化条件に耐えるのに十分な生理学的可塑性を持っていることが明らかになっています⁸⁾。しかし、ギンザケは、海洋酸性化条件下で捕食者を検出する能力を低下させる行動障害を被ることが示されています⁹⁾。

全体として、蓄積された科学的証拠により、海洋酸性化条件により、高いレベルの生物学的変動性(種、生活史や生息地にわたって)が起こることが示唆され

ています。この変動性により、生態系の生物群とそれらが提供する生態系サービスに対しての影響は不確実性をもたらします。

4. 政策への展開

海洋酸性化の科学とその海産種への影響が明らかになるにつれて、政策対応はより曖昧になっています。大まかに言えば、2009年から2016年にかけて、海洋酸性化に焦点を当てた政策措置が、米国のさまざまな沿岸域、特にカリフォルニア、オレゴン、ワシントンの西海岸沿いの州で実施されました。注目すべきこととして、海洋酸性化の研究と監視に関する連邦法(2009)¹⁰⁾、ワシントンの海洋酸性化に関するブルーリボン委員会(2012)¹¹⁾、および西海岸海洋酸性化/低酸素パネル(2013-2016)¹²⁾が挙げられます。これらの努力の最終的な成果は、主要な海洋酸性化問題に関する多くの科学的合意がなされたことであり、主に研究とモニタリングを支援するための資金供給を行った政策が実施されたことであります¹³⁾。

そして、沿岸域へのCO₂やその他の負荷を削減するために適用可能な政策手段を評価しました。この分析は米国内の州に焦点を当てていますが、政府が海洋酸性化に対して行動するのに十分な情報を持ち、さまざまな省庁の資源・権限を短期、長期施策を織り交せて問題解決を図ろうとするならば、日本やその他の国にも適用できるものです。

参考文献

- 1) Feely, R.A., et al. *Science*, 320,1490-1492, 2008.
- 2) Barton, A., et al. *Limnology and Oceanography*, DOI: 10.4319/lo.2012.57.3.0698, 2012.
- 3) Gonski, S.F., et al., *Coastal Management*, 49, 487-509, 2021.
- 4) URL: faculty.washington.edu/pmacce/LO/LiveOcean.html.
- 5) Gallego, R., et al. *Proc. R. Soc. B*, 287: 20202424, 2021.
- 6) Bednarsek, N., et al., *Sci Total Environment*: DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.142689, 2020.
- 7) Keil, K.E., et al., *Front. Mar. Sci.* 8:613778. DOI: 10.3389/fmars.2021.613778, 2021.
- 8) Murray, C.M. and Klinger, T., *J Exp Biol*. DOI: <https://doi.org/10.1242/jeb.243501>, 2022.
- 9) Williams, C.R., et al., *Global Change Biology*, <https://doi.org/10.1111/gcb.14532>, 2019.
- 10) Federal Ocean Acidification Research and Monitoring ("FOARAM") Act, 33 U.S.C. §§ 3701-08 (2009) (authorizing funding, developing interagency plan on ocean

acidification, and establishing an acidification program within the National Oceanographic and Atmospheric Administration).

11) See Washington State Blue Ribbon Panel on Ocean Acidification, *Ocean Acidification: From Knowledge to Action* (2012), <https://fortress.wa.gov/ecy/publications/documents/1201015.pdf>.

12) Chan, F. et al., *The West Coast Ocean Acidification and Hypoxia Science Panel: Major Findings, Recommendations, and Actions* (2016), <http://westcoastcoah.org/wp-content/uploads/2016/04/OAH-Panel-Key-Findings-Recommendations-and-Actions-4.4.16-FINAL.pdf>

13) Kelly, Ryan P. "Ocean acidification policy: applying the lessons of Washington to California and beyond." *Washington Journal of Environmental Law and Policy* 7 (2017): 1.

