

令和 5 年度
海洋酸性化適応プロジェクト
報告書

2024 年 5 月

NPO 法人 里海づくり研究会議

目 次

I. 背景および目的	5
1 背景.....	5
2 本プロジェクトの目的.....	7
3 本プロジェクトのこれまでの成果.....	8
II. 調査海域	20
III. 調査海域ごとの調査方法および結果	22
A 岡山県備前市日生町地先における海洋観測.....	22
A.1. 定点連続観測.....	22
A.2. 定点定期観測および採水分析.....	32
B 宮城県南三陸町志津川湾における海洋観測.....	41
B.1. 定点連続観測.....	41
B.2. 定点定期観測および採水分析.....	48
C 広島県廿日市市地先における海洋観測.....	60
C.1 定点連続観測.....	60
C.2 定点定期観測および採水分析.....	64
C.3 まとめと考察.....	76
D 豊後水道における海洋観測.....	78

D.1 定点連続観測	78
E. 岡山県笠岡市北木島地先における海洋観測	89
F. 福井県小浜湾における海洋観測	95
G. 三重県鳥羽市生浦湾および英虞湾における海洋観測	105
I. 大分県姫島CO ₂ 噴出域(CO ₂ シープ)	114
IV. 海洋観測の結果に基づく総合的な評価および考察	118
V. マガキ浮遊幼生の観測結果と形態異常に関する検討	130
1. マガキ浮遊幼生の観測	130
2. カキ類浮遊幼生に対する海洋酸性化の影響評価	140
VI. 数値モデリングによる影響評価	151
1. 数値モデリングによる河川水が酸性化の進行に及ぼす影響評価	151
1.1 富栄養海域の東京湾と貧栄養海域の比較検証	151
1.2 瀬戸内海豊後水道海域における海洋酸性化の現状と将来予測の検討	156
2. 海洋酸性化による国内水産業への経済的損失の検証	173
VII. 世界における酸性化に対する政策・適応策の分析	164
1. 背景	164
1.1. OA 国際的な海洋酸性化政策の枠組み	164
1.2. OA による影響を緩和するための適応	165

1.3. OA 認識と科学的コミュニケーション	166
2. 目的	168
3. 方法	168
4. 研究成果	169
4.1. 世界における最新の OA 研究 の影響	169
4.2. グローバル OA ガバナンスの概要-トップダウンの視点から	169
4.3. 世界の OA 適応戦略の事例研究-ボトムアップの手法	200
4.4. OA に対する世界の貝養殖業者の視点	205
4.5 海洋ベースの二酸化炭素除去技術	213
5. 考察	216
5.1. OA 政策の立案	216
5.2. OA 適応戦略	218
5.3. OA 意識	221
6. 補足資料	224
VII 要約	246
参考文献	256

I. 背景および目的

1. 背景

1.1. 気候変動をもたらす脅威

気象庁によれば、温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)の解析による2022年の世界の二酸化炭素の平均濃度は、前年と比べて2.2ppm増えて417.9ppmとなっており、工業化以前の1750年の平均的な値とされる278ppmと比べて50%増加しているという(気象庁, 2024)。世界気象機関(WMO: World Meteorological Organization)が2021年8月31日、報告書を発表し、1970~2019年の50年間で気候変動や異常気象、または水の危険に関連する災害などを背景に、干ばつや洪水といった気象災害が5倍に増えたと警告した。この間に報告された1万1000件を超える気象災害で200万人以上が死亡し、経済的な損失は3兆6400億ドル(約400兆円)にのぼったとしている。経済的損失は1970年代から2010年代にかけて7倍に増加、気象災害に起因し、被害要因は増加している。ペッテリ・ターラス WMO 事務局長は、「気候変動の結果として、天候、気候、水問題の極端な事象が増加、世界の多くの地域でより頻繁かつ深刻化する」と指摘した(防災新聞, 2022)。

2019年の夏、Elsevier社よりPredicting Future Ocean(Cisneros-Montemayor, A. M., W. W. L. Cheng and Y. Ota (Eds.), (2019) という本が出版された。これは、2011~2019年まで9年間を費やし、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 太田義孝教授が、その中から16章を翻訳し、2021年8月下旬に「海洋の未来」(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))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、海中の溶存酸素(DO)濃度の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者の動向は、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。石炭の燃焼や金工業に起因するメチル水銀汚染の問題にも警鐘を鳴らす。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年に日本財団ネクスプログラムが発足され、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。

1.2. 相次ぐ海の異変

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（不漁問題に関する検討会，2021）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。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ているが，その他にも様々な異常が散見される（田中，2021）。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る。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。底びき網漁師によれば2018年頃からコガイ(ホトギスガイ群落)の分布域が拡大しており，潜水器漁師によればホトギスガイが異常に足糸を伸ばし絡み合って広範囲に絨毯を敷き詰めたように海底を覆い，その下でナミガイ等の二枚貝類が死んでいるという。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るが，瀬戸内海等の閉鎖水域では，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(Yamamoto *et al.*, 2021)などの原因が加わり，さらに複雑な様相を呈する。

もうひとつのCO₂問題“海洋酸性化”は，今後の大きな脅威である。地球温暖化と海洋酸性化は，いずれも人為起源CO₂の過剰排出が主たる原因である全球的な現象として捉えられる(藤井，芳村，小埜，2021)。海水中のCO₂濃度の増加は炭酸イオン(CO₃²⁻)濃度の減少をもたらすので，炭酸イオンを利用して炭酸カルシウムや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，これには産業上重要な魚介類も多く含まれる。貝類は幼生時に数日程度の短い期間でも高CO₂環境に晒されると，死亡率や奇形率が增加することが室内実験によって示されており(Onitsuka *et al.*, 2018)，海洋酸性化に脆弱であると考えられる。石灰化生物の中には，すでに地球温暖化による海水温上昇の影響を深刻に受けているものが存在する。つまりこれらの生物は，地球温暖化と海洋酸性化という，人為起源がもたらす“双子の現象”の影響をダブルで受けることになる。海洋酸性化と海水温上昇

が日本近海のサンゴ礁に及ぼし得る観光・レクリエーションに関する経済的損失の今世紀末までの積算値は 6 兆 7,000 億円程度と見積もられ、海洋酸性化が日本近海の海面漁業・養殖業に及ぼす経済損失の積算値は、海面漁業で 3,000 億円～1 兆 2,000 億円程度、養殖業で 2,000～8,000 億円程度と見積もられている(藤井賢彦,2020)。

2. 本プロジェクトの目的

アメリカ西海岸のピュージェット湾では、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が 2005 年から起きている(Feely *et al.*,2008)。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おり、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(Onitsuka *et al.*,2018)。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十分とはいえない。そこで、2020 年度にスタートしたのが「日本財団 海洋酸性化適応プロジェクト」である。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。このプロジェクトの特徴は、我が国で初めて漁業への影響に軸足を置き、最もリスクを負うであろう貝類養殖、特にカキ養殖に焦点を絞ってスタートしたことである。そして、二つ目の特徴は、漁業現場からの視点を重視し、地元漁協、漁業団体、地域の法人組織、民間企業が連携し、北海道大学、水産研究・教育機構、JAMSTEC 等の国内研究機関など、20 を超える多様な主体がネットワークを形成してプロジェクトを駆動している点である。前述のネクサスプログラムとも連携し、海洋酸性化に関する先行研究に高い実績を持つワシントン大学の協力を得ながら取り組んでいる。初動体制でのモデル海域としては、我が国を代表するカキ養殖産地から、岡山県備前市日生町海域、宮城県南三陸町志津川湾を選定した。この両者は地理的条件及び気候条件等がまったく異なり、それぞれの海域特性を把握するため、淡水供給源、藻場または海藻養殖場、カキ種場(カキ採苗場)、沖合の4カ所に観測点を設けた。これが本プロジェクトの三つ目の特徴である。目的は、効率的な海洋酸性化モニタリング手法を構築し、分野横断的ネットワーク(科学・政策・利害関係者)の基礎を確立するとともに、適応策に関する世界的な知見を収集整理して検証し、日本沿岸における効果的な適応策と実践体制の提案である。具体的目指すべき成果として、次の三つの目標を掲げた。

① 状況把握とモニタリング

:我が国沿岸における海洋酸性化の進行状況の把握、pH・アルカリ度等の観測方法の簡素化による汎用性のある海洋酸性化モニタリング技術の開発、地域の特性に応じた持続可能なモニタリング実施体制の提案など

② 適応策の提案

:海洋酸性化に関する事例と適応策に関する世界的なリサーチによる知見の収集整理

と海洋酸性化の現状と対策に関する分析, 海洋酸性化進行度に応じた評価レベルの構築とレベルに応じた適応策の提案, 観測と数値モデリングの併用によるカキ養殖にとって危険水準に達する年代の推定と回避するための適応策の提案

③ 海洋酸性化に関するアウトリーチ活動の展開

: 漁業者・漁業団体・漁業界との双方向型アウトリーチ活動、一般国民に対する意識啓発

3. 本プロジェクトにおける令和 4 年度 (2022 年度) までの成果

3.1. 海洋観測から得られた知見

3.1.1. 海洋観測結果の概要

令和 4 年度から、北木島 1 定点、豊後水道 3 定点が加わり、我が国沿岸 7 海域の pH 等の長期的変化を比較検討することができた。これらのうち、酸性化傾向が顕著に現れたのは志津川湾、日生、廿日市であり、pH の大幅な低下はないものの塩分と pH の相関が明らかになったのは豊後水道の佐田岬と佐伯湾、pH の大幅な低下もなく塩分と pH の明確な相関も認められなかったのは北木島と豊後水道の内海であった。 Ω_{arag} が閾値 1.5 を下回ったのは志津川湾、日生、廿日市であった。いずれにおいても塩分と DO の低下が伴い、これは、大気中の CO_2 濃度の増加に伴う海洋酸性化ではなく、淡水の流入とそれに伴う有機物分解に起因する沿岸酸性化であることが解明された。北木島では著しい塩分低下は見られたものの、それに伴う pH 低下は認められず、河口部から遠いことから有機物の影響を受けなかったものと推測された。内海では黒潮の影響が強く pH の低下が観測されなかったが、また、これにより少なくとも豊後水道沖の太平洋では海洋酸性化の著しい進行はないものと考えられた。

3.1.2. 我が国沿岸における酸性化の実態およびカキ養殖への影響

日生における 2020 年 8 月～2022 年 12 月までの約 2 年半の連続観測の結果では、複数回に亘って Ω_{arag} が閾値 1.5 を下回っていた。我が国沿岸の貝類養殖場で Ω_{arag} が閾値 1.5 を大幅に下回った事例が発見されたのは、本プロジェクトが初めてであるが、これまでの調査研究により、我が国沿岸で見られる酸性化は、大気中の CO_2 濃度増加に伴う海洋酸性化ではなく、陸水の流入とそれに伴う有機物分解による沿岸酸性化であることがほぼ明らかになった。しかし、これまでの観測では、異常形態の浮遊幼生は確認されていない。マガキの産卵期以外の時期に Ω_{arag} が閾値 1.5 を下回っても影響が及ぶことはないが、2022 年には産卵期に当たる時期に半月近くも 1.5 を下回っていた。マガキ浮遊幼生は、塩分 20 以下の低塩分水から忌避すると言われている(鬼塚, 投稿中)。大雨が降った翌日 2022 年 7 月 20 日 9 時 30 分前後に、日生の主要なマガキ採苗場所である Stn.H-2 周辺の表層において、北原式プランクトンネット(目合い 50 μm)により任意の 20m ラインを水平に 5 本曳いてマガキ浮遊幼生の採集を試みたが、持ち帰って顕微鏡観察したところ

まったく視認されなかった。また、2022年度は、例年どおり、ラーバ観測や種見調査で8月に入るとアンボ期幼生も順調に増加し、採苗のタイミングは何度も訪れ採苗作業をしたものの、その度に降雨に阻まれて採苗が遅れて8月末まで完遂せず、カキ漁師達が不安を感じた程であった。これらの状況から見ても、マガキ浮遊幼生が低塩分水から忌避することは間違いないと考えられる。今後、気候変動によって広範囲に亘る豪雨やゲリラ豪雨など局地的な極端現象の増大が懸念され、沿岸酸性化は規模的にも期間的にも拡大すると予測される。これにグローバルな大気中のCO₂濃度の増加に伴う海洋酸性化が進行してくれば今後のリスクはさらに大きくなっていく。塩分低下とDO低下が伴う沿岸酸性化のマガキ幼生に対する影響については、引き続きさらなる精査が求められる。

3.1.3. 海洋観測手法の簡素化に関する検討

Ω_{arag} の算定に必須であるアルカリ度については、現時点では連続観測方法が実用化されておらず、観測データは1~2回/月の採水分析によって得られるボトルデータのみである。2020年8月~2022年12月までの約2年半の日生と志津川の8点のデータを総合的に分析したところ、アルカリ度と塩分の間に非常に高い相関があることが分かった。また、日生の2020年度夏季におけるStn.H-2のアルカリ度のデータで異常値ともとれる低い数値が得られたため、陸域からの工場排水など特殊な物質の流入による可能性を確認するとともに、河口部周辺における塩分とアルカリ度の相関を見るため、Stn.H-2への淡水供給源となっている片上湾内に流入する小河川等の河口部8箇所において採水し、塩分とアルカリ度を分析したところ、やはり両者には明らかな相関が確認された。これは、この関係式によってアルカリ度の連続観測データを塩分から算定できることを示している。全アルカリ度の簡易な測定方法など海洋観測手法の汎用化へのアプローチについては、引き続きワシントン大学、オレゴン大学等との協働体制の下に進める必要がある。

3.1.4. 我が国沿岸における沿岸酸性化のメカニズムの解明

志津川における2022年度のトピックスは、7月に大きな災害を引き起こした大豪雨が襲ったことである。この豪雨によってこれまでに見たことのない塩分低下現象が起きた。また、これによってpHは7を切って酸性に達し、 Ω_{arag} に至っては1をはるかに下回る極端に低い数値になった。全期を通じて見ると、2022年度の志津川は前年に比べて降雨が少なく Ω_{arag} も比較的維持されていたが、この7月16日の大豪雨という極端現象によって、降雨の後に何故に Ω_{arag} が低下するのかを考えるうえで多くのヒントを与えてくれた。2022年7月16日の豪雨の際には塩分が5を下回るまで低下したが、pHが下がるまで24時間程度のタイムラグがあった。1日後の17日に、pH低下時には濁度は上がったが、Chlaは上がらなかったこと、pH低下時にはDO飽和度も低下したことが確認できた。そして、低塩イベントの1週間後(7/24頃)にChlaが上昇し、その後にDO飽和度とpHのピークが来た。この現象は、出水時のpH低下は川から来た栄養塩に由来する生物活動でなく、川か

ら来た有機物粒子の分解により生じていることを示しており、この有機物粒子の分解で生じた栄養塩が、1週間後に流下先で植物プランクトンを増殖させ pH を増加させている、ということを示している。物質収支は±0になるが、この間に pH と Ω_{arag} が大きく下がるのが問題である。これまでの2年半の間にも同じ事が繰り返し起こっていると考えられるが、まず栄養塩が来て Chla が上昇することもある可能性もあるので、これまでのデータを再整理し、このメカニズムを精査する必要がある。

鉛直方向にも様々なことが起きており、志津川で4月17日に観測、採水した後、7月16日に豪雨があったが、その後の鉛直プロファイルを見ると、Stn.S-1でもS-3でも出水後に塩分は低下して、水温は鉛直混合が起きて水平方向にも水塊が動き、植物プランクトンの増殖とこれらの沈降による有機物分解も生ずるので、ChlaもDOも表層、底層で複雑な様相を呈する。特に廿日市のような浅い場所では底層で生じた現象が鉛直混合によって表層のpHを悪化させるので、浅い場所でも底層の時系列データを取得して底層で生じている現象を把握しなければならない。

志津川と日生のデータに、宮古、柏崎、廿日市の3点のデータを加えて解析してみると、各点ともpHは冬に高く、夏から秋にかけて低下するが、三陸と柏崎では年間のpHの変動幅が比較的小さいのに対して、瀬戸内海の2点のpHの振幅は大きい。また、アラゴナイト飽和度は、三陸と柏崎では冬から春に低下し、夏から秋に上昇するが、瀬戸内ではむしろ夏から秋の方が低くなる。そしてこの基本的な季節変動パターンの上に、降雨に伴う短期的なpH・アラゴナイト飽和度の低下イベントが生ずる。この変動の原因は降雨であるが、DOとの関係が非常に深い。宮古と廿日市では両者はきれいに乗ってくるが、日生と柏崎はエスチュアリー循環によって異なった勾配になっている。特に日生Stn.H-2と志津川Stn.S-3は底層の影響を受けていることが浮き彫りになり、やはり底層の時系列データが必要であることが再認識された。志津川・日生・廿日市では、この短期的なpH低下イベント時に、アラゴナイト飽和度が一時的に1.5を下回ることがあり、主に夏の後半から秋にかけて起こっている。志津川ではマガキの主要な採苗時期は5~7月であるため、アラゴナイト飽和度が1.5を下回ることがないが、日生では近年は盆種と呼ばれるように8月上旬から下旬にかけてが主要な採苗時期になっており、2022年度の採苗が完了したのは8月末で、pH・アラゴナイト飽和度の低下イベントと重なっていた。それでも異常形態のマガキ浮遊幼生は発見されなかったが、気候変動により豪雨等の頻度は大きくなることが予想され、引き続き注視していく必要がある。

現在の沿岸域では、平常時のpHは生物に影響が現れるとされるレベルよりも充分高いが、夏~秋の降雨時に、pHが短期的に危険レベルまで下がることもある。この短期的なpHの低下は、溶存酸素濃度の減少とセットで発生し、出水時に輸送されてきた有機物粒子の分解が原因と推定される。降雨時のpH低下幅を抑制することができれば、とりあえず直近の不安は解消される。降雨時にpH・DOが下がってまた上がるまでの時間スケールは10日間程度なので、各海域のpH・DOの日最低値を算出し、この値の

10 日間のばらつきを標準偏差として算出し、水温、塩分についても同様に日最低値の 10day_SD を計算した。降雨時の塩分低下と DO・pH の短期的な低下にはタイムラグがあり、そのラグの大きさは一定ではない。このため 10day_SD 同士のラグ関をとってもうまくシグナルは出ない。そこで、水温、塩分、DO、pH それぞれの 10day_SD の月平均値を計算し、その間の相関を解析した。東京湾のデータも入れて、6 海域の塩分の短期変動に対する pH 短期変動の感度を比較してみたところ、陸域負荷の大きい東京湾では、塩分の短期変動強度と pH の短期変動強度はどこまでも同じ傾きで正比例した。陸域負荷が中位の瀬戸内海では、塩分の短期変動が小さい時には東京湾と同じ感度で pH の短期変動強度が増大するが、ある規模の塩分の短期変動強度からは、pH の短期変動強度の比例係数が低下する。陸域負荷の小さい三陸・中越では、一定規模以上の塩分の短期変動強度に対する pH の短期変動強度の比例係数はさらに小さくなる。陸域負荷が小さくなると、ある程度以上の出水からは、出水中の栄養塩濃度が薄まり始めるなどの理由であろうか、栄養塩負荷量が比例して増加できなくなる。同じ塩分の短期変動幅に対する pH 短期変動幅の感度は、現在の各海域への栄養塩負荷量(外部負荷量)とほぼ正比例しており、同じ出水量であれば栄養塩負荷量が多いほど同じ塩分の短期変動幅に対する pH 短期変動幅の感度は大きくなる。つまり、同じ量の陸水が海に流れ込んだ場合、栄養塩負荷量が高いほど pH の低下幅が大きくなる。

沿岸酸性化の進行が懸念される一方で、我が国沿岸域は貧栄養化による生産性の著しい低下に悩まされている。沿岸酸性化は栄養塩が多いほど進行するので、栄養塩を減らせば良いという短絡的な解決策に向かう状況にはなく、両者のバランスを勘案して総合的な解決策を導き出さなければならない。そもそも、この横軸に持ってくるべきものは、現時点ではデータとして栄養塩(N)しかないのが、栄養塩を使用せざるを得ないが、栄養塩ではないのかもしれない。沿岸酸性化に対して栄養塩そのものは植物プランクトンを増殖させ、むしろ pH を上昇させる方向に作用する。この横軸に持ってくるべきものは、栄養塩に分解される前の河川内、河口域あるいは沿岸海底に蓄積された有機物そのものであるかもしれない。「これらの有機物が流出して分解過程で CO₂ を発生させ酸性化を進行させる。」というメカニズムと考えれば合点がいく。そうであれば、対策としては栄養塩のコントロール(栄養塩管理)ではなく、有機物のコントロール(有機物管理)であり、物質循環の促進こそが最も効果的な適応策となり、干潟の整備や藻場の再生などの対策がさらに重要な位置付けになってくる。まずは、この横軸の実態の解明を急がねばならない。

3.2. 海洋酸性化に関する漁業者の意識調査

3.2.1. 海洋酸性化に関するヒアリング調査

海洋酸性化に対する認識や、それによる漁業影響等に対する対応のあり方を検討するために、漁業者の意見について、構造化された質問票を元に、ヒアリングもしくは、質問票の送付・回収により意見を聴取した。実施期間は 2020 年 10 月 1 日～2021 年 10 月 8 日

で、対面での個別ヒアリングをもとに実施され 33 件の回答を得た。

養殖・収穫量の決定、カキ養殖・漁業の方法、収穫の時期については、自身、漁業者、組合などの関与実態が高いとともに、本来の関与であると評価されていた。全体を通して、科学者や行政、政府については関与実態が薄く、本来関与すべきと考えられており、特に環境適応については、いずれの主体もより深い関与をすべきと回答されていた。なお、販売価格については、組合以外の関与が薄く、自身や業者、組合、行政の関与があるべきとの回答がなされていた。

意思決定の根拠となっている情報源としては、漁業者、漁協、カキ養殖団体や独学での情報収集がなされている実態が示されるとともに、家族や科学者からの情報も一定数活用されている回答があった。なお、その他の情報源として「他地域の漁業者」という回答があった。意思決定に関与しない理由としては、参加できない、情報が無いという回答が多く、全ての意思決定に関与していると回答した人が 1/3 を超える割合であった。カキ養殖をするための決定方法への満足度は、過半数がやや不満と回答した。カキ養殖・漁業を管理するための決定について、「決定の理由と方法の透明性」が最も重要視され、次に「取り組むべき課題の妥当性」が高い決定要因となっていた。価格についてのデータ収集への参加が最も重要との結果となった。収穫物の大きさや健康度、環境については水温などが重要視されていた。

カキ養殖・漁業に関する管理のために、計画を立てたり、データを収集したり、データを利用したりする活動への参加については、半数以上の人事業計画やデータ収集に参加しており、いずれの項目についても高い重要度が認識されていた。意思決定への影響要因としては、圧倒的に自身の収入への影響が大きかった。

カキ養殖・漁業の意思決定について、自由意見を求めたところ、金銭に関わる部分で参加したい、将来の日生の漁業を存続させるためにしっかり協力していく、皆で協議し様々な意見を取り入れる、意見を言い合える環境を作るべき、様々なチャンスをもっと取り上げていく、時代や環境に適した事業を目指す、など積極的な考え方が一方、上層部で決まったことは覆らない、関わりたくない、特にしたくない、などの消極的な考え方も有り、個人間での温度差が見られた。

海洋酸性化の認識については、「あまり知らない」が半数、「初めて知った」が 1/3 程度で、今後のアウトリーチ活動を強化する必要性が明らかになった。海洋酸性化の漁業への影響については、過半数(23 人)が「わからない」と答え、8 人が影響を受けている、1 人が影響を受けていないと回答した。影響を受けている人の内、5 人が 10 年前くらいから、2 人が 5 年くらい前からの影響を指摘した。懸念されるカキ養殖・漁業への脅威については気候変動、自然災害、病気などが脅威として高く認識されており、同時にその解決の難しさが認識されていた。

しかし、カキ養殖・漁業の安定性を考えた場合の海洋酸性化の脅威については、5 年以上先に脅威と答えた人が 44%で、5 年以内に脅威となると回答した人 34%を若干超えてい

た。海洋酸性化について多少とも知識を得た段階では、海洋酸性化がカキ養殖・漁業に与える影響について、非常に心配、心配を足すと過半数を超え、少し心配も含めると 3/4 を超える人が影響についての不安を持った。海洋酸性化がカキ養殖・漁業に与える影響について、早急な対応策が必要と感じている人は 23%で、海洋酸性化がカキ養殖・漁業に与える影響の検知のために必要なこととして、28 人が現地観測を、22 人が具体的な影響について学ぶことと回答した。海洋酸性化、地球温暖化についての情報源については、独学が最も多く、次いで、漁協、科学者となっていた。特に地球温暖化については独学での情報集が過半数を超えており、興味の高さが示された。

海洋酸性化がカキ養殖・漁業に影響を与えているシナリオについて想像してもらった結果、まずは、現状認識と漁業者の知識向上が大切であるという回答とともに、対応策として、カキ殻を散布する、品種改良、カキ以外の新たな養殖の可能性、陸上養殖への転換、海底の汚泥等を除去、行政や研究機関等と連携し対策を講じる、光合成できる海草・藻類の育成、などのアイデアが提示された。海洋酸性化詳細を知るために相談する先については、漁協やカキ養殖団体に対しては高い信頼と影響力のあることが示され、科学者、地方行政がそれに続いた。

3.2.2. 海洋酸性化に関するアンケート調査

岩手県、宮城県、兵庫県および広島県のカキ養殖漁業者の代表を対象にアンケート調査を実施し、32 名から回答を得た。県別には、回答者数が最も多いのは広島県で 19 人、岩手県と宮城県はともに 5 人、兵庫県が 3 人であった。回答者の年齢層は、50 歳台と 60 歳台がともに 28.1%となった。70 歳以上は、25.0%であり、40 歳台が 18.8%だった。回答者の最終学歴は、「高等学校(水産高等学校を除く)卒業」が最も多く、50.0%を占めた。次に「大学卒業」が 21.9%となり、「水産高等学校卒業」は 18.8%、「中学校卒業」は 6.3%だった。カキ養殖歴を回答した人は 22 人で、平均 37.0 年であった。最も短い人で 20 年、最も長い人で 65 年だった。カキ養殖歴を階層にすると「30 年～39 年」が 25.0%、「40～49 年」と「50 年以上」がともに 15.6%、「20～29 年」が 12.5%となった。県別の回答者の年齢層は、**図表 1-1** のとおりである。岩手県、広島県で「70 歳以上」の人が占める割合が最も高く、それぞれ、40.0%、31.6%となった。最終学歴は、岩手県、宮城県で、「水産高等学校卒業」の割合が最も高い。それに対して、広島県は「高等学校卒業」が 63.2%と最も多く、大学卒業も 31.6%となった。概して、東北 2 県では、若いうちから専門性を深める一方、広島県は、高等学校や大学へ進学し、幅広い教育を受けていた。また、県別のカキ養殖歴の平均は、広島県が 40.3 年、宮城県が 35.3 年、岩手県が 32.5 年と 30 年を超えるのに対し、比較的新しい産地である兵庫県では 27.5 年だった。全回答者 35 人の年齢層の分布は、40 歳台が 20.0%、50 歳台と 60 歳台がともに 25.7%、70 歳以上は、28.6%と、カキ部会の部会長のみの集計に比べ、40 歳台と 70 歳以上の階層の割合がやや高かった。全回答者の最終学歴は、「中学校卒業」が 8.6%、「水産高等学校卒業」が 17.1%、「高等学校(水産高等学校

を除く)卒業」が 51.4%、「大学卒業」が 20.0%だった。カキ養殖歴の平均は、カキ部会の部会長のみの集計の場合は 37.0 年だったが、全回答者では 37.8 年となった。

種ガキの入手方法は、「天然種苗を採苗」が最も多く、43.8%を占め、次に「種ガキを購入」が 28.1%だった。また、「採苗も購入も行う」は、25.0%だった。県別には、岩手県と兵庫県で、全ての回答者が「種ガキを購入」と回答した。一方、宮城県と広島県では「天然種苗を採苗」がそれぞれ 80.0%、52.6%となった。また、「採苗も購入も行う」という回答は、宮城県で 20.0%、広島県で 36.8%であった。つまり、これら 2 県では、概して、採苗した天然種苗のみか、採苗した天然種苗に加え購入した種苗でカキ養殖が行われていた。天然種苗を採苗している人(「天然種苗を採苗」もしくは「採苗も購入も行う」と回答した人)は、広島県の 17 人、宮城県の 5 人の計 22 人だった。広島県、宮城県は種ガキの主要産地でもある。ここ 3 年間で採苗時の変化については、最も多かった回答が「種苗が消えてしまうことが増えた」で 63.6%、次に多かったのが、「種苗を確保し難くなった」で 36.4%だった。「種苗の発生する時期が変わった」は 27.3%、「成長が遅くなった」は 22.7%であった。「奇形の種苗が多くなった」は、0%、「特に変化なし」は、18.2%だった。県別には、広島県で「種苗が消えてしまうことが増えた」は、70.6%に達した。また、「種苗を確保し難くなった」は 47.1%と、およそ半数の回答者が種苗の確保に苦労していることが明らかとなった。宮城県では、「種苗の発生する時期が変わった」、「種苗が消えてしまうことが増えた」に加え、「特に変化はない」がともに 40.0%で、「種苗の発生する量が少なくなった」、「種苗を確保し難くなった」、「成長が遅くなった」という回答は 0%で、採苗が比較的安定していることが窺えた。種ガキの生産地として最も多かったのが宮城県で、それに続き、広島県、岡山県となっている。種苗を購入している人のうち、必要量を入手しているという回答が 88.2%で、県別に見ると、岩手県、宮城県では必要量を入手している人が 100%だったのに対し、広島県は 87.5%、兵庫県は 66.7%だった。

全回答者の種ガキの入手方法の分布は、「天然種苗を採苗」が 42.9%を占め、「種ガキを購入」が 31.4%、「採苗も購入も行う」が 22.9%だった。

養殖施設の規模を県別にみると、いかだの台数、1 台当たりの平均面積を平均したものは、ともに広島県が他県を大きく上回っている。台数、1 台当たりの平均面積をともに回答した回答者 20 人について「いかだ垂下式、簡易垂下式」の養殖面積を算出すると、最大で 83,349 m²、最小で 200 m²となった。回答者 1 人当たりの平均養殖面積は、9,128.1 m²である。県別には、広島県が 13,170.9 m²と最も大きくなっている。「はえ縄」の幹縄の長さを回答した人は 10 人(回答者の 31.3%)で、その長さは平均 510.0m だった。はえ縄の回答者は、岩手県、宮城県、ともに 4 人であり、それぞれの県の回答者の 8 割が利用していた。はえ縄の幹縄の長さは、岩手県が他県を大きく上回った。シングルシードを導入していたのは、回答者全体の 15.6%だった(図表 3-4)。県別には、兵庫県が 66.7%、広島県で 15.8%となった一方、岩手県、宮城県では利用がなかった。

カキの育成期間は、「2 年子を出荷」が 62.5%と最も多く、次に「3 年子を出荷」が 37.5%、

「1年以内に出荷」が31.3%となった(図表3-6)。県別には、「1年以内に出荷」の割合が大きいのが、宮城県(60.0%)、兵庫県(100.0%)であった。一方、「2年子を出荷」が中心なのが、岩手県(80.0%)、広島県(73.7%)だった。

養殖施設の設置場所の特徴として、回答者が最も多く挙げたのは、「水深は20mより浅い」で87.5%となった。「陸地から近い」(78.1%)、「河川が近くにある」(59.4%)がこれに続いた。「水深は20mより浅い」は、どの県でも最上位となった(図表3-9から図表3-12)。岩手県と兵庫県で、「陸地から近い」が100.0%であった。宮城県では、「潮流は速い」が80.0%を占めた。「藻場が近くにある」という回答は、岩手県で高く、60.0%となった。「海藻の養殖場が近くにある」という回答は、宮城県で60.0%と全体(21.9%)より高かった。「養殖施設の設置場所は毎年同じですか」という質問に対し、「いいえ」と回答した人に養殖施設の設置場所の決定方法について尋ねたところ、「くじびきで決める」という回答が最も多く、50.0%を占めた。「漁業者間で話し合って決める」が25.0%、「ローテーションで移動している」、「その他」はともに12.5%となった。「その他」として「区画」が挙げられていた。全回答者の場合、「いかだ垂下式、簡易垂下式」の台数は平均25.6台、1台当たりの平均面積を平均したものは326.1㎡と、カキ部会の部会長のみを集計の場合(27.1台、367.8㎡)より小規模になった。一方、はえ縄の幹縄の長さは平均554.5mとなった。シングルシードの導入状況は、「はい」が14.3%、「いいえ」が77.1%だった。カキの育成期間は、「1年以内に出荷」が31.4%、「2年子を出荷」が65.7%、「3年子を出荷」が42.9%となった。養殖施設の設置場所は、「河川が近くにある」が62.9%、「陸地から近い」が80.0%、「藻場が近くにある」が25.7%、「海藻の養殖場が近くにある」が20.0%、「水深は20mより浅い」が85.7%、「潮流は速い」が48.6%となった。カキ部会の部会長のみを集計の場合と比べ、「河川が近くにある」、「陸地から近い」、「潮流は速い」の3項目の回答割合が高かった。

ここ数年のカキの育成中に起こった変化については、「夏場の水温が高い日が増えた」が81.3%と最も高く、「成長が悪くなった」が56.3%と続いた。その他として、「昔より悪い」(広島県)、「ザラボヤやフジツボ等の付着物が多くなった」(岩手県)、「身入りがよくなった」(岩手県)という意見があった。「夏場の水温が高い日が増えた」の回答した人の割合は、兵庫県(33.3%)を除き、岩手県、宮城県、広島県の3県で80.0%を超えた。「食害の増加」は、岩手県、宮城県で回答がなかった一方、兵庫県、広島県で60.0%を超えた。特に広島県は、「夏場の水温が高い日が増えた」と「食害が増えた」の2項目が高い割合で回答されていた。岩手県は、「漁場に淡水が流入することが増えた」(40.0%)や「台風等の被害が増えた」(20.0%)の回答も比較的高かった。カキの育成中の変化について県別に見ると、広島県を除いて、「貝毒の発生頻度が増えた」が上位になった。「成長が悪くなった」は、広島県で73.7%、兵庫県で66.7%と、カキについての変化として上位の回答となった。「成長が悪くなった」を選んだ人のほうが、選ばなかった人より、「斃死する量が増えた」、「原因不明の斃死が増えた」、「身入りが悪くなった」を高い割合で選んでおり、成長の悪化、斃死増や身入りの悪化という現象も同時に起こっていることが想定される。兵庫県、広島県の回

答者に絞り、「食害の増加」と養殖施設の設置場所の関係をみたところ、養殖施設の設置場所が「陸地から近い」と回答した人の 8 割超が「食害の増加」を選んだ。一方、「陸地から近い」を回答しなかった人が「食害の増加」を選んだ割合は 25.0%だった。

カキの養殖技術において分からないことがあったときには、65.6%の回答者が「漁業者仲間に相談する」を選んだ。それに続き、「水産試験場に相談する」(43.8%)、「水産普及員に相談する」(25.0%)となった。「関連する文献を読む」はほとんど選ばれず、「インターネットを検索する」も広島県を除いて同様であった。より身近な人や機関が、文書よりは対話が重視されていると考えられる。全回答者のカキの育成中の変化でも、「夏場の水温が高い日が増えた」(82.9%)、「成長が悪くなった」(51.4%)、「食害が増えた」(45.7%)、「斃死する量が増えた」(45.7%)が上位となった。回答者の多くが特にここ 5 年程の間にこれらの異常が増えたと認識し、その原因が温暖化に伴う気候変動と海洋環境変化によるものと感じており、様々な工夫で乗り越えようとしている実態が浮き彫りになった。

3.3. 海洋酸性化および沿岸酸性化の世界における現状と対策

大気中の二酸化炭素が海洋に過剰に取り込まれることにより、海水の pH が低下し飽和状態になる現象は、海洋酸性化(OA)として知られている。また、近年の大気中の二酸化炭素の増加に加え、河川からの低アルカリ性淡水の流出、降雨や氷の融解、富栄養化、沿岸湧水など、他の海洋プロセスによって沿岸域の炭酸塩化学変化が起こり、沿岸酸性化(CA)が進む。OA が種レベル、生態系レベル、社会レベルに及ぼす様々な影響については、数多くの研究が発表されている。貝類は、アラゴナイト飽和状態の低下により貝殻形成生物の生存や幼生の発達に悪影響を及ぼすため、OA による影響に対して最も脆弱なグループであると認識されている。例えば、サンゴの生態系では、OA と水温の上昇が壊滅的な影響を与え、逆に海藻のバイオマスの増加が見られるなど、OA が多くの海洋生態系に与える影響はより複雑であることが分かっている。一方、生態系に生息する魚類や無脊椎動物は、捕食者-被食者関係や食物網とともに、結果として変化することになる。社会経済的な OA 影響の典型例として、世界各地で貝類関連商業産業の経済的損失が指摘されている。日本においても、過去 30 年間の pH のマイナス傾向やサンゴ生態系へのダメージなど、同様の現象が見られる。しかし、OA が日本の漁業に与える影響に関する知見はまだ限られており、OA が日本の社会経済に与える影響について言及した研究はほとんどない。そこで、OA とその影響に関する世界的な研究の進展を調査し、日本における将来の OA 影響への適応策を検討するための端緒とした。

3.3.1 OA 知識・研究ギャップ

最近の OA 影響に関する研究は、全体的に単一種、短期間、実験に基づくものが多い。OA が海洋生物に与える生物学的影響を理解するために多くの研究が行われているが、海洋生物は同じ分類群であっても異なる反応を示すことが分かっている。そのため、OA が海洋生物に与える影響を一般化すると、生物種によって偏りが生じる可能性がある。具体

的には、多くの生物種が OA 影響に対してある種のレジリエンスを示している。今後、海洋生物の保護が行われる際には、OA が海洋生物に与える影響について正確な評価が必要である。また、生態系レベルでの OA 影響に関する研究も不足している。OA によって、多様性、生物量、栄養の複雑さ、生態系機能が低下し、生態系が単純化されることが報告されている。さらに、実験室とフィールドでの研究のミスマッチは、実験と海洋観測の間の一貫性に疑問を投げかけるものであった。今後の研究では、長期的、生態系レベル、フィールドワークに基づく研究に重点を置く必要がある。

3.3.2 OA を含む複合的な多因子による影響

OA に加え、水温の上昇、脱酸素、氷の融解、微量金属汚染やプラスチック汚染なども海洋生物に脅威を与えており、OA とともに相乗効果、相加効果、拮抗効果を引き起こす可能性がある。OA と温暖化の累積効果は、サンゴ礁、一次生産者、無脊椎動物などについて広く研究されている。海洋の地域によって、極域では OA の影響が大きく、熱帯域では海洋温暖化と貧酸素化の影響が OA を上回る。微量汚染については、銅汚染が海洋温暖化や OA と相まって、成長速度の低下を通じて大型藻類のライフサイクルの完成を阻害する可能性を指摘した研究がある。同様に、プラスチック汚染は、南極オキアミの発達と生理を阻害することが認識されている。いずれのストレス要因も、別のストレス要因によって閾値が変化する可能性があるため、将来の海洋変動の進展に伴い、OA が及ぼす多因子的影響について慎重に検討されている。

3.3.3 OA 適応策の世界観

将来の OA 影響に対処するために、さまざまな適応策が提案されている。その中で、米国は OA 適応策の実施において先駆的な存在である。適応策を実施する前に、漁業コミュニティの脆弱性分析が行われた。CO₂ 排出を削減することが OA 問題を解決する根源であるにもかかわらず、OA の影響を軽減するための他の多くの戦略が提案されている。州によって異なる漁業コミュニティの脆弱性に応じて、OA に取り組む基本的な方法は、沿岸の富栄養化を解消するなど、海洋生態系の露出を減らすことである。一方、適応戦略は、漁業コミュニティから生まれることもある。漁業コミュニティの適応力を高めるために、漁業者の OA に対する意識を高め、収穫する魚種を多様化させる。教育・アウトリーチ、知識格差への対応、産業界の雇用支援、レジリエンスのための管理、OA 削減など、さまざまな観点から多くの戦略が出されている。しかし、実施することは難しく、法整備や政策立案など、常にサポートが必要である。他の地域や国でも、将来の OA に対する様々な解決策や注意事項が示され、主にローカルな対策に焦点が当てられてきた。例えば、南氷洋の炭酸塩化学の自然変動を考慮し、種固有の反応や潜在的なバイオモニターとしての適性を評価することが提案された。熱帯の島々では、海洋資源への依存を減らすことが、将来の OA 影響に対する重要な解決策の一つと考えられている。一方では、海洋モニタリングに関する環境

技術の革新が、政策立案を通じて急務である。地中海沿岸では、海水温の上昇や夏の海洋熱波に比べ、OA があまり理解されていないが、貝殻の厚みが減少していることが、確かな証拠を見出すこともなく、一部の採貝漁業者によって観察されているにすぎない。オーストラリアでは貝類養殖が盛んであるため、水質モニタリングや水質改善などの技術的支援により、OA や気候変動に対応した養殖が長期的に可能であることが予想される。ノルウェーは、モニタリングや知識の普及啓発に加え、OA に対する認識レベルを高め、OA への適応に関する政府の努力を促すために、ワークショップを通じて地域レベルの政策に取り組んでいる。中国はここ数十年、多くの環境問題に直面しており、これらの問題を解決するための技術革新が進んでいる。海藻養殖は、OA や貧酸素に対する低コストな適応戦略として有効であることが証明され、初期段階の取り組みは OA に対してある程度の回復力を示した。ブラジルでは富栄養化が酸性化の主な原因であることが判明したが、さらなる保護のためには、ブラジルの沿岸域における連続的かつリアルタイムな測定の緊急措置が必要である。英国では、政策立案と連携を統合した適応策をより効果的に実施するため、運用規模での地域主導・学習ベースの管理を推進している。

3.3.4 日本産カキの変遷とそれに伴う OA 脅威の可能性

瀬戸内海では、半世紀以上にわたってマガキの養殖が行われてきた。その生産量は変動するが、長期的な養殖によるカキの成長性能の変化についてはほとんど知られていない。本研究では、将来の環境問題の下でカキ生産を効果的に管理するために、カキの成長性能に及ぼす長期的な環境の影響について調査した。瀬戸内海の日生海域での観測から環境データとカキの生物データを取得し、1990 年と 2015-2021 年の 2 つの期間について比較した。日生では、カキ養殖期間中、水温は大きく変化していないが、2015-2021 年の 7 月には季節的な大雨の影響で塩分濃度が低く、カキの総重量に悪影響を及ぼした。クロロフィル a の濃度は、1990 年には変動していたが、2015-2021 年の期間では安定していた。1985 年以降の瀬戸内海のアマモ場再生により、水質が改善され、カキの成長に必要な餌が豊富に存在するようになり、2015-2021 年の成長率や収穫時のむき身重量が高くなったものと思われる。

2022 年 6 月～11 月にさらなる調査研究を実施した。2022 年夏に採取したカキ浮遊幼生のサンプルに異常形態の幼生が観察されたが、保存方法に問題があったことが発覚したため、これが塩分/pH の急激な低下と関連している可能性があるかは判然とせず、さらなる精査が必要である。また、1990 年と 2022 年のサンプル間で貝殻の特性を比較したところ、2022 年産は 1990 年産に比べ、殻重量と殻厚の有意な減少が見られ、むき身重量と Condition index (CI) は 2022 年産の方が高かった。瀬戸内海の日生ではアマモ場再生によってカキの身の割合が相対的に高くなった可能性が考えられる。

世界的な OA 適応策の進展、海水の pH や日本で養殖されているカキの生物学的特徴の長期的な変化から、海洋における継続的なモニタリングは、今後の OA 変化を追跡し、

海洋生態系とそれに依存する漁村を守るための適応策を適時に適用するための重要な要素となり得る。同時に、OA に対する人々の意識を高め、OA に対するレジリエンスを高めることは、日本を含む多くの国で必要とされている社会的脆弱性の軽減に貢献することができる。

II. 調査海域

本プロジェクトの対象海域として、初年度の2020年度に、マガキ養殖の盛んな沿岸域のうち、それぞれ地理的条件及び気候条件等がまったく異なる2海域、岡山県備前市日生地先海域と宮城県南三陸町志津川湾を選定した(図1)。岡山県と宮城県のマガキ養殖生産額の合計は国内全体のマガキ養殖生産額の約2割を占めている(農林水産省ウェブサイト)。

備前市日生町における2020年9月の観測で閾値($\Omega_{\text{arag}} = 1.5$)を下回る期間が半月も継続していたことが明らかになり、さらにこの Ω_{arag} の低下には淡水の流入が大きく寄与していることが示唆されたため、我が国トップの生産地である広島湾にあつて淡水の影響が特に強い広島県廿日市市沿岸の1観測定点を選定し2021年6月から新たに観測に着手した。

2022年6月からは、ここ数年に亘りカキ殻が薄くなっているとのカキ養殖業者から訴えがあつた笠岡市北木島地先の1定点、瀬戸内海を代表する大きな水道部のひとつで、地形や流況の複雑さから同一海域内に様々な環境特性を有し、カキ養殖、アコヤガイ養殖、魚類養殖など多様な漁場となっている豊後水道3定点が新たに加わり、調査対象海域は5海域となった(図1)。

2023年6月から、新たなカキ養殖海域として福井県小浜湾2定点、三重県鳥羽市地先1定点、アコヤガイ養殖海域として三重県英虞湾を加えられた。英虞湾のアコヤガイ養殖場では、数年来にわたって大量斃死が続いており問題となっている。また、2021年に大分県姫島地先において新たなCO₂シーブが発見され2022年度に予備調査を行ったが、海洋酸性化が進行した未来の沿岸海域の姿を検証できる貴重なフィールドとして本プロジェクトの調査対象に加え、CO₂シーブを中心に水質等の変化に応じた生物相の変化などについて調査した。

さらに、広島市農林水産振興センターの参画により、広島市地先において、連続観測定点は設けないものの1回/月の水質定期観測データが得られることとなり、2023年度の調査対象海域は12海域になった。

調査対象海域ごとに調査結果をとりまとめた。



図 1. 2023 年度 海洋酸性化適応プロジェクト調査対象海域(12 海域)

Ⅲ. 調査海域ごとの調査方法および結果

A. 岡山県備前市日生町地先(以下、日生)における海洋観測

A.1. 定点連続観測

日生海域に、Stn.H-1: 淡水供給源近傍、Stn.H-2: カキ採苗場、Stn.S-3: アマモ場近傍、Stn.4: 沖合(日生海域の標準的な水質)の4定点を設け(図A-1)が、2020~2022年度までこの4定点で観測したが、Stn.H-1 および H-4 については2022年度をもって終了し、2023年度からはStn.H-2およびH-3の2定点で観測を継続した。



図 A-1. 日生における観測定点: Stn.H-2 および H-3

表 A-1. Stn.H-2 および H-3 の位置

地点名	緯度	経度	水深 (C.D.L. m)	観測機器の固定方法
H-2	34° 42′ 45.63″	134° 14′ 55.24″	-4m 程度	表層では灯標筏から吊り下げたロープに固定、底層では海底から立ち上げたパイプ付ロープに固定(図 1-1.2)
H-3	34° 42′ 34.46″	134° 16′ 36.02″	-3m 程度	灯標筏から吊り下げたロープに固定(図 1-1.3)

(1) 観測方法

Stn.H-2:カキ採苗場(図 A-1)には水面下 1m に水温塩分計、pH センサー、クロロフィル濁度計および DO 計、海底上 1m に水温塩分計、pH センサーを、Stn. H-3:アマモ場近傍(図 A-1))には水面下 1mに水温塩分計、pH センサーを設置し(図 A-2, A-3)、保守管理とデータ回収・データ整理を行った(表 A-2, 表 A-4)。観測期間は 2023 年 4 月～2024 年 3 月までで、原則として1カ月に 1～3 回の観測機器に付着した生物の除去等の清掃と 2～3 カ月に 1 回のデータ回収を行うとともに、pH センサーについては 2～3 カ月に 1 回程度の頻度で人工海水を用いたセンサーの校正作業を行い、すべての観測機器について、適宜、電池を交換した(表 A-3)。

表 A-2. 岡山県備前市日生町地先における連続観測地点と使用機器

観測地点	Stn.H-2:カキ採苗場		Stn.H-3:アマモ場近傍
	水面下 1m	海底上 1m	水面下 1m
水温・塩分	ワイパー式メモリー水温塩分計 Infinity CTW ACTW-USB (JFE アドバンテック(株))	小型メモリー水損塩分計 DEF12CT (JFE アドバンテック(株))	ワイパー式メモリー水温塩分計 Infinity CTW ACTW-USB (JFE アドバンテック(株))
pH	海水用pHセンサー SPS-14 (紀本電子工業(株))	HOBO BLE pH/温度ロガー MX2501(Onset 社製)	海水用pHセンサー SPS-14 (紀本電子工業(株))
クロロフィル濁度	ワイパー式メモリークロロフィル濁度計 Infinity ACLW2-USB (JFE アドバンテック(株))	—	—
DO	ワイパー式メモリー DO 計 Infinity AROW2-USB (JFE アドバンテック(株))	—	—

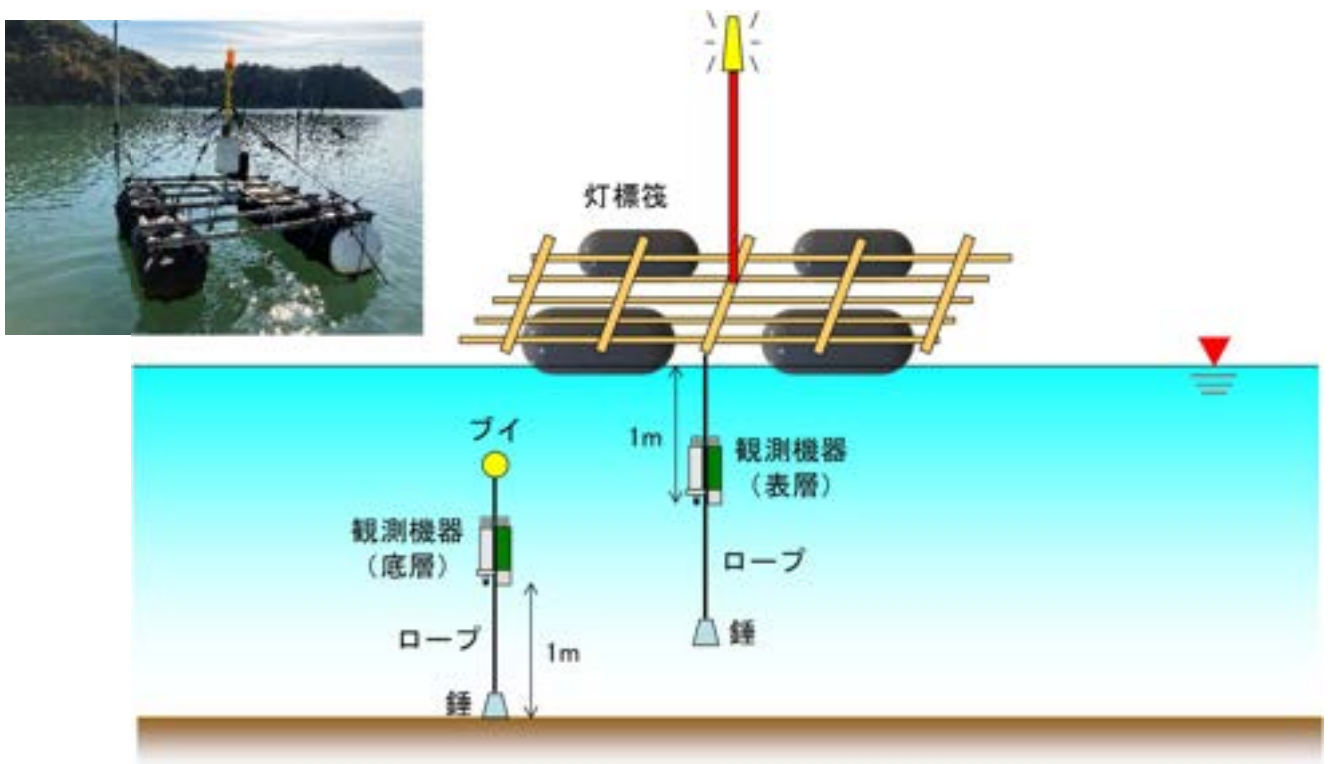


図 A-2. Stn.H-2 における観測機器の設置方法

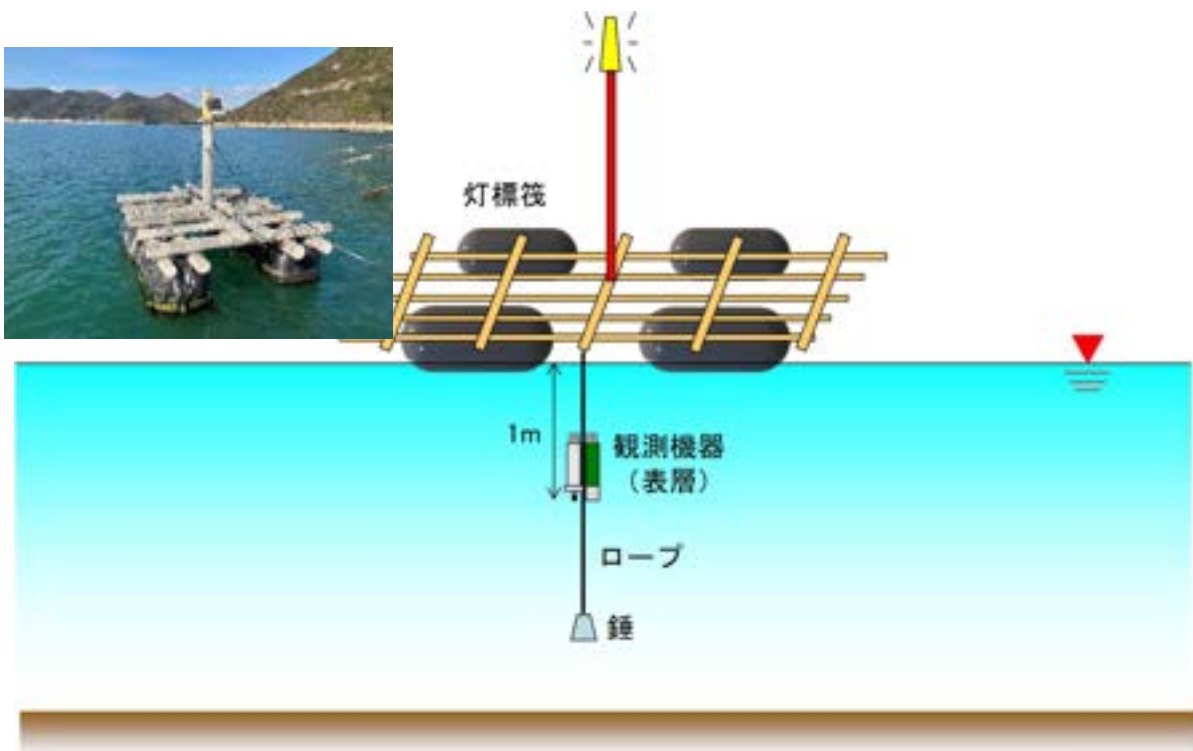


図 A-3. Stn.H-3 における観測機器の設置方法

表 A-3. 連続観測機器の設置・回収・センサー清掃など機器管理の実施状況

実施日	観測機器の設置	観測機器の回収	観測機器の清掃
2023年4月3日	● 全観測機器を設置		
2023年4月24日			●
2023年5月26日			●
2023年6月16日			●
2023年6月30日			●
2023年7月14日		● 全観測機器を回収, 電池交換, センサー 校正	
2023年7月28日	● 全観測機器を設置		
2023年8月22日		● フジツボ等が多く着 生していた H-2_表層 の水温塩分計を回収	●
2023年9月8日	● H-2_表層の水温塩 分計の設置		●
2023年9月19日		● フジツボ等が多く着 生していた H-2_底層 の水温塩分計と pH 計を回収	●
2023年9月27日	● H-2_底層の水温塩 分計と pH 計を設置		●
2023年10月19日		● 全観測機器を回収, 電池交換, センサー 校正	
2023年10月27日	● 全観測機器を設置		
2023年11月10日			●
2023年12月11日			●
2024年1月9日			●
2024年2月20日		● 全観測機器を回収, 電池交換, センサー 校正	
2024年3月●日	● 全観測機器を設置		

表 A-4. 定点連続観測の実施内容

項目	方法	数量
<p>・水温 ・塩分</p>	<p>■ ワイパー式メモリー水温塩分計 (ACTW-USB, JFE アドバンテック) を海面下 1m(表層)と海底上 1m(底層)の位置に固定し, 10 分間隔の 5 秒間計測を 1 年間連続で実施した。</p> <p>■ 表層では灯標筏から吊り下げたロープ, 底層では海底から立ち上げたブイ付きロープに結束バンドを用いてワイパー式メモリー水温塩分計を固定した(図 1-1.2, 図 1-1.3)。</p> <p>■ ワイパー式メモリー水温塩分計のセンサー部に付着した生物等は, 採水等の実施日に船上に引き揚げて歯ブラシ等を用いて除去した。</p>	<p>2 層 × 1 地点 (H-2) 1 層 × 1 地点 (H-3)</p>
<p>・pH</p>	<p>■ 海水用 pH センサー (SPS-14, 紀本電子工業) を海面下 1m(表層), 海水用 pH センサー (MX2501, HOB0) を海底上 1m(底層)の位置に固定し, 60 分間隔の 5 秒間計測を 1 年間連続で実施した。</p> <p>■ 表層では灯標筏から吊り下げたロープ, 底層では海底から立ち上げたブイ付きロープに結束バンドを用いて海水用 pH センサーを固定した(図 1-1.2, 図 1-1.3)。</p> <p>■ 海水用 pH センサーの電極に付着した生物等は, 採水等の実施日に船上に引き揚げて歯ブラシ等を用いて除去した。</p>	<p>2 層 × 1 地点 (H-2) 1 層 × 1 地点 (H-3)</p>
<p>・DO</p>	<p>■ ワイパー式メモリー溶存酸素計 (AROW2-USB, JFE アドバンテック) を海面下 1m(表層)の位置に固定し, 10 分間隔の 5 秒間計測を 1 年間連続で実施した。</p> <p>■ ワイパー式メモリー溶存酸素計は, 灯標筏から吊り下げたロープに結束バンドを用いて固定した(図 1-1.2)。</p> <p>■ ワイパー式メモリー溶存酸素計のセンサー部に付着した生物等は, 採水等の実施日に船上に引き揚げて歯ブラシ等を用いて除去した。</p>	<p>1 層 × 1 地点 (H-2)</p>
<p>・クロロフィル ・濁度</p>	<p>■ ワイパー式メモリークロロフィル濁度計 (ACLW2-USB, JFE アドバンテック) を海面下 1m(表層)の位置に固定し, 10 分間隔の 5 秒間計測を 1 年間連続で実施した。</p> <p>■ ワイパー式メモリークロロフィル濁度計は, 灯標筏から吊り下げたロープに結束バンドを用いて固定した(図 1-1.2)。</p> <p>■ ワイパー式メモリークロロフィル濁度計のセンサー部に付着した生物等は, 採水等の実施日に船上に引き揚げて歯ブラシ等を用いて除去した。</p>	<p>1 層 × 1 地点 (H-2)</p>

(2) 観測結果

2023年1月～12月の間、Stn.H-2の表層(水面下1m)で水温、塩分、pH、クロロフィル濁度、DO、底層(海底上1m)で水温、塩分、pHを連続観測した。H-3においては、表層(水面下1m)のみにおいて水温、塩分、pHを連続観測した。

ア. 水温(図 A-4)

2023年1月～12月の水温は、H-2表層で5.12(2023年1月30日0:00)～31.69℃(2023年8月13日18:00)、地点H-2_底層で7.38(2023年12月24日2:00)～30.94℃(2023年8月29日16:00)であった。また、H-3_表層では6.55(2023年1月28日23:00)～31.46℃(2023年8月28日13:00)であった。

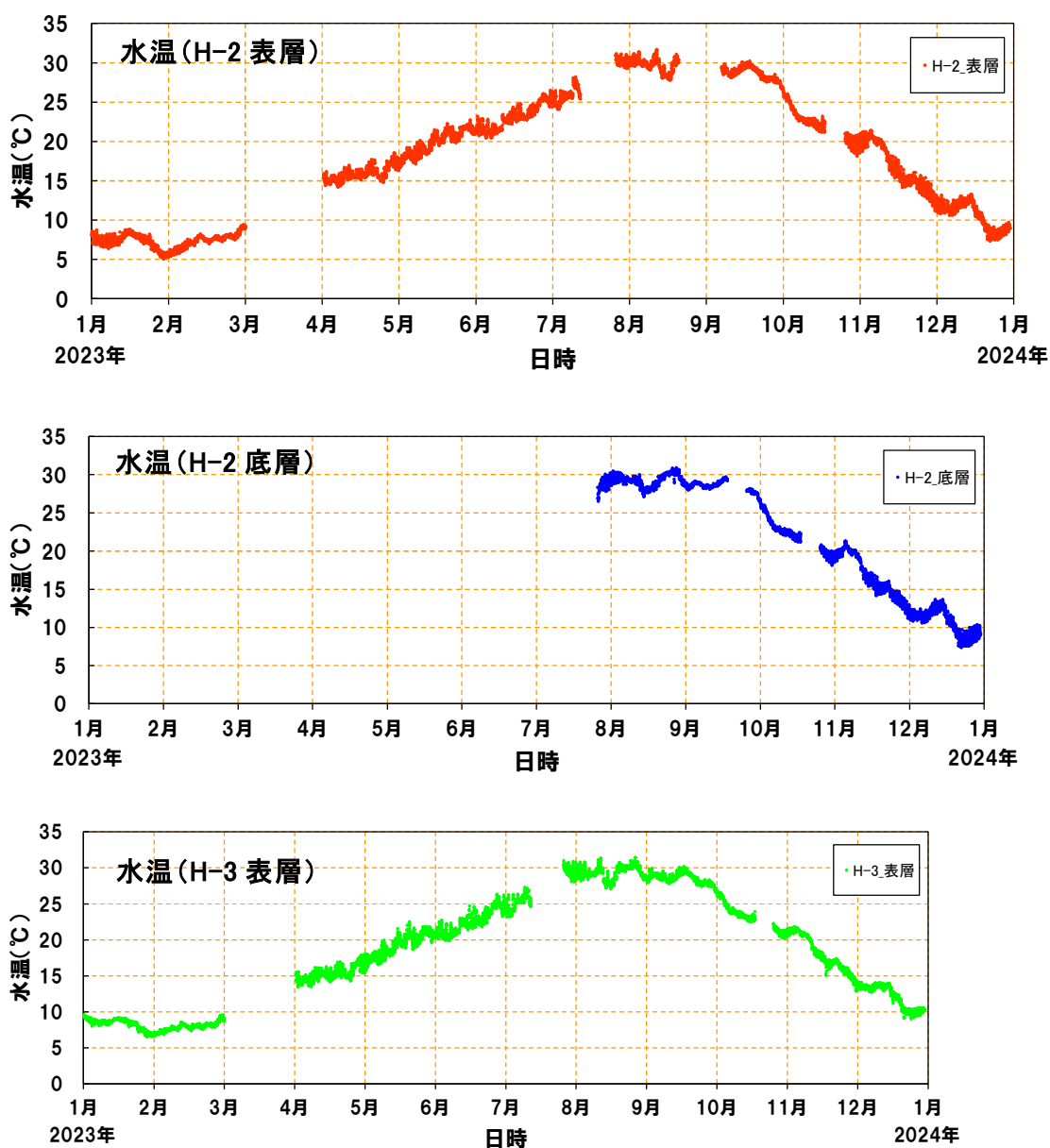


図 A-4. 2023年1月1日～12月31日のH-2表層・底層, H-3表層の水温の推移

イ. 塩分(図 A-5)

2023年1月1日～12月31日における塩分は、H-2_表層で21.63(2023年6月3日17:00)～32.53(2023年2月24日1:00, 2:00), H-2_底層で21.17(2023年8月30日16:00)～32.42(2023年10月13日14:00), H-3_表層で22.89(2023年9月1日16:00)～35.22(2023年10月13日1:00)であった。

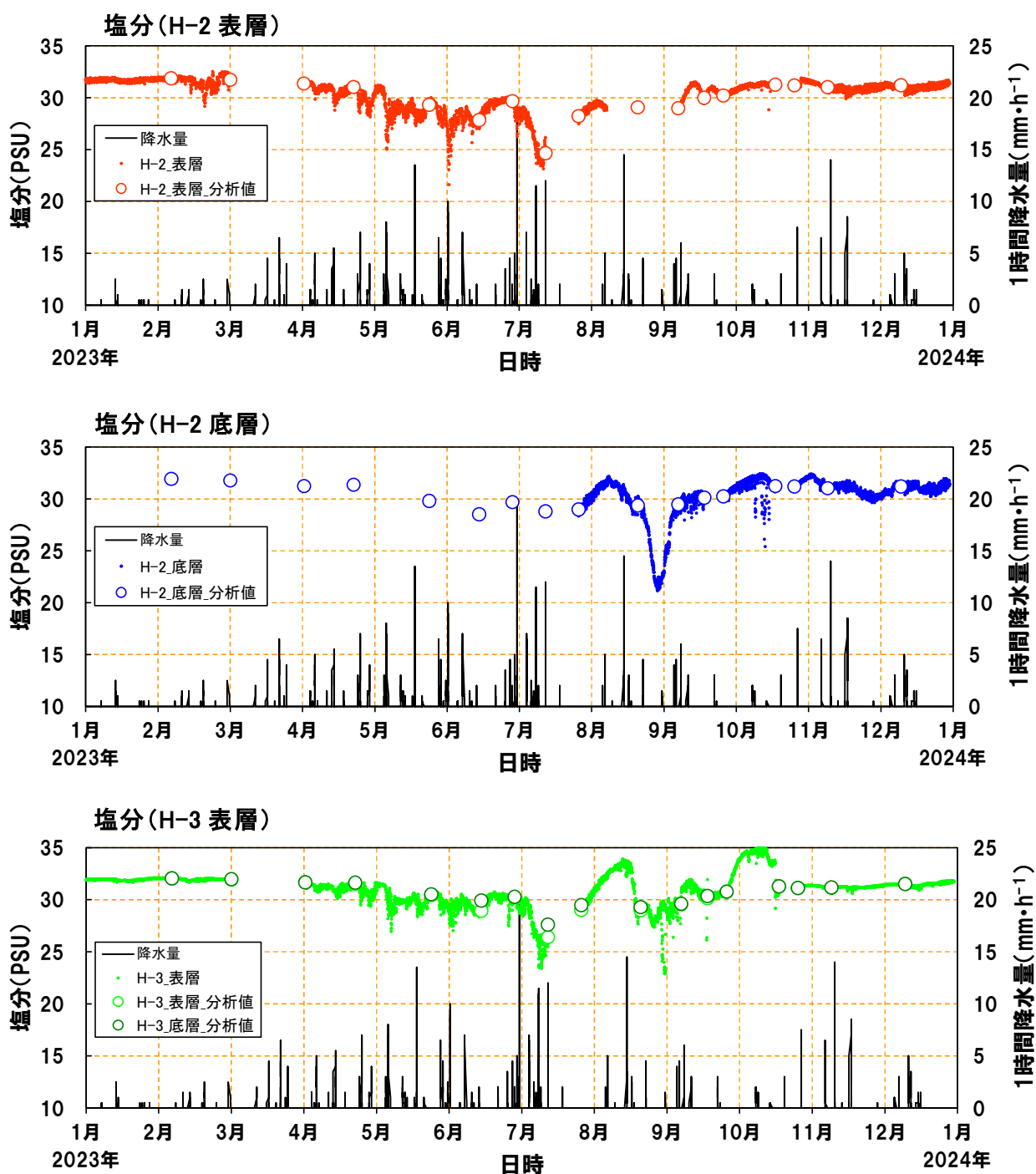


図 A-5. 2023年1月1日～12月31日のH-2_表層・底層, H-3_表層の塩分の推移
※1時間降水量は, 虫明地上気象観測所の測定値

ウ. pH(図 A-6)

2023年1月1日～12月31日におけるpHは、H-2_表層で7.08(2023年6月10日13:00)～10.51(2023年8月13日15:00), H-2_底層で7.72(2023年8月22日3:00)～8.19(2023年12月29日4:00, 5:00), H-3_表層で7.71(2023年5月9日22:00, 2023年6月16日11:00)～8.39(2023年7月11日17:00)であった。

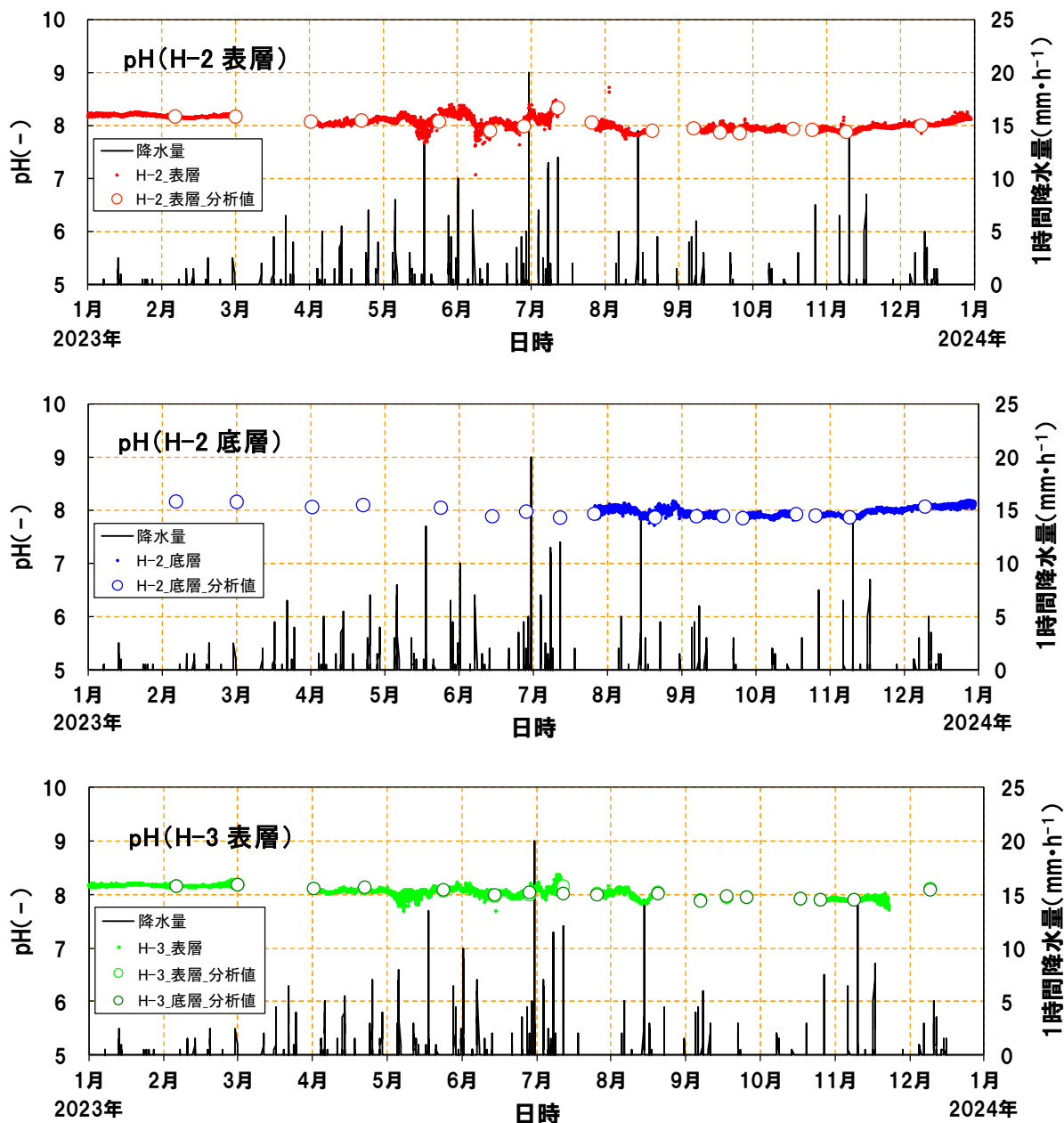


図 A-6. 2023年1月1日～12月31日のH-2_表層・底層, H-3_表層のpHの推移
※1時間降水量は、虫明地上気象観測所の測定値である。

エ. DO(図 A-7)

2023年1月1日～12月31日における地点 H-2_表層の DO の時間値は 1.78(2023年8月22日 8:00)～15.08 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023年7月11日 13:00)であった。

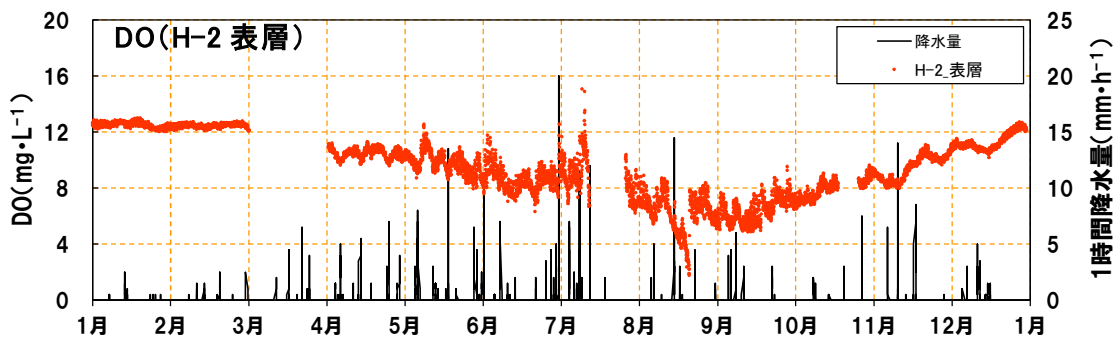


図 A-7. 2023 年 1 月 1 日～12 月 31 日の H-2 表層の DO の推移

オ. 濁度(図 A-8)

2023年1月1日～12月31日における H-2 表層の濁度は、0.4(2023年1月17日 15:00)～1,292.7(2023年9月8日 0:00)であった。

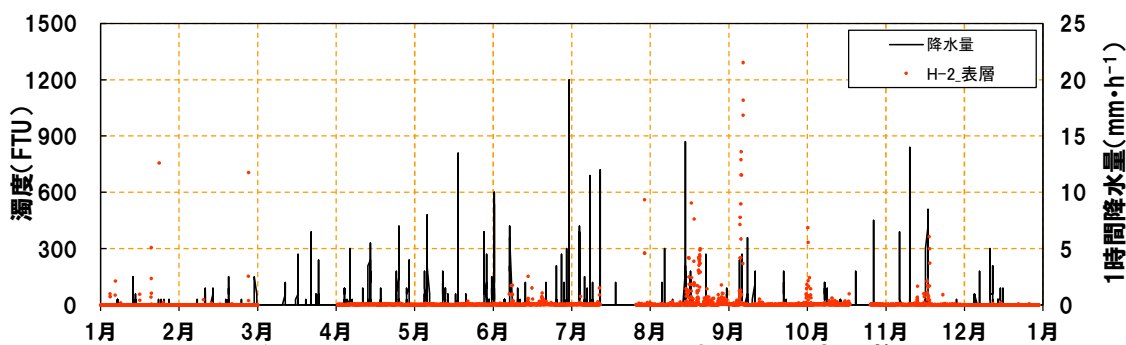


図 A-8. 2023 年 1 月 1 日～12 月 31 日の H-2 表層の濁度の推移

カ. クロロフィル(図 A-9)

2023年1月1日～12月31日の H-2_表層のクロロフィルは、0.36(2023年3月3日 12:00)～113.8 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023年1月21日 3:00)であった。

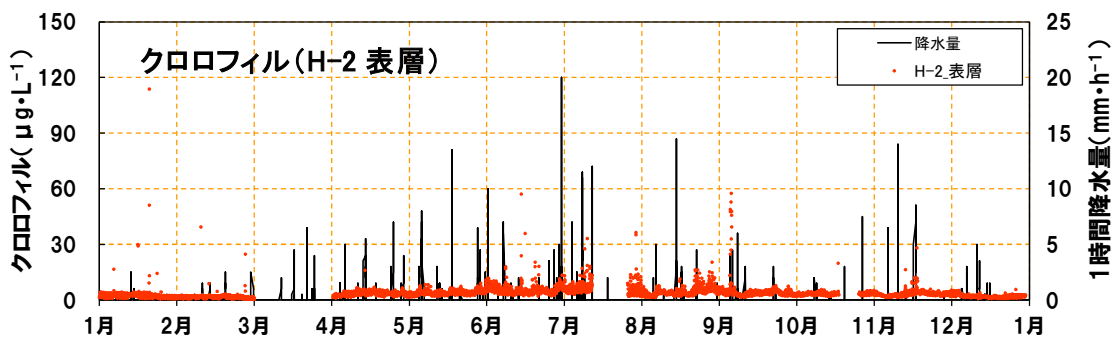


図 A-9. 2023 年 1 月 1 日～12 月 31 日の H-2 表層のクロロフィルの推移

キ. Ω_{arag} (図 A-10)

2023年1月1日～12月31日の Ω_{arag} は、H-2表層で0.29(2023年6月10日 13:00)～8.09(2023年8月4日 16:00), H-2底層で1.46(2023年12月2日 0:00)～4.12(2023年8月9日 19:00), H-3表層で1.04(2023年5月9日 22:00)～4.24(2023年8月6日 18:00)であった。

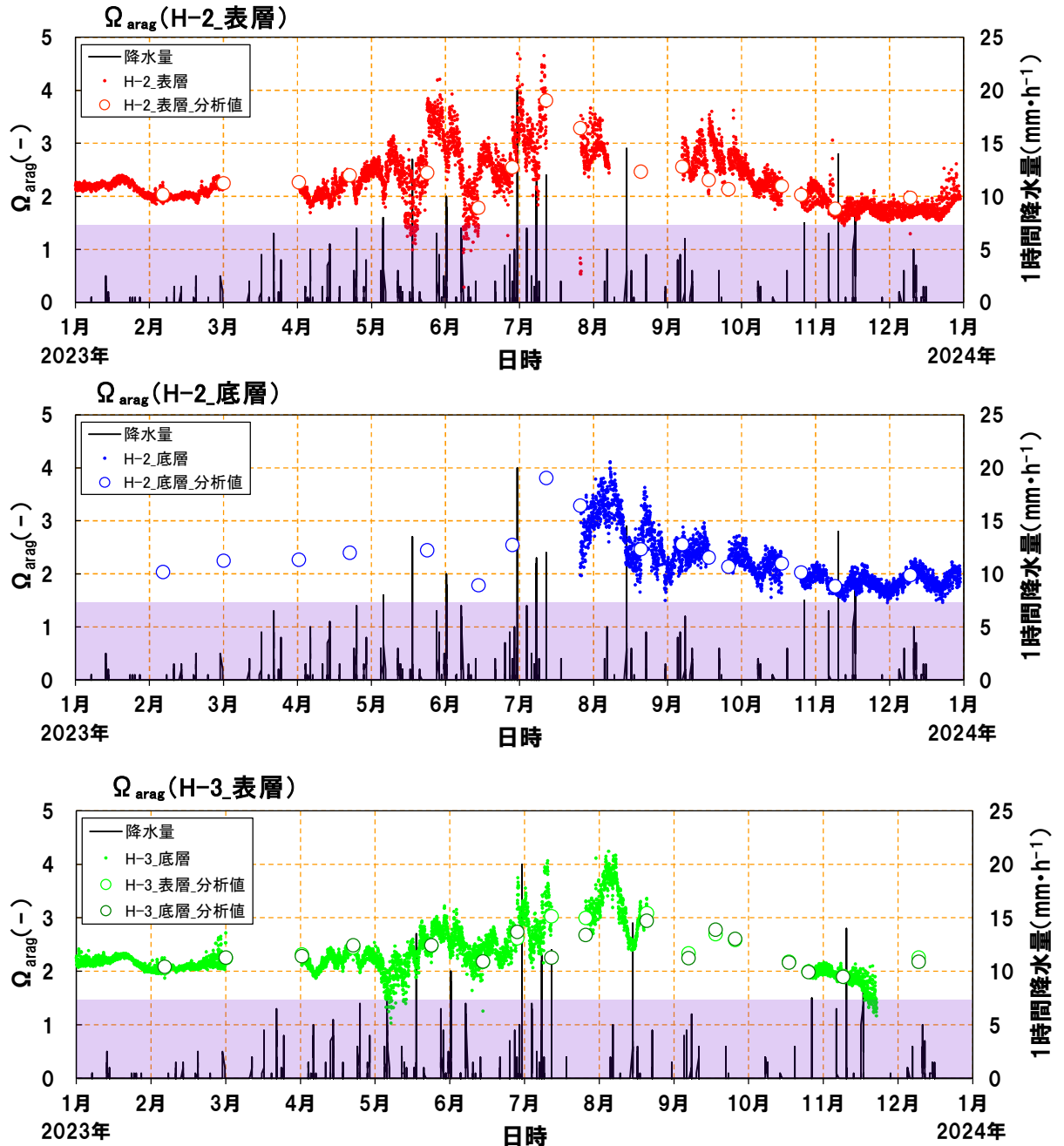


図 A-10. 2023年1月1日～12月31日の地点 H-2 表層・底層, H-3_表層の Ω_{arag} の推移
 ※1時間降水量は、虫明地上気象観測所の測定値である。

A.2 定点定期観測および採水分析

(1) 観測方法

2023年1月～12月まで、H-2 および H-3 の2定点(図 A-1、表 A-1)において、毎月1～2回、多項目水質計により水質を現地測定する(表1)。観測頻度は、2022年6～10月は毎月2回、その他は月に1回とする。多項目水質計は、(株)エイト日本技術開発が所有する YSI EX02 (YSI/NANOTECH Inc.)を使用することとし、T, S, Chl, DO, pHを測定して解析し、定点ごとの海域特性や季節変化等を把握した。

また、定点観測に併せて毎月1～2回、表層(1.0m)と底層(海底面上1.0m)でニスキン採水器により採水し、分析用サンプルとして国立研究開発法人 JAMSTEC に発送し分析に供した。採水サンプルの処理は p.39-40「酸性化モニタリングのサンプルの採水方法及び保存方法」に従った。

JAMSTEC においては、滴定法など標準手法を用いて塩分(S)、溶存態無機炭素(DIC)、全アルカリ度(A_T)を分析し、これらの数値からアラゴナイト飽和度(Ω_a)を算定し求める。また、測定されたA_TとDICを用いて、現場で計測されたpHの事後校正を行った。なお、栄養塩の分析については、岡山県水産研究所において行った。

表 A-5. 定期観測および採水方法

項目	方法	数量
<ul style="list-style-type: none"> ・pH ・塩分 ・DIC ・アルカリ度 ・栄養塩類 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ニスキン採水器(Model-1010, General Oceanics 社)を用いて、海面下 1.0m(表層)と海底上 1.0m(底層)で海水を採取し(図 1-2.1), 各海水で共洗いした容器に収容したものを水質試料とし、氷を入れたクーラー内で冷蔵して分析室に持ち帰った。 ■ pHとアルカリ度の水質試料には塩化水銀を10μL添加し、塩分とDICの水質試料とともにJAMSTECへ冷蔵で送付した。 ■ 栄養塩類の水質試料は、岡山県農林水産総合センター水産研究所へ冷蔵で送付した。 	2層×2地点(H-2・3) ×17回
<ul style="list-style-type: none"> ・水温 ・塩分 ・pH ・DO ・濁度 ・クロロフィル 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 多項目水質計(EX02, YSI)を毎秒10cmの速度で船上から垂下し、水温、塩分、pH、DO、濁度及びクロロフィルを水深別(0.1m間隔)に計測した(図 1-2.1)。 	全層×2地点(H-2・3) ×17回

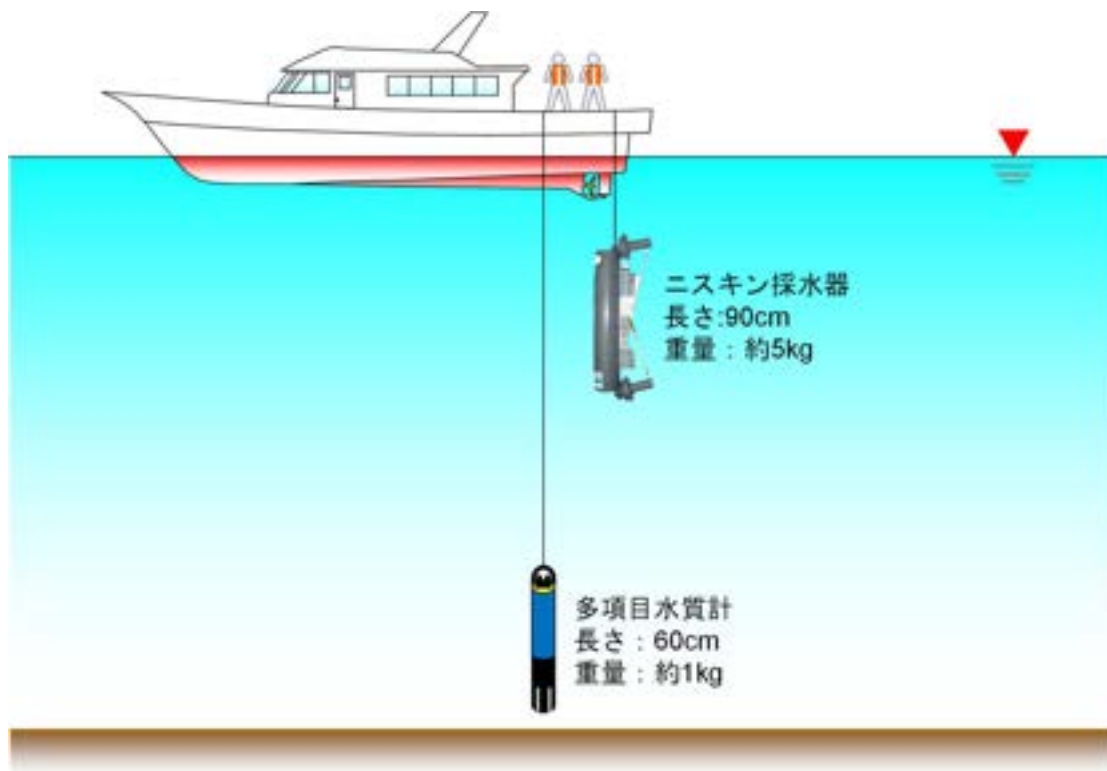


図 A.-11. 定期観測および採水方法のイメージ

表 A-6. 定期観測および採水年月日および天候・気温

採水等の実施日		天気概況	気温		
			平均 (°C)	最高 (°C)	最低 (°C)
第1回	2023年4月24日	曇	11.9	15.4	8.3
第2回	2023年5月26日	曇	20.2	24.5	15.6
第3回	2023年6月16日	晴	21.9	27.7	16.1
第4回	2023年6月30日	曇	24.8	27.0	22.7
第5回	2023年7月14日	曇	25.7	27.9	23.2
第6回	2023年7月28日	晴	29.4	35.0	24.6
第7回	2023年8月22日	晴	29.4	34.8	25.3
第8回	2023年9月8日	曇	24.2	28.9	20.5
第9回	2023年9月19日	晴	27.1	32.7	23.4
第10回	2023年9月27日	曇	26.1	30.8	22.0
第11回	2023年10月19日	晴	18.9	25.8	12.5
第12回	2023年10月27日	晴	13.7	23.5	9.8
第13回	2023年11月10日	雨	17.7	20.4	14.6
第14回	2023年12月11日	晴	12.4	15.8	8.9
第15回	2024年1月9日	晴	3.1	10.9	-3.4
第16回	2024年2月20日	曇	13.0	18.2	10.8
第17回	2024年3月●日				

注:1) 気温は、虫明地上気象観測所の測定値である。

(1) 観測結果

① 定点定期観測結果

ア. 水温

表層混合層深さ(MLD)の水温の測定値は, H-2 で 14.87(2023年4月3日)~31.04℃(2023年7月28日), H-3 で 13.85(2023年4月3日)~30.23℃(2023年7月28日)であった。

共通最深層深さ(CDD)の水温の測定値は, H-2 で 6.9(2023年2月6日)~29.29℃(2023年8月22日), H-3 では 7.42(2023年2月6日)~29.05℃(2023年8月22日)であった。

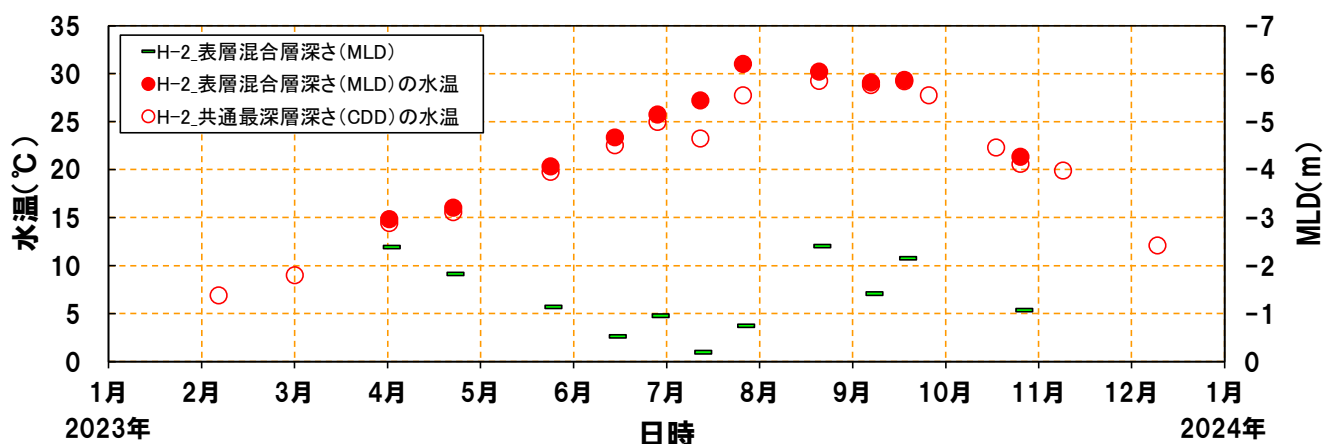


図 A-12. 2023年2~12月のH-2の水温の鉛直測定値
※共通最深層深さ(CDD)は-4mである。

イ. 塩分

表層混合層深さ(MLD)の塩分の測定値は, H-2 で 22.63(2023年7月14日)~31.71(2023年10月27日), H-3 で 25.97(2023年7月14日)~31.57(2023年10月27日)であった。

共通最深層深さ(CDD)の塩分の測定値は, H-2 で 28.46(2023年2月6日)~31.69(2023年2月6日, 10月19日), H-3 では 29.42(2023年7月14日)~31.97(2023年12月11日)であった。

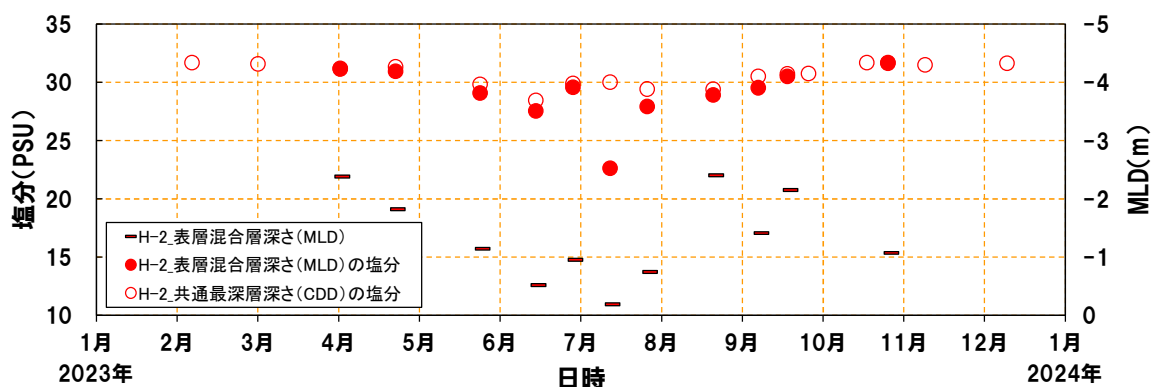


図 A-13. 2023年2~12月のH-2の塩分の鉛直測定値
※共通最深層深さ(CDD)は-4mである。

ウ. pH

表層混合層深さ(MLD)の pH の測定値は、地点 H-2 で 7.8(2023 年 10 月 27 日)～8.47(2023 年 7 月 14 日), 地点 H-3 で 7.89(2023 年 9 月 8 日)～8.13(2023 年 7 月 14 日)であった。

共通最深層深さ(CDD)の pH の測定値は、地点 H-2 で 7.8(2023 年 8 月 22 日)～8.17(2023 年 2 月 6 日), 地点 H-3 では 7.89(2023 年 9 月 8 日)～8.18(2023 年 3 月 3 日)であった。

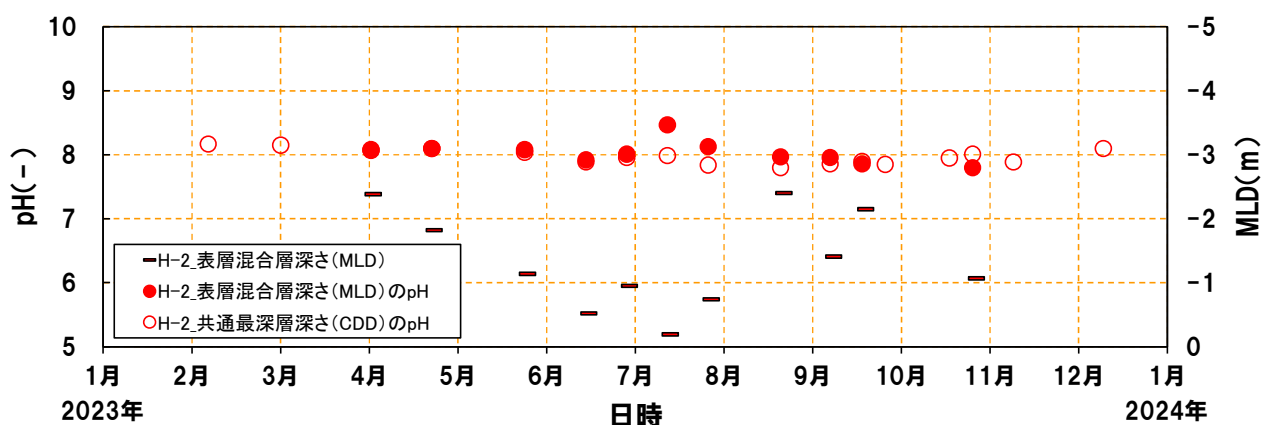


図 A-14. 2023 年 2～12 月の H-2 の pH の鉛直測定値
※共通最深層深さ(CDD)は-4m である。

エ. DO

表層混合層深さ(MLD)の DO の測定値は、地点 H-2 で 6.05(2023 年 9 月 19 日)～9.97 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 4 月 3 日), 地点 H-3 で 6.25(2023 年 9 月 8 日)～10.28 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 4 月 3 日)であった。

共通最深層深さ(CDD)の DO の測定値は、地点 H-2 で 4.68(2023 年 7 月 14 日)～10.89 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 3 月 3 日), 地点 H-3 では 5.94(2023 年 9 月 8 日)～10.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 3 月 3 日)であった。

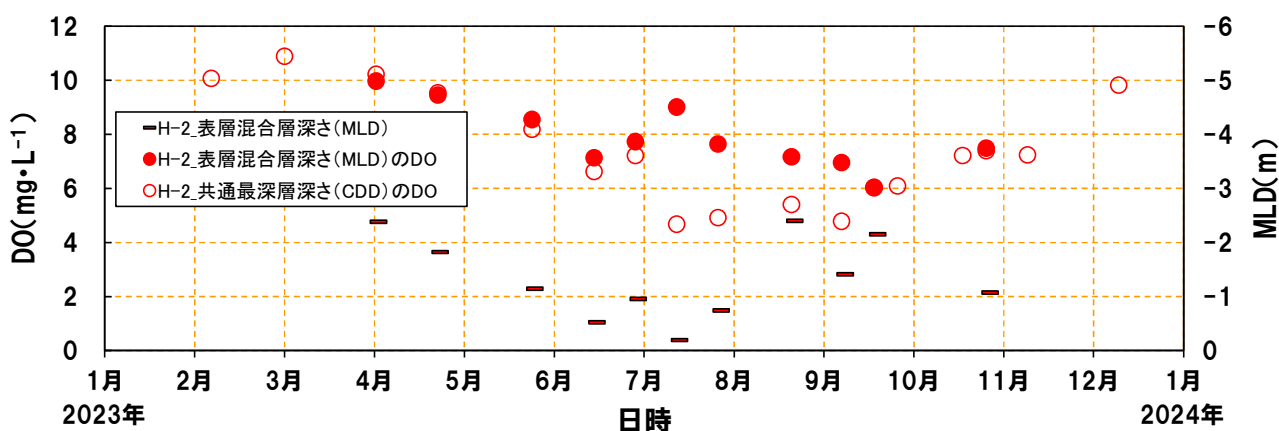


図 A-15. 2023 年 2～12 月の H-2 の DO の鉛直測定値
※共通最深層深さ(CDD)は-4m である。

オ. 濁度

表層混合層深さ(MLD)の濁度の測定値は、地点 H-2 で 1.51(2023 年 6 月 30 日)～5.07NTU(2023 年 10 月 27 日)、地点 H-3 で 0.61(2023 年 6 月 30 日)～3.06NTU(2023 年 9 月 8 日)であった。

共通最深層深さ(CDD)の濁度の測定値は、地点 H-2 で 1.2(2023 年 2 月 6 日)～14.79NTU(2023 年 7 月 28 日)、地点 H-3 では 0.51(2023 年 6 月 30 日)～6.27NTU(2023 年 10 月 19 日)であった。

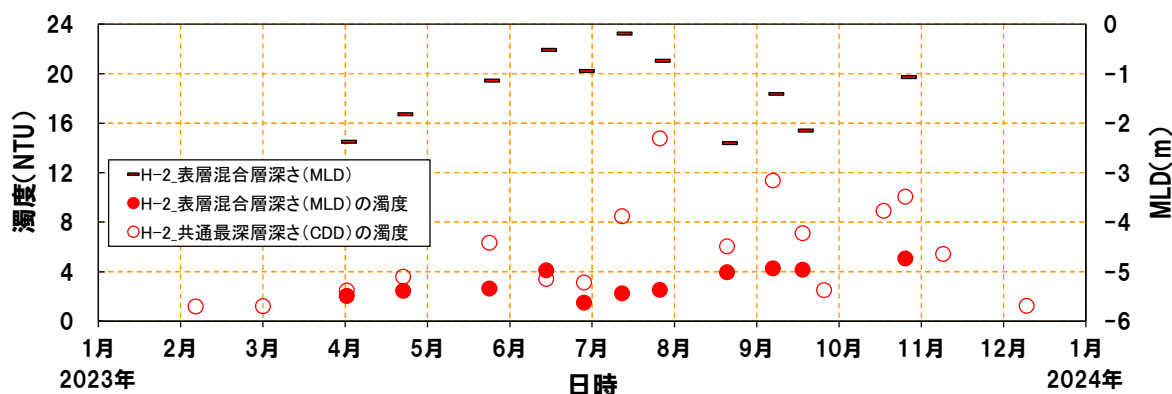


図 A-16. 2023 年 2～12 月の H-2 の濁度の鉛直測定値
※共通最深層深さ(CDD)は-4m である。

カ. クロロフィル

表層混合層深さ(MLD)のクロロフィルの測定値は、地点 H-2 で 1.5(2023 年 4 月 3 日)～8.35 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 7 月 14 日)、地点 H-3 で 0.67(2023 年 4 月 3 日)～4.18 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 7 月 14 日)であった。

共通最深層深さ(CDD)のクロロフィルの測定値は、地点 H-2 で 1.01(2023 年 3 月 3 日)～7.97 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 6 月 30 日)、地点 H-3 では 0.82(2023 年 3 月 3 日)～4.84 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 7 月 28 日)であった。

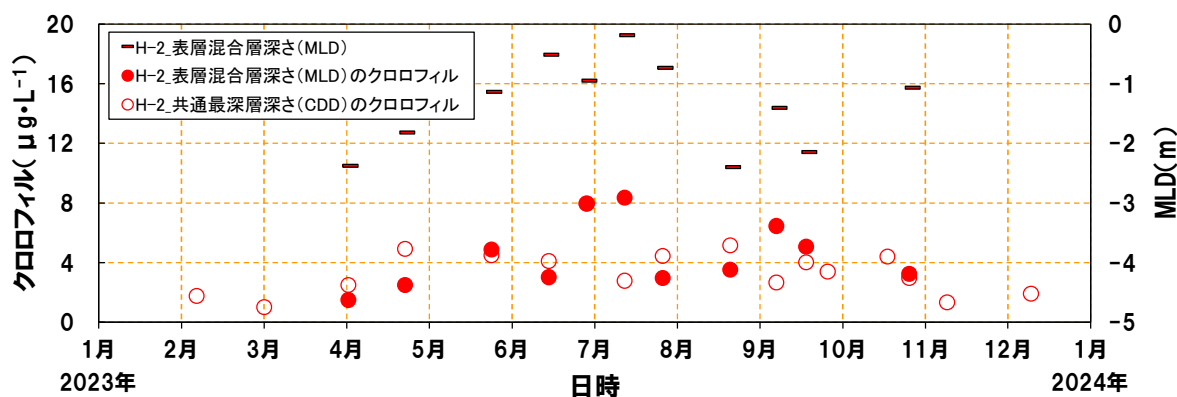


図 A-17. 2023 年 2～12 月の H-2 のクロロフィルの鉛直測定値
※共通最深層深さ(CDD)は-4m である。

② 採水分析結果

ア. $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$

$\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ の表層の分析値は、地点 H-2 で 0.002(2023 年 4 月 3 日)～1.187 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 11 月 10 日)、地点 H-3 で 0.001(2023 年 9 月 8 日)～3.329 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 9 月 27 日)であった。

$\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ の底層の分析値は、地点 H-2 で 0.03(2023 年 7 月 28 日)～1.066 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 11 月 10 日)、地点 H-3 で 0.001(2023 年 4 月 3 日)～1.525 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 11 月 10 日)であった。

イ. $\text{NH}_4\text{-N}$

$\text{NH}_4\text{-N}$ の表層の分析値は、地点 H-2 で 0.01(2023 年 3 月 3 日, 4 月 24 日)～2.999 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 11 月 10 日)、地点 H-3 で 0.01(2023 年 3 月 3 日, 4 月 3・24 日)～3.036 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 11 月 10 日)であった。

$\text{NH}_4\text{-N}$ の底層の分析値は、地点 H-2 で 0.01(2023 年 4 月 24 日)～3.374 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 11 月 10 日)、地点 H-3 で 0.01(2023 年 3 月 3 日, 4 月 3・24 日)～2.476 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 11 月 10 日)であった。

ウ. $\text{PO}_4\text{-P}$

$\text{PO}_4\text{-P}$ の表層の分析値は、地点 H-2 で 0.041(2023 年 4 月 24 日)～0.636 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 11 月 10 日)、地点 H-3 で 0.043(2023 年 4 月 24 日)～0.733 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 10 月 27 日)であった。

$\text{PO}_4\text{-P}$ の底層の分析値は、地点 H-2 で 0.053(2023 年 4 月 24 日)～0.608 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 11 月 10 日)、地点 H-3 で 0.071(2023 年 4 月 24 日)～0.702 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 10 月 27 日)であった。

エ. $\text{SiO}_2\text{-Si}$

$\text{SiO}_2\text{-Si}$ の表層の分析値は、地点 H-2 で 2.318(2023 年 2 月 6 日)～102.641 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 7 月 28 日)、地点 H-3 で 1.842(2023 年 2 月 6 日)～54.678 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 7 月 28 日)であった。

$\text{SiO}_2\text{-Si}$ の底層の分析値は、地点 H-2 で 1.911(2023 年 2 月 6 日)～73.36 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 7 月 28 日)、地点 H-3 で 1.094(2023 年 3 月 3 日)～44.769 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (2023 年 7 月 28 日)であった。

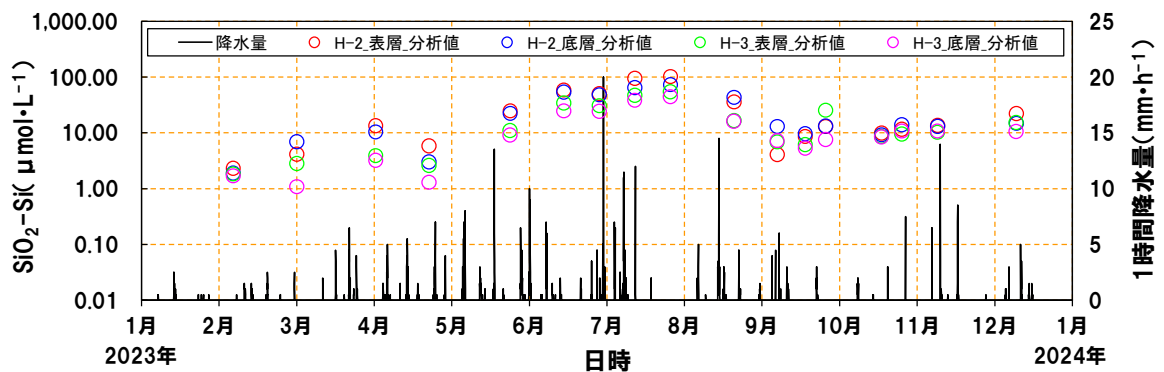
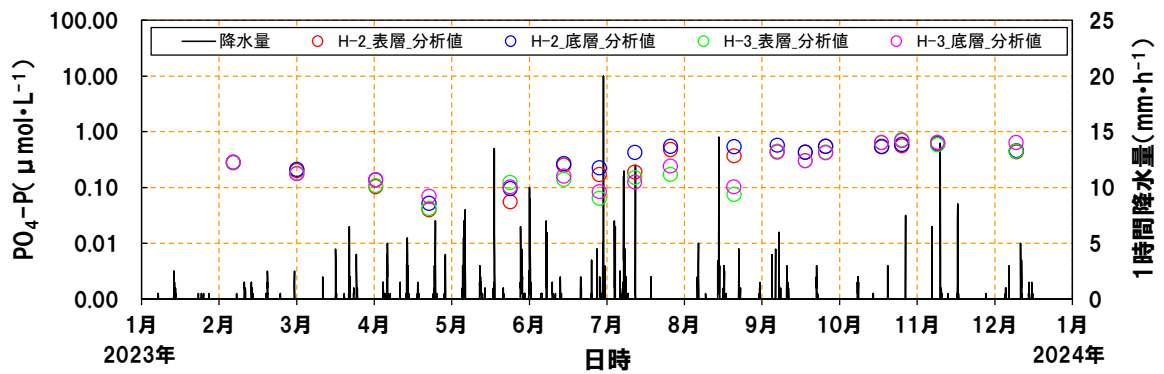
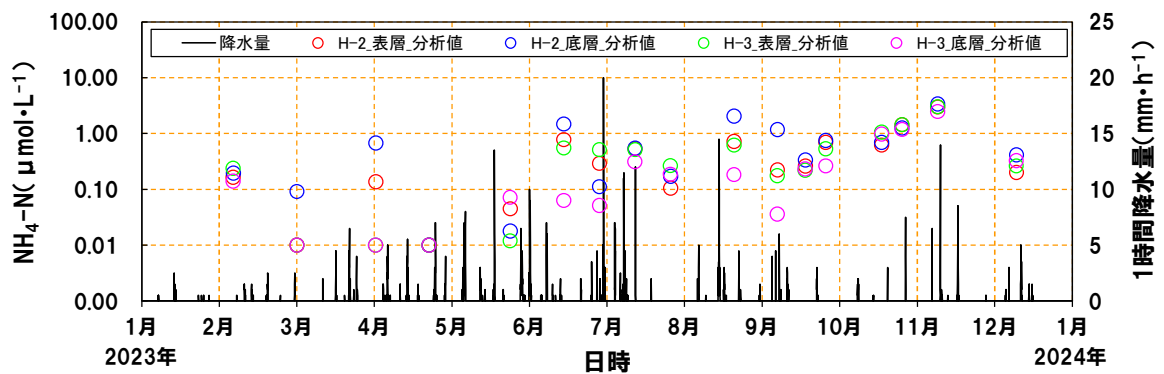
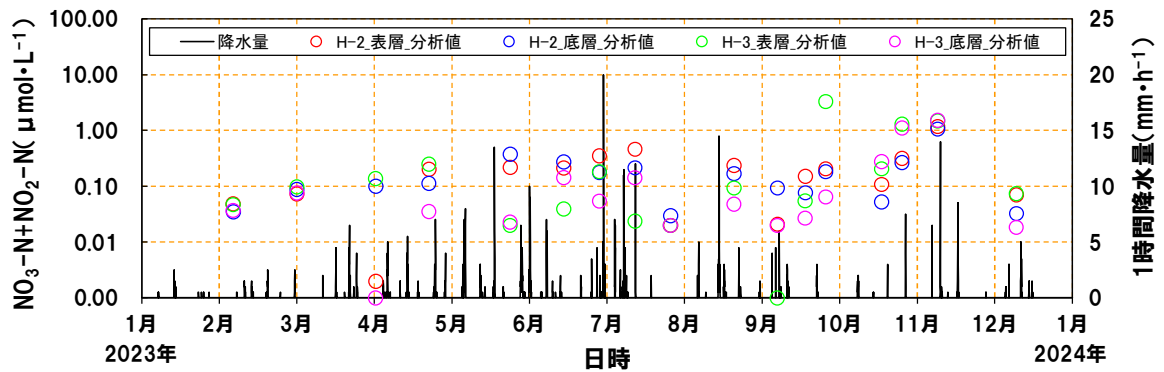


図 A-18. 2023年2~12月のH-2・H-3における表層・底層の栄養塩類分析値
 ※1時間降水量は、虫明地上気象観測所の測定値である。

「酸性化モニタリングのサンプルの採水方法と保存方法」

溶存無機炭素(DIC)・全アルカリ度(TA)の採水

使用器具：採水チューブ、ガラス瓶 2 本(DIC 用 125ml、TA 用 100ml)、
シール

1. まず、ボトルに貼ってある番号を、日付や測点に一致するように、採水野帳に記入をお願いいたします。
2. ニスキン採水器を 3 回共洗いする。同時に採水チューブも洗う。
3. 気体成分のため、一番初めに採取してください。採水チューブをニスキンボトルの排水口に差し、チューブの中の空気をしごき出しながら、数秒海水を流し、流水を指で止める。
4. ガラス瓶のゴムキャップを取る。ガラス瓶を傾け、流水を止めているチューブの先をガラス瓶の底まで入れ、ゆっくり海水を注ぎ、泡立たないように入れる。
5. そのまま、ゆっくり指を離しながら海水を流し入れ、瓶からあふれて出てきたら、そのまま **20 秒以上**溢れ出させる。その際、チューブの先に泡が着かないように、軽く回す。また、瓶から溢れ出てくる海水でゴムキャップを洗う。
6. 20 秒以上オーバーフローさせた後、瓶の底にあるチューブの先を、流水を止めながら、引き上げる。チューブの先が水面ぎりぎりのところで、流水を止める。そのあと、ゴムキャップで閉める。
7. 海水サンプルを採取したガラス瓶は、青いプラスチック箱に戻し、日光があたらないようにする。可能であれば、冷暗所に保存してください。



採水チューブ



ガラス瓶

以下のサンプル固定の手順は、実験室で行ってください。採水で時間が無いときは、採水が一段落したら行って下さい。

使用器具：マイクロピペット (0.1ml と 5 ml)、飽和塩化水銀、ゴムキャップ、アルミキャップ、バイアル瓶締機、手袋

8. 手袋を付ける。それぞれのマイクロピペットに 5ml と 1 ml のチップを取り付ける。
9. サンプル瓶のゴムキャップを開け、瓶の口近くからマイクロピペットで 2ml 海水を吸い取り、ビーカーなどに捨てる。そのあと、液面より少し下にチップの先を入れ、飽和塩化水銀を 0.1ml 添加する。空気が入らないように気を付ける。
10. 少し小さいゴムキャップとアルミキャップをガラス瓶に取付け、バイアル瓶締機でグイッと密閉する。
11. サンプル瓶は、破損防止のため、可能な限り冷蔵庫で保存する。



バイアル瓶締

塩分の採水

使用器具：250ml 茶褐色瓶 1本、内キャップ、清水

1. まず、ボトルに貼ってある番号を、日付や測点に一致するように、採水野帳に記入をお願いいたします。
2. DIC・TA サンプルを採水した後、残ったニスキン採水器の海水を使ってください。
3. 瓶に海水が残っている場合は、まず捨てる。採水チューブを取り外し、バケツを傾けて、海水を流す。
4. 瓶に海水で3回共洗いを行い、肩口まで（約8割）入れる。
5. 内キャップを海水で洗い、軽く締めて、黒いネジロキャップでギュッとキツく閉める。
6. その後、実験室で、清水で瓶全体を洗い、海水を落として、逆さに向けて、青プラコンに入れる。サンプルが凍ると割れるので、冷凍しない程度の場所で保存する。

栄養塩の採水

使用器具：スピッツ管（2本）、試験管立て、アルミ製ユニパック

1. まず、ボトルに貼ってある番号を、日付や測点に一致するように、採水野帳に記入をお願いいたします。
 2. DIC・TA サンプル、塩分を採水した後、残ったニスキン採水器の海水を使ってください。
 3. 海水を流す。スピッツ管を空ける。
 4. 3回共洗いを行い、約8割入れて、キャップを洗って、閉じる。
 5. 実験室に帰ってきたら、ミリQか清水でスピッツ管全体を洗い、試験管立てに立てて、冷凍する。
 6. 後日、冷凍したスピッツ管をアルミ製ユニパックに入れて、アンモニアのコンタミネーションを防ぐため、冷凍庫で保管する。
- 3ヶ月に1回ほど、繰返し精度の確認のため、すべてのサンプルを2倍取ってください。サンプルが貯まりましたら、DIC・TA サンプルは冷蔵で、塩分は常温（冬以外）または冷蔵で、栄養塩は冷凍で、海洋研究開発機構むつ研究所に送ってください。

B. 宮城県南三陸町志津川湾(以下、志津川湾)における海洋観測

B.1. 定点連続観測

志津川湾においては、本プロジェクトがスタートした 2020 年度に Stn.S-1(淡水供給源近傍)、Stn.S-2(ワカメ養殖場)、Stn.S-3(カキ採苗場)、Stn.S-4(沖合:志津川湾の標準的な水質)、Stn.S-5(沖合参考地点)の 5 定点を設けた。Stn.S-5 については、連続観測は実施せず、多項目水質計による定期観測のみを行った(図B-1)。5 定点のうち Stn.S-2,S-4、S-5 は 2022 年度をもって終了とし、2023 年度には Stn.S-1 と S-3 の 2 定点で連続観測と定期観測を実施した。

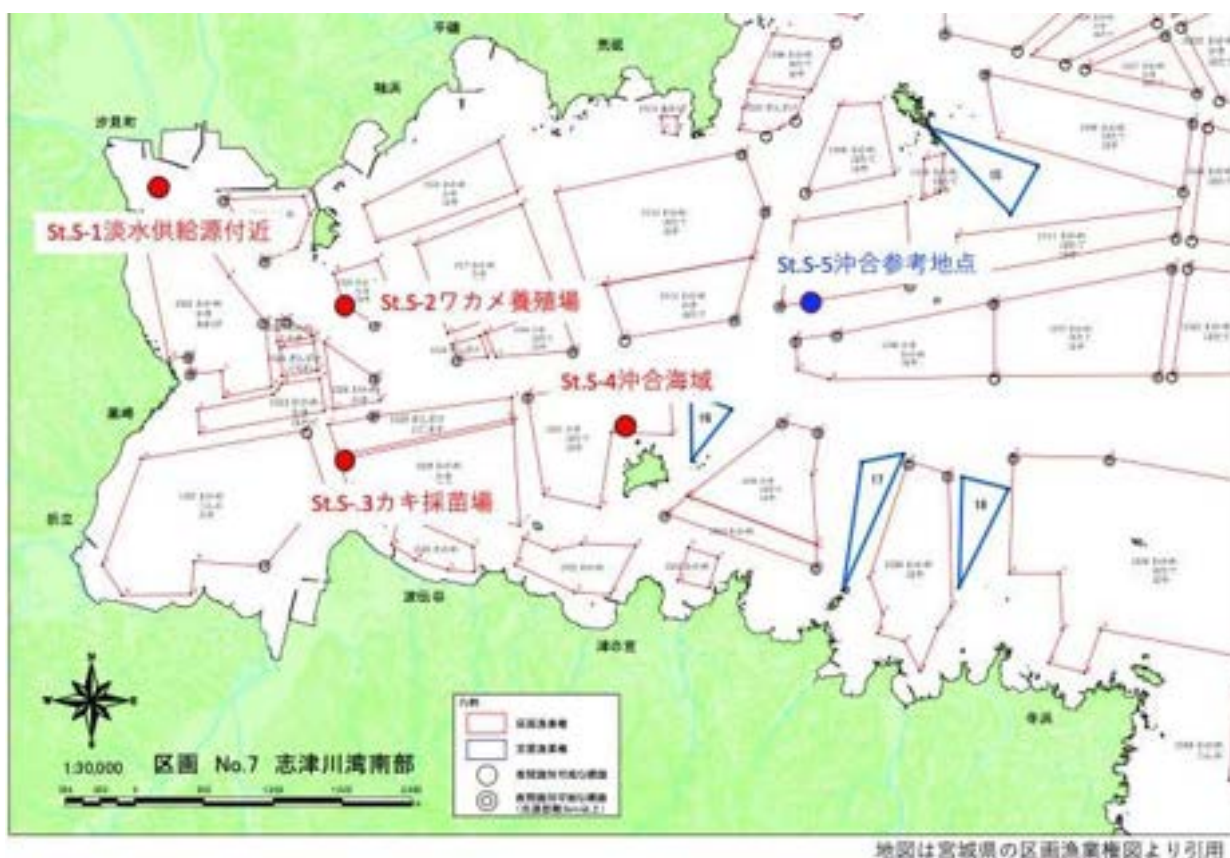


図 B.1 志津川湾における観測定点 Stn.H-1 ~ Stn.H-5

(1) 観測方法

Stn.S-1 および Stn.S-3 の水深1m に、水温・塩分計と pH センサーを設置した(表 B-1、図 B-2)。Stn.S-1 についてはシロザケ稚魚の中間育成施設、Stn.S-3 は戸倉地区青年研究会の養殖試験施設に取り付けた。設置にはカキ養殖に使用するロープを用い、水温・塩分計と pH メーターを結束バンドで固定し、さらに幅 50mm のビニールテープで巻いて一体化したものを水面下 1m に垂下した。センサー部への付着軽減をねらい、再設置の際、屋内でネズミの侵入防止に用いられる銅ネットでセンサー部の外枠を覆った。さらに Stn.S-3 の水深1m には濁度計と DO 計を、海底から1m直上には水温・塩分計及び 01

pH・温度データロガーを設置し、連続観測を行った。なお、連続観測された pH の値は、採水分析の測定値を用いて、ドリフト補正を行った。

表 B-1. 志津川湾における連続観測定点使用機器

観測定点	Stn.S-1: 淡水供給源近傍	Stn.S-3: カキ採苗場	
測器設置位置	水面下1m	水面下1m	海底上1m
水温・塩分	ワイパードメモリ水温塩分計(JFEアドバンテック(株)) INFINITY-CTW ACTW-USB		小型メモリ水温塩分計DEF12CT (JFEアドバンテック(株))
pH	海水用pHセンサーSPS-14 (紀本電子工業(株))		HOBO BLE pH/温度ロガー MX2501(Onset社製)
クロロフィル濁度	—	ワイパードメモリクロロフィル濁度計 INFINITY-ACLW2-USB (JFEアドバンテック(株))	—
DO	—	ワイパードメモリDO計 INFINITY-AROW2-USB (JFEアドバンテック(株))	—

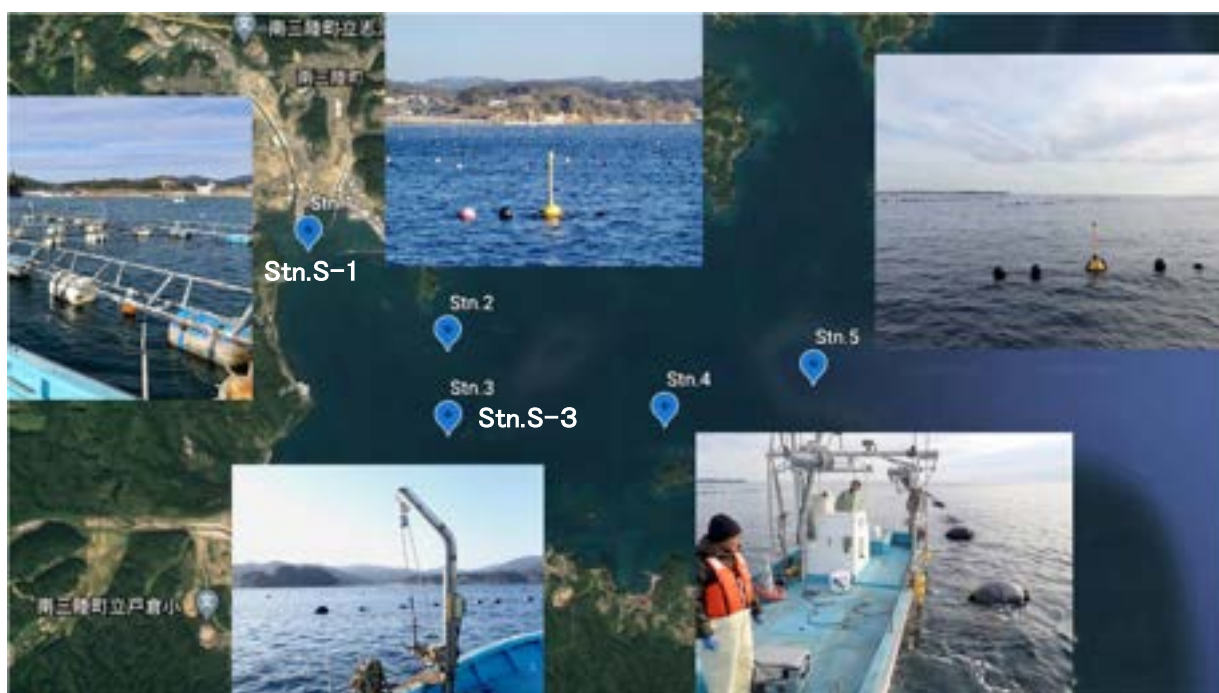


図 B-2. 志津川湾における観測機器の設置状況

表 B-2. 定点連続観測の方法

項目	方法	数量
・水温・塩分	ワイパー式メモリー水温塩分計 (ACTW-USB, JFE アドバンテック)を海面下 1m の位置に固定し, 10 分間隔の 5 秒間計測を 1 年間連続で実施した。	1 層 × 4 定点 (S-1 ~ 4)
・pH	海水用 pH センサー (SPS-14, 紀本電子工業)を海面下 1m の位置に固定し, 60 分間隔の 5 秒間計測を 1 年間連続で実施した。	1 層 × 4 定点 (S-1 ~ 4)
・DO	ワイパー式メモリー溶存酸素計 (AROW2-USB)を海面下 1m の位置に固定し, 10 分間隔の 5 秒間計測を 1 年間連続で実施した。	1 層 × 1 定点 (S-3)
・クロロフィル ・濁度	ワイパー式メモリークロロフィル濁度計 (ACLW2-USB)を海面下 1m の位置に固定し, 10 分間隔の 5 秒間計測を 1 年間連続で実施した。	1 層 × 1 定点 (S-3)

(2) 観測結果

Stn.S-1 および S-3 の水温・塩分の連続観測結果を図 B-3 に示した。Stn.S-1 表層の水温・塩分はそれぞれ 6.33℃～29.7℃、13.54～34.33 であった。Stn.S-3 表層の水温・塩分はそれぞれ 7.39℃～29.0℃、28.26～34.43 であった。今年度は 8 月から 9 月にかけて水温が非常に高い状態で推移したことが見て取れ、また 12 月に入ってから 20℃を下回らない時期が続くなど、志津川湾は記録的な高水温を記録した。なお、塩分の最低値はいずれのステーションでも 2023 年 6 月 16 日に記録した。高水温の影響か付着生物も多く、測器への付着によるワイパーの脱落で Stn.S-3 の 6 月 18 日から 6 月 28 日にかけての正しい塩分値が計測できなかった。2023 年 5 月 26 日より Stn.S-3 の底層にも測器を設置し水温・塩分の計測を開始したが、ワイパーのない測器のため、長期設置時は後半の計測値の信頼性が著しく低くなっていると推定された。

pH の連続観測結果を図 B-4 に示した。pH センサーによる実際の計測値と採水サンプルの分析値によるドリフト補正を行った数値を示した。Stn.S-1 の測器が不調のため、メーカーによる点検整備を行ったことから、2023 年 8 月 4 日から 9 月 25 日まで欠測となった。また Stn.S-3 の 2023 年 3 月 22 日から 4 月 25 日まで値が急激に高くなっていることから何らかの不調が生じた可能性がある。計測した pH の値は夏季に低く冬季に高くなる傾向が見られ、Stn.S-3 では 7.77 から 8.54 の間で推移した。

2023 年 4 月 25 日からは Stn.S-3 の海底より 1m の水深にも pH 計を設置し、連続観測を開始した。HOBO の pH 計はセンサー付近に付着生物が付着すると除去が困難であり、センサー部の破損を招きやすい。2023 年 11 月 28 日以降の欠測は、そのような状況でセンサーが破損し、再設置ができなかったことによる。

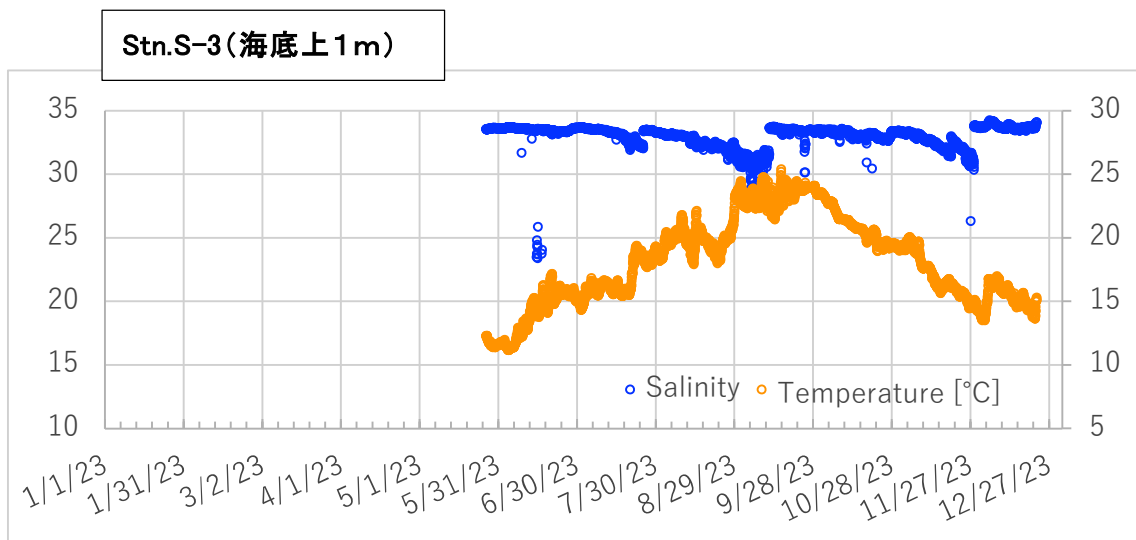
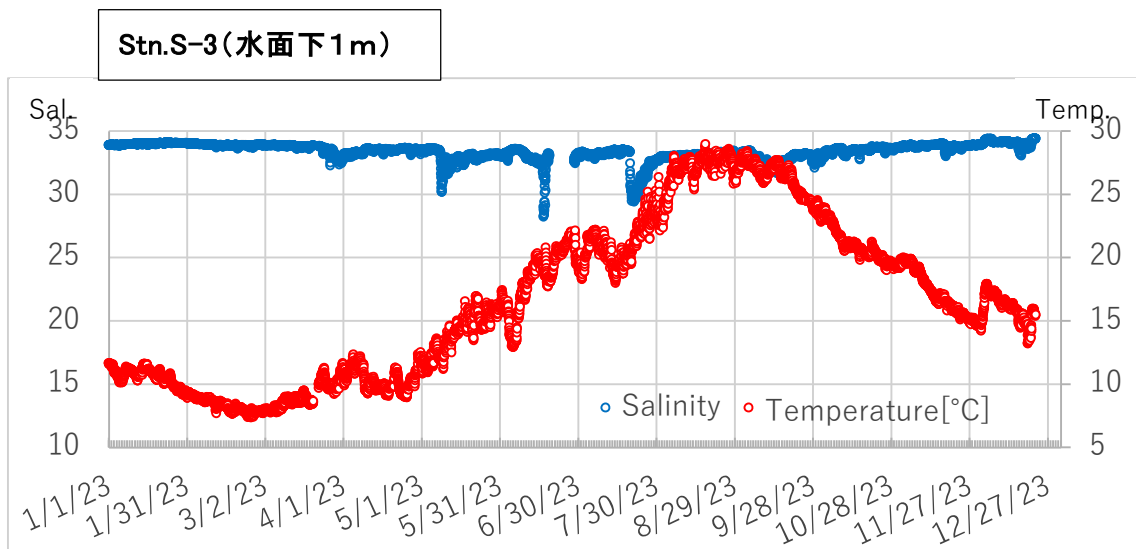
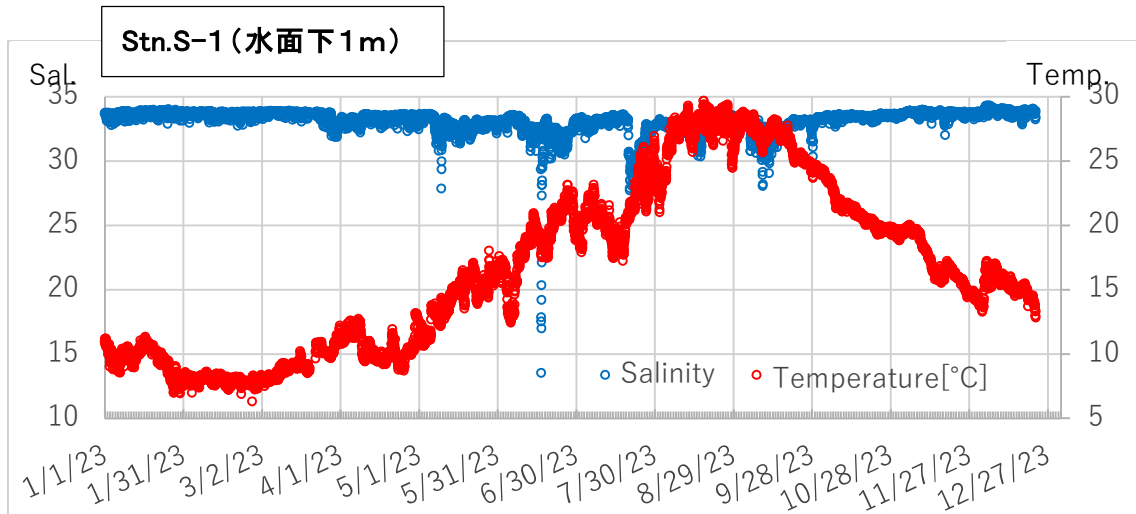


図 B- 3. Stn.S-1 および S-3 における水温・塩分の連続観測結果

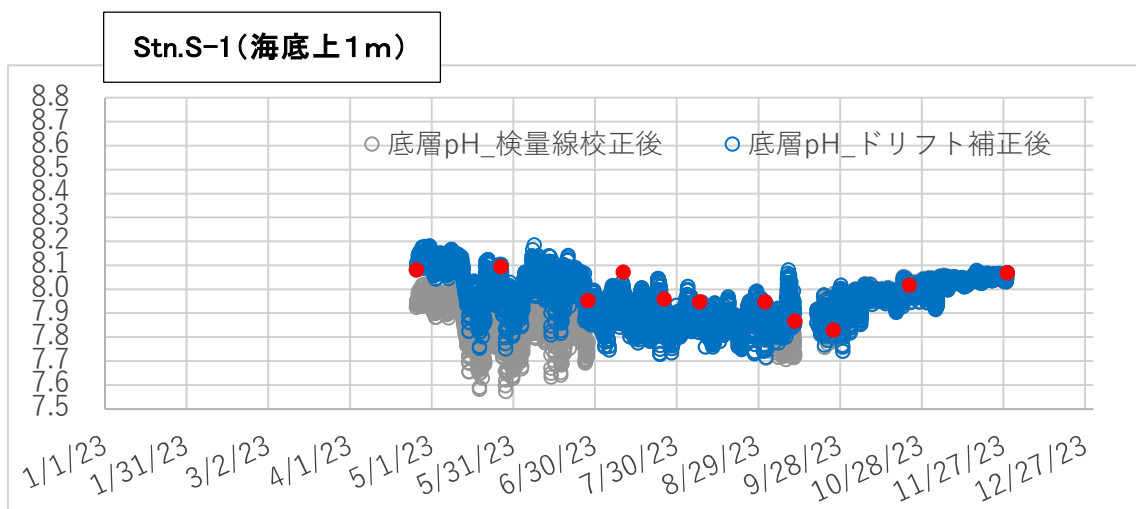
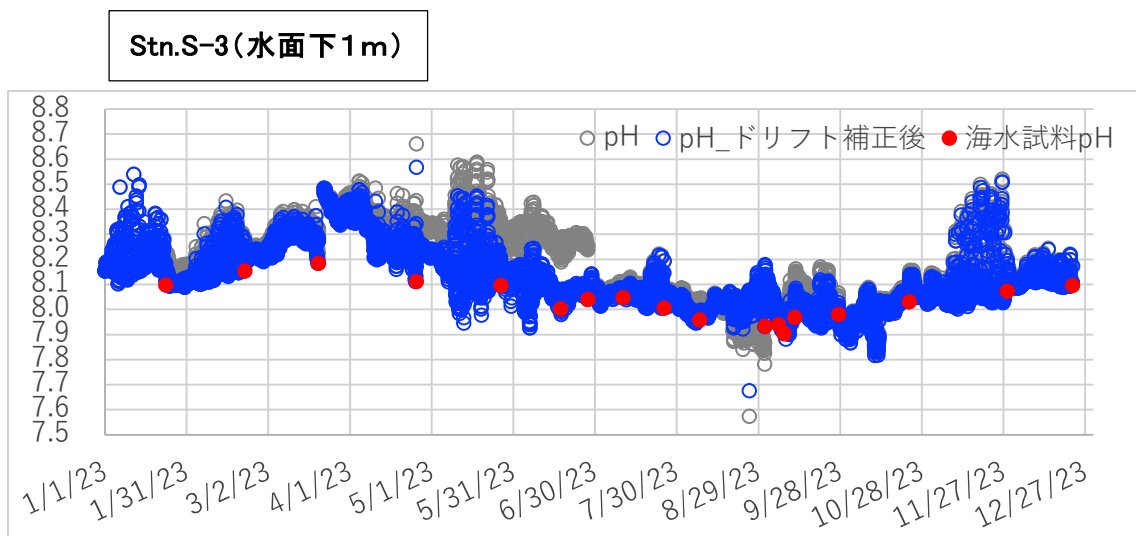
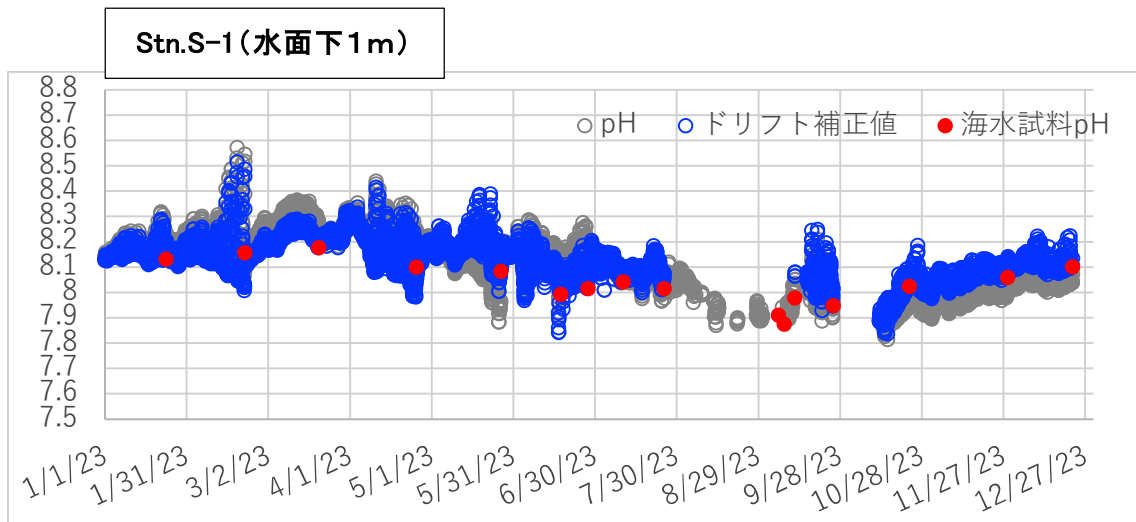


図 B-4. Stn.S-1 および S-3 における pH の連続観測結果

塩分の連続観測値より推定した表層のアラゴナイト飽和度 (Ω_{ara}) の値を図 B-5 に示した。6 月 16 日のまとまった降雨の後、一時的に1を下回るような値も見られたが、志津川湾では、ほとんどの期間でアラゴナイト飽和度は2を下回らないと推定された。

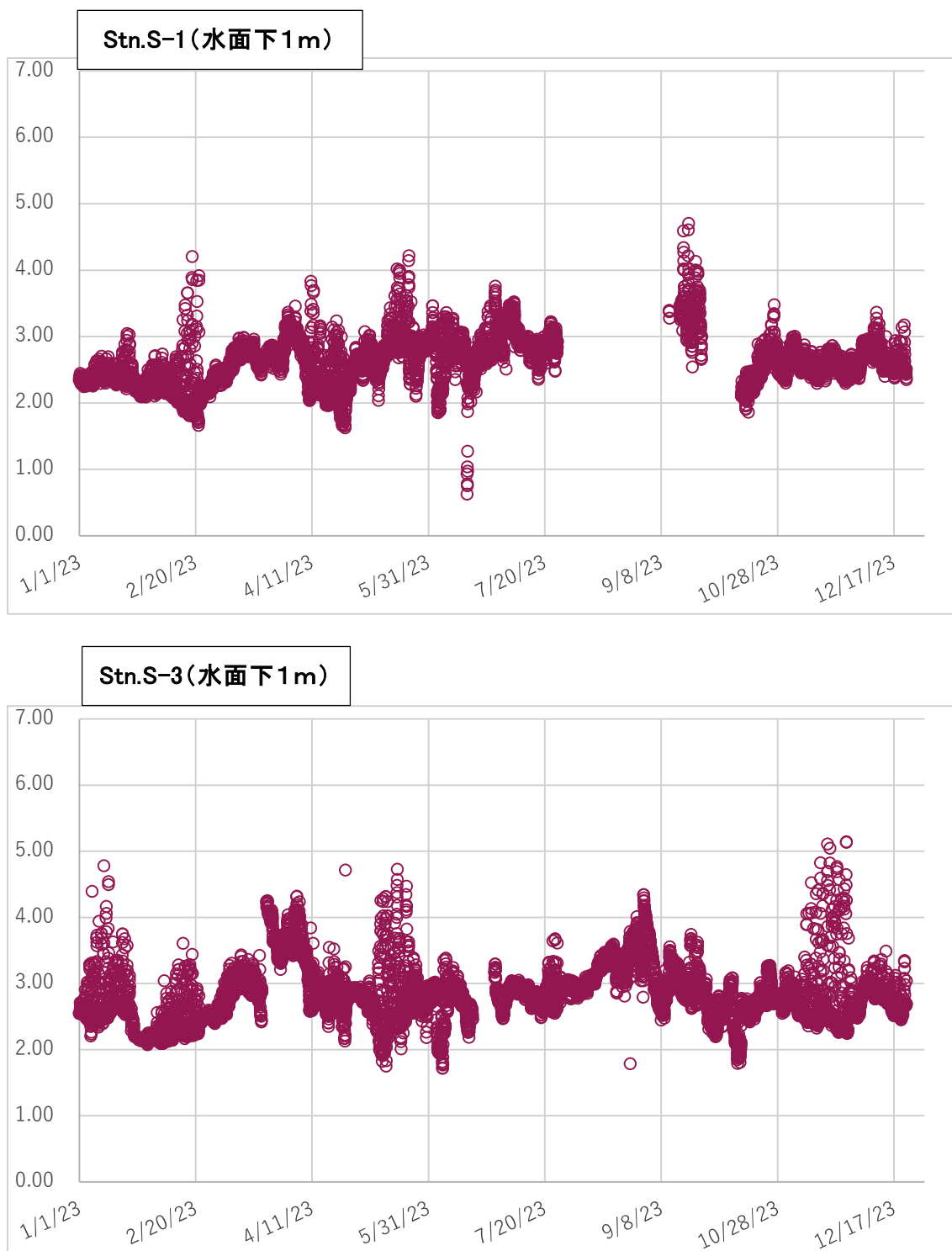


図 B-5. Stn.S-1 および S-3 における Ω_{ara} 推定値の推移

Stn.S-3 に設置した溶存酸素 (DO) 計及びクロロフィル・濁度計による計測結果を図 B-6 に示した。昨年度同様、掃除の直前にクロロフィル濃度が上がり続けるという異常な挙動が見られたが、これは設置用ロープに増殖した海藻のクロロフィルを拾っていたためとみられる。正しく計測されていれば、この海域ではクロロフィル濃度が $5 \mu\text{g/L}$ を上回るようなことはそれほど多くないと推察された。溶存酸素については、2023 年 10 月 1 日の 6.62mg/L から 2023 年 3 月 31 日の 13.77mg/L の間で推移した。3 月から 4 月にかけて高く、その後変動しながら 10 月にかけて下がっていく様子が観測された。

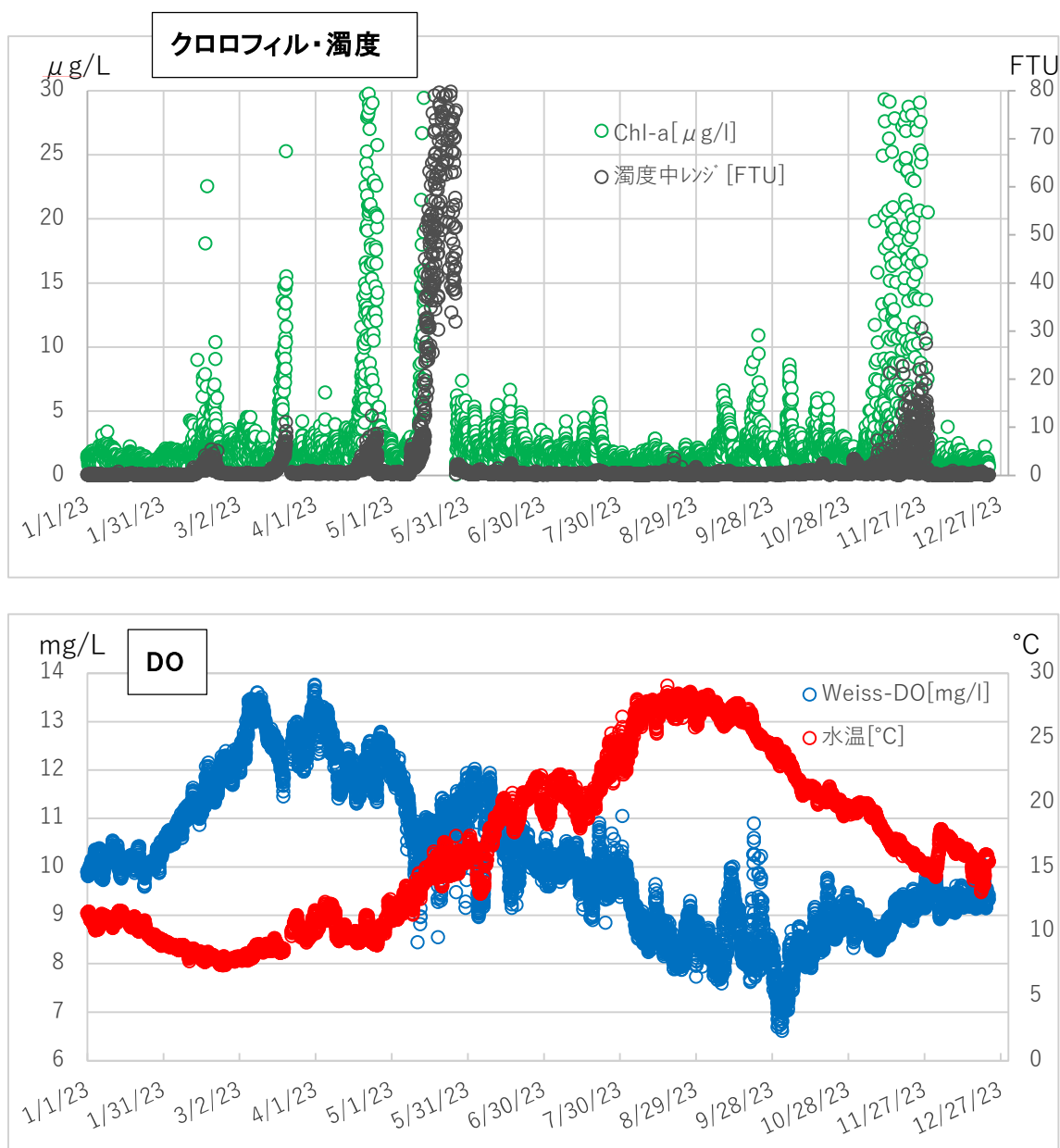


図 B-6. Stn.S-3 におけるクロロフィル・濁度, DO の連続観測結果

B.2. 定点定期観測および採水分析

(1) 観測方法

志津川湾において設けた Stn.S-1:淡水供給地点、Stn.S-3:カキの採苗場の2定点において、実施計画書に基づき、観測を実施した(図 B-1)。

定期的な調査として、多項目水質計 RINKO-Profilier ASTD102 (JFE Advantech Co.,Ltd.: D, T, Sal, Chl, DO) と HOBO MX2501 pH・温度データロガー (Onset Computer Corporation: pH)を用いた現地観測と、採水調査を行った。採水はニスキン採水器(GENERAL OCEANICS, INC. 8L)を用い、Stn.S-1 および Stn.S-3 の各表層(海面下 1.0m)と底層(海底面上 1.0 m)にて実施した。採水サンプルの処理は p.39-40「酸性化モニタリングのサンプルの採水方法と保存方法」に従った。

採水調査の分析項目は、全炭酸(DIC)、全アルカリ度 (TA)、塩分(Sal)、栄養塩(NP)、アラゴナイト飽和度 (Ω_{ara})である。栄養塩は宮城県水産技術総合センター気仙沼水産試験場に分析を依頼し、DIC、TA および Sal については、JAMSTEC に送付し分析を行った。 Ω_{ara} は pH と TA から計算で求めた。7~9 月については月 2 回の頻度で、また、降雨直

表 B-3. 定期定点調査および採水実施日

	月日	降雨後	採水 (表層)	採水 (底層)	機器清掃	データ回収
2023 年	4/25		○	○	○	
	5/26		○	○	○	
	6/17	○	○		○	
	6/27		○	○	○	○
	7/10		○	○	○	
	7/25		○	○	○	
	8/7		○	○	○	
	8/31		○	○	○	
	9/5	○	○		○	
	9/7	○	○		○	
	9/11		○	○	○	
	9/25		○	○	○	○
	10/23		○	○	○	
	11/28		○	○	○	
	12/22		○	○	○	○
2024 年	1/29		○	○	○	
	2/22		○	○	○	
	3/21		○	○	○	○

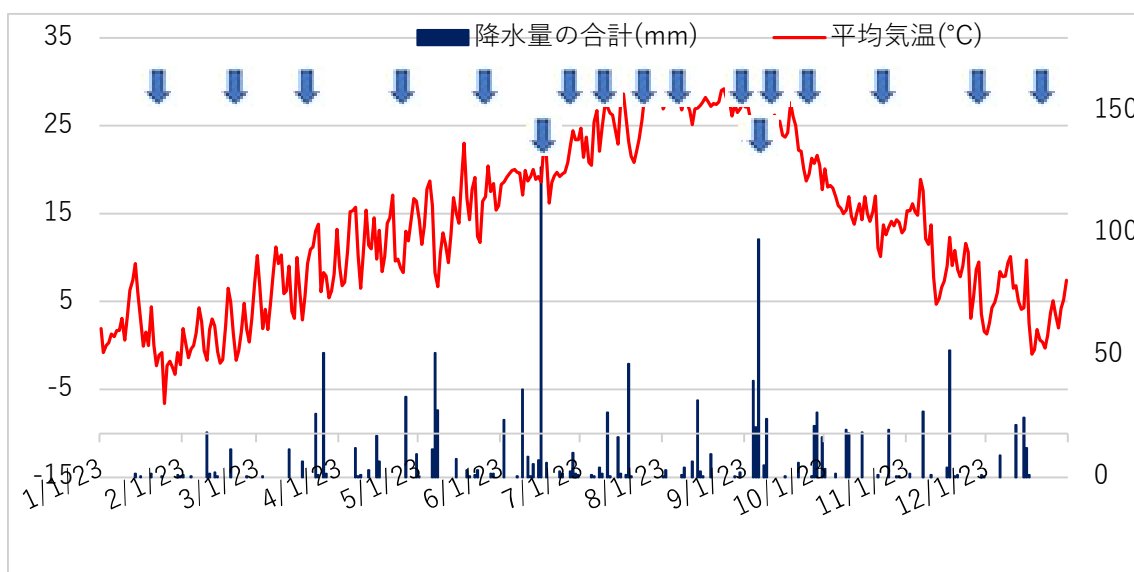


図 B-7. 志津川湾における採水日と日平均気温・降水

後のサンプリングを3回実施した(表1)。調査日と志津川で記録された降水量・平均気温は図 B-7 のとおり。なお、調査は、南三陸町自然環境活用センターの全面的な協力のもとに実施した。

(2) 観測結果

調査結果については、「海洋酸性化適応プロジェクト(OAAP)におけるデータ整理及び初期解析方法の統一について」に従い、2023年1月から12月までの観測結果を整理した。

毎月の計測で湾内の水温・塩分・水質の変化の様子が明らかとなった。

採水したサンプルの分析結果を図 B-8~10 に示した。塩分(Salinity)は Stn.S-1 表層では 33.10 から 33.97、底層では 32.43 から 34.04 の間で、Stn.S-3 表層では 31.60 から 34.45、底層では 33.29 から 34.40 の間で推移した。アルカリ度(TA)は Stn.S-1 表層では 2087.5 μ mol/kg から 2263.2 μ mol/kg、底層では 2167.3 μ mol/kg から 2268.7 μ mol/kg の間で、Stn.S-3 表層では 2101.2 μ mol/kg から 2267.7 μ mol/kg、底層では 2189.8 μ mol/kg から 2274.1 μ mol/kg の間で推移した。溶存無機炭素(DIC)は Stn.S-1 表層では 1871.7 μ mol/kg から 2067.9 μ mol/kg、底層では 1933.3 μ mol/kg から 2066.5 μ mol/kg の間で、Stn.S-3 表層では 1876.5 μ mol/kg から 2060.4 μ mol/kg、底層では 1973.9 μ mol/kg から 2077.9 μ mol/kg の間で推移した。pCO₂ は Stn.S-1 表層では 278.3 から 606.1、底層では 294.5 から 494.1 の間で、Stn.S-3 表層では 271.1 から 557.0、底層では 294.6 から 696.4 の間で推移した。pH は Stn.S-1 表層では 7.88 から 8.18、底層では 7.95 から 8.15 の間で、Stn.S-3 表層では 7.90 から 8.19、底層では 7.83 から 8.15 の間で推移した。カルサイト飽和度(Ω_{cal})は Stn.S-1 表層では 3.30 から 4.27、底層では 3.21 から 4.43 の間で、

Stn.S-3 表層では 3.37 から 4.18、底層では 3.06 から 4.05 の間で推移した。アラゴナイト飽和度 (Ω_{ara}) は Stn.S-1 表層では 2.09 から 2.81、底層では 2.07 から 2.93 の間で、Stn.S-3 表層では 2.14 から 2.75、底層では 1.96 から 2.66 の間で推移した。アラゴナイト飽和度が 2 を下回ったのは、2023/9/25 の Stn.S-3 底層で記録した 1.96 の一度だけであった。

栄養塩の測定結果を図 B-11 に示した。三態窒素については、Stn.S-1 では 2023 年 1 月 23 日の底層で記録した 52.25 mg/L が最も高く、Stn.S-3 では 2023 年 9 月 11 日の底層で記録した 120mg/L が最も高値であった。リンに関してはいずれも 2023 年 9 月 7 日に記録した Stn.S-1 表層の 33.78 mg/L、Stn.S-3 表層の 36.6 mg/L が最も高い値であった。2023 年 9 月 5 日および 9 月 7 日の降雨後のサンプルでは、Stn.S-1 と Stn.S-3 の双方で表層のリンが 3 態窒素よりも大きな値を示しているのが特徴的であった。また 7 月から 8 月にかけては、全体的に栄養塩が枯渇する傾向にあるのが見て取れた。

採水時に各ステーションで計測した CTD データは、共通最深層として、Stn.S-1 は 2.2m、Stn.S-3 は 13.8m の水深における各項目の値をグラフ化して整理した(図 B-12~17)。Stn.S-1 の水温は、2023 年 2 月 21 日の 8.23°C が最低であり、2023 年 9 月 11 日の 26.12°C が最高であった。塩分は 2023 年 7 月 25 日の 32.67 から 2023 年 12 月 22 日の 34.04 まで変化した。クロロフィル濃度については、2023 年 3 月 20 日の 0.16 μ g/L が最低であり、2023 年 9 月 11 日の 7.57 μ g/L が最大であった。濁度は 2023 年 1 月 23 日の 0.42 から 2023 年 6 月 27 日の 4.65 まで変化した。溶存酸素(DO)は 2023 年 9 月 7 日の 5.24mg/L が最低であり、2023 年 4 月 25 日の 10.05 が最大であった。pH の最低値は DO の最低値と同様、2023 年 9 月 7 日に記録した 7.88 であり、最大は 2023 年 2 月 21 日の 8.17 であった。Stn.S-3 については、水温は 2023 年 2 月 21 日の 7.71°C が最低であり、2023 年 8 月 31 日の 24.39°C が最高であった。塩分は 2023 年 8 月 7 日の 33.25 から 2023 年 12 月 22 日の 34.41 まで変化した。クロロフィル濃度については、2023 年 1 月 23 日および 2023 年 12 月 22 日に記録した 0.6 μ g/L が最低であり、2023 年 4 月 25 日の 4.73 μ g/L が最大であった。濁度は 2023 年 12 月 22 日の 0.23 から 2023 年 6 月 17 日の 6.64 まで変化した。溶存酸素(DO)は 2023 年 9 月 7 日の 4.14mg/L が最低であり、2023 年 2 月 21 日の 9.62 が最大であった。pH の最低値は DO の最低値と同様、2023 年 9 月 7 日に記録した 7.80 であり、最大は 2023 年 12 月 22 日の 8.20 であった。

水温および塩分の鉛直プロファイルの変化率から推定した混合層深度を図 B-18 に示した。Stn.S-1 および Stn.S-3 とも、成層が見られたのは 5 月から 9 月までの間であった。Stn.S-1 では 2023 年 9 月 5 日のみ水深 3m に混合層深度があったが、それ以外の 5 月から 9 月までは水深 1m に混合層深度があった。Stn.S-3 では 2023 年 9 月 25 日の 11m が最も深い混合層深度であり、それを除くと 5 月から 9 月の間の混合層深度は水深 1~2m であった。10 月から 4 月までの間は鉛直混合により、水面から海底までの水温差がほとんどない状態であった。

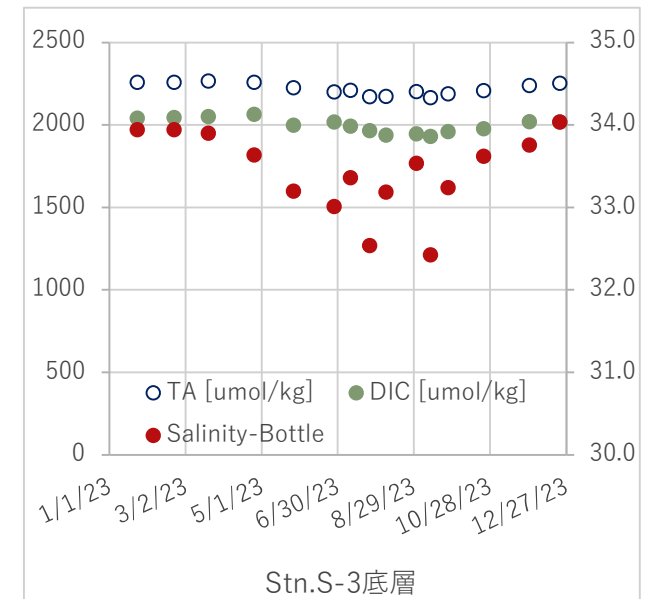
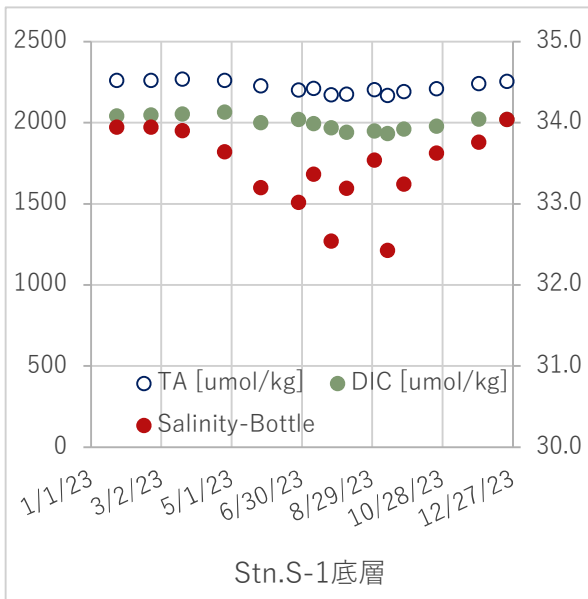
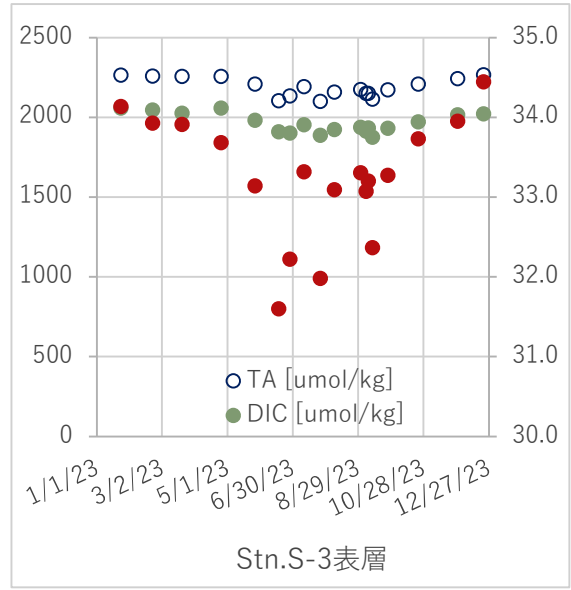
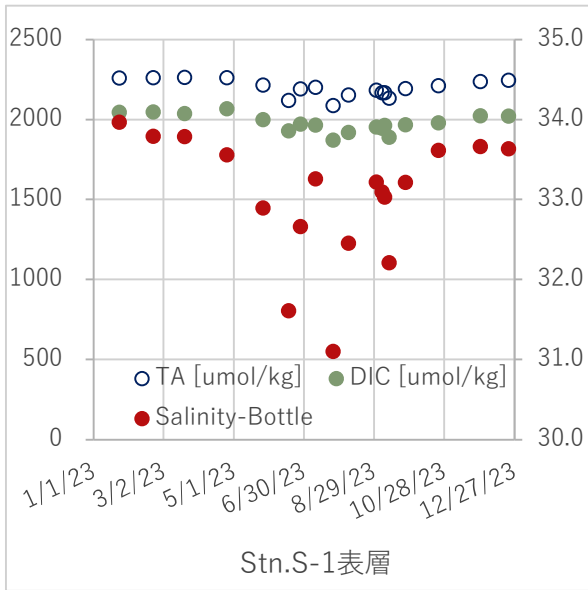


図 B-8. 志津川湾における採水調査結果 (TA、DIC、Salinity)

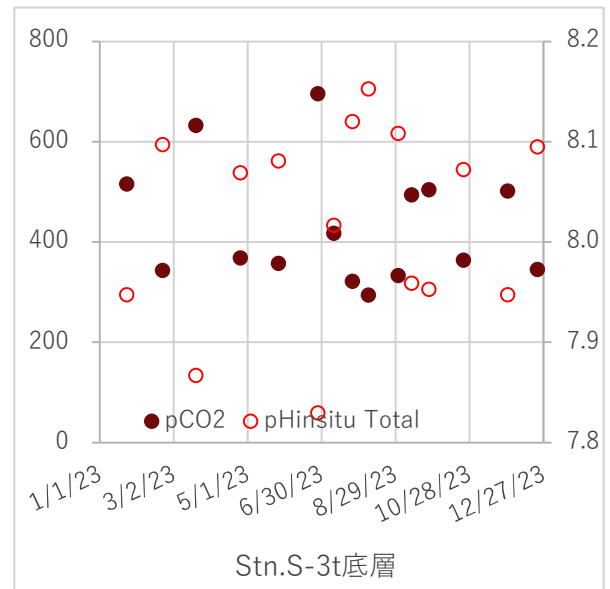
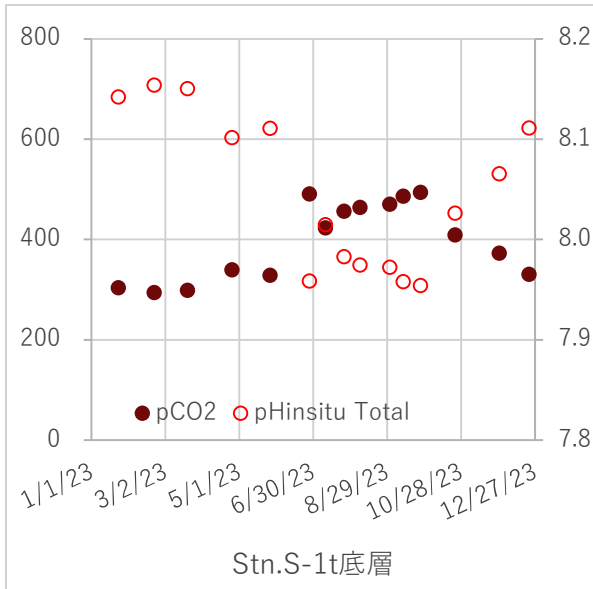
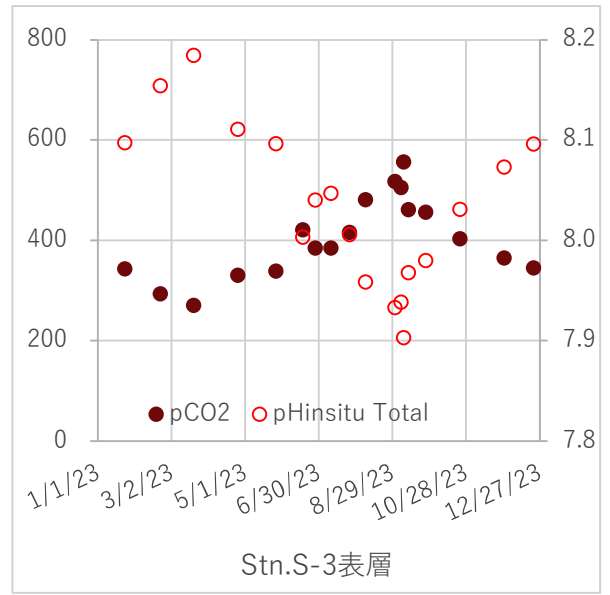
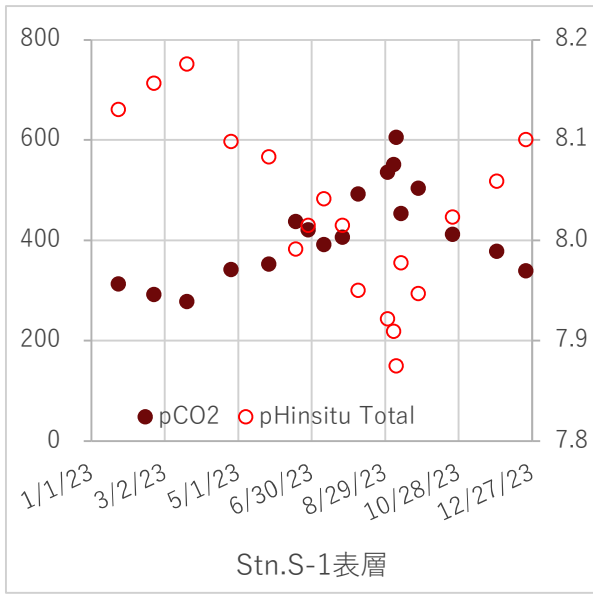


図 B-9. 志津川湾における採水調査結果(pCO₂、pH)

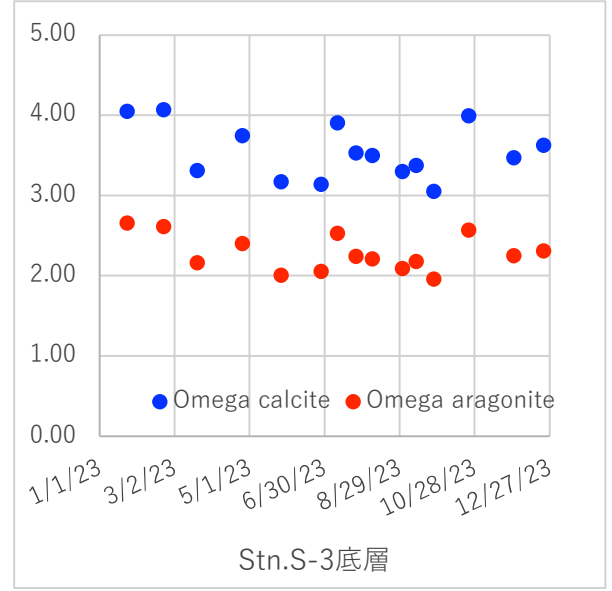
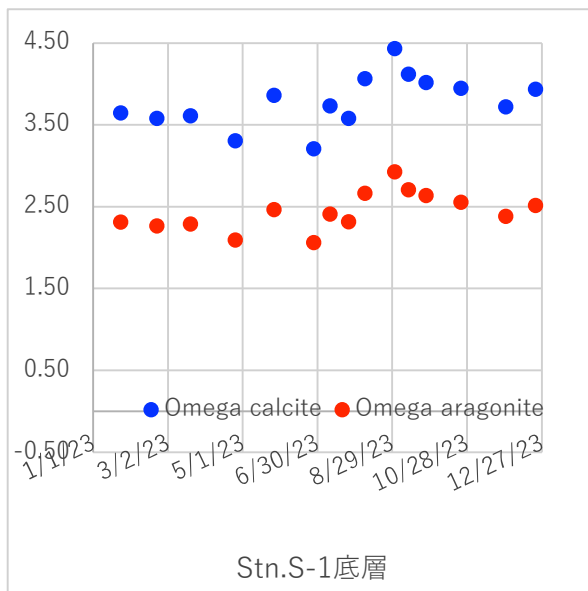
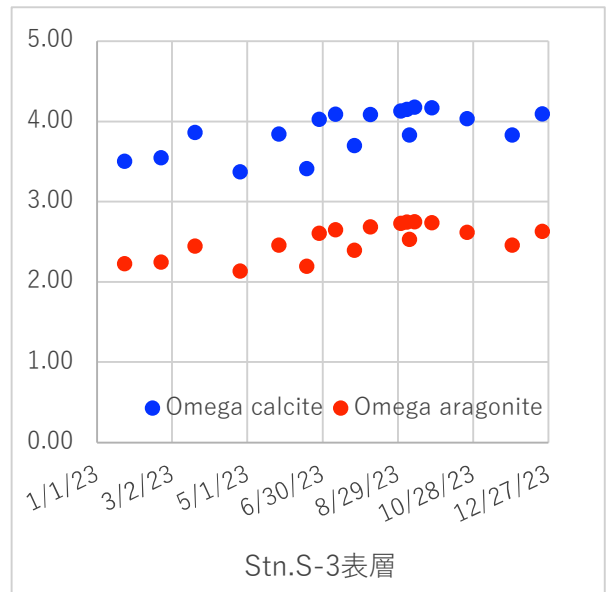
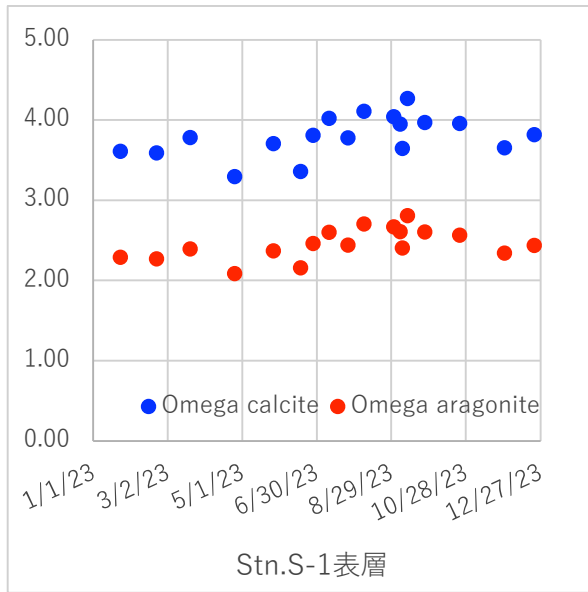


図 B-10. 志津川湾における採水調査結果 (Ω_{cal} 、 Ω_{ara})

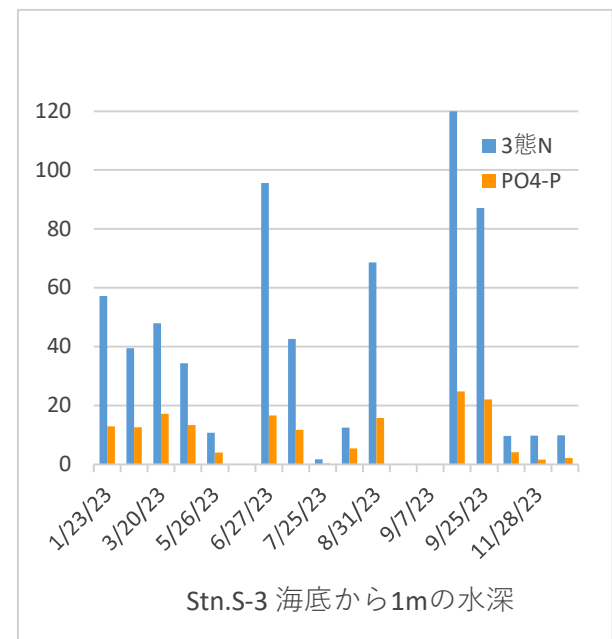
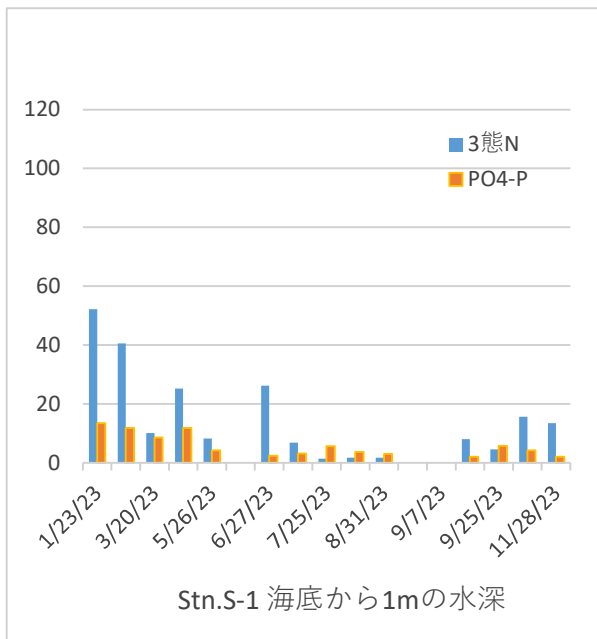
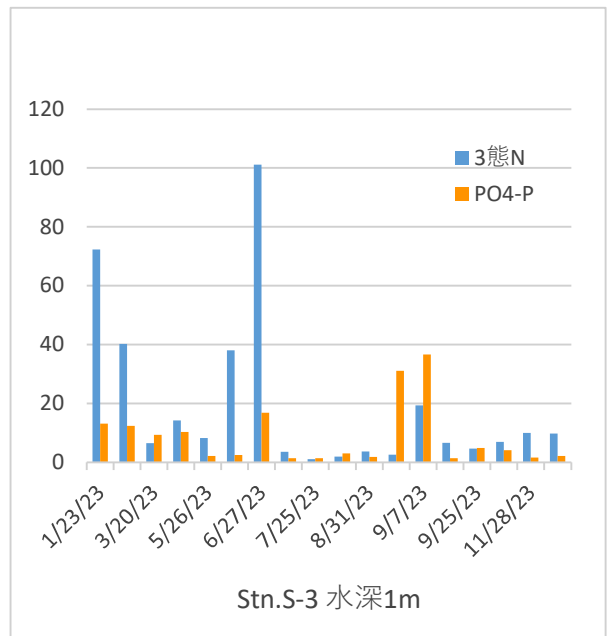
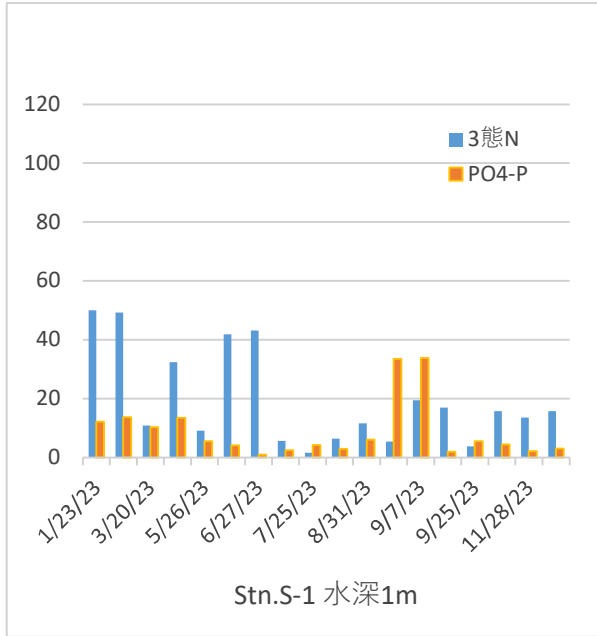


図 B-11. 志津川湾における栄養塩観測結果

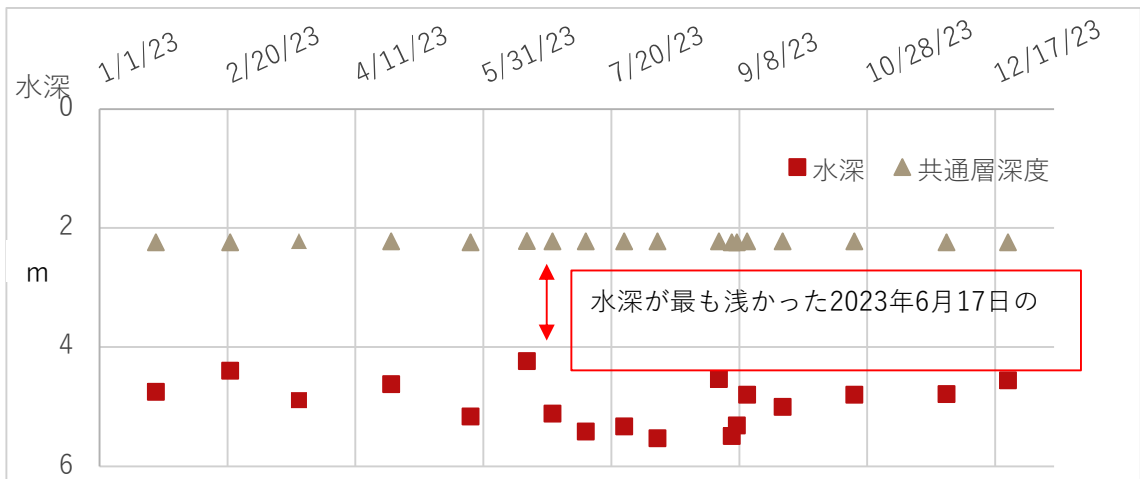


図 B-12. 共通最深層における CTD 観測結果 (Stn.S-1)

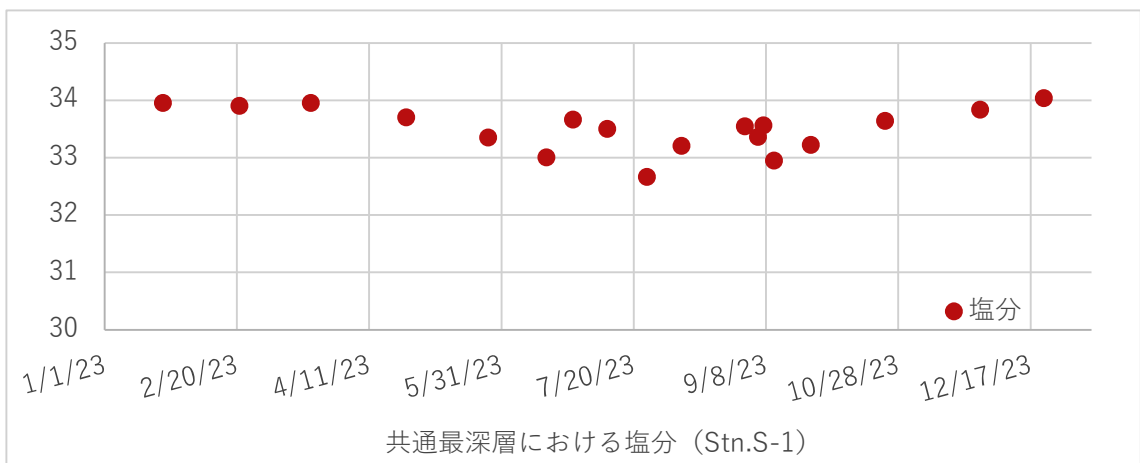
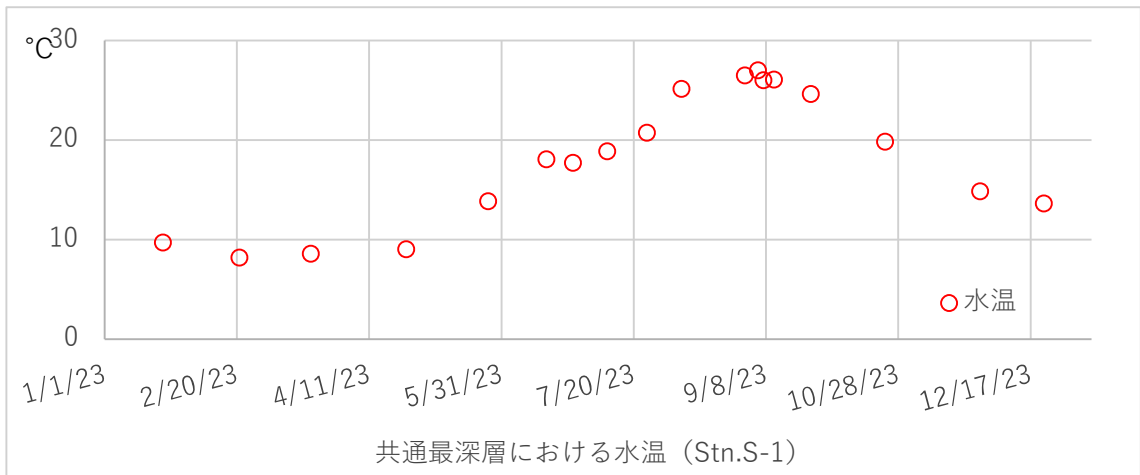


図 B-13. 共通最深層における CTD 観測結果 (Stn.S-1)

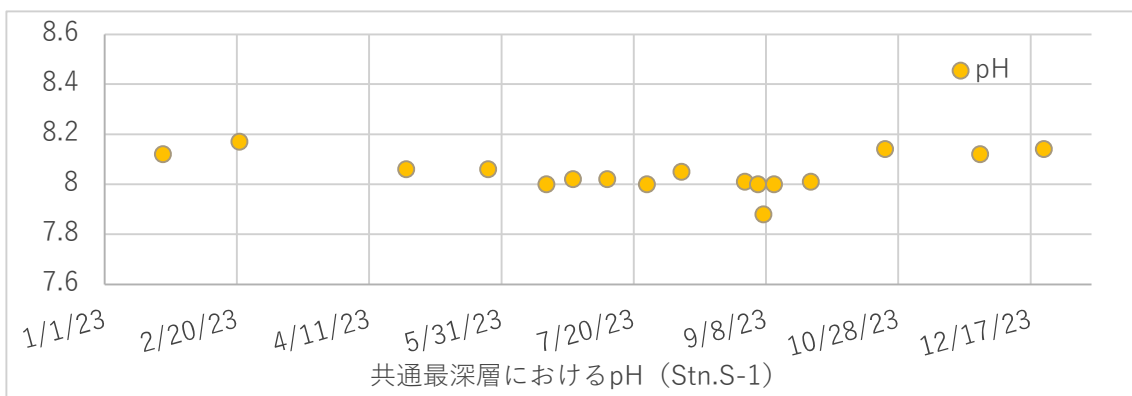
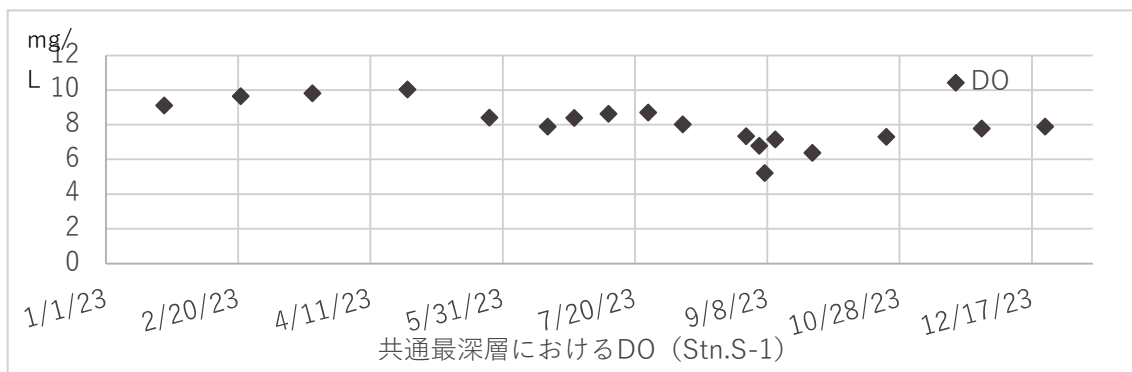
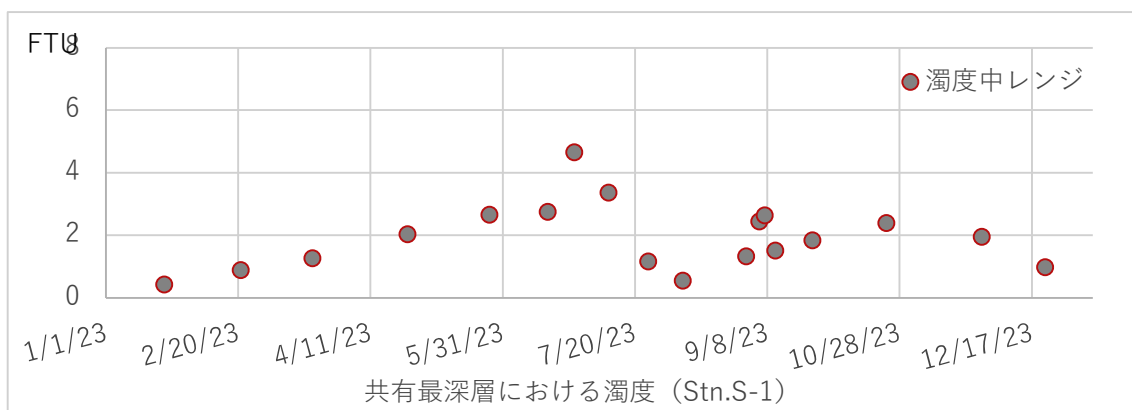
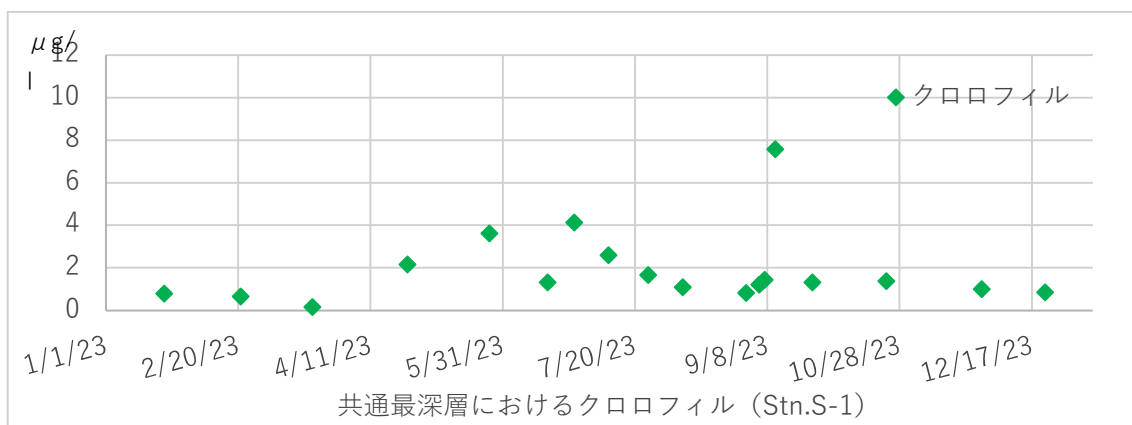


図 B-14. 共通最深層における CTD 観測結果 (Stn.S-1)



図 B-15. Stn.S-3 の共通最深層深度

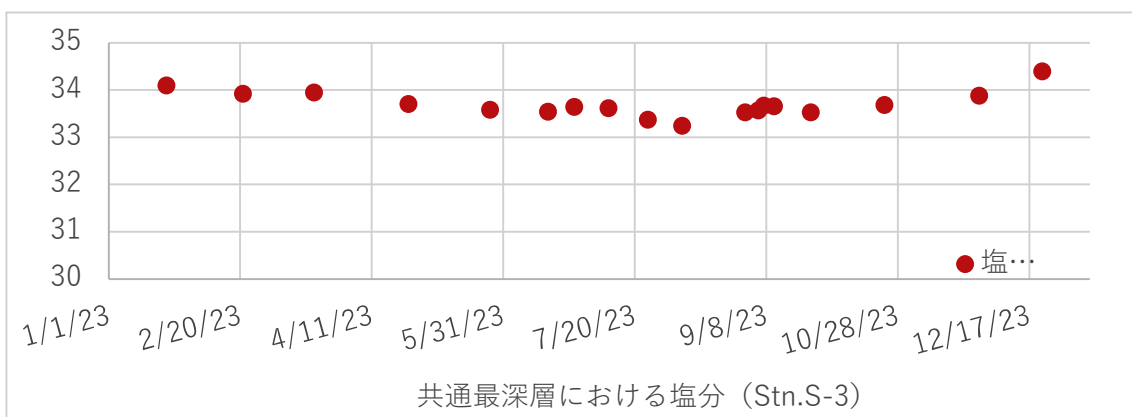
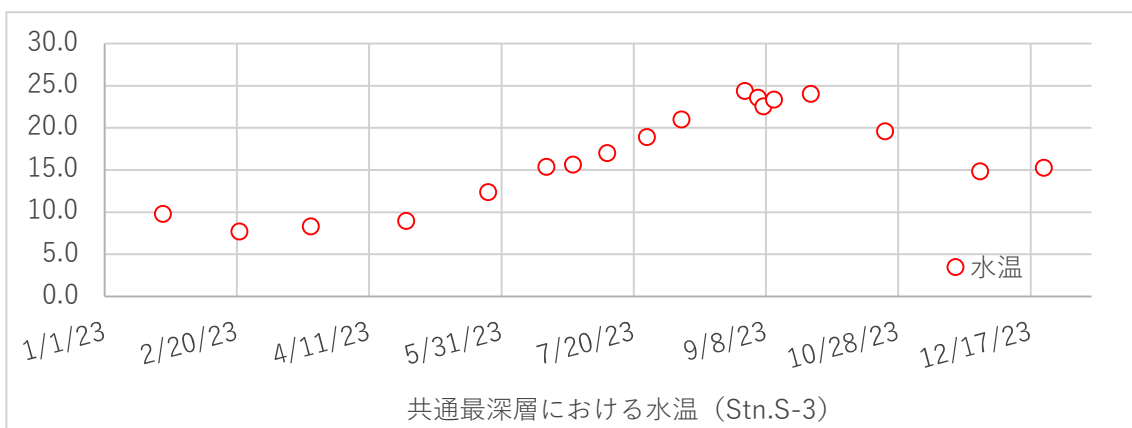


図 B-16. 共通最深層における CTD 観測結果 (Stn.S-3)

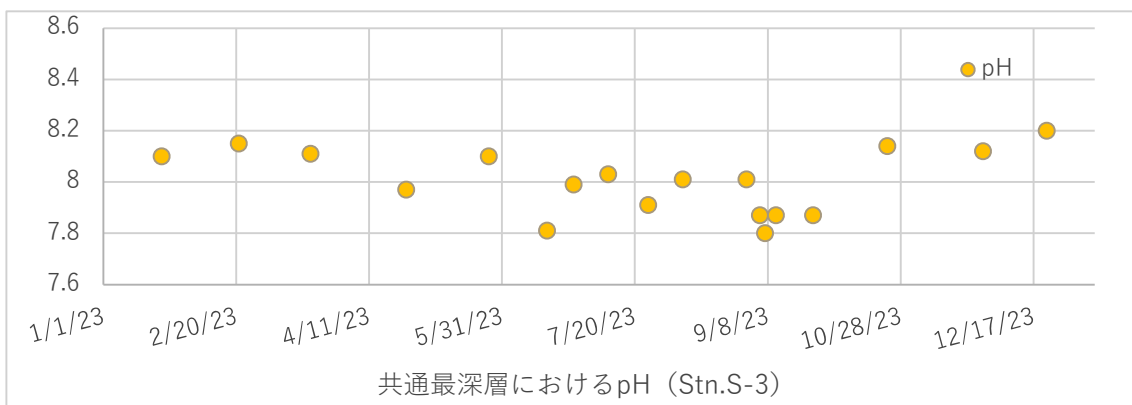
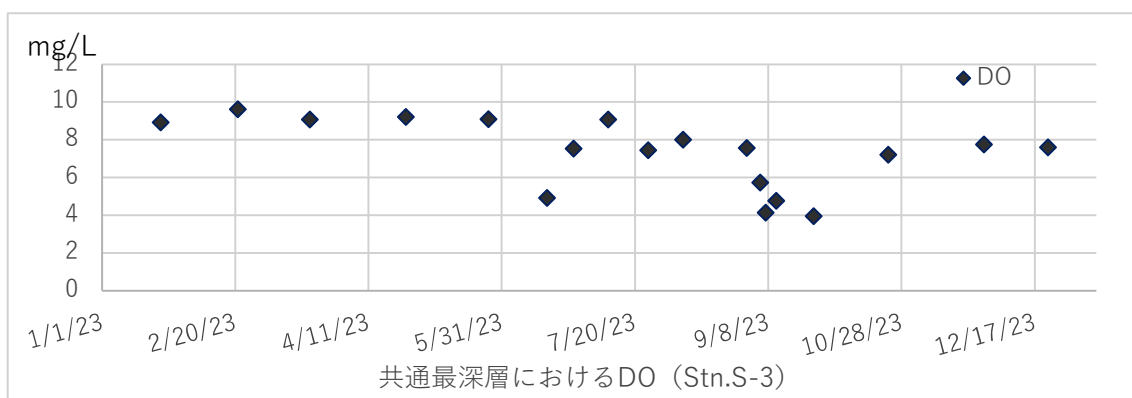
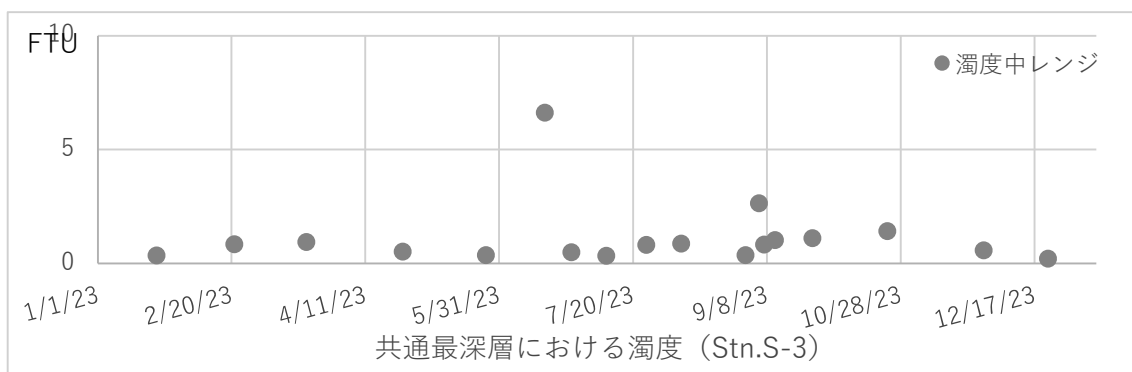
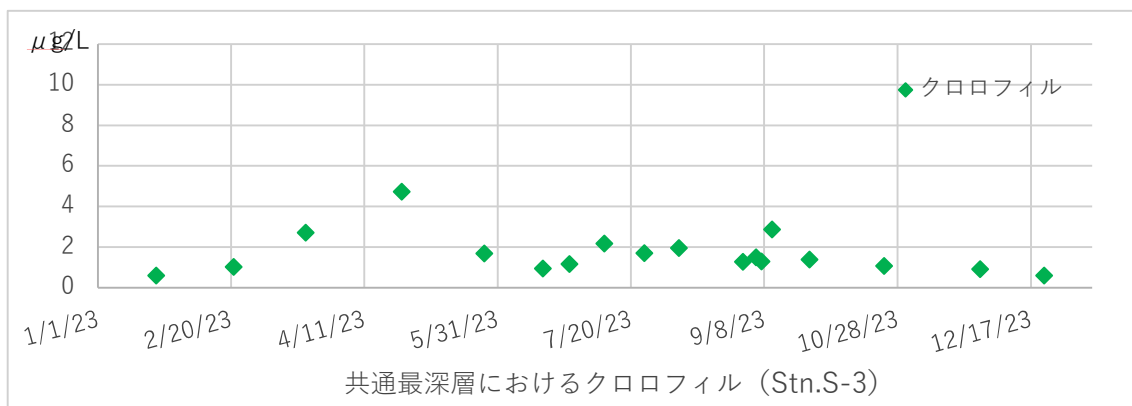


図 B-17. 共通最深層における CTD 観測結果 (Stn.S-3)

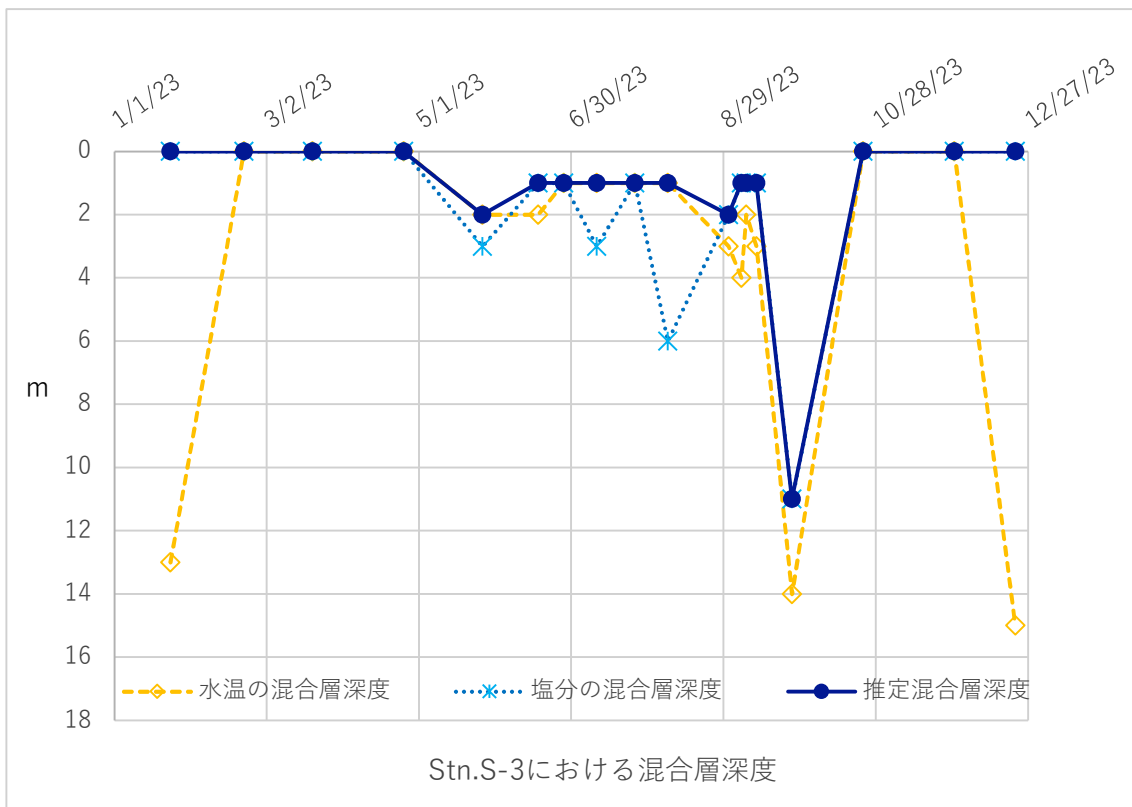
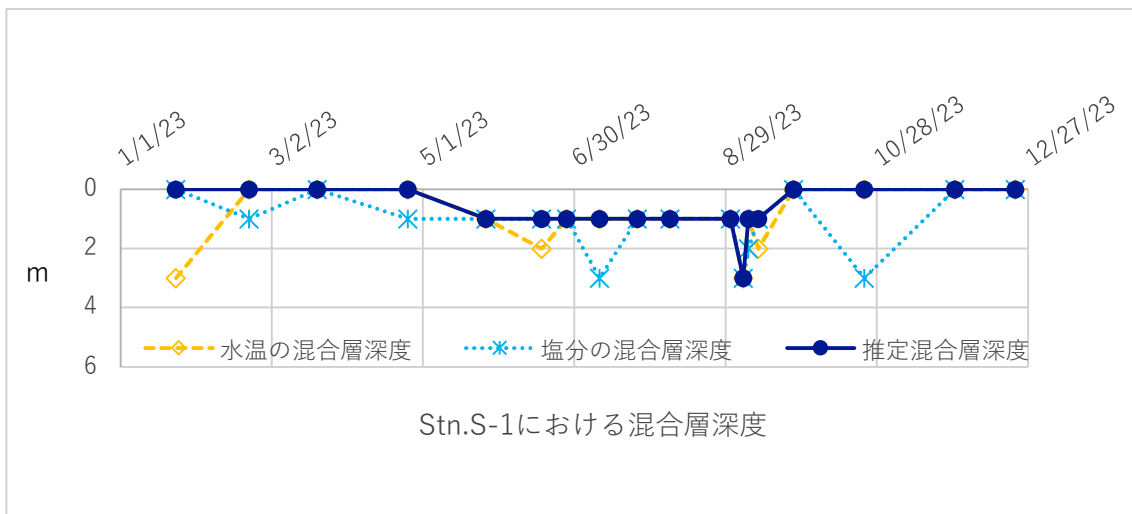