Recent advances in ocean acidification science and policy
in Washington state and along the US West Coast

Terrie Klinger (University of Washington)
Ryan Kelly (University of Washington)

Key words:

ocean acidification, coastal acidification, Puget Sound, biological response, policy response

Over the past 15 years, ocean acidification (OA) has evolved from a scientific question — is it happening, at what rate, and where? — into a scientific consensus sufficient to support a policy response in the United States and elsewhere. Here, we provide a survey of OA-related scientific advances from the past several years, focusing on the experience of the US west coast, and Washington state in particular. We then move into the key policy questions facing coastal jurisdictions worldwide: given the information in hand, what can we do about it, and how might such an effort work? We review the relevant policy processes and responses in Washington and elsewhere along the west coast, with the goal of providing a useful set of experiences likely to be relevant to Japan.

In 2008, oceanographers described the occurrence of corrosive or acidified waters along the U.S. West Coast associated with seasonal upwelling¹. In 2009, oyster growers reported high rates of mortality among larval oysters in a hatchery in Oregon associated with low pH waters². These findings spurred action in Washington state and along the west coast to better understand the threats posed by OA. Research concerning oceanographic conditions and biological responses to OA were prioritized.

To determine how our understanding of the problem has advanced, and what gaps in our understanding remain, we surveyed the state of knowledge that existed in Washington in 2012 and in 2021. In 2012, environmental monitoring programs had been established, biological responses had been described for a limited number of species tested in laboratory settings, and oyster aquaculture practices had been modified to reduce larval mortalities associated with OA. Other aspects, for example forecast modeling of OA, ecological consequences of OA, and human adaptation to OA through activities such as restoration were relatively unstudied. By 2021, environmental monitoring had been expanded, forecast modeling of OA had been developed, and the study of biological and ecological responses had grown. Advances in adaptation through restoration practices and mitigation of OA through carbon and nutrient pollution management were moderate in Washington state in 2021.

Here we offer several representative examples of recent research with respect to monitoring, modeling, and biological response. For instance, new work by the Washington State Department of Ecology shows that aragonite saturation state (ω) and $p\text{CO}_2$ in Puget Sound vary by season and location, with critically low values of ω occurring throughout Puget Sound in November, when $p\text{CO}_2$ values are highest³. Forecast models for Puget Sound and Washington's outer coast now can show daily 3-day forecasts of Pacific Northwest and Puget Sound circulation and water properties, including OA conditions. These forecasts are freely available online⁴ and are used by shellfish growers and others to warn of corrosive conditions.

A suite of new studies has elucidated biological response among species that were formerly unstudied or understudied. Among phytoplankton, new work using environmental DNA (eDNA) suggests that over time, OA conditions could increase diversity among dinoflagellates and reduce diversity among diatoms, with consequences for food webs and the incidence of harmful algal blooms⁵. Recent observations of pteropods—calcified zooplankton—from Puget Sound clearly show that current-day OA conditions can cause severe dissolution of their shells⁶. Interestingly, other zooplankton species, especially copepods, have been found to persist in abundance in waters of low pH in Puget Sound⁷, suggesting a degree of tolerance to OA conditions. New laboratory studies reveal that embryos of Pacific herring—an important forage- fish species in Puget Sound—possess sufficient physiological plasticity to tolerate OA conditions even when exposed to heatwave conditions⁸. Coho salmon, however, have been shown to suffer behavioral impairment under OA conditions that reduce their ability to detect predators⁹.

Overall, the accumulated scientific evidence suggests that high levels of variability in biological response to OA conditions exist across species, life stages, and habitats. This variability creates uncertainty with respect to effects on ecological communities and the ecosystem services they provide.