図 B-18. 混合層深度の推定

C. 広島県廿日市市地先(以下、廿日市)における海洋観測

C.1 定点連続観測

(1) 観測方法

廿日市市地先にある水産研究・教育機構水産技術研究所廿日市庁舎の敷地内観測サイトに Stn.HH-1:淡水供給源近傍(図 C.1:水深 5m)を設け、2021年6月22日に水面下1mに観測機器を設置し(表 C-1)水温・塩分、DO、クロロフィル・濁度を連続観測している。海底上1mには2022年8月26日に観測機器を設置し(表 C-1)水温・塩分、DO、クロロフィル・濁度、深度を連続観測を継続している。

表 C-1. 廿日市における連続観測定点と使用機器

観測定点	Stn.HH-1: 淡水供給源近傍	
測器設置位置	水面下1m	海底上1m
水温・塩分	ワイパ°式メモリー水温塩分計Infinity ACTW-USB(JFEアドバンテック(株))	
pH	海水用pHセンサーSPS-14 (紀本電子工業(株))	HOBO BLE pH/温度pH- MX2501 (Onset社製)
クロロフィル濁度	ワイパ°式メモリークロロフィル濁度計Infinity ACLW-USB(JFEアドバンテック(株))	
DO	ワイパ°式メモリー溶存酸素計 Infinity AROW-USB(JFEアドバンテック(株))	
深度	—	深度計DEFI2-D10(JFEアドバンテック)



図 C-1. 廿日市における観測定点 Stn.HH-1

原則として1カ月に1~4回の観測機器に付着した生物の除去等の清掃と3カ月に1回のデータ回収を行うとともに、pHセンサーについては3カ月に1回程度の頻度で人工海水を用いたセンサーの校正作業を行った。また、すべての観測機器について、3カ月ごとに電池を交換した。これまでに得られたデータのうち2023年1月~12月について整理、解析を行った。

付着生物の着生は夏季に多く、冬季に少ない傾向であった。表ではセンサー部分を中心に週1~2回、底層は月1回程度の掃除が必要であった。

2023年6月16日



2023年9月14日



図 C-2. 観測センサーへの生物付着状況

(2) 観測結果(図 C-3, C-4)

2023年1月1日~2023年12月27までの表層水温は9.54~29.94℃、底層水温は9.98~29.63℃であった。表層水温の積算水温が、マガキ産卵の目安とされる600℃を超えたのは2023年6月10日であった。

表層塩分は9.38~32.62、底層塩分は17.39~33.68で、特に表層ではまとまった降雨の後に顕著に低下した

表層クロロフィルは0.52~200.50、底層クロロフェイルは0.85~27.93で、表層では5月と7月、底層では7~8月と9月にピークが認められた。

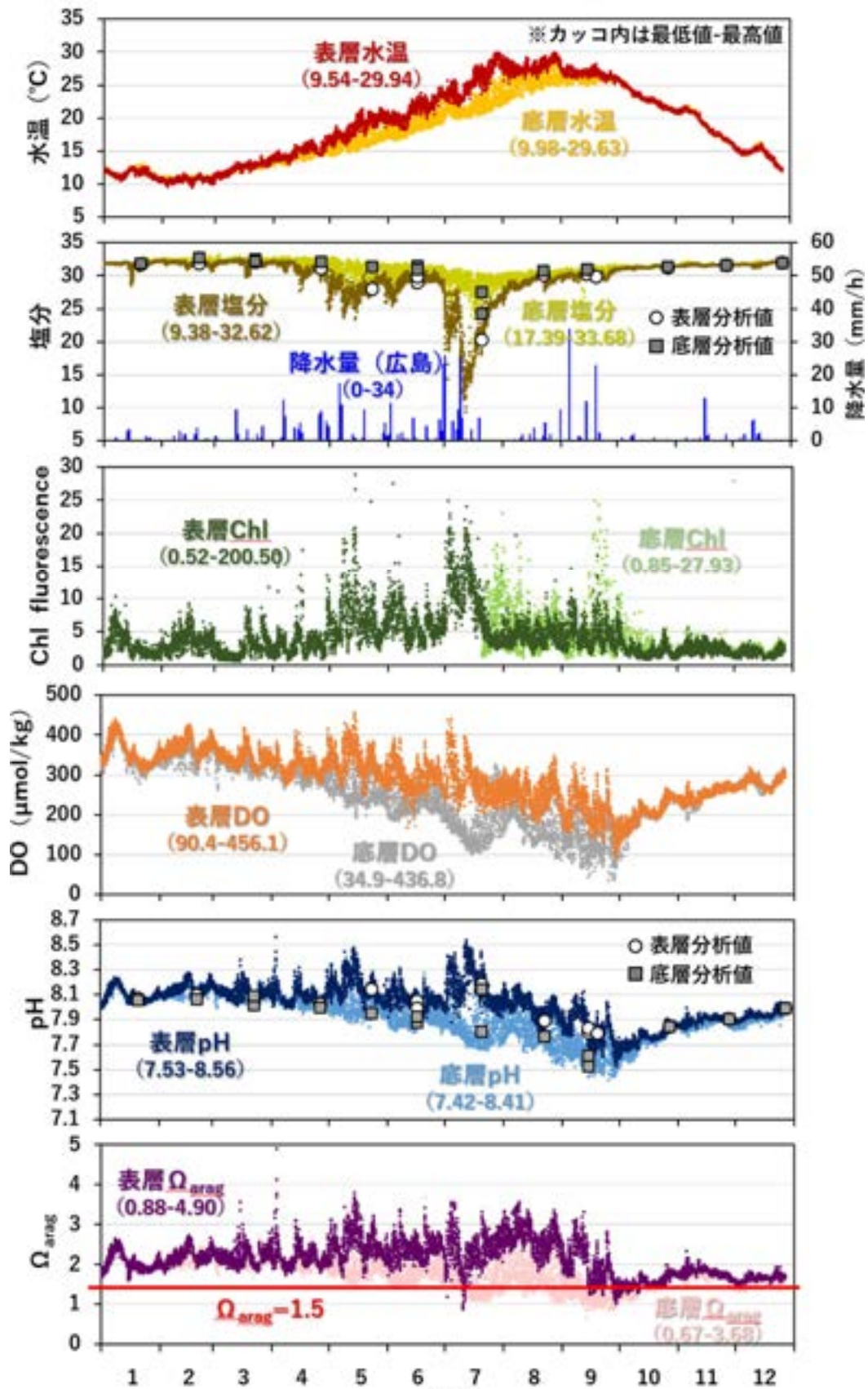


図 C-3. Stn.HH-1 における連続観測結果(2023 年 1 月 1 日～2023 年 12 月 27 日)

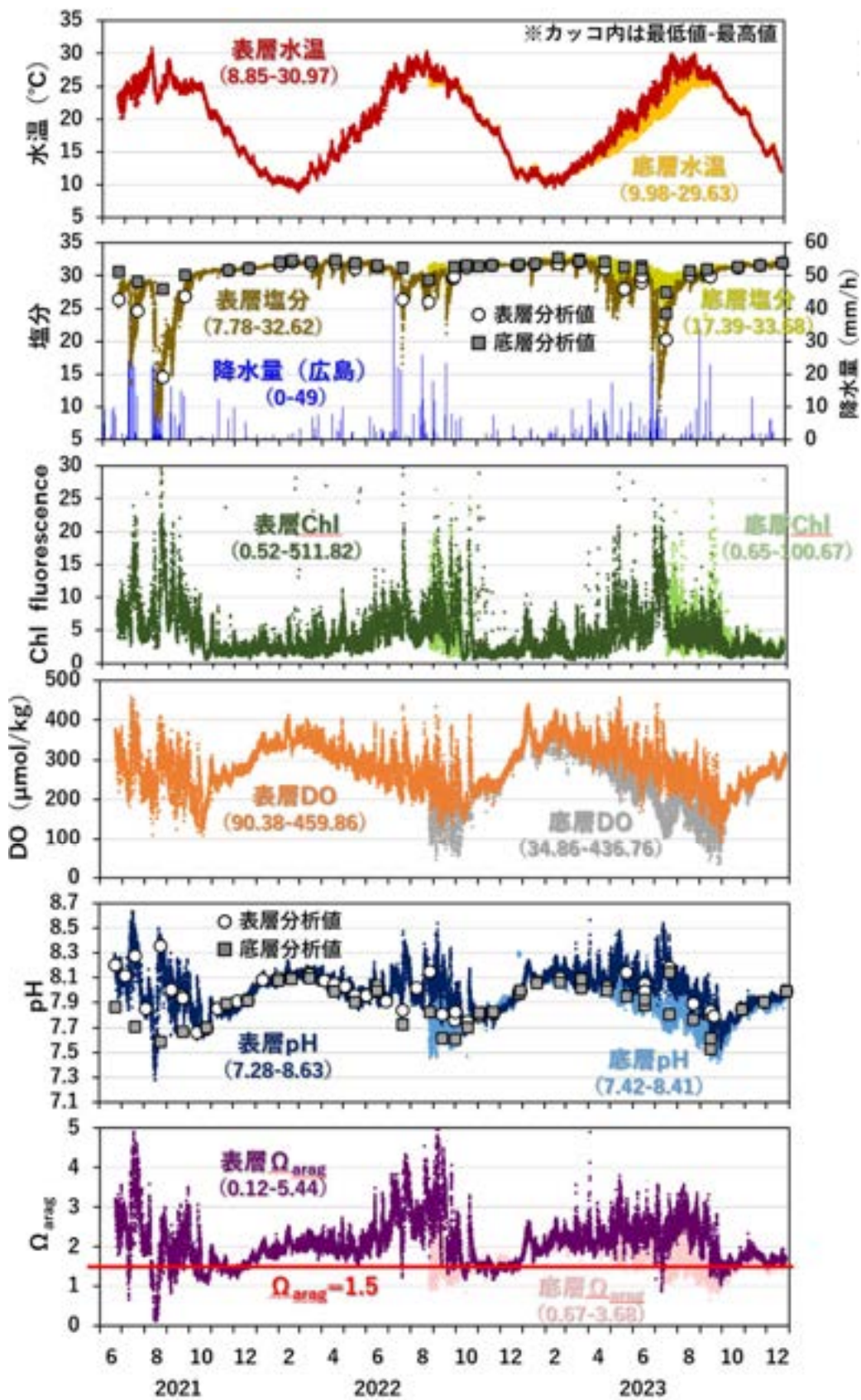


図 C-4. Stn.HH-1 における連続観測結果(2021年6月~2023年12月)

表層 DO は 90.43~456.1 μ mol、底層 DO は 34.9~436.8 μ mol で、底層 DO は 8~9 月にかけて低い値を示した。

表層 pH は 7.53~8.56 で最低値は 7.6 を下回り、7~9 月の塩分低下時と 10~11 月の DO 低下時に著しく低下した。底層 pH は 7.42~8.41 と最低値は 7.5 を下回ったが、pH 低下時には DO の低下が伴った

表層 Ω_{arag} は 0.88~4.90 で、1.5 を下回ったのは 7 月の塩分低下時と 9~10 月の DO 低下時であった。

C.2. 廿日市における定点定期観測および採水分析

H. 広島市地先海面における定点定期観測

(1) 観測方法

2023 年 1 月~2023 年 12 月まで、廿日市 HH-1(図 C.1)において、毎月 1 回、多項目水質計 AAQ-RINKO(JFE アドバンテック株)を使用し、水温 T・塩分 S、DO、pH、クロロフィル Chl・濁度を測定して解析し、定点の海域特性や季節変化等を把握した。AAQ-RINKO については事前に pH センサーの保護キャップ中を人工海水に入れ替え、観測当日に人工海水(TRIS・AMP)の pH 値で補正し、観測後には洗浄してから保護キャップ中に KCL 溶液を入れて保管した。

また、2022 年 6 月~2022 年 3 月まで、上記の定点観測に併せて毎月 1 回、表層(1.0m)と底層(海底面上 1.0 m)でニスキン採水器を用いて採水し、分析用サンプルとして国立研究開発法人 JAMSTEC に発送した。採水方法等は p.39-40「酸性化モニタリングのサンプルの採水方法と保存方法」に従った。JAMSTEC においては、滴定法など標準手法を用いて塩分(S)、溶存態無機炭素(DIC)、全アルカリ度 (A_T)を分析し、これらの数値からアラゴナイト飽和度(Ω_a)を算定した。また、測定された A_T と DIC を用いて、現場で計測された pH の事後校正を行った。鉛直観測データは 0.1m ごとのデータを、調査日ごとにエクセルファイルに整理した。pH は毎回人工海水で補正した(図 C-4)。塩分については、分析値とセンサー値の回帰式を用いて 3 カ月ごとに補正し、全アルカリ度 TA は塩分と TA の分析値で求めた回帰式(図 C-5)を用いて算出した。pH については、分析値を用いてセンサー値とのずれを補正した。 Ω_{arag} は、CO₂Sysv2.3.xls にこれらのデータと水温、深度、TP(DIP 濃度)、TSi(DSi 濃度)を入力して算出した。

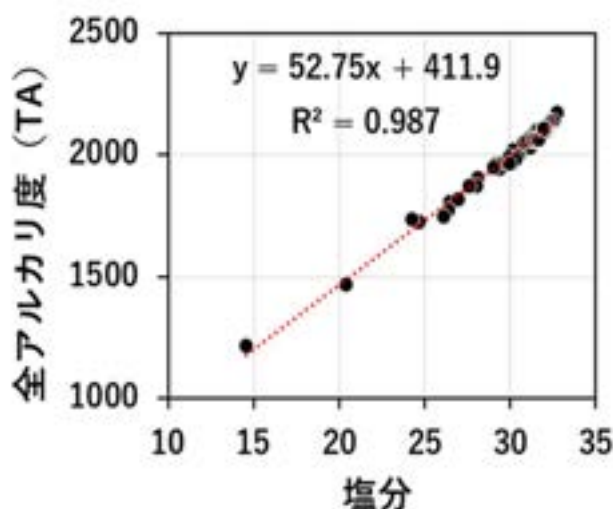


図 C-5. Stn.HH-1 における全アルカリ度 TA と塩分の分析値から求めた回帰式

栄養塩の分析については、水産研究・教育機構 水産技術研究所廿日市庁舎において行った。採水サンプルを0.45 μ mのフィルターで濾過後、-20 $^{\circ}$ C以下で冷凍保存し、後日にQuAAtro39(ビーエルテック)を用いて分析した。

【広島市農林水産振興センターによる水質鉛直分布観測】

2023年5月～2024年2月まで毎月1回、広島市農林水産振興センターが広島湾北部海域の3点、津久根、金輪西、三高(図 C-5)において実施した表層～海底直上までの鉛直分布観測のデータの提供を受け、廿日市 HH-1(図 C.1)において得られたデータとともに整理解析した。広島湾北部の3つの観測点のうち、津久根と金輪西は一級河川の太田川河口部にあたり河川水の影響を強く受け、三高は河口部から約10km沖合に当たる場所である。太田川水系は、流域面積1,710km²、計画流量8,000m³/秒、瀬戸内海式気候で、雨量は5, 6, 7月(梅雨時)と9月(秋雨・台風時)の二峰性である。



図 C-6. 広島市農林水産振興センターによる水質鉛直分布観測の概要

観測項目は T, S, Chl, DO, pH と廿日市と同じで、測器も多項目水質計 AAQ-RINKO (JFE アドバンテック(株))と同じものを用いたが、観測初日の5月29日にはpHセンサーの精度に不安があったため、pHのみ HOBO BLE pH/温度ロガーMX2501 (Onset 社製)を使用した。その後に、広島市農林水産振興センター所有の AAQ-RINKO と HOBO の測定結果を検証したところほぼ一致、水産技術研究所廿日市庁舎所有の AAQ-RINKO と同時測定して比較した結果、広島市農林水産振興センター所有の AAQ-RINKO とに深度が0.6不一致であったことが判明したため、深度補正の手法を統一し、6月以降の観測はpHも含めすべての項目について AAQ-RINKO のみを用いて観測した。



図 C-7. 太田川水系の概要

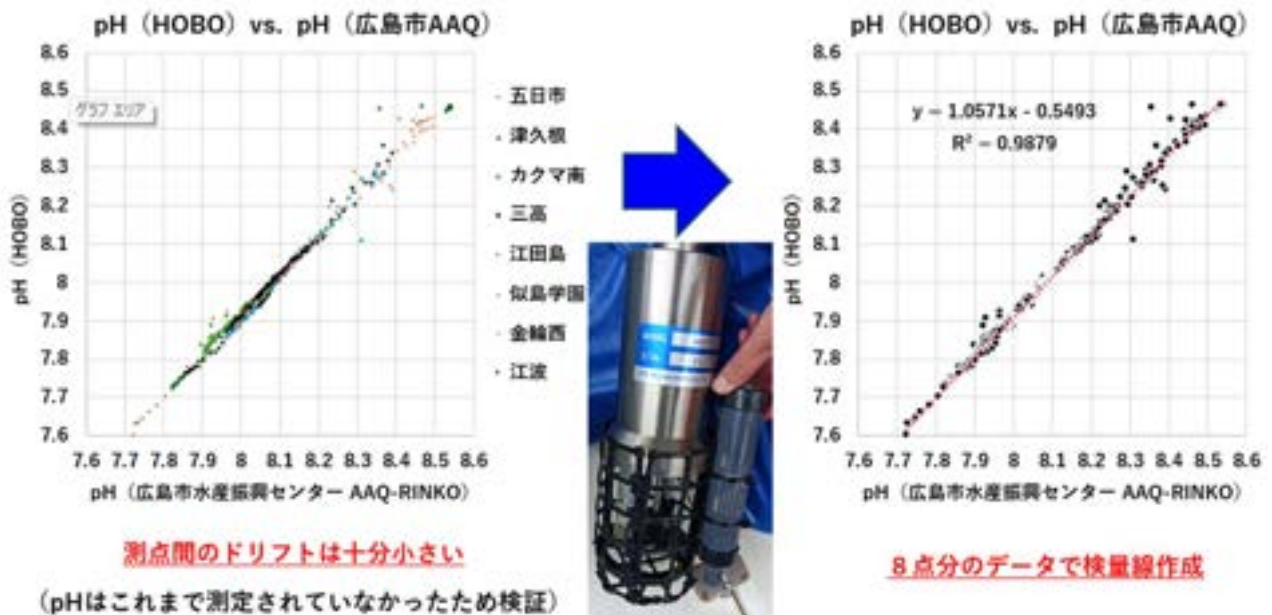


図 C-8. 2023年5月29日に実施した広島湾8定点の調査結果

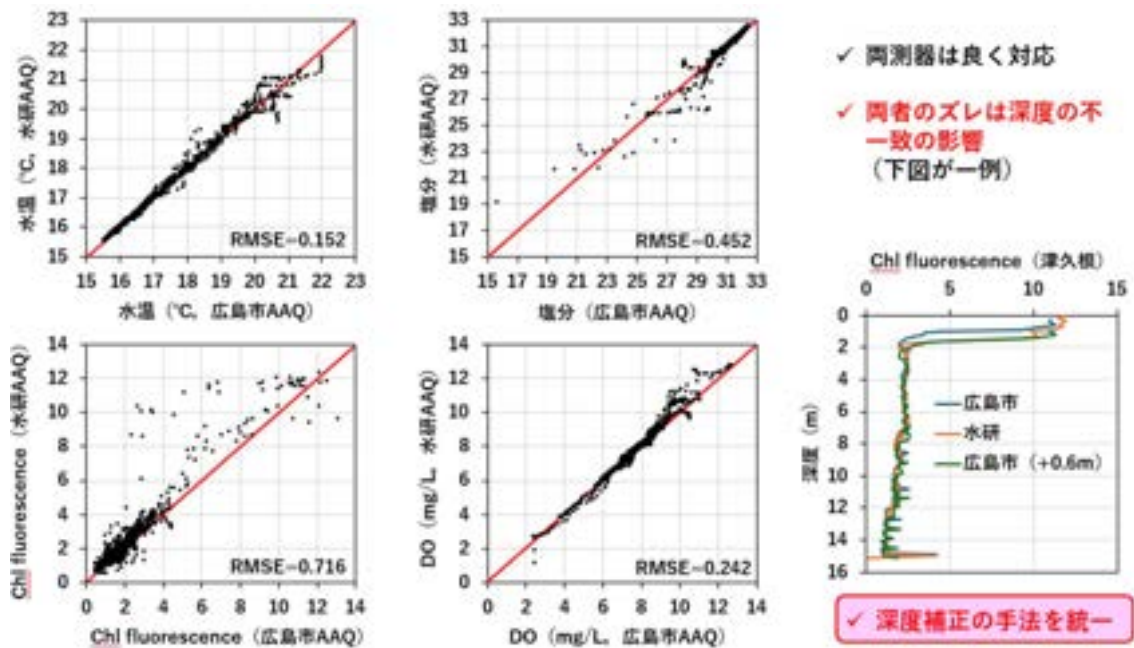


図 C-9. 水産技術研究所と広島市農林水産振興センターの AAQ-RINKO データの比較

(2) 観測結果

① 定期観測結果

水面下1m 深では、水温は全期を通じて 11.3~29.4℃の範囲で 3 つの観測定点で大きな違いは見られなかったが、その他の水質項目については、河口部から約 10 kmに位置する三高と、河口部にあたる金輪西と津久根で大きな違いが認められた。pH については 7.72~8.42 で、3 定点ともに 9~11 月にかけて低下し、その後上昇する傾向が見られたが、

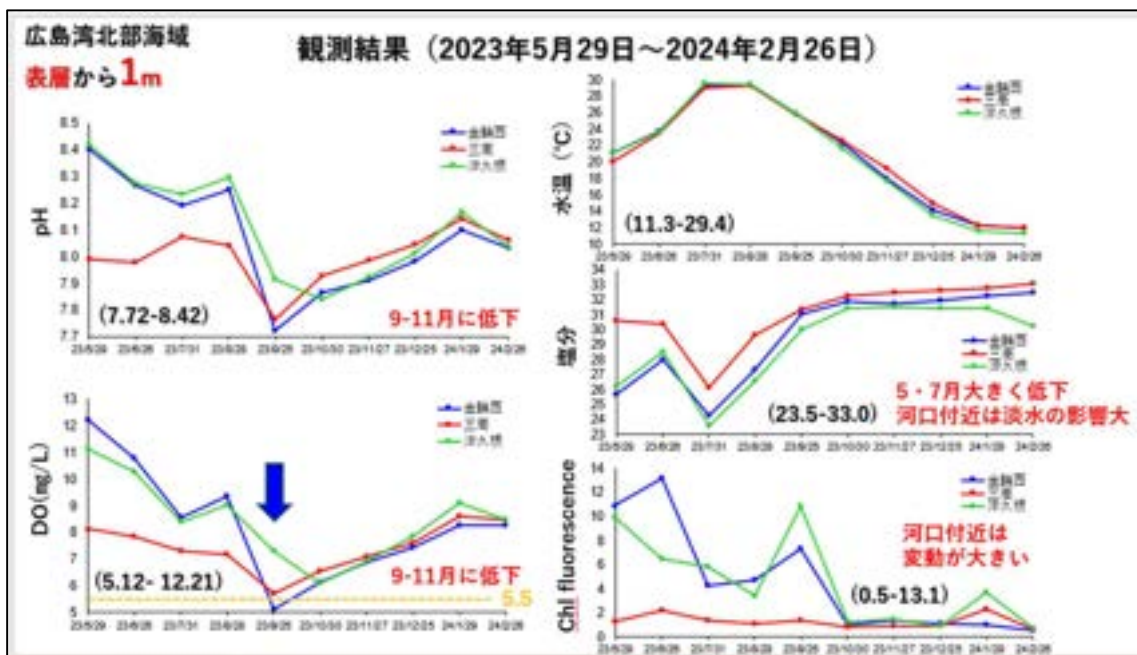


図 C-10. 広島湾北部海域の水面下 1m 深における定点定期観測結果(2023 年 5 月~2024 年 2 月)

特に、金輪西・津久根では栄養塩供給による植物プランクトンの増殖のためか約 8.4 と高く、変動幅が大きかった。DO は 5.12～12.21mg/L で、3 定点ともに 9～11 月に低下したが、金輪西では 9 月に 5.5mg/L を下回った。塩分は 23.5～33.0 で、5、7 月に大きく低下し、河口部では陸水の影響を大きく受けた。クロロフィルは 0.5～13.1 で、沖合の三高では全期を通じて大きな変動は見られなかったが、河口付近は 5～10 月に変動幅が大きかった。広島湾では、全体的に夏季に底層で低酸素化と低 pH 化が進行して、それが秋季に差し掛かると鉛直混合より表層と混ざることによって表層の pH が下がると考えられた(図 C-10)。

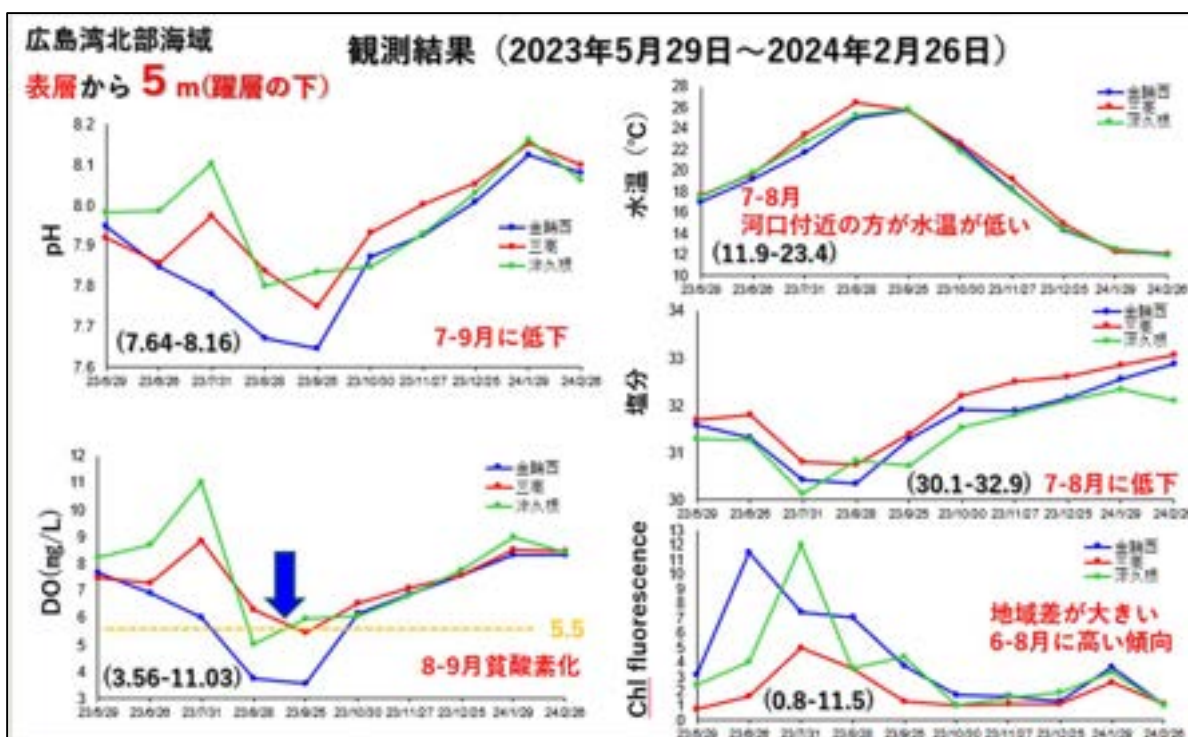


図 C-11. 広島湾北部海域の水面下 5m 深における定点定期観測結果 (2023 年 5 月～2024 年 2 月)

躍層の下に当たる水面下 5m 深では、pH は 7.64～8.16 で、3 定点ともに 7～9 月に低下し、その後に上昇した。DO は 3.56～11.03 で、3 定点ともに 8～9 月に低下し、10 月以降に上昇する傾向が見られた。特に金輪西では 8、9 月には 5.5mg/L を大きく下回り、付け根でも 8 月には 5.5mg/L を切った。8 月はマガキ採苗時期にあたるが、マガキ浮遊幼生の分布水深は 3m 以浅であるため大きな影響は受けないものと考えられた。水温は 11.9～23.4℃で、7～8 月にかけて河口付近の方が水温が低い傾向にあった。塩分は 30.1～32.9 で降雨の影響か河口付近で 7、8 月に低下した。クロロフィルは 0.8～11.5 でいずれにおいても 6～8 月に高くなったが、地域差が大きく河口付近で特に高くなった(図 C-11)。金輪西、津久根、三高における定期観測結果を図 C-12、C-13、C-14 に示した。

金輪西では、水温、pH、DO などの鉛直プロファイルから水深 3～5m に顕著な躍層が認められた。pH および DO は 7-9 月に著しく低下したが、躍層の存在により 3m 以浅と 5m 以深で数値が大きく異なり、10 月以降に鉛直混合によりすべての水深層で均質化された。DO は 7-9 月に低下し、9 月 25 日にはすべての層で 5.5mg/L を下回った。塩分は、3m 以浅の表層でのみ低下したが、5m 以深では大きな変動は認められなかった。クロロフィルは水深 5m 以浅において 5-9 月に高い傾向であった(図 C-12)。

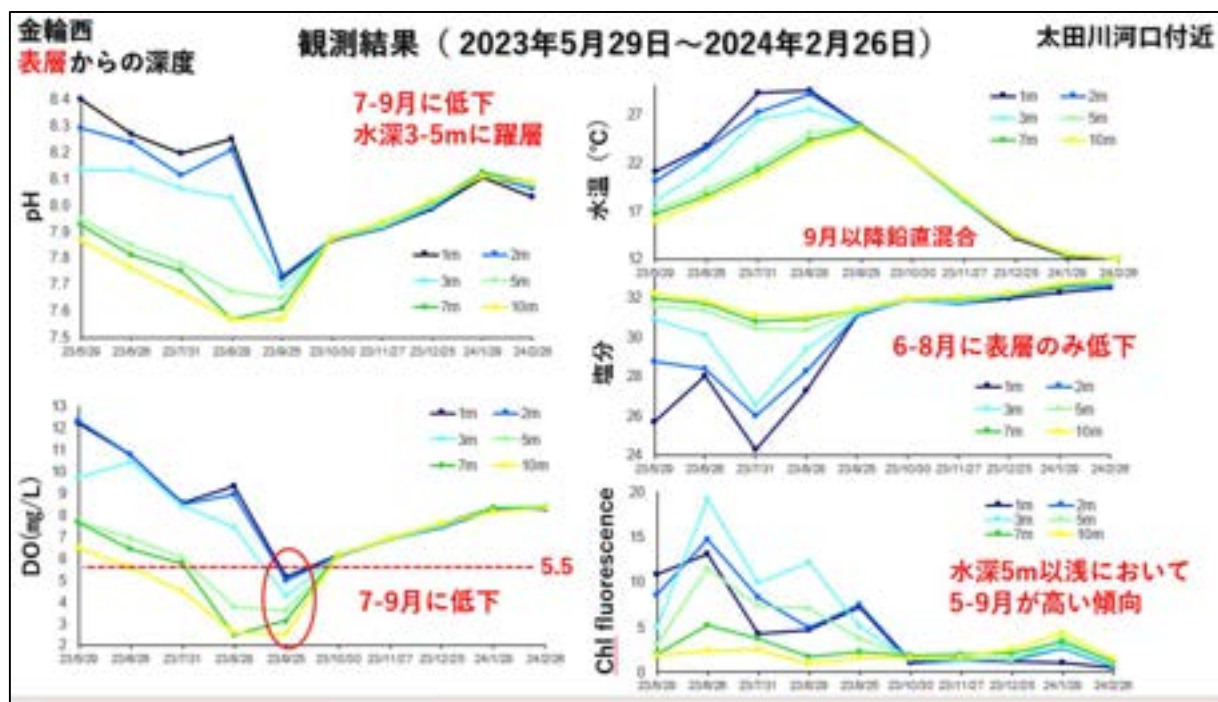


図 C-12. 金輪西における定点定期観測結果(2023 年 5 月～2024 年 2 月)

津久根においても、金輪西ほど顕著ではないが、水温の鉛直プロファイルから 3-5m 層に躍層が形成されていたと考えられたが、水温は 9 月には鉛直混合により均質化された。7-9 月に pH、DO が低下し、10 月以降に鉛直混合により均質化された。DO が 5.5mg/L を下回ったのは 5m 以深の 8-9 月のみであった。塩分は、6-8 月に表層のみ低下した。クロロフィルは、水深 13m では大きな変化はなかったが、水深 10m 以浅において季節変化が顕著であった(図 C-13)。

太田川河口部から約 10 km 沖合に位置する三高においても、変動幅は小さいものの同様の傾向を示した。pH は 8 月まで水深ごとに大きく変動しながら低下し、9 月には鉛直混合により均質化、DO は水深ごとに大きく変動しながら 8-9 月に低下し、10 月には均質化した。5.5mg/L を下回ったのは 5m 以深の 8、9 月であった。水温は 9 月には均質化した。塩分は 7 月に 3m 以浅で低下し、10 月 30 日には均質化、クロロフィルは季節変化が大きく、特に 6-9 月に変動幅が大きくなった(図 C-14)。

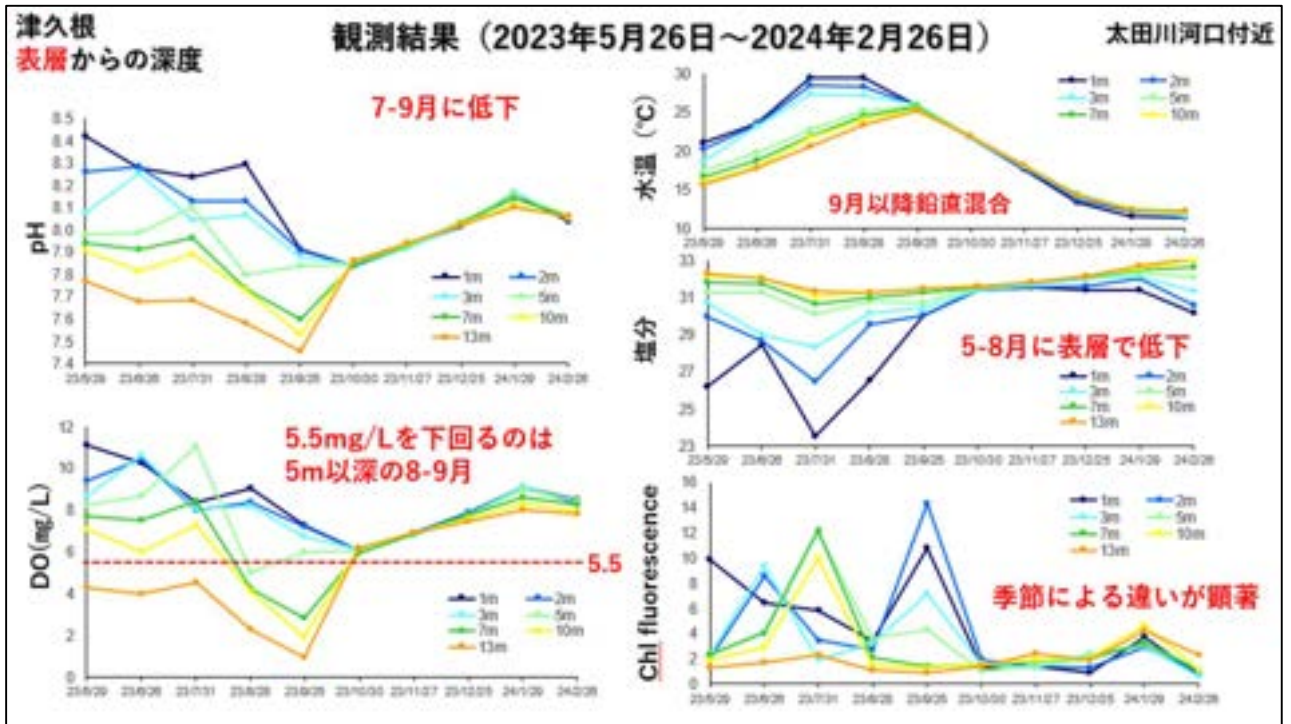


図 C-13. 津久根における定点定期観測結果(2023年5月～2024年2月)

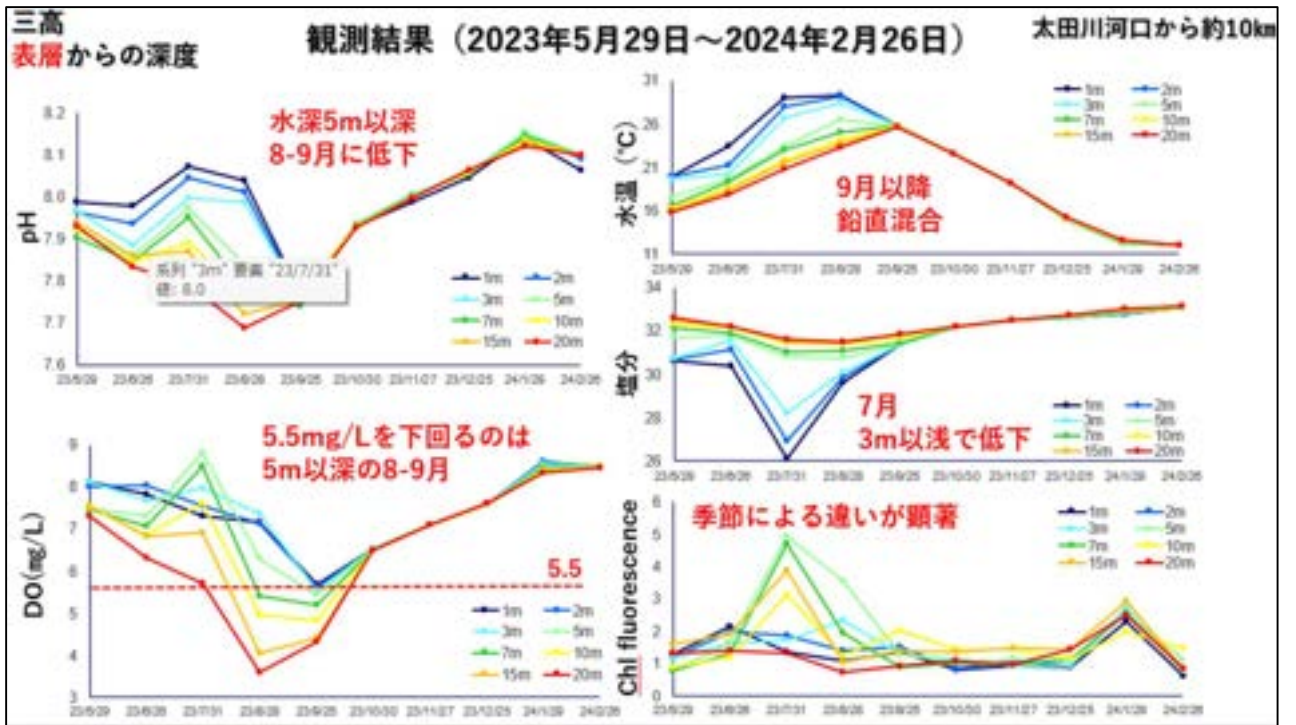


図 C-14. 三高における定点定期観測結果(2023年5月～2024年2月)

廿日市の2023年の定期観測結果では、水温、pH、DOの鉛直プロファイルから5-8月

に水深 2-3mに躍層が認められたが、いずれの項目においても 10 月には躍層が解消され全層が均質化された。DO が 5.5mg/L を下回ったのは 3m 以深の 8、9 月であったが、9 月には水面下 2m、1mでも下回る現象が確認された(図 C-15)。これらのデータを海底を基準にして深度別に整理しても同様の傾向が認められた(図 C-16)。

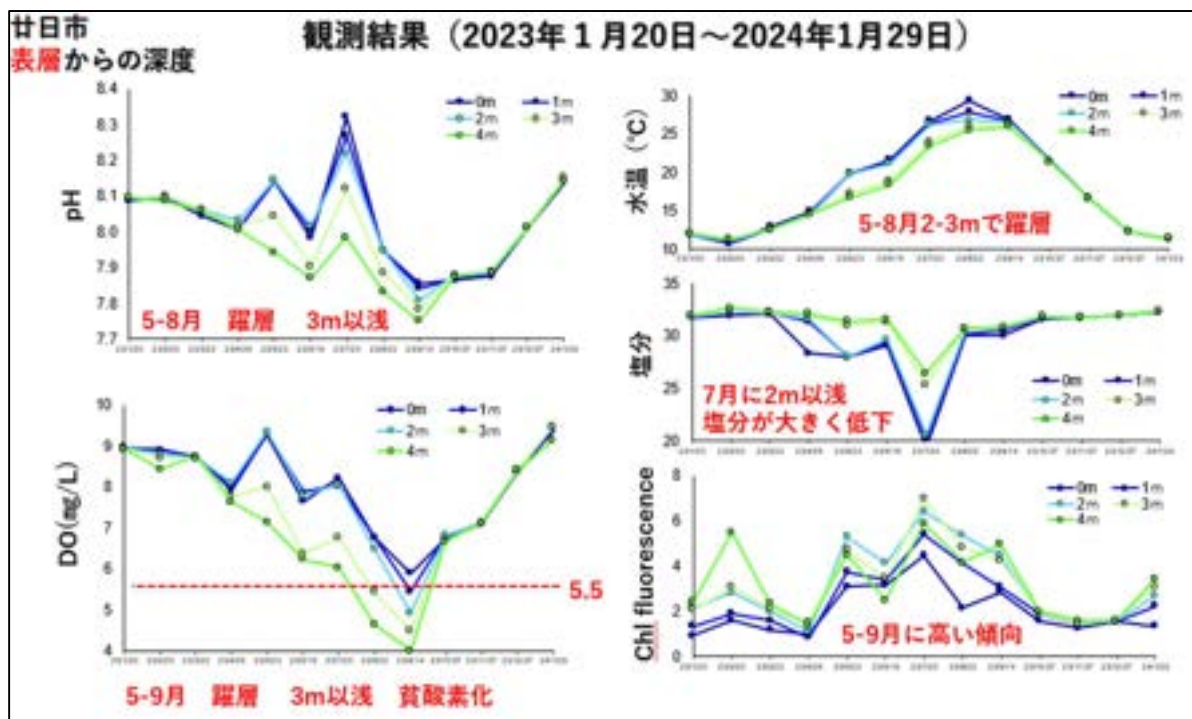


図 C-15. 廿日市における定点定期観測結果(2023 年 1 月~2024 年 1 月)

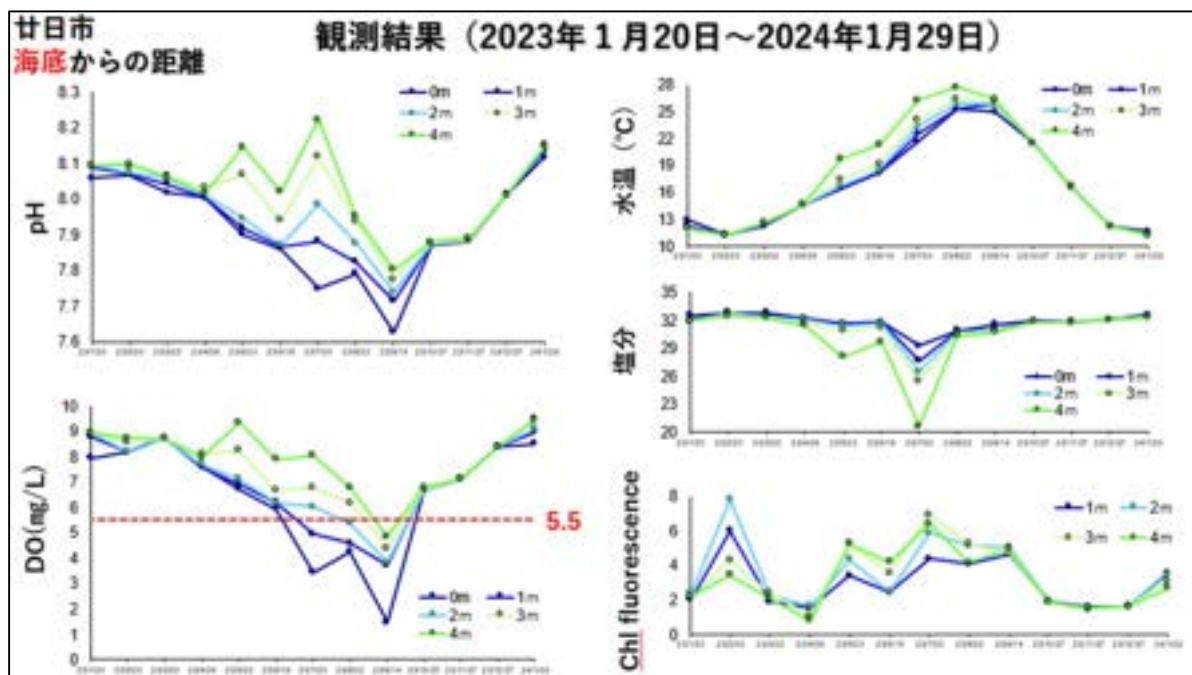


図 C-16. 廿日市における定点定期観測結果(図 C-15)を海底を基準にして深度別に整理

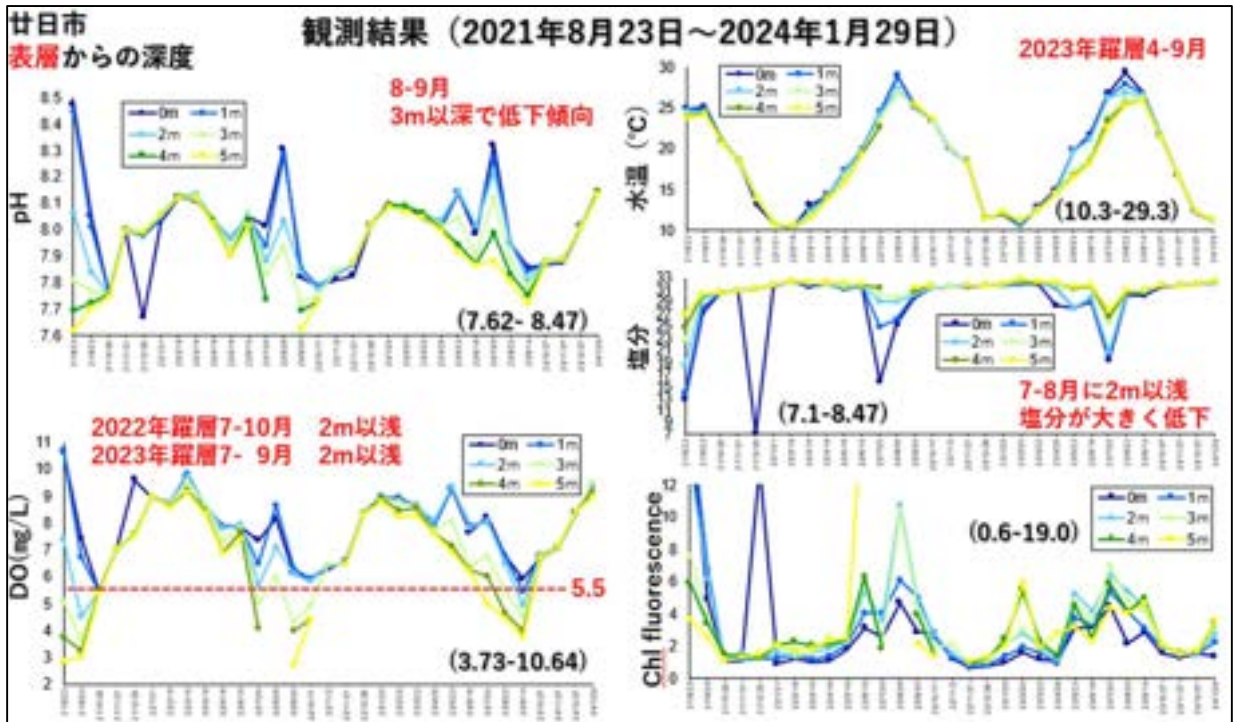


図 C-17. 廿日市における全期(2021年8月～2024年1月)定点定期観測結果

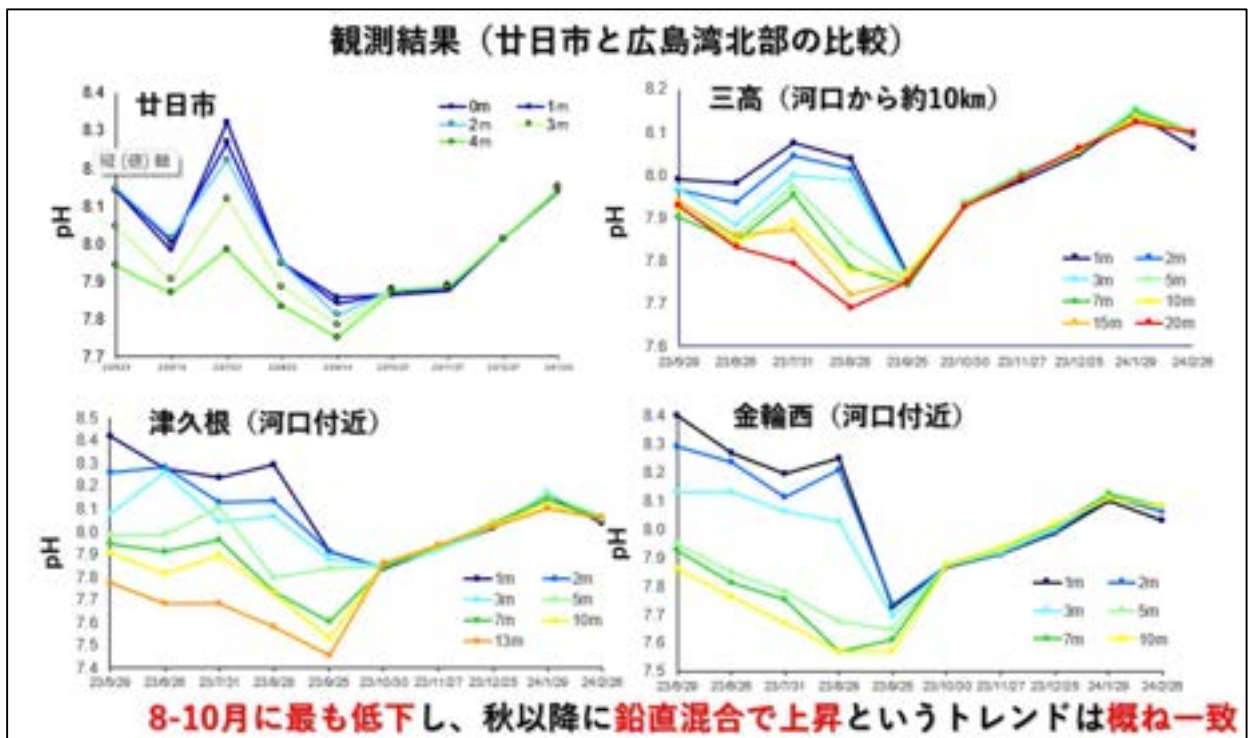


図 C-18. 廿日市と広島湾北部(三高・津久根・金輪西)定点定期観測結果の比較

廿日市において 2021 年 8 月に定期観測に着手して以来 2024 年 1 月までの観測結果から、2022 年と 2023 年を比較してみるとほぼ同様の傾向であるが、数値の振れ幅が異なっていた。躍層の形成も 2022 年と 2023 年ともに 2m 以浅ではあるが、躍層形成期間は 2022 年 7-10 月、2023 年 7-9 月で、2022 年の躍層は 2023 年ほどには強固でないことなどが見てとれた(図 C-17)。また、廿日市と広島湾北部(三高・津久根・金輪西)の定期観測結果を比較検証した結果(図 C-18)、これまで、廿日市は広島湾の中でも特殊な環境下にあり pH の動向も特異であると考えられていたが、8-10 月に最も低下し秋季以降に鉛直混合で上昇するというトレンドはすべての定点でほぼ一致していた。

廿日市では、2022 年と 2023 年では季節変動は同様であるが、観測値や変動幅が大きく異なっており、今後とも温暖化に伴う海水温の上昇やゲリラ豪雨などの頻度増加が考えられ、年変動が大きくなってくると考えられる。また、廿日市、広島湾北部 3 定点において、河口付近の金輪西と津久根では淡水流入の影響が顕著であったが、5~9 月に成層化して下層で低 pH 化と低酸素化が進行し、秋季以降に鉛直混合して全層で均質化するトレンドは概ね同じであった。広島湾の下層で形成された低 pH 水がどこまで拡散するかなどを把握するためにも、水産技術研究所廿日市庁舎による定期観測実を広島市農林水産振興センターの定期観測と同日に実施するなど調整し、引き続き通年のデータ取得を継続する。

③ 栄養塩の採水分析結果

栄養塩については、DIN 濃度は表層 0.13~10.15 μ M、底層 0~34.0 μ M、DIP 濃度は表層 0.04~0.87 μ M、底層 0.24~1.42 μ M、DSi 濃度は表層 8.50~41.65 μ M、底層 10.45~47.82 μ M で(図 C-5)、DIP 濃度は DO が低下し貧酸素になると増加する傾向が見られた。2021 年からの全期を通じて表層・底層の季節的変動は概ね一致しており(図 C-6)、DIN 濃度の最高値は表底層ともに 12 月、DIP 濃度の最高値は表層で 10 月、底層で 9 月、DSi 濃度の最高値は表底層ともに 7 月で、DIN・DIP 濃度は 7~12 月に高く、DSi 濃度は 5~10 月に高い傾向であった。

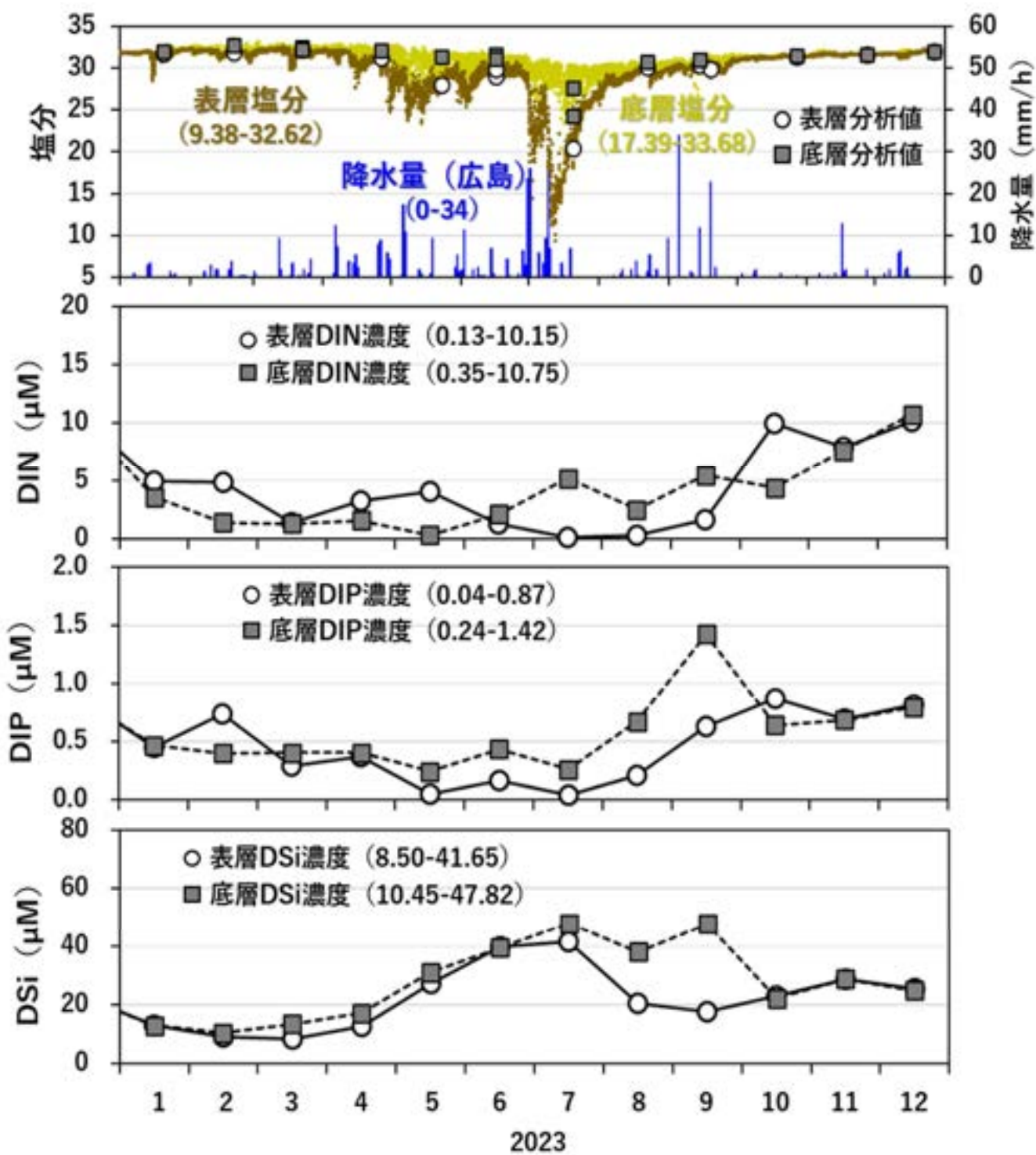


図 C-6. Stn.HH-1 の表層・底層における栄養塩濃度の推移(2023年1月～2023年12月)

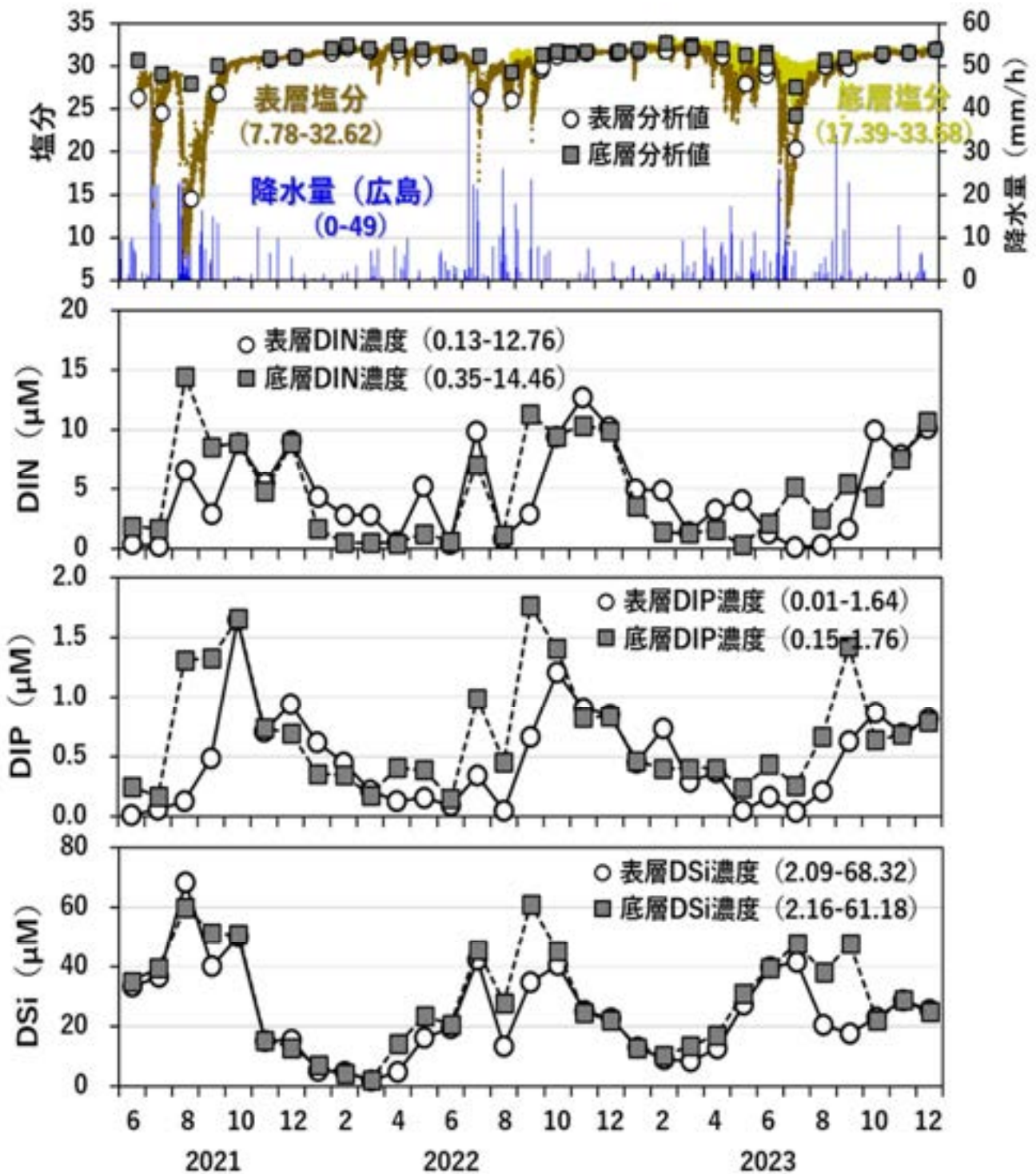


図 C-6. Stn.HH-1 の表層・底層における栄養塩濃度の推移(202 年 6 月~2023 年 12 月)

C.3. まとめと考察

観測地点 HH-1 のすぐ近傍にはカキ養殖場が広がっている。マガキ浮遊幼生が酸性化による悪影響を受ける閾値は、世界的な共通の認識として $\Omega_{\text{arag}}1.5$ とされている。マガキ浮遊幼生の出現時期に当たる 7~9 月間の連続観測結果を拡大して見てみると(図 C-7)、 Ω_{arag} が 1.5 を下回るのは、降雨によって塩分が著しく低下した 7 月と、塩分は高いが DO が顕著に低下した 9 月に認められた。また、8 月後半以降の Ω_{arag} の低下には周期性が認められ、大潮時に表層、底層ともに低下する傾向が見られたが、これは底層の DO 低下の影響が鉛直混合により表層まで及んだ結果によるものと推定された。

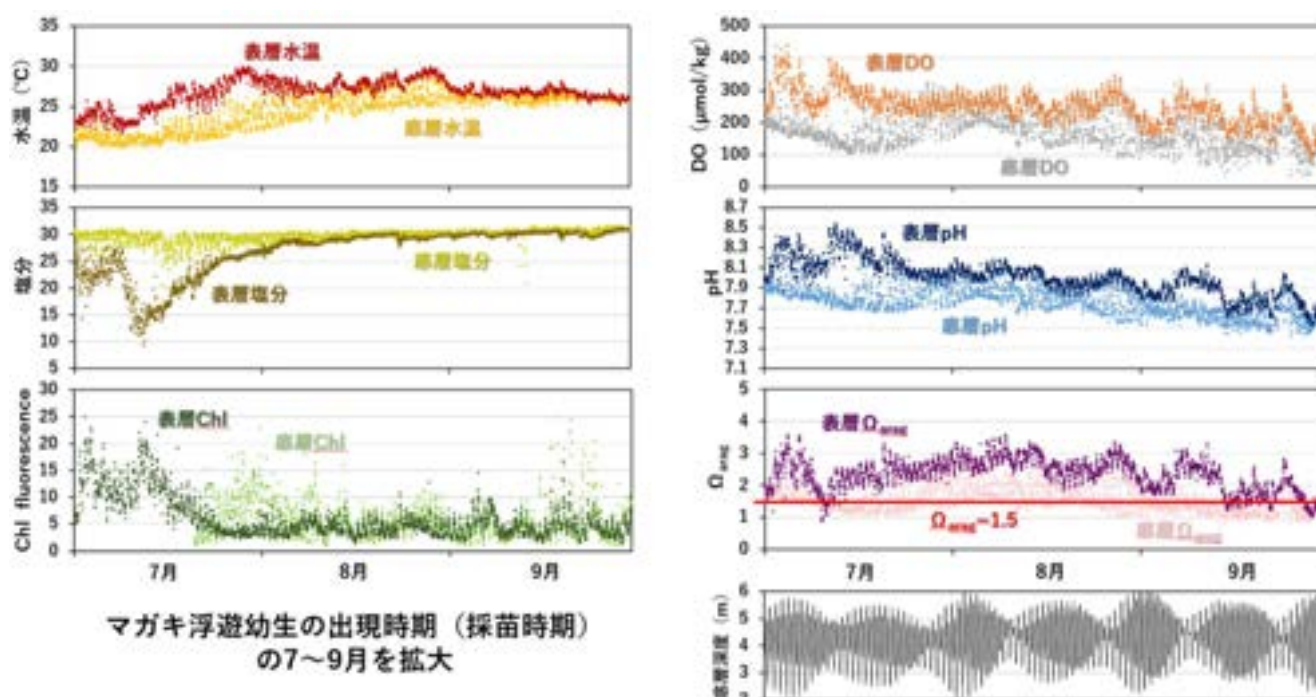


図 C-7. Stn.HH-1 におけるマガキ浮遊幼生出現期における連続観測結果 (2022 年 7 月 ~ 2023 年 9 月)

マガキの D 型浮遊幼生は、塩分 20 付近で分布密度が最も高くなり、塩分 20 以下になると著しく分布密度が減少することが明らかにされている。つまり、マガキ浮遊幼生は塩分 20 以下の低塩分になると低塩分環境から能動的に忌避すると考えられる。低塩分により $\Omega_{\text{arag}}1.5$ 以下になる閾値はほぼ塩分 20 前後で(図 C-8)、マガキ浮遊幼生が忌避する塩分と一致するため、結果的に浮遊幼生が $\Omega_{\text{arag}} < 1.5$ に長時間曝露される機会は少ないのではないかと考えられた。

Ω_{arag} が低下するもうひとつの要因は DO 低下である。 Ω_{arag} と DO の相関関係を見ると、 Ω_{arag} が 1.5 を下回るのは DO 濃度 $167\mu\text{mol}/\text{kg}$ ($5.5\text{mg}/\text{L}$) 以下である。後述する広島市農林水産振興センターによる広島湾内の定期定点観測で得られたデータによると DO

濃度が 5.5mg/L 以下になる水深は、7 月 31 日には約 20m 以深、8 月 28 日には約 6m 以深、9 月 25 日には約 5m 以深であった。マガキ浮遊幼生の大部分は水深 3m 以浅に分布することが解明されており、DO 低下による $\Omega_{arag} < 1.5$ 環境に長時間曝露される機会もほとんどないものと推測された。

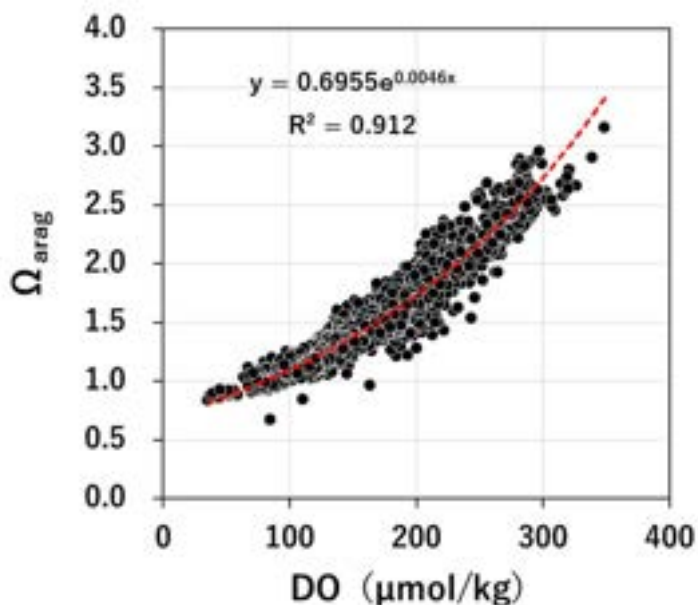


図 C-8. Ω_{arag} と DO ($\mu\text{mol}/\text{kg}$) の相関関係

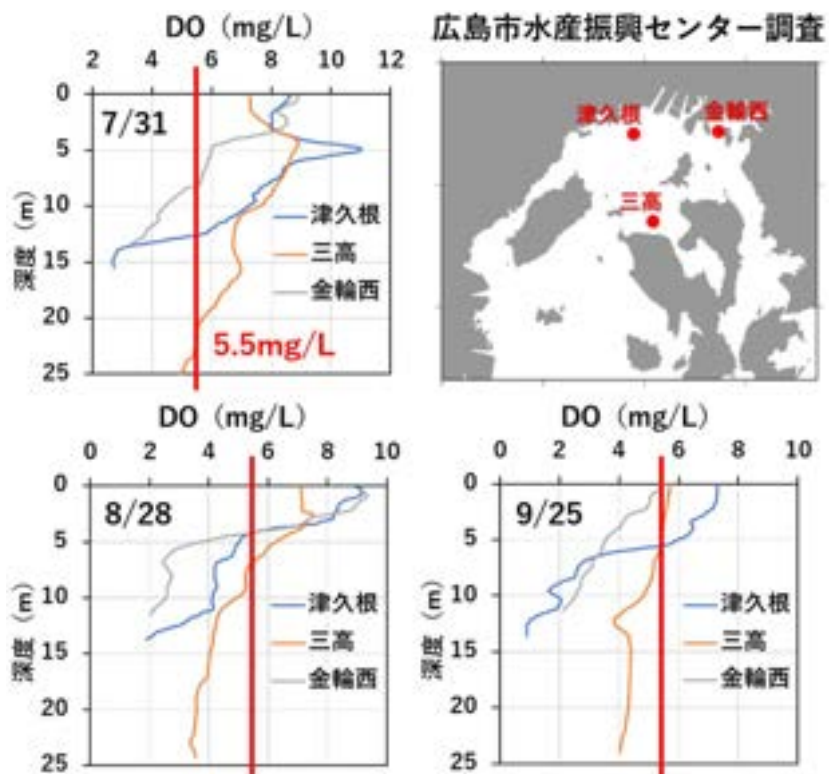


図 C-9. 広島湾内における DO 濃度 ($\mu\text{mol}/\text{kg}$) と水深の関係

D. 豊後水道における海洋観測

D.1. 定点連続観測

(1) 観測方法

豊後水道は、南から侵入する黒潮水塊と、北から河川水や下水等の影響を受けた内海の水塊が流下し、これらが約 25～30km の範囲で激しく鉛直混合される海域である(図 C-1)。

豊後水道においてそれぞれ海域特性の異なる 3 海域に佐田岬 Stn.B-1、佐伯湾 Stn.B-2、内海 Stn.B-3 の 3 つの観測定点を設けた(図 D-2)。佐田岬 Stn.B-1 は瀬戸内海内部と周囲との混合の影響、佐伯湾 Stn.B-2 は九州北部河川の影響、内海 Stn.B-3 は黒潮系外洋水の影響を強く受ける海域である(図 D-3)。



図 D-1. 豊後水道の流動構造(藤原, 2013)



図 D-2. 豊後水道における観測定点 Stn.B-1, B-2, B-3

3 定点それぞれに表 D-1 に示した観測機器を設置し、佐田岬 Stn.B-1 は 2021 年 6 月から、佐伯湾 Stn.B-2 および内海 Stn.B-3 は 2022 年 6 月から水温・塩分、pH、クロロフィル・濁度を継続して観測している。佐田岬 Stn.B-1 の観測機器設置場所は 50m×60m のイセエビ旧畜養池で、春季から夏季には海藻が 4 繁茂する場所で、佐伯湾 Stn.B-2 はハマチ養殖場近くの観測筏の水面下 5m、内海 Stn.B-3 はスマ・マダイ・ハマチ養殖場の調

整筏の水面下 5m である(図 D-3)。観測機器は 1 カ月ごとに付着生物を除去し、現場で採水し、pH センサー 3 カ月ごとに校正した。

表 D-1. 豊後水道における連続観測地点と使用機器

観測地点	Stn.B-1: 佐田岬	Stn.B-2: 佐伯湾	Stn.B-3: 内海
定点海域の特徴	潮汐混合海域. 瀬戸内海内部からのからの影響をモニタリング	マグロ養殖・カキ養殖. 九州北部河川からの影響をモニタリング	マグロ養殖・アコヤガイ養殖. 外洋(黒潮)からの影響をモニタリング
測器設置位置	水面下1m		
水温・塩分	ワイパ-式メモリー水温塩分計 Infinity CTW ACTW-USB (JFEアドバンテック(株))		
pH	海水用pHセンサーSPS-14 (紀本電子工業(株))		
クロロフィル濁度	ワイパ-式メモリークロロフィル濁度計 Imfinity ACLW2-USB (JFEアドバンテック(株))		



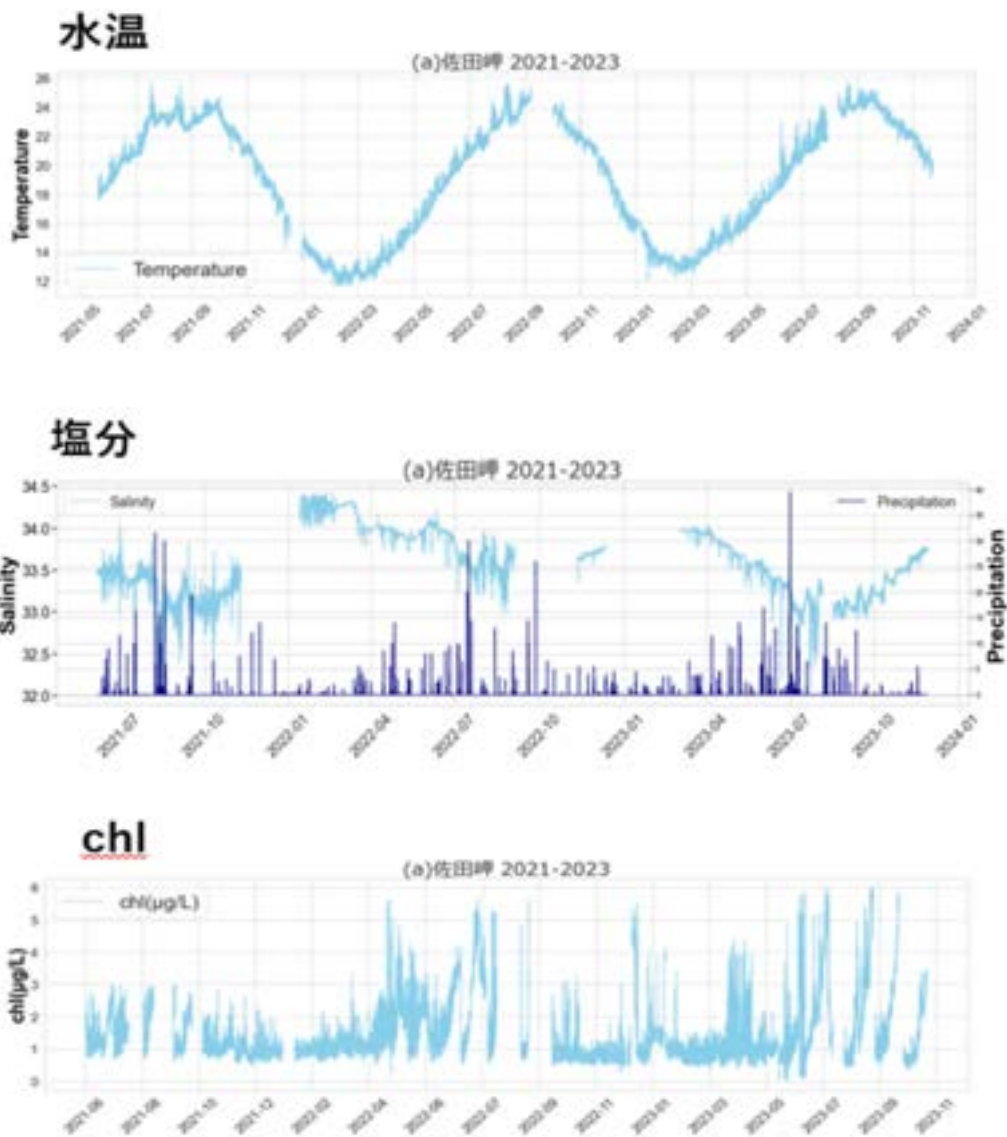
図 D-3. 豊後水道における観測地点Stn.B-1, B-2, B-3 の周囲の状況



図 D-3. 観測方法および観測機器の保守管理の状況(付着生物防除のために銅板設置)

(2) 観測結果および考察

豊後水道 3 定点の連続観測結果を図 D-4～D-6 に示した。



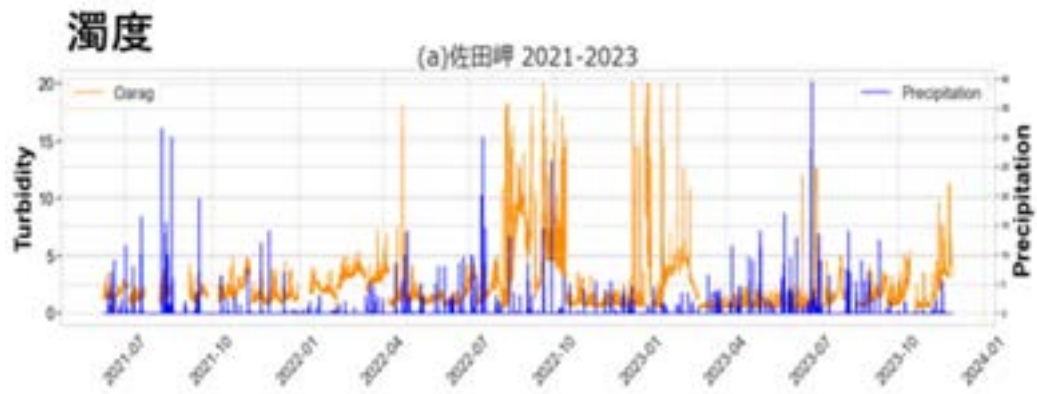
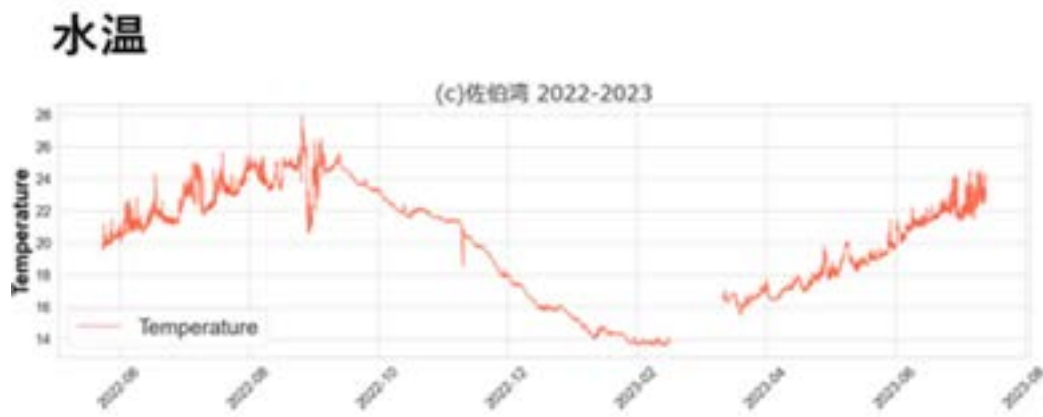


図 D-4. 佐田岬 Stn.B-1 における連続観測結果(2021年6月～2024年1月)



chl

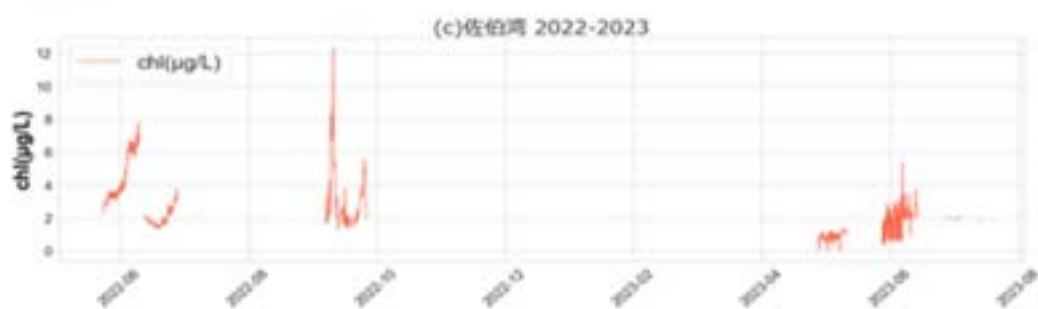
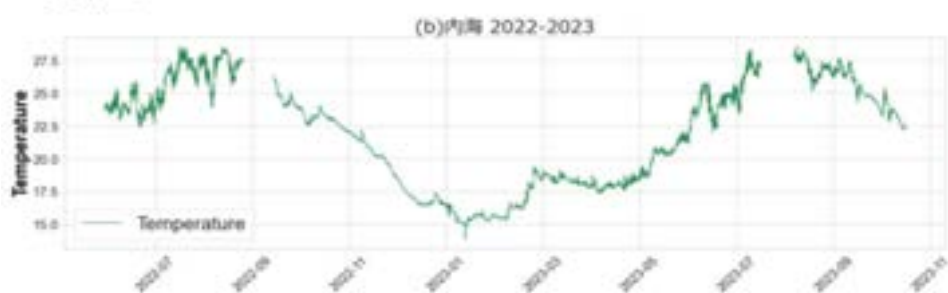
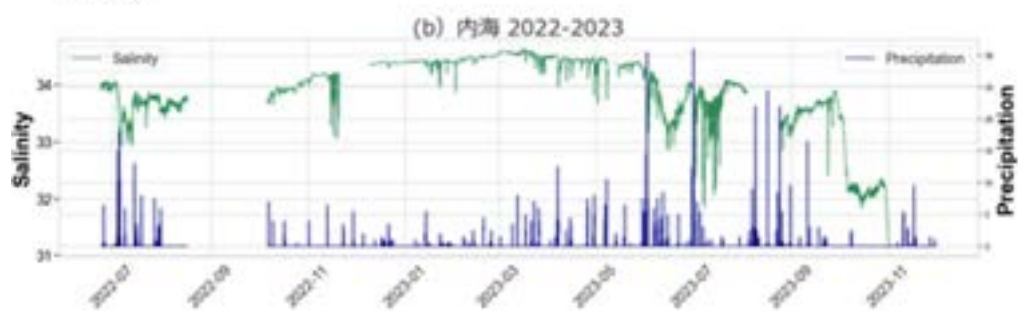


図 D-5. 佐伯湾 Stn.B-2 における連続観測結果(2021 年 6 月～2023 年 8 月)

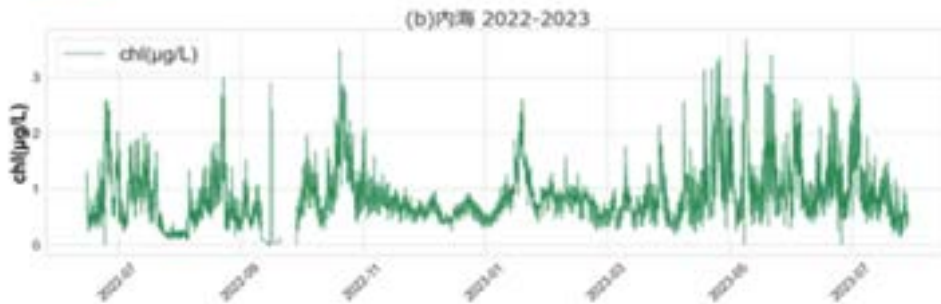
水温



塩分



chl



濁度

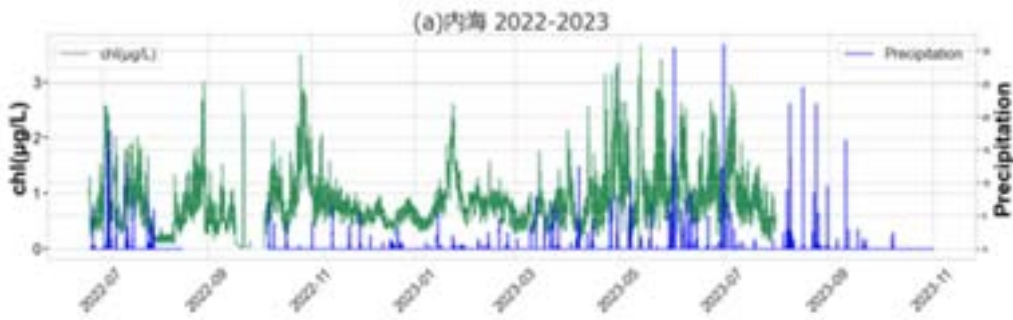
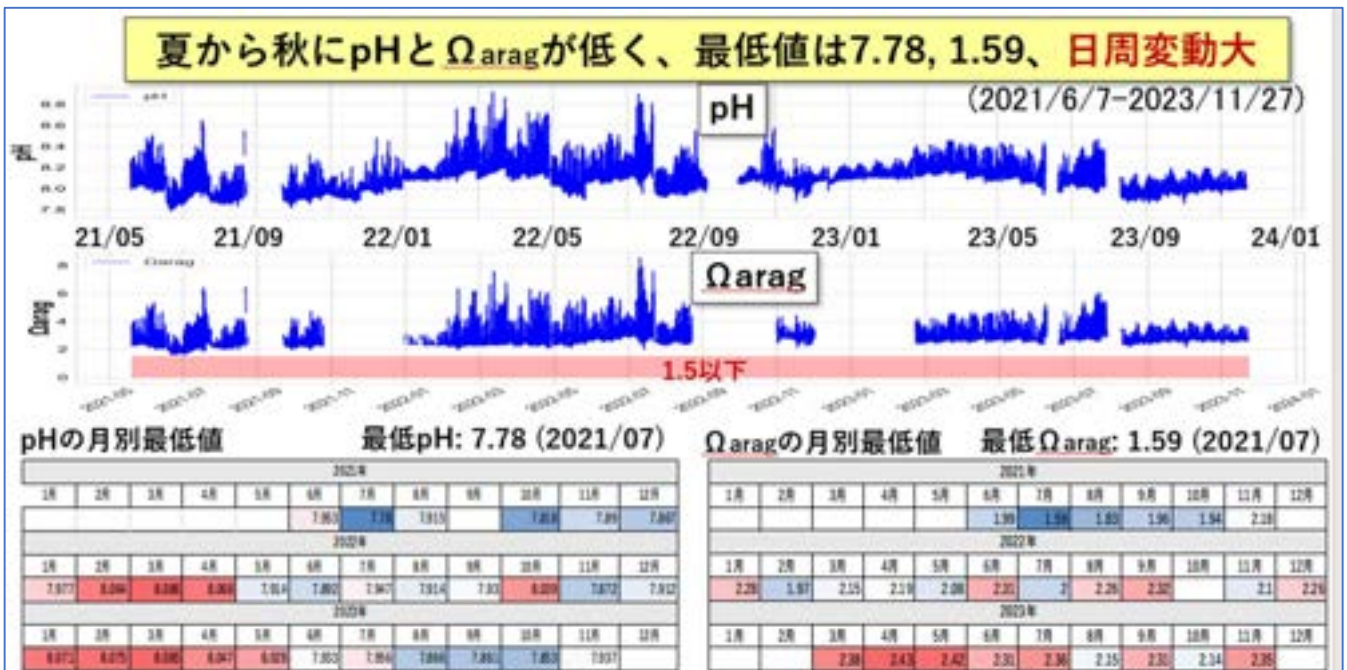


図 D-6. 内海 Stn.B-3 における連続観測結果(2022 年 6 月～2023 年月)

佐田岬 Stn.B-1 では、2021 年 6 月から約 2 年半の間、採水分析結果からドリフト補正した Ω_{arag} の数値を 1 時間ごとにプロットして見てみると(図 D-4)、 Ω_{arag} がマガキ浮遊幼生に悪影響を与える閾値 1.5 を下回ることがなかった。2021 年、2022 年、2023 年について



て、pH および Ω_{arag} の数値を整理し、高い数値を赤色、低い数値を青色で示すと(図 D-4)、両者ともに夏から秋に低く、最低値は 2021 年 7 月の pH7.78、 Ω_{arag} 1.59 で、同時期に廿日市でも低い値が観測されており、廿日市が被った同じイベントの影響を受けたものと考えられた。また、佐田岬では全期を通じて数値の振れ幅が大きく日周変動が大きいのが特徴的であった。

河川からの影響を強く受ける佐伯湾 Stn.B-2 でも Ω_{arag} が 1.5 を下回ることにはなかった。2026 年 6 月から 1 年半の間で夏季と冬季に pH と Ω_{arag} が低くなる傾向にあり、この間の最低値は pH7.80、 Ω_{arag} 1.71 であった(図 D-5)。

黒潮の影響を強く受ける内海 Stn.B-3 でも、2022 年 6 月から約 1 年半の間に Ω_{arag} が 1.5 を下回ることにはなく、この間の最低値は pH7.99、 Ω_{arag} 2.56 であった。ここでは外洋水が多く入ってくるうえに、近傍に河川・ダムもないため外洋に近い数値を示した。ただ、他の定点と異なるパターンを示し、 Ω_{arag} の数値が著しく低下することはないものの春季に最も低くなるのが特徴的で、これは春季の鉛直混合により外洋水が入り難くなるためと考えられた(図 D-6)。

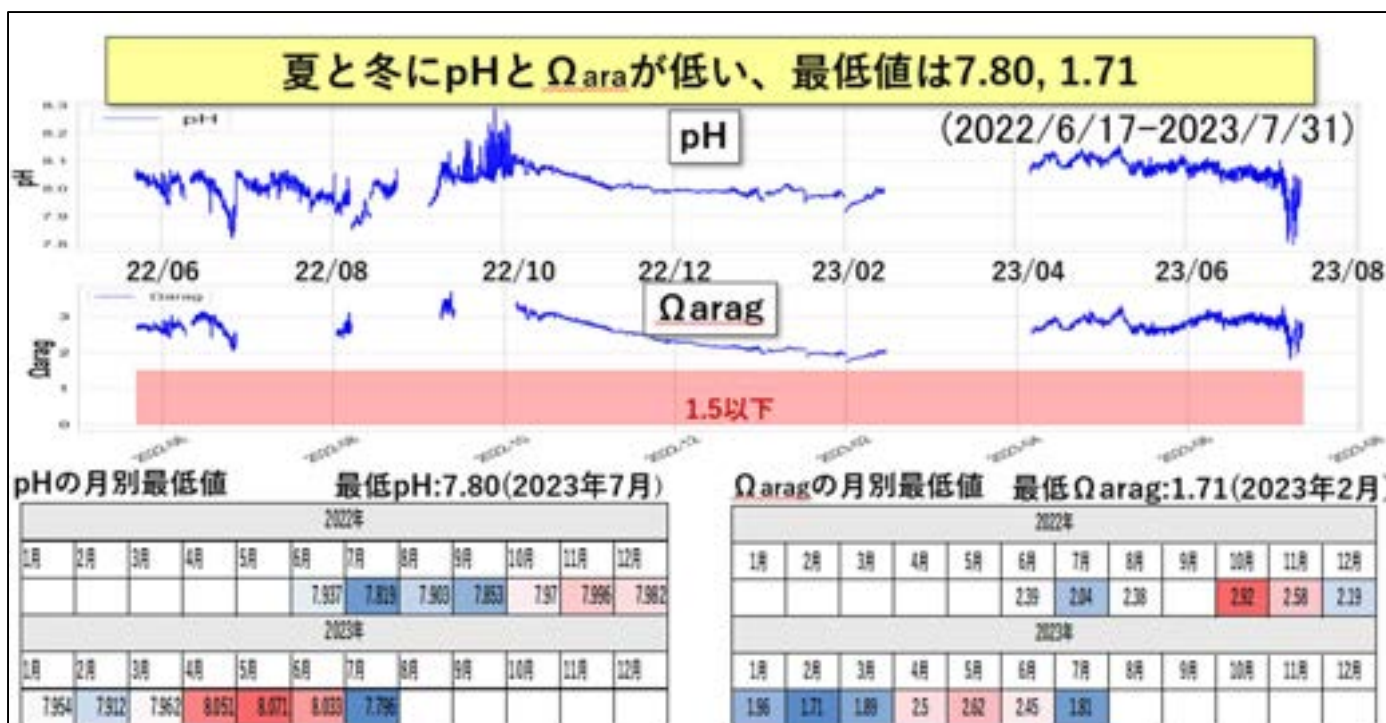


図 D-5. 佐伯湾 Stn.B-2 における pH と Ω_{arag} の推移 (2022 年 6 月 ~ 2024 年 1 月)

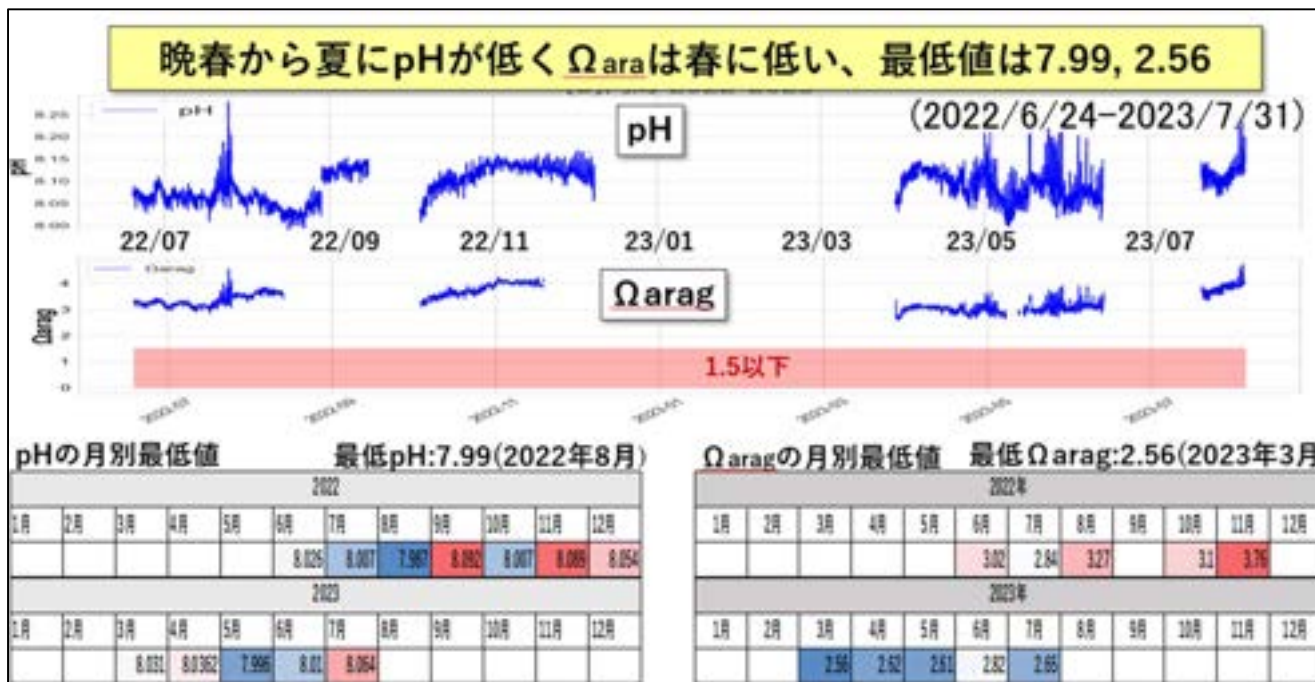
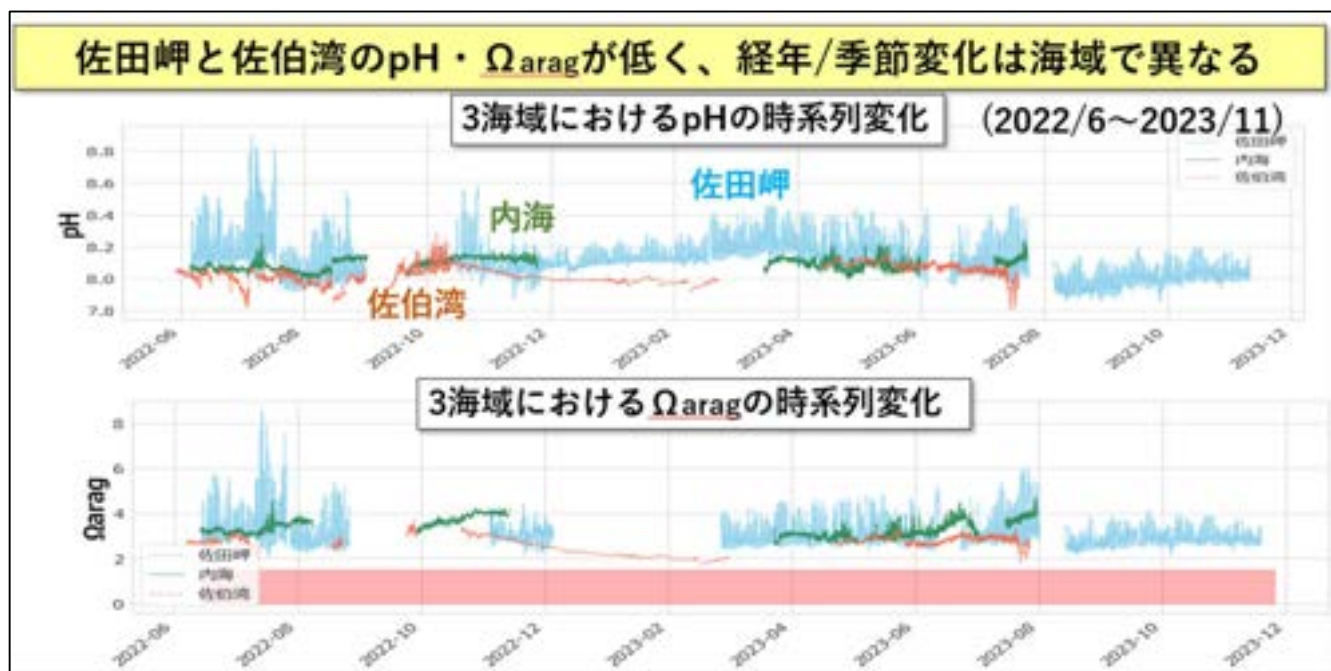


図 D-6. 内海 Stn.B-3 における pH と Ω_{arag} の推移 (2022 年 6 月～2024 年 1 月)

3 海域の連続観測データを同期間 (2022 年 6 月～2023 年 11 月) で比較してみると、pH、 Ω_{arag} ともに佐田岬 Stn.B-1、佐伯湾 Stn.B-2 で比較的低いのが、経年変動パターンや季節変動は海域によって異なっており、今後の気候変動の影響を考慮すれば、さらに継続したモニタリングと詳細な検討が必要である (図 D-7)。



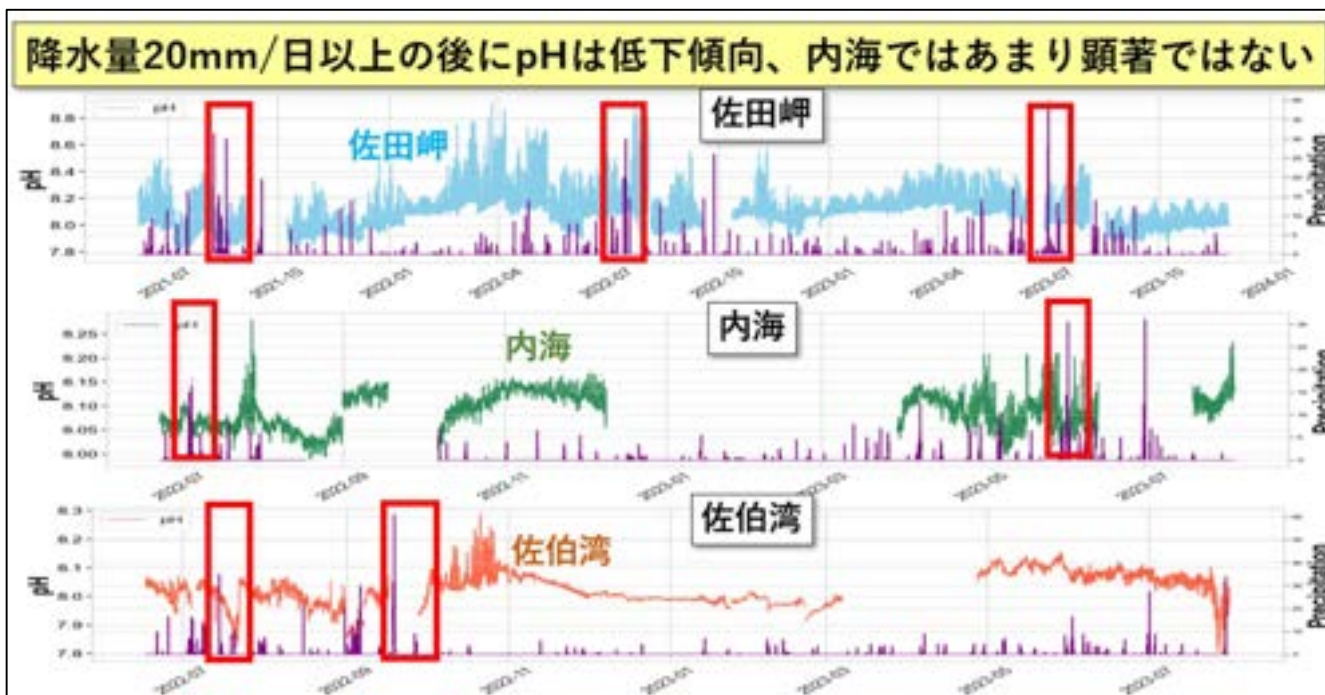


図 D-8. 降水量と豊後水道 3 海域における pH 変動の関連性

降水量と pH 変動の関連性については、佐田岬 Stn.B-1 と佐伯湾 Stn.B-2 では深く関係しており、20 mm/日以上 of 降水の後には pH が低下する傾向が明らかに認められたが、内海では外洋水が流入するため顕著な相関は見られなかった (図 D-8)。これは、20 mm/日以上 of 降雨があると陸域から河川を通じて有機物が供給され、その後の有機物分解により pH が低下するものと考えられ、pH 低下までには約 1 週間のタイムラグが生ずる。佐伯湾 Stn.B-2 では九州北部河川からの有機物流入の影響を受けるし、佐田岬 Stn.B-1 にも別府湾に流入した有機物は 1~2 日で到達する (図 D-9)。やはり、沿岸酸性化対策には河口部における藻場等による懸濁有機物のトラップと分解が有効な策であろう。

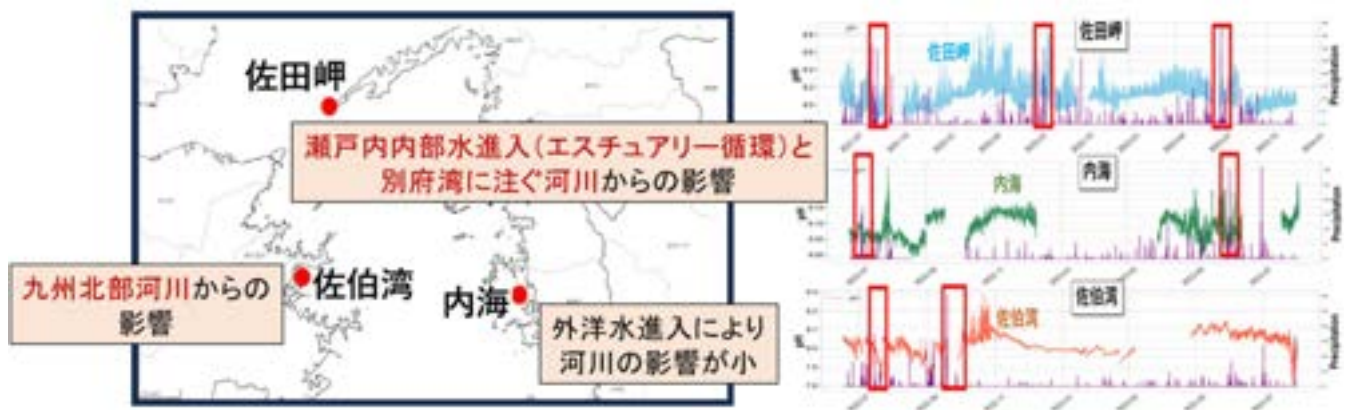


図 D-9. 降水量と豊後水道 3 海域における pH 変動の関連性

佐田岬 Stn.B-1 はアワビ、サザエなど磯根資源が豊富で、これらの餌となるアラメ類、ホンダワラ類などの大型褐藻類などの藻場が形成されているが、ここでの pH の日周変動は、周囲に繁茂する藻場の影響を強く受けているものと考えられた。pH の時間帯別月平均値を見てみると、季節によって数値は大きく異なるものの、光合成が盛んな昼間に高くなり、呼吸によって CO_2 を排出する夜間に低く夜明け前に最も低下する変動パターンは年間を通じて同一で、四季藻場、1 年生藻場の発芽・形成期、伸長期、枯死・脱落期などの生活史ともよく一致している。

本プロジェクトの観測サイトでもある日生および志津川湾では、今世紀末には Ω_{arag} が閾値 1.5 を下回りカキ養殖等に影響が出るとの予測がなされている (Fijii et al.,2023)。豊後水道でも、今世紀末には、内海は外洋水進入により高 Ω_{arag} が維持されマガキ・アコヤガイ養殖への影響は小さいと考えられるものの、佐田岬では瀬戸内海内部水、別府湾に流入する河川水の影響によりアワビ・サザエ種苗生産への影響、佐伯湾では九州北部河川水によりマガキ養殖への影響が懸念され、気候変動による降水頻度や降水量の増大への懸念とも相まって、今後とも長期的なモニタリングが必須である。

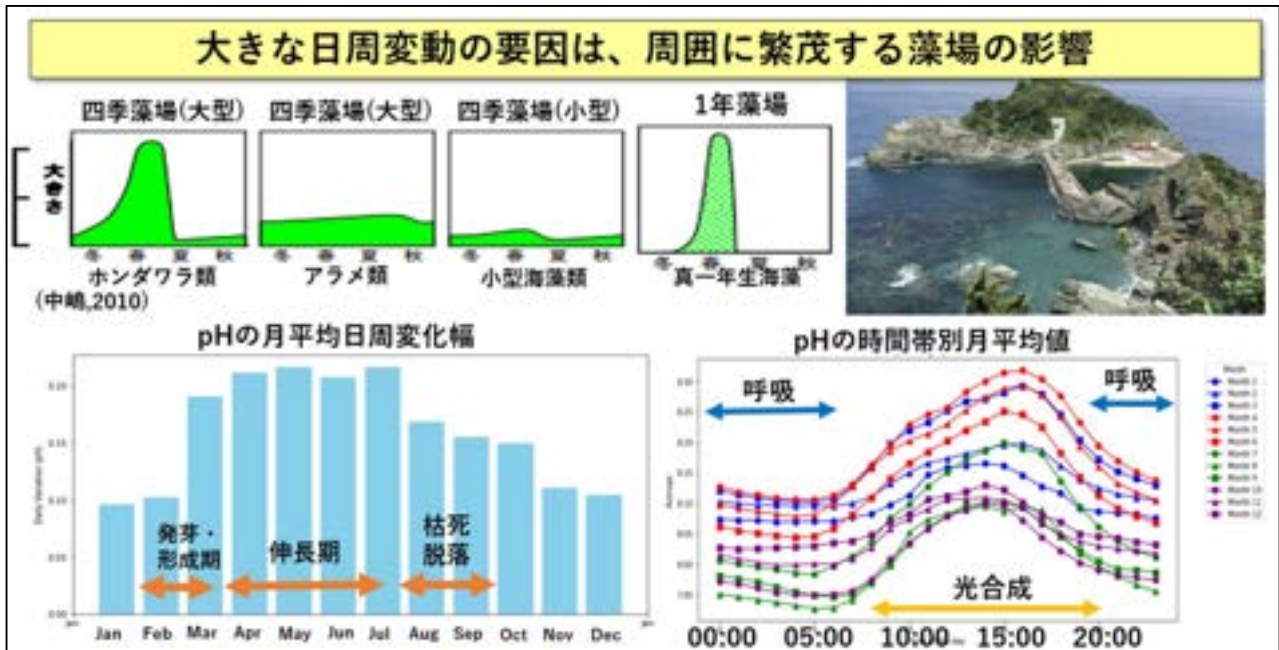


図 D-10. 佐田岬 Stn.B-1 おける pH の日周変動

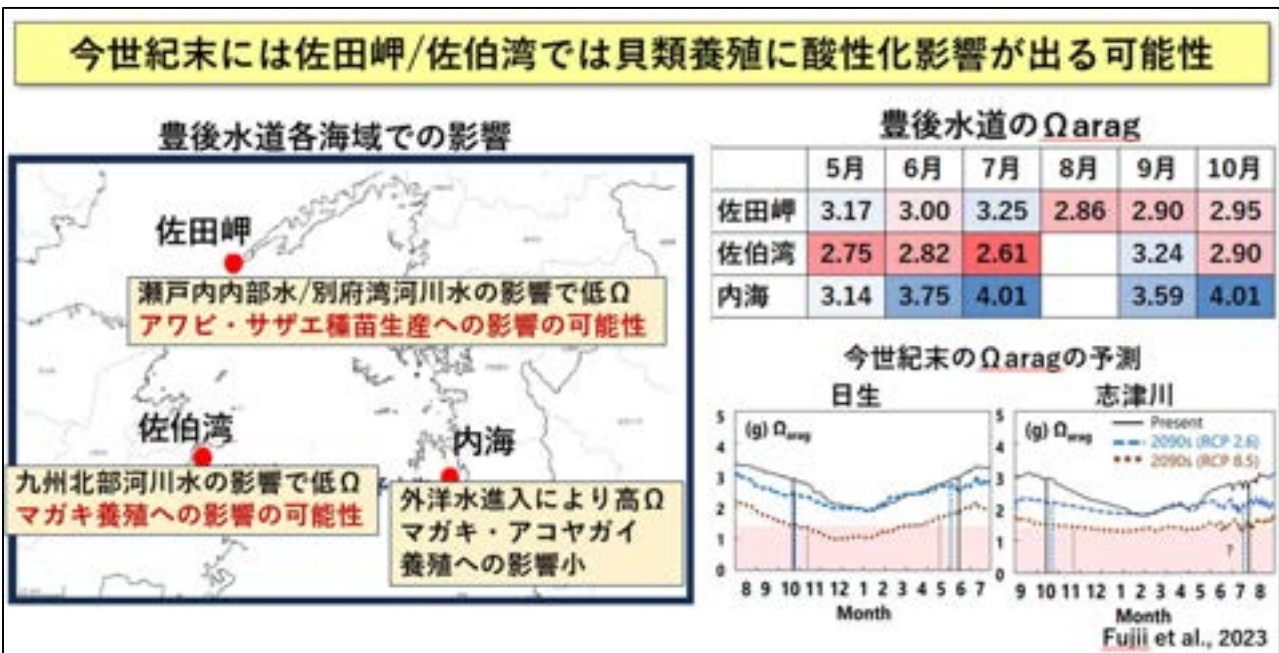


図 D-11. 豊後水道における今後の海洋酸性化による影響の可能性

E. 岡山県笠岡市北木島地先(以下、北木島)における海洋観測

E.1. 定点連続観測

(1) 観測方法

北木島地先カキ漁場に設けた1つの調査定点、Stn.K-1(図 E-1)の水面下1mに表 E-1 示した観測機器を設置し、2022年6月から水温・塩分、pHを連続観測している。1カ月に1~4回の頻度でセンサーに付着した生物の除去等の清掃を行い、3カ月に1回データ回収を行うとともに、pHセンサーについては人工海水を用いたセンサーの校正作業を行い、適宜、電池交換を行った。



地点名	緯度	経度	水深 (C.D.L. m)	観測機器の固定方法
K-1	34° 23′ 35.49″	133° 33′ 23.57″	-10m 程度	カキ筏から吊り下げたロープに固定(図 1-1.2)

WGS-84



図 E-1. 北木島における観測定点 K-1

表 E-1. 北木島における連続観測地点と使用機器

観測地点	Stn.K-1: カキ養殖筏
測器設置位置	水面下1m
水温・塩分	ワイパー式メモリー水温塩分計 Infinity ACTW-USB(JFEアドバンテック(株))
pH	海水用pHセンサーSPS-14 (紀本電子工業(株))

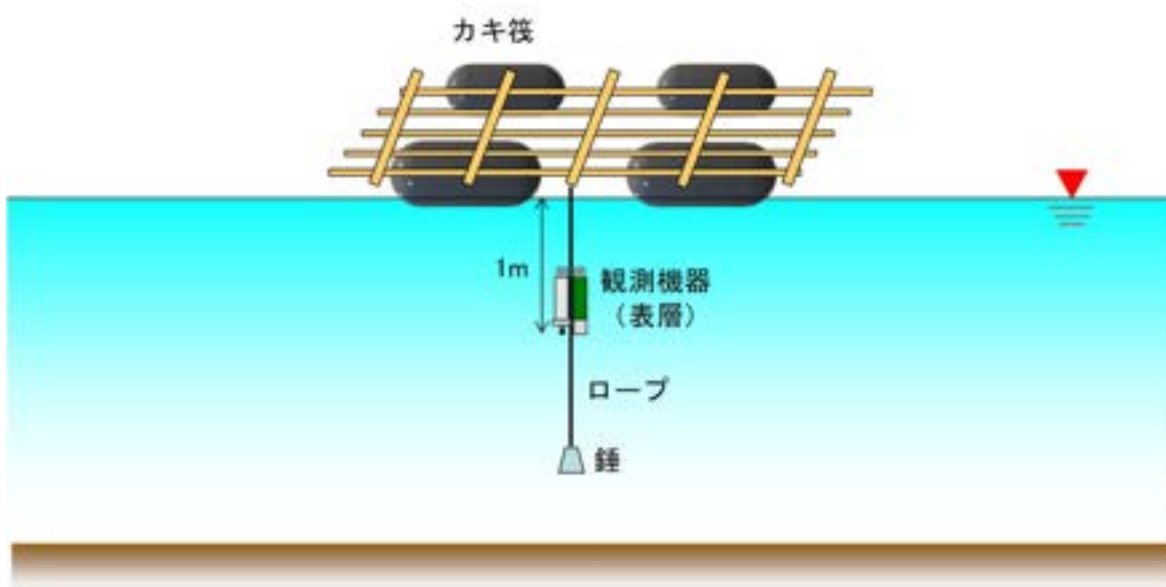


図 E-2. 北木島における観測機器の設置方法

表 E-2. 北木島における観測機器の設置・回収年月日

実施日	観測機器の設置	観測機器の回収
2023年8月4日	● 全観測機器を設置	
2023年12月18日		● 全観測機器を回収, 電池交換, センサー 校正
2023年12月22日	● 全観測機器を設置	
2024年3月21日		● 全観測機器を回収, 電池交換, センサー 校正
2024年3月26日	● 全観測機器を設置	

表 E-3. 北木島における連続観測実施方法

項目	方法	数量
・水温 ・塩分	<ul style="list-style-type: none"> ■ ワイパー式メモリー水温塩分計 (ACTW-USB, JFE アドバンテック) を海面下 1m (表層) の位置に固定し, 10 分間隔の 5 秒間計測を 1 年間連続で実施した。 ■ ワイパー式メモリー水温塩分計は, カキ筏から吊り下げたロープに結束バンドを用いて固定した (図 1-1.2)。 ■ ワイパー式メモリー水温塩分計のセンサー部に付着した生物等は, 漁業者が 2 週間に 1 回程度の頻度で船上に引き揚げて歯ブラシ等を用いて除去した。 	1 層 × 1 地点 (K-1)
・pH	<ul style="list-style-type: none"> ■ 海水用 pH センサー (SPS-14, 紀本電子工業) を海面下 1m (表層) の位置に固定し, 60 分間隔の 5 秒間計測を 1 年間連続で実施した。 ■ 海水用 pH センサーは, カキ筏から吊り下げたロープに結束バンドを用いて固定した (図 1-1.2)。 ■ 海水用 pH センサーの電極に付着した生物等は, 漁業者が 2 週間に 1 回程度の頻度で船上に引き揚げて歯ブラシ等を用いて除去した。 	1 層 × 1 地点 (K-1)

(2) 観測結果

ア. 水温

2023 年 1 月 1 日～同年 12 月 31 日における地点 K-1_表層の水温の時間値は 8.36 (2023 年 2 月 16 日 6:00, 8:00)～31.23℃ (2023 年 8 月 28 日 17:00) であった。

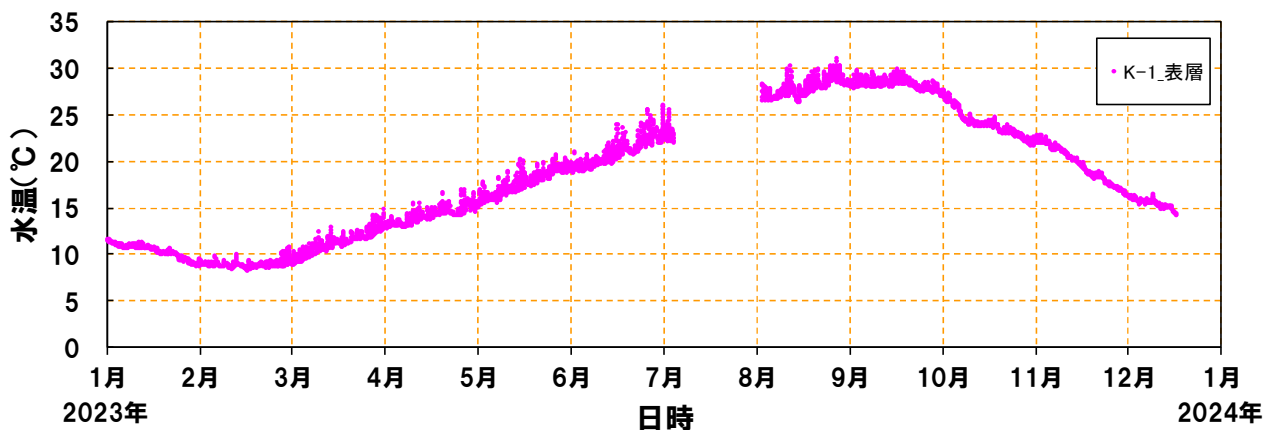


図 E-3. 2023 年 1 月 1 日～2023 年 12 月 31 日における地点 K-表層の水温の推移

イ. 塩分

2023年1月1日～同年12月31日における地点 K-1_表層の塩分の時間値は 22.65 (2023年5月10日 11:00)～32.74PSU(2023年2月6日 15:00, 17:00)であった。

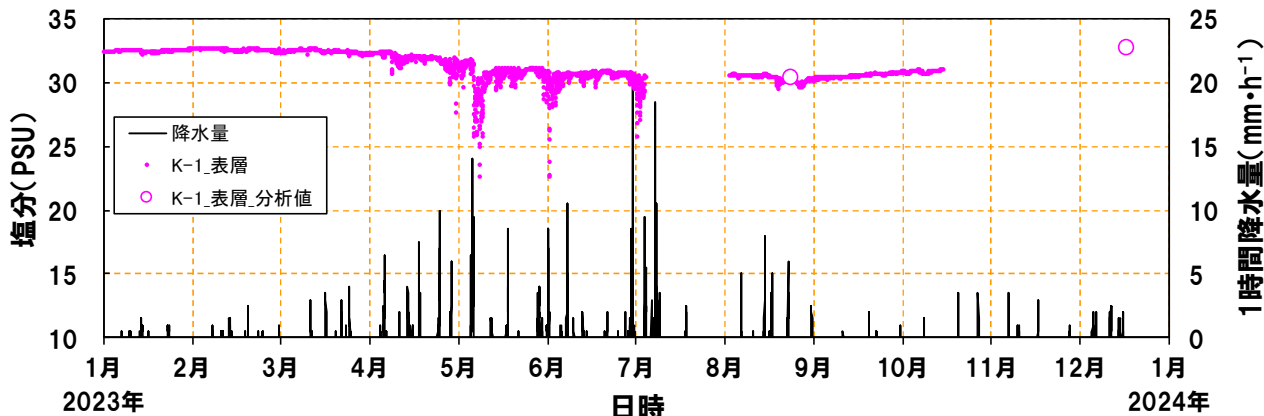


図 E-4. 2023年1月1日～2023年12月31日における地点 K-表層の塩分の推移
※1時間降水量は笠岡地上気象観測所の測定値

ウ. pH

2023年1月1日～同年12月31日における地点 K-1_表層の pH の時間値は 7.50 (2023年8月12日 5:00)～8.49(2023年11月21日 14:00)であった。

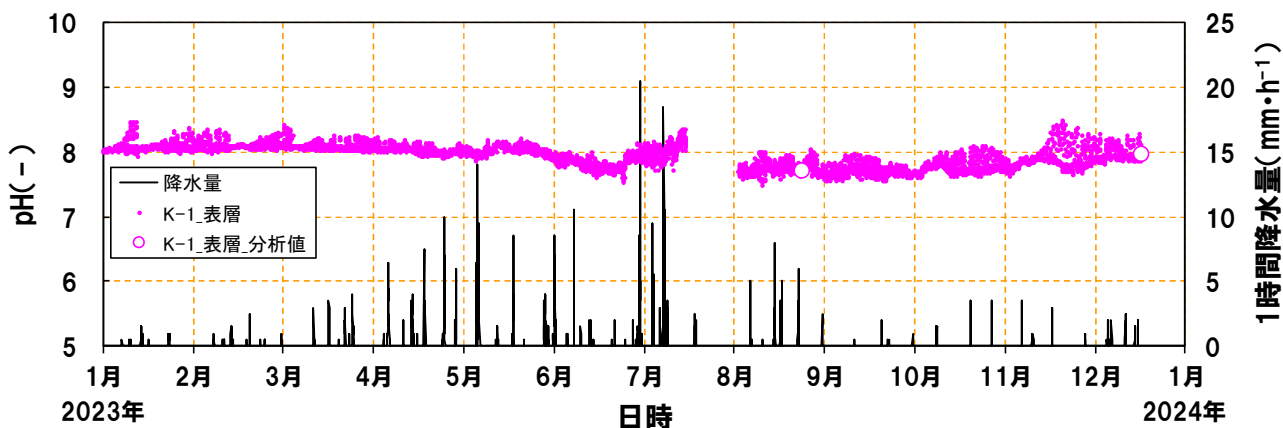


図 E-4. 2023年1月1日～2023年12月31日における地点 K-表層の pH の推移
※1時間降水量は笠岡地上気象観測所の測定値

エ. Ω_{arag}

2023年1月1日～同年12月31日における地点 K-1_表層の Ω_{arag} の時間値は 0.95 (2023年6月26日 5:00)～4.02(2023年1月11日 11:00)であつ

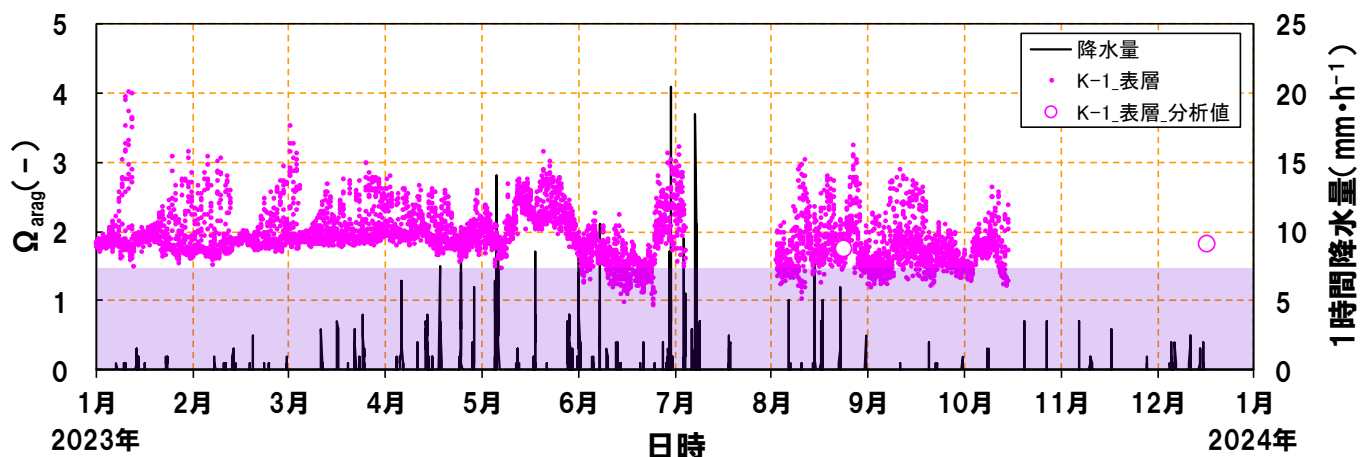


図 E-5. 2023年1月1日～2023年12月31日における地点 K-表層の pH の推移
※1 時間降水量は笠岡地上気象観測所の測定値

E-2. 定点定期観測および採水分析

(1) 観測方法

2023年8月～2024年3月の間に合計6回の定期観測と採水分析を実施した。

表 E-. 北木島における定期観測および採水実施年月日

採水等の実施日		天気概況	気温		
			平均 (°C)	最高 (°C)	最低 (°C)
第1回	2023年8月4日	晴	30.3	35.8	25.7
第2回	2023年8月25日	曇	28.5	33.2	25.5
第3回	2023年12月18日	晴	3.6	8.4	-0.6
第4回	2023年12月22日	晴	-0.3	4.8	-4.2
第5回	2024年3月21日	晴	3.7	7.8	-0.5
第6回	2024年3月26日	雨	10.3	13.3	6.1

注: 1) 気温は、笠岡地上気象観測所の測定値である。

定期観測には多項目水質計 YSI EX02 (YSI/NANOTECH Inc.) を使用し、水温・塩分、クロロフィル、DO、pH を測定した。

採水にはニスキン採水器 (Model-1010, General Oceanics 社) を用いた。海面下 1.0m (表層) と海底上 1.0m (底層) で海水を採取した。採水方法等は別紙「酸性化モニタリングのサンプルの採水方法と保存方法」に従ったが、ここでは塩化第二水銀が使用できないため、ニスキン採水器と JAMSTEC と紫光技研が共同開発した深紫外線殺菌装置 (図 E-6)

をビニールチューブで繋ぎ、海水で共洗いしたサンプル瓶に収容したものを水質試料とした。これを氷を入れたクーラー内で冷蔵し、水産研究・教育機構 水産資源研究所 横浜庁舎に送付し pH、塩分、溶存態無機炭素 DIC、全アルカリ度の分析に供した。なお、栄養塩以外のサンプル瓶は生物活動を抑えるためアルミホイルで覆って遮光した。分析は、滴定法など標準手法を用いて塩分(S)、溶存態無機炭素(DIC)、全アルカリ度(A_T)を分析し、これらの数値からアラゴナイト飽和度(Ω_a)を算定し求めた。また、測定された A_T と DIC を用いて、現場で計測された pH の事後校正を行った。



図E-1 深紫外線殺菌装置

(2) 観測結果

栄養塩類の分析は岡山県水産研究所で実施した。

採水等の実施日	$\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_4\text{-N}$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{PO}_4\text{-P}$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{SiO}_2\text{-Si}$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)
2023年8月4日	0.510	3.354	1.052	46.466
2023年12月18日	0.282	0.977	0.390	8.642
2023年12月22日	0.322	1.050	0.372	13.162
2023年3月21日	分析中	分析中	分析中	分析中
2023年3月26日	分析中	分析中	分析中	分析中

F. 福井県小浜湾(以下、小浜湾)

(1) 観測方法

① 定点連続観測

小浜湾においては、湾内のカキ養殖場に Stn.F-1(岸に近い:水深 4.7m)、および Stn.F-2(河口部に近い:水深 5.7m)の 2 定点を設けた(図 F-1)。小浜湾には一級河川である北川と二級河川の南側が注いでおり河川水の影響を受けるが Stn.F-2 の方がよりその影響を受ける。それぞれに表 F-1 に示した観測測器を設置し、水温・塩分、pH を連続観測した。



図 F-1. 小浜湾における観測定点 : Stn.F-1 および Stn.F-2

表 F-1. 小浜湾における連続観測定点と使用機器

観測定点	Stn.F-1	Stn.F-2
測器設置位置	水面下1m	
水温・塩分	ワイパ°式メモリー水温塩分計Infinity CTW ACTW-USB(JFEアドバンテック(株))	
pH	海水用pHセンサーSPS-14 (紀本電子工業(株))	

Stn.F-1 および Stn.F-2 とともにカキ養殖筏に水温・塩分計と pH メーター水面下 1mに垂下した。連続観測は 2023 年 5 月 23 日に開始し継続して実施している。原則として1カ月に 1~4 回の観測機器に付着した生物の除去等の清掃、3 カ月に 1 回のデータ回収と人工海水を用いた pH センサーの校正作業を行い、すべての観測機器について、適宜、電池を交換した(表 F-1)。なお、連続観測された pH の値は、採水分析の測定値を用いて、ドリフト補正を行った。

② 定点定期観測および採水分析

定期観測および採水は 2023 年 6 月 4 日から開始し、2023 年 12 月までに 10 回にわたって実施した。定期観測には多項目水質計 RINKO-Profler ASTD102 (JFE Advantech Co.,Ltd.: D, T, Sal, Chl, DO) と HOBO MX2501 pH・温度データロガー (Onset Computer Corporation: pH)を用いて、水温・塩分、クロロフィル、DO、pH を測定した。その際に、ニスキン採水器 (6L)を用いて Stn.F-1 および Stn.F-2 の表層(海面下 1.0m)と底層(海底面上 1.0 m)から採水し、p.39-40「酸性化モニタリングのサンプルの採水方法と保存方法」に従って採水サンプルを処理した後、JAMSTEC に送付し分析を行った。分析項目は、溶存態無機炭素(DIC)、全アルカリ度 (TA)、塩分(Sal)で、 Ω_{arag} は pH、TA、DIC から計算で求めた。栄養塩の分析は福井県立大学にて実施した。また、降雨直後の採水分析 2023 年 7 月 15 日と 8 月 18 日の 2 回実施した。

(2) 観測結果および考察

Stn.F-1、F-2 それぞれの最小値—最大値は、水温 8.2-31.9°C、8.2-31.8°C、塩分 18.4-33.5、15.8-33.3、pH7.6-7.8、7.8-8.9、 Ω_{arag} 1.3-6.4、1.0-7.0 であった。小浜湾には流域面積の 80%以上の河川水が流れ込んでいるため、淡水の影響を強く受ける。Stn.F-1 と F-2 の間の時間変化には正の相関が認められ、ほぼ同様の動きを示したが、Stn.F-2 の方が河口部に近いことより河川水の影響を受け、数値の振幅は Stn.F-1 より大きく、塩分、pH、 Ω_{arag} はいずれも全期を通じて有意に低い数値を示した(図 F-2, F-3)。特に Ω_{arag} は、Stn.F-2 において最低値 1.0 を示し、期間中に数度にわたって閾値 1.5 を下回った。

定期観測は 2023 年 5 月~12 月に 10 回実施したが、Stn.F-1 の水温は表層(水

面下 1m) 14.6-30.3°C、底層(海底上 1m) 15.5-29.1°C、DO は表層 5.4-8.1mg/L、底層 4.5-9.7 mg/L、全アルカリ度は表層 1630-2106、底層 1963-2167、pH は表層 7.7-8.1、底層 7.5-8.1 で(図 F-4)、Stn.F-2 の水温は表層 14.8-30.2°C、底層 15.8-28.6、DO は表層 6.0-8.6 mg/L、底層 5.2-7.2 mg/L、全アルカリ度は表層 1544-2095、底層 2103-2211、pH は表層 7.9-8.1、底層 7.9-8.1 であった(図 F-5)。Stn.F-1、F-2 とともに水深 1m 前後に強固な塩分躍層が形成されていた。前期を通じての最低値は 4.5 mg/L であったが、2023 年 9 月に一時的に見られたのみで、塩分躍層の形成による底層の極端な貧酸素化は認められなかったが、この水面下 1m という非常に浅い層に居座った強固な塩分躍層は、少なからず小浜湾の生産構造に影響しているものと考えられる。また、採水分析データのバラツキやセンサー測定値との不整合などは、塩分躍層が水面下 1m の採水層と一致しているため、長さ 60 cm のニスキン採水器では採水時に塩分躍層付近の海水をサンプリングしたことによる可能性が高く、次の項目について検討する必要がある。

1. 採水層を塩分躍層の上下どちらかを観測するか方針を固めて採水層を変更する。塩分躍層の上部を観測層とする場合には、ニスキン採水器を縦ではなく、横にして採水できる構造に変更する。また、塩分躍層の株を観測する場合には連続観測および採水層を 2m 前後に変更する。
2. Stn.F-1、F-2 の 2 定点間の時間変化には正の相関があるため、観測定点を見直して 1 定点とし、塩分躍層の上部(表層:例えば水面下 0.5m)と下部(底層:海底上 1m)の 2 層観測とする。

出水時の 7 月 15 日および 8 月 18 日に表層水を汲み取り、同様の分析を実施したところ、全アルカリ度と塩分は明らかな正の相関にあり、DIC と塩分についても 7 月と 8 月で若干の違いはあるもののほぼ正の相関が認められたが、 Ω_{arag} についてはかなりバラツキがあり、その要因についてはさらに精査が必要である(図 F-6)。

日本海側では冬季の降雨は少なかったが、近年になって冬季の降雨が明らかに増加しており、2013 年と 2023 年を比較すると 2023 年には塩分低下が著しく、特に冬季に降雨が多かったのは明らかである(図 F-7)。今後とも、この傾向は顕著になってくる可能性がある。

Stn.F-1 および F-2 において、高頻度にポンプにより採水し、植物プランクトンの現存量(クロロフィル a)と一次生産量の鉛直分布を調べたところ、両定点ともに全層でクロロフィル a の極大は確認できるが、光合成による一次生産は極く表層のみでしか行われておらず、中低層のクロロフィル極大は、表層で生産された植物プランクトンが沈降したものであることが明らかになった(図 F-8)。光合成に必要な光は強固な塩分躍層が居座っている水面下 1m までしか届いておらず、光合成有効放射量は、水面下 0m 近くにしか到達しないので、必然的に光合成できるのは極く表層に限られてしまう。地下水の流入量の指標となるラドンも全体的に多く、底層にも広がり、表層への河川水の広がりも影響していると考えられる。

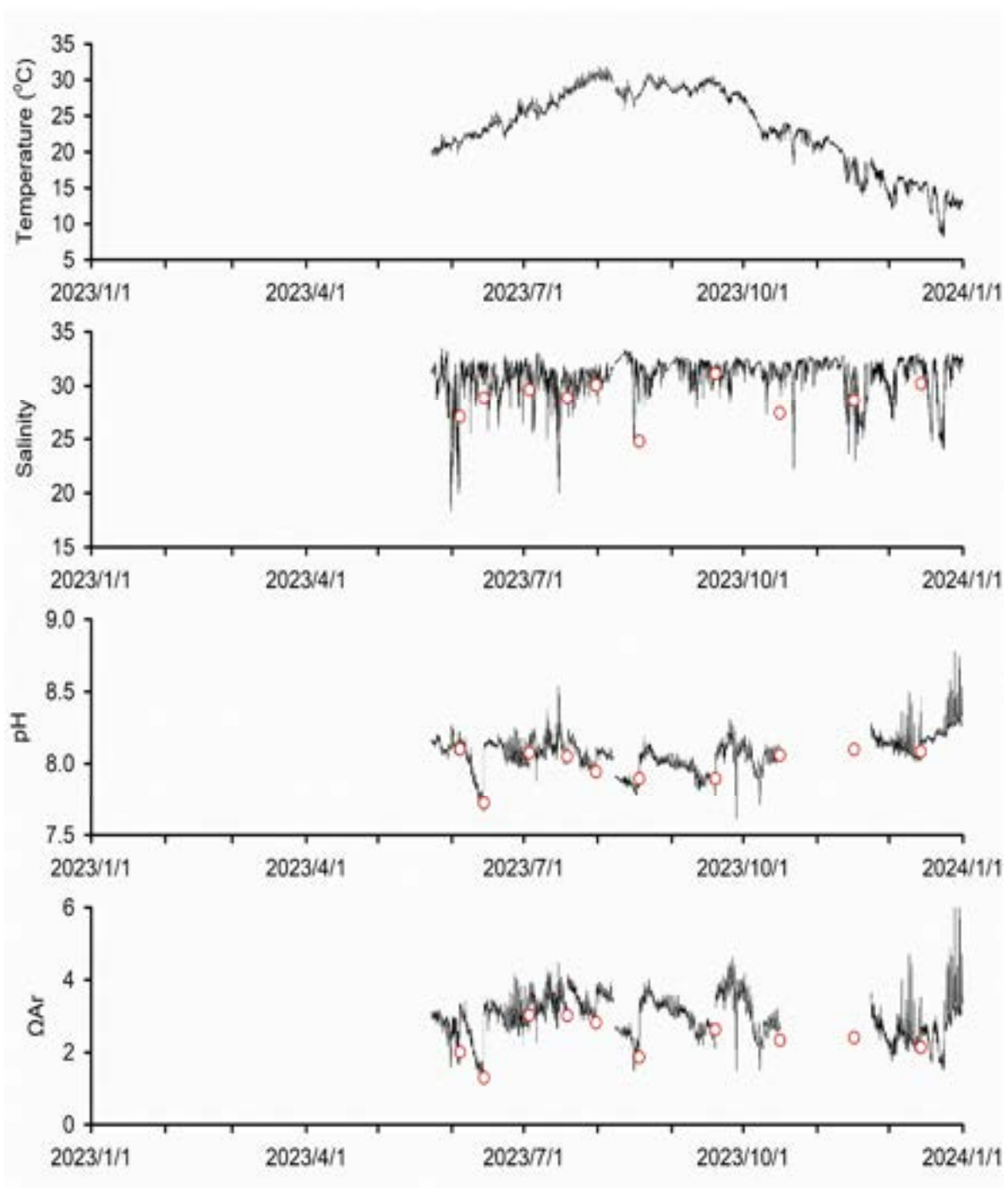


図 F-2. Stn.F-1 における連続観測結果

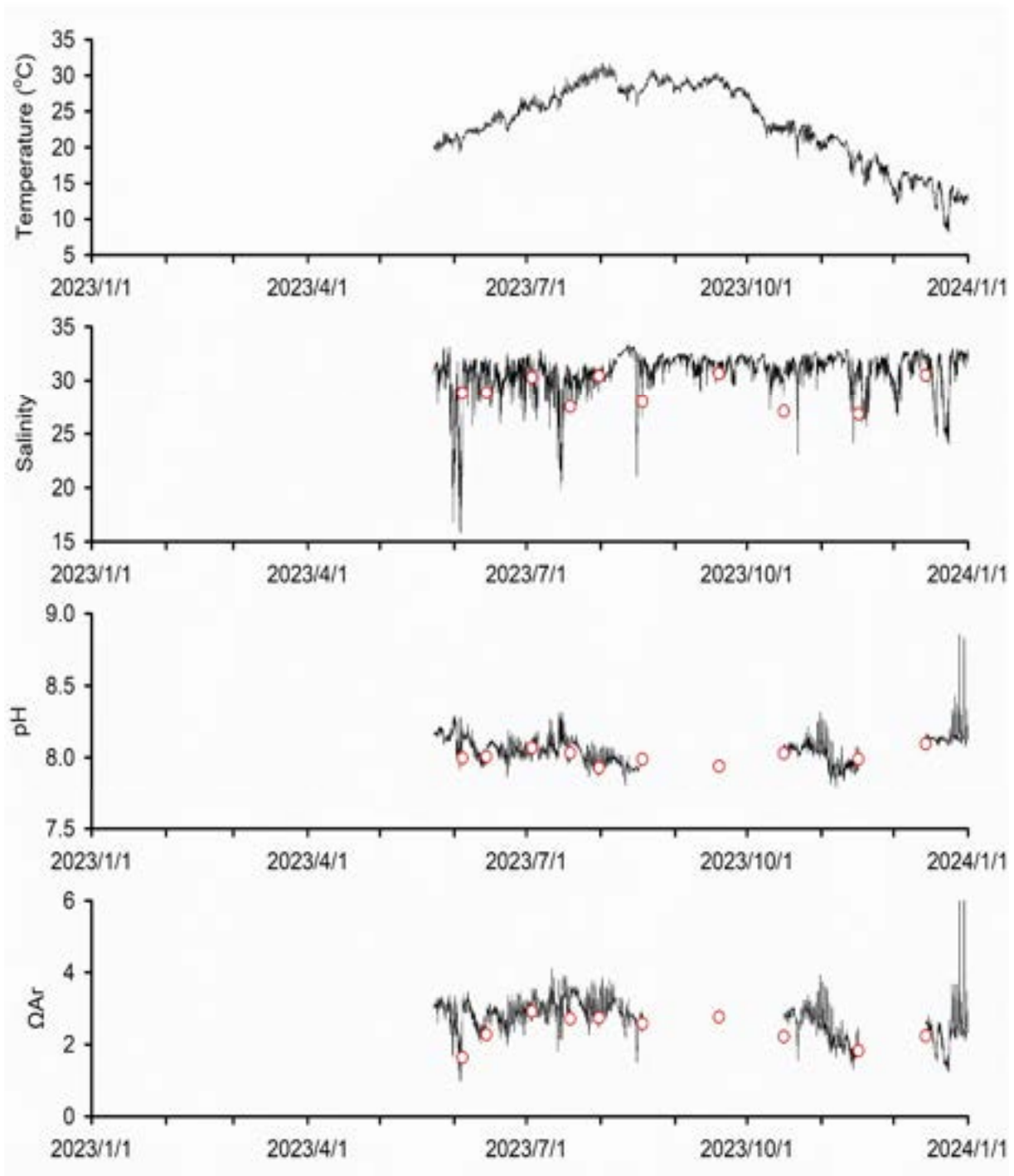


図 F-3. Stn.F-2 における連続観測結果

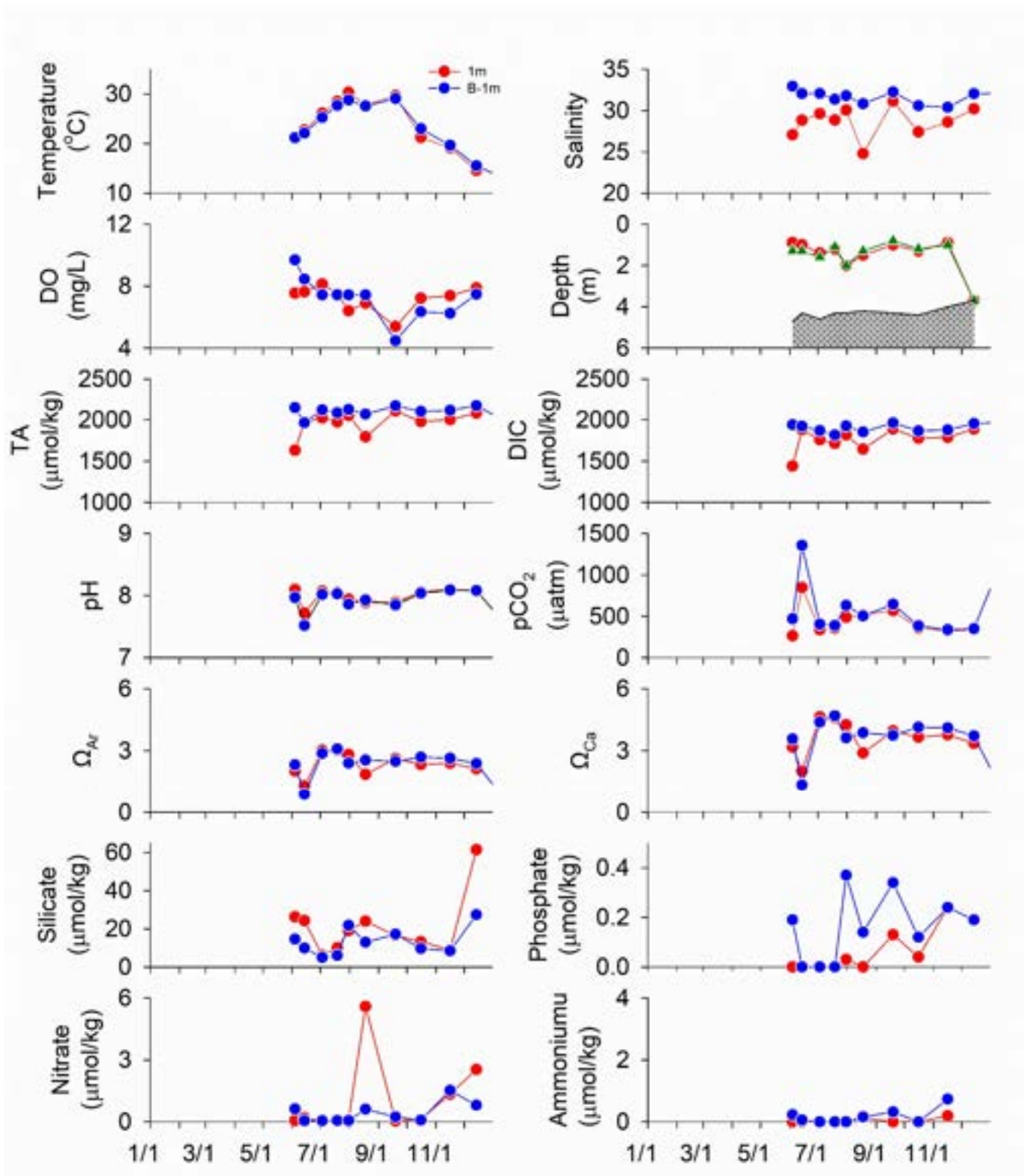


図 F-4. Stn.F-1 における表層(水面下 1m)および底層(海底上 1m)の定期観測結果

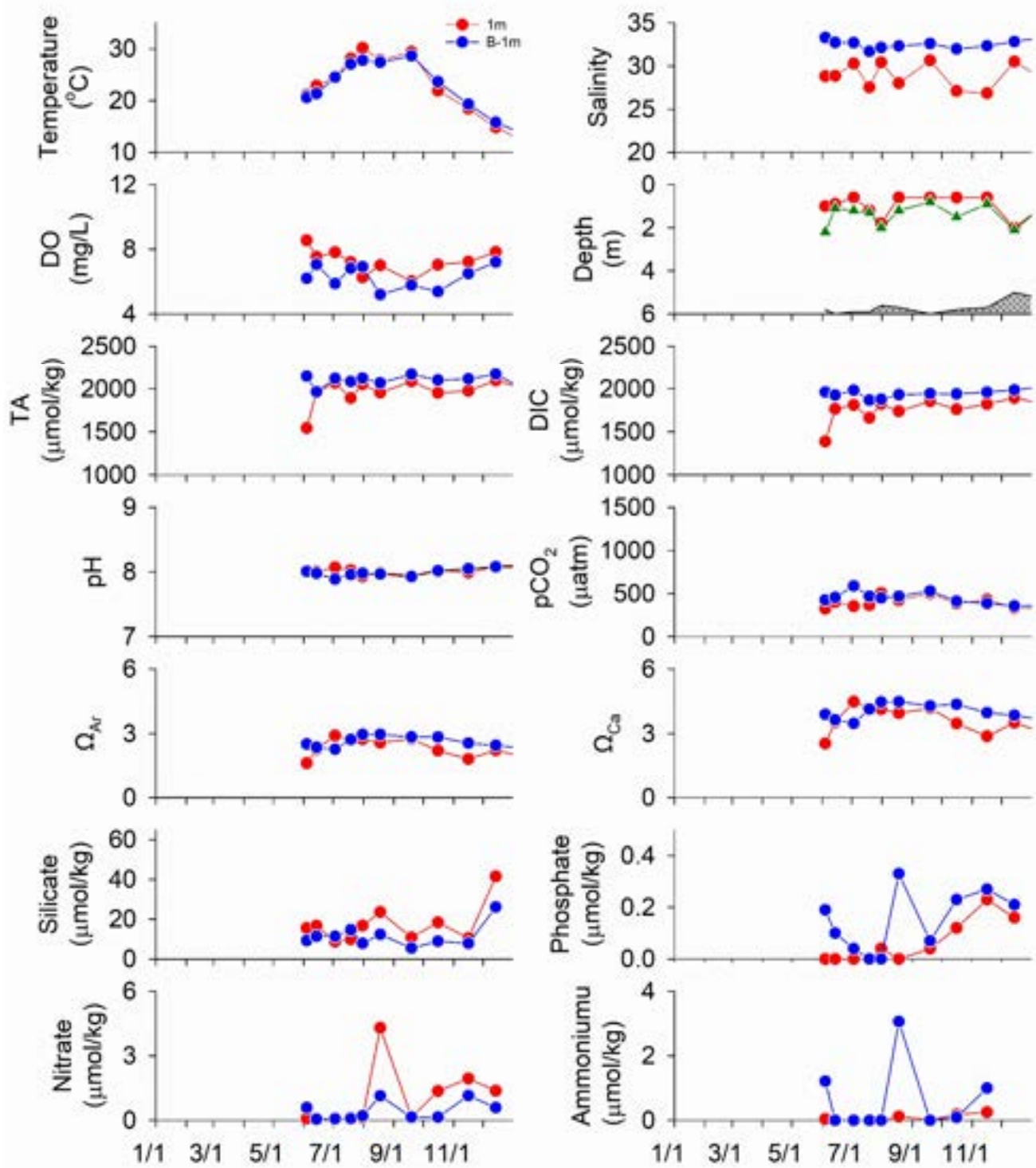
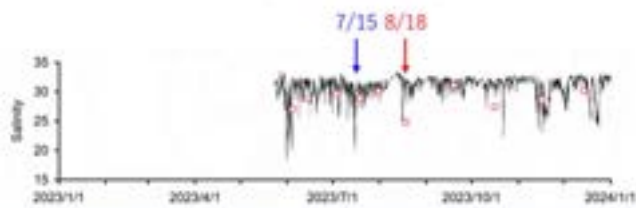


図 F-5. Stn.F-2 における表層(水面下 1m)および底層(海底上 1m)の定期観測結果

3. 出水時観測（表層海水）



Cabral et al. (2023) Mar. Chem.

- River water (Sal=3.9 ± 7.3): TA=698.7 ± 686.5 μM, DIC=440.3 ± 441.9 μM
- Fresh groundwater (Sal=0.1 ± 0.1): TA=198.9 ± 237.6 μM, DIC=462.2 ± 734.3 μM
- Saline groundwater (Sal=17.2 ± 8.3): TA=1514.1 ± 714.9 μM, DIC=1690.5 ± 877.2 μM

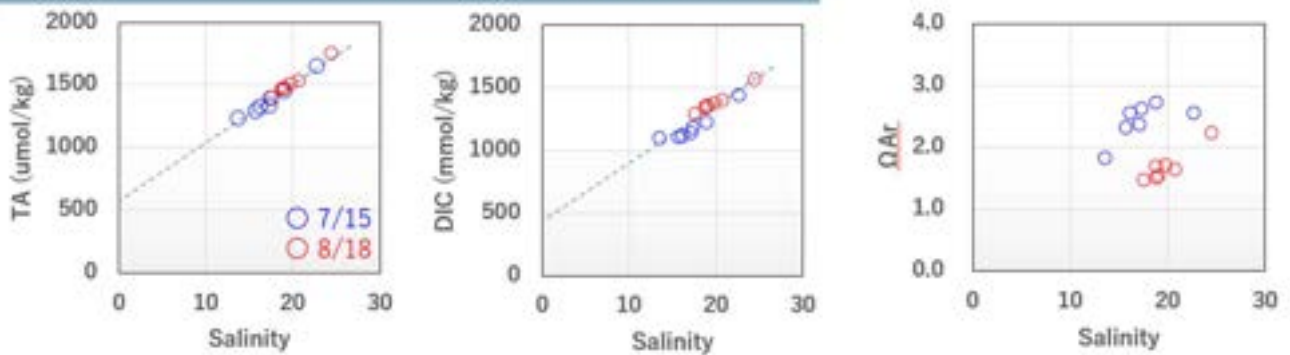


図 F-6. 出水時(2023 年 7 月 15 日および 8 月 18 日)の採水分析結果

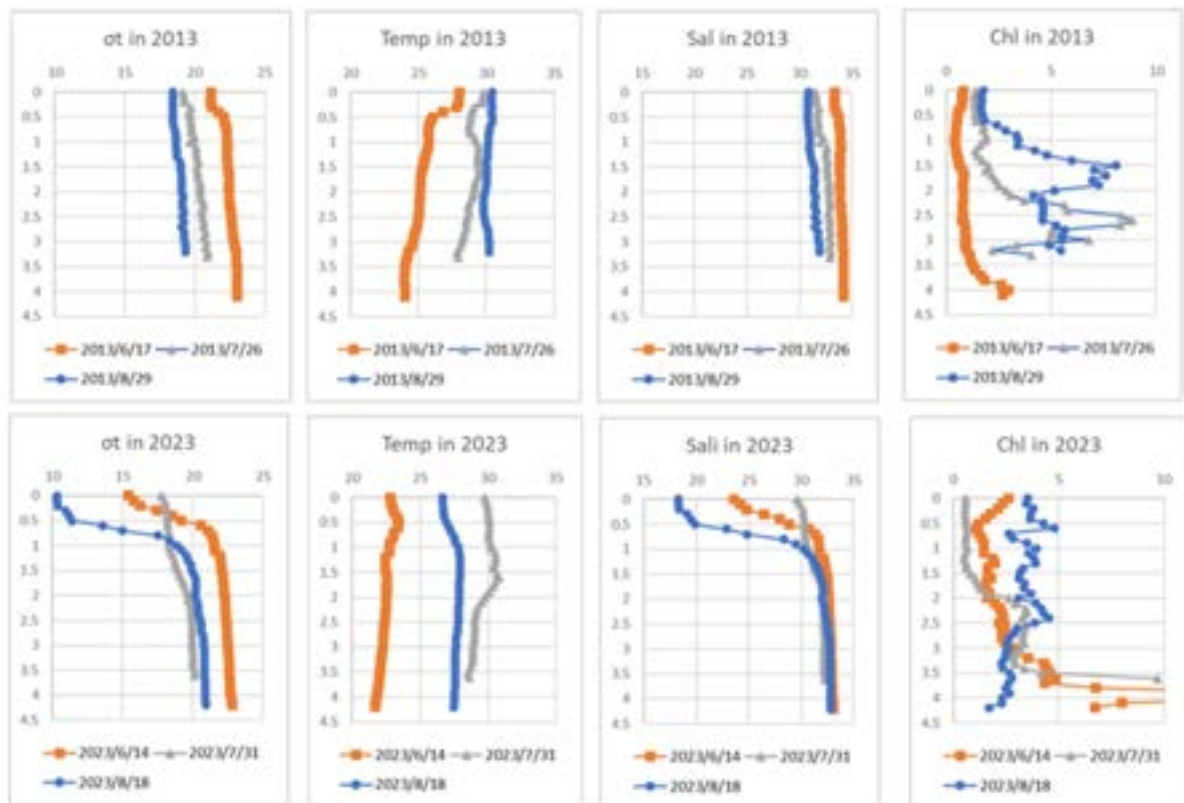
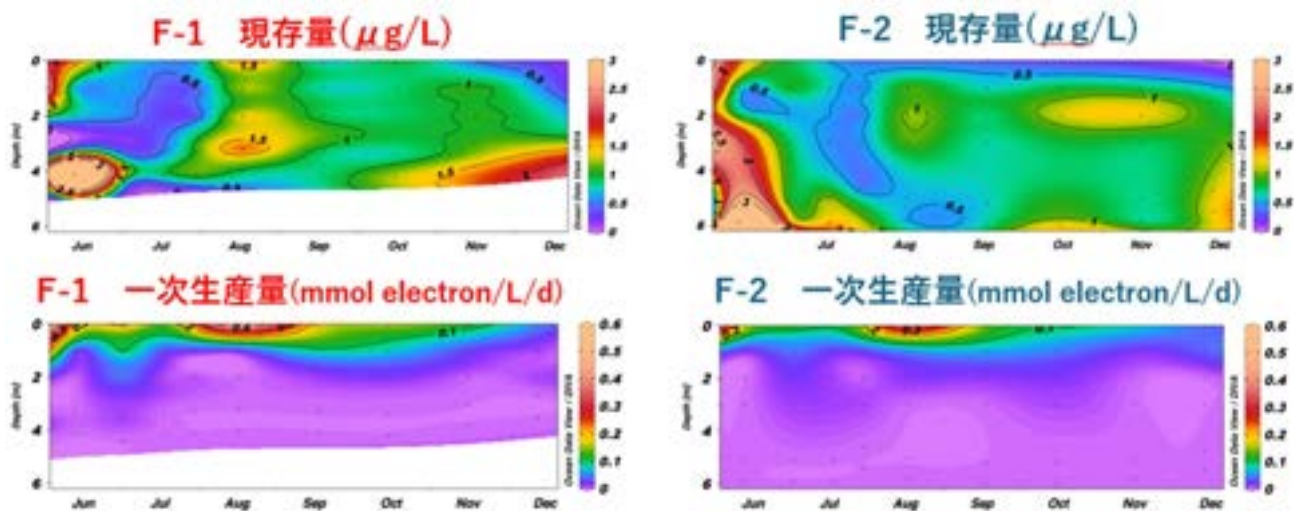


図 F-7. 2013 年と 2023 年の出水時の比較



Chl-aの極大は全層で確認できるが一次生産は表層のみ

中底層のChl-a極大=表層のChl-aが沈降したもの

図 F-8. Stn.F-1 および F-2 における植物プランクトン現存量(Chl-a)と一次生産量の鉛直分布

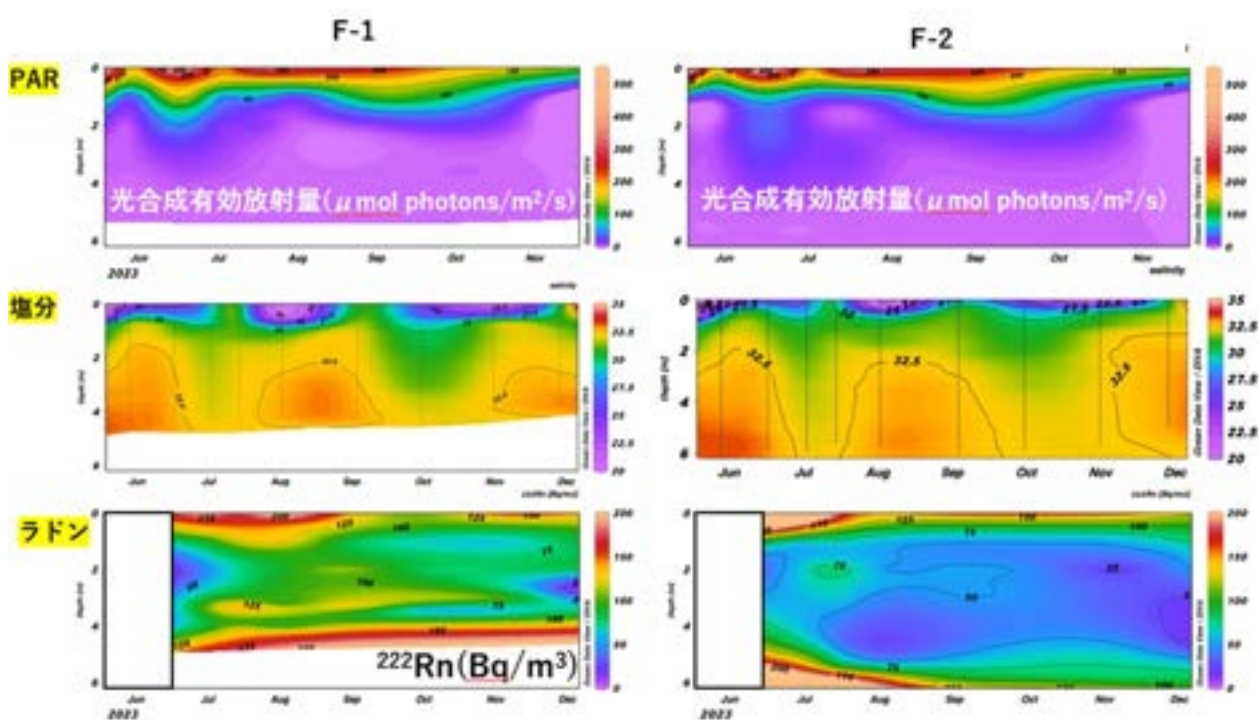


図 F-9. Stn.F-1 および F-2 における光合成有効放射量、塩分、ラドンの鉛直分布

また、植物プランクトンのサイズ別クロロフィルa現存量と一次生産量の水柱積算をしてみたところ、現存量、一次生産量ともに 20 μm 以下の小型植物プランクトンが 70~80%以上を占め支配的でありことが判明した(図 F-10)。20 μm 以下の小型プランクトンが支配的なのは宮津湾、若狭湾でも同様で、この現象は日本海の特徴なのかもしれない。

小浜湾はもともと淡水の流入により強固な塩分躍層が水深 1m という浅い層に形成され、その躍層が水温上昇により強化され、底層の貧酸素化と一次生産層の薄層化(1m 以浅)を招き、主に水深 1m 以深で生育する養殖カキは、極く表層で生産された植物プランクトン沈降物と水平移動してきた植物プランクトンやデトリタスを餌に何とか凌いでいたことが窺われた。

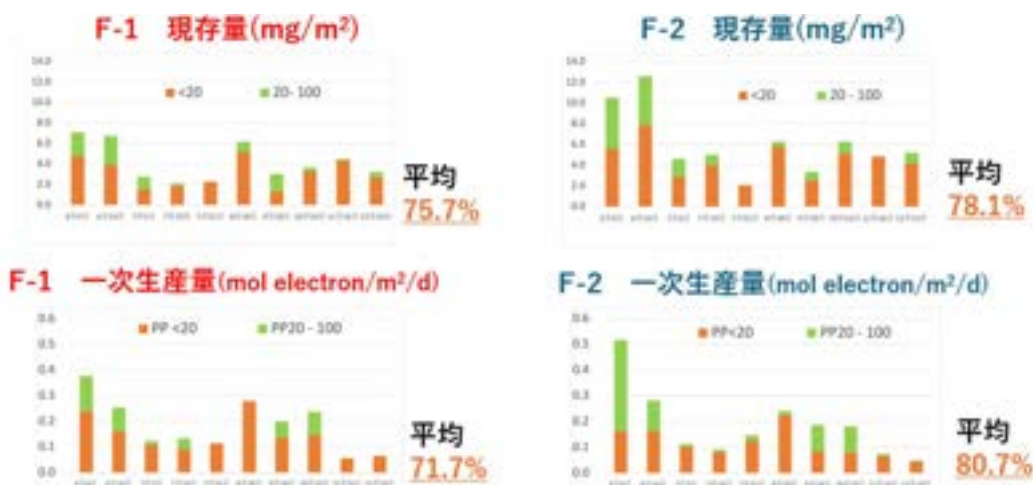


図 F-10. 植物プランクトンのサイズ別 Chl-a 現存量・一次生産量の水柱積算

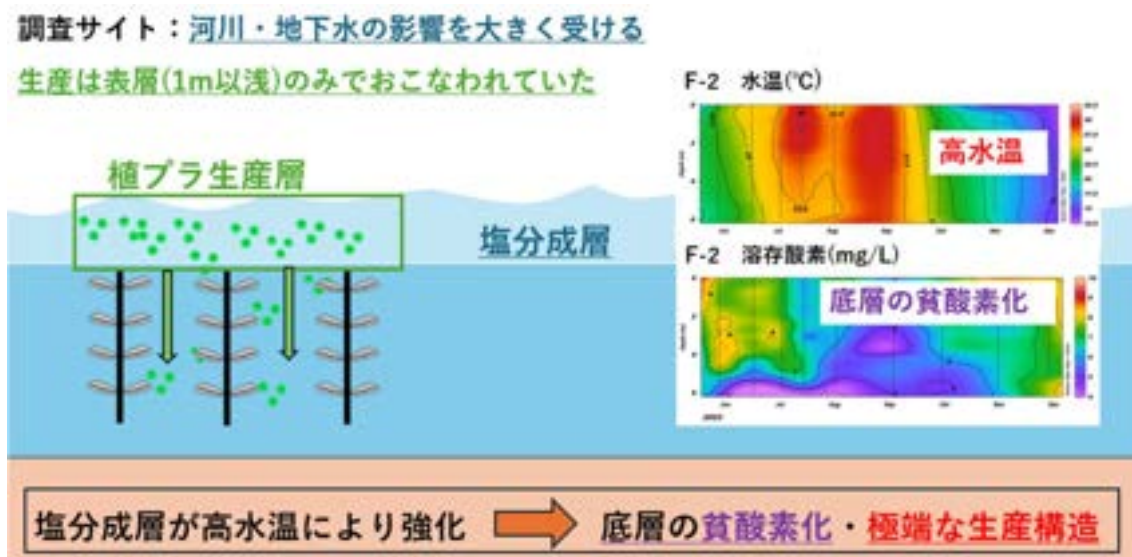


図 F-10. 植物プランクトンのサイズ別 Chl-a 現存量・一次生産量の水柱積算

G. 三重県鳥羽市^{おおのうら}生浦湾(以下、生浦湾)および英虞湾

三重県は古くから多様な漁業が盛んで、伊勢湾ではアサリ、ハマグリ等の採介漁業、ノリ養殖業、生浦湾、英虞湾ではカキ養殖業、アコヤガイ養殖業、ワカメ養殖業、アオサ(ヒトエグサ)養殖業、サザエ・アワビなど採介漁業が営まれている(図 G-1)。本プロジェクトの観測定点として、カキ養殖漁場として生浦湾 Stn.M-1(水深 9m)、アコヤガイ養殖漁場として英虞湾 Stn.M-2(水深 9m)を設定した(図 G-2)。

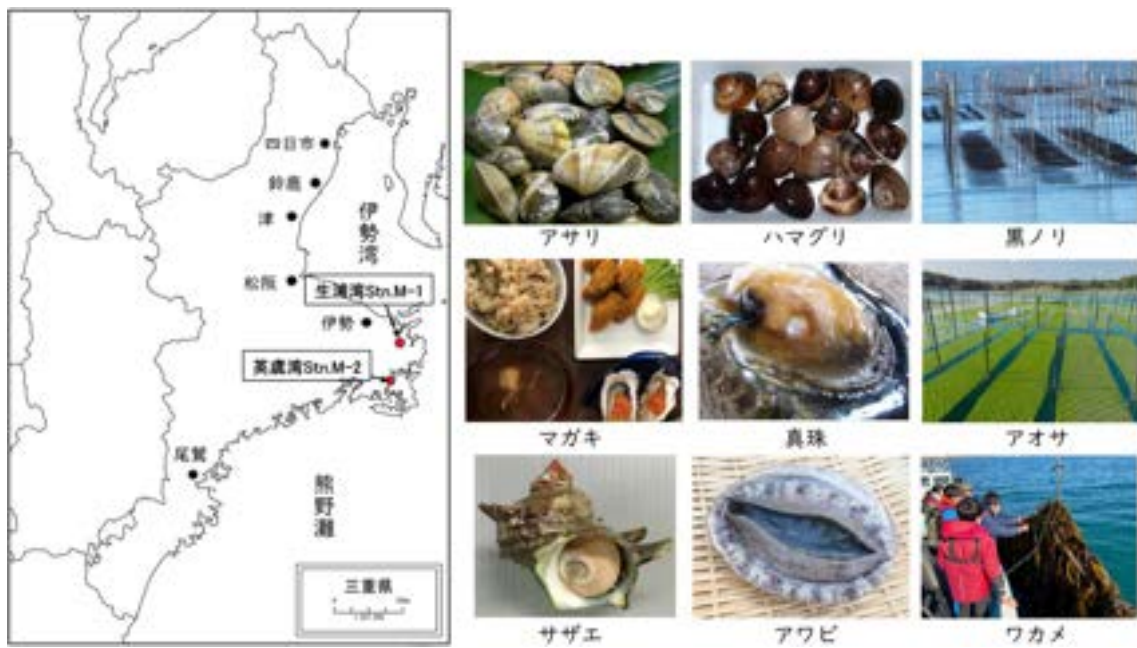


図 G-1. 三重県の水産業と観測定点

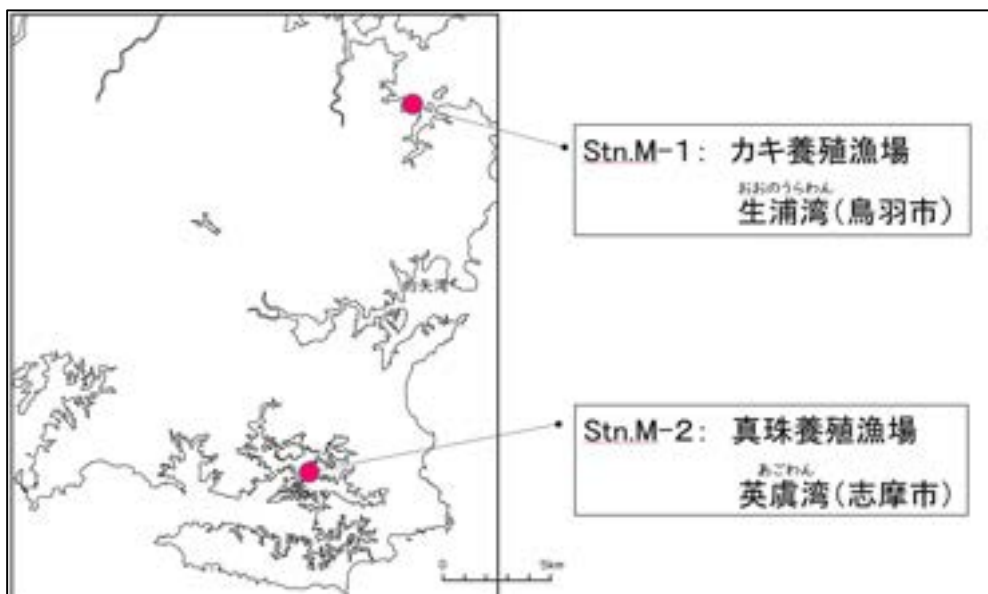


図 G-2. 三重県における観測定点: Stn.M-1, Stn.M-2

三重県鳥羽市生浦湾(Stn.M-1)ではカキ養殖業が盛んで、2018年までは生産状況も安定していたが、2019年から毎年のように大量斃死が続いており大きな問題となっている。2018年までカキ養殖生産が順調であったため、水質等の変化など環境データは乏しい。様々な海況の異変が取り沙汰されており、漁業者からも海洋酸性化による影響に対する不安の声も聞かれるようになり、大きな問題となる前の現段階から関係機関と協力して三重県における海洋酸性化に関する知見を収集することが必要である。



図 G-2. 三重県鳥羽市生浦湾(Stn.M-1)の現状

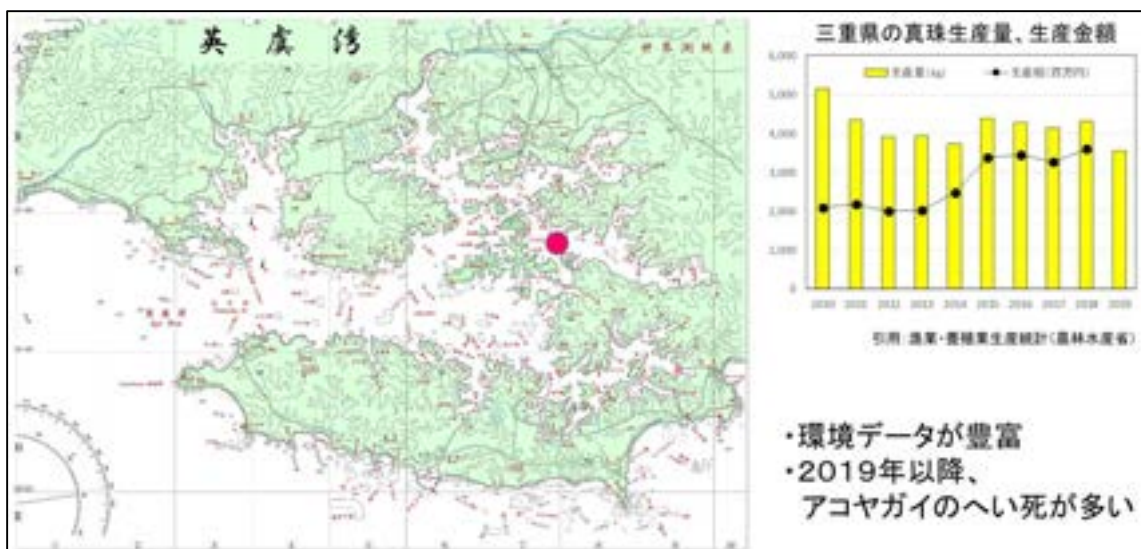


図 G-3. 三重県志摩市英虞湾(Stn.M-2)の現状

三重県志摩市英虞湾(Stn.M-2)では真珠養殖産業発祥の地としてアコヤガイ養殖のメッカであり、近年の真珠需要の高まりから 2022 年以降の浜値(入札価格)はそれまでの 200~300%と市況は極めて順調であるが、カキ養殖と同様に 2019 年から大量斃死が続いている。英虞湾では水質等の変化など環境データは豊富であるが、海洋酸性化に視点を置いた環境調査は実施したことがなく現状も不明であるため、新たに取り組むものである。

(1) 観測方法

① 定点連続観測

Stn.M-1 および Stn.M-2 とともに、2023 年 5 月 17 日に水面下 1mに水温・塩分計、pH センサー、クロロフィル濁度計を垂下設置した(表 G-1)。原則として1カ月に 1~4 回の観測機器に付着した生物の除去等の清掃、3 カ月に 1 回のデータ回収と人工海水を用いた pH センサーの校正作業を行い、すべての観測機器について、適宜、電池を交換した。なお、連続観測された pH の値は、採水分析の測定値を用いて、ドリフト補正を行った。

表 G-1. 三重県地先における連続観測定点と使用機器

観測定点	Stn.M-1: 鳥羽地先 (カキ養殖場)	Stn.M-2: 英虞湾 (アコヤガイ養殖場)
測器設置位置	水面下1m	
水温・塩分	ワイパー式メモリー水温塩分計 Infinity CTW ACTW-USB(JFEアドバンテック(株))	
pH	海水用pHセンサーSPS-14 (紀本電子工業(株))	
クロロフィル濁度	ワイパー式メモリークロロフィル濁度計Infinity ACLW2-USB (JFEアドバンテック(株))	

② 定点定期観測および採水分析

Stn.M-1 および M-2 における定期観測および採水は 2023 年 6 月から開始し、6~8 月には 2 回/月、それ以外は 1 回/月実施した。定期観測には多項目水質計 RINKO-Profiler ASTD102 (JFE Advantech Co.,Ltd.: D, T, Sal, Chl, DO) と HOB0 MX2501 pH・温度データロガー (Onset Computer Corporation: pH)を用いて、水温・塩分、クロロフィル、DO、pHを測定した。また、その都度採水を行い、ニスキン採水器を用いて Stn.M-1 および Stn.M-2 の表層(海面下 1.0m)と底層(海底面上 1.0 m)から採水し、p.39-40「酸性化モニタリングのサンプルの採水方法と保存方法」に従って採水サンプルを処理した後、JAMSTEC に送付し分析を行った。分析項目は、溶存態無機炭素(DIC)、全アルカリ度

(TA)、塩分(Sal)で、 Ω_{arag} は pH、TA、DIC から計算で求めた。栄養塩の分析は三重県水産研究所にて実施した。また、降雨直後の採水分析は、2023年10月8日と2024年3月1日の2回実施した。

(2) 観測結果

【生浦湾(Stn.M-1)】

生浦湾 Stn.M-1 における連続観測では、2023年5月～2024年1月までの水温は、9.32～30.09℃、塩分は6.37～33.45、pHは7.20～8.49、 Ω_{arag} は0.16～4.60であった。6月および8月には台風の襲来に伴いそれぞれ6月2日481.0mm、8月15日121.5mmの降雨があり、それに伴って低下したが、特に6月3日にはpHは7.20、 Ω_{arag} は0.16まで低下した(図 G-4)。これは明らかに降雨に伴う出水と流入した有機物分解によるものと考えられたが、7月にも降雨がなかったにもかかわらず塩分が15近くまで低下し、 Ω_{arag} は1を下回った。また、10月初めにも降雨がないのに塩分がスパイク状に15目で低下し、 Ω_{arag} も1近くまで低下した。これらについては原因が不明で、今後の精査が必要である。

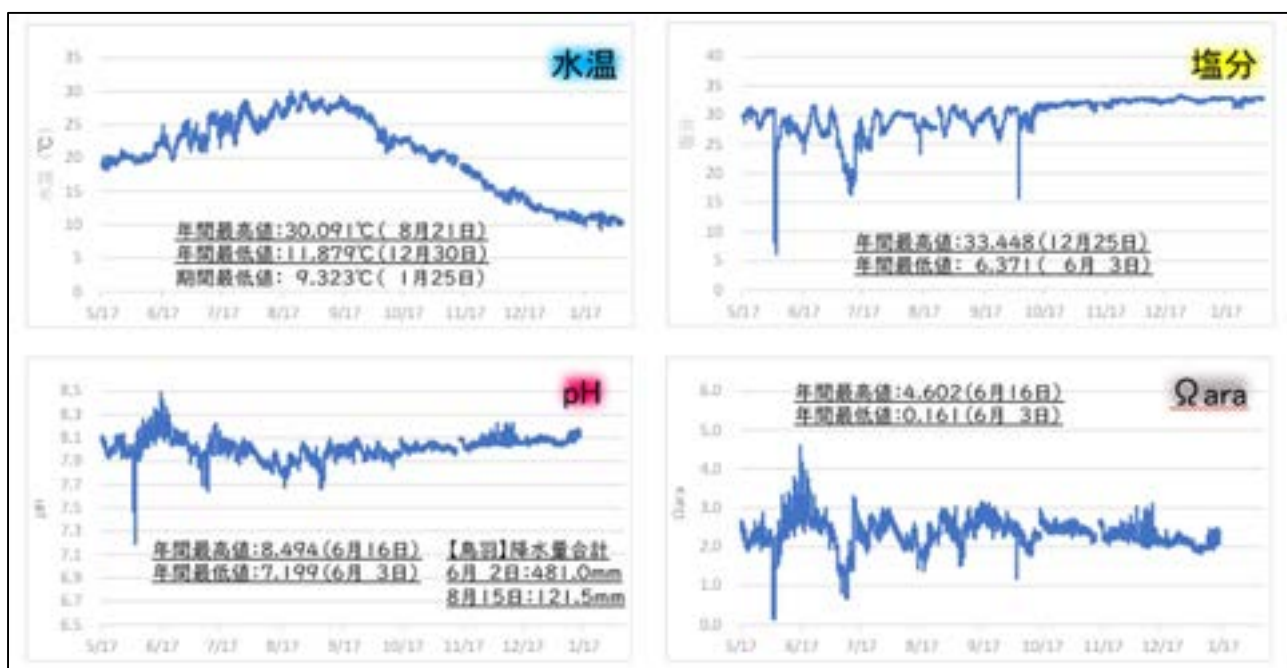


図 G-4. 生浦湾 Stn.M-1 における連続観測結果(1時間毎) 水温 塩分 pH Ω_{arag}

生浦湾 Stn.M-1 における定期観測で得られたデータのうち海底直上1～1.5mの水温、塩分、DO、pHをプロットした(図 G-5)。水温は10.11～26.88℃、塩分は20.21～32.90、DO72.64～108.65%、pH7.90～8.18であった。いずれも急激な変化はなく、極端な数値は認められず、DOも良好な状態で推移した。

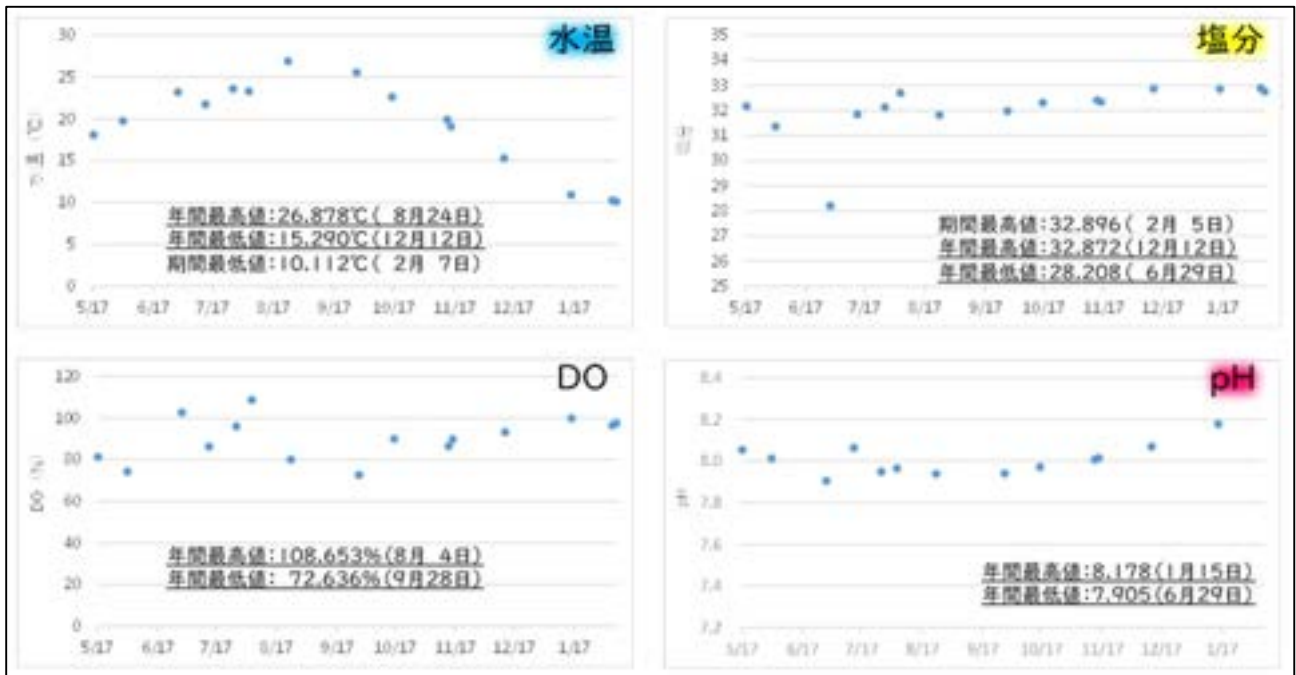


図 G-5. 生浦湾 Stn.M-1 における定期観測結果(海底直上 1 から 1.5m) **水温** **塩分** **DO** **pH**

生浦湾 Stn.M-1 における定期観測結果から混合層深度を読み取りプロットしてみると(図 G-6)、水温と塩分でよく似た様相を呈し、水温と塩分を最浅部で合わせてみると年間最浅値 0.32m(2023 年9月28日)、年間最深値 4.77m(2023 年6月1日)になった。年間最深値となった 2023 年6月1日は台風の影響を受けていたものと考えられた。

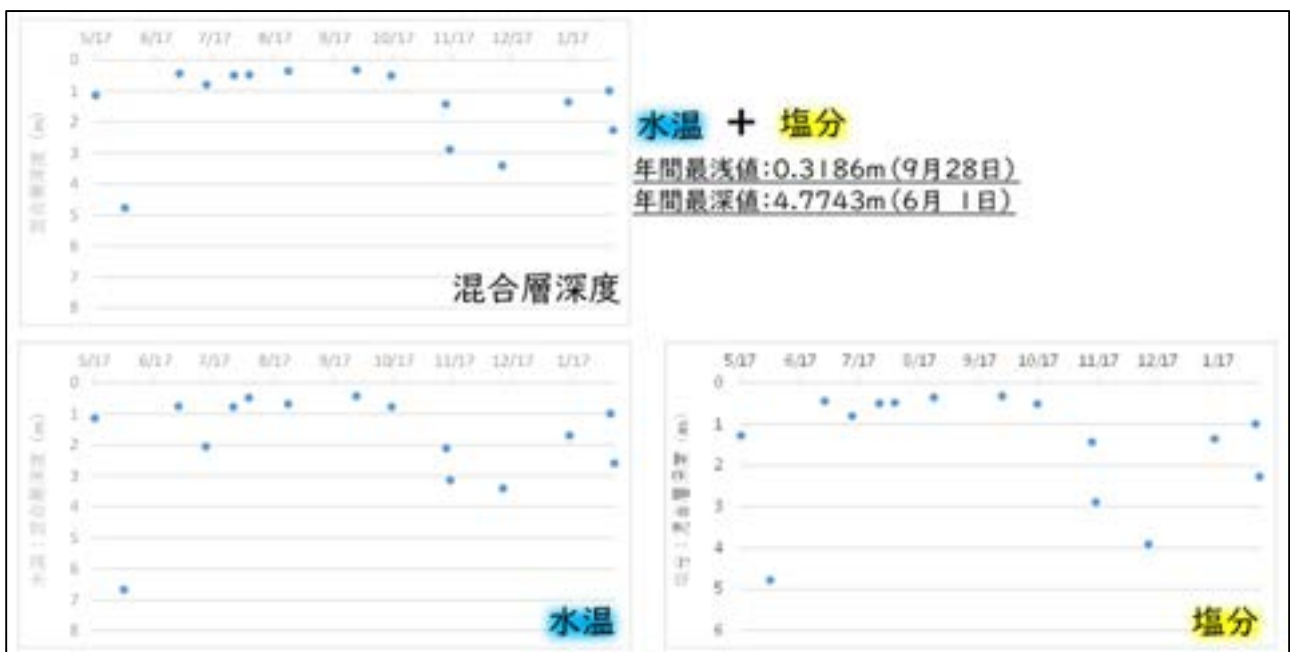


図 G-6. 生浦湾 Stn.M-1 における混合層 **水温** **塩分**

また、成層の発達する夏季(2023年8月4日)には、水温、塩分ともに水面下1mと非常に浅い層に躍層が認められた(図G-7)。

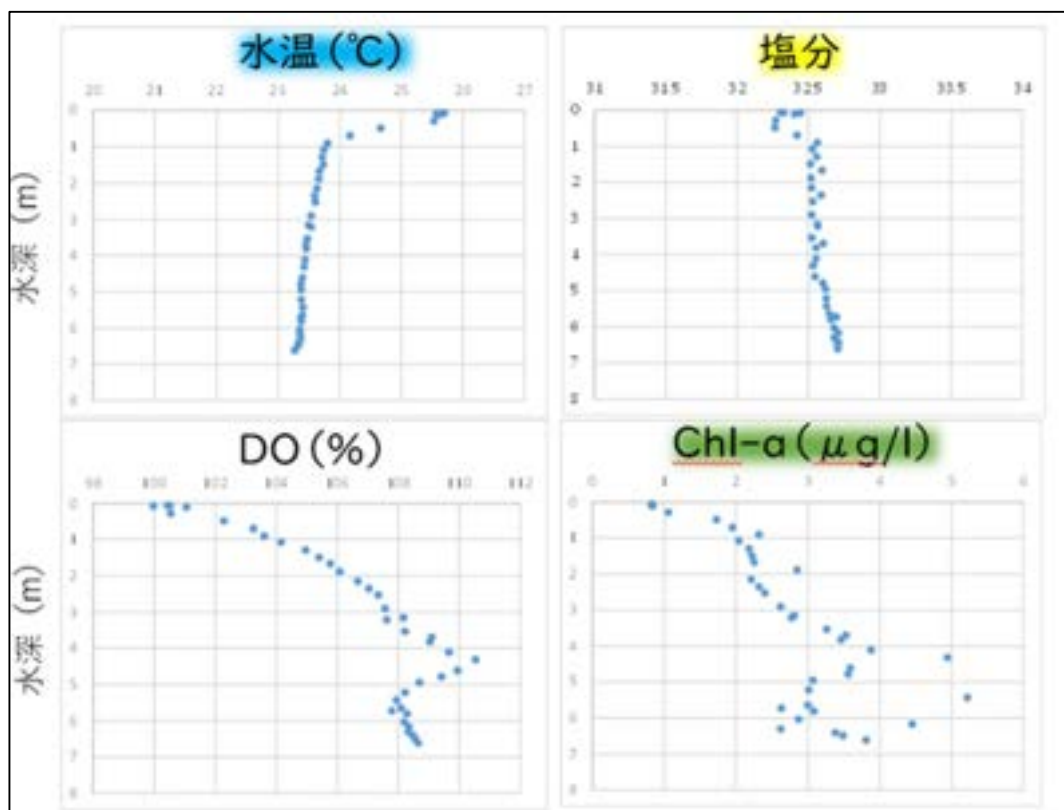


図 G-7. 生浦湾 Stn.M-1 の夏季における鉛直プロファイル

【英虞湾(Stn.M-2)】

英虞湾(Stn.M-2)における連続観測では、2023年5月～2024年1月までの水温は、9.96～32.12℃、塩分は22.45～37.35、pHは7.39～8.30、 Ω aragは0.74～4.84であった。6月および8月には台風の襲来等に伴いそれぞれ6月2日401.0mm、8月14日40.0mm、8月15日98.5mmの降雨があった。それに伴って塩分は6月5日に22.45まで低下したが、pHと Ω aragはこれより11日遅れで6月16日7.39、0.74まで低下した(図G-8)。この遅れは有機物分解までに時間を要したことによるタイムラグと考えられた。しかし、大雨もなく顕著な塩分・pH低下がないにもかかわらず、10月と1月に複数回にわたって Ω aragが1.5を下回った。これらの現象については原因が不明で、新たにDOの連続観測を加えるなどによりさらなる精査が必要である。

英虞湾 Stn.M-2 における定期観測で得られたデータのうち海底直上1～1.5mの水温、塩分、DO、pHをプロットした(図G-9)。水温は10.24～28.60℃、塩分は33.10～34.57、DO 11.87～120.77%、pH7.52～8.17であった。塩分は全期を通じて高いレベル安定していたが、夏季の8月には顕著に低下し最低11.87%になり、同時期にpHも7.53まで急減した。

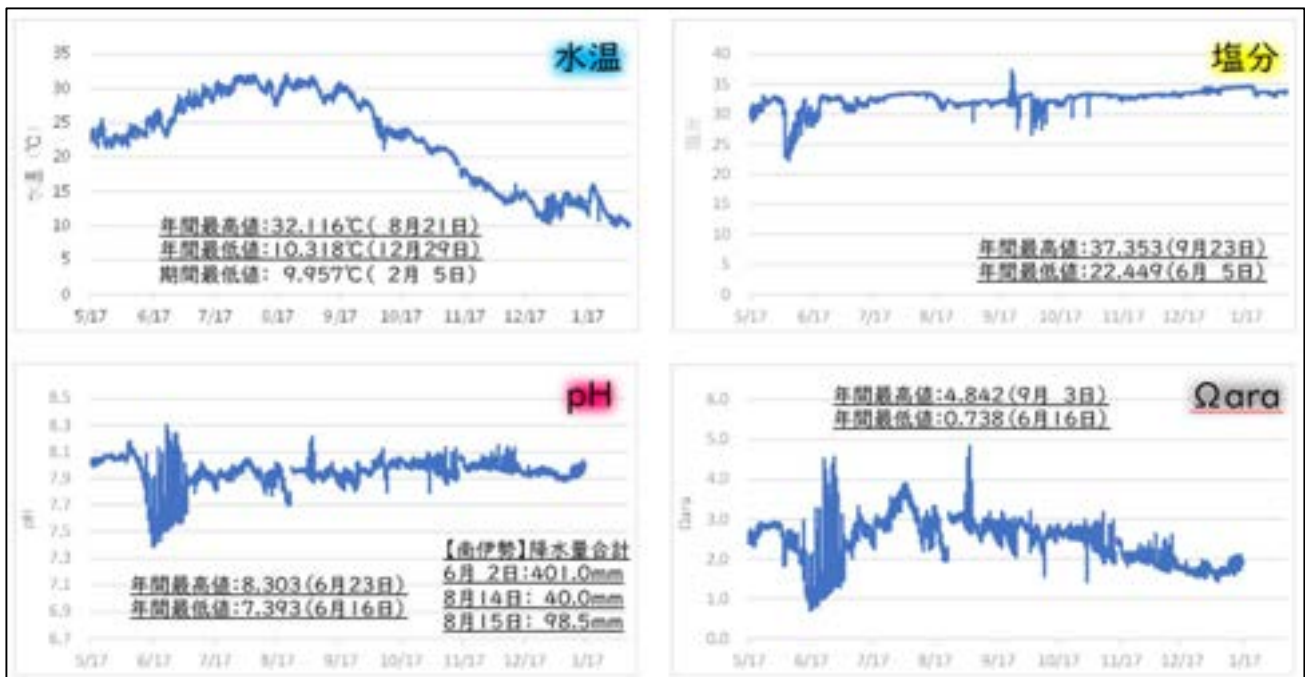


図 G-8. 英虞湾 Stn.M-2 における連続観測結果(1 時間毎) 水温 塩分 pH Ωara

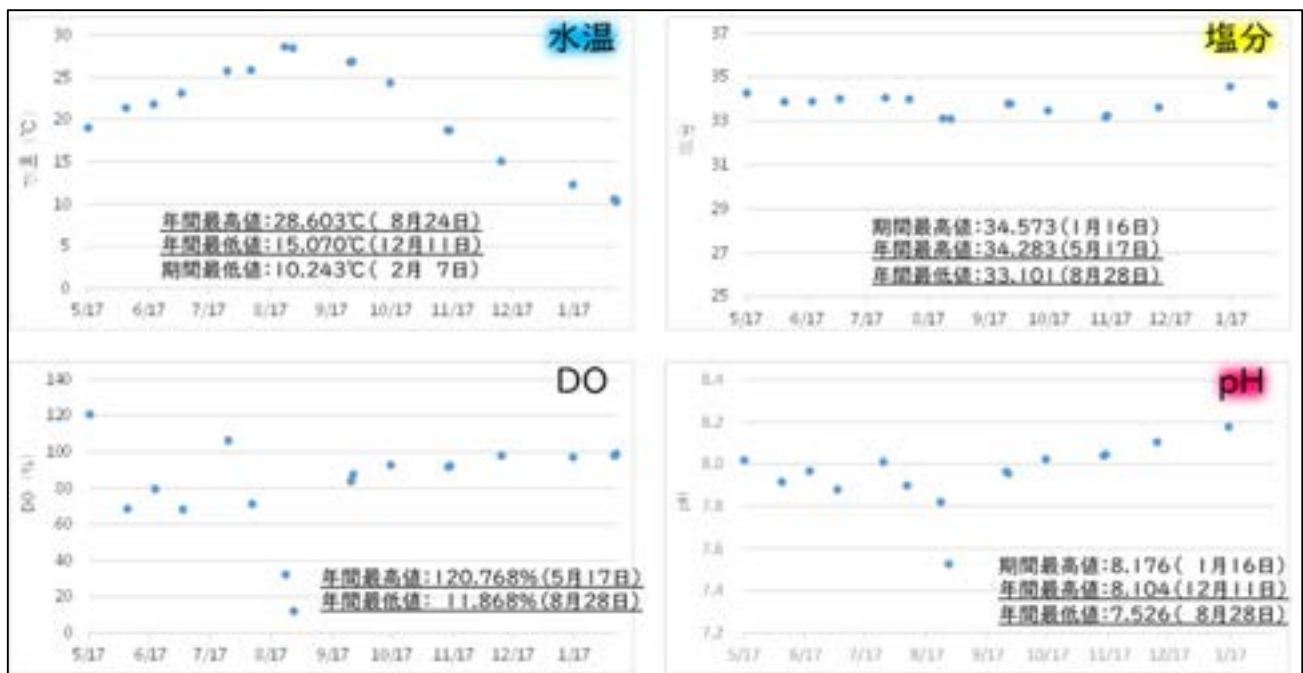


図 G-9. 英虞湾 Stn.M-2 における定期観測結果(海底直上 1 から 1.5m) 水温 塩分 DO pH

英虞湾 Stn.M-2 における定期観測結果から混合層深度を読み取りプロットしてみると(図 G-10)、水温の方がバラツキが大きく 12 月には最深部が水深 8m 近くに達したが、水温と塩分を合わせて最浅部でプロットすると年間最浅値 0.68m(2023 年 6 月 5 日)、年間最深値 4.31m(2023 年 8 月 7 日)になった。

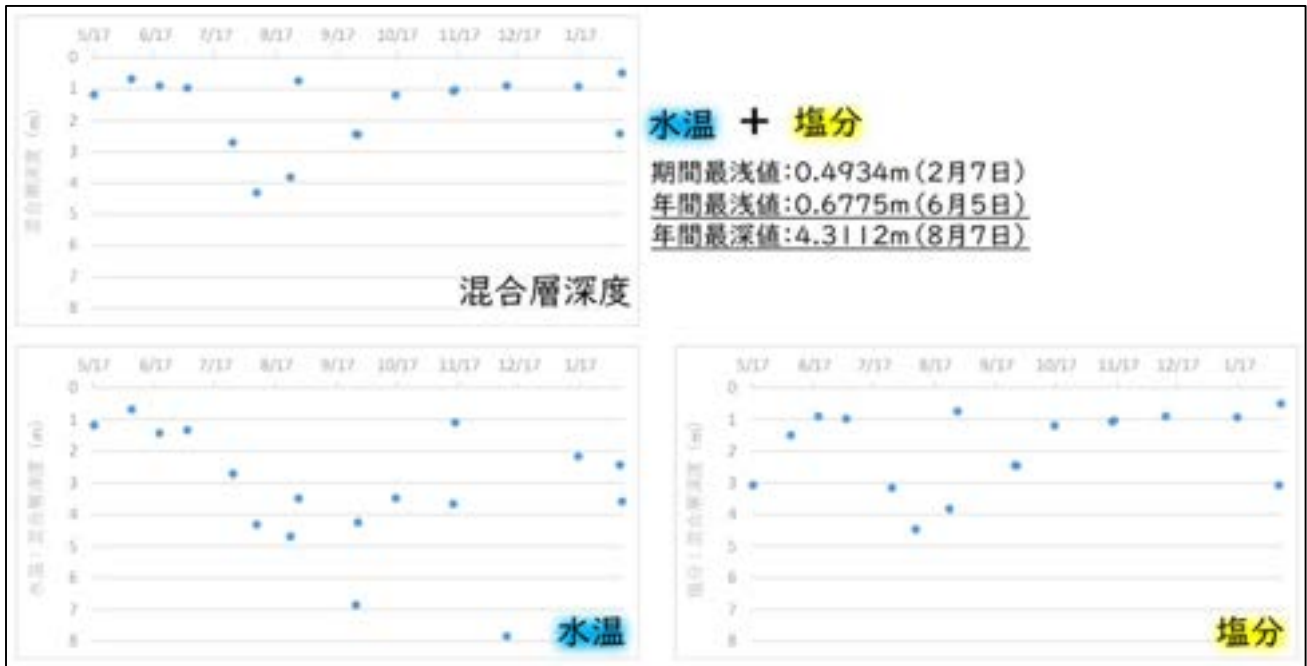


図 G-10. 生浦湾 Stn.M-1 における混合層深 水温 塩分

また、成層の発達する夏季(2023年8月7日)には、水温、塩分ともに水面下4mに顕著な躍層が認められ、1m深に躍層が見られた生浦湾とは水塊構造が全く異なっておりことが明らかになった(図 G-11)。