As the science of OA and its effects on marine species has become clearer, the policy response has been more equivocal. In broad terms, the years 2009-2016 saw OA-focused policy measures arise in various jurisdictions in the United States, particularly in the states along the west coast – California, Oregon, and Washington. Highlights included federal legislation for OA research and monitoring (2009)¹⁰, Washington's Blue Ribbon Panel on Ocean Acidification (2012)¹¹, and the West-Coast Ocean Acidification / Hypoxia Panel (2013-2016)¹². The net result of these efforts was a substantial degree of scientific consensus on key OA issues, with actual political responses mainly being money in support of research and monitoring¹³.

Here, we evaluate policy avenues available for jurisdictions to reduce CO₂ and other inputs into the coastal oceans. This analysis centers on states within the United States, but applies generally to Japan and elsewhere: where there is sufficient information for governments to act on OA, policy solutions are likely to be a mix of short- and long-term actions using a variety of sources of legal authority.

References

¹Feely, R.A., et al. *Science*, 320,1490-1492, 2008.

²Barton, A., et al. *Limnology and Oceanography*, DOI: 10.4319/lo.2012.57.3.0698, 2012.

³Gonski, S.F., et al., *Coastal Management*, 49, 487-509, 2021.

⁴URL: faculty.washington.edu/pmacc/LO/LiveOcean.html.

⁵Gallego, R., et al. *Proc. R. Soc. B*, 287: 20202424, 2021.

⁶Bednarsek, N., et al., *Sci Total Environment*: DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.142689, 2020.

⁷Keil, K.E., et al., *Front. Mar. Sci.* 8:613778. DOI: 10.3389/fmars.2021.613778, 2021.

⁸Murray, C.M. and Klinger, T., *J Exp Biol*. DOI: <https://doi.org/10.1242/jeb.243501>, 2022.

⁹Williams, C.R., et al., *Global Change Biology*, <https://doi.org/10.1111/gcb.14532>, 2019.

¹⁰Federal Ocean Acidification Research and Monitoring ("FOARAM") Act, 33 U.S.C. §§ 3701–08 (2009) (authorizing funding, developing interagency plan on ocean acidification, and establishing an acidification program within the National Oceanographic and Atmospheric Administration).

¹¹See Washington State Blue Ribbon Panel on Ocean Acidification, *Ocean Acidification: From Knowledge to Action* (2012), <https://fortress.wa.gov/ecy/publications/documents/1201015.pdf>.

¹²Chan, F. et al., *The West Coast Ocean Acidification and Hypoxia Science Panel: Major Findings, Recommendations, and Actions* (2016), <http://westcoastoah.org/wp-content/uploads/2016/04/OAH-Panel-Key-Findings-Recommendations-and-Actions-4.4.16-FINAL.pdf>

¹³Kelly, Ryan P. "Ocean acidification policy: applying the lessons of Washington to California and beyond." *Washington Journal of Environmental Law and Policy* 7 (2017): 1.

我が国沿岸域における海洋酸性化・貧酸素化の現状評価と対策の考え方

小笠 恒夫（水産研究・教育機構 水産資源研究所）

キーワード：海洋酸性化・貧酸素化・緩和策・適応策

1. はじめに

地球温暖化に伴う海水温の上昇はすでに世界の海の生態系や水産資源に様々な影響を与えているが、近年はこの水温上昇以外に「海洋酸性化」と「貧酸素化」という二つの現象についても懸念が広まっている。「海洋酸性化」とは、大気中のCO₂濃度の上昇に伴って海水中に溶解したCO₂量も増加することで、海水のpHが低下する現象である。pHそれ自体が魚類の行動等に影響を与えるだけでなく、pHの低下によって貝類・ウニ類・甲殻類等の炭酸カルシウム殻が溶けやすくなることで、これらの生物にも影響が現れることが飼育実験で確かめられている。一方「貧酸素化」は、海が温暖化する際に表面から温められることで海の成層構造が強化され、鉛直循環が妨げられる結果として海洋混合層からそれ以深への酸素の輸送が妨げられ、混合層以深の酸素濃度が低下する現象である。