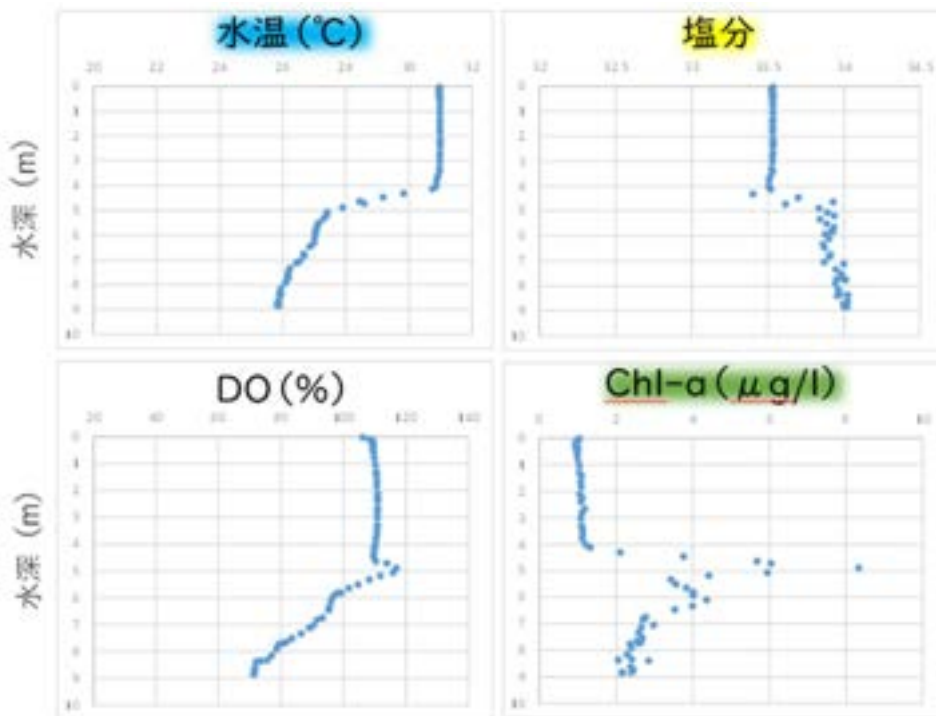


図 G-11. 英虞湾 Stn.M-2 の夏季における鉛直プロファイル

両定点のクロロフィル($\mu\text{g}/\text{L}$)は、生浦湾では11~1月の冬季には $2\mu\text{g}/\text{L}$ 前後と低いものの、5~8月にかけて $3\sim 82\mu\text{g}/\text{L}$ と変動しながらも増加したが、英虞湾では全期を通じて $2\mu\text{g}/\text{L}$ 前後で推移しており、栄養塩濃度でも、N、Pともに生浦湾では夏季には増加したが、英虞湾では全期を通じて低濃度で、貧栄養に陥っていた。

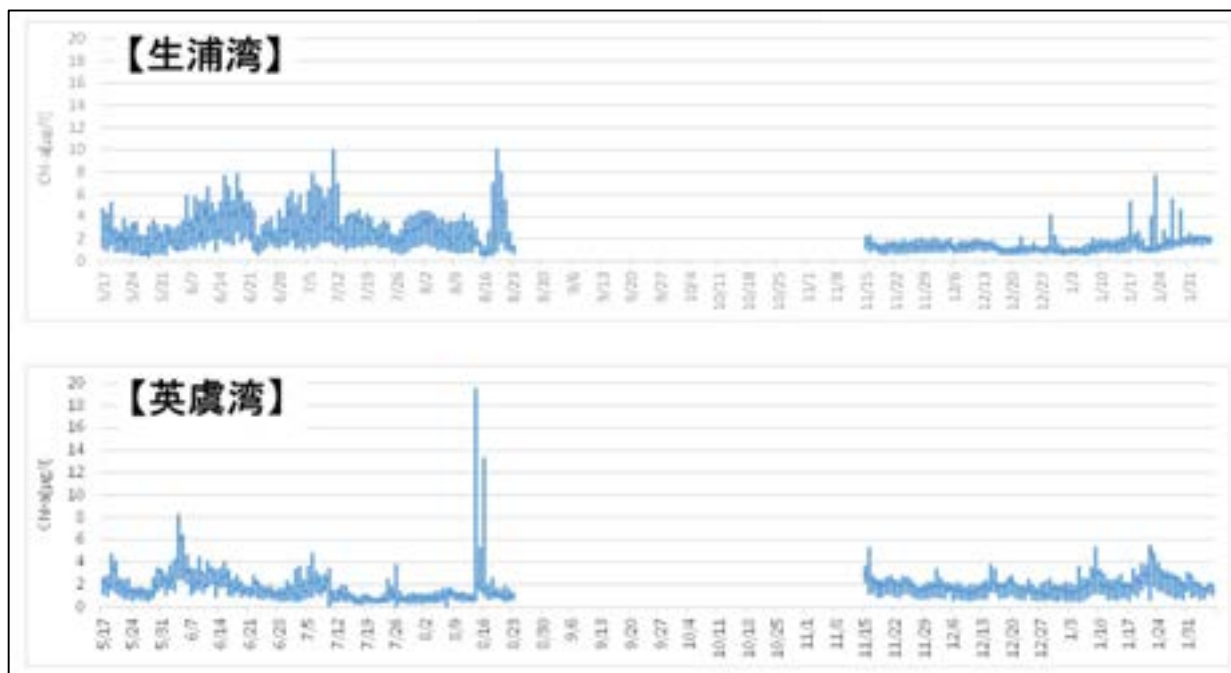


図 G-12. Stn.M-1 および Stn.M-2 におけるクロロフィル($\mu\text{g}/\text{L}$)の推移



図 G-12. Stn.M-1 および Stn.M-2 における栄養塩濃度の推移

I. 大分県姫島 CO₂噴出域 (CO₂シーブ)

日本近海には、海底から CO₂が噴出している CO₂シーブと呼ばれている場所が5か所知られており(図 I-1)、今後、海洋酸性化が進行した場合の将来的な海洋生態系を現出している海域として注目され International CO₂ Natural Analogues Network (ICONA) : 日本学術振興会研究拠点形成事業(和田, 藤井)による「CO₂ 湧出海域と非湧出海域の生物影響調査」、令和 5 年度おおいた姫島ジオパーク調査研究助成(藤井, 山田)による「姫島周辺の CO₂ 噴出海域における生物化学調査」が実施されているが、本年度より本プロジェクトでも新たな観測サイトとして加えることとなった。



図 I-1. 日本近海における主な浅海 CO₂ 噴出海域 (CO₂シーブ)

姫島 CO₂シーブでは、盛んに CO₂を噴出している時には水面から明らかに認識できるほどで(図 I-2)、過去の調査でガスが放出している直上でpH7.08 との測定結果がある。姫島には西浦と姫島灯台の 2 か所のガス噴出孔があり、ロートをさかさまにして噴出ガスを採取し分析し、それぞれ CO₂が 66.9%、40.5%、底生動物等に大きな悪影響を与える硫化水素は 9.7ppm、9.9ppm と極く微量(図 I-3)で、海洋生態系への高濃度 CO₂の影響を精査するに適切なフィールドであることが分かっている。

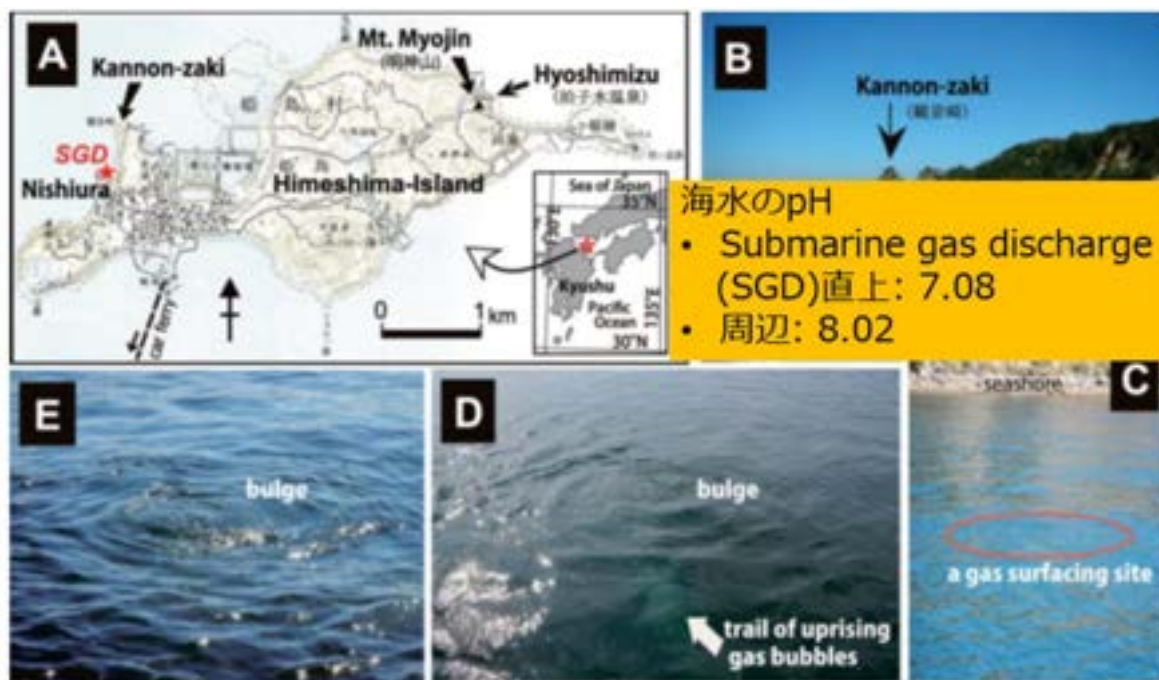


図 I-3. 大分県姫島 CO₂ シープ周辺における沿岸生態系への海洋酸性化影響調査<大沢・三島(2017, 火山)を改変>



	窒素	メタン	CO ₂	硫化水素
西浦	15.9 %	5.0 %	66.9 %	0.00097 % (9.7 ppm)
姫島灯台	33.1 %	10.9 %	40.5 %	0.00099 % (9.9 ppm)

図 I-2. 大分県姫島 CO₂ シープ噴出ガスの組成

2023年1月～2023年2月にかけてコントロール海域(●)とCO₂シープ(●)において海水試料を採取し分析した。コントロールは塩分、pH、 Ω_{arag} いずれも安定しており、瀬戸内海における標準的な数値で、コントロールサイトとして優良であることが確認されたが、CO₂シープではpH、 Ω_{arag} ともに大きく乱高下した(図 I-3)。また、数値モデリングも試みたが、コントロール海域についてはほぼ再現されており、今後とも境界条件の整備による精度向上が必要である。姫島周辺の10河川の全アルカリ度を調査したところ、909.7～2027.3と狭い領域ながらかなり河川によって大きく異なっていたが、河川の全アルカリ度としては東日本に比べて高い傾向にあった(図 I-4)。

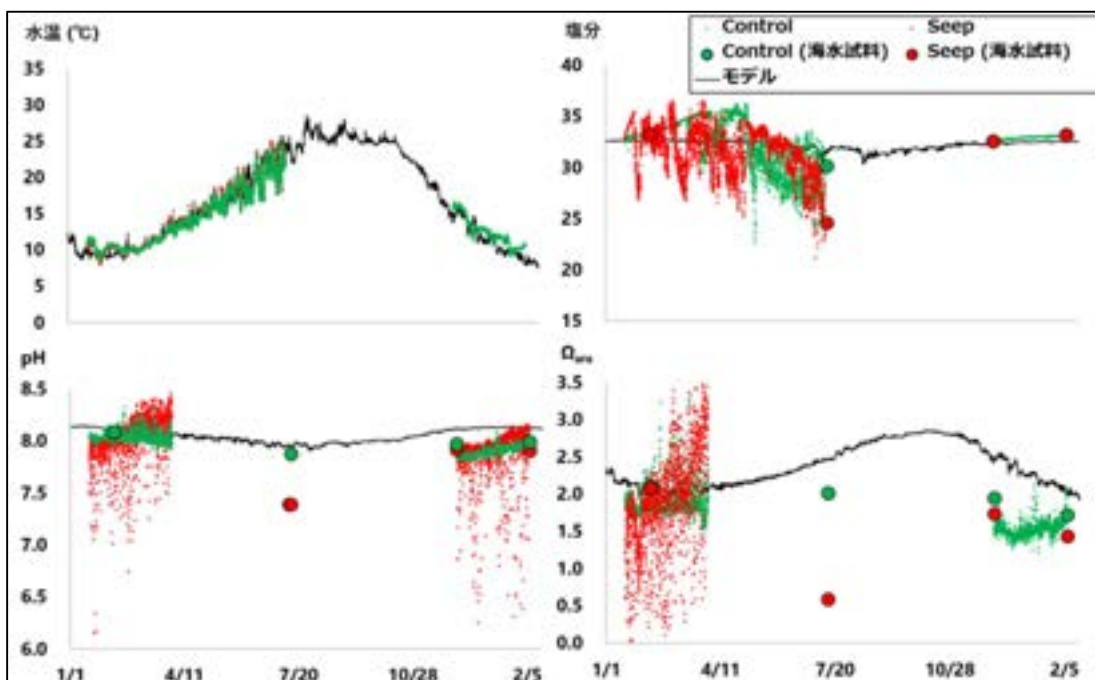


図 I-3. 大分県姫島西浦 CO₂シープ周辺における採水分析および数値モデリングの結果



図 I-4. 姫島周辺 10 河川の全アルカリ度

姫島周辺の pH は、CO₂ 非噴出域 (コントロール海域) では潮汐に関係なく安定していたが、CO₂ 噴出域 (CO₂ シープ) では干潮時に急激に低下する様子が確認された。また、式根島など多くの日本近海の CO₂ シープでは広範囲にわたってその影響が確認されているが、姫島 CO₂ シープでは東西方向、南北方向ともに 10m 程度の影響範囲であることがわかった(図 I-5)。

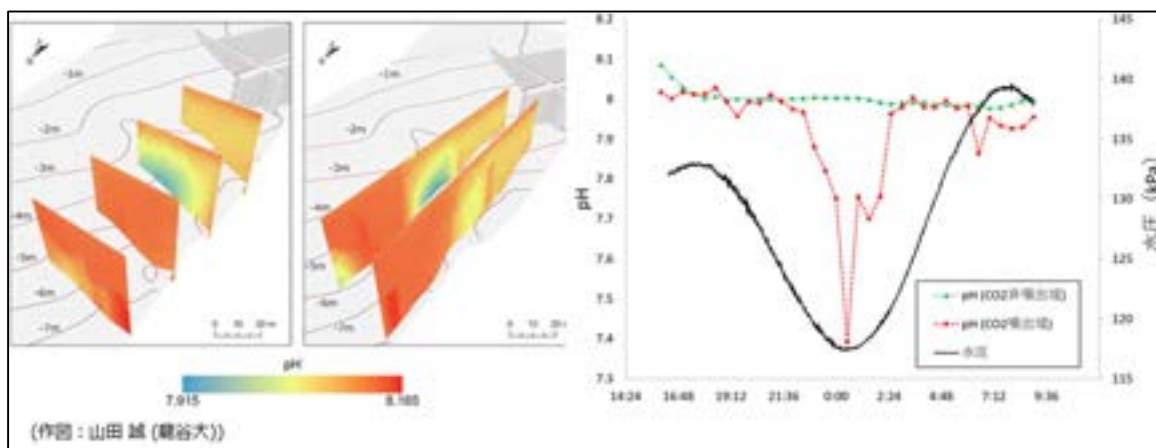


図 I-5. 大分県姫島西浦 CO₂ シープ周辺におけるモニタリング結果

本年度は予備的な調査であったが、次のことが明らかになり、来年度にはワイパー付き水温塩分計に統一して測定頻度と精度を向上させ、河川からの淡水・物質流入の影響を加味しながら連続観測、採水分析のデータを解析するとともに、境界条件の発掘整理を進めながら数値モデリングの精度の向上を図っていくこととする。

- 姫島周辺の CO₂ 非噴出域は瀬戸内海の標準的な海洋環境であり、数値モデリングの結果も CO₂ 非噴出域で観測された各パラメータ値を現実的に再現できており、瀬戸内海西部を代表するモニタリングサイトとして優れている。
- 姫島周辺の CO₂ 噴出域では pH や Ω_{ara} の顕著な短期変動が見られ、特に潮汐による影響が顕著である。
- 姫島西浦では CO₂ 噴出が海洋環境に及ぼす影響は半径 10m 程度と限定的である。
- 姫島周辺の 10 河川の全アルカリ度は、東日本に比べて相対的に高めであった。

IV 海洋観測の結果に基づく総合的な評価および考察

1. 調査海域ごとの調査結果概要とそれぞれの海域特性

2022 年度には、調査対象海域が志津川湾(宮城県)、日生(岡山県)、廿日市(広島県)、北木島(岡山県)、佐田岬(愛媛県:豊後水道)、内海(愛媛県:豊後水道)、佐伯湾(大分県:豊後水道)の7海域であったが、2023年度には小浜湾(福井県)、生浦湾(三重県)、英虞湾(三重県)、広島市地先(広島県)、姫島(大分県)の5海域が加わり12海域となった。また、対象養殖種もマガキだけであったのがアコヤガイ(英虞湾)が加わった。12海域のうち、酸性化傾向が顕著に現れたのは、それぞれ発生頻度や発生期間などは異なるものの志津川湾、小浜湾、生浦湾、英虞湾、日生、北木島、廿日市、広島市地先、姫島の9海域で、pHの大幅な低下はないものの塩分とpHの相関が明らかになったのは豊後水道の佐田岬と佐伯湾、pHの大幅な低下もなく塩分とpHの明確な相関も認められなかったのは豊後水道の内海であった。内海では黒潮の影響を強く受けるため瀬戸内海奥部の沿岸酸性化の影響を受けにくくpHの低下が観測されなかったが、これにより少なくとも豊後水道沖の太平洋では海洋酸性化が進行していないことを証明するものである。

北木島については、2022年度調査において出水後に顕著な塩分低下に見舞われてもこれに追随したpH・ Ω_{arag} の低下が認められず、高梁川(岡山県)・太田川(広島県)河口部から10km以上離れていることから、河川水は到達しても有機物はこのプロセスで沈降またはトラップされ、沿岸酸性化の影響を受けていないかを見受けられた。しかし、2023年度に Ω_{arag} が全期を通じて他の海域に比べて常時低い数値であることが判明し、その季節変動等もむしろ廿日市に近く、一転して酸性化が進行している可能性がある海域として注目され、地元のカキ養殖漁師のマガキ成貝の殻が薄くなっているとの主張を裏付ける結果となった。塩分低下、DO低下が伴う沿岸酸性化は生じていないのに、なぜに Ω_{arag} が低いのか？北木島の観測測器はカキ養殖漁場内のカキ養殖筏に設置している。生浦湾や日生などカキ養殖場に観測測器を設置した観測定点では、出水等によりpH・ Ω_{arag} の数値が昼夜で乱高下する。これは10:00~14:00頃の日射の強い時間帯は植物プランクトンや付着藻類による光合成が盛んなため上昇し、夜間には呼吸により低下するからである。北木島のある笠岡市地先海域は栄養塩濃度が低い貧栄養海域であるため光合成が低調であると考えられ、観測測器の設置場所はカキ養殖筏で、かつ周辺には多くのカキ養殖筏が設置されている。全期を通じて Ω_{arag} が低いのは多くの養殖カキによる呼吸の影響を受けている可能性があるが、さらなる精査が必要である。

Ω_{arag} が閾値1.5を下回ったのは9海域であるが、CO₂シープである姫島を除き、その発生頻度が高く、かつ発生期間が長いのは、廿日市>北木島>日生>生浦湾>英虞湾>小浜湾>志津川湾の順であった。北木島を除き、いずれにおいても塩分とDOの低下が伴い、淡水の流入とそれに伴う有機物分解に起因する沿岸酸性化によるものである。

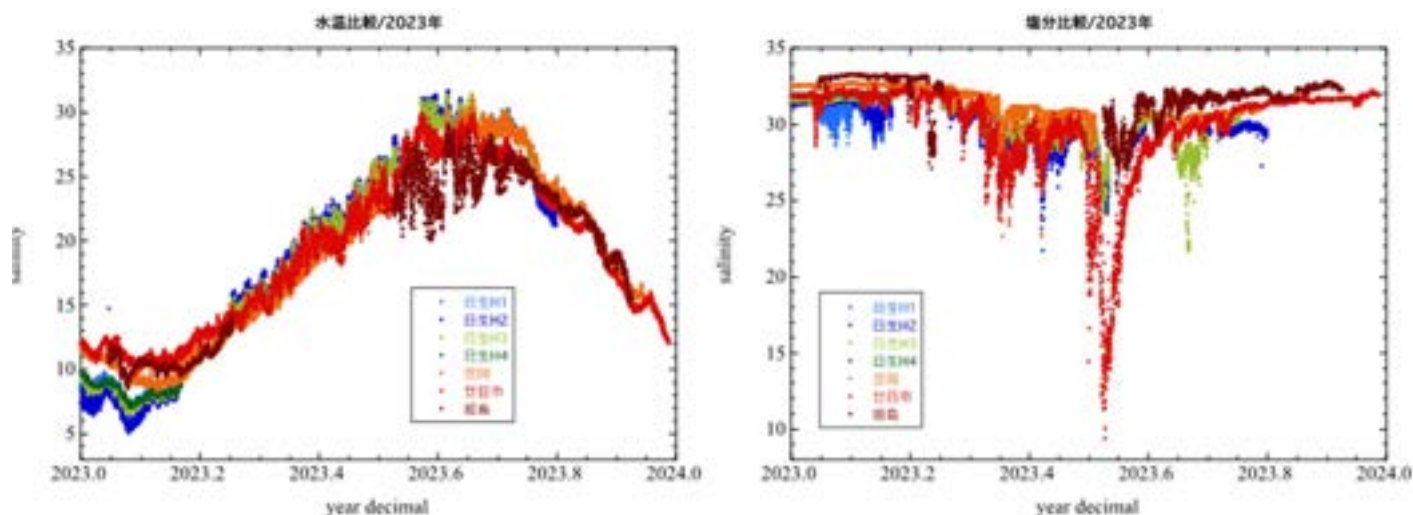
2022年度に大出水により著しく沿岸酸性化が進んだ志津川湾では、2023年度には6

月 16 日に出水があっただけで、 Ω_{arag} が閾値 1.5 を下回ったのはその 1 回のみでそれも短期間で終焉した。志津川湾には大きな流入河川が存在しないため、近傍の北上川などの大河川の影響を強く受けていると考えられ、小規模な降雨で受ける影響は小さいのかもしれない。

小浜湾でも、 Ω_{arag} が閾値 1.5 を下回ったのは 2 定点において全期を通じてそれぞれ 2~3 回程度で、発生期間も短かった。ここでは北川と南川の河川水の影響を色濃く受けており、水深 1m という浅い層に強固な塩分躍層が形成されており、これを境に上層と下層で水質環境が大きく異なると考えられる。しかしながら、採水層がちょうど水深 1m で、なおかつ採水に使用した長さ 60 cmニスキン採水器を縦に使用したため、塩分躍層の上下層で採水時にコンタメが生じたものと考えられ、採水分析値のバラツキが著しく、センサーの測定値との不整合も生じた。小浜湾の水塊構造と酸性化の現状を把握するには、塩分躍層の上層と下層に分けて、採水層や連続観測機器の設置個所を見直す必要がある。また、小浜湾では、この 1m 深の塩分躍層の存在が災いしてか、光合成が極く水深 0m の極く表層のみでしかなされておらず、一次生産層が極めて薄いのも特徴的であった。

2. 瀬戸内海の観測点間の pH 変動パターンの比較

瀬戸内海において日生、笠岡(北木島)、廿日市については複数年のデータが取得され、2023 年 4 月からは姫島も追加されて東西に 4 海域の観測サイトが設けられ、それぞれの pH・ Ω_{arag} の変動パターンの比較や相互の関連性について考察した。



日生 Stn.H-2(カキ採苗場)、Stn.H-3(アマモ場近傍)、笠岡(北木島)、廿日市、姫島の水溫・塩分の 2023 年 1 月~12 月の推移を図 1 に示した。日生で冬季にやや低い、パターンはどこもほぼ同様であった。塩分は太田川の影響があるため廿日市が最も低下し変動幅も大きい。日生では、降雨後に断続的に塩分が低下するが、H-2 と H-3 で同じ地

先であるにもかかわらず低下するタイミングがずれており、これは日生に河川が流入しているわけではなく、東隣の千種川と西隣の伊里川からの河川水の拡散の具合で変わるものと考えられた。笠岡における塩分の動きは、廿日市とほぼ似通っていた。

塩分変動のドライバーである2023年の日降水量を見てみると、降雨は5～7月に集中しており、9月には笠岡だけ比較的多く降ったものの、他ではほとんど降らなかった。塩分低下パターンとの地域差は、降雨パターンの差よりも河川流量の地域差の影響の方が大きいと考えられるが、瀬戸内海の主要河川である揖保川(兵庫県)から山国川(姫島の袂)まで5河川の河川流量は、2023年においてはほぼ同じ動きをしていた。これらの動向を踏まえてpHの変動パターンについて考察したい。

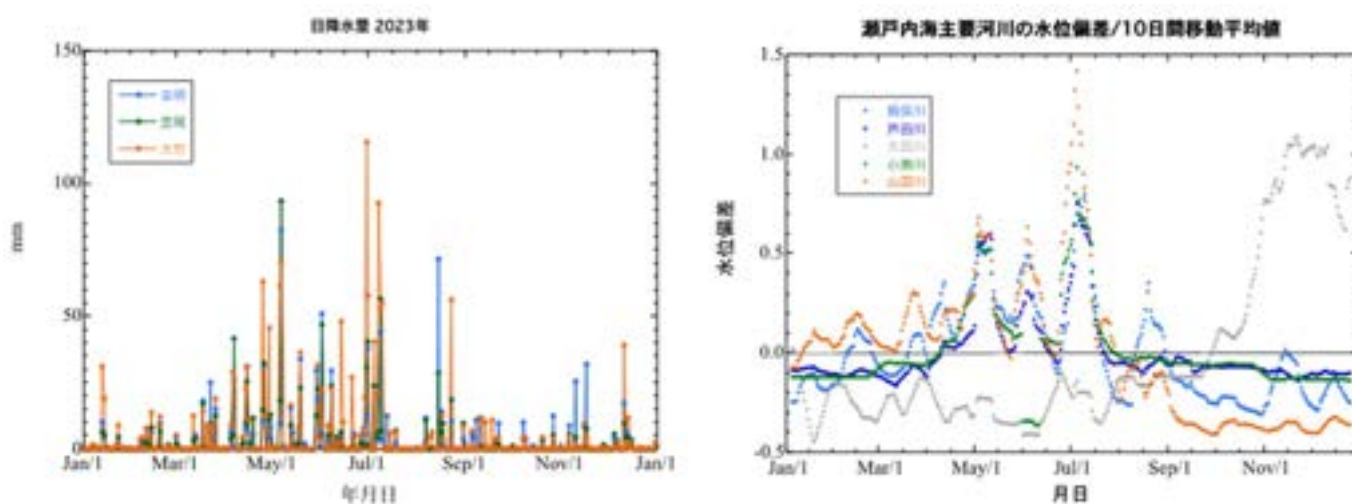


図 2. 虫明(日生)・笠岡(北木島)・大竹(廿日市)における2023年の日降水量

図3の左図は2023年1～12月のpHの生データをプロットしたものであるが、付着生物が増えてくると日変動が大きくなって見にくいので、1日の最低値だけ抽出してプロットしたものが右図である。2023年は、日生と笠岡と廿日市でpH・ Ω_{arag} の季節変動の様相がまったく異なっていた。図4の左図は2023年1月～12月のpHの日平均値、右側はこれを Ω_{arag} に変換したものである。図4の左図で見ると、日生では夏季には河川流量が多かったため、塩分が顕著に低下しpHも低下するが、秋季にはそんなに下がらなかった。同じ日生でもH-2(カキ採苗場)では塩分、pHともに下がったが、H-3(アマモ場近傍)では塩分は下がってもpHは下がらなかった。夏季においてもH-3ではH-2に比べて振れ幅が小さく、塩分が下がってもpH、 Ω_{arag} が低下しなかった。これは、明らかに近傍にあるアマモ場の影響と考えられ、従前から提案している「河口部からカキ養殖場に至るまでの間にアマモ場を再生すれば、陸水に伴って流入する多くの懸濁有機物をトラップして分解し、沿岸酸性化を抑制することができる。」という仮説を立証してくれる結果と考えられる。来年度から、アマモ場内に観測定点を追加し、さらなる証拠固めとメカニズムについて精査する。

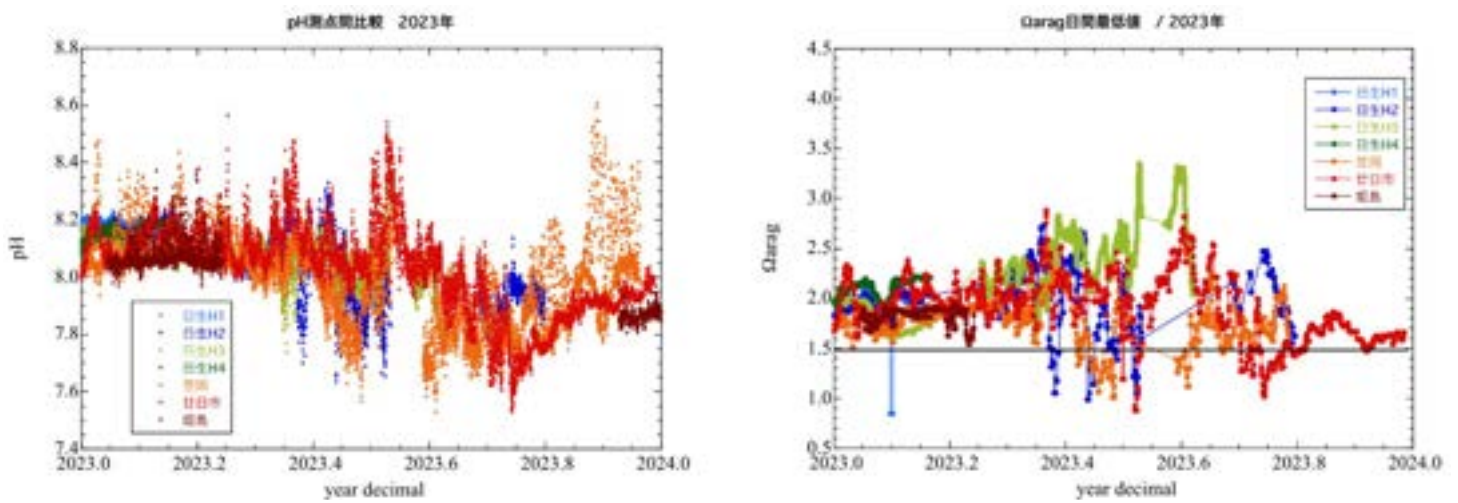


図 3. 2023 年 1 月～12 月の日生・笠岡・廿日市の pH・ Ω_{arag} の推移—その 1—

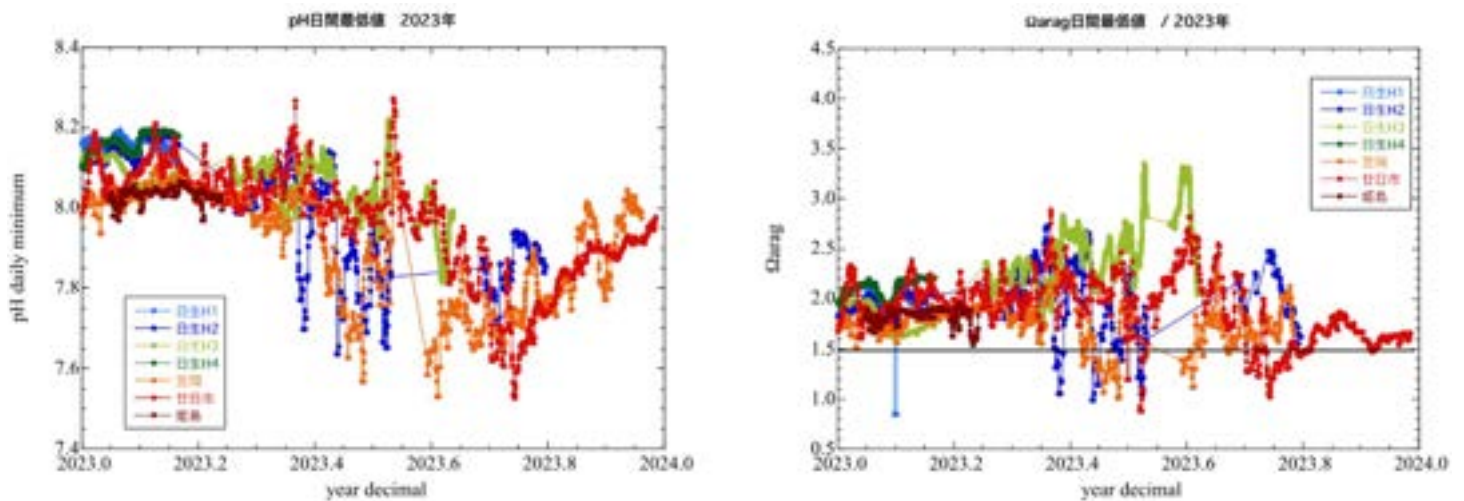


図 4. 2023 年 1 月～12 月の日生・笠岡・廿日市の pH・ Ω_{arag} の推移—その 2—

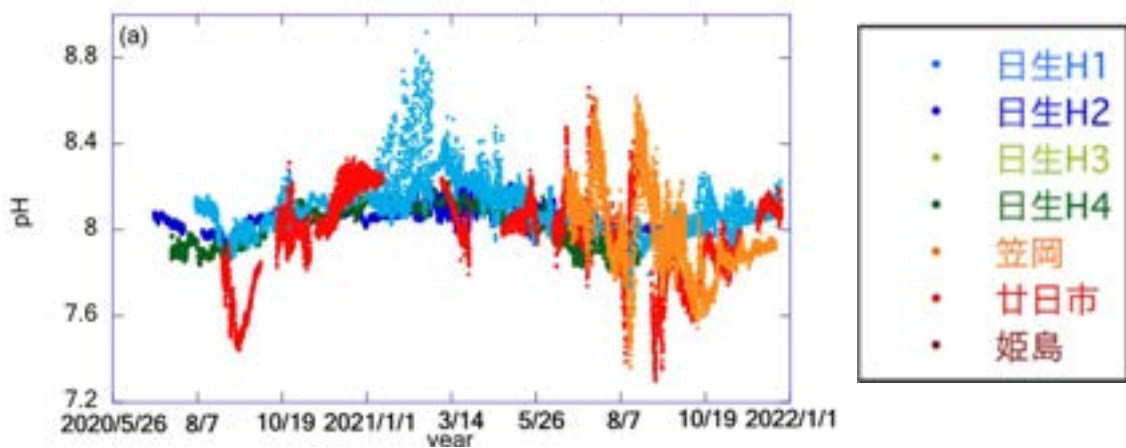


図 5. 廿日市における 2020 年 6 月～2021 年 12 月の pH・ Ω_{arag} の推移

廿日市では、2023 年は夏季に複数回のまとまった降雨があり塩分は低下したにもかかわらず、pH が下がったのは 1 回だけであったが、降雨があっても塩分は低下したのに pH はさがらないという現象は 2022 年にも確認された。2020～2021 年には、「降雨→塩分低下→pH・ Ω arag 低下」が顕著に見られたのに(図 5)、何故か 2022 年からこの現象が顕著に発現しなくなり、季節変動だけで秋季に下がるというパターンに切り替わっている。「降雨→塩分低下→pH・ Ω arag 低下」というパターンは沿岸酸性化のメカニズムであり他海域でも頻発しているが、特にカキ採苗時期である夏季における顕著な pH・ Ω arag 低下は大きな脅威である。廿日市でも 2021 年までは「降雨→塩分低下→pH・ Ω arag 低下」が頻発していたのに、何故に廿日市だけが 2022 年から塩分が低下しても pH・ Ω arag が下がらなくなったのか？ 現段階で気付いた点として、2021 年と 2023 年を比較して海洋環境で異なっているのは夏季における DIN 濃度の違いである。2023 年の夏季の DIN 濃度は 2021 年の 1/4 以下と著しく少なかったが(図 6)、2023 年には栄養塩が少なかったために一次生産力が大幅に低下したことが関係しているのかもしれない。2021 年と 2023 年でこれほどに栄養塩濃度の差が生じたのかも不明であるが、塩分が低下しても pH を低下させない河川・海洋トリートメントが特定されて、このメカニズムが解明できれば、沿岸酸性化に対する極めて有効な緩和策・適応策となるものと考えられ、周辺のデータを含めあらゆる観点から洗い直す必要がある。

一方、笠岡は 2022 年まで塩分低下に pH 低下が伴わないので沿岸酸性化の影響は少ないと見られていたが、これは常に Ω arag が低いがために見逃されていた面があり、少なくとも 2023 年においては本プロジェクトの調査対象海域の中で最も悪条件にあると判断された。引き続きモニタリングして、複数年の平均値で評価すべきであろう。

姫島の CO₂ 非噴出域では夏季のデータが欠測しているが、取得されたデータから判断すれば瀬戸内海の平均的な数値を示しており、離島であるためか陸水の影響を受けにくく降雨があっても顕著な塩分低下がないため、今後ともデータを蓄積していけば瀬戸内海の標準的な海域として有用にある可能性があるフィールドである。

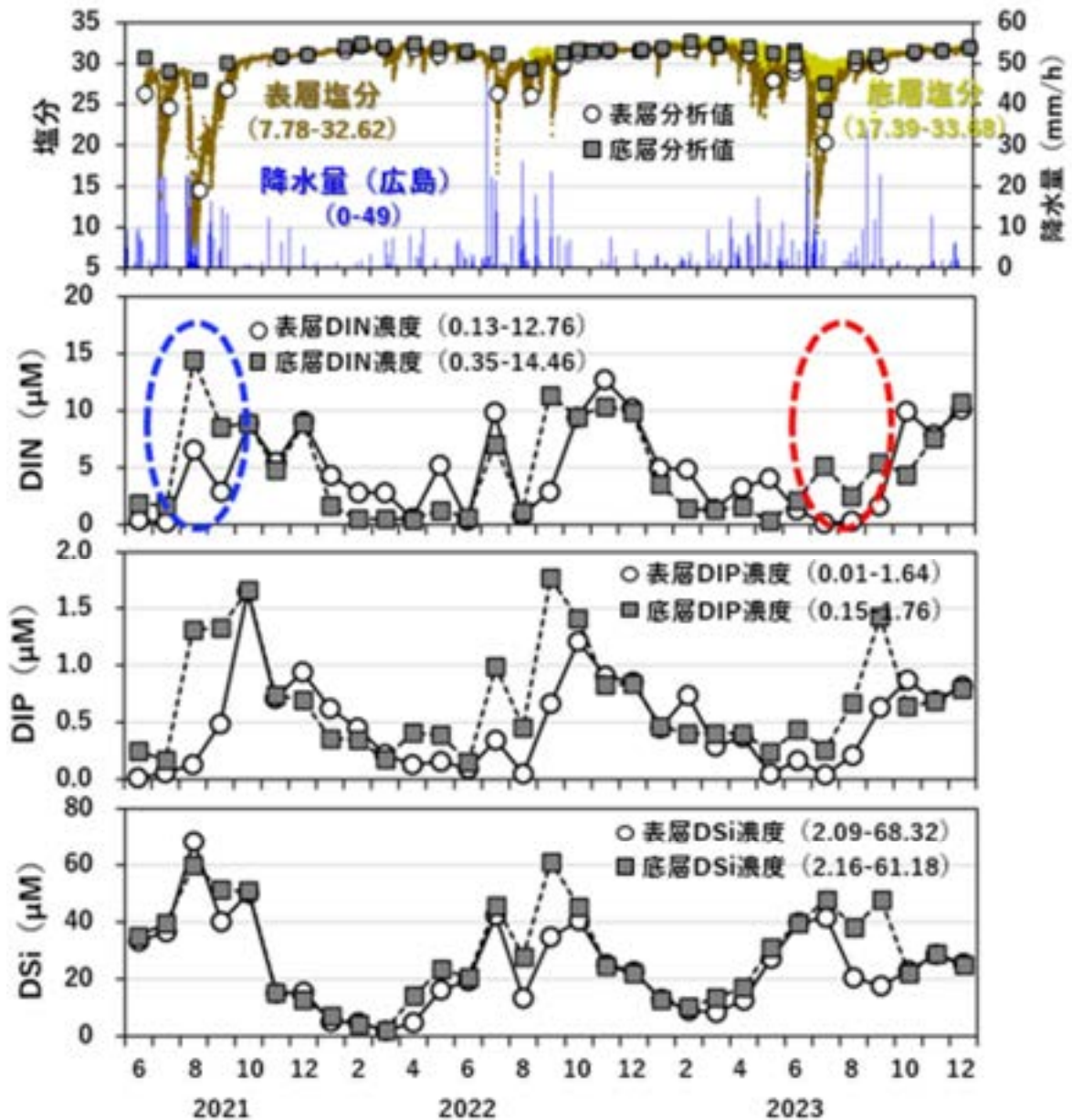


図 6. 廿日市における 2021 年 6 月～2023 年 12 月の栄養塩濃度の推移

3. 志津川湾における塩分低下時の pH 変動パターンのバリエーション

志津川湾では、降雨後のデータをきめ細かく取得しており、出水後に塩分低下した際の pH・ Ω_{arag} の応答のバリエーションを瀬戸内海など他の海域でも応用できるように整理解析した。

図 7 は、2022 年 7 月の災害に至った大豪雨の際の志津川湾における生物応答であるが、まず大量の有機物流入により濁度が上昇し、有機物が分解されて DO が下がってそれに追従して pH が低下、1 週間ほどのタイムラグの後、有機物分解によって増加した栄養塩を植物プランクトンが取り込んでクロロフィルが増加した。これが沿岸酸性化の典型的なパ

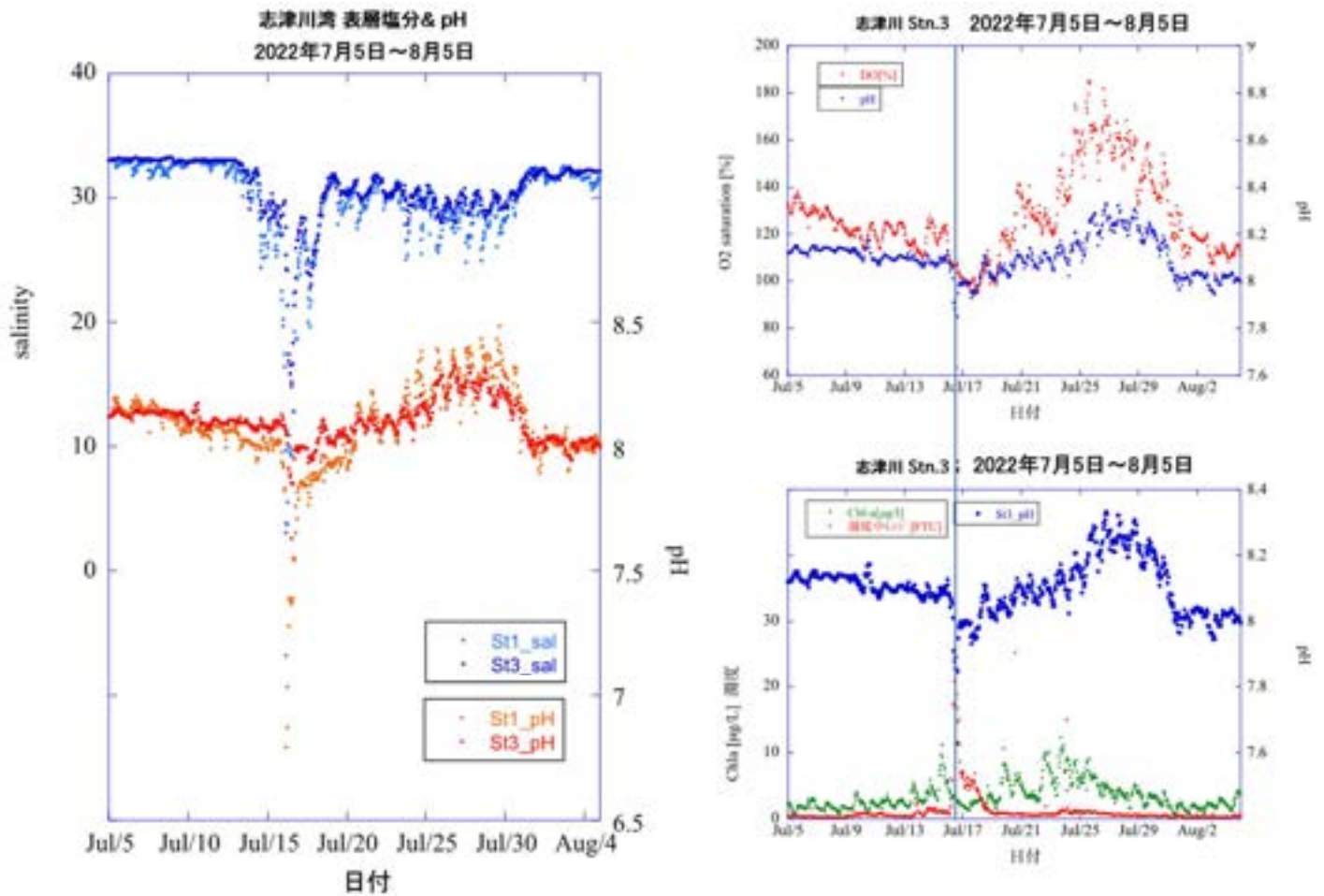


図 7. 志津川湾における 2022 年 7 月の大豪雨の際の生物応答

ターンとメカニズムである。したがって、大量の有機物流入を抑制してやれば急激な pH・ Ω arag の低下は避けられるという解釈であった。

ところが、2023 年にはこれまでとまったく異なったパターンが現れた。志津川湾には大きな河川がないのに、2023 年 9 月に 2 週間以上低塩分が続く現象が見られた。1 週間ほどかけて塩分が下がり、また 1 週間ほどかけて徐々に戻っていった。低塩分化の開始時に pH と DO が下がったのはこれまでと同様であるが、塩分が下がったままなのに 4 日後には有機物分解によって栄養塩が供給され pH、DO、クロロフィルが上昇、その後に再び pH と DO が低下、さらにその後有機物分解により pH、DO、クロロフィルが上昇した。つまり、2 週間にわたって低塩分と有機物供給が継続することによって 2 段階の増減が生じたが、この間に顕著な濁度の増減はなく濁度ソースが不明であったことから、どこか別の場所では有機物が分解して pH が下がった水塊が流入してきた可能性が見えてきた。そこで、2023 年 9 月の志津川における降水量と北上川推移の経日変化を調べてみた。志津川の降水量は 9 月 5 日がピークで、志津川湾に流入している河川は短いため 1~2 日で志津川湾に

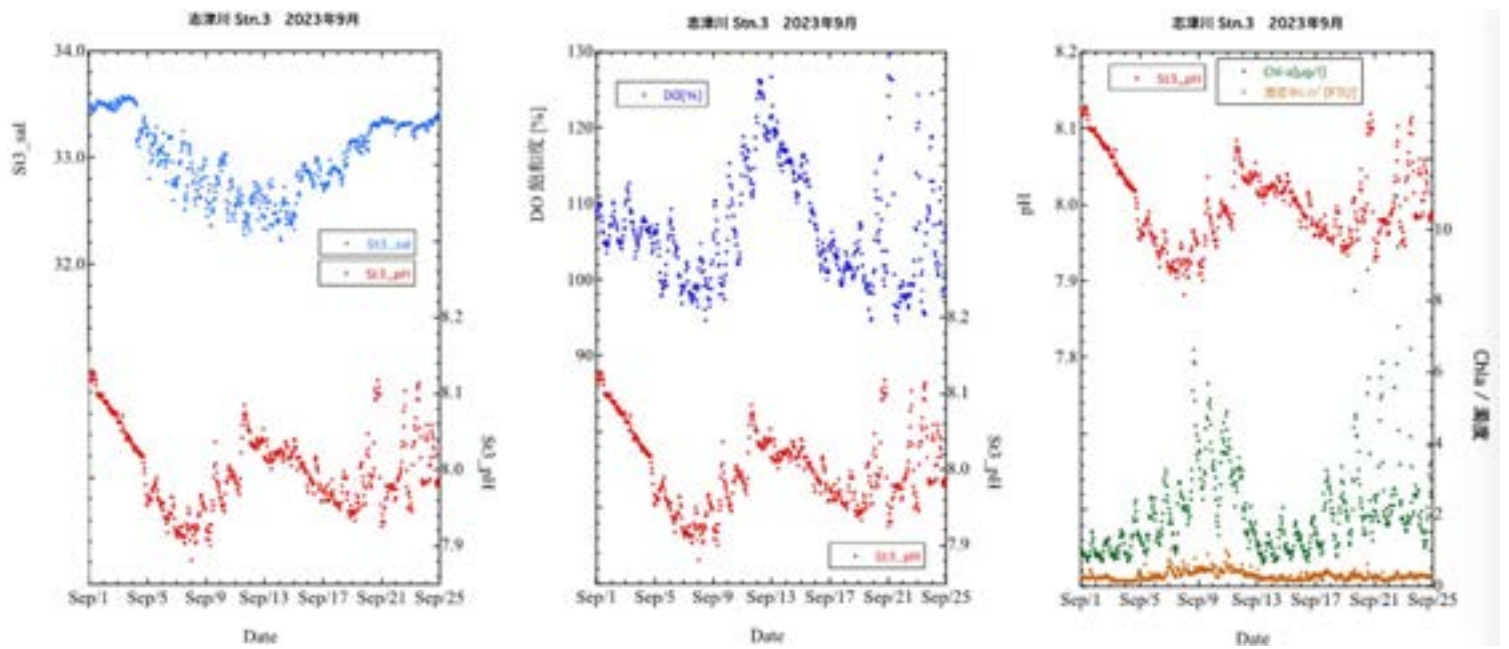


図 8. 志津川湾における 2023 年 9 月の長期の塩分低下に伴う pH・DO・濁度・クロロフィルの変化

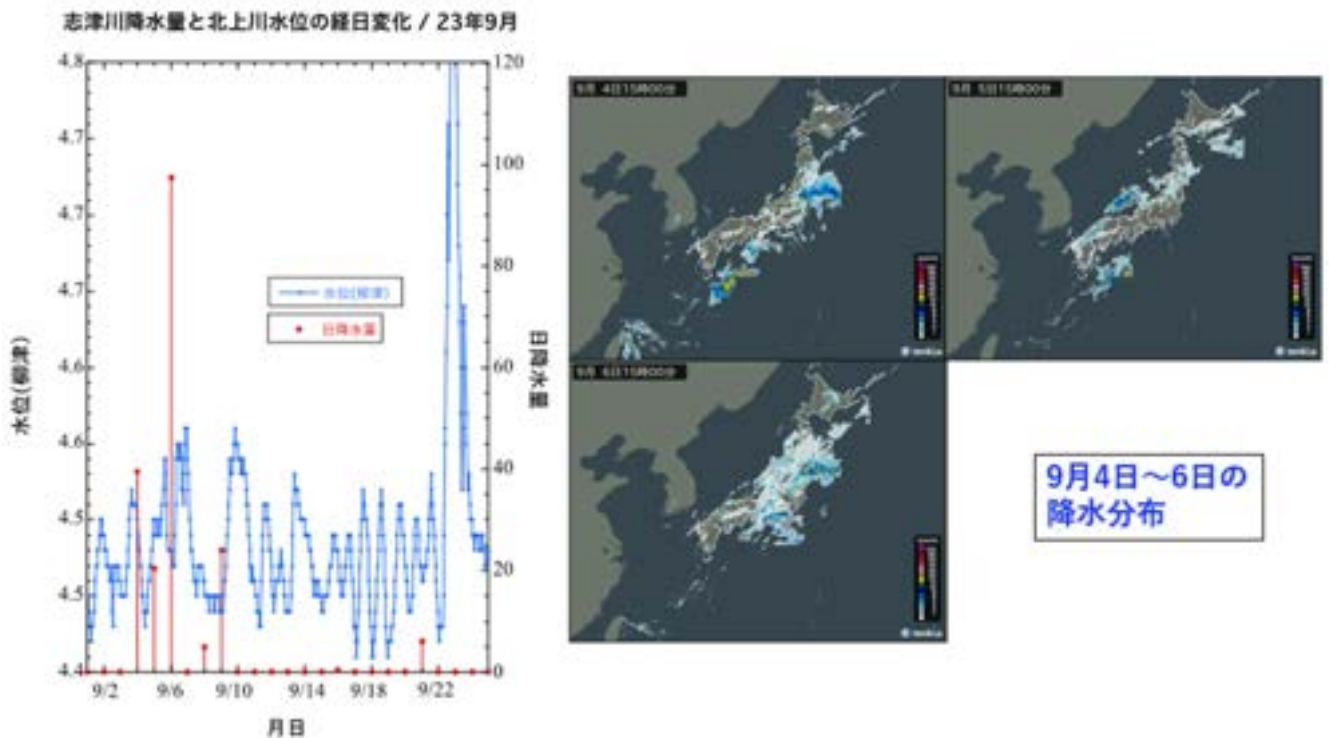


図 9. 2023 年 9 月志津川降水量・北上川水位と 9 月 4-6 日の東北太平洋岸の降水分布

流入するので今回の 2 週間以上にわたって続いた低塩分のソースとは考え難い。一方、2 週間のスパンでゆっくり水位が増減している川を調べてみると北上川がそれに該当し、志津川湾の 9 月の塩分低下は志津川湾内の川ではなく北上川の影響を受けた可能性がある。さらに、2022 年の豪雨時と異なり、2023 年 9 月の降雨は山間部を含めて岩手以南の幅広い範囲で数日間継続しており、南三陸町への降雨と河川流出ではなく、三陸一帯の河川が一斉に増水することで、沿岸の広範囲に低塩分帯を形成されて志津川湾に流入してきたもので、それによって低塩分の継続日数が長期化したことで、淡水流入の初期応答だけでなく、その後の pH・DO の振動現象まで観察できたと考えられる。来年度からは東北地方で大槌湾と宮古の観測定点を増設することとしており、水産研究・教育機構によって取得された塩分データ等も活用しながら、このような広域的な塩分低下による影響も考慮していかなければならない。

4. 表層・底層の pH 変動パターンのバリエーション

廿日市では 2022 年から、志津川湾、日生では 2023 年から底層(海底上 1m)にも観測器を設置し、底層から表層への影響を始めとした相互の関連性などを考慮した pH・ Ω_{arag} の変動パターンを整理し検討した。

廿日市では、特に底層で 2023 年 7~9 月にかけて pH と Ω_{arag} が低下し、3 カ月にわたって Ω_{arag} が閾値 1.5 を下回り、10 月に入って鉛直混合によって解消するという動きを示した。

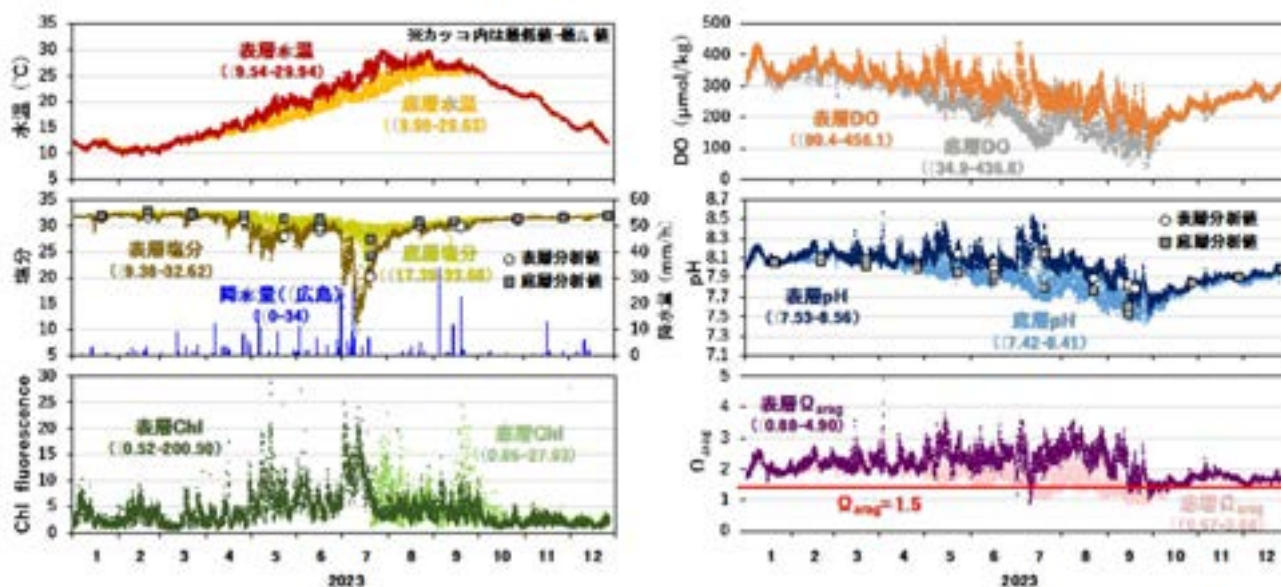


図 10. 廿日市における 2023 年 1~12 月の表層と底層の環境変動

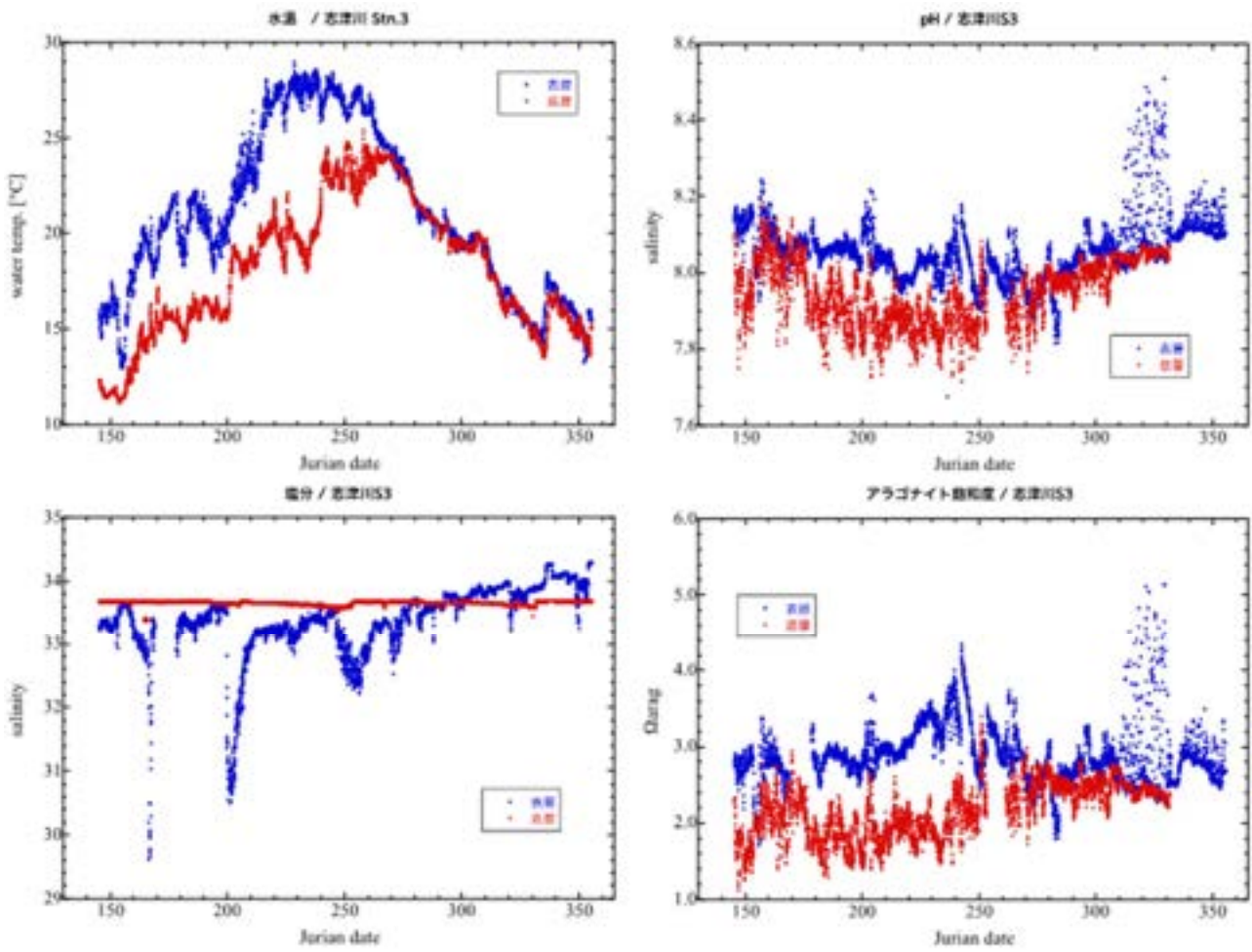


図 11. 志津川湾における 2023 年の表層と底層の環境変動

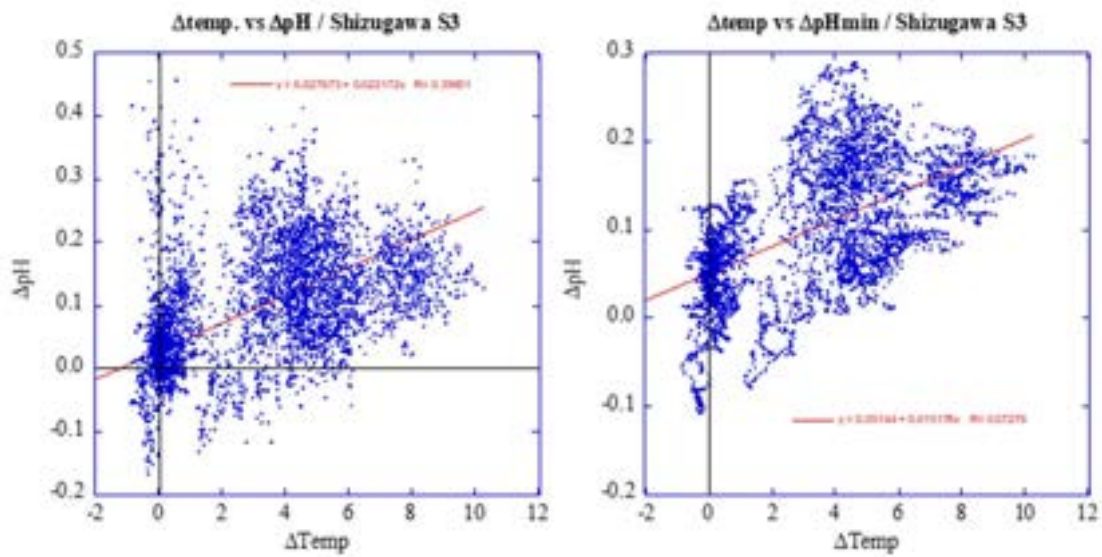


図 12. 志津川湾における 2023 年の表層と底層の水温差と pH 差の相関

志津川湾と日生においても、それぞれ Stn.S-3 と Stn.H-S において 2023 年度から底層（海底上 1m）で観測を開始した。志津川湾では水深が深いため、水温は 10 月以降は表層・底層で均質化するものの、春から夏にかけては底層が表層に比べて 3~5°C 程度低く推移した（図 11）。水深が深いため、塩分は底層では全期を通じてほとんど変動せず安定していた。pH は、廿日市と同様に夏季に底層で表層よりも顕著に低下し秋季に解消するというパターンを示したが、底層 Ω_{arag} は閾値 1.5 を頻繁に下回り、廿日市に比べて水深差が大きいため、pH・ Ω_{arag} ともに表層と底層で大きな差が生じた。横軸に表層と底層の水温差、縦軸に表層と底層の pH 差とって関係を見ると（図 12）、両者は正の相関にあり、成層化すると表層と底層の差が大きくなり、成層が解消されると表層と底層の差がなくなる。廿日市で見られたように、成層が解消されて鉛直混合は起きると底層の酸性化水の影響で表層の酸性化が一気に進むこともある。

日生ではまたくい異なるパターンを示した。水深が浅いため、廿日市や志津川湾のような表層と底層の明瞭な水温差がなく、底層でもきっちりと塩分変動が存在し、表層よりも底層の方が pH が高く、変動幅が小さく安定しており、有光層が底層まで達して光合成が行われているような動向を示した。これを見る限り、水深の浅いところでは表層の pH が底層に引っ張られて低下する懸念はなく、降雨の影響等により表層の方が pH 低下を招きやすい。これら複数の海域で表層と底層の関係を明らかにすることで、どの程度の水深で成層構造や成層の強弱によって底層の酸性化と低層が表層に及ぼす影響などを予測することが可能となる。

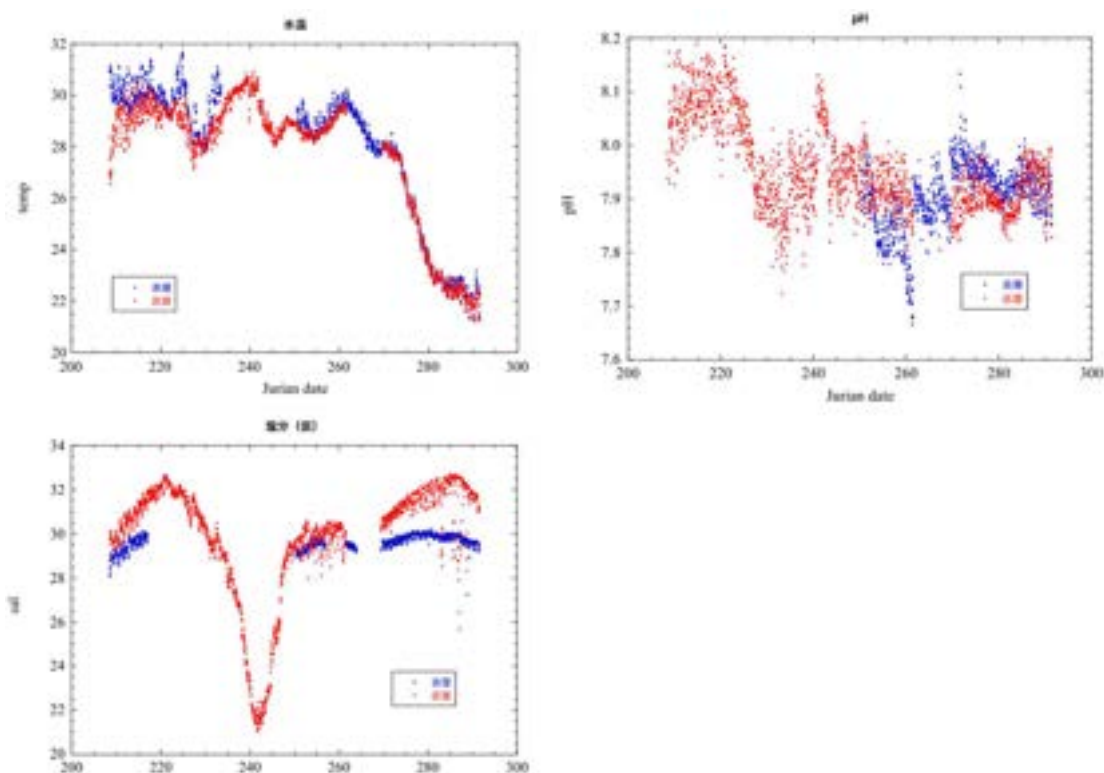


図 12. 日生における 2023 年度の表層と底層の環境変動

5. まとめ

- 全体として、観測点が増えたこと、また複数年度のデータが溜まってきたことで、初期の解析では把握できなかった複数の環境変動バリエーションを新たに把握できるようになった。
- 廿日市の栄養塩濃度変動パターンは、季節変動のレベルで年による違いがあり、そのことが、短期的な塩分変動に対する pH の短期変動特性を変えている可能性がある。現在、開発中の西部瀬戸内海モデルが構築できれば、季節スケールの栄養塩変動機構を解析できる可能性に期待できる。
- 志津川では、複数パターンの短期的塩分低下イベントに対する詳細観測データが揃いつつある。塩分低下持続期間の長短、淡水供給源の位置(湾内・湾外)によって、湾内での生物応答や pH 変動パターンが異なる。今後とも観測を継続し、さらなるパターンの収集に努める。また、来年度以降に三陸地域にも複数の観測点(大槌・宮古など)が揃うことで、三陸地域全体の空間スケールで生じている過程と湾内で生じている過程を分けて解析できるようになることも期待される。
- 表層と底層の関係についても、複数海域の比較ができるようになった。廿日市と志津川は似たパターンであったが、水深が浅い日生は異なったパターンを示したので、他の海域でも表層と底層のデータの取得に着手したい。
- アマモ場近傍である日生 Stn.H-3 の pH 変動は、H-2 に比べて明らかに小さいことが判明したので、来年度には新たにアマモ場内に観測定点を設け、アマモ場内と外での pH 変動等を比較することにより、アマモ場の効果をより直接的に解明する。
- 笠岡の pH 変動は、日生のパターン(短期的な塩分低下と連動した pH 低下イベントの多発)と廿日市のパターン(秋季に発生する季節スケールの pH 低下)の両方の特徴を示した。さらに数年程度データを蓄積して、笠岡の pH 変動機構を明確にする必要がある。
- 姫島の CO₂非噴出域は、瀬戸内海の観測定点の中では最も塩分変動が小さく、瀬戸内海のベースデータとしての利用が可能である。

V. マガキ浮遊幼生の観測結果と形態異常に関する検討

1. マガキ浮遊幼生の観測

A. 日生

A.2 マガキ浮遊幼生の観測

(1) 観測方法

マガキの受精卵は、 50μ 内外の球形で、胞胚期になって卵膜を破って水中に出て浮遊生活を始め、トロコフォア幼生、ベリジャー幼生を経て、2～3日後には $70\sim 80\mu$ の大きさのD型幼生となる。カキ養殖漁家は、二枚貝類のラーバが多く出現する6月下旬～8月上旬にかけて、アンボ期幼生に生長した段階でホタテ板に付着させて天然種苗として養殖生産に供する。

岡山県備前市日生町地先16定点(図A-19)において、海洋酸性化の進行による二枚貝浮遊幼生の形態異常発生の有無を確認するため、2020年6～9月にかけて北原式プランクトンネットによってサンプルを採取し、光学顕微鏡により顕鏡し確認した。プランクトンネットはそれぞれの定点において海底まで降ろした後、垂直曳き1回で採集し、サンプルは海水とともにサンプル瓶に入れ中性ホルマリンで固定してから持ち帰り顕鏡観察に供した。形態異常発生の有無は、図A.2.2～4の既往知見にある二枚貝幼生の形態異常の実例と目視観察により比較して確認した。



図1. 備前市日生町地先におけるマガキ浮遊幼生観測定点

(2) 観測結果

日生町漁協が地先海域 10 定点で 2023 年 6 月 23 日～8 月 13 日にかけて 56 日採水を行い計 395 検体(目合い 50 μ m)、西隣に位置する邑久町漁協が地先海域 6 定点で 2023 年 7 月 3 日～9 月 11 日にかけて 59 日採水を行い 187 検体(目合い 100 μ m)について顕鏡観察したが(表)、異常形態と思われる浮遊幼生(A-21～23)は認められなかった。

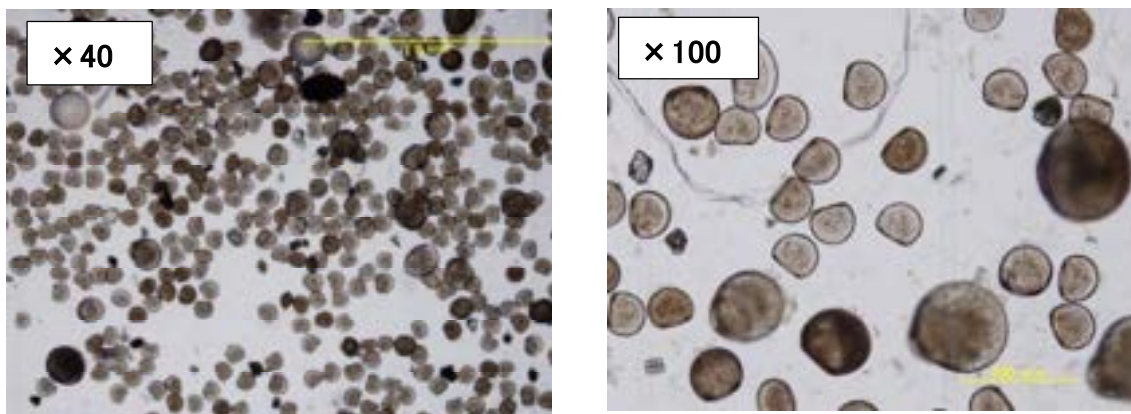


図 2. 備前市日生町地先において採集されたマガキ浮遊幼生

表 1. 日生における 2022 年度マガキ浮遊幼生観測状況

実施機関	ネット目合い	観測定点数	観測期間	観測日数	検体数
日生町漁協	50 μ m	10	2023. 6.23～ 8.13	56	395
邑久町漁協	100 μ m	6	2023. 7. 3～ 9.11	59	187
計	—	—	—	—	582

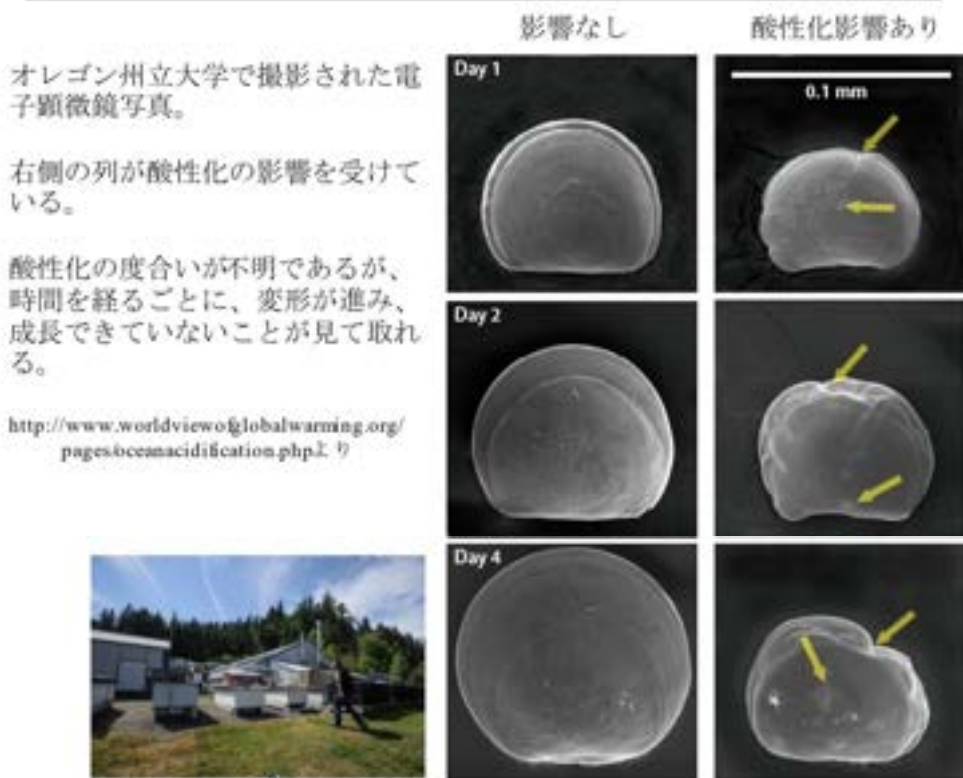
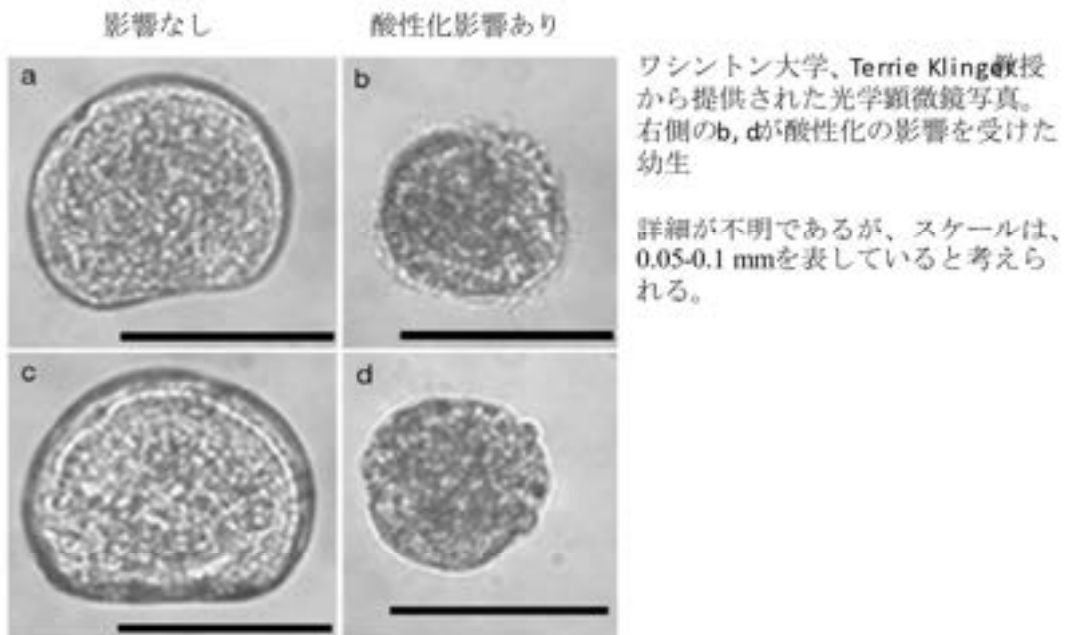


図 3. 酸性化により影響を受けたカキ浮遊幼生の画像—その 1—



Pergamon

PII: S0043-1354(96)00244-8

Mar. Res. Vol. 31, No. 2, pp. 351-355, 1997
Copyright © 1996 Elsevier Science Ltd
Printed in Great Britain. All rights reserved
0043-1354/97 \$17.00 + 0.00

RESEARCH NOTE

A SIMPLIFICATION THE BIVALVE EMBRYOGENESIS AND LARVAL DEVELOPMENT BIOASSAY METHOD FOR WATER QUALITY ASSESSMENT

E. HIS*, M. N. L. SEAMAN* and R. BEIRAS

IFREMER, Quai de Commandant Silhouette, 33120 Arcachon, France and *Institut für Meereskunde,
24103 Kiel, Germany

(First received February 1995; accepted in revised form July 1996)

His et.al 1997に示されたカキの幼生の変形形態

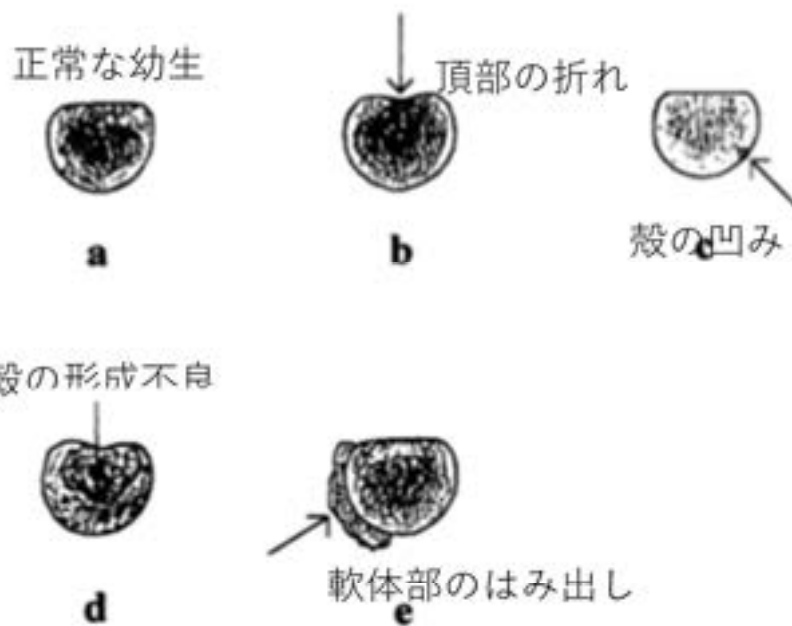


Fig. 1. The different abnormalities observed in D-larvae of oysters, *Crassostrea gigas*: (a) normal larva; (b) convex hinge; (c) indented shell margin; (d) incomplete shell; (e) protruding mantle.

図 4. 酸性化により影響を受けたカキ浮遊幼生の画像—その 2—

B. 志津川湾

(1) 観測方法

宮城県気仙沼水産試験場が、志津川湾内 10 定点(図 B-19)において、北原式プランクトンネット(目合い 100 μ m)によりサンプリングし検鏡・計数した。

(2) 観測結果

計 8 回の調査(図 B-20)における顕微鏡による目視観察では浮遊幼生の形態異常は見つからなかった。また、検鏡後のサンプルを撮影し、詳細に観察し、異常形態の画像と図 A.21~23 と比較し検証したが、特に問題になるような浮遊幼生は発見されなかった。

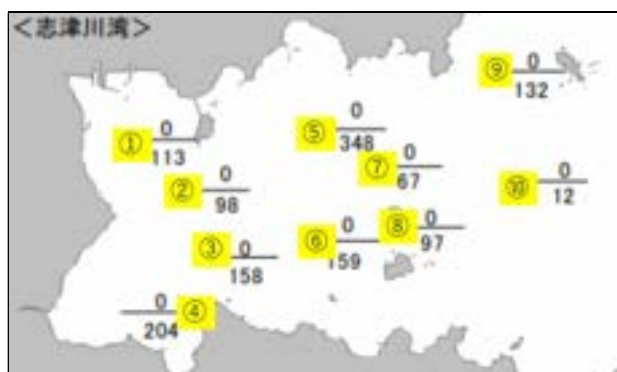


図 6. 志津川湾におけるマガキ浮遊幼生観測定点

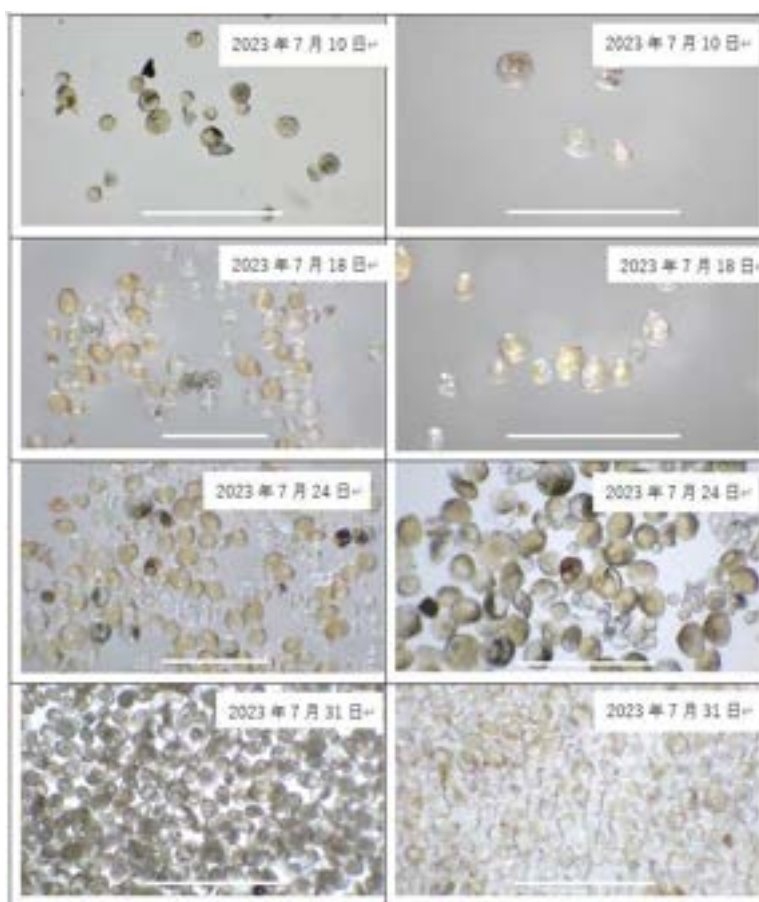


図 7. 志津川湾で採取されたマガキ浮遊幼生の顕微鏡画像

F. 小浜湾

(1) 観測方法

福井県立大学 浜口昌巳教授により、2020年6月30日～9月11日にかけて9回にわたり、小浜湾内6定点(図8:St.1～6)において北原式プランクトンネット(目合い50 μ m)によってサンプルを採取し、蛍光顕微鏡により顕鏡した。採取したサンプルは、モノクロナール抗体によってマガキ浮遊幼生を確認して計数した(図10:D型幼生では他の二枚貝幼生と判別できないが、モノクロナール抗体によってマガキ幼生だけが緑色に蛍光発色する)。小浜市漁協では、2022年からマガキ天然採苗に取り組んでおり、調査結果は、その都度、地元の小浜漁協に情報提供し(図9)、

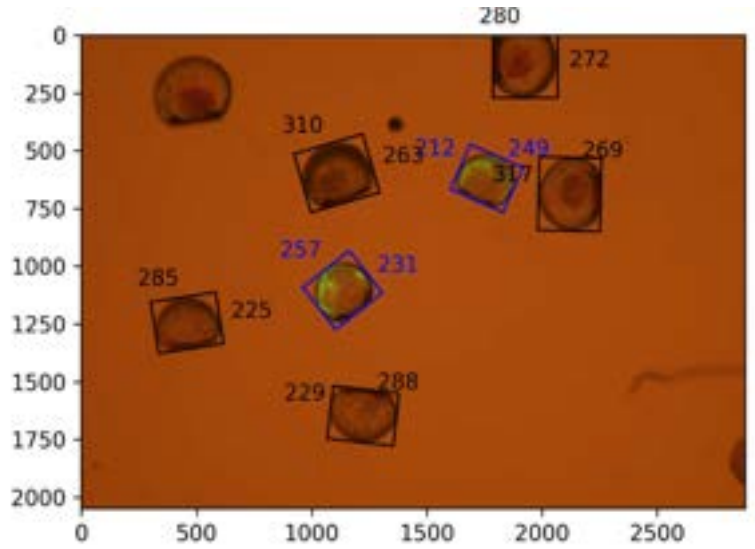


図8. 小浜湾におけるマガキ浮遊幼生の顕微鏡画像
:マガキ浮遊幼生のみがモノクロナールによって緑色に蛍光発色する



図9. 小浜湾におけるマガキ浮遊幼生の調査結果に関する地元漁協への提供資料



図 10. マガキ浮遊幼生の簡易種判別方法が開発された際のプレスリリース資料

マガキ採苗指導に供した。画像解析による判別は D 型幼生に絞り、モノクロナール抗体による種判別の後に、殻高、殻長を測定した。

(2) 観測結果

2023 年の小浜湾では 9 月上旬にはマガキ産卵期がほぼ終わったと判断され、採苗できる期間が短かったが、この原因として、小浜湾が狭く水深が浅いため風などの影響によって湾内の海水の流動性が高く、浮遊幼生の滞留時間が短いことなどが考えられた。加えて、今季の小浜湾はマガキの産卵期にマガキ幼生の好適な餌生物が少なく、採苗できても違いの生残率が低下した可能性がある。なお、全期を通じてマガキ浮遊幼生、他の二枚貝浮遊幼生ともに形態異常はまったく視認されなかった。

H. 広島市地先海面

(1) 観測方法

2023 年 6 月 12 日～2023 年 8 月 29 日に計 43 回にわたり、広島市農林水産振興センターによりマガキ浮遊幼生の観測が実施された。調査定点は、広島湾内 10 定点(図 10: 津久根、カクマ南、ナサビ北、美能、三高、長浜、似島二階、峠島南、似島学園、江波)、大黒神島海域 7 定点(図 10: 大黒神島東、大黒神島西、大黒神島南、大黒神島北、大黒神島中、大黒神島東岸、深江)の計 17 点である。

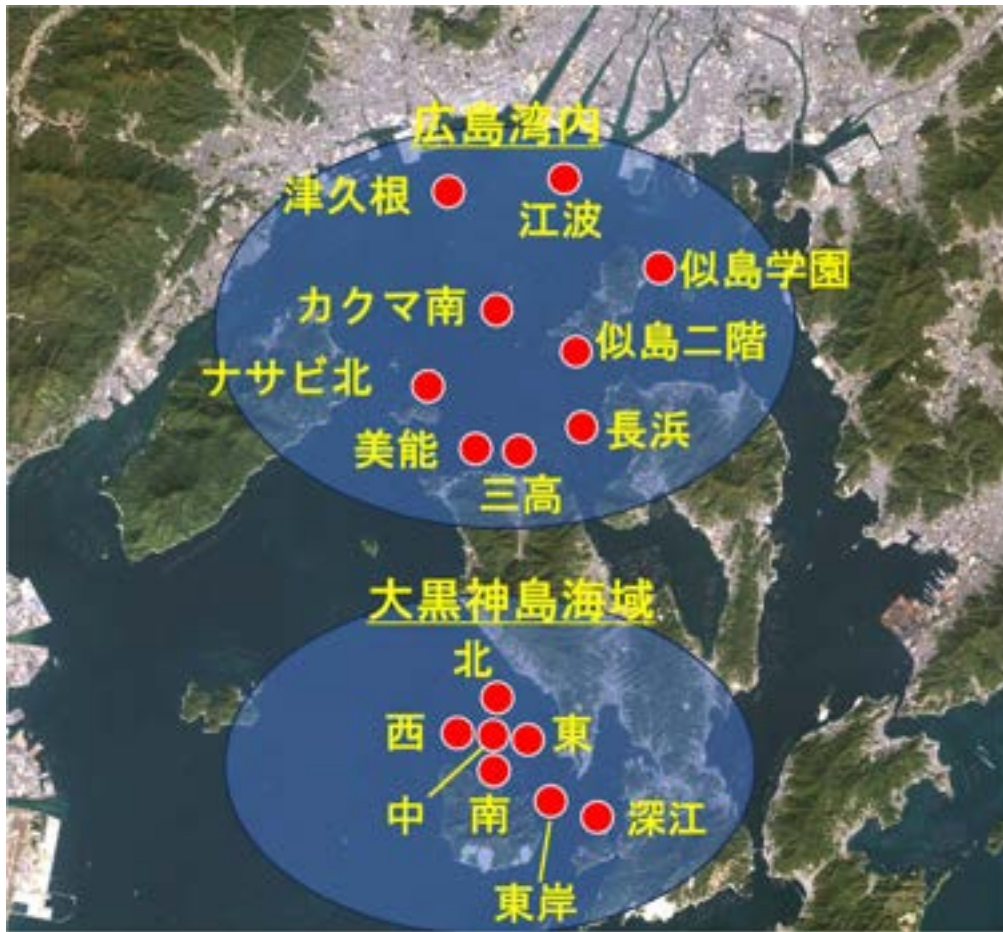


図 11. 広島市地先海面におけるマガキ浮遊幼生の観測定点

北原式定量プランクトンネット(NXX17) (口径:22.5 cm、目合い:72 μm)を用いて、水深 5 mから表層まで鉛直曳きにより採集し、90 μm から 330 μm までを 30 μm ごとに9区分し、広島市農林水産振興センター職員5名でマガキ浮遊幼生を光学顕微鏡により検鏡・計数し、その際に形態異常の有無についても確認を行った。観測結果は、実施日ごとに広島市艦内カキ養殖漁協に天然採苗に必須の情報として提供している(図 12)。

(2) 観測結果

2023年6月12日～2023年8月29日(計43日間)に、サンプリング試料を検鏡した結果、広島湾内10定点で499,504個体、大黒神島海域7定点で220,276個体(表2)、計719,780個体の浮遊幼生を視認したが、形態異常の浮遊幼生は確認されなかった。

かき養殖情報 第81報

令和5年7月24日(月)
(公財)広島市農林水産振興センター

1 広島湾内のカキ幼生調査結果

(7月24日調査) 5m曳き

区分	小型			中型			大型			付着期	フジツボ		
	～90	～120	～150	～180	～210	～240	～270	～300	～330		フジツボ	キアキ	
付着までの日数	12～14日	10～12日	8～10日	7～8日	4～6日	3～5日	2～4日	0～2日					
津久根	152	293	195	92	39	12	2					1	
カクマ南	275	875	1,150	1,950	1,400	1,750	253	35				4	
ナサビ北	550	1,100	675	1,150	1,330	890	104	15				8	
美能	1,060	1,950	1,220	1,380	965	813	136	32				6	2
三高	850	1,450	725	875	1,170	575	115	18				12	
長浜	1,110	1,540	1,120	506	1,720	665	111	35				11	5
似島二階	1,350	2,130	1,100	1,200	725	2,220	416	73				5	1
神島南	225	105	145	311	256	87	12	4				3	4
似島学園	55	95	100	603	714	274	42	4				8	1
江波	56	565	1,080	870	527	121	7	2				5	2
平均	684	1,156	779	997	1,035	909	149	27				7	2
前週(7/20)	1,423	4,142	218	102	43	37	14	3				7	1

※ 平均は、津久根、江波を除く。

2 広島湾内のカキ稚見調査結果(一日あたりの付着数)等

広島湾内	7/20～7/21		7/21～7/23		7/23～7/24	
	カキ	フジツボ	カキ	フジツボ	カキ	フジツボ
津久根	24.3	2.7	5.6	6.9	5.6	6.9
カクマ南	19.0	6.3	10.7	10.5	16.3	22.7
ナサビ北	20.3	1.3	29.7	8.8	47.7	11.0
美能	40.7	7.3	94.3	28.2	58.3	11.7
三高	48.7	8.0	69.2	12.3	134.0	22.3
長浜	117.0	21.0	118.7	40.2	75.7	29.7
似島二階	74.0	29.3	58.3	37.0	153.7	73.0
神島南	62.0	10.0	55.3	16.3	140.3	48.0
似島学園	144.0	17.7	72.8	21.0	47.0	24.0
江波	28.3	9.0	37.3	29.3	37.3	29.3
三高東	63.0	18.3	116.8	37.3	115.3	26.0
エセキ	142.7	19.0	172.7	33.0	224.7	35.0
金輪西	167.7	26.7	110.7	55.2	163.7	58.0
平均	65.7	12.6	63.6	21.5	84.1	30.3

※ 平均は、津久根、江波、三高東、エセキ及び金輪西を除く。

※ 津久根及び江波の7/23～7/24の数値は、7/21～7/24における一日あたりの付着数。

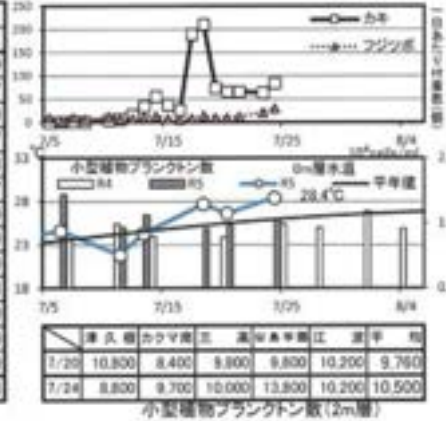


図 12. 広島市地先海面におけるマガキ浮遊幼生調査結果に関する地元漁協への提供資料

表 2. 広島市地先海面におけるマガキ浮遊幼生調査結果

広島湾内：10地点のカキ幼生数の合計										
合計/幼生数	～90µm	90～120µm	120～150µm	150～180µm	180～210µm	210～240µm	240～270µm	270～300µm	300～330µm	
似島学園0-1	2275	1775	918	281	263	251	251	81	18	0
似島二階0-1	2812	1121	1210	1872	2828	2285	2285	799	188	9
長浜0-1	2918	1482	787	1247	2849	708	189	88	88	6
ナサビ北0-1	2784	2179	483	1881	2281	1782	688	181	181	9
似島学園0-2	8181	6181	2881	1281	2848	1281	1281	1281	1281	2
似島二階0-1	2187	2085	1281	1781	1818	1281	1281	1281	1281	9
長浜0-1	2881	1879	678	1845	623	1871	621	1281	1281	2
江波0-1	1812	1841	1218	1888	1288	1281	1281	1281	1281	11
似島学園0-1	2288	2187	1888	2287	2187	628	1281	71	71	9
美能0-1	2888	2888	1118	782	1812	1278	1278	1278	1278	6
合計/幼生数	170751	173424	97209	41933	28470	18452	7357	1883	25	499504

大黒神島海域：7地点のカキ幼生数の合計										
合計/幼生数	～90µm	90～120µm	120～150µm	150～180µm	180～210µm	210～240µm	240～270µm	270～300µm	300～330µm	
大黒神島0-1	9128	9828	4128	2284	2752	2848	4128	78	78	9
大黒神島0-2	8728	11888	2888	1888	788	678	182	88	88	9
大黒神島0-3	2848	1488	4128	1288	1112	188	1281	1281	1281	9
大黒神島0-4	2288	2288	528	2881	888	288	182	182	182	2
大黒神島0-5	9478	1888	1288	2281	1288	688	1281	1281	1281	2
大黒神島0-6	4288	728	288	182	728	2281	188	188	188	9
大黒神島0-7	7881	2188	448	278	288	278	288	288	288	9
合計/幼生数	63718	96942	30308	15197	7849	3869	1879	518	4	226276

2. カキ類浮遊幼生に対する海洋酸性化の影響評価

2020 年度から日生および志津川湾、2013 年度からは小浜湾および広島市地先において、マガキ浮遊幼生に関する観測を実施し、形態異常の有無を調査してきたが、世界的にマガキ浮遊幼生に悪影響を与える閾値とされる $\Omega_{\text{arag1.5}}$ を複数回にわたり比較的長期にわたって大きく下回った場合を含め、いずれの海域においてもマガキ浮遊幼生の形態に異常が確認された事例はまったく認められていない。ただ、海外ではマガキの天然採苗が行われておらず、 $\Omega_{\text{arag1.5}}$ という閾値もアメリカ西海岸で飼育実験によって得られた数値であり、複合的な要因に晒される自然海域で、しかも日本沿岸海域で適用できるかの確証は得られていない。また、マガキ浮遊幼生の形態異常の調査にあたっては、D型幼生になって以降のすべての発育ステージの幼生を確認する必要があり、目合い 50 μm のプランクトンネットを使用することが望ましいが、日生のうち日生町漁協と小浜湾では 50 μm を使用しているものの、日生のうち邑久町漁協、志津川湾は 100 μm 、広島市地先は 72 μm と統一されていない。さらに、形態異常の判定基準は観察者によって異なるものと考えられ、客観的に誰もが正しく判定することができる判定手法の確立が求められる。

Fig. 1 Categories of larval deformities of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) (24 h post-fertilisation) used for scoring. Images taken with a Zeiss Axio Vert.A1 inverted microscope with an Axioacam ERc camera at 10 \times magnification setting. A = egg, B = trochophore, C = protruding mantle, D = indented margin, E = convex hinge, F = cupped, G = normal D-larva

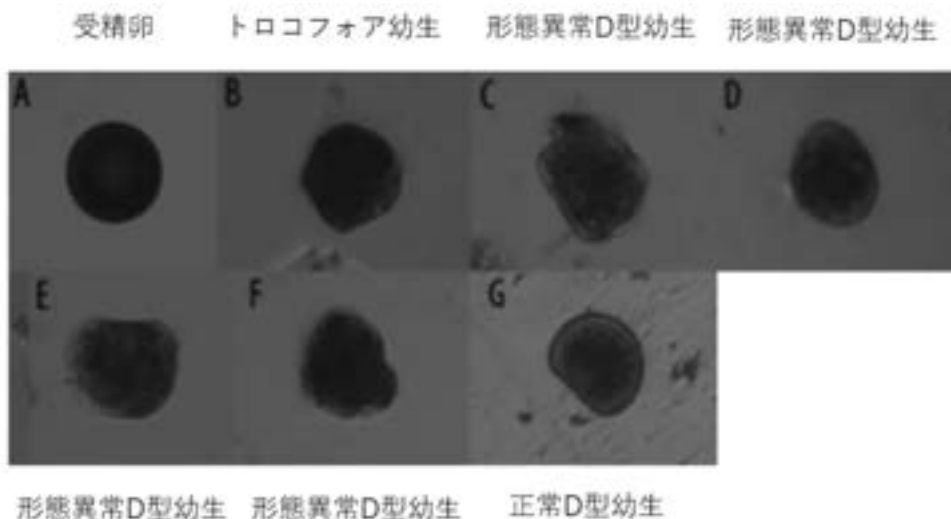


図 13. 既存報告におけるカキ類浮遊幼生の形態異常画像

2.1. 自然海域におけるマガキ浮遊幼生の形態異常判定手法の構築

(1) 調査方法

カキ幼生は卵から生まれたばかりのサイズは 0.08mm 程度で、海水中の植物プランクトン他の餌を食べながら成長し、約 2 週間後に着底する。カキ幼生は成長するにつれて左殻の厚みが増すので、画像解析をする際に投影面積が安定しないため(図 14)、形態異常を判定する対象は D 型幼生に絞ることとした。蛍光抗体法によるマガキ幼生の同定方法(図 10)を組み合わせることで野外試料からマガキ幼生だけを選んで形態を判別することとし、低 pH 下での飼育実験により形態異常を発現したマガキ D 型幼生は直線部分の屈曲が顕著

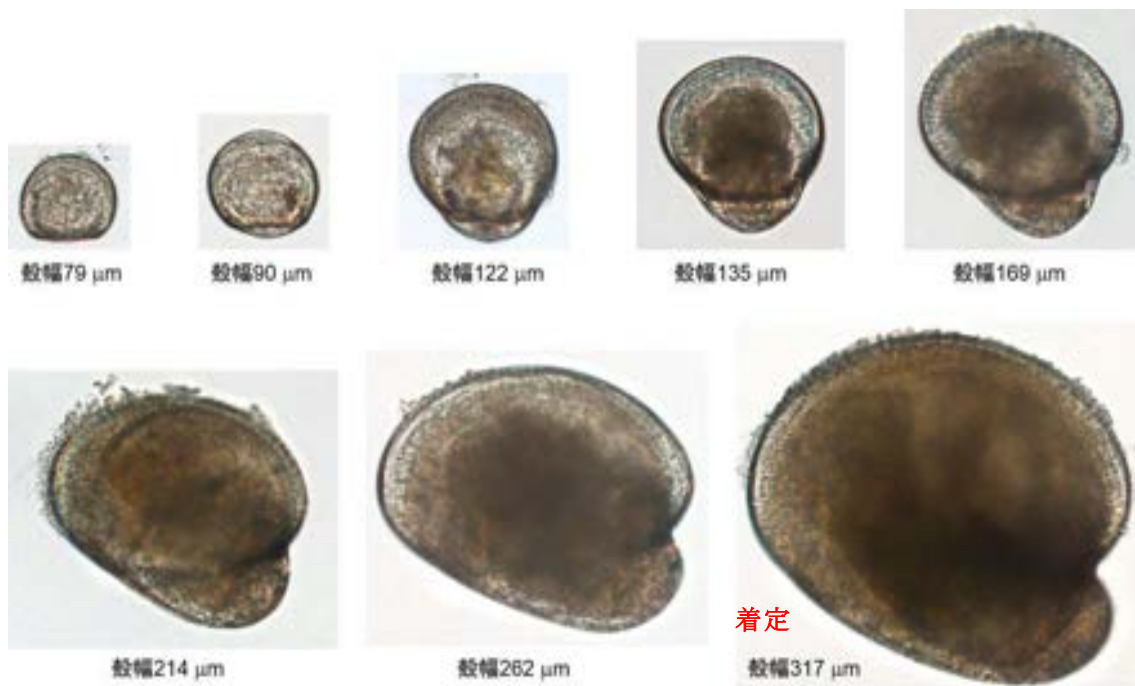


図 14. マガキ浮遊幼生の成長過程

であるとの既往知見が得られたので、図 15 に示したとおりD型幼生に長方形を当てはめて長辺の長さで判定することとした。マガキ幼生の各種のサイズを計測し形態異常を検討するにあたっては、先行研究である「画像解析システムを用いた二枚貝幼生の自動識別方法の試み(寺崎誠,・浜口昌巳,・薄浩則,・石岡宏子. 2003, La mer, 39, 87-93.)」を参考にし、福井県立大学 八杉准教授の協力を得て、マガキ浮遊幼生の形態異常等を誰でもが簡便に判定できるように画像解析システムを開発に取り組んだ。

(2) 調査結果および考察

併せて行った低 pH 下でのマガキ浮遊幼生飼育実験では、貝殻がまともに形成されず、当初考えていたようにD型幼生の直線部分の長さや屈曲度では評価することができなかった(図 16)。そこで、D型幼生の投影面積を算定して比較した結果、対照区と2つの低 pH 群の間で有意な差が生じた(Kruskal-Wallis test $P < 0.01$)ので、形態異常は投影面積で評価することにし(図 17)、この方法によって全国各地でのマガキ浮遊幼生の形態異常を調べるための画像解析システムを開発することができた。

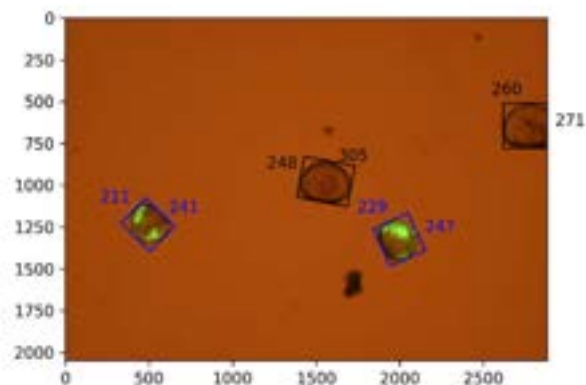


図 15. マガキD型幼生の形態判定方法

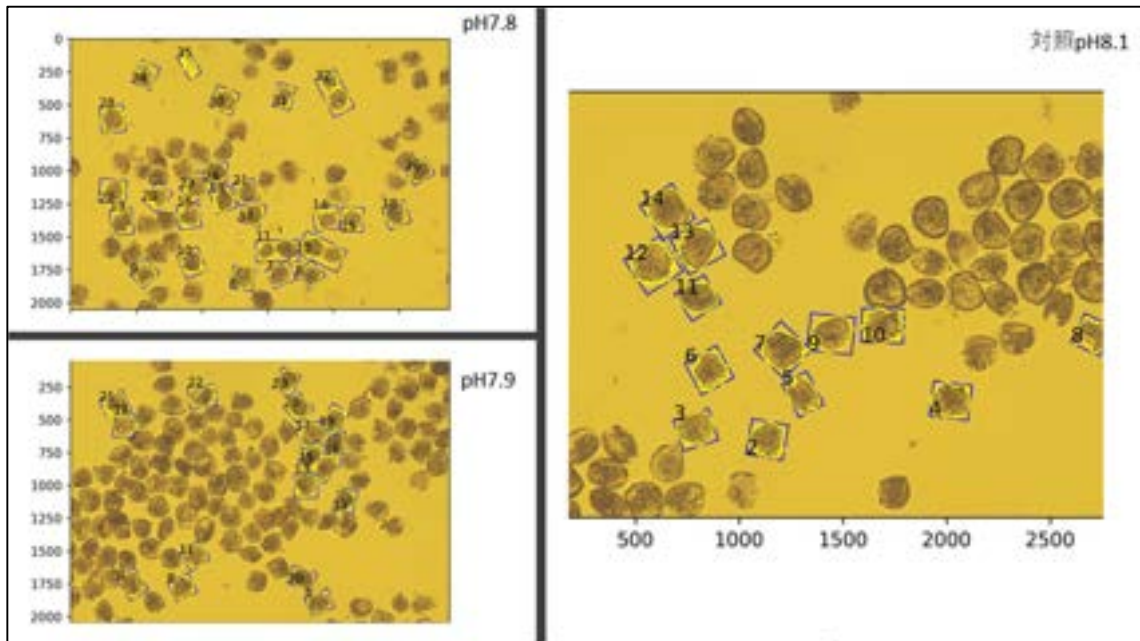


図 16. マガキD型幼生への長方形当てはめによる形態異常判定

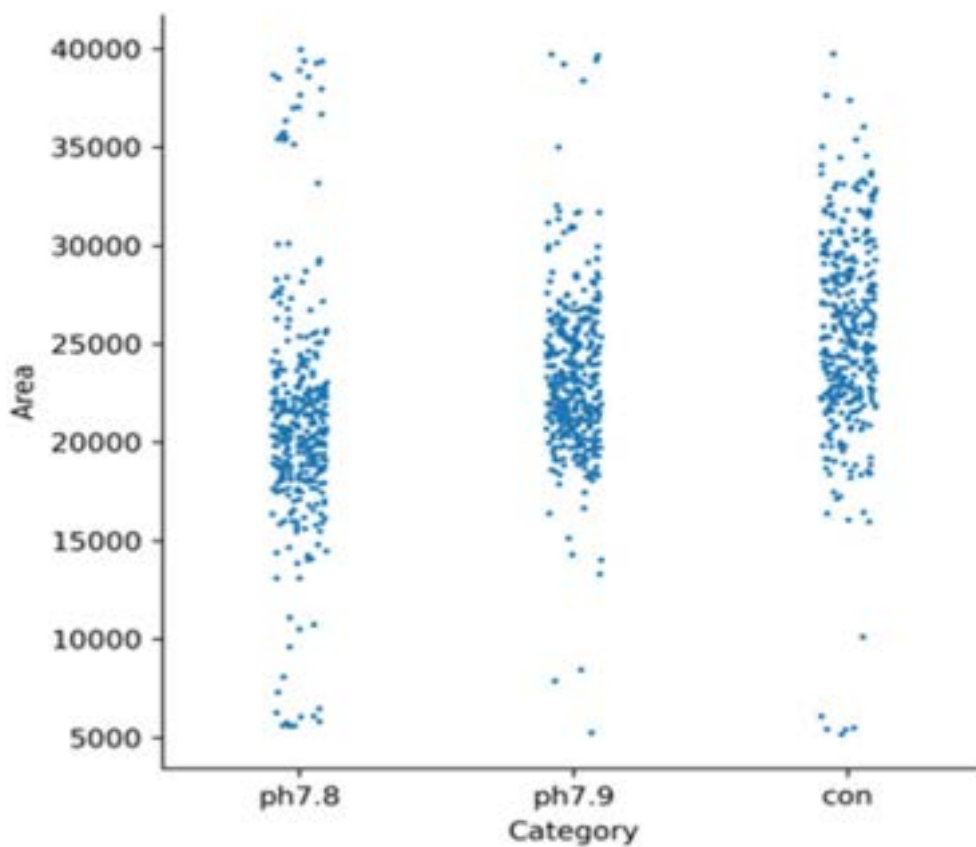


図 17. マガキD型幼生の正常個体との低 pH 群との投影面積の比較

今後、この画像解析システムを活用して全国的なモニタリングを行うとすれば、使用するプランクトンネットは目合い 50 μm に統一するとともに、統一したマニュアルに沿って処理し凍結保存するのが望ましい。

また、低 pH 環境下では、貝殻形成が遅れるとともに、貝殻が形成されても形態異常が生じた。貝殻形態に異常が生じると、遊泳行動や摂餌に影響が出るため、おそらく発生初期の段階でへい死すると考えられ、海洋酸性化はマガキ幼生の発生初期の生残率を下げるのではないかと推測された。

2.2. 飼育実験によるカキ幼生および稚貝への酸性化影響評価

(1) 調査方法

マガキ種苗生産により得られたマガキ浮遊幼生をして低 pH 環境下で飼育し、貝殻の形態異常を調べるとともに、貝殻形成たんぱく質を中心とした発現遺伝子解析を実施した。また、マガキ付着稚貝でも同様に低 pH 環境下で飼育し発現遺伝子解析を行った。低 pH 海水は二酸化炭素を吹き込むことによって調製した。

発現遺伝子解析とは、細胞や細胞群において遺伝子がどれくらい発現しているかを調べる方法で、表現型の違いを分子生物学的に解明し、発現が変動しているターゲット遺伝子を選別することができる。本来、細胞の DNA が RNA に転写されてタンパク質や骨格などが形成され、生物が生きていくための生理機能が発現する。したがって、RNA の発現状況を調べることによって対象生物の生理状態を把握でき、例えば低 pH 環境下でマガキ幼生や稚貝に何が起きているのかを調べることができる。また、遺伝子の発現量を調べることでその影響を定量化できる場合もある(図 18)。これには様々な方法があるが、これまでも経験があるリアルタイム PSR で実験を行った(図 19)。



図 18. 発現遺伝子解析とは？

低 pH 環境下でマガキ幼生や稚貝の発現遺伝子を比較、検討したが、マガキ幼生では pH7.8 と 7.9、着底後の稚貝では低 pH 耐性が強くなると考えられたので、pH7.4 と 7.7 に調整して実験を行った(図 20, 21)。実験海水には精密ろ過海水を使用し、pH を下げるのは CO₂ ガスを吹き込むことにより行ったが、24 時間以内の実験では低 pH 環境を維持することができた。実験方法としては、低 pH 海水と対照区(無処理区)にそれぞれマガキ幼生と稚貝を入れ 12-24 時間後に分離して RNA を抽出し、発現遺伝子を解析した(図 20, 21)。

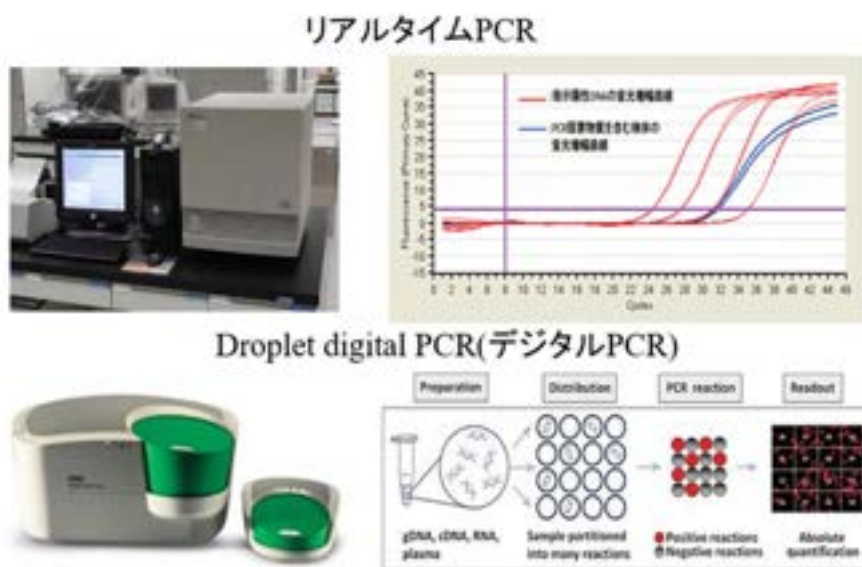


図 19. 発現遺伝子解析の方法

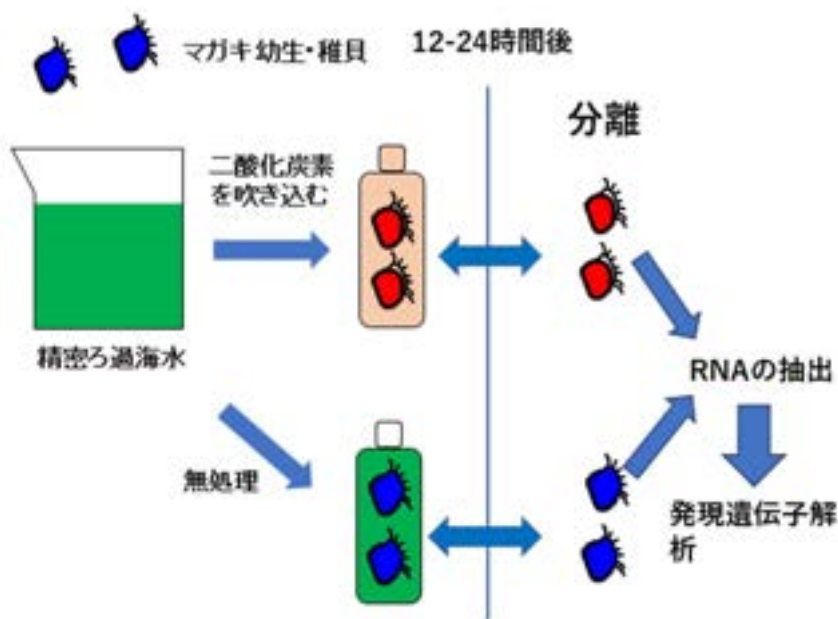
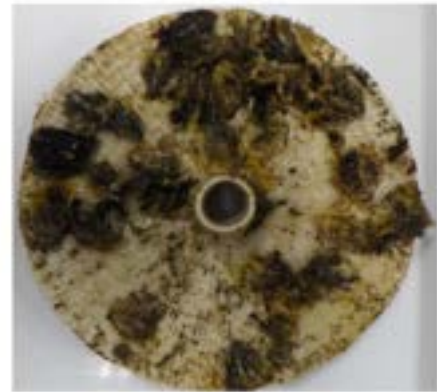


図 20. 低 pH 環境下におけるマガキ幼生と稚貝の発現遺伝子の比較・検討



低 pH 暴露時にはエアレーションは行わなかった

図 21. 低 pH 環境下におけるマガキ幼生および稚貝への影響評価実験

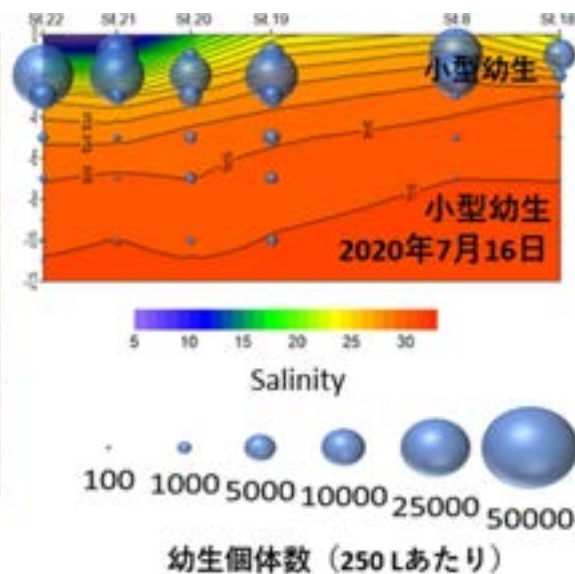
(1) 調査結果および考察

マガキは受精後数時間でD型幼生になって遊泳能力を持つようになり、鉛直方向に移動することによって、不適な環境から逃避することができる。マガキ幼生は主として 3m 以浅に分布し、表層の低塩分の直下の塩分 20 付近に高密度に分布するが、塩分が 20 を下回ると沈降して低塩分水から忌避する(図 22)。



広島湾の南北6点

2020年7月7, 16, 21, 28日 (4日間)
 250 Lのポンプ採水
 採水深度：1, 2, 3, 5, 7, 10
 50 μmのプランクトンネット



- ✓ 主に3 m以浅に分布
- ✓ 表層の低塩分の直下に高密度で分布 (塩分20付近にピークを形成)

図 22. 広島湾でのマガキ幼生鉛直分布調査

したがって、遊泳力のあるD型幼生以降のマガキ幼生は不適な環境にある海水中に暴露され続けることはない。しかし、受精後 2 週間の浮遊幼生期において、受精からトロコフォア幼生になるまでの 2-3 時間だけ不適な海水中に晒される可能性がある。そこで、低 pH 環境下での実験は、受精からトロコフォア幼生になるまでの間に絞って実施したところ、対照区 (pH8.0) ではほぼ正常なD型幼生に変態したのに対し、pH7.8、pH7.7 では直線部分の長さや屈曲度の判別が困難なほど形態異常が生じた(図 16)。これまでの海洋観測によれば、広島湾では比較的高頻度かつ長期にわたって低 pH 条件に陥っている。広島湾では 1990 年以降採苗不良の発生頻度が高くなっており(図 23)、その原因は高水温や貧栄養による餌不とが考えられているが、海水の酸性化がその一因である可能性が生じてきた。

これら幼生の一部を RNAlater に浸漬し RNA 発現解析に供した。幼生および稚貝の発現遺伝子解析にあたっては、当初は RNA-seq で網羅的に発現遺伝子のプロファイリングを行う予定であったが、文献調査により発現遺伝子を用いた低 pH 条件の影響評価に関する知見が多く得られたため(表 3)、主に貝殻形成に関わる遺伝子群を選択し、マガキ幼生と稚貝について検討した。



図 23. 広島湾におけるマガキ採苗確保率の経年変化

表 3. 解析に使用した発現遺伝子

Gene 分類	略称	遺伝子
Housekeeping	actin	actin
	gapdh	glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase
	arf1	ADP-ribosylation factor 1
	elf1 α -1	α subunit of elongation factor 1 (elf1 α)
着底関連	Chit1	putative chitinase 1
	CalmA	calmodulin A
	Anx	annexin A4
	CA1	collagen α 1 chain
	VWC2	von Willebrand factor C domain-containing protein 2-like
	wif1	wnt inhibitory factor 1/EGF-like domain-containing protein 2
殻形成	Perl1	perlucin
	Perl2	perlucin
	Perls	perlustrin
	Nacr1	nacrein(1)
	Nacr2	nacrein(2)
	Nacr3	nacrein(3)
	Nacr4	nacrein(4)
	Nacr5	nacrein(5)
	pif177	shell matrix protein pif-177
	slc26-2	HCO ₃ -translocating factor
	slc4-1	HCO ₃ -translocating factor
	slc4-3	HCO ₃ -translocating factor
	slc4-4	HCO ₃ -translocating factor
	Pepi	papilin Protease inhibitor
	Calm1	calmodulin (1)
	Calm2	calmodulin (2)
	NKA1	Na ⁺ K ⁺ -ATPase(1)
	NKA2	Na ⁺ K ⁺ -ATPase(2)
	Tyro	tyrosinase (1)
	ChBP	chitin-binding protein
	ChiSyn1	chitin synthase (1)
	ChSyn2	chitin synthase (2)

その結果、まず Housekeeping や貝殻形成遺伝子の発現量には差がなかった。これは、低 pH 環境に晒されても、マガキ幼生や稚貝の恒常性の維持や貝殻形成機構は影響を受けないという可能性を示唆するものであるが、実際に貝殻が形成されないのであるから、貝殻を形成するアラゴナイト等のカルシウムの形成に異常を来すことによる貝殻形成異常起こすのかもしれない。ただ、着底期に変化するとされている遺伝子群のうち、低 pH 環境下で発現量が増える遺伝子が2つ発見された。【CA1:The Collagen α 1 chain is an important structural protein on the surface of human skin.:コラーゲンに関する遺伝子】と【VWC2:フォン・ビル ブランド因子(VWF)は血管損傷時の止血血栓形成や凝固第VIII因子(FVIII)の保護と運搬に必須の血漿タンパク質:血清やフィブリン形成に関する遺伝子群】という2つの遺伝子である。そこで、この2つの遺伝子について定量系を構築して発現量を比較し検証した。これら2つの遺伝子の発現量を検定するための検量線を作成した(図 24-26)。

この検量線を用いて2つの発現遺伝子の定量分析を実施したところ、マガキ幼生と稚貝では発現遺伝子の挙動が異なり、CA1(collagen α 1Chain)遺伝子は幼生では低 pH で発現量が増したが、稚貝では差が見られなかった。一方、VW2(von Willebrand factor C domain-containing protein 2-like) 遺伝子は幼生では pH による差がなかったが(図 27)、稚貝では pH が低くなるにつれて発現量が増した。これは、VW2は低 pH のマーカーに使える可能性があることを示している。

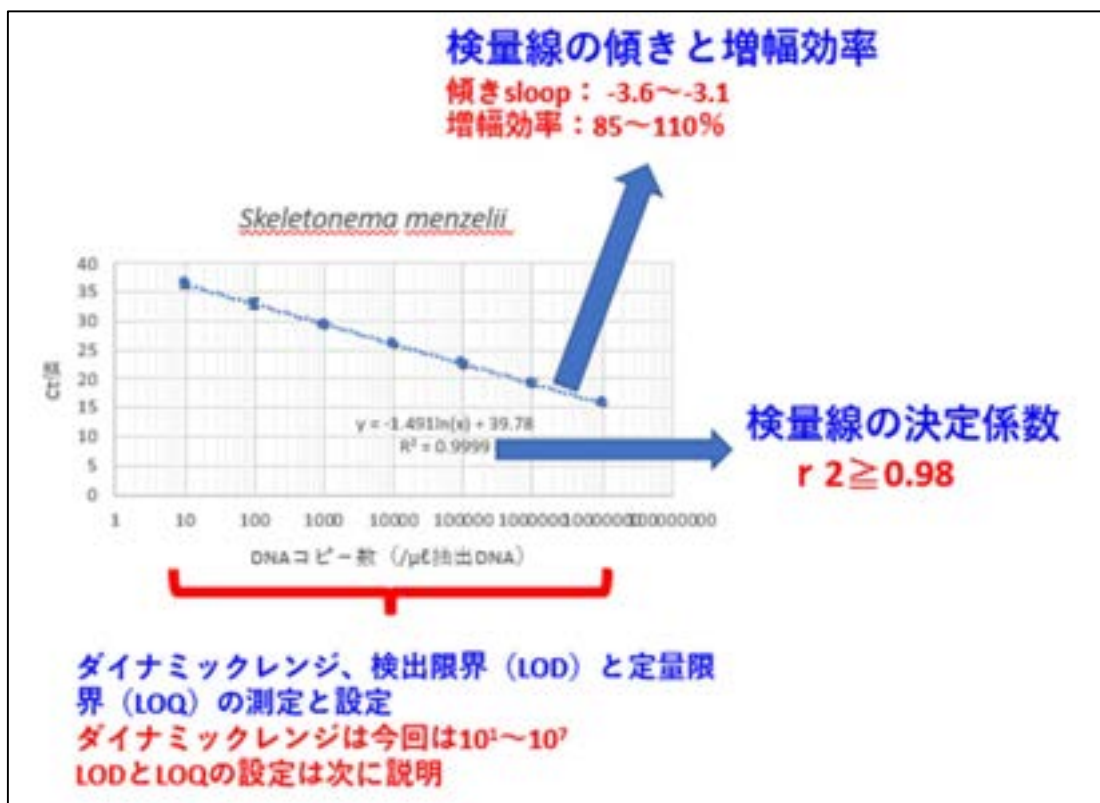


図 24. 設計した qPCR の定量系の評価項目

検出系の検出限界 (LOD) と定量限界 (LOQ) の算出

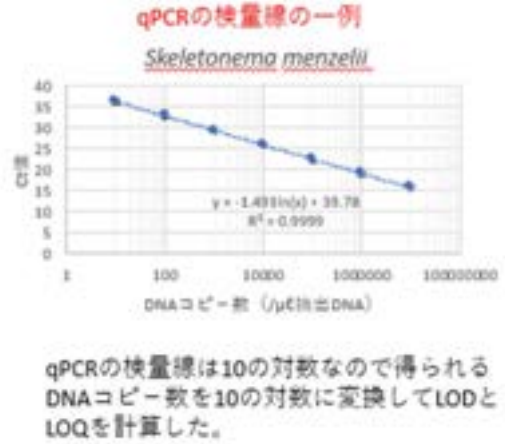
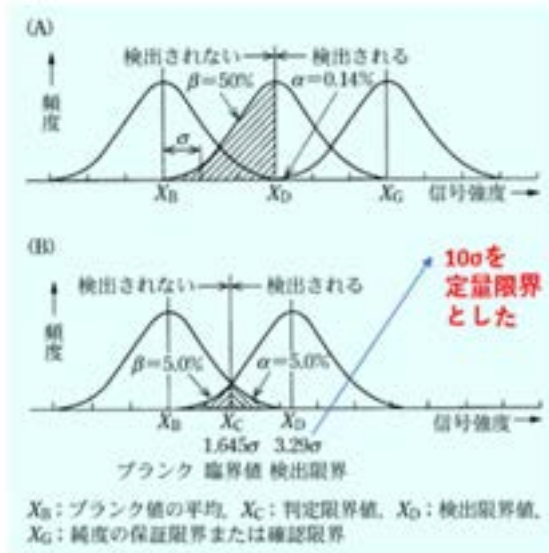


図 25. リアルタイム PCR による定量分析の前のチェック-2

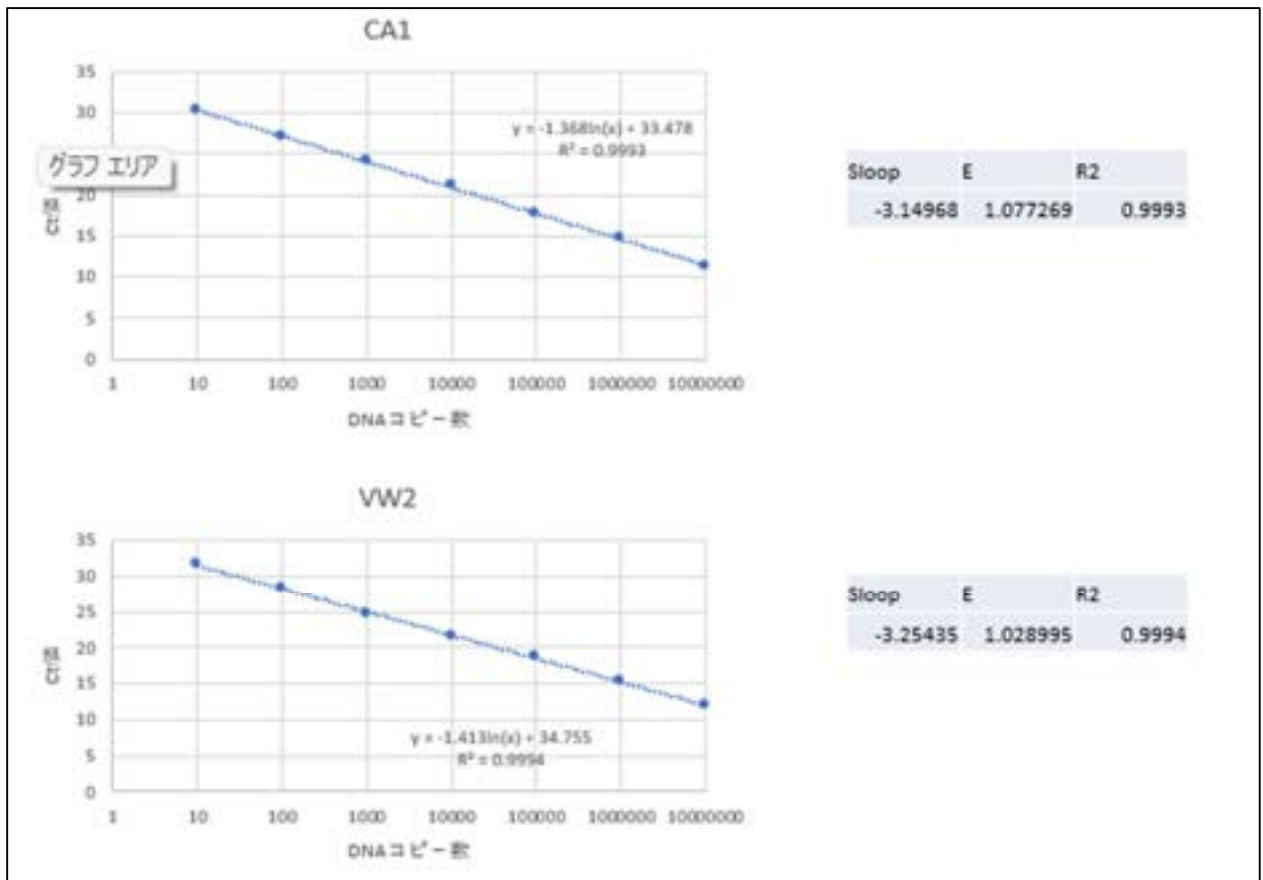


図 26. 2つの発現遺伝子の検量線

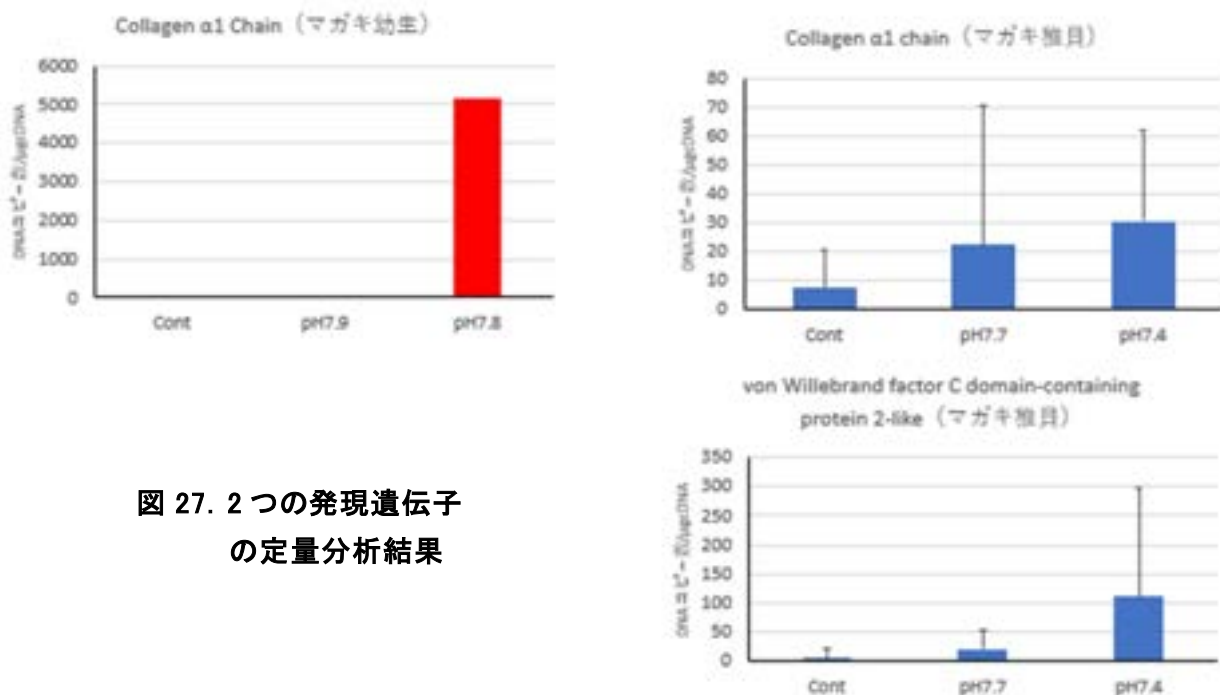


図 27. 2つの発現遺伝子の定量分析結果

(3) まとめ

- マガキ浮遊幼生の形態異常の調査手法について検討し、全国共通で使用できるマガキD型幼生の形態異常を検証できる投影面積による画像解析システムを開発することができた。
- 低 pH 環境下におけるマガキ幼生の発生実験により、低 pH 環境下の晒されると貝殻形成の遅延や形成異常が生じることを確認した。特に、受精からトロコフォア幼生までの2-3 時間に低 pH 環境下に晒されると、マガキの発生初期の生残率が下がると推測された。このことにより、海水の酸性化が、1990 年以降に広島湾において発生頻度が高まっている採苗不良の一因である可能性が浮上してきた。
- マガキ幼生および稚貝の発現遺伝子解析から、低 pH 条件下で発現量が増す遺伝子が発見され、今後は、これらをマーカーとして現場観測チームと連携することによって、低 pH 等の環境とマガキへの影響の関係を調べることができる体制が整った。
- 引き続き、マガキ幼生や稚貝の低 pH 条件下の影響評価を行い、発現遺伝子解析について網羅的に調べることによって低 pH と関連するマーカー候補を発掘する。
- 今年度見つかったマーカーを使って現場観測チームと連携し、例えば pH 変動が大きな海域を選定し、観測機器類と共にマガキ稚貝を垂下して定期的にサンプリングして観測値とマガキの応答の関連性を解析することを検討する。

VI. 数値モデリングによる海洋酸性化影響評価

1. 数値モデリングによる河川水が酸性化の進行に及ぼす影響評価

1.1. 富栄養海域の東京湾と貧栄養海域の比較検証

(1) 方法

人為起源CO₂の過剰排出による“deadly trio”と言われる地球温暖化、海洋酸性化、貧酸素化は、それぞれ直接に悪影響を与えるだけでなく、相互に複雑に絡み合っさらなる脅威を招くが(図1)、それらの複合的な影響を現地での海洋観測のみから予見することは困難であり、その面において数値モデリングは効果的な手法である。

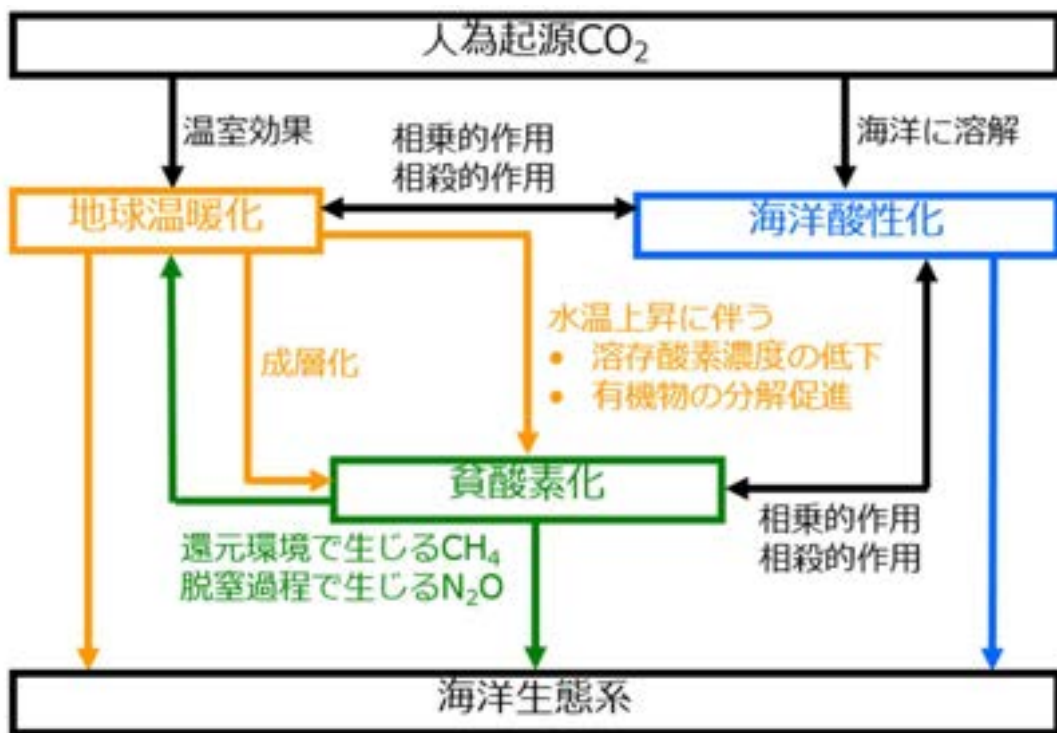


図1. 地球温暖化・海洋酸性化・貧酸素化の関係(藤井・芳村・小笠, 2021:月刊海洋)

東京湾は、我が国において最も富栄養化が進んでいる海域であり、貧酸素・無酸素状態が繰り返し観測されている (Kodama and Horiguchi, 2011, Mar. Pollut. Bull.)。海洋酸性化の指標である pH、アラゴナイト飽和度 (Ω_{arag}) の顕著な季節変動も確認されおり (Yamamoto-Kawai *et al.*, 2021, Front. Mar. Sci.)、 Ω_{arag} は産業革命前よりもすでに 0.6 低下している (Yamamoto-Kawai *et al.*, 2015, J. Oceanogr.)とも言われ、沿岸酸性化が極めて進行している海域でもある。一方、宮古湾は古くからアワビ、ウニ漁が盛んであるが、我が国において代表的な貧栄養海域で、今後ますます人口減少や流域の産業の縮小により、河川を通じた栄養塩供給が減少しさらに貧栄養化が進むものと危惧される海域で、もとより沿岸酸性化も認められない海域である。

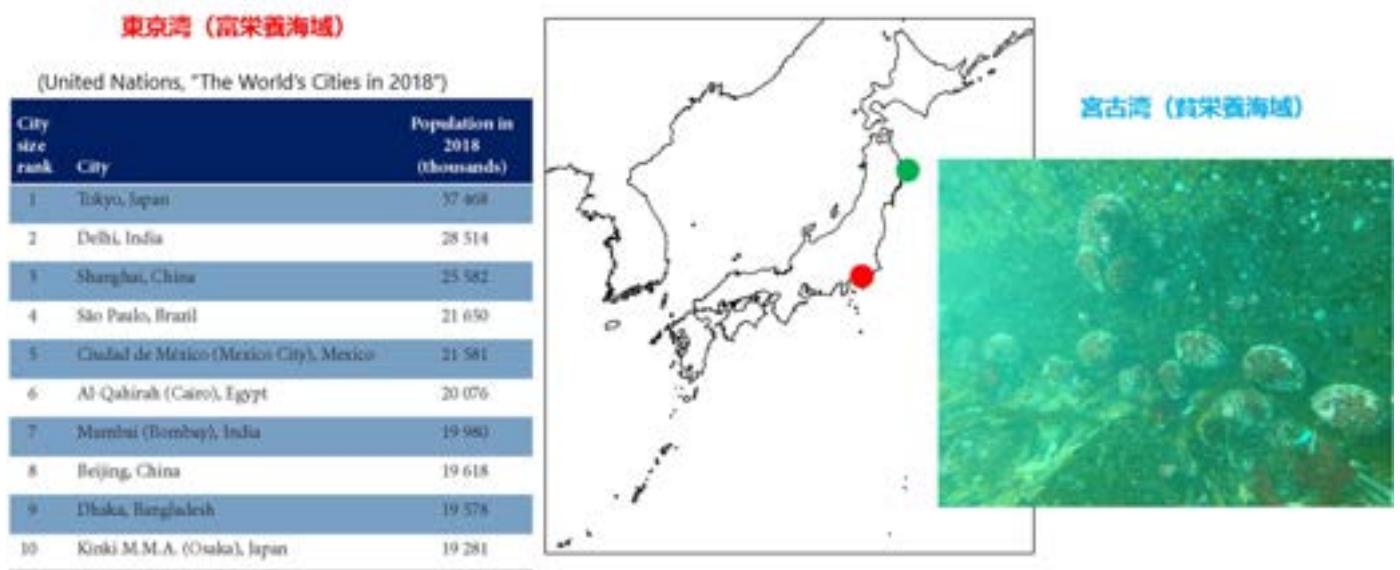


図 2. 東京湾(富栄養海域)と宮古湾(貧栄養海域)

このように栄養環境面で両極にある東京湾と宮古湾(図 2)において、これからどのような地域適応策を考えていくべきかの指針を得るために数値モデリングを試みた。物理モデル:Regional Ocean Modeling System (ROMS) CROCO v1.1 (Jullien *et al.*, 2019) と生態系モデル: Pelagic Interaction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies (PISCES) (Aumont *et al.*, 2003; Aumont, 2005) を統合して走らせたが、これまで統合モデルにおいては河川からの淡水・栄養塩流入過程を考慮できていなかったもので、今回はその点を考慮した。宮古湾については、水産研究・教育機構水産技術研究所 宮古庁舎地先、東京湾については川崎人工島における観測データを使用した(図 3)。

モデルに適用した現在(2000-2001)と将来(2099-2100)の境界条件を表 1 に整理した。水温やCO₂ 濃度など将来に明らかに変動する項目については将来予測値、全アルカリ度など将来の数値が予測不可能なものは現在と同じ値を適用した。

河川流入過程を考慮するにあたっては、宮古湾については二級河川が多く二級河川の流量データは限られているため、近隣の一級河川の流量データをそれぞれの流域面積で按分する方法で流量データを求めた。東京湾については 6 河川の流量データが得られ、また河川起源の栄養塩付加量(NO₃・PO₄)の回帰式が既往知見により得られているので(図 4)これらを用いた。

- 物理モデル：Regional Ocean Modeling System (ROMS) CROCO v1.1 (Jullien et al., 2019)
- 生態系モデル：Pelagic Interaction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies (PISCES) (Aumont et al., 2003; Aumont, 2005)
- 観測データとの比較を通じてモデル結果を検証
 - 宮古：東北水研宮古庁舎地先
 - 東京湾：川崎人工島 (Kawasaki Artificial Island; KAI)

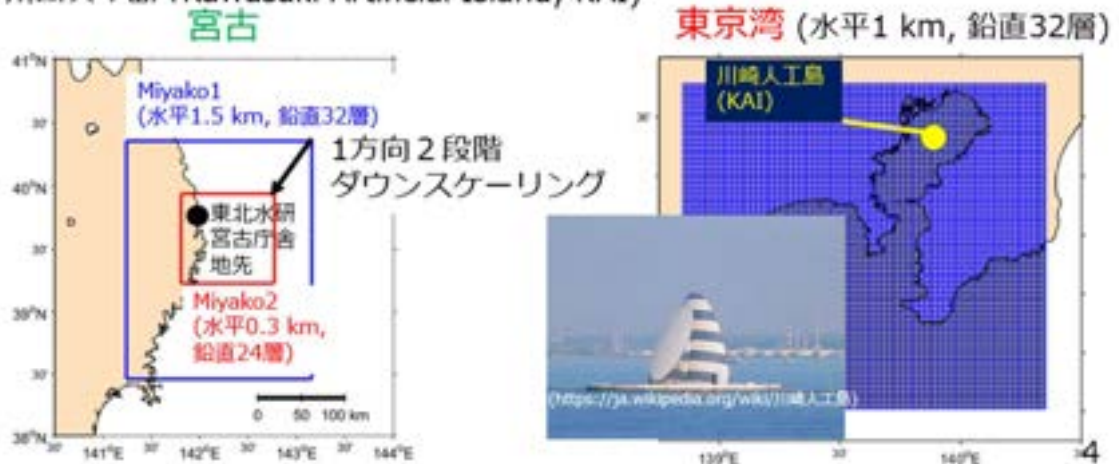


図 3. 宮古湾(貧栄養海域)と東京湾(富栄養海域)で用いたモデルの概要

表 1. 宮古湾および東京湾モデルの境界条件

Parameter	Dataset	Source
Bathymetry	General Bathymetric Chart of the Ocean (GEBCO) 15 arc-second	GEBCO website
Tide	TPXO Global Tidal Models (TPXO7.0)	Egbert and Erofeeva (2002)
Ocean physics (water temperature (T), salinity (S), current velocity, water level)	Future Ocean Regional Projection (FORP)-JPN02 (MRI-GCM3) (Present (2000-2001), Future (2099-2100; RCP 2.6 scenario and RCP 8.5 scenario))	Tsujino et al. (2017); Nishikawa et al. (2021)
Atmospheric forcing (irradiation, air temperature, sea level pressure, relative humidity, precipitation, wind velocity)	GPV/JMA Meso-scale Spectral Model (MSM)	Japan Meteorological Agency website
Atmospheric CO ₂ concentration	Present: 370 ppm Future: 420 ppm (RCP 2.6 scenario), 900 ppm (RCP 8.5 scenario)	van Vuuren et al. (2011)
Dissolved oxygen (DO) Nutrients (NO ₃ , PO ₄ , Si)	World Ocean Atlas 2009	Garcia et al. (2010a); Garcia et al. (2010b)
Dissolved organic carbon (DOC) Fe		Aumont and Bopp (2006)
Total alkalinity (TA)	AT = 2319 + 0.5155 T - 0.2367 DO (for present and future)	Watanabe et al. (2020)
Dissolved inorganic carbon (DIC)	Present: DIC = 2407 - 12.20 T - 0.7851 DO Future: Outputs from Model description and results of CMIP5-20c3m experiments (MIROC-ESM) (2086-2095)	Lewis et al. (1998); Watanabe et al. (2020); Watanabe et al. (2011)

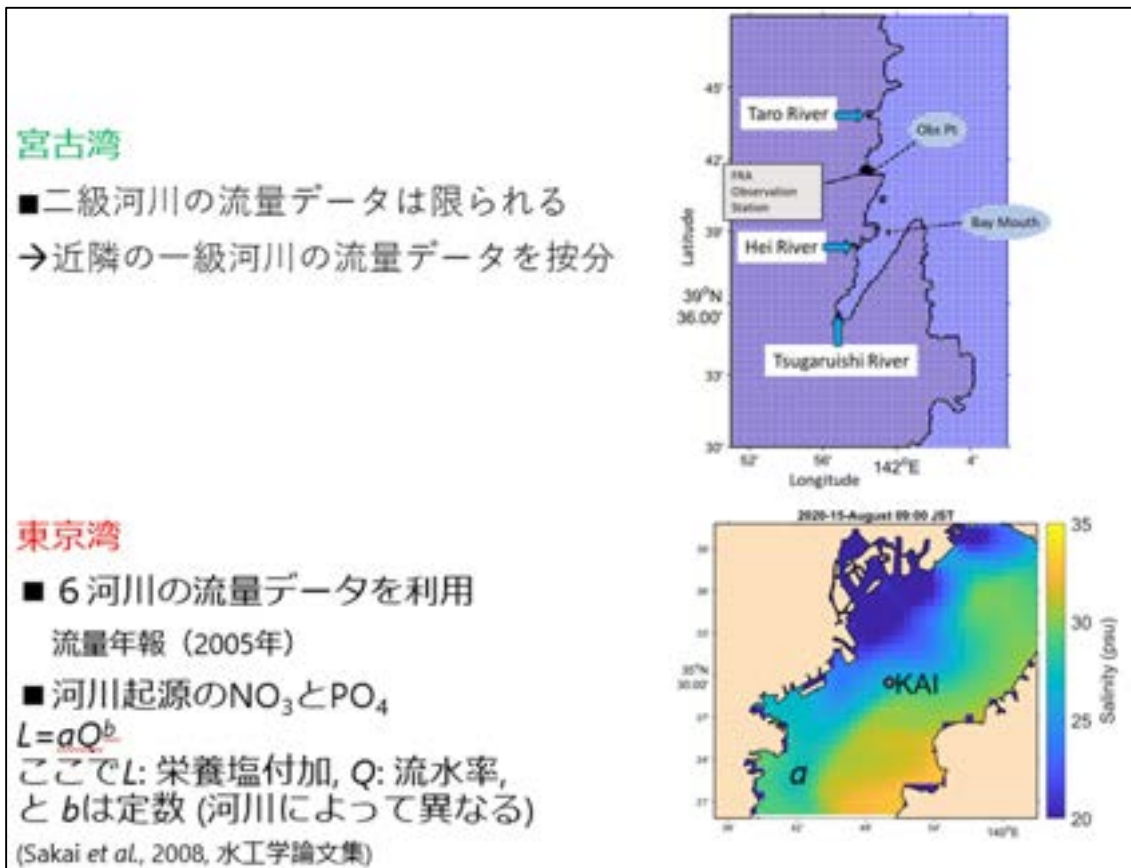


図 4. 河川流入過程の検討

(2) 結果

図 5 に宮古湾におけるシミュレーション結果を示した。黒線(一) が水産研究・教育機構水産技術研究所 宮古庁舎地先の現地観測結果、青線(一) が現状を再現したモデル、緑線(一) が今世紀末 2090 年代; RCP2.6 シナリオでパリ協定に準拠した場合のモデル、赤線(一) が 2090 年代; RCP 8.5 シナリオで何も対策を講じなかった場合のモデルである。現状モデルの水温を見ても現段階では観測値をうまく再現できていないのが課題であるが、塩分については、スパイク状に急減する状況がほぼ再現できている。DO については、観測測器のセンサーへの生物付着による影響も考えられるが、現状モデルではうまく再現できていない。Ω_{arag} は、大雨とそれに伴う河川増水後の塩分とΩ_{arag} の急激な低下をうまく再現できており、RCP8.5 シナリオでは周年を通じて閾値 1.5 を下回りマガキ浮遊幼生にとっての危険水準に達してしまうが、RCP2.6 シナリオでは回避できるという結果が出た。

東京湾については(図 6)、灰色線(一) が東京湾川崎人工島の現地観測結果、黒線(一) が現状を再現したモデル、青線(一) が今世紀末 2090 年代; RCP2.6 シナリオのモデル

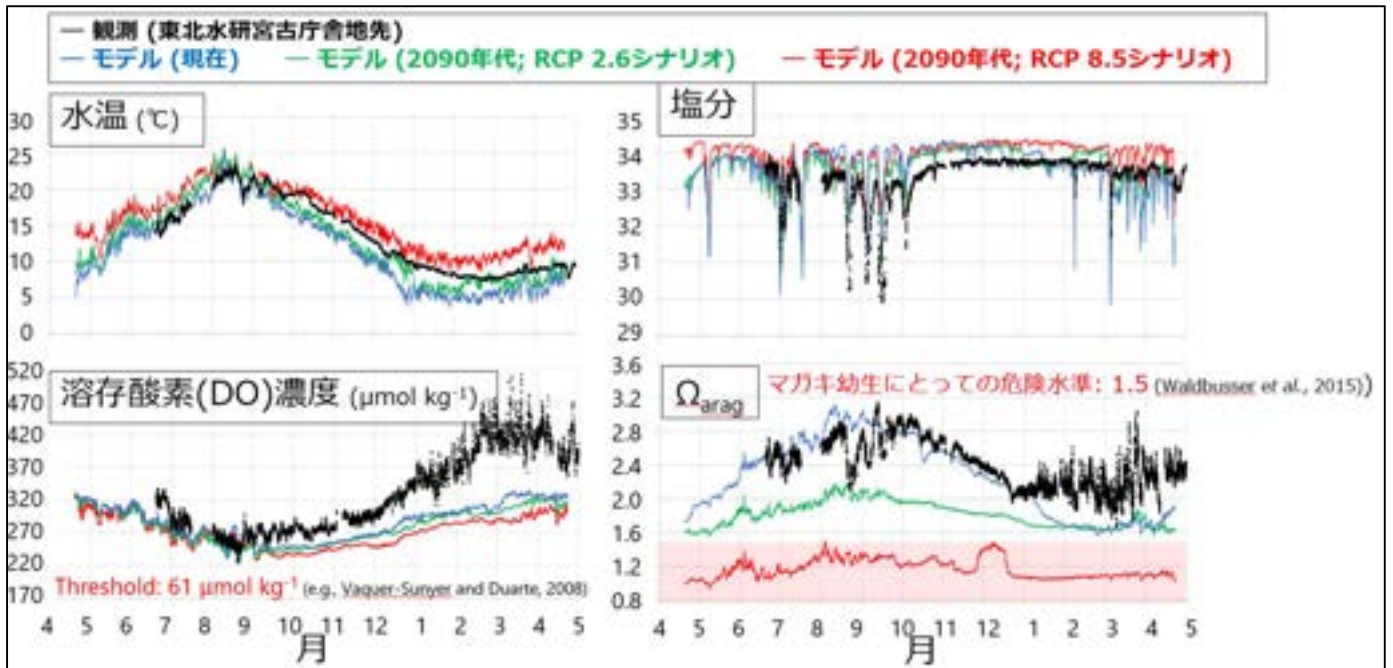


図 5. 宮古湾(貧栄養海域)におけるシミュレーション結果

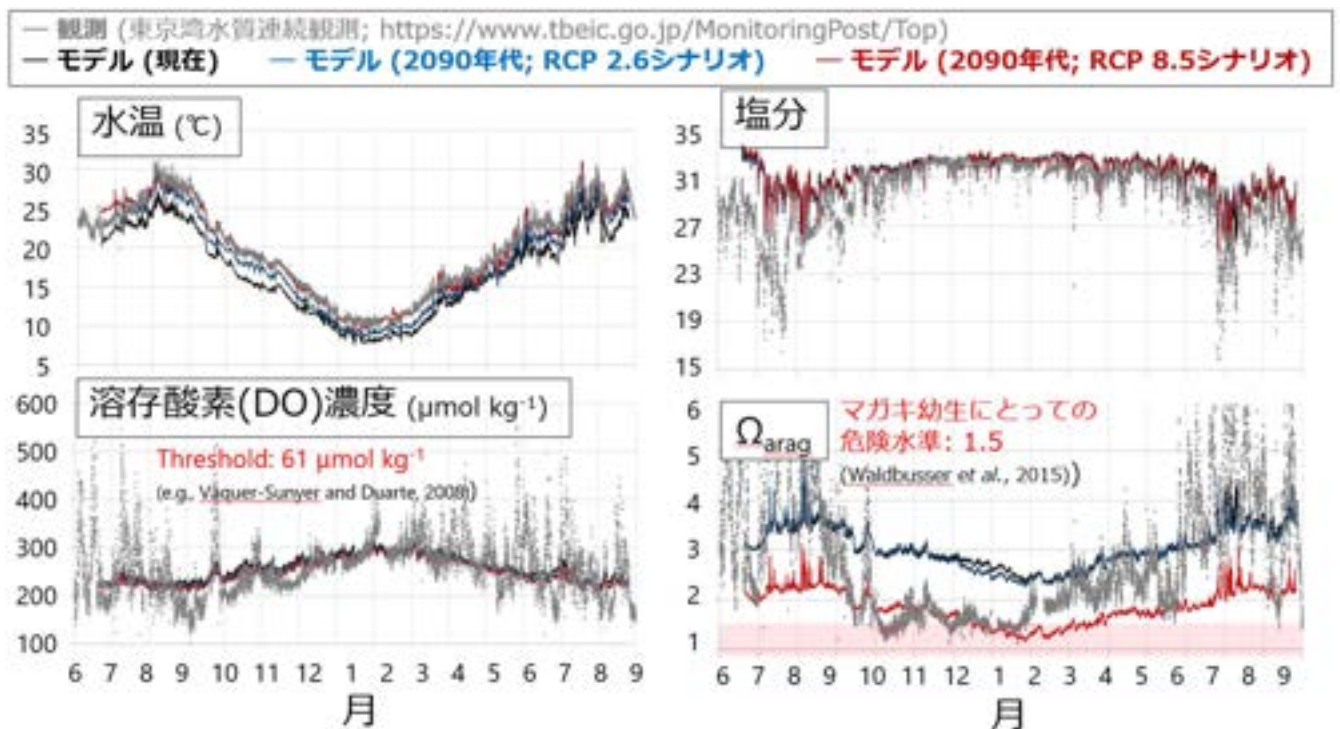


図 6. 東京湾(富栄養海域)におけるシミュレーション結果

ル、茶色線(一)が2090年代; RCP 8.5シナリオのモデルである。水温については現状と再現モデルが比較的連動している。DOについては細かい変動までは再現できていないが、ベースとしては再現できていると評価できる。 Ω_{arag} は、RCP8.5シナリオではやはり閾値1.5を下回りマガキ浮遊幼生にとっての危険水準に達してしまうが、RCP2.6シナリオでは回避できるという結果が出た。しかし、 Ω_{arag} と塩分については、河川流量に加えて下水・工場排水等を考慮する必要があると考えられるが、モデルではこれらを考慮していないため数値の計算結果が高めに出ていると考えられ、影響としては過小評価になっていると考えられる。

(3)まとめ

- モデル結果は貧栄養海域である宮古湾と、富栄養海域である東京湾で観測された物理・生物化学過程の季節変動を現実的に再現できた。
- 人為起源CO₂を大幅に削減しない限り、今世紀末までに海洋酸性化は貝類幼生にとって危険水準に到達すると予測された。
- 現行のモデル結果では、貧酸素化は宮古湾の表層と底層、東京湾の表層では深刻なレベルには到達しないとの示唆が得られた。但し、底層との相互作用を考慮していないため、今後、これらを考慮した検討が必要である。
- 貧栄養海域では河川からの栄養塩の投入が表層の海洋酸性化と貧酸素化を緩和する可能性がある。
- 河川からの淡水と栄養塩の流入過程のモデルでの考慮は不十分であり、東京においては、下水や工場排水の流入も考慮する必要がある。

1.2. 瀬戸内海豊後水道海域における海洋酸性化の現状と将来予測の検討

(1) 方法

本プロジェクトの調査対象海域である佐田岬、佐伯湾、内海、廿日市、笠岡、姫島の6海域が含まれる瀬戸内海西部のモデルを作成した。外洋では境界条件にグローバルなデータセットを使用できるので比較的容易に取り組めるが、瀬戸内海のような内海では河川水等の影響を強く受けるなど複雑で、境界条件などモデリングの設定が困難であるが、敢えて試みたものである。物理モデルには領域海洋モデルROMSベースのCROCOバージョン1.1および1.3.1モデリングシステム(Jullien et al.2022)、生態系モデルにはPISCES-v2(Aumont et al.,2015)を用い、これらを結合させて使用した。空間解像度は細かくしないと河川の影響を考慮できないので、水平1.5kmグリッド解像度、鉛直32シグマ層、時間解像度30秒とした(図7)。モデルのパフォーマンスは境界条件によって決まる。境界条件で最も困っているのは、河川からの栄養塩、DIC、全アルカリ度であるが、基本的データが不足している部分もあり、多くの検討課題が残されているのが現状である(表2)。

モデル域周辺には12の一級河川がある(図8)。水温、水温、硝酸(NO₃)、アンモニア

(NH₄)、リン酸(PO₄)、DO は水環境総合情報サイト <https://water-pub.env.go.jp/water-pub/mizu-site/mizu/kouiki/dataMap.asp> から入手可能であるが、ここからデータを引っ張り出すには多くのマンパワーが必要である。ケイ酸(Si)と鉄(Fe)の濃度は小林 (1961)を用い、全アルカリ度と溶存無機炭素(DIC)濃度は 410 ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)に固定した。一級河川の場合には河川水量のデータを入手できるが(表 3)、月単位でしか入手できないため、台風に伴う大雨なお季節変化に伴う増減やゲリラ豪雨などの極端現象のデータが得られない。沿岸酸性化はこのような短期的、突発的なイベントの影響を強く受けるので、よりきめの細かいデータが必要となる。また、これら河川流量に加えて栄養塩濃度が当該海域へ流入する栄養塩量を決めるので、これらについても十分なデータの取得が求められる(表 4)。

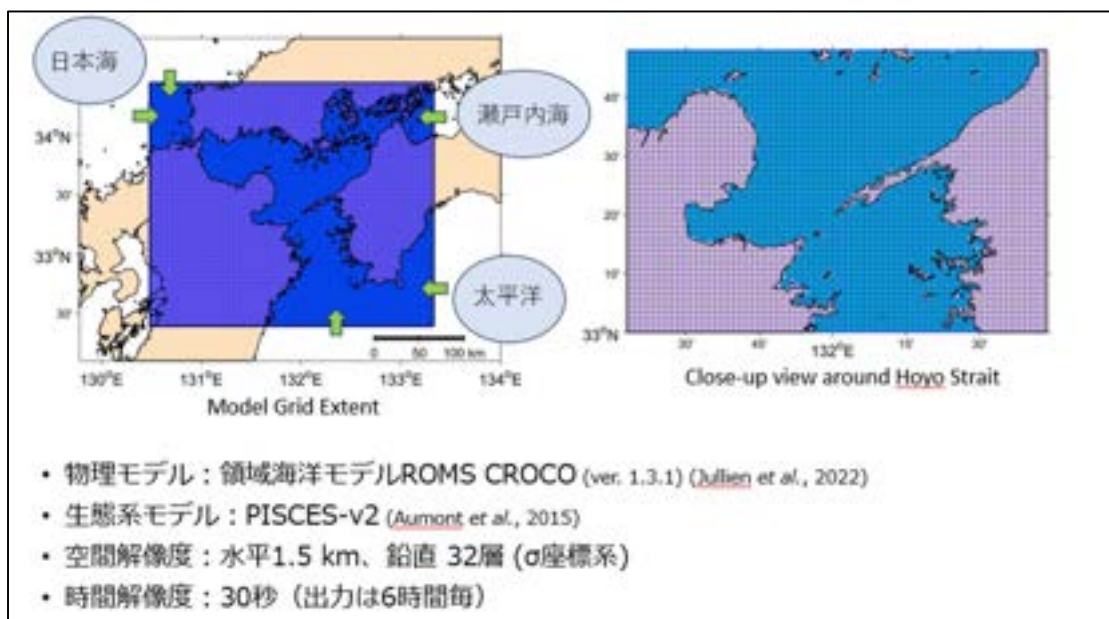


図 7. 瀬戸内海西部モデルの概要

表 2. 瀬戸内海西部モデルの境界条件

パラメータ	境界値	出處
水深	The 15 arc-second General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) 2021 dataset	GEBCO website (https://www.gebcos.net/data_and_products/gbidded_bat_hymetry_data/)
潮汐	TPXO Global Tidal Models (TPXO7.0)	Egbert and Erofeeva (2002)
水温、塩分、流速、水位	現在：JCOPE2M Model Outputs 将来：Future Ocean Regional Projection (FORP)-JPN02 (MRI-GCM3) (2099-2100) (要検討)	Miyazawa et al. (2017) Tsurino et al. (2017), Nishikawa et al. (2021)
大気外力 (日射、気温、相対湿度、降水量、風速)	現在：GPV/JMA Meso-scale Spectral Model (MSM) (2020年5月～2022年3月) 将来：(要検討)	気象庁ウェブサイト (http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/gpv-netcdf.html)
大気CO ₂ 濃度	現在：417 ppm 将来：420 ppm (RCP 2.6シナリオ), 900 ppm (RCP 8.5シナリオ)	NOAA Global Monitoring Laboratory (https://gml.noaa.gov/) van Vuuren et al. (2011)
溶存酸素 (DO), NO ₃ , NH ₄ , PO ₄ , Si	現在：World Ocean Atlas 2009 (要検討) 将来：(要検討)	Garcia et al. (2010a, 2010b)
Fe, 溶存有機炭素 (DOC)	現在：Aumont and Bopp (2006)の月平均値 将来：(要検討)	Aumont and Bopp (2006)
全アルカリ度 (TA)	現在：塩分から見積もる (要検討) 将来：現在から変わらないと仮定	Taguchi et al. (2009) Bernardo et al. (2023), Fujii et al. (2023)
溶存無機炭素 (DIC)	現在：以下の関係式を用いて水温とDO濃度から見積もる： DIC = 2407 - 12.20 T - 0.7851 DO (要検討) 将来：Model description and results of CMIP5-20c3m experiments (MIROC-ESM)の2086～2095年の出力 (要検討)	Lewis et al. (1998), Watanabe et al. (2020) Watanabe et al. (2011)

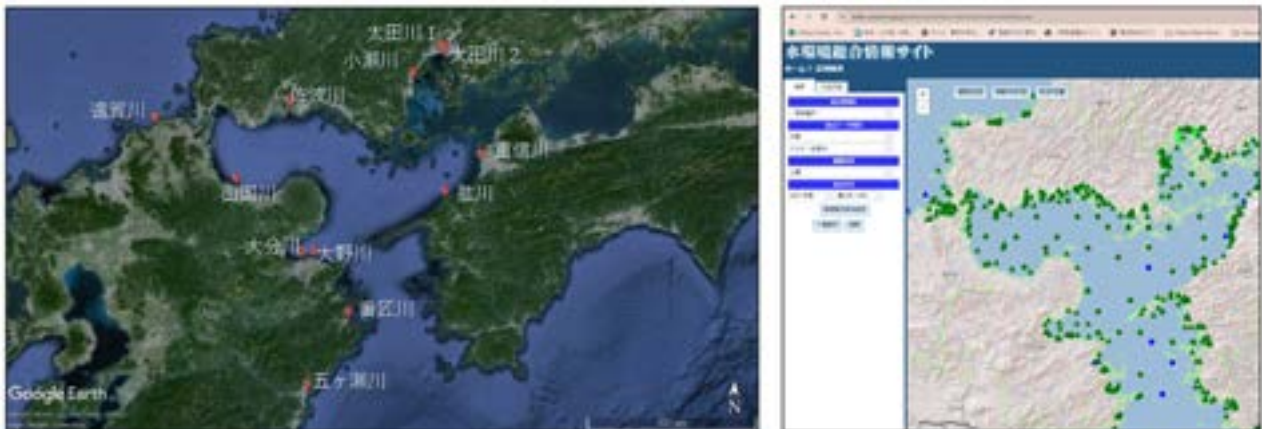


図 8. 瀬戸内海西部モデル領域内の 12 河川

表 3. 12 河川の河川流量

月	中国				四国		九州					
	佐波	小瀬	太田 1	太田 2	重信	肱	遠賀	五ヶ瀬	番匠	大野	大分	山国
1月	4.02	6.12	3.06	1.53	0.86	9.04	11.27	22.23	3.34	26.03	13.24	3.43
2月	12.20	6.09	3.05	1.52	5.99	27.22	21.46	33.56	4.75	38.37	20.17	23.21
3月	15.87	12.40	6.20	3.10	11.46	39.32	31.07	51.02	7.01	45.21	23.42	29.23
4月	25.97	22.02	11.01	5.51	6.77	26.93	20.12	45.42	5.89	31.38	21.39	11.70
5月	10.13	9.39	4.70	2.35	2.12	10.05	13.41	55.22	9.38	32.31	23.15	8.57
6月	16.38	17.86	8.93	4.47	16.25	110.32	51.25	217.90	56.88	188.45	88.30	67.88
7月	58.22	44.99	22.50	11.25	21.18	119.67	141.07	168.52	22.59	206.99	117.92	143.82
8月	12.43	9.59	4.80	2.40	3.09	32.99	36.76	194.55	39.83	114.89	45.95	5.09
9月	4.63	7.82	3.91	1.96	8.33	45.36	25.77	161.58	24.56	133.59	60.13	5.77
10月	4.37	6.69	3.35	1.67	3.52	18.37	14.98	47.91	10.52	51.91	26.79	3.83
11月	4.96	6.53	3.27	1.63	2.44	19.49	14.22	29.93	5.51	32.14	21.80	5.42
12月	7.48	6.57	3.29	1.64	5.51	26.62	15.72	26.71	4.45	29.28	18.69	7.40
平均	14.72	13.01	6.50	3.25	7.29	40.45	33.09	87.88	16.23	77.55	40.08	26.28

表 4. 12 河川の栄養塩濃度

PO₄ (μmol kg⁻¹) (2020年度) (水環境総合情報サイト)

月	佐波	小瀬	太田 1	太田 2	重信	肱	遠賀	五ヶ瀬	番匠	大野	大分	山国
1月	0.65	0.26	2.65	1.71	3.87	1.00	2.74	0.71	0.68	0.77	1.61	0.77
2月	1.42	0.32	2.65	2.32	2.23	1.13	1.42	0.74	0.52	1.84	2.19	1.84
3月	0.58	0.35	3.74	3.03	2.71	1.10	2.45	0.77	0.48	1.39	2.71	1.39
4月	0.71	0.26	5.29	3.35	3.06	1.26	2.74	0.94	0.74	1.23	1.68	1.23
5月	0.71	0.32	2.32	1.84	2.00	0.83	1.10	0.80	0.61	0.61	1.03	0.61
6月	0.81	0.32	4.77	3.84	3.55	1.00	3.23	1.14	0.87	1.81	1.77	1.81
7月	0.81	0.35	5.03	5.10	1.93	0.70	2.60	1.48	1.13	1.45	1.35	1.45
8月	0.71	0.42	4.65	3.65	1.63	0.59	2.71	0.89	0.68	1.52	1.84	1.52
9月	0.65	0.39	3.48	2.97	1.87	0.68	2.60	1.10	0.84	1.45	1.61	1.45
10月	0.61	0.48	4.06	2.52	1.51	0.55	1.50	1.10	0.84	0.84	1.26	0.84
11月	0.55	0.45	2.42	1.84	1.42	0.52	1.85	0.89	0.68	1.03	1.32	1.03
12月	0.74	0.35	2.32	3.82	2.11	0.76	1.56	1.05	0.81	0.87	2.00	0.87

SiO₂とFe (μmol kg⁻¹) (小林, 1961)

	佐波	小瀬	太田	重信	肱	遠賀	五ヶ瀬	番匠	大野	大分	山国
SiO ₂	467.9	503.6	414.3	621.4	425.0	753.6	1260.7	553.6	1950.0	1900.0	1053.6
Fe	0.00	0.36	0.18	1.43	0.18	0.36	0.36	0.72	5.38	2.33	0.54

(2) 結果

2020年5月1日～2022年3月7日(スピンアップ期間2カ月)の期間で、廿日市、姫島、佐田岬(図9)での本プロジェクトによるモニタリング結果をモデルの初期値・境界値・参照値としてモデルを駆動させ、パラメーターを較正したうえで再現性を評価した。pHと Ω_{arag} は水温、塩分、全アルカリ度(TA)、溶存無機炭素(DIC)の値からCO2SYS(Pierrot et al., 2006)を用いて計算した。

図10に廿日市(青線)、姫島(赤線)、佐田岬(オレンジ線)における表層の水温、塩分、全アルカリ度、DIC、図11に表層のDO、クロロフィル、pH、 Ω_{arag} 、図12に栄養塩のシミュレーション結果を示した。また、

現時点では、塩分濃度の大幅な低下、pHとオメガアラグのダウンシフトを再現できない。前半においては塩分濃度、年末にかけてはpHと Ω_{arag} のミスマッチが大きい、全般的に塩分濃度のミスマッチが大きい。pHと Ω_{arag} の観測値の変動はモデルよりもはるかに大きいことから、河川流出量の過大評価が原因かもしれない。RCP8.5条件下での2098～2099年の Ω_{arag} はマガキ浮遊幼生の閾値1.5を下回る予測結果が得られた。

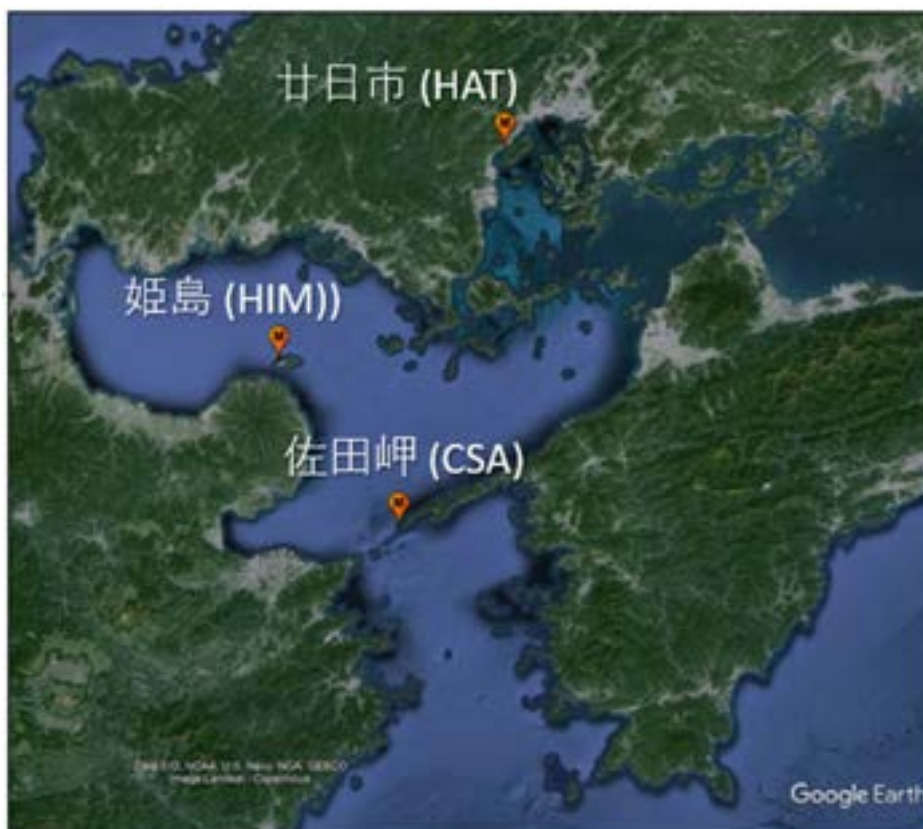


図9. 瀬戸内海西部の海洋酸性化シミュレーション

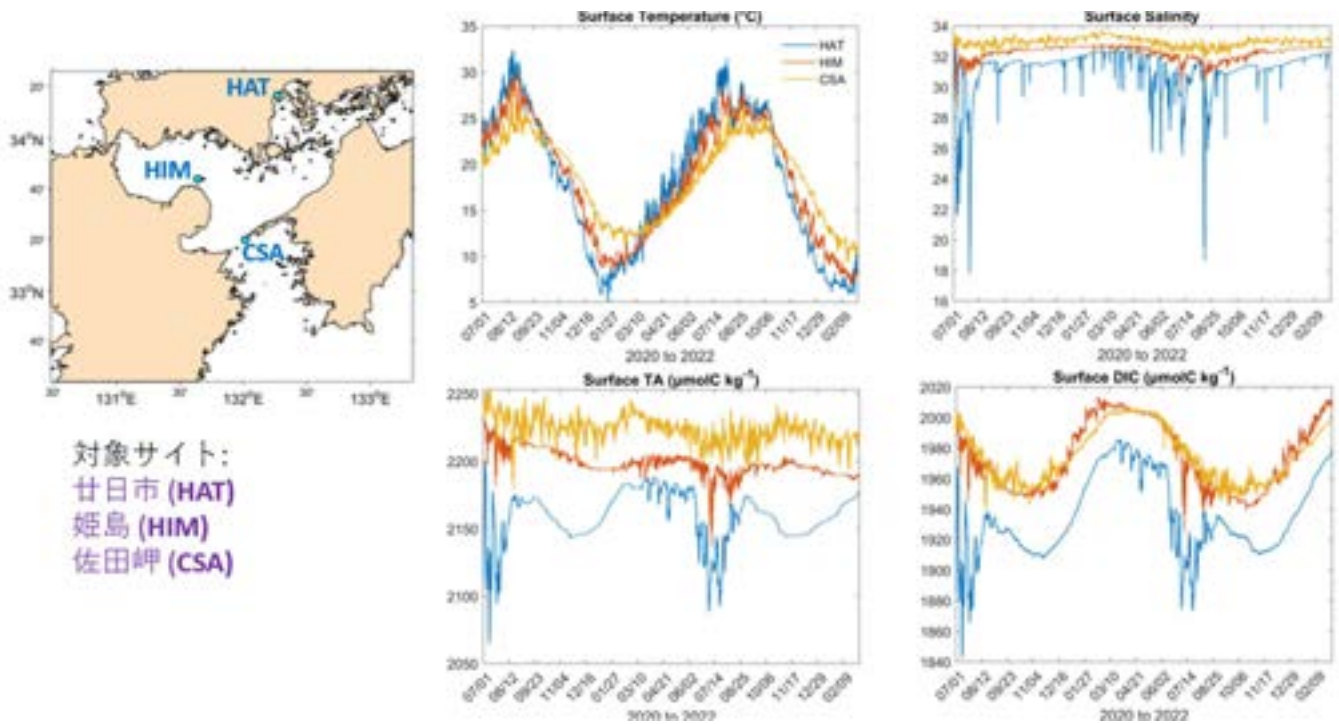


図 10. 甘日市・姫島・佐田岬における水温, 塩分, 全アルカリ度, DIC のシミュレーション結果

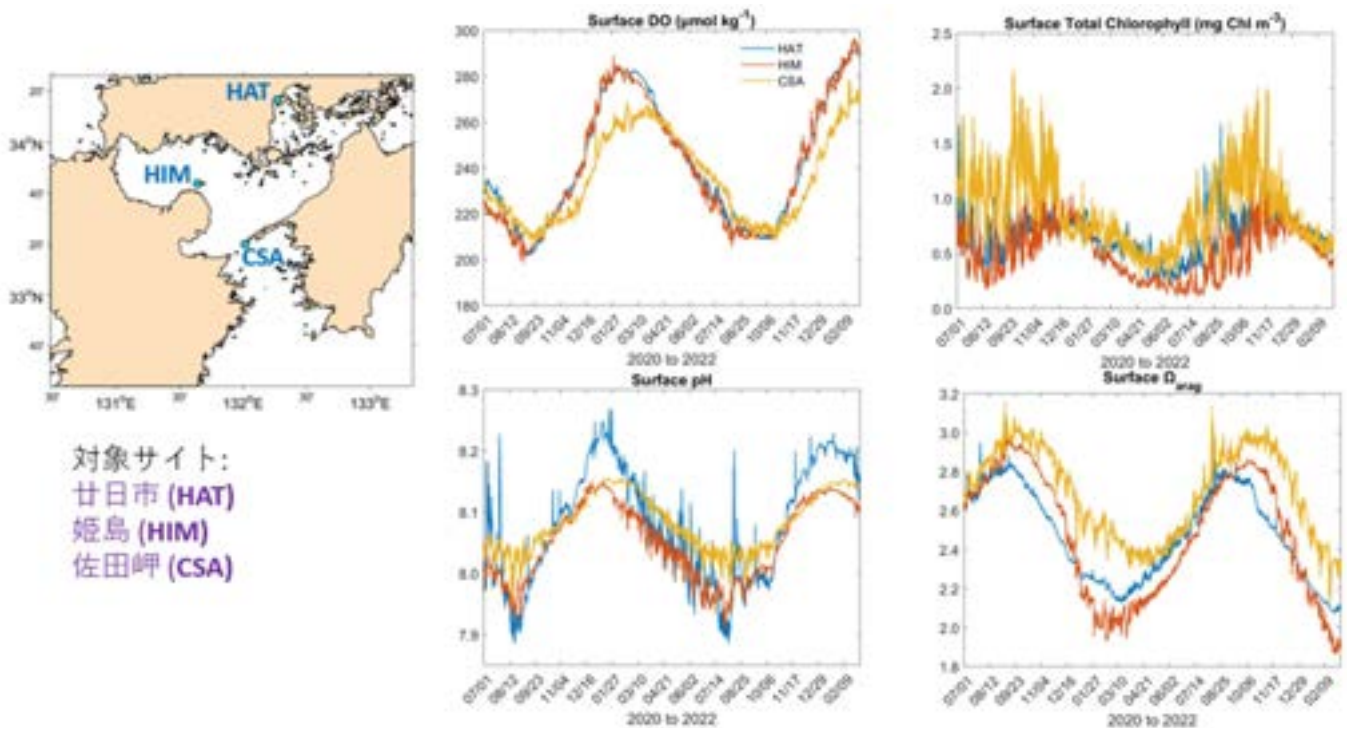


図 11. 甘日市・姫島・佐田岬における DO, クロロフィル, pH, Ω_{arag} のシミュレーション結果

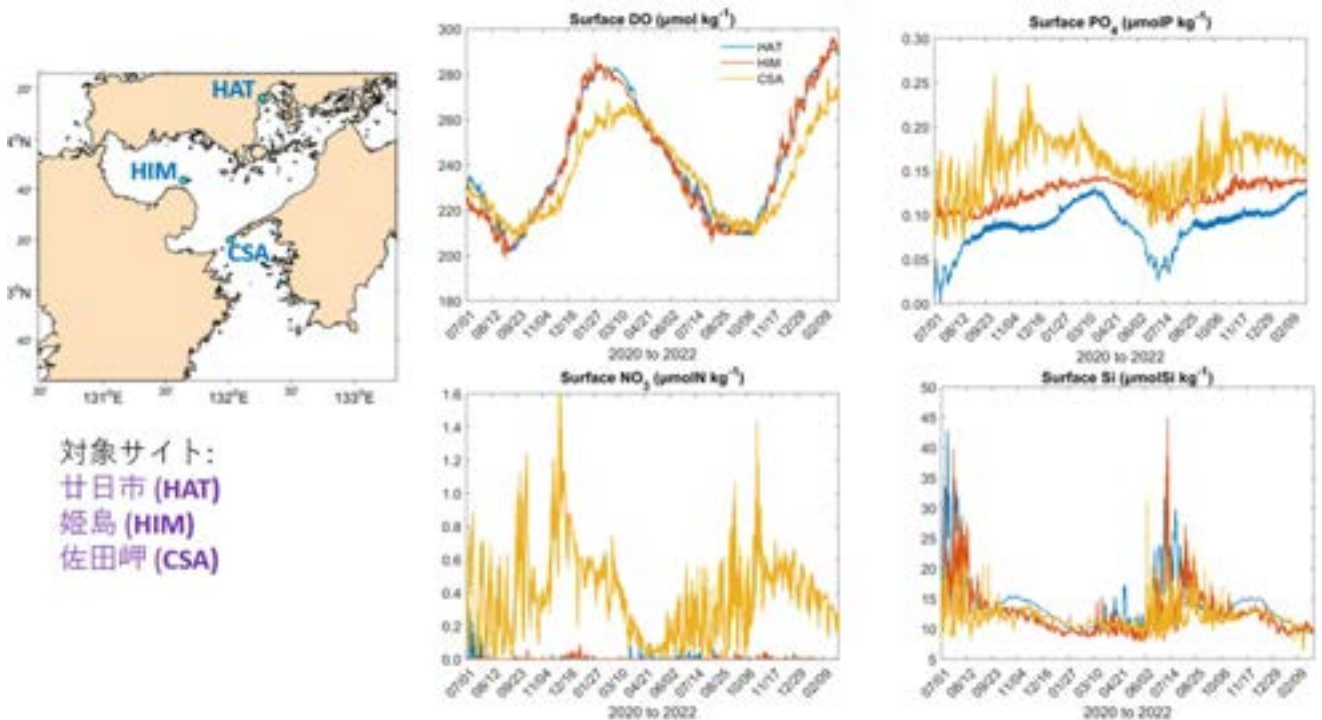


図 12. 甘日市・姫島・佐田岬における栄養塩濃度のシミュレーション結果

瀬戸内海西部において生物地球化学モデルの開発を試みたところ、モデル出力と観測値の比較から、モデルは重要なパラメータについて妥当な値をシミュレートできることが示された。RCP8.5 の条件下では、危機的な Ω_{arag} が今世紀末に通年で持続する可能性があることを、試行的な将来予測で示すことができた。モデルの弱点を明確にし、対処するためには、観測データのさらなる収集と分析が必要であり、モデルのセットアップを改善し、将来予測の精度を向上させるには、3つの領域(図 13)での境界条件の見直しが必要である。

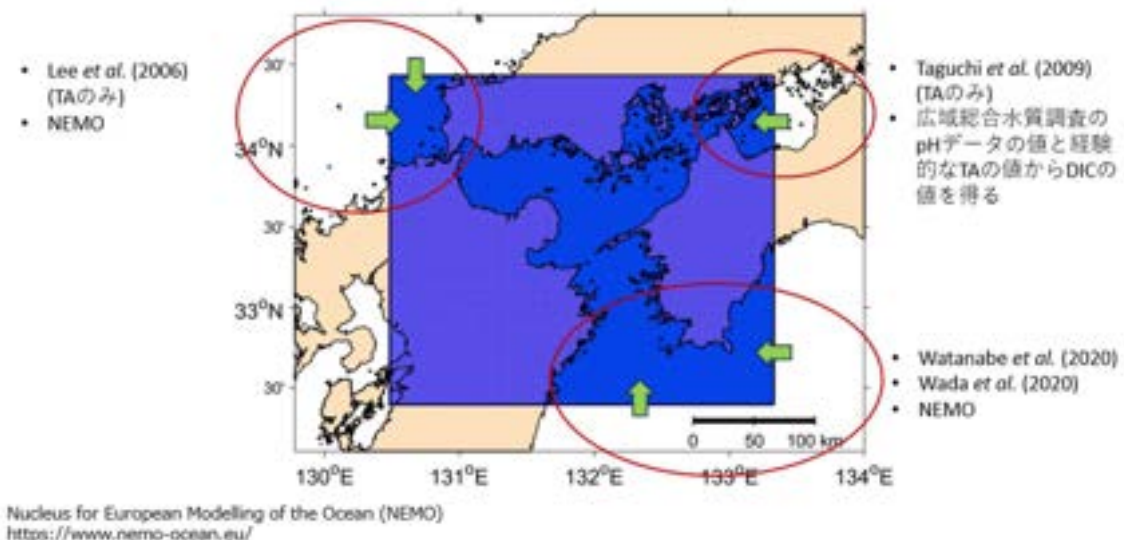


図 13. 全アルカリ度 (TA) と溶存態無機炭素 (DIC) の境界条件の設定

1.3. 海洋酸性化による国内水産業への経済的損失の検証

日生および志津川湾において、人為起源 CO₂ の排出が高排出(RCP 8.5)シナリオで推移した場合、海洋酸性化の影響による今世紀半ば 2050 年にマガキ養殖生産量と生産額への影響について予測した。

$$\boxed{\text{生産量: } F(2050) = \Delta E \times P \quad \text{生産額: } F(2050) = \Delta E \times F}$$

とし、 $F(2050)$: 2050 年における生産額 $F(2050)$: 2050 年における生産量
 F : 現在の生産額 P : 現在の生産量 ΔE : マガキへの生態的影響の変化率である。

マガキへの海洋酸性化による生態的影響としては、次のとおり、年平均 pH と産卵期の Ω_{arag} の値で影響を評価できることが知られている。

Case1: $\Delta E =$ 稚貝の正常な発達率 (ΔN)

$$\text{稚貝の正常な発達率} = \frac{0.933}{1 + \left(\frac{\Omega_{arag}}{0.649}\right)^{-3.615}} \quad (\text{Waldbusser et al., 2014})$$

Case2: $\Delta E =$ 成貝の石灰化速度 (ΔC)

$$\text{成貝の石灰化速度} = 0.2849 \times \text{pH} - 2.0301 \quad (\text{Gazeau et al., 2007})$$

これにより試算したところ、2050 年には日生では「稚貝の正常な発達率」低下により、4,470 千円、「成貝の石灰化」低下により 198,800 で、計 203,270 千円の減収、志津川湾では同様に、2,390 千円、67,700 千円で、計 91,600 千円減収の見込みとなった(表 1)。

表 5. 日生および志津川湾における海洋酸性化による 2050 年時点のマガキ養殖被害額

(百万円)	ΔN (稚貝の正常な発達率)	ΔC (成貝の石灰化)
日生	4.47	198.80
志津川	2.39	67.70

海洋酸性化がこのまま RCP8.5 シナリオで進行すれば、2050 年には養殖マガキの稚貝の正常な発達や成貝の石灰化に影響が及び始め、2090 年代にはマガキの生活史のすべてにおいて影響が顕在化し、カキ養殖に大きな打撃を与えると予測された。稚貝の正常な発達や成貝石灰化に支障が出始めた場合には、他地域からのマガキ種苗の購入、マガキ人工採苗技術の導入等により新たな支出が増加するとともに、養殖密度など養殖方法の見直しも必要になってくる。しかし、パリ協定基準の低排出(RCP 2.6)シナリオに抑えることができれば、深刻な打撃は回避することができることが定量的に示された。

今後は地球温暖化による水温上昇やゲリラ豪雨等の極端現象の増大との複合影響について検証すると共に、国内ではマガキと並んで重要な貝類養殖種であるホタテガイ養殖に対しても同様の検証を行う必要がある。

VII. 世界における酸性化に対する政策・適応策の分析

～各国の酸性化に関する最新研究から～

1. 背景

1.1. OA 国際的な海洋酸性化政策の枠組み

海洋酸性化は世界的な問題であり、それに対処するためには国際的な行動が不可欠である。国際的な場で海洋酸性化に対応するための一つの重要な手段は、生物多様性条約(CBD)などの多国間環境協定(MEAs)の行動である。気候変動とOAが相互に関連していることを考えれば、OAを既存の気候政策の枠組みに統合し、個別に扱わないことも可能である。例えば、OAへの適応への取り組みは、OA、温暖化、貧酸素化、乱獲、海面上昇、乱開発、汚染など、複数の海洋変化への取り組みが可能な海洋ガバナンスの下で行われれば、より効果的である可能性が高い(Harrould-Kolieb, 2019)。

緩和は、大気中のCO₂濃度を安定化させることによってのみ達成可能である。

CO₂排出量の削減は、低炭素・カーボンニュートラルなエネルギー技術の導入、省エネルギー・効率化対策、自然炭素吸収源の保護・回復を含む土地利用の管理によって達成できる。しかし、このような転換は容易ではなく、常に正義と公平性の問題や、既得権益や政治的権力闘争が絡んでくる。

CO₂除去技術は、大気からCO₂を隔離するために、CO₂の吸収を促進する海洋システムの直接的な操作に依存しているが、逆にうまくいく場合もある。例えば、海洋施肥(海域に鉄、窒素、リン酸塩を施肥すること)の効果については、長期的な影響や生態系への広範な影響の可能性など、疑問が投げかけられている。海洋環境におけるCO₂の貯留は、局所的に深刻な酸性化をもたらす可能性がある。風化の促進や海洋のアルカリ化など、海洋をベースとしたその他の負の排出技術は、生物地球化学的プロセスの攪乱、一次生産と二次生産の交代、汚染物質の蓄積の増加、生物の許容範囲を超えた個別領域のpH上昇の可能性など、他の不利益も伴う可能性がある。ジオエンジニアリング技術でより議論的となるのは、太陽放射管理であり、これは表層海洋の冷却をもたらすかもしれないが、CO₂の溶解度を増加させ、海洋のCO₂吸収を促進するだろう。OAとその影響の削減は、大気中のCO₂濃度を数万年かけて削減するよりも、はるかに長期的なプロセスである。

この枠組みは、OAに対する将来の行動の指針として機能し、既存の活動がOAへの対処と最小化という目標にどのように貢献できるかを理解するためのロードマップを提供することができる(図1)。しかし、この枠組みは、この対策がどのように実施されるのか、あるいは実施されるべきなのかについては答えていない。統一的なOA協定が締結される可能性は低く、OAのガバナンスは既存の体制に委ねられているからだ。



図 1. 海洋酸性化を最小限に抑え対処するための枠組み(Harrould-Kolieb, 2019)

1.2. OA による影響を緩和するための適応

適応策は、避けることのできない影響を管理するための重要な手段を提供することができ、そうでなければ適応能力を低下させたり、システムを衰退状態に追い込んだりしかねない圧力を緩和することによって、人間社会、海洋システム、それらが提供する財産やサービスを保護するのに役立つ。適応は、影響が観測される前に能動的に起こることもあれば、影響が観測された後に能動的に起こることもある。また、適応は、人間や生態系の中で自然発生的に起こる自律的な場合もあれば、自然系への人間の介入を含む意図的な政策決定によって生じる計画的な場合もある。適応能力とは、社会生態系が潜在的または経験的な危害に適応したり、機会を利用したりする能力のことである。

海洋保護区は、海洋生息地や生態系の保護、海洋空間計画を通じて、OA による影響を軽減する可能性が高いことがわかっている。海洋保護区は生態系の回復力を高めるだけでなく、化学的変化を緩衝できる植生や魚類資源の保護を通じて、OA を直接緩和する

可能性もある。さらに、乱獲や底引き網漁など、酸性化に関連しないストレス要因を減らすことによって魚類資源を保護し、資源量を増加させれば、漁業の適応能力を大幅に向上させることができる。遺伝子工学、種の移動補助、微生物や選択的育種による種の進化補助など、より議論の余地のある手段もある。しかし、それらは従来の対策よりも効果が低く、コストもかかる可能性が高い。それに加えて、社会システムの回復力を高めることで、人間社会が経験した、あるいは将来の変化に適応できるようにすることもできる。例えば、モニタリングや早期警報システムを確立することで、漁業者は漁業や養殖業を、より脆弱性の低い種を利用するように変更することができ、タイムリーなデータ収集に従って、より好条件の場所に産業を移転することができる。

複数のストレス要因が存在する地域では、局所的な要因が地球規模の OA シグナルを大幅に増加させることが示されている。汚染や湧昇を含むローカルな要因は、グローバルな OA に対する感度を高める可能性がある。局地的な OA 要因を減らす努力には、農業流出、有機物や栄養塩の汚染を制限すること、流域のアルカリ度に対する溶存無機炭素の投入のバランスをとること、硫黄や窒素酸化物の排出を減らすことなどが含まれる。これらの要因を削減することで、累積酸性化を抑制し、緩和策を講じるための時間を稼ぐことができる。もうひとつの方法は、植物群落の構成を通じて海水の化学的性質を操作し、CO₂ の光合成による取り込みを促進することである。これは、pH とアルカリ度レベルを回復させる持続可能な方法であるが、夜間の OA を悪化させ、全体として悪影響を及ぼす可能性がある。海洋化学の緩和は、二枚貝の粉碎物などのアルカリ性物質の添加による化学的修復でも達成できる。自然の風化プロセスを促進することで、これらの影響は局所的なものであり、周囲の生態系へのリスクを伴い、継続すればコストがかかる可能性がある。これらの局所的な対策は、OA による影響を軽減する可能性が高い。

1.3. OA 認識と科学的コミュニケーション

問題のフレーミングとは、複雑な現実を理解し行動するための境界を確立する、選択、整理、解釈の活動である。初期の海洋酸性化ガバナンスに関する文献では、「適応ではなく緩和が世界的なマントラでなければならない」、「海洋酸性化は CO₂ 排出を緩和することによってのみ対処できる」というような物語があった。そして、このような海洋酸性化に対する初期の科学的枠組みは、対応策の選択肢を制限してきた。現在利用されている気候変動の枠組みの中で、OA を同時的な問題としてではなく、気候変動の影響として説明するようにシフトすべきである (Harrould-Kolieb, 2021)。

より広範で効果的な方法で OA に対処するためには、OA を海洋の他の文脈、例えば生物多様性や汚染体制に置くことが極めて重要である。海洋酸性化を生物多様性の問題として捉え直せば、CO₂ 排出量のさらなる削減よりも、多くの生物種の減少や生態系サービスの喪失に、さらなる注目が集まるだろう。また、OA を生物多様性の問題として位置づけることは、汚染、乱獲、富栄養化など、生物多様性減少の CO₂ 以外の要因との関連付けに

も役立つだろう(図 2)。このように、OA を海洋変動という大きな文脈の中に位置づけ、CO2 以外の介入策を強調することで、地方から地域レベルで OA の原因と結果の両方を緩和するのに大いに役立つことができる(Harrould-Kolieb, 2020)。

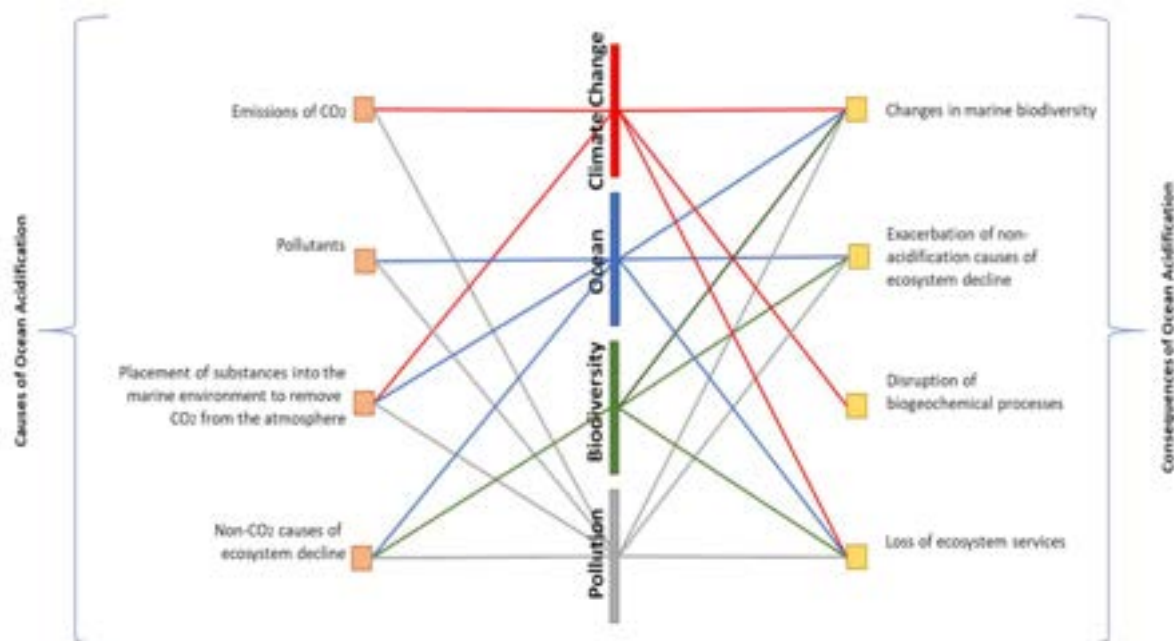


図 2. 海洋酸性化の 4 つの問題フレームとそれに対応する原因と結果の特徴
(Harrould-Kolieb, 2021)

OA コミュニケーションは、気候変動コミュニケーションに比べてほとんど研究されていない。米国の一般市民を対象とした調査では、炭素汚染よりも大気汚染の緩和が最も高い政策支持を得ていた。OA 緩和は、炭素汚染、気候変動、地球温暖化よりも高い支持を受けるかもしれないが、政策支持の独立した有意な予測因子として、カジュアルな知識、特に人間が気候変動を引き起こしているという信念が挙げられる(Mossler et al.)。しかし、知識だけでは行動の動機付けには不十分であることが長い間認識されており、広く嘆かれながらも理解されていない断絶を生み出している。ウイスキークリークの海洋酸性化に関する事例では、環境変化による経済的損失という物語が政治的・民衆的に大きなインパクトを与え、知識と行動を結びつける一助となった。“物語”はまた、登場人物の具体的な経験を時系列で描写するコミュニケーション方法でもあり、環境科学に単なる記憶に残る逸話以上の貢献をすることができる。そして、環境の変化によって生態系サービスや個人的な幸福や生計が多少なりとも得たり失ったりすることを個人が経験するような実話は、科学的分析や統計的予測を現実のものにするのに役立つ。そして問題解決の文脈において、物

語が力を発揮するのは、その事実が必要な生物物理学的データに徹底的に基づいている場合のみであり、そうでない場合は単なるストーリーテリングに過ぎない(Kelly et al.)