沿岸域では、上記のような「温暖化に伴う貧酸素化」ではなく、水質の悪化や内湾における海水循環の低下等によって引き起こされる貧酸素化が古くから問題になっている。つまり沿岸域においてはこうした古くからの要因による貧酸素化と、温暖化による貧酸素化が入り混じった状態で進行するということになる。実は「酸性化」についても、「大気中のCO₂増加に伴う酸性化」だけでなく、「水質の悪化や海水循環の低下に伴う酸性化」も沿岸域では古くから存在していたことが、近年の研究により明らかになってきた。つまり沿岸域では酸性化についても、「水質の悪化」と「大気中のCO₂増加」の二つの要因による酸性化が入り混じって進行しているということになる。これらのことは沿岸域におけるpHや溶存酸素の変動に複雑な影響を与える一方で、沿岸域における酸性化と貧酸素化の対策立案において新たな可能性も提供してくれている。

本講演では、日本の縁がニキにおける貧酸素化と酸性化の現状とその対策の間変え方について、これまで得られてきた知見をレビューする。

2. 日本沿岸域におけるpHと溶存酸素濃度の系年変動

海洋酸性化も貧酸素化も、北米西岸など、元々湧昇域であることにより浅い水深帯の酸素濃度やpHが低かった海域で先に影響が顕著に現れており、様々な研

究も先行している。北米における酸性化については本シンポジウムにおいてクリンガー教授が詳細にご紹介いただいているとおりであり、貧酸素化についても、「温暖化に伴う貧酸素化」によって北米西岸の大陸棚の底魚類が斃死する現象が、既に2000年代に報告されている¹⁾。日本の近海域でも同様に酸素濃度が経年的に減少していることが確認されている²⁾が、幸いなことに太平洋西部では、同じ水深帯におけるpHや溶存酸素濃度は東部に比べて相対的に高いため、大陸棚の底魚類に貧酸素による明確な影響は確認されていない。しかし水深300m以深の大陸斜面上では、溶存酸素濃度の経年的な減少にともなって、一部の底魚類の生息下限水深が上昇している可能性が示唆されている³⁾。一方内湾等の浅海域においては、現在においても赤潮等に起因する短期的な酸素欠乏現象が多数報告されている⁴⁾。瀬戸内海のように近年はむしろ貧栄養化が進行しているような海域でも、海底に降り積もった有機物の分解により依然として底層で酸素が消費され、貧酸素現象がなかなか治らないような海域もある⁵⁾。注目すべきことに、このような貧酸素現象が生じているような海域で、pHの経年的な減少速度が大きくなる傾向があることが、日本沿岸の2000点以上のpH時系列データを解析した結果から明らかになっている⁶⁾。逆に経年的に水質が改善されているような海域では、pHの低下速度が小さくなる傾向があり、場合によっては逆にpHが増加しているような海域もあることがわかっている。このことは、日本沿岸域全体の傾向としては「大気中のCO₂増加に起因する酸性化」が進行しているものの、その進行速度は並行して起きている「水質の悪化に起因する酸性化」の程度によって、個々の海域毎に大きく異なること、そして後者が改善されているような海域では、その効果で「大気中のCO₂増加に起因する酸性化」を相殺することすら可能になっていることを示している。

3. 現在の沿岸域における短期的なpHの変動特性

NPO 法人里海づくり研究会と一般社団法人サステイナビリティセンターは、日本財団の協力のもと、宮城県志津川湾と岡山県日生海域において、カキ養殖場を含む各海域内のpHモニタリングを実施している。

2021年6月からは、陸水が沿岸pHに及ぼす影響を把握するために、特に陸水の影響を受けやすい広島県廿日市市の地先においてもpHのモニタリングを開始した。これらの観測は、研究機関ではなく、漁業者と連携した民間組織が自主的に自分達の地先海域の酸性化環境の把握を試みた、日本では初の事例であり、非常に意義深いものである。