2. 目的

本年度は、

- 1)世界の最新の OA 研究のアップデート、
- 2)世界各国の OA 関連政策設計を通じた海洋酸性化政策分析
- 3)いくつかの地域で実施・提案されている OA 適応戦略のケーススタディ調査、
- 4)カキ養殖業者への OA に関する意識調査のまとめ

という4つのパートに主に焦点を当てた。

さらに、これらの作業を踏まえて、

- 1)諸外国から日本の文脈に転用可能な政策とは何か
 - 2)貝類養殖における OA 適応戦略の日米比較
 - 3)最終的に日本と諸外国の OA 意識の違い
- について議論した。

3. 方法

世界中の最新の研究成果を収集するため、本年は太平洋岸貝類協会年次大会、PICES、GOA-ON OA week 2023 など多くの学会に参加し、発表も行った。他の研究者の発表をもとに、より深い文献調査を通して彼らの研究成果を調べ、それらをまとめることで、世界における最先端の OA 研究の進展を全体的に把握することができた。

OA 政策分析、OA 適応ケーススタディについては、様々な国や地域の関連論文をレビューし、様々な文脈における OA 関連政策と適応戦略をリストアップし、日本の場合の政策立案と適応戦略提案のための確かな根拠を提供した。次のステップとして、OA 関連政策を組み合わせ、コスト、効果、公平性を考慮しながら、海外から日本への移管をいかに成功させるかを考える。また、OA に関連する適応戦略を日本と諸外国との間で比較し、文化的・農業的背景の違いにかかわらず、OA への適応について理解を深めていく必要がある。

OA に関する意識調査の研究は限られていたが、日本、米国、カナダのデータを収集することができ、これらの国の貝類養殖業者の OA 意識を比較し、成長する環境問題としての OA を貝類養殖業者や一般市民によりよく届ける方法を考えることができた。

4. 研究成果

4.1 世界における最新の OA 研究

4.1.1. ICONA ネットワーク(国際 CO₂ 自然分析ネットワーク)からの最新情報

CO₂ 濃度上昇に対する光合成生物の応答は、海洋酸性化研究の重要なトピックである。この分野の研究のほとんどは、生態学的な現実性を欠く実験室条件下での生理学的応答に焦点を当ててきた。ICONA ネットワークは、火山性 CO₂ 噴出孔(日本の式根島の噴出孔周辺の p CO₂)と半閉鎖湾(パラオの湾内の pH)という自然の CO₂ サイト間の比較に焦点を当てている。マクロ藻類は沿岸生態系を支える重要な役割を果たしている。高 CO₂ 条件下では、RubisCO 酵素の働きが高まるため、光合成が増加する可能性がある。したがって、p CO₂ 300ppm の条件下ではサンゴやキャノピーを形成する藻類相が、p CO₂ 900ppm の高濃度条件下では低姿勢藻類相や芝藻類相に移行することになる。本研究では、式根島の高 CO₂ スポットと低 CO₂ スポットの群集光合成を比較した。しかし、高 CO₂ 条件に関わらず CO₂ 施肥は認められず、高 CO₂ は群集の光合成に寄与しないことがわかった。その理由を理解するために、群集平均 13C 値を計算し、比較した。藻類の 13C 値は、炭酸水素を積極的に取り込むための CO₂ 濃縮メカニズム(CCM)の効率を示している。そして、低 CO₂ スポットは、高 CO₂ スポットと比較して、より高い 13C 値を示し、すなわち、現在の海洋では CCM の活性が高いことを示し、これは藻類がすでに低 CO₂ 条件に適応していることを示唆している。光合成の増加は海洋酸性化の肯定的な側面と考えられてきたが、食糧供給や炭素隔離への肯定的な影響は実際には限定的である。海洋酸性化は、沿岸域の炭素循環を根本的に変化させる可能性があり、群集組成が多年生藻類から一時生藻類にシフトすることにより、温暖温帯生物地理学的地域の沿岸生態系からの光合成と炭素輸出を増加させる(Wada et al.)

OA の影響に関する研究のほとんどは、単一種を対象とし、短期間の実験室で制御された条件下で実施されたものであり、種の相互作用を考慮したものはほとんどなく、生物から群集レベルへの影響へのスケールアップは困難である。浅海のベントサイトは天然の実験場とみなされてきた。本研究はイタリアのエオリア島、ヴルカーノで行われた。*Symphodus ocellatus* の繁殖行動と卵の発達、*Gobius incognitus* の対捕食行動である。*S. ocellatus* は巣を作る藻類を積極的に選択し、高 CO₂ 条件下では藻類の利用可能性の違いにより巣の構成が変化した。しかし、酸素消費量や孵化時の大きさについては、常温と高 CO₂ 条件下で有意な差は見られなかった。さらに、遊泳活動やシェルター利用における大きな行動障害は観察されなかったことから、OA に対する *G. incognitus* の適応可能性が示唆された。また、生息域の複雑さは pCO₂ レベルの上昇とともに減少し、非線形の関係を示した。このような変化がどのように起こるかを理解し、OA 条件に対処しうる種の順応と適応のメカニズムを理解するために、天然の OA 類似種を利用することができる。これらの系

は、OA 条件に対処しうる種の順化と適応のメカニズムを理解するまたとない機会を提供する。これらの研究により、親からの暴露を通じた非遺伝的遺伝 (エピジェネティクス) と、幼生の生存などの他の下流の結果を包含する適応的可塑性のメカニズムをさらに評価するために、地球変動トラジェクトリー下でこれらのプロセスを扱う研究の数を増やし、これらを自然の高 CO₂ 環境に拡大することが極めて重要であることが明らかになった (Cattano et al.)

Hermatypic coral は、光合成共生生物である褐虫藻からエネルギーを得ている。石灰化を維持するためには、より大きなエネルギーが必要である。 **Hermatypic coral** が極域に拡大するにつれ、OA の影響が強くなり、高緯度では光の利用可能性が低下する可能性がある。光量が少ないと、サンゴの石灰化や代謝が低下するため、光量が少ない条件下では、より強い OA の影響を受ける可能性がある。しかし、より強い OA の影響は、CO₂ の慢性的な暴露でのみ見られた。以上のことから、低照度下ではサンゴの生理機能が低下し、OA の影響はほとんど見られず、低照度下での OA の複合的な影響は見られなかった。このことから、温帯域における海底サンゴの分布は、深度や緯度に限定されない可能性が示唆された。OA の慢性的な反応を知るためには、より長期の CO₂ 暴露が重要である (Agostini et al., 2024)。

4.1.2 SAROA (南アジア地域 OA)

ネゴンボ・ラグーンと隣接する沿岸水域の炭酸塩化学は、Nuwandi Shyamini によって調査されている。スリランカでは、炭酸塩化学に関するベースラインデータは公表されていない。この調査により、ネゴンボ・ラグーンと隣接する沿岸水域の緩衝能力は、時間の経過とともに低下していることがわかった。ネゴンボ・ラグーンと隣接する沿岸水は、CaCO₃ 構造を持つ生物に対する腐食性が高まっている。ラグーンの水は、海水よりも CaCO₃ に対する腐食性が高い可能性がある。

植物プランクトンは、サンゴ礁生態系の基本的な食料源である。バングラデシュでは、沿岸社会のほとんどが漁業に依存している。漁業の生産性は、植物プランクトンの豊度にほぼ依存している。セント・マーチン島では、*Coscinodiscus sp.* が優占種であった。塩分、亜硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩の濃度が植物プランクトン群集の動態を制御している。pH 変化に対する適応性の違いから、全ての珪藻属が同じ反応を示すわけではない。植物プランクトンの光合成は沿岸水の pH 調整に寄与しているが、大規模な水系では実現は難しいだろう。規模は重要である。植物プランクトン群集は生き残ることができるかもしれないが、希少な分類群は失われ、植物プランクトン群集はより特殊な群集構造へと移行するかもしれない。低 pH 条件下では、渦鞭毛藻類の存在量が大幅に増加した (Ghosh and Bhadury, 2019)。

4.1.3 センサーと OARS 3

“気候”は、長期的なトレンドを評価するのに十分な測定値を提供し、数十年単位での長期的な人為的要因と炭素化学の検出をサポートする。「気象」は、相対的な空間パターンと短期的変動を特定するのに十分な品質を提供する。これは、局所的かつ直接的な OA 影響に対する生態系の反応のメカニズム論的解釈をサポートすることができる。

海洋酸性化 (OA) センサーの技術が発展・向上するにつれて、そのようなセンサーの原位置配備はより広まりつつある。しかし、これらのデータの科学的価値は、校正、検証、品質保証のためのベストプラクティスの開発と適用、および測定技術自体のさらなる開発と最適化にかかっている。

現在のニーズと課題には、海洋酸性化の影響を受けやすい海域を適切にモニターすることが含まれ、そのためには科学界やその他の利害関係者が適切なセンサーを利用できるようにする必要がある。また、これらのセンサーは、適切な精度と正確さで測定でき、信頼性が高く、適切なコストで入手できなければならない。この文脈では、“suitable” と “appropriate” は、特定のアプリケーションの環境、生態系、ロジスティクスに依存する。商業的で、信頼性が高く、費用対効果の高いセンサーの入手可能性は、OA コミュニティにとって継続的な問題である。センサーの性能は、精度と正確さ、サンプリング頻度、サイズ/重量、データの遠隔測定や保存、バッテリー容量、生物付着防止オプション、センサーのドリフト、校正/検証、データ処理ソフトウェア、QC 要件において大きく異なる。海水 CO₂ システムの変数を測定するために設計された市販の装置は、表 1 のように説明されている。

表 1. 海水 CO₂ システムの変数を測定するために設計された市販の機器 (自律性のレベルによるカテゴリー)。表示されているすべてのケースについてカスタムシステムが開発されているが、ここでは市販の機器のみを表示している。掲載基準は、2014 年 12 月時点で購入情報が掲載されているメーカー/ベンダーのウェブサイト

	BENCHTOP ¹	UNDERWAY ²	AUTONOMOUS ³
DIC	VINDTA 3D/3C Mariano AIRICA Mariano AS-C3 APOLLO SCITECH		
TA	VINDTA 3S/3C Mariano AS-ALK2 APOLLO SCITECH	HydroFIA Contros	
pH		AFT-pH Sunburst Sensors SP200-SM SensorLab	SAMI-pH Sunburst Sensors SeaFET Satlantic SP101-LB SensorLab
pCO ₂		GO 8050 General Oceanics SuperCO ₂ Sunburst Sensors AFT-CO ₂ Sunburst Sensors SUNDANS Mariano	MOG 701 Kimoto OceanPack SubCtech AS-P2 APOLLO SCITECH
			Seaology Bottlele HydroC Contros OceanPack SubCtech SAMI-CO ₂ Sunburst Sensors CO ₂ -PRO Pro-Oceanus C-Sense Turner Designs

¹Benchtop: discrete bottle, auto-assisted. ²Underway: flow-through, automated, externally powered. ³Autonomous: automated, internally powered, in situ.

別の例として、センサーの配置と個別サンプルの分析を通じて pH とアルカリ度データを取得できる “GOA-ON in a Box ”がある。これまでに Ocean Foundation は 17 のキットを調達し、16 カ国に発送した。しかし、センサーの修理は依然として難題である。成功への最大の障壁は、センサーの故障を診断し修理する方法についての受信者の快適さと知識にある。現場でのサポートや経験が豊富な人は 5 年以上センサーの操作に成功しているが、そうでない人は苦勞している。

pHyter is a hand-held, affordable, field-durable, easy-to-use pH instrument

- Controlled through smartphone app with data in under 1 minute
- pH measurements are spec-based with indicator dye
- Accuracy comparable to uncertainties in benchtop spectrophotometric pH measurements (± 0.046)
- Designed for community-based science and used with minimal training
- Ideal for spatial and temporal sampling, while highlighting small-scale variations across large regions

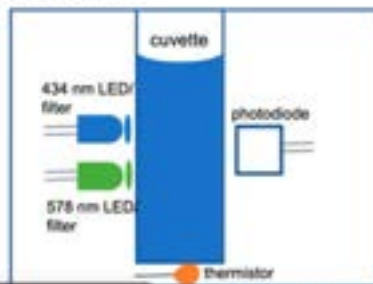


図 3. pHyter の導入 (Kalina Grabb)

pHyter は生徒の pH に関する学習意欲を高め、ベンチトップよりも使いやすかった(図 3)。生徒たちは、数回 pHyter を使用した後、一人で pHyter を使用する能力を感じ、仲間に教え、pHyter を使用することを楽しんでた。サンバースト社は pHyter5.0 を開発中で、カスタム加工された部品がレゴのようにパチンとはまり、ケーブルで接続される。さらに、pHyterPro-TA(全アルカリ度)、pHyter-Chl-a(クロロフィル-a)、pHyter-FDOM(蛍光溶存有機物)も現在設計中である(Pardis et al.)

オープンソース・テクノロジーは、オープンソースの既製コンポーネントを斬新な方法で統合し、研究課題に取り組むものである。デジタル受託製造業者、電子機器組立業者、ファームウェア開発者は、市販のコンポーネントを使用可能なプラットフォームに変換することができる。海洋観測への参入のハードルを下げ、観測のコストを下げ、商業生産によるコスト高をカットし、コミュニティの力を借りて技術の向上とアップグレードをサポートし、十分なサービスを受けていないコミュニティへの情報アクセスを向上させる。データの品質を考慮

する必要があり、品質保証と品質管理のルーチンをユーザーに提供する必要がある。利用者は、自分たちが作成したデータの適用可能性を理解する必要がある (Gledhill, et al., 2009)。

現在市販されている自律型プラットフォーム用のセンサーは、 $p\text{CO}_2$ または pH を測定することができ、TA 用のオプションも登場している。飽和状態と残りの炭素系を計算するためには、2 つのパラメーターを測定または推定しなければならない (加えて、温度、塩分、圧力)。センサーの選択は、研究課題、期待される成果、容量と制約、およびデータニーズによって、観測設計の指針となる。データ管理と品質管理にかかる費用を含め、さまざまなセンサーの性能とそれに伴う初期費用、長期費用を調査する。

最終的に、センサーデータを収集する目的は、変化する海洋化学を科学的に評価し、炭酸塩システムを理解することであり、単にモニタリングすることではない。高品質の離散サンプル (できれば少なくとも 2 つ、できれば 3 つの炭酸ガスシステムパラメータ) を、展開中のわずかな時点でも収集することは、センサーデータの価値を大幅に高める。他の、より頻繁に測定されるパラメータから炭酸システムパラメータを推定する経験的アルゴリズム (例えば、Fassbender et al.) また、検証測定に使用された方法論が注意深く文書化され、メタデータに含まれることも重要である。塩分濃度のような補助的なデータとともに、可能な限り広範なメタデータをアーカイブする必要性、および永続的な識別子は、曖昧さのない引用と割り当てられたデータ製品のバージョン番号へのリンクを提供すべきであるという点で、一般的なコンセンサスが得られた。

4.1.4. ICONEC: 国際炭素海洋ネットワーク (初期キャリア向け)

河川が遡上する浅い熱帯の沿岸海洋環境における超飽和 $p\text{CO}_2$ 水の制御に関する調査が Sarah Cryer によって行われた。沿岸海洋では、生態系の代謝、滞留時間、河川からの CO_2 と有機物の流入、風速が、大気から海への CO_2 フラックスに加えて、海水の炭酸塩化学に影響を与える。マングローブは DIC と有機物の供給源であり、海草は CO_2 の排出を緩和する (図 4)。マングローブは、陸と海の境界面で生育する回復力のある樹木種で、炭素の隔離に優れている。その複雑な根系は有機物を捕捉し、堆積物への炭素の埋没を促進し、大気中への CO_2 の放出を防ぐ。

ギニア湾における沿岸海洋酸性化のベースライン研究は、マーガレット・オグンダレによって行われた。ギニア湾は赤道直下の大西洋北東部に位置する。水路沿いの乾季と雨季において、塩分、水温、TA、DIC、 dfCO_2 (表層水温における CO_2 のフガシティー) を含む水質パラメータを測定した。全アルカリ度と溶存量の空間変動は、マングローブの影響を受けている可能性がある。

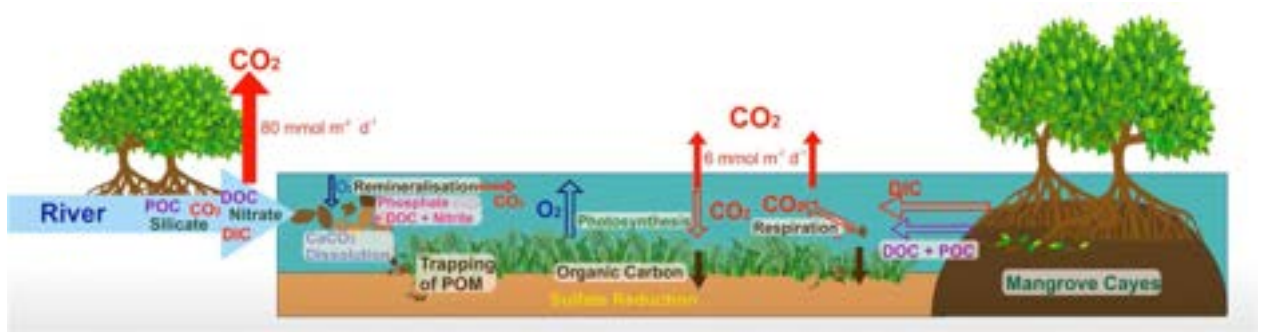


図 4. 沿岸海洋の炭酸塩系におけるマングローブの機能

グローバル・サウスにおける持続可能な開発における海洋性ブルーカーボンとその役割について、イサ・エレグベデが調査した。グローバル・サウスにおける海洋性ブルーカーボンの具体的なプロジェクトとして、アフリカのモザンビークにおけるマングローブ再生プロジェクトが紹介された。このプロジェクトは、炭素の吸収だけでなく、持続可能な水産養殖やエコツーリズムなどの活動を通じて、地域コミュニティの持続可能な生計を立てることに貢献している。もうひとつは、インドネシアの「海草再生」である。このプロジェクトもまた、地元の漁業の健全性を維持し、沿岸地域社会の幸福を支えている。オセアニック・ブルー・カーボン・プロジェクトの開発には、土地の埋め立て、都市の拡大、インフラプロジェクトによる開発圧力など、いくつかの課題がある。農業、工業、都市部からの汚染もまた、これらの生態系に害を及ぼす可能性がある。気候変動と海面上昇は、ブルーカーボン生態系の存在そのものを脅かすかもしれない。

海洋酸性化に対する新しい技術と応用は、エミリー・ハンマーマイスターによって観測された。自律的な観測を用いることは、動的な海洋炭酸塩システム(図 5)において画期的なことであり、より高い時空間解像度、微細なスケール、共観的なプロセスを提供する。その利点は、費用対効果が高く、効率的で持続可能であることである。

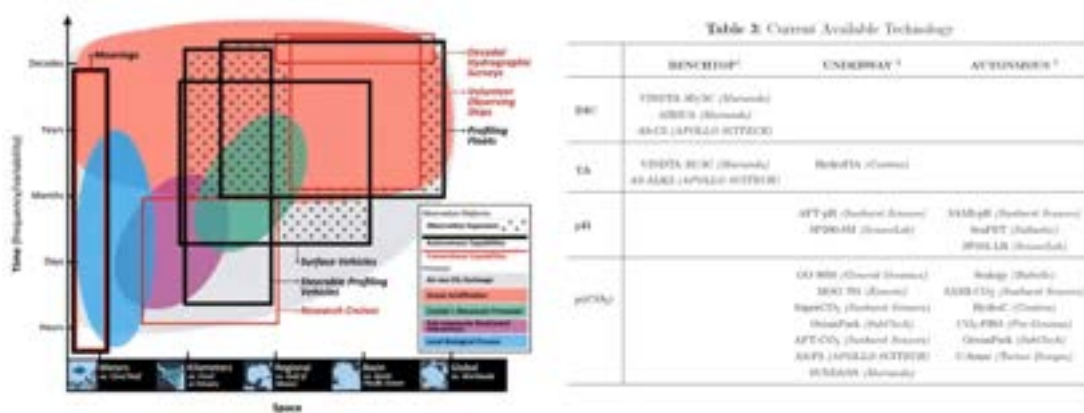


図 5. 海洋炭酸塩システムの内部構造(現在利用可能な技術は右表に示した)

4.1.5. 政策と OARS 7: OA に関する法律と政策の最新情報

これまでの米国の OA 行動には、OA 緩和(mCDR:海洋二酸化炭素除去)、回復力と適応戦略(地域脆弱性評価と沿岸海洋酸性化ネットワーク)、モニタリングと研究の増加(米国 GO SHIP、全国 OA 観測ネットワーク、海洋炭素と酸性化データシステム)、国内外での協力(米国沿岸酸性化ネットワークと GOA-ON)が含まれる。米国は、他の国々が OA 同盟に参加し、OA に関する法整備、意識向上、能力開発を促進することを奨励する。WIO 地域とアフリカ全域にわたる OA リスクは、開発的であると同時に生態学的でもある。増大する戦略的要請として、OA と気候変動によって引き起こされる現在および将来の政策課題に対処するためには、海洋科学とモニタリングスケールを超えた既存の政策優先事項の中に位置づけることが必要である。既存の気候、海洋、開発、政策の枠組みをマッピングすることは、WIO 地域と大陸の両方における OA 科学とモニタリング、そして政策の優先事項のつながりを明らかにするのに役立つ(Makomere and McDonald, 2020)。

海洋戦略枠組指令(MSFD; 2008/56/EC)は、EU の海洋管理を 200 海里まで拡大し、欧州連合(EU)加盟国の海洋生物多様性、海洋生態系、人間の健康、海の合法的利用に対する重大なリスクや影響がないことを保証する、EU、そして実際に世界の海洋環境管理のための野心的な立法手段である(Smith et al.)。MSFD は、海洋生態系の構造だけでなく、その機能の評価とモニタリングに焦点を当てている。海洋環境、特に海洋生態系と生物多様性の保護を目的とする EU の法律は、EU の海洋水域の「良好な環境状態(GES)」を達成することを目標としている。EU の海洋水域は、ダイナミックで、生態学的に多様で、清潔で、健康的で、生産的でなければならず、海洋環境は人間による持続可能な利用と活動を維持できなければならない。

この目標を達成するために、加盟国は以下を行う。

- 1) サブリージョン内の GES にとって重要な特性を決定するための初期評価
- 2) 自国水域の環境状態を継続的に監視、評価し、EU に報告する。
- 3) GES 達成のための環境目標およびその他の指標の設定
- 4) GES を達成し、維持するための対策プログラム(PoM)の策定

「OA に関する国際的な進展:UNFCCC、SDG14、生物多様性条約(Jessie Turner) 持続可能性のための OA 研究プログラム」は、海洋生物への影響や海洋生態系の持続可能性など、管理と意思決定に関連する OA 科学の発展を促進する。OA アライアンスとノルウェー水研究所は、GOA-ON 成果 2「異なるスケールにおける OA 緩和と適応のためのデータと証拠の必要性を特定する」の共同チャンピオンである。Ocean Foundation と Commonwealth Blue Charter は、GOA-ON 成果 7「各国が政策と法律を通じて OA を削減できるようにする」の共同チャンピオンである。

OA アライアンスは、沿岸のコミュニティと生活を維持するための行動指針を示すことで、海洋酸性化の影響に積極的に対応するよう各国政府を動かすことを目的としている。OA アライアンスのメンバーは、海洋酸性化についての認識を高めるために協力する。また、独

自の「OA アクションプラン」を策定することで、各地域で海洋酸性化がもたらす環境的・経済的脅威に対処するための個別行動を取ることを約束する。メンバーはまた、国連気候変動枠組条約 (UNFCCC) や国連持続可能な開発目標 (UN SDGs) のような適用可能な気候枠組みの下で、排出削減や海洋適応・回復行動を求めている。最終的に、海洋酸性化の最善の緩和策は、炭素排出を大幅に抑制することであり、そのためには国際的な協力を継続的に取り組む必要がある (Cross et al.)

4.1.6 北米地域

沿岸域の推定値は、ベースラインの設定、将来の変化の理解、モデル出力の検証、将来の観測への情報提供を困難にしている沿岸海洋で大きく異なる。炭素観測から炭素吸収源推定まで、SST、SSS、SSH が測定され、予測変数との非線形関係から $p\text{CO}_2$ も推定された。摂動に基づく空間感度解析を適用した。年平均フラックスが小さい(大きい)地域のほとんどは、季節フラックスの振幅が大きい(小さい)。ニューラルネットワーク空間感度解析により、沿岸渦、淡水プルーム、潮汐混合を含むメソスケールプロセスの影響が明らかになった。北東太平洋沿岸海域は、大気中の CO_2 の正味の吸収源であり、沿岸域での排出と外洋での吸収の間に大きな空間的不均質性がある。沿岸域を含めると、地域スケールの海洋炭素収支に大きな影響を与える可能性がある。このことは、大気中の CO_2 に対する北東太平洋の吸収量が増加している可能性を示唆している (Duke et al., 2023)。

北部湾ホタテガイの第2世代における $p\text{CO}_2$ レベルの発生的ミスマッチは、軟体動物における OA/ハイパーキャプ ニアの細胞影響の基本的理解である。ナイーブコホートは、短時間の $p\text{CO}_2$ 曝露で高い膜電位を示し、OA がプロトンリークとミトコンドリア機能不全を引き起こすことを示唆した。適応したコホートは過剰な活性酸素産生に対処できたことから、OA がフリーラジカル産生を増加させ、適応した表現型が有益な遺伝子フロントローディングを示す可能性が示唆された。ミトコンドリアは、急速な順応と適応に不可欠な役割を果たす。この研究は、溶存酸素濃度の変化に対する心臓の応答が暴露履歴に影響されうことを示唆しており、このことはダイナミックな沿岸環境におけるホタテガイの生態生理学と回復力にとって重要な意味を持つかもしれない (Gurr., et al., 2021)。

アカアワビ *Haliotis rufescens* は、世界的なアワビ養殖において極めて重要な水産資源である。しかし、この種は、短期的・長期的な海洋酸性化など、生息地の気候変動に伴う生活史的な大量死のためもあり、絶滅危惧種に指定されている。アワビの生存は初期生活史の成功に依存するため、酸性化に対する脆弱性を把握することは、養殖管理戦略を確立するための第一歩である。本研究では、アカアワビの胚を CO_2 による長期的な酸性化 ($\text{pH}7.8$ と 7.6) 下で飼育し、評価した。障害有病率は、発育の成功、成長、石灰化を考慮し、幼生の段階で評価した。 $\text{pH}7.6$ におけるアカアワビの外見形質には、段階特異的な(負の)反応が見られた。細胞の恒常性を維持するために必要な生理的コストは、酸性化の共変量に反応して観察された。最後に、沈降は短期的なストレスを受け、長期的な酸性

化で観察されたのとは逆の結果を示した。このように、初期生活史は複数の経路を通じて相互作用しており、その経路は酸性化の課題（すなわち、短期か長期か）にも依存している可能性がある。ストレス反応の耐性限界と経路を理解することは、海洋酸性化に対する *H. rufescens* の脆弱性を探る上で貴重な知見を提供する (Gómez-Reyes et al., 2023)。

北西大西洋は、人為的活動による二酸化炭素の重要な吸収源である。しかし、表層水には強い季節変動があり、海洋炭素の観測はまばらで夏季に偏るため、水柱全体の時間変動の全体像を捉えることは困難である。本研究は、拡張重回帰 (eMLR) 法の時系列一般化という新しい統計的アプローチを用いて、人為起源による溶存無機炭素 (DIC) の時間的傾向の推定を改善することを目的としている。北西大西洋の表層水における人為的な DIC の増加は、DIC の強い自然の季節変動のために定量化することが困難であり、DIC を季節的、自然的、人為的な成分に分離することによって対処した。海洋炭素データは夏に収集されることが多く、夏のバイアスが生じるが、月平均データを使用することで、利用可能なデータにおける強い夏のバイアスの影響を受けにくくなった。1000m 以深の海域の変動は通常 10 年単位で分析されてきたが、月次分析によると、人為起源炭素成分は 2000 年に急激に変化し、静止状態から上層と同じ割合で増加傾向に転じた。全ての水深層で人為起源炭素の増加速度は同程度で約 $0.57 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{ year}^{-1}$ であり、eMLR の結果よりも不確実性のレベルは小さい。水柱全体 (0~3,500 m) を統合すると、人為起源炭素蓄積率は $1.37 \pm 0.57 \text{ mol m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ となり、これは他の発表された推定値 (Boteler et al., 2023) と一致する。

4.1.7 太平洋諸島・準州 PI-TOA

太平洋諸島海洋酸性化センターの下での太平洋における海洋酸性化活動が Azaria Pickering により報告された。パプアニューギニアとサモアは、研究を進めるために GOA-ON キットを待っている。ツバル Tuvalu は実験室のスペースを確保しようとしており、適切な場所が見つかればセンサーを配備する予定である。バヌアツ Vanuatu は、2019 年から 2020 年にかけての水サンプルの収集と分析に成功し、TA と pH システムを測定するためのいくつかのスペアパーツとともにろ過キットの受領を待っている。フィジーは、ブルーカーボン復元プロジェクトのために GOA-ON in a Box キットを受け取り、海洋観測機器の重要性について地元コミュニティや漁師を教育する必要があることを確認した。ソロモン諸島は、研究費を受け取る最初の新規キット受領国のひとつであり、このプロジェクトが地元コミュニティの OA 意識を高めることを期待している。その他の課題としては、資金不足、機器の故障、スタッフの入れ替わり、限られたサポート、データ管理の品質管理などがある。

蘚苔類 Bryozoans はコロニアルな底生海洋無脊椎動物の石灰化生物であり、南半球の棚環境では重要かつ特に豊富で多様である。石灰化の進んだ大きなコロニーは 50 年にもなるが、長寿の Bryozoans の多くは 10-20 年が限度である。扁平な包被性蘚苔類の半径方向の伸長は、一般に $1\sim 5 \text{ mm/y}$ のオーダーである。直立石灰化種は一般に 2-

15mm/y で垂直方向に成長するが、*Cellaria* のような関節を持つ種は 40mm/y に達することもある。蘚苔類によって生成される炭酸塩は、方解石からアラゴナイト、そしてその両方の混合物まで様々である。方解石は安定で、溶解性が低く、生産コストが安く、もろい。アラゴナイトは準安定で、より溶けやすく、生成コストが高く、強い。無脊椎動物の中で鉱物学的に最も研究されているのは、ブリオゾア類である。平均的な蘚苔類は 82% が方解石で、5% が $MgCO_3$ である。海洋の酸性化は、浅い海域での骨格炭酸塩の溶解を増加させる可能性があり、炭酸塩鉱物学は溶解速度に影響を与える要因のひとつである。Bryozoans の骨格を形成する炭酸塩鉱物学は複雑で、遺伝的に強く制御されているようである。水温の上昇につながる地球規模の気候変動は、一般的に海洋性蘚苔類の代謝速度を増加させ、方解石中の Mg を増加させる可能性がある。一方、pH の低下 (海洋酸性化) は腐食、鉱物組成の変化、生存率の低下を引き起こす。以上、Bryozoans の成長と石灰化について概説したが、一般的な展望が得られるだけでなく、取り組むべき知識のギャップも明らかになった (Smith, 2014)。

海洋酸性化と光に対する *Caulerpa* 属の応答 (Aleluia Taise) について、macroalgae のほとんどの種は、重炭酸塩 (HCO_3^-) の積極的な取り込みを可能にする CO_2 濃縮機構 (CCM) を有している。CCM を持たない種は、海水中の溶存無機炭素 (DIC) の中で現在最も少ない種である CO_2 の利用に制限される。したがって、OA 条件下では、非 CCM 種は CCM 種よりも成長の増加を示した。非 CCM 種による恩恵は、DIC 利用の増加により、より高い放射照度下でより頻繁に発生すると考えられる。CCM 種は一般的に、 CO_2 上昇に対する成長速度の反応に鈍感である。一般的に、非 CCM 種は昇温 CO_2 の恩恵を受けるが、光の影響がより強かった。*Caulerpa* は、広く分布する葉緑素 (緑色大型藻類) の属であり、その食用、社会的、沿岸生態系の価値のために重要である。CCM を持つ種と持たない種の両方を持つ数少ない属のひとつである。ニュージーランドで最も一般的な *Caulerpa* は、*C. geminata* (CCM を持つ) と *C. brownii* (CCM を持たない) の 2 種である。我々は、*C. geminata* と *C. brownii* の成長、光生理学、DIC 利用の反応を、将来の OA をシミュレートした pCO_2 の増加による pH の変化に対応する 4 つの平均海水 pH 処理 (8.03、7.93、7.83、7.63) に対して調べた。低 pH 下では *C. brownii* (非 CCM) の平均成長率が上昇し、*C. geminata* (CCM) の成長率は低下する傾向が見られたが、これは統計的に有意ではなかった。しかしこれは、海水 pH が低下するにつれて成長速度のばらつきも大きくなったためと思われる。海水 pH が低下するにつれて、CCM 種では HCO_3^- の取り込みよりも CO_2 の取り込みがより選好される傾向が見られたが、pH による両種の生理学的な差異は他にほとんど見られなかった。この研究は、DIC-use だけでは OA に対する大型藻類の応答を予測できないことを示している (Taise et al., 2023)。

4.1.8 アフリカ地域

海洋酸性化とマイクロプラスチックの二重の挑戦は、サリー・サラ・エルディンによって探求された。海洋環境におけるプラスチック破片の最初の証拠は、1972年にカーペンターとスミスによって公式に報告された。海洋酸性化は、海水の酸性化によって海洋生物の免疫システムや生存に不可欠な構造物(例えば、二枚貝が作り出す byssus threads)を作り出す能力が損なわれた場合、海洋生物の将来の存続を脅かす疾病発生のリスクを高める可能性がある。これらの潜在的な悪影響は、将来海洋酸性化と共起すると予測されているマイクロプラスチック汚染によって悪化する可能性がある(Huang et al.)

湧昇系は溶存無機炭素を輸送し、pHを低下させ、炭酸カルシウムの飽和状態を維持する。ギニア湾は、海流、河川流出、潮汐混合、降水の影響など複雑なシステムを持ち、これらすべてが季節変動に寄与している。水素イオン濃度(pH)、電気伝導率、全溶解固形分、塩化物イオン、硝酸イオン、炭酸水素イオン、硫酸イオン、カルシウムイオン、ナトリウムイオン、カリウムイオン、マグネシウムイオンといった物理化学的パラメータの季節変化を追跡するため、地球化学的調査は季節をまたいで行われた。pHは7.72~8.07と、かなりのばらつきがある。アラゴナイト飽和度とカルサイト飽和度はともに季節的な過飽和を示した。TA、塩分、DICの相関は、炭酸塩システムと海洋生態系に影響を与える生物地球化学プロセスの複雑な相互作用を示す(Akpan et al.)

本研究は、モーリシャスの水化学のベースラインを構築することである。pHとDOには夏と冬で大きな変動があるが、TAにはない。夏の平均pHは冬よりも高いが、これは夏の海面水温が上昇し、溶存CO₂分子の平均運動エネルギーが増加し、海-空気界面から大気への流出が可能になったためである。OA緩和と避難所としてのモン・ショワジーの海草草原の可能性は明らかである。モン・ショワジーの海草の効果については、現在さらに研究が進められている。また、モーリシャス周辺の海域は、両シーズンともすべての地点の平均DO値が基準値である2mg/Lを大きく上回っていることから、低酸素状態ではないことが推測できる。この研究によって、(1)2つの季節の平均pH変動が同程度であったのは、アルビオンとラ・カンビューズの2地点だけであり、方位と形態は正反対であったが、平均DO変動は正反対であった(2)モン・ショワジーにおけるDOとpHの平均時間変動は、海草の存在により有意ではなかった(Imrit et al.)

ナイジェリアと西アフリカにおける国家政策への海洋酸性化の主流化に関する的を絞ったadvocacyの強化は、Falilu Adekunbiによって提案された。ナイジェリアと西アフリカにおける海洋酸性化市民社会行動ネットワークは、関連する政策と管理の枠組みにOAのモニタリングと研究の勧告を組み込むことによって、政府、科学、地域社会のパートナーが以下の能力を強化することを提唱する。

- a. 気候・海洋変動に関する地域・地方の知識と観測の目録を作成する。
- b. 気候リスク、準備、緩和、適応に対するより包括的なアプローチを開発する。
- c. 気候、海洋、沿岸の政策と管理にまたがる活動をよりよく統合する。

- d. 一つの地域における科学、地域社会の優先事項、効果的な海洋・沿岸管理のつながりを強化する。
- e. 重要な種の適応能力を決定し、生態系サービスの回復力を高めるための情報を優先する。
- f. 気候海洋緩和、適応、そしてレジリエンス(回復力)プロジェクトに対する官民の資金提供を強化する。そして回復力プロジェクト
- g. 国連 SDGs アジェンダ、UNFCCC、CBD、ブルーエコノミー、その他適用可能な枠組みにおける、気候・海洋・沿岸に関する既存の公約の実施を支援する。

4.1.9 カリブ海地域

カリブ海の海洋酸性化コミュニティのニーズに基づく評価と GOA-ON ハブの形成については、カリブ海地域の海洋観測能力の現状を評価するために、ナタリー・ロードによって社会調査が実施された。回答者の 59%が、病気、白化、海洋酸性化によるサンゴ礁の健康を懸念している。回答者の 51%は、沿岸汚染、有害藻類の大発生、サルガッサム、海洋ゴミによる水質を懸念している。海洋酸性化の研究と能力構築の障壁については、回答者の 64%が、OA モニタリング機器やメンテナンス、研究施設、船舶、人員配置など、資金調達が主な障壁であると考えている。74%の回答者は、モニタリング機器、データ収集のための訓練されたスタッフ、データ管理と共有、ベースラインデータへのアクセスなど、技術的能力が大きな課題であると考えている。回答者の 53%が海洋酸性化に関するトレーニングを受けており、その多くはボトルサンプリング、ラボでの pH とアルカリ度分析に重点を置いている。ほとんどの参加者は、さらなる研修の機会に関心を持っている。海洋酸性化研究にも強みがあり、例えば研究協力に基づく社会的ネットワーク、学生、組織的支援などがある。また、生物地球化学、海洋観測のためのモデリングやフィールドモニタリング、助成金や資金の配分、情熱、やる気、協力体制などのスキルなど、研究の専門知識もある。

2000 年代前半にジャマイカのディスカバリー湾で、海底地下水湧出 (SGD) とそれに伴う栄養塩類のフラックスが調査された。海底湧水から流出する水の流量はハンドヘルド流量計を用いて測定され、拡散浸透はリー型浸透計を用いて評価された。この研究は、沿岸水の生物地球化学、水質、生態系への影響、地下水と表層水の影響に焦点を当てたものである。季節変動と、これらのフラックスが沿岸のサンゴ礁システムに与える影響について議論する。この研究は、カリブ海のカルストが支配する小島嶼開発途上国への SGD 窒素とリンのフラックスの推定値を初めて報告したものである (Gordon-Smith and Greenway, 2019)。

炭酸塩化学の動態と傾向は、外洋水域については合理的な制約があるが、サンゴ礁が存在する浅い沿岸水域における海洋酸性化 (OA) の現れ方は、あまり理解されていない。サンゴ礁近海における炭酸塩の化学的性質や生態系の代謝プロセスの日較差、季節、年較差の変動を明らかにすることは、生態系に変化をもたらす可能性のある海洋酸性化の生

物地球化学的閾値を評価する上で重要である。米国とカリブ海のサンゴ礁の経済価値は年間 31 億～46 億ドル。1992 年から 2015 年までの地域経験モデルによると、表層海洋 pH(トータルスケール)とアラゴナイト飽和度は、それぞれ約 0.04 単位と約 0.29 単位減少している。これは、1992 年以降、カリブ海の表層海水の酸性度が約 11% 上昇し、アラゴナイト飽和度が約 7.4% 低下したことを表している。カリブ海の表層海水は 1988 年と 1992 年に比べて 12% 酸性度が高く、2.3% 温暖化している。1 月から 4 月中旬までは石灰化率が非常に低く、貝類の産卵が始まる時期と重なっていた。これらのデータから、サンゴ礁域とサンプリング地点上流の関連生態系では、 CaCO_3 が正味で減少していることが示唆され、海面上昇に伴い、サンゴ生態系の健全性と維持に必要なサンゴ礁の付加プロセスが損なわれている可能性がある。海面水温の上昇やサンゴの白化など、他の気候規模のストレス要因からの回復力は、炭酸塩の正味の損失を示すシステムでは損なわれる可能性が高い(Meléndez et al.)。

4.1.10 データの質 - OARS 成果 1

効果的なデータ管理は、海洋研究において重要な役割を果たす。異なる研究室や探検隊から収集されたクルーズベースのデータは、地域から地球規模の海洋プロセスを調査するために一般的に編集されるからである。持続的で統合された物理・化学・生物観測を達成するために、GOA-ON ネットワークは、既存の観測能力の評価、十分なトレーサブル認証標準物質の確保、資源の少ないラボの SOP 手法の開発、Salidrone や BGC Argo Float などの原位置海洋炭酸塩センサー技術の改善に取り組む。GOA-ON ネットワークは、既存および新技術による地球規模の炭素測定密度が高まる時代に急速に移行している。課題は、高品質の出力とデータ製品を提供しながら、測定のスループットをどのように増加させるかであり、最終的に科学者たちは、コミュニティ全体が利用できる新しいデータサービスとデータ製品についてコンセンサスを得ることができる。

海洋無機炭素測定のパリチェーン(Dorothee Bakker)は、データセットが表面海洋 CO_2 アトラスバージョン 2022 (SOCATv2022) データプロダクトファイルで構成されている。SOCAT のウェブサイト(www.socat.info)は、オンラインビューワ、ダウンロード可能なデータセット、データ利用声明、貢献者リスト、SOCAT に関する科学的出版物および SOCAT を利用した科学的出版物の概要への単一アクセスポイントを提供している。海洋は、人間活動による世界の CO_2 排出量の 4 分の 1 を吸収している。コミュニティ主導の表面海洋 CO_2 アトラス(www.socat.info)は、現在および将来の海洋 CO_2 吸収量とその変動を定量化するための鍵となる。SOCAT バージョン 2022 は、1957 年から 2021 年までの世界の海洋および沿岸海域の船舶、係留施設、自律型および漂流型海洋表層プラットフォームにおける、品質管理された表層海洋 fCO_2 (fugacity of CO_2) 原位置測定値を備えている。海洋無機炭素測定のパリチェーンは、世界の海洋の CO_2 吸収量、その変動と正味ゼロへの応答、海洋酸性化の進行の認定を行うための鍵である。表層海洋 CO_2 アトラスは、表層海洋

CO₂の原位置測定結果を統合したもので、毎年公開されている。しかし、外洋 CO₂ 測定は憂慮すべきほど減少しており、海洋観測システムの 20～25%しか維持されていない。海洋無機炭素測定の変数チェーンを安定させるために、我々は表層海洋 CO₂ 測定を増加させ、SOCAT の緊急支援を構築し、WMO グローバル温室効果ガスウォッチのニーズを満たすために、1*1 分解能で月次の大気海洋 CO₂ フラックスのための運用表層海洋 CO₂ 観測能力へ移行する必要があります。何百もの査読付き科学出版物やインパクトのある報告書が SOCAT を引用している。SOCAT コミュニティ主導の統合プロダクトは、海洋の原位置無機炭素測定に基づく変数チェーンの重要なステップであり、気候交渉において海洋 CO₂ 吸収に関する重要な情報を政策立案者に提供する。世界の海洋 CO₂ 吸収量とその(将来の)変動に関する正確な知識の必要性から、海洋 CO₂ 原位置観測への持続的な資金提供が不可欠である(Bakker et al.)

Synthesis Product for Ocean Time-Series” (SPOTS) には、12 の固定された船舶ベースの時系列プログラムからのデータが含まれている(図 6)。SPOTS はコミュニティ主導で、特定の科学的根拠に焦点を当て、複数のソースからのデータセットを組み合わせたカスタマイズされた技術である。データセットは、詳細化可能で、アクセス可能で、相互運用可能で、再利用可能でなければならない。パイロット版では、溶存酸素、溶存無機栄養塩、無機炭素(pH、全アルカリ度、溶存無機炭素、CO₂ 分圧)、粒子状物質、溶存有機炭素といった、生物地球化学的に重要な海洋変数に焦点を当てている。使用されている時系列には、さまざまな時間分解能(月次、季節、不定期)、時間範囲(10～36年)、底部水深(80～6000m)があり、最も古いサンプルは1983年までさかのぼり、最新のものは2021年に相



図 6. 海洋時系列合成プロダクト(SPOTS)

当する。その他のデータ品質記述子には、精度と正確さの推定値、データのばらつきを示す指標、世界の海洋の参照データとして広く認知されている“GLObal Ocean Data Analysis Project”と比較したオフセットが含まれる。一般的に、これらの記述項目は、時系列プログラム内の測定品質が高いレベルで継続し、GLObal 海洋内部炭素データとの強固な比較は限定的であるにもかかわらず、GLObal 海洋内部炭素データとの整合性が高いことを示している(Lange et al.)

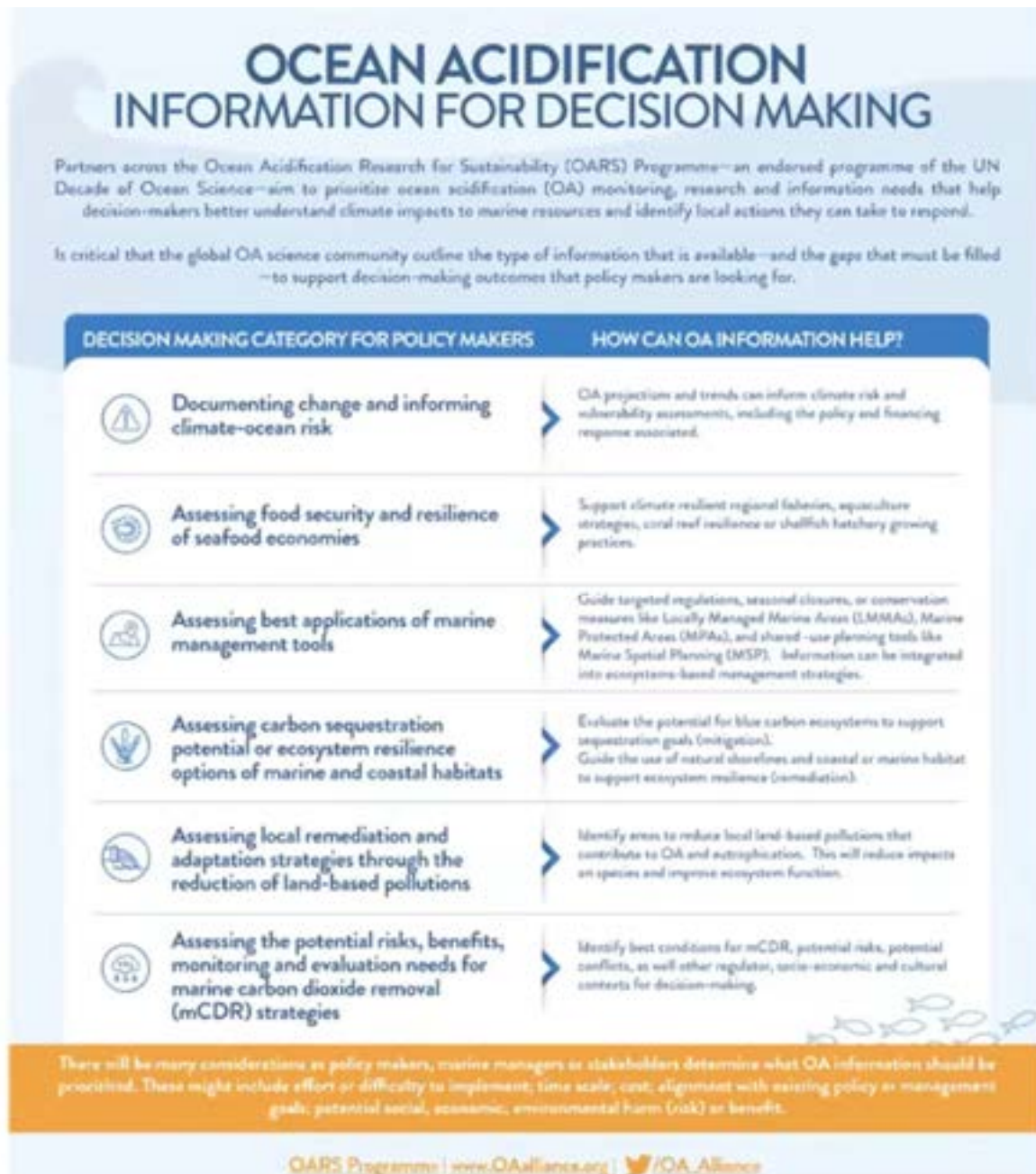


図 7. 意思決定のための海洋酸性化情報

海洋酸性化コミュニティを成長させ、その持続可能性を高めるために、重要な要素として能力開発と指導が Kaitlyn Lowder によって提案されている。新しい技術や手順が開発され、OA コミュニティに導入される際には、その導入と適切な使用を確実にするために、トレーニング、ツール、リソースが含まれるべきである。急成長する研究グループのためのリソースには、低コストのデータ収集機器 (GOA-ON in a box kit)、トレーニング (OTGA OA コース)、指導 (GOA-ON Pier2Pier プログラム + 奨学金)、およびアクセス可能なリソースが含まれる。この 10 年間の他の機会としては、機器、研修、スタッフの時間のための資金調達のための持続可能なモデルの開発、指導、より多くのメンティーに提供する斬新な方法の検討、研修資料の共同開発、低コストセンサーの開発を奨励するための産業界や技術開発者との連携などがある。

地域のギャップを埋め、海洋／沿岸資源における気候変動や炭素排出の影響を共有し、個別の行動や意思決定にますます情報を提供するなど、より広いステークホルダーに情報を提供するための OA データのニーズがある。OA への関心と認識が高まるにつれ、私たちはさまざまなオーディエンスや個別の成果に向けて OA を伝えることを考えなければならない。“OA に取り組むために、様々なアクターは何ができるのか？”異なるステークホルダー・グループ間の信頼関係を構築し、共有ビジョンを策定するには、誠実で幅広い議論が必要である(図 7)。同様に、国や州政府が行っているように、資産を行動に移すことを約束するには、公平な参加を確保するための交渉と、時には妥協が必要である (Cross et al., 2019)。

4.1.11. 化学物質モニタリング

海洋酸性化の新たな証拠が、最近の東海岸海洋酸性化 (ECO) クルーズの船上での $\delta^{13}\text{C}$ -DIC データ収集によって明らかになった。1970-1990 年代における大気中の ^{13}C Suess effec は -0.65 であったが、海洋表層の ^{13}C は -0.16 であった。 ^{13}C は、海洋による人為的な CO_2 吸収について、独立した、おそらくより感度の高いトレーサーを提供するが、その一方で、分析精度やデータの少なさ、あるいは空間的・時間的解像度の低さによって研究が制限されている。 ^{13}C -DIC は、陸域および海洋縁辺の炭素輸出のトレーサーとして使用できる。本研究は、[DIC]と同位体(^{13}C -DIC)を同時かつ高精度に測定するという分析目標を達成した。しかし、正確で適用しやすい校正法の開発はまだ進行中であり、地域社会の支援が必要である。海洋のスース効果を定量化するための ^{13}C データの利用は進展しているが、過去のデータ不足が依然として問題である。 ^{13}C データの完全な解釈、特に陸域と沿岸の炭素輸出の定量化は、依然として大きな課題である (Su et al.)

表層海洋の大気中 CO_2 との平衡化時間が比較的短いことから、 CO_2 増加に対する Ω の応答時間はわずか数十年であり、現在の酸性化速度に匹敵する。現在の速度は、おそらく過去数百年間のどの時期よりも 100 倍速く、気候変動境界の越境と結びついた関係を確認し、海洋生物圏の完全性を弱め、海洋酸性化境界のアラゴナイト飽和状態を悪

化させるリスクの上昇につながる。高 CO₂ 排出シナリオと低 CO₂ 排出シナリオは、2025 年頃に分離し始める。減少率と現在の世界平均の両方を観測すると、アラゴナイト飽和度 2.8 は現在の世界値を過小評価しており、2.89 であるべきである(図 8)。しかし、地域差は存在し、重要である。観測だけからすると、最も大きな変化は最も緩衝能の高い地域で起こり、最も小さな変化は東部境界湧昇帯に沿って起こっている。地域的には、アラゴナイトの変化速度が最も速いのは中緯度域であるにもかかわらず、高緯度域はすでに産業革命前の状態と比較して境界を越えており、7つの海洋流域のうち4つの流域で境界を越えている。いくつかの生物学的反応は、我々がすでに安全な境界に達しているか、あるいは境界を越えていることを示唆している。海洋生物の OA に対する反応はさまざまで、pCO₂ に反応するものもあれば、pH に反応するものもある。OA 境界については、アラゴナイト飽和状態の代わりに他のパラメータを考慮すべきである(Richardson et al.)

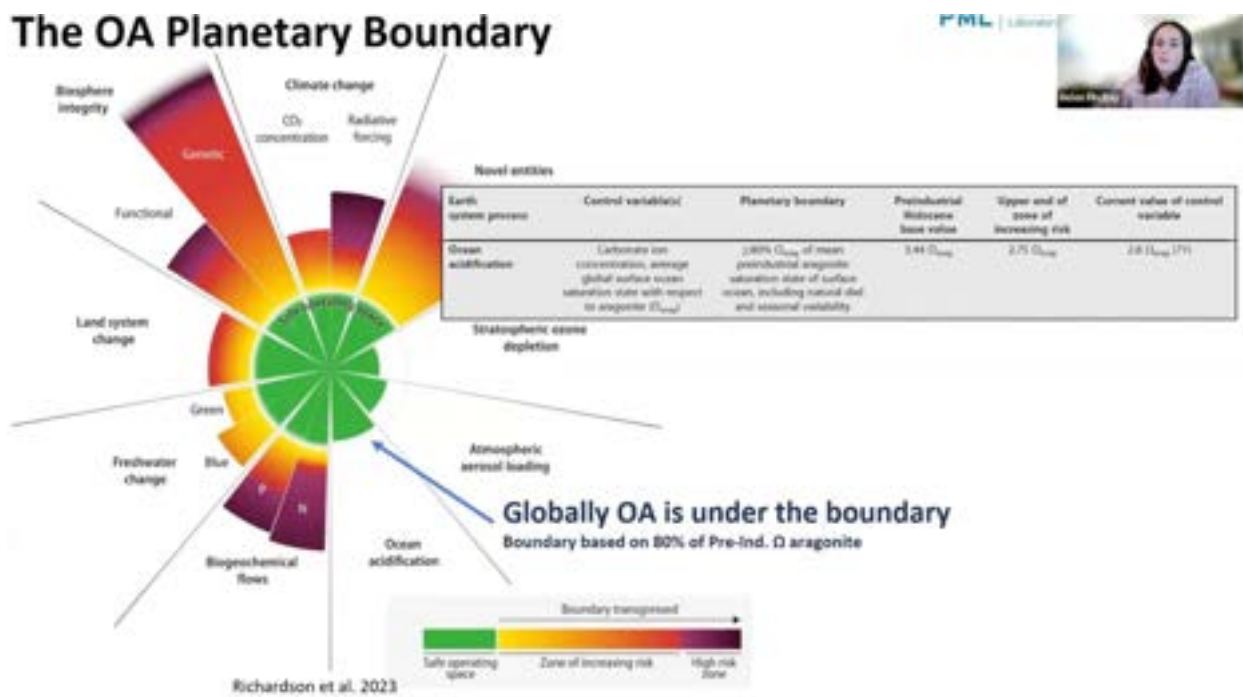


図 8. OA の惑星境界

いくつかの研究では、地下の OA 信号の上昇が確認されている。地下海水は通常、有機物の再石灰化による天然炭素の蓄積により、表層海水よりも緩衝性が低いいため、これらの海水が海面に再出現すると、海水が沈み込む前に大気と完全に平衡する時間がない。高緯度地域では、CO₂ 蒸発率の上昇や海洋炭素貯蔵効率の低下につながる可能性がある。地下 pH の増幅は、生物起源炭素副生成物の存在による非線形増幅またはメトリック変化によって引き起こされる。増幅された地下の OA が示唆するのは、複数の環境ストレスを伴う水量の増加による生息域の圧縮である。湧昇域の生物は “自然な” 炭酸塩化

学的変動により OA に対してより耐性があるという仮説は、再考する必要があるかもしれない。海水が表層に再浮上する際に発生する $p\text{CO}_2$ 値の高騰は、海洋の炭素貯蔵効率に影響を与える可能性がある。海洋二酸化炭素除去技術に関しては、深度依存性を考慮することが重要である (Fassbender et al., 2023)。

4.1.12 地中海地域

地中海の生態系では、ほとんどの生理的プロセスが影響を受けている。沿岸域では、底生生態系は遠洋生態系、特に地中海の潮下岩礁域よりも OA に対して脆弱であるように見える。OA 研究の地理的能力にはばらつきがあり、アルジェロ・プロベンカルとイオニア亜流域の両方が、現地中海で最も研究が遅れている地域であることを示している。炭酸塩システムは沿岸域ではまだ十分に定量化されておらず、長期的な時系列データは地中海全域でまだまばらである。最も研究されている生物群は、独立栄養生物(藻類、植物プランクトン)、軟体動物、サンゴであり、微生物、小型軟体動物(主に翼足類)、海綿動物などは最も研究が遅れている。地中海における社会経済学的、古生物学的、モデル化研究は全体的に少なく、一般的な資源の利用可能性や、OA ガバナンスの改善と協調の合意にもかかわらず、地中海では一貫した OA 政策が欠如している。また、この地域には、底生生物研究に焦点を当てた、レジリエンス構築や現在の生態学的状況やマルチドライバーの評価など、他の潜在的課題もある (Ziveri et al., 2017; Hassoun et al., 2022)。

表層水の人為的酸性化は、地中海における生物起源石灰化を減少させる。人為起源の二酸化炭素レベルの上昇は、有孔虫の石灰化を変化させることによって、流域全体のサイズ規格化重量の減少をもたらした。炭素($\delta^{13}\text{C}$)とホウ素($\delta^{11}\text{B}$)の同位体組成は、それぞれ化石燃料由来の二酸化炭素と pH 低下の影響の増加を示している。アルケノン濃度と試験蓄積率は、温暖化と生物生産性の変化が酸性化の影響を相殺するには不十分であることを示している。我々は、大気中の二酸化炭素のさらなる増加が、地中海における海洋生物由来の石灰化を継続的に減少させることを示唆している。人為的な酸性化は、地中海表層水における浮遊有孔虫の石灰化を阻害する。この結果は、他のプランクトン石灰化生物(球石藻、翼足類)にも適用できる。種間、流域幅の広いアプローチにより、信頼性が高く、ばらつきの少ない評価が得られる。人為的な CO_2 吸収の促進(炭素同位体)と pH の低下(ホウ素同位体)が、地中海のプランクトン有孔虫殻で初めて測定された (Pallacks et al., 2023)

貝類養殖は大量の貝類資源を供給しており、1990 年から 2020 年にかけて 52%から 87%に増加している。しかし、OA の影響について行われたほとんどの実験は、強制因子のレベルが安定し、餌が無制限で、病原体が存在しないといった非現実的な条件下で行われた。本研究の目的は、現実的な条件下で養殖された二枚貝の性能と品質を分析することである。その結果、将来的にはカキの生存率が低下することが予測されるが、急激な低下ではない。また、2100 年まで生カキとムール貝の体重増加は減少する。カキとムール貝

の両方が成長の面で影響を受け、ラグーン内での養殖が将来的に危険にさらされることになる(Gazeau et al.,2014)

海洋酸性化、マイクロプラスチック、ランタンがウニ *Arbacia lixula* に及ぼす複合ストレスの影響について Önder Kılıç が調査した。その結果、*A. lixula* をストレス要因に曝した結果、死亡は観察されなかった。また、ストレス物質による呼吸率の有意な変化も見られなかった。しかし、これらのストレス因子を異なる値や種に、より長い暴露期間で適用するためのさらなる研究が必要である。

4.1.13 北東大西洋地域

OSPAR(オスロ条約とパリ条約の原型)のビジョンは、生産性が高く、持続可能 に利用され、気候変動と海洋酸性化に強く、きれいで、健康的で、生物学的に多様な北東大西洋である。OSPAR は、科学者、政策アドバイザー、政策立案者が交流するプラットフォームである。OSPAR は、現状を評価し、政策に情報を提供し、対策を評価する品質評価報告書を作成する。

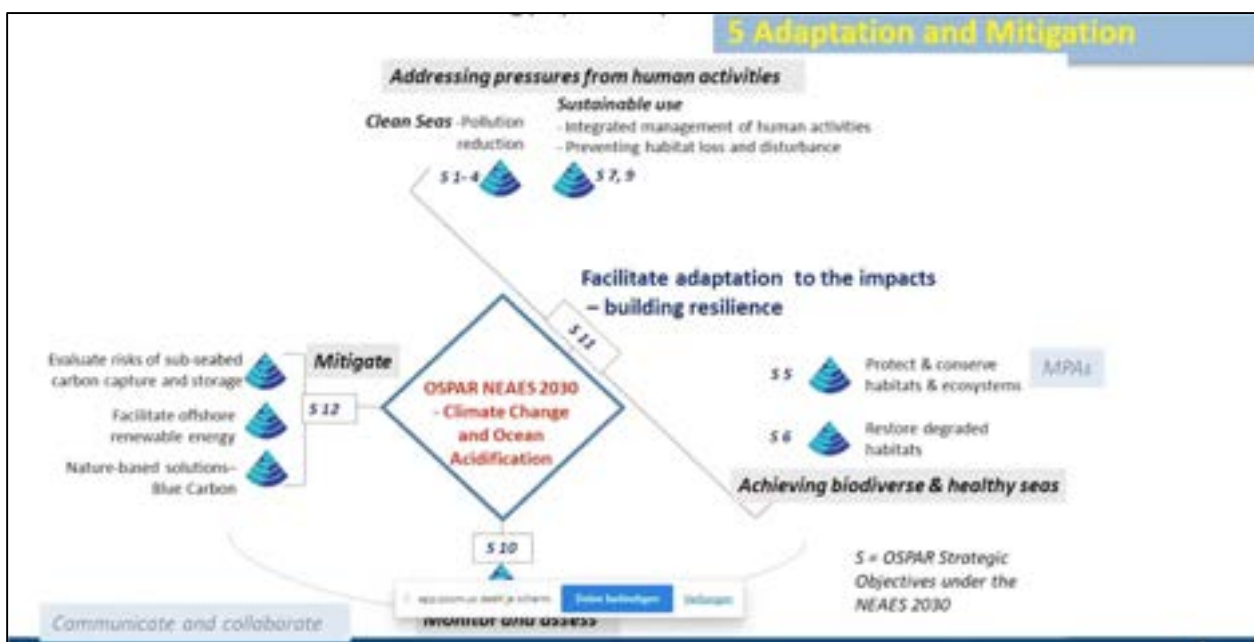


図 9. OA への適応と緩和に適用される OSPAR NEAES 2030

OSPAR 海域の全地域で OA が観測されている。調査された排出シナリオの下では、OA が継続すると予測されている。OA によって海洋生物はさらにプレッシャー下に置かれるため、気候変動への適応と緩和を検討する際には OA を考慮に入れる必要がある。推奨される研究は、モニタリングのためのより多くの継続的な支援が必要であること、モデルアンサンブルを用いた OA の将来予測をさらに制約するための支援が必要であること、などで

ある。将来的には、現実的な(最悪のケースだけでなく)シナリオを考慮した生物学的影響の解明、複数の海洋ストレス要因、生態学的相互作用、進化プロセスの調整的役割の説明が必要である。堅牢で、感度が高く、OAに特化して必要とされ、広い生物地理学的範囲を持つ潜在的な「生物指標」候補について、さらなる研究が必要である。政策面では、CO₂排出を削減する対策、大気や海洋からCO₂を除去する対策、栄養塩の投入や汚染、生息地の劣化や破壊といった他の圧力を減らすことで回復力を高める対策、生物多様性や群集構造を増加させることで回復力を高める対策、例えばMPAやOECS、乱獲といった対策が必要である。

ここ数十年で、バルト海は大きな変化を遂げた。20世紀後半における陸地からの栄養塩類負荷の増大は、富栄養化と低酸素・貧酸素域の拡散を引き起こし、水柱の恒久的な成層と深層の換気制限によって好条件が整えられた。pHの低下という意味でのOAは、バルト海では今のところ検出されていない。CO₂の変動はバルト海のpH動態を読み解くのに十分ではなく、完全な酸塩基平衡が考慮されなければならない。バルト海のOAは、HELCOM、バルト海の地球、および多くの科学的プロジェクト(Kuliński et al.,2022)

海水炭酸塩系標準物質は、海洋炭素科学および政策にとって不可欠である。海水炭酸塩系の測定に必要な標準物質を提供する生産・供給センターは、スクリプス海洋研究所に1つしかないため、標準物質(RM)への世界的なアクセスは脆弱である。Covid-19のパンデミック時にRMの供給が激減したため、各研究室はRMを自家生産するか、作業用RMを生産せざるを得なくなり、その結果、不均一な生産とコンプライアンス対策の不確実性が生じた。したがって、世界的な協調なしに各国が独自の標準物質を生産することが重要である。あるいは、複数の生産・認証拠点が世界的な協調のもとに標準物質を生産することも重要である。

JPI海洋炭素容量は、海洋の緩衝能と炭素貯蔵能の理解における不確実性に対処し、これを低減する。JPI海洋炭素容量知識ハブは、人為起源の炭素と沿岸の海洋酸性化の海洋測定に必要な炭酸塩系標準物質を生産する欧州の能力を確立するための中心的な役割を果たすことを目指している。私たちは、科学者、国立計量研究所、企業、資金提供者、エンドユーザーを含む、提案された新しいモデルを構築し維持するための調整を必要としている(Maribel I. García-Ibáñez et al.,2024)

4.1.14. Best practice

能力とは、「人々、組織、社会全体がその業務をうまく管理する能力」と理解される。提供される技術支援は、地域のニーズに応え、他の援助国やパートナーとの調整を図りながら、地域コミュニティにおける持続可能な能力の構築を支援し、現地での訓練や、実際であれば現地の資機材の使用を奨励することを目標とすべきである(Dickson, 2010)。pH_Tだけでは十分ではなく、海水中の炭酸塩システムの明確な記述には、関連する平衡定数や少なくとも2つの炭酸塩システムパラメータなど、より多くの情報が必要である。海

洋 OA に対する生物応答の原因となる単一の CO₂ システムパラメータを特定することはできないし、CO₂ システムの変化に対する生物の応答を研究するための完璧な単一因子実験をデザインすることも不可能である。“測定以上の計算はできない”
有効な分析測定原則を以下に挙げる。

- a. 分析測定は、合意された要件を満たすために行われるべきである
- b. ある場所で行われた分析測定は他の場所で行われたものと一貫性がなければならない
- c. 分析測定を行うスタッフは、その作業を行う資格と能力の両方がなければならない
- d. 分析測定は、目的に適合していることを確認するために試験された方法と機器を用いて実施されなければならない
- e. 検査施設の技術的性能について、定期的に独立した評価が行われるべきである
- f. 分析測定を行う組織は、明確に定義された品質管理・品質保証手順を持つべきである

pH 指示色素メタクレゾールパープルの不純物分析は、Rieke Schäfer によって実施された。海水 pH の測定には、クーロメトリー法、NMR 分光法、LC-MS 法（高速液体クロマトグラフ質量分析法）の 3 つの方法が比較された。クーロメトリー法は不純物のため、意味のある酸性の測定値が得られない。NMR 分光法では、精製過程で海水の組成が変化するため、安定性に問題があった。LC-MS 法はまだ特定されておらず、結果の解釈は難しい。

4.1.15 地域の実力——効果的な OA 研究を可能にする炭酸塩化学測定能力の構築

米国の regional CANs は、科学者、利害関係者コミュニティと協力して、知識のギャップと情報ニーズを特定し、モニタリングと研究のための地域の優先事項を推奨することができる。また、研究者と利害関係者間の関与と情報共有を促進し、観測とデータ収集のベストプラクティスを共有し、データ共有を促進し、アウトリーチと統合資料を作成し、地域の OA 情報のリソースハブとしての役割を果たすことができる。

アラスカ海洋観測システム(AOOS)が主導・調整するアラスカ OA ネットワークは、漁業・養殖業、部族、政策立案者、沿岸コミュニティ、一般市民から関連情報を提供・受信し、OA の専門家と、各地域での OA 研究やモニタリングへの参加に関心を持つアラスカの団体の双方と緊密に連携している。アラスカ海洋酸性化ネットワークは、理解を深め、情報ニーズやモニタリングの優先順位を特定し、ベストプラクティスやデータを共有し、適応策や緩和策を検討するためにコミュニティと協力している。コミュニティベースの採水、ウェブアクセス可能な情報、アウトリーチ資料など、いくつかの活動がある(Dugan et al.)

メキシコ湾(GOM)は、人口が多い海岸線、海洋に依存する多くのコミュニティ、貴重な経済があるにもかかわらず、酸性化に関して比較的研究が進んでいない地域である。メキシコ湾海洋酸性化ネットワークは、CAN メンバーや運営委員会からの支援、関係構築、地域社会の関与、学生の支援、ソーシャルメディアの支持といった成功を収めた。メキシコ湾

の酸性化に影響を与える小規模な環境要因としては、大河川からの淡水、栄養塩、炭酸塩の流出、海洋の温暖化、循環、滞留時間、周期的な異常気象などが挙げられた。課題としては、限られたスタッフ、限られた資金、政治的環境、優先される他の環境問題、調整されたメッセージングなどが挙げられる (Osborne et al., 2022)。

2017年、NANOは、研究プロジェクト「特定地点における沿岸の脱酸素、海洋酸性化、生産性の世界的研究」(NANO-DOAP)を開始した。この研究プロジェクトは、会員が世界各地に分布し、沿岸モニタリングのための施設を提供できる機関に所属している利点を生かしたものである。このプロジェクトは、既設のモニタリングステーションを統合し、あるいは新たなモニタリングステーションを設置することによって、沿岸海洋の知識と観測を向上させることを目的としている。現在、このプロジェクトはアジア、アフリカ、ラテンアメリカの15カ国、22のサンプリング・サイトを網羅している。

地球規模の海洋観測のためのパートナーシップは、海洋に対する理解を深め、人類の利益のために海洋を広く利用するために必要な、真に地球規模の海洋観測システムの開発を促進し、実現するために、グローバル・コミュニティとして一丸となって取り組んでいる。NANO-DOAPは、参加沿岸サイトにおけるEOVsのその場観測を支援し、グローバルな結果を生み出すためのローカルな分析とサイト間の比較分析を実施し、能力開発活動を組織し、参加サイトにおけるアウトリーチと市民科学活動を促進する (Krug et al.)

太平洋諸島における海洋酸性化モニタリング能力の向上は、Katy Soapiによって紹介された。太平洋諸島海洋酸性化センターが2021年に設立され、OA研究とモニタリングを支援するための国際的かつ地域的な取り組みが統合された。このセンターは、地域のOAモニタリングの専門性を高めるためのトレーニングを提供し、地域のOA状況を把握するためのOA機器の配布を支援している。また、海洋酸性化データの管理および利用可能性に関する支援や、モニタリング、行動、政策努力を支援する国際ネットワークへのアクセスも提供している。地域のOAモニタリング能力を構築するために、インタビュー、国際会議、会議、シンポジウム、トレーニングコースなどの啓発活動を行っている。現在直面している課題としては、機器の故障やスペアパーツの入手・注文の困難さ、継続的なトレーニングのニーズや支援、機器のメンテナンスに対する限られた支援、学習や経験を共有するための限られた地域のスペース、スタッフの入れ替わりや能力の限界、データの品質管理、継続的なモニタリングやスタッフ・機器の入れ替えのための資金不足などが挙げられる。PIOACは資金を求め、モニタリングや調査活動を拡大し、他の組織との連携を強めている。

ターゲット14.3 SDG14 (BernalとAngulo、2022年)達成のためのラテンアメリカとカリブ海諸国の能力構築について言及する。REMARCOネットワークは、LAC地域の手順を標準化し、LAC地域のCO₂システムを監視する能力を強化し、2つのバーチャルコースのようなトレーニングを実施し、TAとDICの相互比較に関する結果の信頼性を実証し、海水の分光光度法pH測定のための精製と特性評価に取り組むことを支援している。課題とし

ては、地域における海洋酸性化の影響の評価、炭酸塩系の分析プロセスにおける水性廃棄物からの水銀の除去、地域観測所からの情報の分析、科学者と政策立案者・政治管理者との接触などがある。

アフリカにおける海洋酸性化国際調整センター(OAICC)の能力開発プログラムが Sam Dupont によって発表された。アフリカではまだやるべきことが多く、西アフリカは今後優先的に取り組むべきであり、例えば適応訓練を行うべきである。アフリカには多くの課題があるが、多くの国で優れたリソース(機関、専門家)が確認されており、成功例も多い。機関間や機関内の連携を高めることが重要である。将来的な研修の優先順位付けや目標設定、機関や専門家の特定、ネットワーキングを促進するために、コミュニティがデータベースを利用できるようにする。

4.1.16. OA による生物学的影響

地中海のゴルゴニアに対する海洋酸性化と温暖化の影響に関する実験室研究が、生理学的、transcriptomic かつ epigenetic な反応を観察するために、Murat Belivermiş によって実施された。この研究の目的は、表現型可塑性の根底にある transcriptome と epigenetic なメカニズムを理解するために、温暖化、酸性化、およびそれらの組み合わせに対するゴルゴニアの生理学的応答を2週間にわたって評価することである。現在のところ、低 pH(-0.35)と高温(+4)、およびそれらの組み合わせは、2週間にわたって壊死や死亡に至らなかった。低 pH と高温の組み合わせでは、ゴルゴニアのポリプ活性と酸素消費率が有意に増加した。しかし、低温・高温下での表現型の可塑性は DNA メチル化とは関連しなかった。高温は採集地の夏の最高気温を 3-4 度上回るが、急性の有害な影響は生じなかった。この実験の限界としては、pH と温度の局所的変動に関するデータが乏しいこと、長期的な実験が必要であること、順化における epigenetics の役割を理解するために、遺伝子スケールのプロファイリングや世代を超えた研究をさらに進めることができることなどが挙げられる。

高アルカリ性海水で養殖した場合、海洋酸性化が商業用アサリ種 *Chamelea gallina* の稚貝の殻強度に影響を与えないことが判明し、漁業に何らかの示唆を与えている(de las Nieves, 2017)。本研究の目的は、*C. gallina* の稚貝の殻強度と完全性に及ぼす CO₂ 増加の影響を評価することである。シマベニシジミは広く分布し、商業浚渫漁業の対象種であるが、現在は乱獲され、加入不全に直面している。その結果、殻の厚さは CO₂ によって有意に減少し、OA が高 TA 条件下で *C. gallina* の殻強度に影響を与えることはないが、長期的には殻の成長と殻の完全性が損なわれる可能性があることが示された。圧縮実験における殻強度の最良の予測因子は殻厚である。漁具の適応とアルカリ化は、OA 下での貝の回復力を高める可能性がある。

海洋アルカリ性強化(OAE)が生物に与える影響の実験的研究は、Marc Metian によって行われた。OAE は、ウニの幼生 *Paracentrotus lividus* やサンゴの成体 *Stylophora pistillata* の生存、成長、石灰化に役立っている。OAE に関する今後の活動としては、アルカリ度の上昇と他の化合物や不純物との複合的な影響を解決し、実験室条件下で実際の材料を使用して同様のリスクを評価することが含まれる(Dupony and Metian, 2017)。

4.1.17. OA が及ぼす社会経済的影響

OA-ICC などを通じて、IAEA がどのように海洋酸性化の広範な社会経済的影響に取り組んでいるかについて、Olga Anghelici が図 10 に示したとおり発表した。



図 10. OA が及ぼす社会経済的影響に取り組む OA-ICC

すべての生命は海洋に依存している。世界中の CO₂ 滲出地での研究は、生物起源生息域が海洋酸性化の影響を特に受けやすく、その劣化は沿岸保護の低下と漁業への生息域提供の低下をもたらすことを示している。熱帯、亜熱帯、温帯沿岸の湧水地では、酸性化が進むにつれて、海洋財・サービスへのリスクが増大し、大型藻類優勢へのシフト、生息環境の悪化、生物多様性の喪失を引き起こしている。この経験的証拠に基づき、海洋酸性化は沿岸保護、漁業、養殖業に依存する何百万もの人々に深刻な結果をもたらすと予想された。海洋酸性化と温暖化のレベルが低ければ、シーフードはより豊富で美味しく、栄養価も高くなる(Lemasson et al.,2019) CO₂ 排出量削減に直結することで、酸性化、温

暖化、酸素損失、海面上昇の抑制につながる。漁業被害や汚染物質の減少とともに、生態系サービスの向上に役立つだろう(Hall-Spencer et al.,2019)

10,000 以上の出版物があり、多くのよく組織された科学的ワークショップや組織が CO₂ 増加への対処に取り組んでいるが、増加傾向を止めるのに本当に役立ったものは何もない。1.5 度を下回る確率を 50%に抑えるために必要な炭素収支は 250Gt-CO₂ であり、現在のままでは 6 年しかかからない(図 11)。海洋リテラシーが低いのは、コミュニケーションの失敗かもしれない。海洋酸性化は、個々の生物種の発生や、人類の健康と幸福が恩恵を受ける生態系基盤に複雑な変化をもたらすと予想されている。人間の健康と幸福に対するその後の変化は、食糧供給と食糧の質の変化、呼吸器の問題、精神的・肉体的健康、酸性化によって発生する病気の治療から生じる可能性がある(Falkenberg et al.,2020) 人間の健康は、海洋酸性化について伝えるための新たな通貨となりうる。このような複雑性を認識することで、私たちは酸性化する海洋の管理を適応させ、害を減らすだけでなく、人間の健康と幸福 human health and well-being への恩恵を高めることができるかもしれない。

A successful field (?)

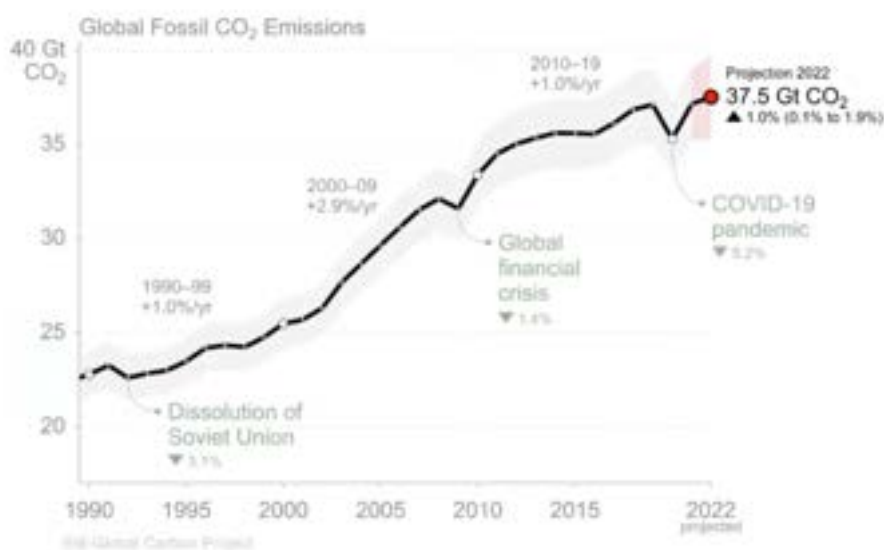


図 11. OA 研究の成長に関係なく増加する CO₂ 排出量

OA は、地中海において、重要な数の生態系を害し、直接的・間接的に大きな社会経済的影響をもたらす可能性がある。OA 問題は現在、地中海の海洋生態系と沿岸生態系の両方を危険にさらしている人為的ストレス要因のリストの中で、最新のストレス要因の一つである。継続的な OA 増加に対する地中海のユニークな回復力は、特別な注目に値するものであり、このことはひいては、意思決定者や政策立案者が的を絞った現実的な対策

に焦点を当てるための情報提供や方向付けに役立つからである。残念なことに、最良の政策オプションに関する科学的・一般的な理解はまだ不十分であり、これは直接的・間接的影響の複雑な管理に起因している。これらの障壁は、データと情報の不十分なアクセスと共有につながり、地域レベルでの効果的な意思決定に向けて、切望されていた進展を妨げている(Hassoun et al., 2022)。

温暖化と海洋熱波による海洋酸性化が養殖と漁業に与える影響が調査され、地中海におけるガバナンスの課題につながっている。昆布とカキ、二枚貝の共同養殖では、カキと blue mussels にポジティブな反応が観察された。ケルプは、統合的養殖のためのソリューションとして使用することができる。例えば、高解像度の観測など、ストレス要因としての OA を明確に定義したマルチストレスのリスクアセスメントに関する戦略。緩和のための介入には、大型藻類との共培養、餌の利用可能性の増加、アルカリ性の強化が含まれる。適応への介入には、生物相と生態系の保護、修復、空間計画、生物学的・生態学的適応の操作が含まれる。持続可能な水産養殖は、特に潜在的な mCDR 戦略によって、厳しく選択された生息地において可能である。

地中海における海洋ガバナンスは、セクター別の制度や、国の管轄内および管轄外の空間的区画の点で、非常に断片化されている。ガバナンスに統合された解決策には、予防、先見的研究とモニタリング、適応と回復力、経済評価の統合、適応的管理とガバナンスが含まれる。効果的なガバナンスのためのイノベーションの課題には、ベストプラクティス、手法の開発、意思決定ルールの開発、介入ガバナンスの枠組みの理解と強化が含まれる(Bednaršek et al., 2023)

4.1.18. 北極地域

バフィン湾におけるアラゴナイト飽和状態の駆動力について、西グリーンランド棚を中心に解析した。西グリーンランド棚には、冷たく新鮮な北極圏の流出水と、暖かく塩分を多く含む大西洋の改質水が含まれていた。バフィン湾の上部 150m では、アラゴナイト飽和度は主に北極海水の低い TA: DIC 比によって駆動される。150m 以深では、アラゴナイト飽和度は呼吸の量に支配される。そして、1997 年 (1.2 ± 0.05) と 2004 年 (1.31 ± 0.08) の観測から 2019 年 (1.02 ± 0.04) にかけて、北極海域のアラゴナイト飽和率は大幅に減少している(Burgers et al., 2023)。

カナダ多島海の表層水における海洋酸性化と炭素収支に関するモデリングの視点が Johanna Länger によって示された。カナダ多島海では塩分濃度が低く、緩衝能が低いことがわかった。河川流量は OA と炭素収支のモデリングに大きく影響する。現在、カナダ多島海の一部では、アラゴナイト飽和率が恒常的に 1 を下回っている。表層炭素化学の大部分は、氷被覆と淡水収支の影響を受けている。

バレンツ海におけるプランクトン石灰化物と生物学的ポンプ効率に対する海洋酸性化の影響について言及する。石灰化物のサイズ分布、現存量、定常蓄積量、輸出生産量には

明確な季節パターンがあり、夏と秋に最も高い値が現れ、冬に最も低い値が現れた。季節氷帯と縁辺氷帯の石灰化物の滞留資源量と輸出生産量はすべての季節で最高であった。植物プランクトンのブルームと比較して、現存量、サイズ分布、それに伴う炭素蓄積量と輸出生産量が最も高くなる時期が遅れることが示唆された。3月から5月にかけての浮遊性有孔虫の現存量の変化は、海氷の育見的役割と大西洋水の流入の組み合わせによる可能性がある (Anglada-Ortiz et al., 2023)

海洋酸性化は金属汚染による生物学的影響を増大させるが、金属汚染に対する海洋酸性化の生物学的影響を理解するために、ノルウェーの北極圏の鉱山廃棄物堆積物の事例研究が適用された。推定 2300 万人が、過去および現在の金属採掘活動に由来する潜在的に危険な濃度の有毒廃棄物の影響を受けている。淡水は凝集剤を使用して回収され、鉱滓は海水と混合されてフィヨルド底の堆積域に放出される。そして、pH と温度が採掘堆積物からの溶出速度に影響を与えた。沿岸の炭酸塩化学の変化は、降水パターン、塩分、流出、氷の覆い、富栄養化によっても引き起こされる。採掘堆積物の毒性と気候変動との相互作用については、ほとんど知られていない。pCO₂ の上昇は、死亡率に対する採掘堆積物の影響を増大させた。採掘土砂は、細胞外 pCO₂ の上昇に反応して重炭酸塩緩衝作用を阻害し、細胞外アシドーシスを引き起こした。

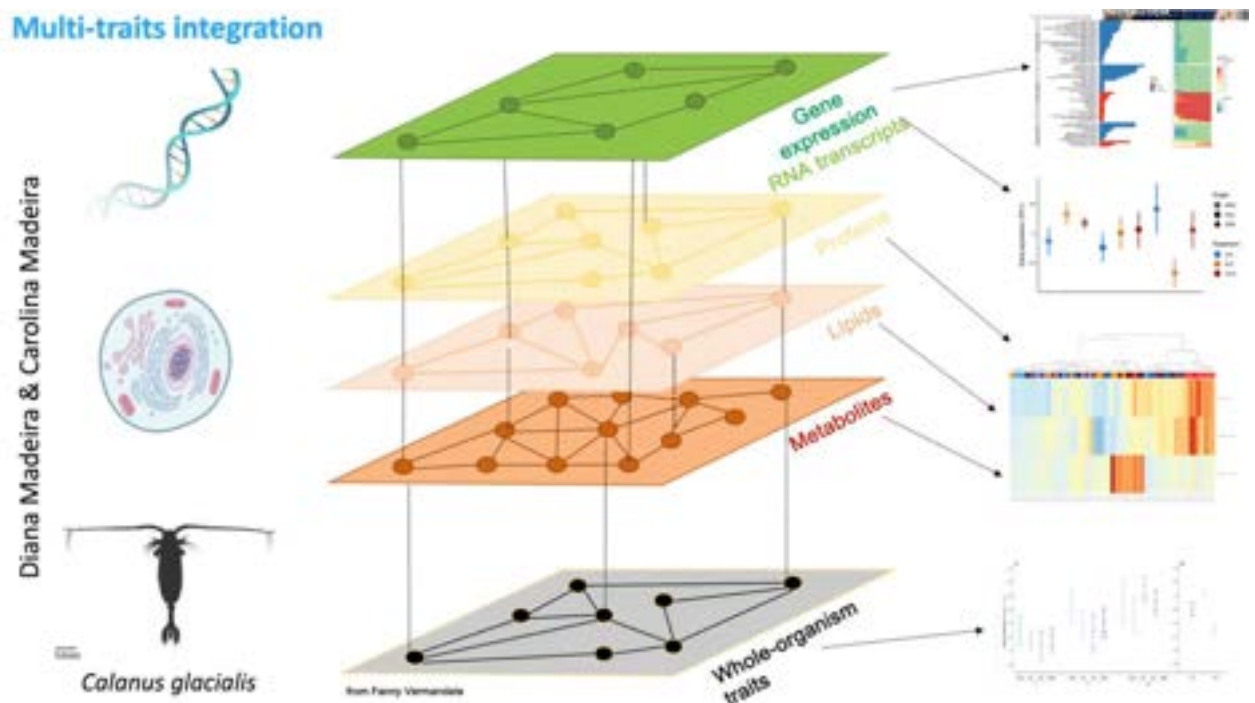


図 12. OA が *Calanus. glacialis* に与えるさまざまなレベルの影響

Anna Nikolopoulos により、汎北極圏分散型生物学的観測所 (DBO) の開発が紹介された。長期モニタリングプログラムに基づくいくつかの地域 DBO の設立、主な作業として、努力の調整 (共同かつオープンな計画、インフラのより良い利用と共有)、専門分野間のバランスの改善 (共同サンプリングのための主要な場所)、ルーチンの調和 (迅速なメタデータの共有、共通のデータ処理、共有、取り扱いルーチン)、再発的な共同評価 (長期的な任務と短期的な努力の間のリンクの強化) などが挙げられる。

海洋酸性化に対する北極海の海洋生物の感受性の個体間変動 (Vermandele et al., 2022) 種の OA に対する反応は異なり、個体群も同様に異なる。代謝率と摂取率から、OA が *C. glacialis* の個体群に与える影響は異なると予想される。カイアシ類の第 4 生活段階は OA に対して極めて敏感であるように見えるが、第 5 生活段階は OA に対してより耐性があるように見える。これはおそらく、冬眠中の低い細胞内 pH に対応するための一般的な生理学的再編成によるものだろう。

4.2 グローバル OA ガバナンスの概要——トップダウンの視点から

4.2.1 カナダの OA 政策

カナダにおける OA 政策立案には、いくつかの提案がなされている:

- 1) 雇用機会を増やすことで教育率を向上させ、社会的脆弱性を緩和する
- 2) 水産養殖では、孵化場の手順の適応として、孵化場のインフラにもっと投資を行うべきである、
- 3) 漁業では、過剰生産能力のために漁業全体の努力を減らし、損失を軽減するために収穫を多様化すべきである。

また、石油生産はカナダの温室効果ガス排出量の大幅な増加の原因となっているため、カナダはアルバータ州のタールサンドで操業する企業への補助金を廃止すべきだという提案もある (Environment Canada 2011, 19-20)。その代わりに、クリーンで再生可能なエネルギー企業に補助金を支給し、安価な代替エネルギーの選択肢を確保すべきである。また、海岸線の保護や有害な漁業の削減・廃止に資金を投入することもできる (Ciuriak, 2012)。

2015 年からカナダは SDGs を採択した。SDGs14 のターゲット 3 では、加盟国は “あらゆるレベルでの科学的協力の強化を含め、海洋酸性化の影響を最小化し、対処する” ことに努めるとしている。カナダの現状は、“データソースを探索中” と記載されている (<https://www144.statcan.gc.ca/sdg-odd/goal-objectif14-eng.htm>)。2016 年には、ブリティッシュコロンビア州は、カリフォルニア州、オレゴン州、ワシントン州の政府とともに、「海洋酸性化と闘う国際同盟 (OA Alliance)」を設立した。

4.2.2 オーストラリア OA 政策立案

オーストラリアの国家政策の主要な構成要素は、排出削減基金 (ERF) を通じて実施される気候ソリューションパッケージであり、現在、2 つの陸上ベースのマイナス排出技術 (NET) 活動と 1 つの海洋ベースの活動、つまり、植林・造林など人為的森林再生、土壌の炭素隔離、潮汐復元プロジェクトによるブルーカーボン隔離からの排出削減のみを認めている。オーストラリアでは、OA に対する政策の準備として 6 つの重要な側面が挙げられた。

- 1) 気候変動対策、これは気候変動の実績によって反映される。
- 2) OA リテラシー、つまり、気候変動を認識し、それを深刻なリスクと考える人口の割合の評価
- 3) 気候変動に対するレジリエンスのための地域ベースの管理、例えば海洋公園、保護区、保護区、資源管理などでは、地域ベースの管理計画を OA プログラムに対するレジリエンスを明確にサポートするように適用することが極めて重要であるか、あるいは汚染、過剰採取、生態系の劣化などを含む相乗的なストレス要因を削減するメカニズムが存在する。
- 4) 研修プログラムの存在、OA を理解し対応するための専用の研究予算、GDP に対する論文数、SDG14.3 データポータルへの OA データの貢献など、研究開発にもっと投資する。また、OA を理解し対応することに焦点を当てた国際的なパートナーシップに参加することも必要である。
- 5) 気候変動に依存するセクターに OA を含めること、また気候変動に適応するためのセクター固有の戦略が存在する。気候変動への適応に焦点を当てたパートナーシップやネットワークは、OA 問題についても明記すべきである。
- 6) OA について策定された政策は、利用可能な最善の科学と一致すべきであり、意思決定はエビデンスに基づくものであり、OA 問題に対処することを目的とした政策が他の政策によって相殺されることはありえない。

例えば、オーストラリアの気候法における温室効果ガス除去の事例がある (McDonald et al., 2023)。セーフガードメカニズム --- 大口排出者 (オーストラリアの排出量の約半分を占める) の排出量をあらかじめ決められたベースラインに制限し、ベースラインを超過した場合にはクレジットを購入することを期待するものである。国レベルでの炭素や温室効果ガスの価格決定メカニズムが存在しないため、現在の排出削減要件のほとんどは、州や準州レベルの法律に盛り込まれている。ビクトリア州と西オーストラリア州は、現在、公害規制の下で温室効果ガスの排出を規制している。

もうひとつ、オーストラリアの政策立案事例として、サンゴ礁に関する事例が紹介された。具体的な対策としては、空間計画の改善、沿岸域の水質を向上させるための土地利用の改善、大型藻類を藻食魚から保護するためのトップダウン制御の促進、サンゴを食べるオ

ニヒトデの駆除強化、遺伝子組換えや遺伝子組換え生物---目に見えるものではない (Anthony, 2016)。

4.2.3 アメリカの OA 政策立案

4.2.3.1 カリフォルニア州のタイムライン

- 1999 年 海洋生物管理法 (海洋資源の保護)
- 2004 年 カリフォルニア海洋保護法 (COPA) と海洋保護協議会
- 2016 年 COPA による OA および貧酸素化削減プログラム作成 (OA を直接取り上げた最初の政策)、法案 AB2139 とともに (OA を含む、気候変動に起因する様々なストレス要因に対する適応能力の取り組みに優先順位をつけ、促進する。
- 2018 年 正式な OA 行動計画 (さまざまな州機関、調査とモニタリングへの投資、水質強化のための近海・水生再生プロジェクト、ベストマネジメントプラクティスの開発を通じて)
- 2018 年 カリフォルニア州海洋酸性化行動計画は、最も早い時期に策定された海洋酸性化行動計画のひとつであり、2018 年に発表された。その重点項目は以下の通りである。
 - 海洋酸性化の影響に備える;
 - 海洋酸性化を州の政策に統合する;
 - 海洋酸性化の原因となる汚染を減らす;
 - 海洋酸性化を遅らせ、炭素を貯蔵する生きたシステム (海草草原、ケルプの森、塩性湿地など) を導入する;
 - 影響を受ける地域社会や産業の回復力を高める。
 - 州の枠を超えた取り組み (および他の管轄区域からの教訓の導入)。

4.2.3.2 オレゴン州のスケジュール

- 1991 年 海洋政策諮問評議会 (OPAC) : 海洋問題に関する州および関連機関の政策を導く専門家の組織)
領海計画 (オレゴン州の海岸と海洋環境の天然資源と生態学的機能、および沿岸地域社会の長期的繁栄を維持するための一連の目標)
- 2017 年 SB1039 (オレゴン州初の OA に特化した正式な法律) と海洋酸性化と低酸素に関する海洋連携協議会 (OAH 協議会)
- 2019 年 OAH 協議会によるオレゴン州の OA 行動計画 (カリフォルニア州とオレゴン州は、既存の環境法を使って新たな OA 政策アプローチを模索し続けている。OA に関する新たな連邦法の大々的な制定に代えて、各州は明らかに、OA に局所的に対処するためのレバーとして使用できる既存の連邦環境政策を重視している。具体的には、オレゴン州は、水質浄化法と沿岸域管理法を利用した OA 緩和政策の変更を検討した。

4.2.3.3 ワシントン州のスケジュール

- 2011年 ・ワシントン州の貝類資源の回復と拡大、ワシントン州における環境保護と家族賃金の雇用創出に資するためワシントン州貝類イニシアティブ
- ・ワシントン州ブルーリボンパネル(6つの行動領域における18の重要な初期行動を特定)
 - ・ワシントン大学海洋酸性化の影響と適応センター
- 2012年 ・海洋酸性化の要因に対抗するため、連邦レベルでの水質浄化法(CWA)および大気浄化法(CAA)
- ・地域の発生源削減の道を提供するため、州レベルでワシントンの成長管理法、海岸線管理法、州環境政策法、水質汚濁防止法、酪農栄養管理法、森林施業法
- 2012～2013年 温室効果ガス排出削減(SB5802)、
- 2013年5月 ワシントン海洋資源諮問委員会(SB 5603)、

4.2.4 スコットランドのOA政策立案

スコットランドにおける養殖業のOAへの適応を支援する政策と計画における適応能力の4つのカテゴリー:

【気候変動への適応】

- 1) OAは「自然を基盤とする産業」にとってのリスクであり、保護、回復力、強化を支援する生態系にとってのリスクである。
- 2) 他の種や海藻への養殖の多様化の可能性が指摘されている。
- 3) 水質管理に関連して、空間計画と河川流域管理計画(RBMP)が強調されている。
- 4) 新しい気候変動と海洋酸性化サブグループによる協力体制。
- 5) 地域の適応努力を支援するための全国フォーラムが提案された。

【海洋計画】

- 1) 養殖セクターの成長、気候変動への適応、生態系の保護と強化に取り組む国家政策
- 2) OAは貝類漁業への脅威であり、炭素吸収源からの放出に対する追加的なリスクであり、将来の海洋保護区の指定において考慮されるべき要因であると認識されている。
- 3) 地域政策は、多様化、沿岸のリスクを軽減するためにさらに沖合に養殖場を設置すること、海洋利用の共存を支持している。
- 4) シェットランド海洋計画は、地域全体の養殖開発管理計画を奨励し、地域における養殖開発の全体的なアプローチを支援する。

【養殖計画】

- 1) 養殖産業の成長は、研究とイノベーションを通じて支援された。
- 2) 2022年までに養殖リースと条件を見直す計画。

3) 政府主導による、養殖開発のための空間ガイダンスの継続的改善プロセス。

4) 貝類養殖地域の指定は6年ごとに見直される。

【養殖免許】

- 1) 一定規模までの既存施設における用途、場所、設備の種類の変更、または陸上計画制度に基づくさらなる開発申請が必要。
- 2) 管理区域は、主要な問題(主に魚の健康)に関連した管理を調整するために推進されるが、拡大される可能性もある。

4.3. 世界の OA 適応戦略の事例研究—ボトムアップの手法

政府のリーダーシップは、草の根の努力だけではできない方法で、法律や行政権を通じて OA への対応を制度化することができる。しかし、政府が OA への対応を制度化した後も、研究や実施への継続的な集中と参加を確保するためには、草の根の協力が不可欠ではないにせよ、貴重である。

4.3.1. 「オレゴン・ウェイ」(ボトムアップ・アプローチ)

オレゴン州と西海岸は、現在海洋の変化を経験しており、海洋食物網のシフト、漁業の生産性の低下、海洋依存型ビジネスの経済機会の減少など、さらなる傾向が予想される。たとえば、ウィスキー・クリーク貝類孵化場は、海洋酸性化による直接的な影響を最初に経験した場所のひとつである。もうひとつの例はダンジネスクラブであり、その漁獲量は過去数十年にわたって空間的・時間的に変動しているが、これは OA に対する脆弱性が原因かもしれない。オレゴン州は、産業界、研究者、そして海洋変化の初期段階から関与してきた管理者たちの継続的な献身と関与を通じて、将来の海洋変化を緩和し、それに適応するための地域的・地方的努力のための政策と行動の枠組みを作り上げる積極的なパートナーである。多くの沿岸地域社会にとって、地域経済と社会の安定を維持することは、海洋酸性化と貧酸素化の脅威に対する回復力を構築するための中心的な課題である。オレゴン州では、コミュニティの組織化が効果的な動機づけと変革の原理となっている (Whitefield et al., 2021)