これらの観測の結果から、各調査海域のpHと、そこから算出されるアラゴナイト飽和度（炭酸カルシウム殻の溶けやすさを表す指標値）は、基本的には年間を通じて、沿岸生物に影響が現れるとされる閾値よりも高い値を維持できていることが判った。しかしその反面、各海域のpHは生物活動によって数日間スケールの短期的な増減を頻繁に繰り返しており、特に夏〜秋の大規模な降水時には、河川由来の有機物や栄養塩によって引き起こされる活発な生物活動によって、大規模なpHとアラゴナイト飽和度の低下が引き起こされることも判明した。このpHの大低下イベント時のアラゴナイト飽和度は、海外で実施された飼育実験でマガキの幼生に酸性化の影響が観測された閾値である1.5⁷を下回っており、現在の日本沿岸域でもごく短期間ながら、生物への影響の有無を確認する必要があるレベルまでpHが低下していることが、観測で初めて確認されたことになる。

4. 日本のマガキに酸性化の影響は現れているか？

前出のプロジェクトでは、志津川湾と日生海域において、pHのモニタリングだけでなく、マガキ浮遊幼生の定期的な採取と幼生貝殻の形態観察も実施している。この結果、環境モニタリングにおいてアラゴナイト飽和度が1.5を下回っていたことが確認された期間を含め、2021年の全期間において、マガキ浮遊幼生からは何の形態異常も検出されなかった。

これまでの日本沿岸域の酸性化研究においてはpHのモニタリングだけが先行しており、同じ海域で実際に貝類等の炭酸殻生物を採取し、生物への影響の有無を確認したのはこのプロジェクトが国内初である。この結果、少なくとも現時点では沿岸生物に明確な酸性化影響が現れていないことを実データに基づいて確言できるようになったことは、本プロジェクトの大きな成果であると評価できる。一方科学的には、少なくとも海外での飼育実験の結果に基づく限り、短期的にせよ生物に影響が現れる可能性のあるレベルまで海水のpHが低下しているにも関わらず、実海域の生物にはなんら影響が表れていないことの理由を検討する必要があることも事実である。現在プロジェクトメン

バーの中で議論されている可能性としては、

- ・海外と国内ではマガキの生息海域の水温や塩分範囲がだいぶ異なっており、日本の水温・塩分環境下では、マガキがより強い酸性化耐性を持っている
- ・飼育実験化では幼生が酸性化海水から逃れることができないが、実海域中ではマガキ幼生は鉛直移動によって極端な低塩分環境から能動的に逃れることが知られており、この機構によって同時に低pH海水からも逃れている

等の機構が考えられている。今後当該海域においてさらに詳細な観測を行い、これらの機構の効果や、この機構自体が将来気候下ではどのように変化するかを検討を行うことで、さらに現実的な酸性化影響の将来予測を行うことができるようになると期待している。

5. 将来の酸性化予測と、影響回避のために我々ができること

これまで述べてきた様に、現在の日本沿岸域では、短期的には（海外の飼育実験結果に基けば）生物に影響が現れる可能性のあるレベルまで海水のpHが低下することがあるものの、少なくとも現時点では、沿岸域の生物に明確な酸性化の影響は表れていない。これは一つの安心情報ではあるが、しかし前出の日本財団プロジェクトでは数値モデルを用いた沿岸域のpHとアラゴナイト飽和度の将来予測も行っており、その結果は、このまま世界が何のCO₂削減対策も講じなかった場合（RCP8.5シナリオ）、2100年時点の日本沿岸域のpHは現在よりも大幅に低下し、その結果志津川湾では、マガキ産卵期間の後半に、アラゴナイト飽和度が長期にわたって1.5を下回るようになる事を示している。このような未来を回避するためにも、世界中が連帯してCO₂削減の努力を続けていくことが何よりも求められる。

また先に述べた様に、日本沿岸域全体の傾向としては、海水のpHは外洋と同じ速度で減少しつつあるが、水質の経年変化によっても沿岸域のpHは大きく変動し、その結果経年的に水質や海水循環が改善されている様な海域では、その効果によって「大気中のCO₂増加に起因する酸性化」がほぼ相殺され、pHが経年的にほとんど変化しない、あるいはむしろpHが増加している様な海域も存在している。このことは、仮に世界レベルでのCO₂削減の達成に時間を要してしまった場合でも、もう一つのpH変動要因である水質や海水循環の方を改善していくことによって、個々の海域のpHの低下速度を遅らせることが出来る可能性を示唆している。特に現在の沿岸域において特にpHの低下に寄与

しているのは出水時に供給される有機物粒子や栄養塩に起因した活発な生物活動だが、河口域に藻場を造成することで、出水時の河川からの急激な栄養塩供給を緩和し、湾内の水質悪化を防げることが過去の研究でも明らかにされている⁹⁾。最初に述べた様に、沿岸域において貧酸素を引き起こす機構と pH の低下を引き起こす機構はほぼ重なっているため、これまで貧酸素対策として開発されてきた手法の多くが、実は短期的な pH 低下の抑制策としても機能することが期待できる。今後は各海域における酸性化の影響を評価していくだけでなく、今述べた様な既存の貧酸素対策技術を酸性化抑制技術として転用していくことで、沿岸域における酸性化影響の発言を遅延、あるいは回避できる可能性についても検討していく事が重要である。

参考文献

- 1) Grantham, B. A, F. Chan, K. J. Nielsen, D. S. Fox, J. A. Barth, J. A. Huyer, A. Lubchenco, B. A. Menge, Upwelling-driven nearshore hypoxia signals ecosystem and oceanographic changes in the northeast Pacific, *Nature*, 429, 749-753 (2004). doi: 10.1038/nature02605
- 2) Ono, T., Long-term trends of oxygen concentration in the waters in bank and shelves of the southern Japan Sea, *J. Oceanogr.*, 77, 659-684 (2021), doi: 10.1007/s10872-021-00599-1
- 3) 小笠恒夫, 北川大二, 伊藤正木, 服部努, 成松庸二, 東北-北海道沖の大陸棚斜面における溶存酸素量の減少と底魚類の分布に対する影響, *東北底魚研究* 31, 93-98(2011).
- 4) Laffoley, D and J. M. Baxter (eds), *Ocean deoxygenation: everyone's problem. Causes, impacts, consequences and solutions*, Gland, Switzerland: IUCN, 580pp (2019). doi: 10.2305/IUCN.CH.2019.13.en
- 5) Yamamoto, T., K. Orimoto, S. Asaoka, H. Yamamoto and S.-I. Onodera, A conflict between the legacy of eutrophication and cultural oligotrophication in Hiroshima Bay, *Oceans*, 2, 546-565 (2021) doi:10.3390/oceans2030031
- 6) Ishizu, M., Y. Miyazawa, T. Tsunoda and T. Ono, Long-term trends in pH in Japanese coastal seawater, *Biogeosci.*, 16, 4747-4763 (2019) doi:10.5194/bg-16-474-2019
- 7) Waldbusser, G. G., B. Hales, C. J. Langdon, B. A. Haley, P. Schrader, E. L. Brunner, M. W. Gray, C. A. Miller and I. Gimenez, Saturation-state sensitivity of marine bivalve larvae to ocean acidification, *Nat. Clim. Change*, 5, 273-280 (2015). doi: 10.1038/NCLIMATE2479

8) 環境総合推進費 S-13 「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発」 終了研究成果報告書. 23pp.

https://www.erca.go.jp/suishinhi/seika/pdf/seika_1_r01/s-13_2.pdf

MEMO

A series of horizontal dashed lines for writing.



アメリカ西海岸 ピュージェット湾



岡山県備前市日生町



宮城県南三陸町志津川湾



広島県廿日市市