【実践コミュニティ】

共通の活動、関心事、あるいはアイデアに対する情熱を共有し、集団目標を達成するために共に行動する人々のグループである。科学と漁業者の間で、海洋観測や科学に関する積極的な双方向の情報交換を促進することを目的としている。例えば、コラボレーティブ・モニタリング・プラットフォームは、塩分、水温、溶存酸素などの生態系データをほぼリアルタイムで科学者、一般市民、漁業者に提供し、生物を維持するための最適な判断を下す。さらに、オレゴン州の漁業コミュニティ全体に、海洋や河口域の状況の変化や、それが地元のビジネスにどのような影響を与えるかについての意識を高めることができる。

【場所のコミュニティ:】

働き、訪れ、暮らし、あるいは長い時間を過ごす場所に対する共通の情熱から、ともに行動する人々の集まりである。Yaquina 湾と Tillamook 湾は、沿岸全域の OAH モニタリングネットワークにおいて最優先事項として特定された 2 つの場所である。Tillamook 湾にはハマグリが生息し、カキの養殖業が盛んで、多くの重要な海洋生物にとって重要なアマモ場とその他の生育地がある。同様に、Yaquina 湾もまた、貝の採取、漁業や魚の加工、伐採、海運、観光、カキの養殖など、沿岸のコミュニティによって何世代にもわたって文化的、レクリエーション的、商業的な目的で利用されてきた。この両分野では、短期的で多様な調査によって情報を得るのではなく、長期的なモニタリングプロジェクトが必要とされている。場世のコミュニティは、限られた資源で共通の目標を達成するために、地域社会の絆とコミットメントを強化しながら、協力関係を促進することができる。モニタリング・データは、地元で悪化している状況を把握し、海洋の変化を地元や個人のスケールで関連づけ、最終的には管理戦略への洞察を提供するのに役立つ。沿岸域に設置された手頃な価格のセンサーに加えて、影響を受ける沿岸コミュニティと経済の回復力を向上させるために、最終的には沿岸全体のネットワークに統合するために、西海岸に沿ってモニタリング・ノードを確立することが重要である。

【ガバナンスのコミュニティ】

同じような枠組みや管轄範囲において、管理、規制、または意思決定能力を共有し、共通の関心や情熱のために集団目標を達成するために協力する人々のグループ。資金や能力の増強が限られている中、オレゴン州のアプローチは、変化をもたらす、既存のプログラムを活用し、活動を拡大するために、OA 活動を既存のプロセスに統合することに重点を置いてきた。

オレゴン州には、先進的な環境法の歴史がある。「オレゴン・ウェイ」(ボトムアップ・アプローチ)という公共プロセスのマントラを用い、州全体の環境イニシアティブは地域レベルで始まり、地域の行動を通じて勢いを増してきた。オレゴン州は、研究者、漁業者、NGO、管理機関、沿岸コミュニティなどを巻き込んだ強力で協調的なアプローチを構築する上で、こうしたコミュニティから大きな恩恵を受けている。

4.3.2 カリフォルニアの貝養殖業者

4.3.2.1 カリフォルニアで観察された環境の変化(付録 8.1)

すべての聞き取り調査において、海洋病害と病原体が環境への影響として頻繁に言及された。また、降雨と藻類の大発生も多くのインタビューで言及された(図 13)。ほとんどの生産者は、海水の炭酸塩の化学的变化や OA に起因する影響を疑い、懸念していたが、この変化を検出することができないことや、影響を OA に特化することができないことも挙げていた。例えば、ある生産者は、炭酸塩化学と降雨との直接的な関連性を観察し、「その年は冬に降雨量が非常に多く、pH が極端に低下した。別の生産者は、炭酸塩

の化学的変化を測定しており、「pH 値を測定する調査ブイがひとつあるのですが、それは劇的なものでした。つまり、成長が半分に落ち込んだのです。」と述べているが、この場合も、特に OAトレンドの影響とはされていない。

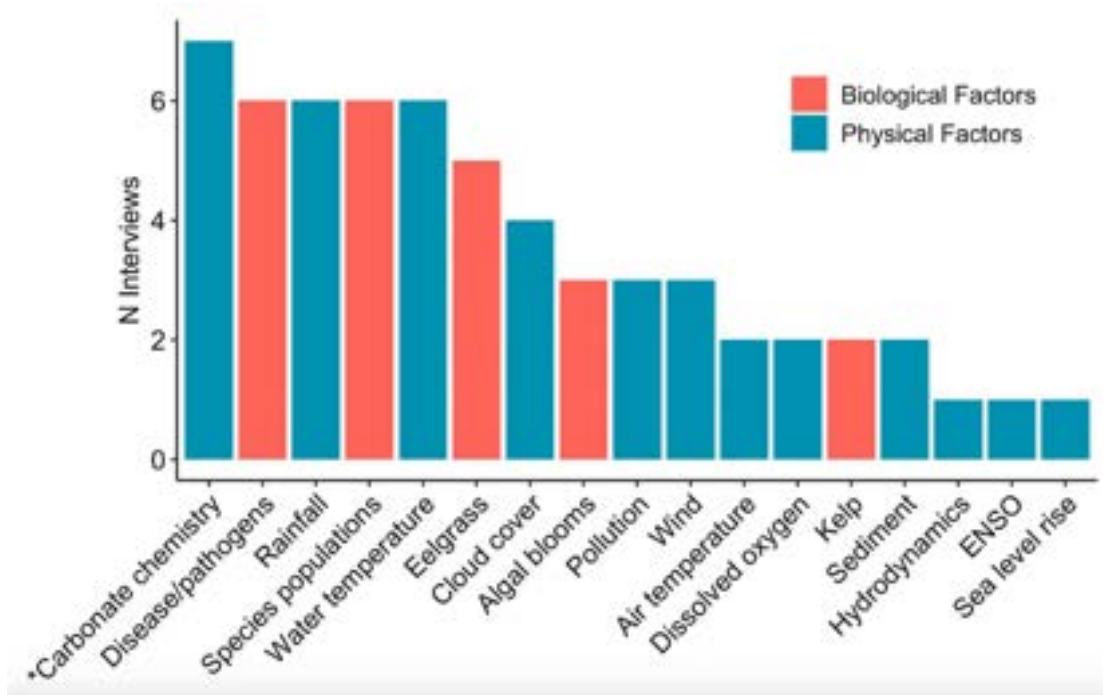


図 13. カリフォルニアの貝類養殖業者へのインタビューで言及された一般的に観察される環境の変化と影響 (Ward et al.,2022)

4.3.2.2 カリフォルニアの農家から提案された適応戦略

【政策とネットワーク】

最も頻繁に議論された戦略は、政策とネットワークのカテゴリーに属し、許認可／規制の変更と ネットワークの構築／依存が最もよく議論された適応戦略であった(図 14)。人脈づくりは、業界全体の業務効率、制度的知識、ビジネスの成功を向上させるために、人脈を築き、情報を共有することによる適応戦略として説明された。科学者とのつながりは、科学的知見や海洋状況に関する知識を生産者に伝えることを促進した。

【漁場管理】

数多くの種やライフステージを追加培養することは、生態学と経済学の両分野で応用されている「ポートフォリオ効果」に似た、一種の保険となった。生産者はまた、より柔軟な経営を実現するために、培養方法、設備、あるいは場所を変更したり、拡大したりしたいという願望を表明した。これらの戦略の具体的な内容は、場所(陸上か湾内か)、魚種、養殖のライフステージなど多くの要因によって、生産者によって大きく異なる。特に陸上養殖場では、低 pH が幼生や稚貝に悪影響を及ぼすことを考慮し(Hauri et al., 2009; Kroeker et

al., 2013)、この戦略は、西海岸の貝類養殖における OA 適応の鍵であるが (Barton et al., 2015)、貝類が湾内の水域に入ると、生産者が炭酸塩の化学的性質をコントロールする能力は大幅に低下する。

【科学】

貝の健康と死亡の要因をよりよく理解する必要性は、1 人を除くすべてのインタビューで言及された。病気、温排水、OA、広範な環境変化による死滅に対して、多くの養殖業者は適応能力を向上させる手段として、遺伝的耐性を持つ貝の系統開発を挙げた。モニタリングや現場固有のデータの不足は、こうした科学的知識のギャップと密接に関係しており、生産者が死亡現象を予測し、それに対応することを極めて困難にしている。

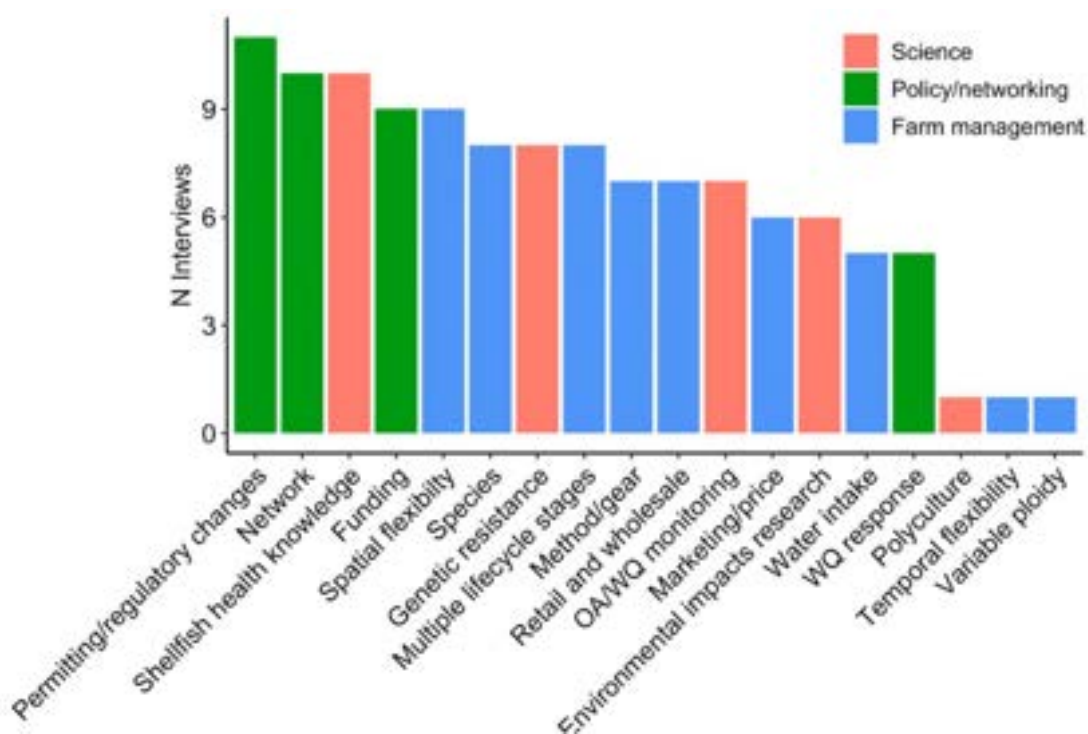


図 14. 環境変化に対する適応戦略の特定 (Ward et al., 2022)

カリフォルニアの貝類養殖業者は、数多くの環境変化を直接観察し、経験しており、その中には、より簡単に観察・測定できるものもある。OA については、未知の潜在的なストレス要因として認識され、生産者は、環境、経済、政治的なストレス要因から生じる変化に適応するための戦略を数多く挙げている。いくつかの戦略は OA を直接の対象としていたが (pH モニタリングの改善や OA 耐性のある種苗の開発など)、広範な戦略は複数の多様なストレス要因への適応を支援し、漁場の回復力を高めるものであった。適応能力を促進するためには、ストレス要因と関連戦略の相互関連性を認識した協調的アプローチが必要である。これにより、ある種のストレス要因を軽減することで、生産者は全体的な回復力を向

上させるために、他のストレス要因に関連する適応戦略の実施に積極的にリソースを割り当てることができる。

4.3.3 オレゴンの貝養殖業者

4.3.3.1 オレゴンで観察された環境の変化

最も頻繁に報告された環境ストレス要因には、捕食者やその他の迷惑種が含まれる。ゴーストシュリンプなどの埋没性エビ類やアマモのような生息域に影響を与える種は、カキが生育する生息域に影響を与えた。その他の物理的環境要因としては、気温の上昇、干潮時の風、大雨、低酸素などがある。OA については、半数の養殖業者が孵化場の問題として報告している。最も頻繁に報告された経済的ストレス要因としては、人件費、例えば従業員の雇用や維持、消耗品や燃料のコスト、販売や輸送のコスト、過去や現在における孵化場からの幼虫のコストや入手可能性などが挙げられた。

最も頻繁に報告された社会的ストレス要因は、COVID-19 の大流行であった。

漁家は 2 つのカテゴリーで規制をストレス要因として挙げた： 1) 日常事業を開始し維持する能力に影響する許認可や規制、例えば許認可の複雑さや期限、新種を培養する能力、2) 水質に関する包括的な連邦政策、例えば水質浄化法。

4.3.3.2 農家から提案された適応戦略

【政策とネットワーク】

政策とネットワークのテーマで最も頻繁に記述された適応戦略(農家の 80%)は、ネットワークであった。農家は、農業の最も効果的な技術について学ぶために、他の農家とコミュニケーションをとることがいかに重要であるかについて、具体的な例を挙げている(図 15)。政策とネットワークにおけるもうひとつの適応戦略は、「許可と認可」(漁家の 53%)であった。多くの農家が、許認可(貝類養殖許可、食品輸送許可、新しい養殖タイプの許可など)に多大な時間を費やしていることを説明し、事務作業を減らし規制を合理化することで、ストレス要因に適応するための行動をより迅速にとることができるようになることを述べた。

【漁場管理】

マーケティングと価格の調整は、最も頻繁に報告された農場経営戦略であった(60%の漁家)。具体的なマーケティングと価格戦略としては、インフレに対抗するためにカキの価格を上げること、ポートランド市に廃水のろ過用に空のカキの殻を売ること、ソーシャルメディアで広告を出すこと、小売商品を多様化すること、パンデミック中に必要に応じて卸売りとし小売りの比率を変更することなどが挙げられた。養殖業者は、十分なリース面積と、生息域の問題が発生した場合に製品を新しい地域に移動させるための養殖タイプの柔軟性、オフボトムシステムのような異なる養殖技術に切り替えるための許可の柔軟性など、空間的な柔軟性の必要性を述べている(養殖業者の 47%)。

【科学】

貝の健康に関する知識は、53%の養殖業者が挙げた一連の戦略である。この適応的なカテゴリーには、さまざまなライフステージにおけるカキへの影響を理解すること、死亡率を減らすために必要に応じて水質をモニタリングし調整することなどが含まれる。

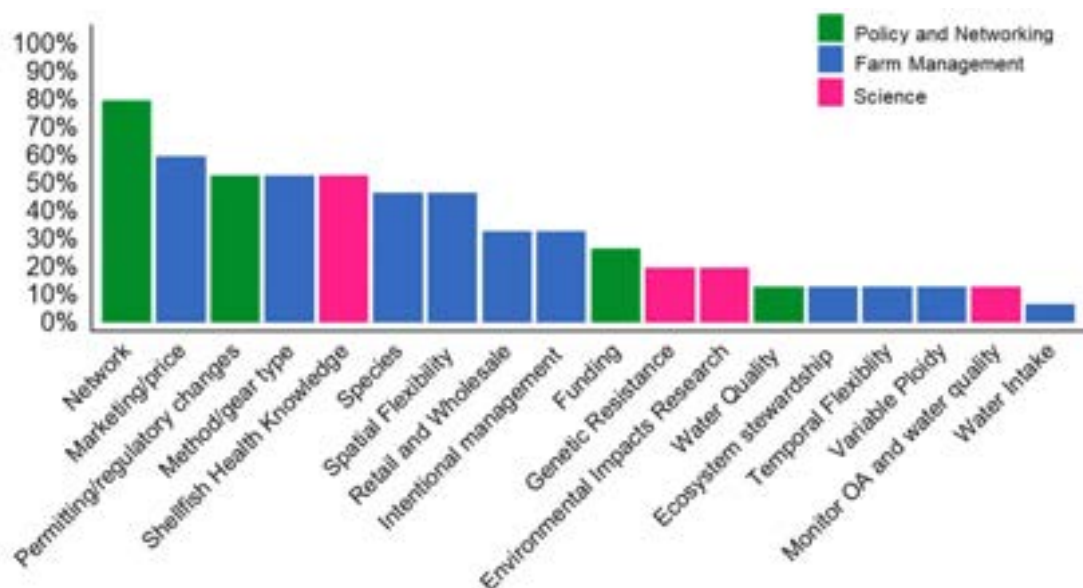


図 15. オレゴン州の農家の適応戦略のカテゴリー (Green et al., 2023)

OA に対処するための「万能の解決策」は存在しない。なぜなら、その起源と影響は多面的であり、また、現象の情報と理解を深め、原因を緩和し、適応対応に情報を提供し、回復力を構築することができる多くの行動が存在するからである (Turner et al., 2021)。

4.4 OA に対する世界の貝養殖業者の視点

4.4.1 世界のカキ養殖業

世界のカキ養殖生産量の急激な増加はごく最近起こったことであり、1990 年以来特に 5 倍に増加している。中国は世界のカキ養殖生産のほとんどを占めており、生産量の 86%、金額では 78% を占めている。1980 年代以降、中国は天然採苗から工場孵化場や池でのエコ孵化場による人工採苗技術に切り替えてきた。しかし、2016 年に輸出された中国の養殖カキは 1% 未満であり、中国は世界のカキ養殖市場に大きな影響を与えていないことになる。フランスは 1950 年代まで最大のカキ養殖国であったが、その生産量は減少している。生産量が減少しているにもかかわらず、フランスのカキに対する需要は依然として強い。カキの価格が上昇しても、潜在的な輸出業者によって高値がもたらす機会が利用されていない。米国は天然カキ漁業が盛んな数少ない国のひとつであるが、疲弊したカキ漁業を補うためにはカキの養殖生産が必要である。しかし、養殖リースゾーンの制限、立ち上げ

コスト、維持コスト、社会的な大きな反対など、カキ生産を制限する要因は多い。輸入カキは主にカナダ、メキシコ、韓国産である。韓国は世界第2位の養殖カキ生産国である。中国と同様、カキ生産のほとんどは国内生産にとどまっており、韓国は世界で2番目に多くの養殖カキを生産しているものの、そのほとんどが世界市場に影響を及ぼしていないことを示唆している。日本は世界第3位のカキ養殖生産国である。高品質で安全なカキ製品に対する需要はまだある。また、日本の産業は国内市場に重点を置いており、生産量の1%未満しか輸出されていない(Botta et al.2020)。カナダのカキ生産量はトップではないが、生産量は着実に伸びている。アメリカからの需要の増加は、カナダに産業を拡大し、アメリカ市場を開拓する機会を与えている。

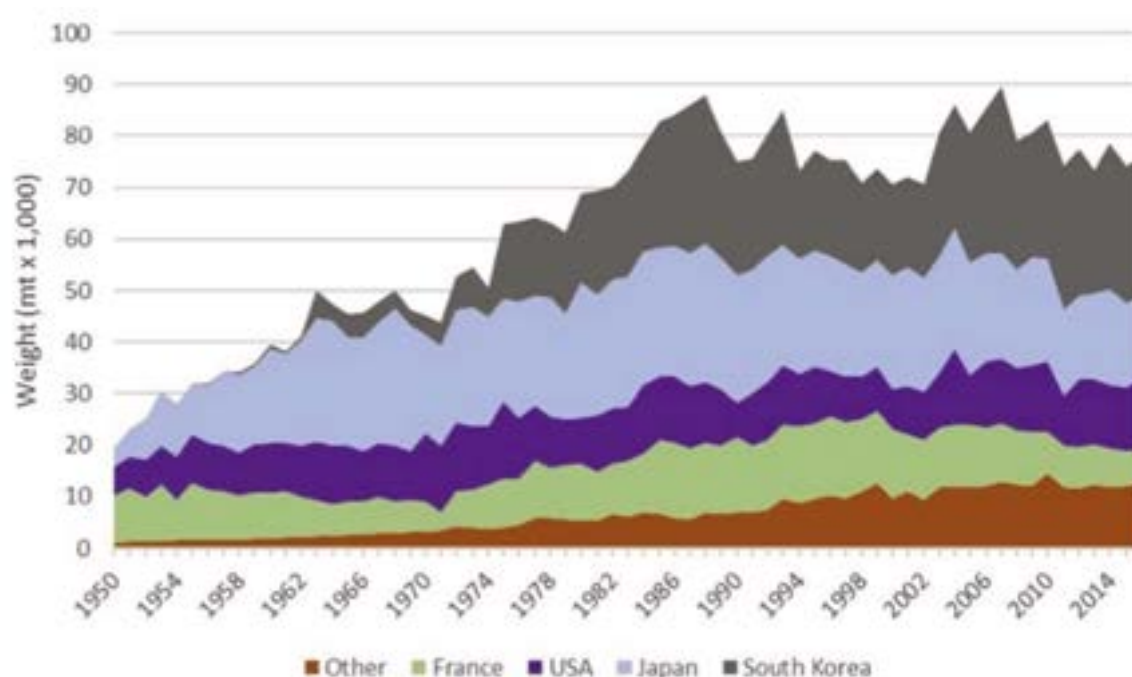


図 16. 中国を除く上位生産国のカキ養殖生産量(生産重量ベース)

4.4.2 カキ養殖の方法

4.4.2.1 底面養殖

カキを海底で養殖する底面養殖は、天然カキに最も近い養殖方法である。養殖カキは、広いカキのように表面に着底することはないが、同じ水を濾過し、殻の色や剛性に影響を与える同じ底に住んでいるため、在来のいとこと同じ成長パターンを共有している。底面養殖の主な利点は、カキが泥からミネラルを吸収したり、潮の満ち引きや荒れた天候の時に波の影響をより多く受けたりするためかもしれないが、頑丈でボリュームのある殻を作ることができることである。しかし、海底で窒息死したり、外敵に襲われたりして、カキが海底に流失してしまうという大きなデメリットもある。また、底で養殖されたカキには砂が多く含まれる可能性がある。

4.4.2.2 オフボトム法

カキの養殖には、養殖場の地理的条件や個人の好みに応じて、多くのオフボトム法がある。オフボトム法は、カキが一般的に密閉され、天候から保護されるため、全体的な収量が向上する可能性がある。カゴ、ラック&バッグ、トレイ、表面培養または浮遊培養を使用したオフボトム培養方法があります。



図 17. アメリカ西海岸におけるカキの垂下式養殖

垂下式養殖は、アメリカ西海岸で一般的に行われているもので、水面に浮かべたブイにカキを吊り下げて養殖する。カキは水面下に吊るされた袋に入れられ、潮の満ち引きによって上下する。吊るされた養殖カキは、常に波の影響を受けている。しかし、研究によると、カキ袋の中の状態(溶存酸素、pH、濁度、クロロフィル-a)は、バイオフィウリングや飼育密度によって悪化する可能性のある水交換速度の低下によって誘発される時空間的な遅れのために、周囲の条件と異なる場合がある。従って、養殖業者は、飼育管理上の決定を通じて、浮き袋内の水パラメータに影響を与えることが示唆されている(Grenn and Walton, 2023 PCSGA)。調整可能なロングラインシステムは、一定の間隔で配置されたライザーポストと杭の間に張力をかけたモノフィラメントラインで作られており、水柱内でのバスケットの位置を調整することができる。カゴとカキの汚れを防ぐため、カゴは定期的に水から上げられ、約 24 時間、上のライザークリップにラインが置かれる。底面養殖法に比べ、長鎖養殖法はアマモ密度に与えるダメージは少ないが、アマモの成長速度にはマイナスの影響を与える(Tallis et al.,2009)



図 18. カキ養殖のための延縄システム

4.4.3 カキの養殖とアマモ

アマモ *Zostera Marina* は OA 改善効果が最も大きいと考えられるが、*Z. pacifica* は小規模で局地的な取り組みのために考慮されるかもしれない。海草は、半日周期の潮汐力学と光合成／呼吸による日ごとのパターンを示し、光の利用可能性の変化による季節差が見られた。カリフォルニアでの予備調査では、いくつかのアマモ場が特定の季節に pH に測定可能な影響を与えることが示唆されている。アマモ場が炭素貯留を促進する可能性を示唆する証拠もあるが、その規模は水柱や海底を陰にする他の「マット形成」種よりも小さく、またアマモ場によって、その下にある堆積物や水流の特性、水深、海草のバイオマスによってかなり異なる可能性がある (Nielsen et al.) アマモが堆積物の炭素含有量に及ぼす最大の影響は、アマモの存在に関係なく有機物を自然に捕捉する細かい泥ではなく、砂質の堆積物で発生する。これは、温帯沿岸河口域では堆積物の粒径が堆積物の有機炭素含有量を支配的に制御しているためで、低流量では細かい粒子が堆積し、これらの細かい泥粒子は体積に対する表面積の比率が高いため、アマモの有無にかかわらず、より多くの有機物を捕捉する (O'Donnell, 2017)。

4.4.3.1 オレゴンのアマモとカキのケーススタディ

太平洋貝類養殖の生存率を改善し、生産性と持続可能性を最大化する方法を開発する。このプロジェクトの目的は2つある：

【このプロジェクトの目的】

- 1) 西海岸河口域におけるカキ養殖生産を制約する稚貝死亡の原因として、ゴカイ類と海洋酸性化を定量化し、モデル化する。
- 2) 既存の生息域に対する貝類養殖の影響を定量化し、河口景観スケールで魚類と無脊椎動物による貝類養殖を含むこれらの生息域の利用を定量化する。

【このプロジェクトの主な成果】

1) 2004年から2010年にかけては burrowing shrimp の繁殖はほとんど見られなかったが、2011年～2017年にかけては再び繁殖が見られた。ワシントン州におけるエビ駆除のための農薬とイミダクロプリド(クロロニコチル系殺虫剤)が、世間一般の認識と市場の問題から一時中止されたため、エビの加入が大きな懸念事項となった。そのため、貝床に生息するエビの個体数が、防除を実施する必要があるか、あるいは貝を育てることができなくなる閾値に近づく時期を予測するための新たな繁殖モデルが開発された。河口域の植物であるアマモが、光合成と二酸化炭素の取り込みによって水質を変化させ、カキのスパッツに影響を与えるかどうかは、2015年にオレゴンで行われた実験によって実証された。アマモの中に置かれたカキのスパッツはより多く生き残り、成長も早かったが、河口沿いのより幅広いステーションに配置されたカキは、アマモが pH に与える影響は場所特異的である傾向があり、最初の成長期が終わるころには個々のスパッツには明確でないことが示唆された。西海岸で実施された別の研究では、カキの生存率と状態は、底面養殖に比べて底面外養殖の方が改善され、底面での生存率は1平方メートルあたり75尾を超えると特に低下することが示唆された。また、周囲のアマモの量によるカキの成績の差は見られなかった。このことは、アマモがカキの収量を押し上げるか減らすかのどちらかであることを示唆している。餌の濃度やフジツボがカキと場所を取り合うなど、他の要因の方がより重要な考察に値する。

2) カキの養殖は生息地として考慮されておらず、単にアマモへの潜在的な影響を最小限に抑えるためである。しかし、その結果、海底外での延縄養殖は、海底での養殖と同じような構造を作り、同じような魚類や無脊椎動物を引き寄せることがわかった。

4.4.3.2 カキ養殖を伴うアマモ政策

【カリフォルニア州】

カリフォルニア州は、マグナソン・スティーブンス漁業・保全管理法の下で連邦政府の保護を受けていることから、アマモやアマモの機能を「正味で損失させない」という方針を掲げている。たとえば、ある養殖業者は「(アマモは) 私たちのカキ養殖場のあちこちで繁茂しています。だから、アマモが水質にとって良いものであることを願っている。貝類が同時にアマモ

に利益をもたらす可能性がある場合、貝類養殖とアマモの管理は複雑であり、両者は密接に関連している可能性がある。

【オレゴン州】

アマモは重要な生態系機能を提供し、NOAA によって必須魚類生息地として保護されているが、普遍的にストレス要因として認識されているわけではない(NMFS, 2007)。一部の養殖業者は、カキはアマモにとってプラスであると説明した：「アマモの群落は、カキの群落には見られない。通常カキが生育している場所には、アマモが繁茂しているのです」。

4.4.4 貝類養殖業者の OA 意識 (表 2)

4.4.4.1. フランス

カキ養殖業者の報告慣行と行動を調査し、カキ死亡の報告プロセスに影響を与える要因を特定するために、現地調査が実施された。シャラント＝マリティーム県のカキ養殖業者を対象とした事例研究が計画され、27 の非報告養殖業者と 89 の報告養殖業者へのインタビューに基づいている。養殖業者がカキの死亡率を報告する決断を後押しする要因として特定されたのは、死亡率報告に対する認識不足と報告意欲に関するものであった。特に、カキ生産損失に対する金銭的補償は報告に対する明確なインセンティブとなるようだが、報告制度の目的に対する認識不足と組み合わさった慣れ効果によって、カキ養殖業者は病気発生の早期発見よりもむしろ、報告することで自分たちの利益を得ようとしている (Lupo et al.,2014)

4.4.4.2. 米国：ワシントン州、オレゴン州、カリフォルニア州の世論調査

この調査では、貝類と貝類養殖に関する認識と行動を評価し、これらの活動に対する社会的態度に何が影響しているかを調べた。調査の結果、10 郡の調査地域全体で貝類養殖に関する知識が限られていることが明らかになった。全回答者の半数以上が貝類養殖場を見たことがないと回答し、43.1%が貝類養殖の実践について「まったく知らない」と答えた。さらに、得た情報が否定的か、中立か、肯定的かという質問に対しては、「貝類養殖に関する情報を得たことがない」という回答が最も多かった。これらの結果は、ワシントン州、オレゴン州、カリフォルニア州において、貝類に関連する活動に関する教育とアウトリーチを強化する明確な機会を示している。また、情報を共有する最も効果的な手段は、テレビ、新聞、ウェブサイト、そして公共イベントでのブース出展であることが示唆された。これらの情報源は、調査対象者全体の好みであると同時に、回答者が地元の海域の健全性を見極めるために頼りにしていると回答した情報源ともよく一致している。また、この調査では、貝類の養殖と国内水産物生産の増加を支援する政策に対するかなりの支持も明らかになった。この政策の質問に対する最も一般的な回答は「反対でも支持でもない」であったが、「強く支持する」という回答は、すべての郡で「強く反対する」という回答を上回った。ワシントン州では、「強く支持する」が「強く反対する」を 2 対 1 で上回り、オレゴン州では貝類養

殖拡大への「強く支持する」が「強く反対する」を6対1で上回り、カリフォルニア州では14対1で上回った。同様に、州内の近海養殖生産を増やすべきか、減らすべきか、あるいは現状を維持すべきかという質問に対しては、「増やすべき」が「減らすべき」を4.5対1で上回った。

貝類養殖政策と拡大に対する市民の支持を示すこの証拠は、地域的にも全国的にも貝類問題を提起し続ける強力な根拠となる。その例として、ワシントン州貝類イニシアティブやNOAAの全米貝類イニシアティブが挙げられる。これらのイニシアティブは2011年に発足し、広範な地域的パートナーシップと支援を得ている。これらのイニシアティブは、貝の養殖と回復の機会を拡大するために重要なリーダーシップと焦点を提供し、継続されるべきである。本調査の回答者は、貝類養殖の「大きな利益」、特に地元で生産される水産物の提供、雇用の創出、地域および州経済の改善、天然漁業への圧力の緩和を認識している。これらの利益を実現し続けるためには、地元や地域の貝類養殖支援の普及が必要である。

4.4.4.3. カナダ

社会調査によると、養殖の意思決定と開発は、幸福を考慮した社会生態学的な視点を持つことで恩恵を受けることがわかった。ベインズ湾の住民を対象に18名のインタビューが実施され、6名が養殖業に直接関与している一方、12名は養殖業に関与していないことがわかった。養殖業は環境、経済、経験の面で個人に影響を与える。環境への影響には、水質、野生生物、ビーチの生態系、海底、運搬能力などが含まれる。地元の経済活動は優先事項であり、これには雇用機会も含まれる。経験という観点では、貝の養殖は地元の歴史やアイデンティティにつながる生活様式であり、車両の騒音や養殖による瓦礫や車庫が、インタビュー対象者の間で不満とされた(Anna and Murray, 2015)。(Anna and Murray, 2015)。

カナダBC州におけるOA報告と貝類養殖セクターの調査が行われた。BC州の貝類養殖業者に対するOAに対する認識とダイオプの経験に関するアンケート調査の結果と、メディア記事のサンプルにおいてOAの科学と地域的な影響がどのように表現されたかを理解しようとする主題分析が行われた。

すべての記事が危機の物語を採用し、75%強が科学的不確実性を伝えていた。55%強が、地元の科学者、貝セクターの代表者、BC州の貝養殖業者のうち1人以上へのインタビューを組み込んでいる。調査の結果、多くの回答者がOAを貝類セクターの脅威と捉えているのは、広範かつ／または将来を見据えたものであり、直接的な意味での脅威、たとえば貝の死滅の原因としてとらえている回答はそれほど多くないことが明らかになった。OAは、より広範な経営上の課題に比して、優先順位が低いことが多かった。気候変動をより地元で根ざしたものとすることを意図した報道では、科学者と地元の人々の声を合わせて、その土地に根ざしたストーリーを伝え、読者に共感してもらおうとすることが多い。

すべての記事は、OA を否定的かつ緊急なものとして表現し、現在および／または将来の影響を、地元の雇用や地域経済、国家経済に関連づけた。しかし、当時 BC 州貝類生産者協会の会長であった一人を除いて、中小規模の養殖業者や農家を引用した記事は皆無であった。

37 人のアンケート回答者のうち、46% が OA について全く知らないか、少ししか知らないと回答した。約 40% が OA が業界にとって脅威であると感じ、10% 強が OA を全く懸念していないと感じた。自分の農場で枯死した経験があると答えた 70% のうち、OA が直接の原因であるとしたのはわずか 8% であった。これらの結果を私たちは、多くの回答者が OA を貝類養殖セクターの脅威として、大まかに、あるいは将来を見据えた形で認識しているが、直接的な意味では認識していない、と解釈している。OA について詳細な情報を得られていると感じている人は少なく、自分の養殖場での死滅が OA によるものだと考えている人はほとんどいなかった (Drope et al., 2023)。

自由記述式の質問では、回答者に農場での課題や、枯死現象の原因と思われるものについて尋ねた。最も多く挙げられた課題は、キャッシュフロー、市場、労働力(すなわち経済状況)に関するものであった。2 番目に多かった課題は、高品質のカキ種子の入手、種子の価格、種子の保存に関するものであった。課題、種子の存続、枯死事象の原因と思われるものについての自由形式の質問に対する回答で、OA について具体的に、あるいは名前を挙げて言及したものはなかった。

この調査から、研究者とジャーナリストは、気候変動と気候変動への適応について、それぞれ根本的に異なる方法で、地域にとって重要な報道に取り組む必要があることがわかった。また、地元を根ざしたジャーナリズムを目指すのであれば、世界の他の地域からのより幅広い声や詳細な情報を統合することは、直ちに見過ごされたり排除されたりすべきではない。

位置性とは、物理的な場所と実体験が、場所内外の他者とのつながりを含め、個人が世界に関する情報をどのように受け取り、解釈するかを形作るという主張である。シチュエーション・アネスとソリューション・ジャーナリズムは、一般的に「地元」を中心に引かれる境界線や、一般的に「環境専門家」とされる資格や実体験の種類を超えたところに目を向けることで、重要な学習や異文化共有の機会が解き放たれることを思い起こさせる。このことは、気候変動に関する報道や、情報に基づいた適切な適応に関する一般市民の議論を促す際に、特に重要な意味を持つだろう。

表 2. 世界の貝類養殖業者の OA 意識調査研究

Country Name	Region within country	Extent of known OA impacts in the environment (list literature, make brief statement)	# of farms/scale of farms/longevity of farms	Species of farmed	Literature available on farmer perceptions about OA and OAH	Notes (other factors social study focusing on oyster farming)
United States	West coast	yes-	Washington -big, lots of farms, OR and CA, smaller scale, less farms	Oysters + other shellfish	Literature examples: Ward Green Mabardy	
United States	East coast					Gender equality, women's role in aquaculture (Maine and New Hampshire)
France	Chstente-Maritime			Pacific Oyster	Not found	Oyster mortality report willness depending on the financial compensation
Japan						
Canada	BC	Yes- But in a future-looking way instead of an immediate sense	BC, Canada	Oysters and other shellfish	Drope, et. al., 2023	
South Korea						Red tide

4.5 海洋ベースの二酸化炭素除去技術(表 3)

4.5.1. 炭素隔離のための大型藻類の養殖

大型藻類の利用は、養殖と生息地の回復を通じたローテク海洋 CDR 戦略である。大型藻類は、食品や他の用途のために収穫することができる。そうでない場合、これらの大型藻類は自然に海底に沈み、大型藻類由来の炭素の大部分は、底生堆積物に数十年間蓄積される可能性がある。これは効率的で環境に優しい炭素隔離方法かもしれないが、意図しない生態系への影響も考えられる。例えば、栄養塩の再配分は、生産を微細藻類から大型藻類にシフトさせるだけで、隔離効果は限定的かもしれない。さらに、自然の季節サイクルから栄養塩類が取り除かれることで、将来の地元での生産が制限され、酸素欠乏や酸性化につながる可能性もある(表 3)。

4.5.2. 海洋アルカリ度の向上

海洋アルカリ性強化は、海水のアルカリ性を高めることによって海洋の CO₂ 貯蔵能力を高める努力を意味し、pH を上昇させることによって海洋酸性化を緩和するというコベネフィットもある。アルカリ性物質の採掘と輸送、あるいは除去された酸の貯蔵と中和による調達、鉱物の風化促進による微量元素の汚染、自然の化学的循環を変化させる危険性など、金銭的にも二酸化炭素排出量的にも高コストであるという欠点が考えられる。また、未知の生物学的影響もある。そのため、海洋アルカリ性の強化は、これまでのところ、実験室やモデリングによる研究に限られている。

4.5.3. 直接海洋除去

海洋直接除去とは、処理水の pH を変化させることによって、海洋水から CO₂ を直接除去・回収する技術を指す。この方法の利点は複数ある。スケーラブルであること、沖合での展開が可能であること、回収された CO₂ によって価値ある商業製品を作ることができること、再生可能な資源をこの電気的方法に使用できることである。主な欠点はコストである。

4.5.4. 生物学的炭素ポンプ強化

海洋施肥は、人工的な湧昇・湧下とともに、生物学的炭素ポンプを介した大気から海洋への CO₂ 移動を増加させることによって、意図的に海洋の炭素吸収量を増加させる。微量栄養素の施肥は、比較的 low コストで迅速かつ効率的に大気中の CO₂ 濃度を下げる技術として提案されている。この炭素の大部分は、水柱中を輸送される間に再鉱物化されるため、最終的に深海の堆積物に到達し、長期的に隔離されるのはごく一部であることに注意することが重要である。

人工湧昇は、冷たくて栄養豊富な湧昇水を光帯に送り込み、そこで肥料効果を発揮させることで、栄養塩施肥のコストを削減する方法の一つとして提案されている。しかし、大きな欠点は、栄養塩類に富んだ湧昇水は、利用可能な栄養塩類に比例して CO₂ 濃度も上昇させ、炭素が植物プランクトンによって隔離されない場合にはアウトガスを発生させ、生物学的炭素の引き込みの利点を打ち消す可能性があることである。

4.5.5. 沿岸ブルーカーボン

沿岸ブルーカーボンは、自然の塩性湿地、マングローブ、海草藻場を含む沿岸湿地で隔離され、貯留される炭素である。沿岸の新興湿地とマングローブは、炭素を隔離する能力について十分な資格があるが、海草藻場の範囲は十分ではない。沿岸のブルーカーボンの生息地は、漁業の養殖場、水質の改善、レクリエーション、観光、床や浸食の緩和など、さらなる利益をもたらす。盛り土による土砂汚染の可能性、海岸線の改変が土砂堆積に及ぼす影響、潮汐下生息域と潮汐湿地帯の炭素除去との交換など、いくつかのトレードオフがあるかもしれない。

4.5.6. 海洋生態系の回復

海洋における生物系炭素(ブルーバイオマス)の割合は比較的小さいが、一次生産者から深海や堆積物などの他の貯留層への炭素移動における動物の役割は重要である可能性がある。最近の研究では、海洋生態系の保護・回復や水産養殖を通じて、海洋の炭素除去を手助けする機会として、生きたバイオマスがより大きな役割を果たす可能性があることが示された。課題としては、海洋生態系の復元、漁獲方法の変更、あるいは養殖から得られるバイオマスが、単に新たな海洋資源として抽出されるだけであれば、炭素隔離における相対的な利益は小さいか、あるいは中立であるということである。さらに、再生は、正味の炭素マイナス効果を実証するために、保全とセットでなければならない(図 19)。

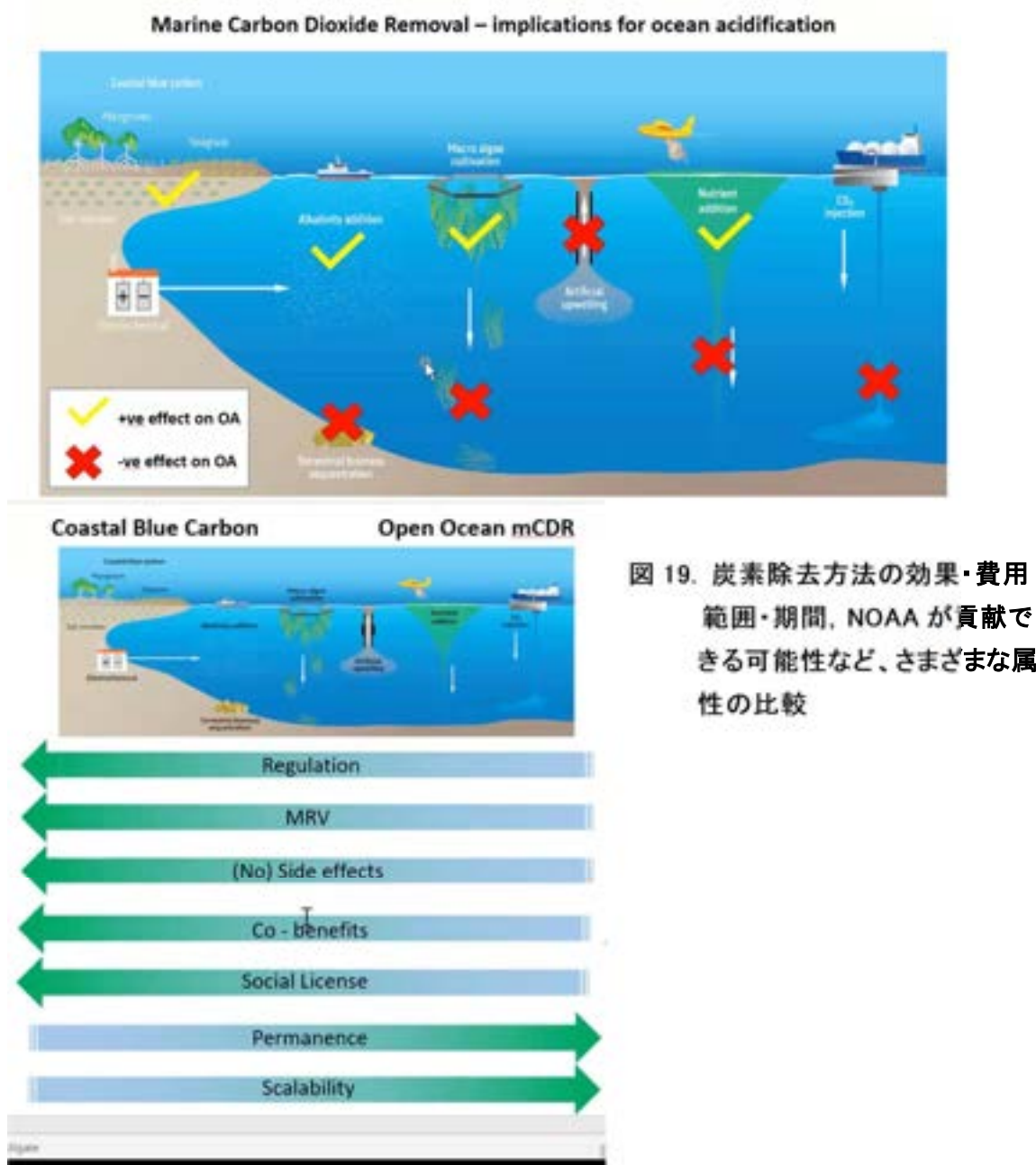


図 19. 炭素除去方法の効果・費用
範囲・期間, NOAA が貢献で
きる可能性など, さまざまな属
性の比較

表 3. 海洋ベースの二酸化炭素除去技術の概要

Ocean-based CDR	Descriptions	Pros	Cons
Macroalgal cultivation	Macroalgae as photosynthesizers taking up CO ₂ from surface water	Low-tech Food usage	Shift from microalgal to macroalgal ecosystem; Limited natural seasonal cycle;
Ocean alkalinity enhancement	Increase ocean CO ₂ storage capacity by increasing seawater alkalinity	Mitigating ocean acidification	High cost; Alter natural chemical cycling; Unknown biological effects
Direct Ocean Removal	Remove and capture CO ₂ directly from the ocean water	Scalable; deployed offshore; commercial products from captures CO ₂	High cost
Biological carbon pump enhancement	Ocean fertilization artificial upwelling and downwelling	Rapid and efficient way to decrease CO ₂	Only small fraction of carbon into deep sea sediments; Potentially elevate CO ₂ levels
Coastal Blue Carbon	Carbon stored in coastal wetlands (salt marshes, mangroves, and seagrass)	Hard to quantify the carbon seagrass bed sequestered	Fishery nursery habitat, improved water quality recreation, tourism, floor and erosion mitigation
Marine Ecosystem Recovery	Living biomass carbon (Blue Biomass)	Restore the biomass, Increase the efficiency of ecosystem process	Might alter the fishing practices

5. 考察

5.1 OA 政策の立案

5.1.1 OA 政策の進展

OA または貧酸素化によって水域が損なわれているとリストアップされた場合、州の管理者は、OA または貧酸素化に直接寄与することが示された汚染物質に対する規制値を設定することができる。しかしながら、OA または貧酸素化に関連する説明的基準を作動させるために必要とされる直接的な因果関係は困難であり、特に、生息域外および生息域内の調査および観測はまだ始まったばかりであり、動的な海洋環境内で分離することが困難である。さらに、河口域や沿岸の pH は、自然および人為的な力の両方によって、日、季節、10 年周期で動的に変化するため、OA に対する「正常な」範囲を設定することは複雑であり、そこからの逸脱は懸念の原因となる。したがって、OA に対処するために既存の政策を適用することは、効果的かつ効率的であることが判明している。例えば、連邦水質浄化法 (CWA) の権限を強調することは、水質保全対策を推進する上で、OA に対する回復力を開拓している州の財産となる。例えば、メリーランド州の CWA の活用は、既存のプログラムを戦略的に活用し、OA に対応するためのマルチストレス・アプローチを取っていることを示している。具体的には、同州の 2020 年 OA アクションプランでは、アクションプランの政策枠組みの重要な要素として、チェサピーク湾流域計画が挙げられている (“State-Led OA Action Planning in the Mid-Atlantic” 2021)。メリーランド州は、栄養塩類の一日総負荷量 (Total Daily Loads) 管理の一環として、いくつかの栄養塩類負荷汚染物質に関してチェサピーク湾を障害する原因となった流域計画を作成した (チェサピーク湾流域計画)。

さらに、カリフォルニア州水資源管理委員会 (SWRCB) は 2019 年、海洋計画の更新を含む、州の水質優先事項を修正または改善する可能性のある、将来のプロジェクトおよび規則制定行動のためのいくつかのトピックに優先順位をつけた報告書を発表した。この報告書では、「海洋酸性化、貧酸素化、気候変動の影響」を、将来的な海洋計画の修正、または水質目標を策定し沿岸環境の回復力を向上させる最善の方法を評価するための州理事会による継続的な作業のいずれかを正当化する可能性のある優先事項のトップ 5 に挙げている。これらの知見と作業の進捗はすべて、CWA 第 303 条 (c) (1) およびカリフォルニア州水道法に従って採択された「カリフォルニア州海洋水質管理計画 (オーシャンプラン)」によるものであり、雨水の流出、自治体で処理された下水の流出、地域および州理事会の許可によって規制された工業用水の流出など、廃棄物の海洋への排出を管理することで、州の沿岸水域の保護を規定している。物理・生物地球化学連成モデルは、下水処理場からの排水や農業からの流出による地域の栄養塩汚染が、いつ、どこで、沿岸の酸性化や貧酸素化の原因となりうるかを知るのに役立っている。

5.1.2 OA 政策の課題

前述のような成功があったとしても、気候変動と海洋変動に対処するためには、世界的に大きな課題がある。新しい政策が効果的であるためには、同時に、動機づけがあり、厳密で、広く支持されるものでなければならないが、これらの性質をすべて包含する政策を見つけることは、極めて困難である。

OA の緩和と適応は、真に長期的な事業である。政府の政策介入は、複数の目標や優先順位付けから生じることがあり、時には矛盾することもある。例えば、エネルギー供給や地方分権に重点を置いた政策が、安価なエネルギーを促進したり、酸性化を促進するような交通活動に補助金を出したりすれば、OA を悪化させる可能性さえある。再選を重視する政治家が、必ずしも公共の利益に資するとは限らない。なぜなら、合理的で投票率を最大化する政治家は、選挙民が嫌がることを恐れる政策を導入する可能性は低いからである。したがって、選挙で選ばれた指導者たちは、しばしば短い時間軸で動く。

例えば、オレゴン州ではこれまで、広範な気候政策に関する立法措置はとられていない。州知事は、温室効果ガス排出の削減と規制のための行動をとるよう州機関に指示する行政命令 20-04 を発表した。これには OAH を含む気候変動と海洋変動の両方に対処する方向性が含まれている (Whitefield et al., 2021) しかし、知事には支出権限も、州全体の排出量に関する新たな基準を作る権限もない。今のところ、この EO で提供される指針と調整は、オレゴン州の資源を最大限に活用し、気候変動対策を前進させるために不可欠なものであり、気候変動と海洋変動に関する政策と手段を州政府の業務に制度化するための基礎を築くものである。しかし短期的には、行政命令は州法よりも簡単に変更される可能性があるため、将来の政権による行政命令によって撤回される可能性がある。した

がって、州法に成文化できる政策協定を模索し続けることが、より耐久性のある解決策となる。

さらに、(非政府組織や国連機関が主導する)国際的なイニシアチブもいくつか存在し、問題に対する認識を高め、科学的情報を統合して普及させ、国連気候変動枠組条約 (UNFCCC) や国際原子力機関 (IAEA) などのハイレベルな交渉の場に影響を与えようとしている (例えば、海洋酸性化国際調整センター: OA-ICC)。このようなプロセスから、具体的な政策や、具体的な OA 防止に必要な行動変容をもたらす政策ツールを実施するための政府の行動という点で、実質的な成果はまだほとんど得られていない。

5.1.3 海外から日本への OA 政策の移転

OA に悩まされている国々は、多くの政策アクションを提案しているが、すべての政策アクションが異なる文脈に適しており、移植可能であるとは限らない。今後の研究では、海外から日本へ、適切で費用対効果の高い政策アクションを移転することに焦点を当てる。日本は他国と全く異なる背景を持っているため、文化や農業の違いを考慮しながら、現状と文脈に基づいた政策アクションを考えることが非常に重要である。

牡蠣養殖を例にとると、今後の OA 化に対応するために、以下のような政策が考えられる。

- 陸上孵化場の設置に補助金を出す。
- 共同養殖や遺伝子選択品種のための助成金の設定
- 既存の水安全モニタリングネットワークを OA モニタリングに活用し、新たな測定機器への助成を行う。
- 場所ごとの緩衝措置の実施
- 他地域・他県への移転
- OA 啓発のための情報/教育キャンペーン
- 日本における OA 研究に資金を提供する

これらの政策を実施できるかどうかを検討するためには、コスト、効果、公平性など、いくつかの評価基準が必要である。

5.2 OA 適応戦略

5.2.1 OA 適応戦略の進展

このテーマに関する 1 つの統合において、Cinner ら (2018) は、適応能力の 5 つの共通ドメインを特定している。「資産」、「柔軟性」、「社会組織」、「学習」、「主体性」である。カリフォルニア州とオレゴン州の貝類養殖業者が OA を打破するために提案または実施したこれらの戦略を、適応能力という広いレンズを通してすべて見直すことで、その特異性の高さにもかかわらず、他の数多くの地域社会との比較を導き出すことができる。例えば、以前の研究では、多くの漁業コミュニティにおける柔軟性の必要性が示されており、漁船が大きか

ったり、より広範で多様な魚種や漁場を持つ漁師は、漁船や漁場が小さかったりする漁師よりも、明らかに回復力が高かった。同様に、組織と学習の領域では、農業コミュニティが十分にネットワーク化され、気候変動に関する情報を共有し、生成し、処理することができれば、適応能力が高まることがこれまでの研究で示されている。

例えば、「柔軟性」領域については、記述された養殖場経営戦略の多くが、柔軟性の必要性に依存している。例えば、養殖に使用する魚種や道具（「魚種」や「方法・道具の種類」）を変更したいという願望や、リース区域内で装置を移動させる能力（「空間的柔軟性」）などである。同様に、貝類養殖業者は、これらの戦略を実行するために必要な多くの「資産」、例えば、必要な設備（「方法／ギア」）へのアクセスや、孵化場や生育スペース（「複数のライフサイクルステージ」）などの施設の種類を特定している。社会組織領域は、情報を得たりデータを共有したりするために、農家がネットワークに依存し、そのネットワークを改善したいと望んでいることに表れている。学習領域に属する戦略は、貝類の死亡の要因や OA 条件に関するより多くの情報への欲求など、特定された科学的ギャップに明らかである。最後に、「主体性」は、Cinner et al. (2018)では、人々が「環境変化への対応において自由な選択ができる」能力と定義されている。農家の戦略の中では、規制や許認可が、特定された適応戦略の多く、特に農場管理戦略の実施を妨げているという農家の感情から、主体性の欠如が明確に特定された。これらの戦略の多くは、複数の領域に分類されることもある。例えば、陸上農場に流入する水の化学的性質を変えること（「取水」戦略）は、本質的に農場管理の柔軟性に依存しており、農家がストレスのかかる状況がいつ発生するかを評価し（「学習」領域）、対応するための設備（「資産」領域）を備えている必要がある。

これらの例を通して、貝類養殖のために特定された戦略は、広範に適用可能な基礎的領域と特徴を持っている。したがって、適応を支援することを目的としたガバナンスと管理アプローチは、地域社会と産業全体におけるその価値と普及を認識し、そのような特性を支援することができ、また支援すべきである。

5.2.2. OA 適応戦略の課題

ほとんどの貝類養殖業者は、世界中の海洋状況の変化に対する懸念を表明しているが、養殖業者にとって、自分たちの事業に対する成果と、容易に観察・測定できない変化との間に直接的な関連性を持たせることは、しばしば困難であった。特に、影響や結果を OA に結びつけることは、直接的な対応を実施する能力に課題をもたらした。例えば、養殖業者は、データ不足や、データを取得し解釈するために必要な資源やネットワークのために、貝の生存や健康状態の変化をこれらの環境要因に帰することができないことが多い。

カリフォルニア州とオレゴン州における高い規制負担は、貝類養殖業者の適応戦略の実施を妨げる重要な要因のひとつである可能性がある。許認可や規制を改善・明確化する努力は、養殖業者の適応能力をサポートするために不可欠であり、気候変動による環境

変化への圧力が高まるにつれて、このアプローチはますます重要になる可能性がある。したがって、貝類の適応と持続可能な生産、それに伴うコベネフィットを促進するためには、規制を変更すると同時に、沿岸の利害関係者の多様な利益と環境保護基準のバランスをとること、すなわち、産業界、科学者、管理者、政策立案者の間で、意味のあるアウトリーチと市民参加を増やすことが極めて重要である。

これまでの研究で、影響を受けている地域社会から直接得られた具体的な適応戦略を明らかにしたものはほとんどない。したがって、気候変動の最前線にいる農民の声を増幅させ、適応のための明確な道筋を明らかにすることによって、適応能力に関する文献のギャップを埋める研究を今後さらに進める必要がある。

5.2.3 OA 適応戦略の日米比較

回答者は、自由形式の質問に対する回答を、アイデアや潜在的な適応策を提供する機会としてとらえることが多かった。日本の養殖業者が提案した適応策(付録 8.2)について、カリフォルニアとオレゴンの養殖業者の事例から示唆された 3 つのカテゴリーに当てはめて、すべての OA 適応策を要約し、以下のように分類した:

【実施された適応戦略】

■養殖場管理＝生態系スチュワードシップ(アマモの再生)

アマモの再生は、水質改善と劣化した生態系の回復のために 1990 年から実施されている。現在、アマモ再生に関する意見は大きく対立している。年配の世代は毎年アマモの植え付けを進める必要があると考えているが、若い世代はアマモが無駄だと考えているため、アマモが有益であるという確かな証拠が必要である。

【適応戦略の提案】

■科学－貝の健康知識

多くのカキ養殖業者は OA について学び、環境やカキに関するセミナーに参加したいと考えている。具体的には、先輩養殖業者は若い養殖業者にもっとセミナーやそのような学習機会に参加してほしいと思っている。

■科学(OA や WQ のモニタリングとデータ共有)

一部の養殖業者は、モニタリングのためのデータ収集は暇なときに手伝ってくれるが、データ分析はしてくれない。しかし、モニタリングデータの分析結果を知りたいと言っていた。彼らの努力は決して無駄ではない。

■政策とネットワーク－ネットワーク

多くの農家が、科学者や研究機関、政府と協力して環境の脅威に立ち向かいたいと述べている。しかし大多数は、自分たちの意見や考えが聞かれなかったり、公平に扱われなかったりすることに不満を抱いている。

■養殖場経営－可変倍数性

少数の養殖業者は、カキの品種改良や 3 倍体の適用を提案している。

■科学－陸上孵化場

多くの養殖業者は、孵化場の建設には高いコストと低い利益が必要であり、余分な努力が必要であることを懸念している。

■農業経営－空間的柔軟性、種苗購入・移転・多角化

養殖業を継続するために、種苗を他で購入して試してみたいという農家もいるが、海外の種苗を使用することは地元の文化的損失が大きい。また、他の地域でカキ養殖を続けようとする人もいるだろう。逆に、カキの種苗が自然に採れないのであれば続けられないという人もいる。また、漁業への転換を考える農家もいた、

■科学－ポリカルチャー(海草など、カキと一緒に他の種を養殖すること)

■養殖場管理－方法・道具の種類

カキの殻を水中に広げて緩衝材にする。農家の経験から蓄積された方法。海洋生物が生存するためのシェルターや生息地を増やし、結果として生態系や漁業を回復させるという理論である。貝殻ハッシュの添加は、炭酸塩の化学的性質を改善し、アサリの加入、生存、成長を促進することがわかった(Greiner et al.,2018)。しかし、カキ殻が水質やカキ養殖に与える影響については明らかにされていない。

■養殖場経営－方法／菌車の種類

あるカキ養殖業者は、鉄イオンを海水に放出することが植物プランクトンの成長に有益であり、OA 問題に対処するのに役立つかもしれないと考え、現在鉄線を実験していると述べた。

■養殖場の管理－マーケティング／価格

現在、収穫された牡蠣は、漁業協同組合の管理の下、ブランド化のために加工業者に送られる。しかし、養殖業者の中には、牡蠣を自分で販売したり、他の方法で販売したりすることで、より良い利益を得たいと考えている人もいる。

今後の課題としては、各地域の適応策を比較検討し、重複する適応策やその間のギャップをさらに調査し、適応策を実現するために必要な支援や政策を考え、最終的に、文化の違いや養殖の違いにもかかわらず、OA グローバル適応のために共有できる教訓をまとめることである。

5.3 OA 意識

5.3.1 OA 意識の進展

貝類産業の認識と経験は、様々な適応的対応の最終的な有効性を示すのに役立つ可能性がある。産業界に対する地球規模の変化への挑戦は、インフラ、能力、あるいは技術指導を提供するために、他の利害関係者とのパートナーシップを必要とする可能性が高いが、こうしたパートナーシップは、米国太平洋岸北西部ではすでに確立されている。貝類養殖業者は、OA に取り組む貝類産業と科学者の相互責任を認識しており、商業生産に関

連する共同研究やデータモニタリングの可能性を示している。OA に関する情報を提供することで、地域のモニタリング・イニシアチブへの関心と参加を促すことができる。OA に関するワシントン州ブルーリボンパネル(BRP Report 2012)は、CO₂ 排出や栄養塩類・有機炭素の流出を削減することに加え、知識のギャップを埋めること、セクターを超えた利害関係者との関わり、科学的協力を促進する意識形成に重点を置いている。貝類産業にとって、OA 対策における地域の適応戦略の有効性を明確にする機会が生まれつつある。貝産業の利害関係者に発言力を与えることは、将来の政策オプションに影響を与え、方向づけることができる。自分たちの主張の本質を明確にすることができる関与した利害関係者は、橋渡し関係に貢献し、将来の環境意思決定に参加することができる。

5.3.2 OA 認識の課題

米国の貝類養殖業者の中にも、OA による負の影響を個人的に経験しているかどうか確信が持てないという人がいたことは注目に値する。これは、OA による影響と貝類の生産を妨げるその他の自然現象との区別が業界内であいまいであることを明らかにするものである。OA の影響と、貝類生産に結果的な影響を及ぼすその他の自然現象とを区別するための、より明確な基準があれば、適応戦略を実施した場合の将来の損失と利益を文書化する際に、業界を支援することができるかもしれません。OA が貝産業に与える影響の大きさを定量化するためのモニタリングや調査への継続的な支援と拡大は、OA による現在のカキ種苗損失の大部分を相殺したように、適応戦略を実施するコストを最終的に支持するのに役立つはずである。

米国の一般市民と貝産業界との間で、OA がもたらす影響についての認識が対照的なのは、天然資源への経済的投資の違いによるものと思われる。米国西海岸の貝類業界は OA に対する理解が進んでおり、悪影響の実体験から懸念の反応を示している。貝類産業は、OA が環境的・経済的な危険であることを高度に認識している主要な利害関係者グループであるのに対し、米国の一般市民の OA の深刻さに対する懸念レベルは、食料安全保障の問題を個人的に経験した後でなければ、大幅に高まらない可能性がある。

もう1つの課題は、貝類養殖セクターからの声が報告に反映されたとはいえ、実際にインタビューされたのは同じ養殖業者のごく一部だったことである。気候変動の最前線にいる地元の人々や企業のストーリー、そしてそれに文脈をもたらす科学者の声は重要であるべきだ。そして、気候変動やその他の環境変化について報告する際に使用する新たな慣例を特定し、評価するローカルサリエンスに関する研究が必要である。

5.3.3 OA に対する貝類養殖業者の意識の比較

表4は、米国、カナダ、日本の貝類養殖業者の OA に対する意識を比較したものである。これは、日本の貝類養殖業者が知識や技術の面であまり準備ができておらず、OA がもたらすかもしれない経済的な不確実性を非常に懸念していることを反映している。

したがって、OA 政策の立案や適応戦略の実施に加え、貝類養殖業者のコミュニティにおける OA に対する認識を高めることも極めて重要である。すなわち、知識キャンペーンやセミナー、メディアを通じて、科学者、一般市民、貝類養殖業者が一体となって、OA 攻撃によってもたらされる将来の結果について理解を深めることである。また、OA の問題やその適応について伝えることも、私たちの仕事の一部であり、貝類養殖業者に OA に対するより強い備えを身につけさせることに貢献するかもしれない。

表 4. OA に対する貝類養殖業者の意識の比較

	US (Marbardy et al., 2015)	Japan (Hinase)	Canada (Drope et al., 2023)
number	40 shellfish owners/managers	33 oyster farmers/fishermen	37 Shellfish farmers
awareness	94% heard of OA Half experienced OA	50% barely know about OA, 9% know well about OA	46% barely know about OA
concerns	93% experienced OA extremely concerned; 64% not experienced OA extremely concerned	More than 50% respondents concerned about it	40% felt OA as a threat.
perception	Everyone know something about OA	No one has experienced OA yet	70% experienced die-off, but only 8% believe it's due to OA
attitudes	40% have confidence to adapt to OA	23% look for “immediate adaptation”, 45% not urgent	OA is a threat in a broad, future-looking way, but not an urgent one.
information	85% prefer to scientists and industry to address OA	“Fisheries coop” is the top information resource they look for	Media express negative impact of OA through mouth of scientists, but not small-scale farmers

6. 補足資料

〈カリフォルニアとオレゴンの貝養殖業者へのインタビュープロトコル〉

インタビュー番号

場所

日付

注:各インタビューの前に事前アンケートを読み、フォローアップの質問が必要な場合は、それに合わせて調整すること。

インタビュー・プロトコル

私たちのプロジェクトは、カリフォルニアとオレゴンの沿岸における海洋酸性化(OA)の影響を調査するものである。この広範なプロジェクトは、海洋酸性化と関連するストレス要因(例:海面水温の上昇、海流パターンの変化など)の影響に対する、カリフォルニア州とオレゴン州の人々と環境の複合的な脆弱性を、空間を越えて理解することを目的としており、特に収穫される貝類と主要な生態学的種に重点を置いている。カリフォルニア大学デービス校の同僚たちは、米国西海岸沿いのOAやその他のストレス要因の「ホットスポット」マップを作成するために、複数のデータセットの編集と分析に取り組んでいる。今日のインタビューでは、こうした変化に対する貝類養殖業の脆弱性に焦点を当て、個々の養殖場の適応能力に影響を与える要因を探る。

このプロジェクトは、米国海洋大気庁(NOAA)の海洋酸性化プログラムの助成を受けている。

インタビューは2つの主要セクションとクロージングセクションで構成されている。第1セクションは、業界の重要性と社会的・環境的变化に関連するリスク認識についてで、10~11の自由形式の質問が含まれている。第2セクションは、業界の長期的な存続可能性を確保するために行っているさまざまな適応戦略についてです。このセクションはやや構造化されており、6つの質問が含まれています。インタビューは1時間以内を予定していますが、これはあなたの持ち時間と、私たちと共有したいこと、または共有しても構わないと思っ

ることによります。あなたの時間を尊重するために、私たちは時間を記録し、すべての質問を終わらせることができるように最善を尽くします。とはいえ、私たちは柔軟に対応いたしますので、ご質問の内容を明確にしたり、情報を追加したい場合は、いつでも質問に戻ることができます。

セクション1:貝の重要性とOAリスクの認識

まず、あなたの貝類活動の歴史と、それに関連するリスクの理解・認識についてお聞きしたいと思います：

1. 基本的なことから始めましょう...あなたが参加している業界、または業界の一部をどのように表現しますか？例えば、孵化場だけですか、それとも養殖施設ですか、それとも混合ですか、その他ですか？また、どのような魚種を扱っていますか？(PROMPT:複数の魚種を扱っていますか？後ほど、多様化を検討しているかどうかを検討します。)
2. 次に、あなたの仕事について教えてください。上記の各活動はいつから行っていますか？業界におけるあなたの役割は何ですか？(オーナー、マネージャーなど)また、その立場において、あなたの意思決定の「能力」はどのようなものですか？(プロンプト: 家族の活動/ビジネスですか？また、あなたの仕事について少し教えてください。- 例: 規模、従業員数、主な販売市場など)
3. 活動はどこで行っていますか？陸上ですか、沿岸ですか、それとも水中ですか？また、なぜその場所を選んだのですか？(良い生育条件か、リース/規制の機会を受け継いだか) (促し: 県名など一般的なものでも、湾の名前、許可地など具体的なものでも構いません)。
4. 環境は時間とともに変化します。この地域で気づいた、海洋環境に関する環境の変化について教えてください。(選択肢: 漁獲量(資源量)の減少/増加、製品の小型化/サイズの変化、奇妙な場所で新種を見かける、生息地の変化や場所/漁場の移動、製品の通常範囲への変化、予測不可能な時期/異なる季節に製品が来る、捕食者/餌生物との相互作用、HAB/ドーモ酸、ダイオフや生存率の低下、悪天候や異常気象、貝殻の質の低下)
5. 貝とは直接関係ないようであれば、こう尋ねる: もしそうなら、どのような形ですか？また、もしそうであれば、どのような形ですか？これらの変化のうち、OAが原因で起こっている可能性があるかどうか、把握していますか？あるとすれば、どのようなものですか？(注: 必要であれば、OAとは何を意味するのかを明記すること)
6. あなたが気づいた変化(インタビュアーへの注: 備忘録として、先に挙げたものをいくつか挙げてください)のうち、「定期的に起こっている、あるいは比較的長い間起こっている」変化ではなく、「新しい、あるいは急性の」変化の数を教えてください。(参考までに: エルニーニョの周期と嵐、海面水温の変化、降水量の変化、淡水の流入、HABの発生など。)

7. 今説明した環境固有の変化以外に、この地域(操業地域を挿入)で起きた社会的、経済的、政治的、その他の変化で、あなたの活動に影響を与えたと思われるものは何ですか？

a. a.あなたの産業に特有な変化(例えば、貝類養殖に従事するためのコストや収入に対する変化など)(例:人件費、市場価値・需要の変化、統合・競争、資源支援サービスやインフラの利用可能性、新興市場、季節的閉鎖やアマモの回復など養殖場の利用能力に影響する管理など)。

b. b.地域社会で、あなたの活動に直接影響を及ぼすか、及ぼさないか、より広範に影響するもの(選択肢:住宅/不動産コスト、雇用形態、観光業、地域の人口変化、スタッフの利用可能性)

8. あなたは、あなたの事業が長期にわたって耐えてきたいくつかのストレス要因について言及しました。極端なストレス要因(環境、社会的、政治的)が、あなたの業界における「転換点」(すなわち、あなたの事業の閉鎖)を引き起こす可能性があるシナリオを思い浮かべることができますか？言い換えれば、どのような状況になれば事業を継続できなくなるのでしょうか？(急性の事象と慢性の事象を考慮してください)(例えば、アワビが全滅した場合、やり直すのに4年かかる可能性があり、その場合、企業は操業停止を余儀なくされるでしょう)

セクション 2: 適応戦略(資産、柔軟性、社会組織、学習、エージェンシーに関連する行動と要因)

それでは、あなたがこれらの変化に対応し、対処する方法について話しましょう。

9. 業界における社会的、経済的、規制的または環境的な変化に適応するために、何らかの措置を講じましたか？可能であれば、その変化の原動力となったものを具体的に教えてください。また、可能であれば、その変化の原動力となったものを具体的に示してください。そのような適応は、OAに対応したものですか、それとも前項で挙げた変化のいずれかに対応したものですか？

PROMPT: 例えば、養殖場の経営戦略(漁具の切り替え、漁具の設置場所、養殖魚種、収穫時期、販売戦略など)である。また、ネットワークを活用したり、経営者や政策立案者、科学者と話をしたり、新しい科学的情報に基づいて実践方法を変更したりすることも考えられます。

10. 環境やその他の変化(市場の変化、政治的な変化など)に適応するために、あなたがすでに行っていること以外に、万が一状況が極端になった場合に、あなたが検討する可能性のある行動はありますか？

選択肢

貝類養殖活動を継続するために必要であれば、別の場所に活動に移す意思や能力はありますか？

活動を放棄しますか？

11. 適応するための手段を講じた場合、何がそれを可能にしましたか？

プロンプト:インタビューに無反応の場合は、ズームを使って画面上で共有してください:

他業界に関する知識や他業界へのアクセス

新しい市場へのアクセス

資本／融資へのアクセス

他の土地に関する知識と、農場を移転したり事業を拡大したりする能力 ○ 科学的な情報や解決策へのアクセス

科学的情報／解決策へのアクセス

科学者や経営者とのコラボレーション

居住地／勤務地の移転

社会的・職業的ネットワーク

意思決定や経営に参加するさまざまな機会 ○ その他？

その他？

最後に、このセクションでは、実際にあなたができることにどのような限界があるのか、その限界とはどのようなものなのか、そしてその障害をどのように克服するかについてのアイデアについて話しましょう。

12. 現在の経営、社会、環境条件の下で、あなたの業界の将来についてどのように言えますか？(これまで述べてきたような変化があった場合、何年連続で事業を継続できると思いますか？急性的な出来事と慢性的な出来事に対して、どの程度脆弱か、あるいは影響を受けやすいか)

13. 社会や環境の変化への適応能力を制約する要因はありますか？(インタビュアーへの注意事項:もしこれらのことが以前にすでに議論されているのであれば、再度質問する必要はありません！そうでない場合は、次のような PROMPTS を使うことができる:仕事のための移動の制限、他の場所／漁場についての知識不足、許可証の入手、その他。また、管理の問題には特に注意を払うこと)。

14. 今の時代、貝類漁業で成功するためには、どのような情報が必要ですか？これらの情報はどこで入手しますか？どのような情報を見つけるのが難しいですか？（参考：生態系や種の変化に関する収穫予測／早期警告指標、新種の生息場所、天候パターン、漁具の種類と技術、許認可、生計を立てるための新しい方法、変動する市場価格によりよく対応するための手段など）。

15. CA における貝類養殖事業の現在の管理体制について、何かお考えがありますか？この業界における現在の、あるいは将来起こりうる変化に適応する能力を向上させるために、管理者や政策立案者ができることはありますか？（例：支持する、支持しない、貝類活動に参加する能力にどのような影響がありますか？インタビューア－：具体的にどのような規制や管理を指しているのか、必ず尋ねてください。）

閉会

16. まだ触れていないことで、他に話したいことはありますか？あるいは私に質問がありますか？

17. これらのテーマについて、カリフォルニア／オレゴン州のできるだけ多くの養殖業者と話をしたいと思っています。他に話を聞くべき人を紹介してもらえますか？（名前、役割、連絡先を教えてください。）

18. 作業終了後、調査結果の要約を受け取ることに興味がありますか？（「はい」の場合、インタビュー結果とは別に連絡先を入手してください。ただしインタビュー番号を明記してください）。

ご協力ありがとうございました。この調査の結果をお受け取りになりたい場合は、今お知らせいただくか、後日メールをお送りください。

8.2 2021 年に実施した日生貝類養殖業者へのインタビュー

インタビュー対象者番号 RH-4

Q: 以前と比べて、経済的利益の観点から見たカキ養殖の変化は？

A: 牡蠣の市場価格は 1800～2400 円/kg から 1400～1500 円/kg に変化している。経営者 1 人当たりの筏数は 8 から 12 に増えた。

これは量的な需要が多いということもあるが、漁業者の数が減ってきているので、空いたスペースを利用した方がいいということもある。昔に比べて牡蠣の値段も安くなっているので、質より量の時代になっています。

Q: 親族に継がせることは考えていないのですか？

A: 牡蠣漁師になろうと思っても、なかなか新しい牡蠣漁師になれないのが現状です。日生牡蠣漁師は22人いますが、後継者がいるのは5、6人です。漁業権の問題や、初期投資(船、筏、吊り貝など)が他の漁業に比べてお金がかかるので、弟子として人を雇い、誰かに中古で譲ってもらうしかないと思います。

Q: 牡蠣の養殖で一番気になる環境問題は？

A: クロダイの捕食被害は深刻で、集荷機に付着したカキを食べてしまう。しかし、天然の種が十分にあるので、今のところ問題はないようです。

Q: 日生でのカキ養殖の将来についてどう考えていますか？

A: 小中学生へのアウトリーチ教育やアマモの再生など、将来にわたって日生でのカキ養殖を持続させたいという思いから、さまざまな取り組みを行っています。

日生での牡蠣養殖を持続させるためには、私たちが高齢になったら筏の数を減らして、牡蠣組合が筏を他の人に配分することになります。

Q: どのような養殖方法ですか？最近の牡蠣養殖に変化はありますか？

A: 採苗(苗を採取すること)は、島々に囲まれた静かな海で行います。筏は9月～10月に沖合に移動する。

RH-3、RH-5(二人インタビュー)

Q: 昔と比べて、経済的利益の観点から見たカキ養殖の変化は？

A: 牡蠣の価格が下がり、利益を上げるのが難しくなった。

Q: 家族に継がせることは考えていますか？

A: 牡蠣漁師は減ってきており、高齢化で辞める人も増えるだろう。

Q: 今後の日生での牡蠣養殖をどのように考えていますか？

A: 将来的には日生牡蠣養殖の適正化を目指していきたい。現役のうちに、もっと地域に貢献していきたい。

Q: どのような養殖方法ですか？最近の牡蠣養殖に変化はありますか？

A: 日生から加久井島への橋が開通したことで、牡蠣の種が取れる場所が変わりました。

Q: 日生で牡蠣の養殖を続けていくために、将来的に牡蠣の種を買うことをどう考えていますか？

A: 牡蠣の種を買っても儲からないし、そうなったらやめようと思う。日生産じゃないからということではなく、種を買うのは良くないと思います。

Q: 海洋モニタリングについてどう思いますか？

A: モニタリングなどを依頼されることがあり、それはいいことだと思うのですが、集めたデータで結果を説明せず、何も還元しない！調査内容を明確に説明し、その結果を公表することは、漁業者の環境意識の向上につながると思いますし、絶対に必要なことだと個人的には思います。

Q: 現在の牡蠣養殖に不満を感じた理由は？

A: 岡山県や備前市の職員の仕事のやり方に不満があり、ハンコを押すだけの仕事ではなく、もっと漁師に近いところで仕事をしている人がいればいいのにと考えています。

牡蠣の水揚げ価格が安すぎる、中間マージンが大きすぎる

例えば、ホタテの集荷業者は 1 個 12~13 円(これが平均価格だが、高い時は 65 円前後の時もあった)

1 つの筏に約 2 万 5000 個のホタテ集荷機が吊り下げられるので、ホタテ集荷機を仕入れるだけで 12 円×2 万 5000 個×10 筏=300 万円かかる

海を愛する」地域活動のような植林も大切だが、なぜこんな山奥に植林するのか。どこに植えればいいのかかわからないが、あんな深いところに埋める意味がない。川上周辺に植えるのは重要だと思う。そして、市や県の担当者が自分たちから何も説明しないことが問題なのではないでしょうか。

Q: 牡蠣の養殖に関する意思決定プロセスについてどう思いますか？

A: 地域内のトップダウンで決定される。若手農家や委員会メンバー以外が参加する会議がない。

RH-7

Q: 昔と比べて、経済的利益の観点から見た牡蠣養殖の変化は？

A: 昔に比べて牡蠣の値段がかなり下がっていて、儲けが減っている気がする。

Q: 牡蠣の養殖で一番気になる環境問題は？

A: クロダイやクサフグなどの捕食は厳しいですが、牡蠣の捕食が厳しい状況でも、牡蠣の種苗は十分にあるので大丈夫です。

Q: 日生での牡蠣養殖の将来をどう考えていますか？

A: 漁業の将来は想像できないし、関心もない。適応策に関しても、私の事業を継ぐ人はいないでしょうから関係ありません。

Q: どのような養殖方法ですか？最近の牡蠣養殖に変化はありますか？

A: 種採りは7月中旬(15日頃)から8月末(24日頃)まで。ホタテの集貝器の両面に約50個体付くが、外側の方がよく付く。ホタテ貝殻は1列に28～33個付く。1筏に吊るせるロープは約800～900本。1筏あたり合計で約25,000個のホタテ貝を吊るすことができる。

Q: 日生でのカキ養殖を持続させるために、将来的にカキの種苗を購入することは考えていますか？

A: 他県の牡蠣の種苗は育ちが違い、宮城の牡蠣は成長が早く、広島は小ぶりだがプリプリしていて味が濃い。

Q: 現在の牡蠣養殖の何が不満だと感じましたか？

A: どの養殖業者からもまとめて出荷されるため、小粒だったり殻がうまく剥けていなかったりする牡蠣を何キロも入れて体重を増やす人がいる。誰がやったか公表するしないにかかわらず、生協はこの点に注意すべきだと思います。

RH-14

Q: ご家族に継がせることは考えていらっしゃいますか？

A: 牡蠣養殖の文化は存続させたいが、採算が合わないので後継者は作りたくない。

Q: 海の状態モニタリングについてどう思いますか？

A: 何もなときはモニタリング(機器の設置)を手伝えるが、漁の繁忙期は手伝う気にならない。データの分析も簡単にはできないと思う。

Q: OAに対応するために必要なことは何だと思えますか？

A: 海洋酸性化によって牡蠣の養殖方法が変わるのであれば、それに従えばいい。しかし、OAに適応するために何ができるかはよくわからない。

RH-1 & RH-2

Q: 牡蠣の養殖に変化はありますか？

A: 事業主が持つことができる筏は最大で 12 筏である。

Q: 牡蠣養殖に関する意思決定プロセスについてどう思うか？

A: 現状は、地元の漁業者が意見を出し、牡蠣養殖部門が調整して決定している。

Q: カキ養殖が他の漁業に与える影響は？

A: サワラ漁は例年 4 月に行われるが、海水温の上昇や冷凍カキが市場に出回るようになったこともあり、漁期を遅らせて大きいカキを採り、冷凍する傾向にある。牡蠣の収穫を遅らせるという新しいビジネススタイルによって、4 月は忙しくて漁に出られない。

さらに、釣りに行っても魚が少なく、あまり釣れない。これは、高次栄養魚種の餌や栄養源となるイカナゴやシラスなどの乱獲が原因かもしれない。また、市場に出回る魚の量が少なくても、魚の市場価値が上がらないのであれば、水揚げ額はさらに低くなり、漁業では採算がとれない。

食用となる低栄養魚種の乱獲を防ぐ対策が必要であるにもかかわらず、国や県が規制をしないのは、それでも儲かるからである。

RH-2

Q: OA に適応するために必要なことは何だと思えますか？

A: 漁業者が環境のためにできることには限界がありますが、できることから積極的にやっていかなければならないと思えます。

Q: OA が牡蠣養殖に与える影響はどの程度心配していますか？

A: OA がどのような脅威や危険をもたらすのか見当もつかないので、危険です。目に見えない問題なので、研究者と相談しながら理解を深めていきたい。

Q: 現在の牡蠣養殖に不満を感じた理由は？

A: ビジネス・お金にこだわりすぎる若い人たちの考え方に不満があります。

RH-1

Q: OA に対応するために必要なことは何だと思えますか？

A: コロナウイルスもそうだが、行政が緊急事態になってから対応し始めることに不満があり、海洋酸性化のように早急な対応が必要だと感じている。OA がどのような影響を与えるのかを明らかにし、その解決策を考える必要がある。OA の事例を学ぶワークショップを開催する必要がある。適応策などにも積極的に対応し、言われたことは積極的にやっていきたい。

Q: これからの日生でのカキ養殖をどう考えていますか？

A: 牡蠣漁業を持続させるための活動や学習会に、若い人たちがもっと地域ぐるみで参加してほしい。若い人は自分のことしか考えていない。

Q: OA に対応するために必要なことは何だと思えますか？

A: 海がもっと栄養豊富で、もう少し汚染されていれば、牡蠣の生産はもっとうまくいっただろう。景観を守ることは重要だが、現状はカキ漁師にとってはあまりにもデリケートだ。アマモについては、間違っているかもしれないが、栄養分がアマモに吸収されて失われているのではないかと心配している。

RH-6

Q: 昔と比べて、経済的利益の観点から見たカキ養殖の変化は？

A: 養殖業者が減っているため、共同出荷のコストを分担できる人が少なくなり、個人負担が増えていることも養殖利益を減らしている要因です。昔に比べて牡蠣の市場価格は上がっていませんが、船や道具などの経費が上がっているため、利益はどんどん小さくなっています。

Q: 家族に事業を継がせることは考えていますか？

A: 日生で牡蠣養殖を家業として続ける人がいない一番の理由は、利益がどんどん減っているからです。私は牡蠣養殖を子供に継がせるつもりはありません。むしろ、この世代で牡蠣養殖は終わると思います。

Q: 牡蠣の養殖で最も関心のある環境問題は？

A: 環境問題に関しては、未来の子供たちに豊かな海を提供することよりも、少しでも牡蠣を生産し続けるために環境問題に取り組むことが急務だと感じています。台風や水温の上昇で筏の沖出し作業が遅れたり、ホヤが牡蠣の殻に付着するなど新たな問題が発生していることは承知しています。

Q: 日生でのカキ養殖の将来をどう考えていますか？

A: 収益が上がらない現状に見切りをつけ、年配の方の代で終わらせたいという風潮が若い人たちの中にあるように感じます。

Q: 日生で牡蠣の養殖を続けていくために、将来的に牡蠣の種を買うことをどう考えていますか？

A: 牡蠣の種苗を他から(中国など海外からも)仕入れても採算が合うのであれば、そうしたい。ただ、海外から苗を輸入するのはバクテリアなどの関係で難しいのではないかとされています。過去にアメリカから苗を輸入しても生産に結びつかなかった事例を考えると、海外からの輸入には懐疑的だ。また、日生が陸上養殖の種苗生産施設に頼るのであれば、採算が合わないことは間違いない。

Q: 現在の牡蠣養殖の何が不満ですか？

A: 漁協の力が強すぎるのが気になります。牡蠣の収穫期には、生協の出勤日と牡蠣の出荷日を合わせなければならぬし、個人で出荷できる牡蠣の量も厳しく制限され、収穫量の1割しか出荷できずに苦しむこともある。

ブランド化で値上げを狙う作戦で、牡蠣を加工工場にまとめて出荷するので、工場内で商品が混ざってしまうが、そんな気はしない。

全組合員で共同出荷しているので、金銭的な損失は少ないのですが、新たな牡蠣の産地が増えていることを考えると、全体としてはやはり利益が減ってしまうというデメリットがあります。

Q: 牡蠣養殖に関する意思決定プロセスについてどう思いますか？

A: 現在、日生では牡蠣養殖のあり方を変えようと様々な意見が出されていますが、なかなか反映されません。年配の漁業者には現状維持の意識が強く、養殖業者の年齢差(次世代が40代、その次が60代)がネックになっているケースが多いのが現状です。

Q: OAに適応するために必要なことは何だと思えますか？

A: 適応策には否定的です。適応策に反対しているわけではないが、適応策を講じた後に事業として採算が取れるのかが心配だ。適応策を講じるだけの資金力があるか心配である。

RH-9 & RH-11 (2人インタビュー)

Q: ご家族に事業を継承してもらうことは考えていますか？

A: 収入が減っているので、後継者は作らない方向で考えています。すでに老後が心配です。

Q: 牡蠣の養殖で一番気になる環境問題は？

A: 環境問題に取り組む必要があるのは、将来の世代に遺産を残すのではなく、現状から生き残らなければならないからです。特に今年は牡蠣の捕食がひどかった。

Q: 日生での牡蠣養殖の将来をどう考えていますか？

A: 牡蠣の養殖は、日生ではなく他の地域で始めてもいいような気がします。質より量という現状はひどい。でも、将来牡蠣の養殖がなくなったら、日生には何も残らないので、牡蠣の養殖は続けてほしいですね。

Q: 日生で牡蠣の養殖を続けていくために、いつか牡蠣の種を購入することをどう思いますか？

A: 稚貝を外国(アメリカ、中国、ベトナムなど南アジア)から買うのは躊躇するかもしれないが、韓国から買うのがいいと思う。人工採苗か海外から種を買うかの2択なら、多少高くても人工採苗を選びますし、国産苗の安心感もあります。

一本苗方式の導入は、ひなせの現行システムでは難しい(大量に出荷されるため、本数確保を考えると不向き)。しかし、いろいろなコストを考えても、筏を使う方法は高すぎるので、他の養殖方法を試すべきでしょう。

Q: 現在の牡蠣養殖に不満を感じた理由は何ですか？

A: フィッシュコープの個別出荷の制限を撤廃してほしいという思いが強い。必要な分だけ払って、あとは自由にやりたい。

殻付きの牡蠣や割れた牡蠣など、殻剥きの悪い牡蠣が良い牡蠣の中に入ってしまう現状は問題です。

現在、水面から2~3個ぶら下がっている牡蠣取りは育ちが悪い。

現在の牡蠣養殖の方法を変える必要があると思う。

共同出荷の平等性を重視しすぎている。各事業主が雇える研修生の人数制限や筏の数制限など、状況に応じてもっと適切に対応すべき。年齢差もあるし、たくさん働ける人とそんなに取れない人をどう平等にするか。

現在、4月中旬まで出荷できるように栽培量を管理している。共同出荷の関係で、出荷期限は生協が決めるので、残された人は牡蠣を全部捨てるしかない。

共同出荷のやり方を変えなければ、自前で他の販売方法を探すことになり、それも難しい。また、漁協には牡蠣の大きさに関係なく販売できるメリットがあるので、小さな牡蠣でも販売することができます。

Q: 牡蠣養殖に関する意思決定プロセスについてどう思いますか？

A: 牡蠣の養殖に関する決定について、地元(牡蠣のグループ)は何も言えない。

Q: OAに適応するために必要なことは何だと思えますか？

A: 適応策には前向きだが、陸上養殖施設の整備など、資金的・物理的にできる今のうちにやっておかないと、後々やっていけなくなる。できる限り対策をして、コツコツやっていきたい(RH-9)。

環境勉強会や研修会があっても、実際に大規模な実験に参加してメリットがなければ参加したくない。みんなで協力して意見を出し合える環境ではないので、参加したくない気がする(経営者目線)。

RH-10

Q: 昔と比べて、経済的利益の観点から見たカキ養殖の変化は？

A: 牡蠣のサイズが小さくなっている(成長が鈍化している)ことに加え、市場では2~3年もの大粒が主流になり、大粒の牡蠣の価格まで下がっていることを実感しています。1年もの養殖牡蠣を売ろうとしても、チャンスはない。

生産量の少ない牡蠣は見下され、生産量が最優先される文化になった。

労働力の高齢化という問題もあり、加工できない牡蠣も多い。機械で加工したいが、初期投資が高すぎる。

今のところ、コロナウイルスによる影響は感じていない(むしろ自宅待機で牡蠣の需要は増えている)。ただ、2~3年後、人々がそれほどお金を持っていない(需要が減っている)ときに影響が出ると思います。

Q: 家族に事業を継がせることは考えていますか？

A: 後継者を作るつもりはないし、今の日生での牡蠣養殖に魅力を感じていない。牡蠣養殖業者の約半数は後継者が見つからずに辞めていますし、30歳以下の若い養殖業者も3分の1ほどいます。

Q: 牡蠣養殖で一番気になる環境問題は？

A: 乏栄養化と地球温暖化が最大の環境問題だと感じています。

小魚やエビは非常に少ない。一方、大型魚は非常に多い。今、クロダイを食べる人が減って、人工的に放流されたものが問題になっています。

Q: 現在の牡蠣養殖の何が不満ですか？

A: 研修生を雇うのはお金がかかるのでやめたい→時間のある日本人を雇いたい。

今の筏の準備や作業スタイルを変えないと生き残れない。

他の牡蠣養殖場と比べて、生協の仕組みや生産方法が取り残されている気がする。

生協に頼りすぎているのが現状を招いている。

もちろん、生協のいいところもある。

牡蠣をストックしておくのは伝統だが、それがネックになって採算が取れなくなっている。

牡蠣の養殖場がそれぞれ独立したビジネスになるのもいいことだと思います。

Q: 牡蠣養殖に関する意思決定プロセスについてどう思いますか？

A: 私たちの意見が通らない。年配の漁師が伝統的なやり方に固執し、若い人たちに意見を言わせない傾向がある。新しいことに挑戦したがるらない、責任問題で遅々として進まないなど、共同作業の負の側面も出てきている。議論もなく、あきらめることに終始し、運営委員でさえもそうだ。

Q: OA に対応するために何が必要だと思いますか？

A: 適応策(他所から種を買う、陸上養殖施設を作る)には積極的ではない。別の仕事を探すことです。将来、牡蠣養殖がなくなったら、また始めるのは難しいので、孫の世代には小規模でもいいから牡蠣養殖を続けてほしい。この仕事を続けてほしい。

RH-8

Q: ご家族に継がせることは考えていらっしゃいますか？

A: 子供に牡蠣養殖を継がせる気はありません。ただ、そう考える理由は、他の人たちと違って、日生町の現状がどうのこうのということではなく、危険な商売なので、頭のいい人でないとできないと思っているからです。漁師になる覚悟と熱意がある人がいれば、喜んで継がせます。

私の夢は、漁師(日生では牡蠣養殖業者)の社会的地位を向上させ、誰からも羨ましがられる立場にすることだ。漁師の地位を向上させ、日生にあるポテンシャルをもっと生かしたい。

若い人たちが新しいことにチャレンジし、失敗や成功から得たものを生かすという意識改革が大切です。

Q: 牡蠣の養殖で一番気になる環境問題は？

A: 環境問題を感じる点は、獲れる魚種が変わったことです。牡蠣養殖を存続させるためには、これからも環境と向き合っていかなければなりません。

Q: 日生での牡蠣養殖の将来をどう考えていますか？

A: 今後も日生で牡蠣養殖を続けていきたいという思いは強いです。世界的に水産物の需要が高まっていることを考えると、グローバル化も考えていきたい。牡蠣養殖が衰退してなくなってしまうよりは、企業が日生に来て牡蠣養殖を引き継いでくれたほうがいい。

Q: 日生で牡蠣養殖を続けていくために、将来的に牡蠣の種苗を購入することをどう考えていますか？

A: 陸上採苗施設を作ることに比べれば、日本のどこかから買う方がいい。しかし、陸上養殖施設を作らなければならないのであれば、漁師を続けることはできません。牡蠣はヘルペスなどの病気のため、日本の規制で輸入できない。

その数少ない選択肢の中で、人工的に種苗を採取し、シングルシードで良質のカキを育て、高値で販売するのも一案かもしれない。

シングルシードは海域の問題などで日生には向かないので、筏を使うべきでしょう。

Q: 現在の牡蠣養殖に不満を感じた理由は？

A: 共同出荷のため、やりたいことができない。日生(ひなせ)の漁師は新しいことをやろうという気がない。儲からないというネガティブな考えで、何も解決できない。現状が嫌だから、2年後、5年後に上の世代がいなくなるんじゃないかと考えてしまう。それよりも、20年後、30年後に何をしたいのか、そのために何をすべきなのか、目標を立てた方がいい。

シニアの牡蠣養殖業者には、新しいことを始めることに価値があることを証明する成功体験が必要で、そうすると、考える段階ですべてが止まってしまう。

私たちが変えたいのは、問題を明確にし、現在の牡蠣集団システムの問題点を細分化できないことを自覚することです。例えば、牡蠣の生産を生協に任せたら生協の問題になったとか、個別に出荷したら出荷の問題になったとか、いろいろな問題が『間違った判断』としてまとめられている。

Q: 牡蠣養殖に関する意思決定プロセスについてどう思いますか？

A: 牡蠣の養殖に関して、私たちの提案や考えが通らない現状に不満がある。若い漁師は仕事以外でも集まって意見交換をしているが、年配者と若手では考え方に大きな隔りがある。

RH-15

Q: 家族に継がせることは考えていますか？

A: 息子に事業を継がせたいと思っています。日生(ひなせ)の牡蠣養殖の家に生まれたのだから、親の跡を継がせたい。外に出なくても、牡蠣養殖で食べていければ十分。息子には楽しい人生を送らせてあげたいし、日生で牡蠣屋をやっている息子に生まれてよかったと思ってもらいたい。

Q: 牡蠣養殖で一番気になる環境問題は？

A: 台風は最も深刻な環境問題ですし、牡蠣の捕食も依然として深刻です。

しかし、環境問題よりも、人材不足や捕食の問題、漁業者の減少による組合結成の問題などが重要です。また、環境の変化によって牡蠣の養殖がいつまで続くのか、人々が無関心であることも気になります。

Q: 日生でのカキ養殖の将来をどう考えていますか？

A: 日生牡蠣の養殖を続けていきたいという思いは強いです。今後、先輩が引退して漁場に余裕ができたとしても、人的資源やリスクの問題(獲れない年はコスト増にしかならない)で増産は難しい。

Q: 日生で牡蠣養殖を続けていくために、将来的に牡蠣の種を購入することをどう考えていますか？

A: 牡蠣の種苗を購入するよりも人工採苗に前向きで、種苗の問題で新しい魚種に切り替えることはない。人工採苗を開始。

人工採苗を徐々に進め、天然種苗が採れない時に採苗できる体制を作る必要がある。できればシングルシーディングにも挑戦し、販売のチャンスを広げたい。

Q: 海況モニタリングについてどう思われますか？

A: 1年・2年のモニタリングで海洋環境を把握するのは難しいし、調査でも把握できないので海洋環境の調査は難しいだろう。

Q: 現在の牡蠣養殖に不満を感じた理由は？

A: 海の環境を守るための森林整備活動は、自分の番が回ってくれば参加しているが、参加する気はない。

理由もなく新しいチャレンジをやめてしまうのはよくない。

今後の問題は、経営者が減り、生協に出す牡蠣の生産量が減ること。生協の存続のために手数料を払わなければならないなどの問題も出てくるのでは？そうするとやっていけない気がする。

市役所の水産課には、漁業をビジネスとしてもっと真剣に考えてほしい。具体的には、お役所仕事ではなく、牡蠣養殖業者がもっと稼げるような仕組みを作ってほしい。そして、生協には海外から学んでほしい。久瀬の漁師はいろんな意味でつながりが強い。岡山県が殻付き牡蠣も出荷できるように政策を変えないと、今の需要には応えられない。

環境問題を考える余裕はない。人の努力で解決できる問題ではないと思っていますし、環境保全活動に参加することにもあまり関心がありません。

Q: 牡蠣養殖に関する意思決定プロセスについてどう思いますか？

A: 牡蠣の養殖に関する私たちの意見は、通らないどころか、聞き入れられないことさえある。

コロナウィルスの時に新しい意見を言いにくいというのは、例えば個人商店の場合、コロナウィルスの影響で現状は変わっていないが、まだ1年しか経っていないのでどうなるかわからない。

Q: OA に対応するために必要なことは何だと思えますか？

A: 海洋酸性化への対策を講じる必要があると思えます。牡蠣の養殖をどうするか(従来の海藻から牡蠣へのシフトなど)よりも、次に何が収穫できるかを考える方が現実的で重要だという意見もある。時間があれば、環境に関する勉強会などにも参加したい(興味のあるテーマがあれば)。

Q: 日生でのアマモ再生についてどうお考えですか？

A: アマモの再生に参加していますが、アマモが成長しすぎて、アマモの再生はもう必要ないと思えます。アマモが流れ藻になってボートに絡まったりするのが困る。アマモの再生活動そのものをやめてほしいとは思いませんが、数年に一度でいいような気がします。

RH-13

Q: ご家族に事業を継承してもらうことは考えていますか？

A: 後継者(息子)に継がせるつもりはありません。生協は一軒しかないので、現状を変えて儲けることができなければ、引き継ぐことはできないでしょう。変えられる気がしないし、自分の意見も言っていない。

Q: 今後の日生での牡蠣養殖をどう考えていますか？

A: 日生での牡蠣養殖は続けていきたいと思っています。ただ、できるかどうかはわからない。環境を守りたいという気持ちはあります。動ける限りは続けたい。

アマモの再生活動も続けたい。現在、牡蠣の勉強会や環境勉強会に参加していますが、これからも積極的に参加していきたいです。

Q: 日生で牡蠣の養殖を続けていくために、将来的に牡蠣の種を買うことについてどう思いますか？

A: 種苗一本化など、新しい試みも必要だと思います。

Q: 海洋モニタリングについてどう思いますか？

A: いろいろなデータを集めるのは漁師の仕事ではない。それができるのであれば、別の仕事をしている。率先してやる気が起きない。

Q: 現在の牡蠣養殖の何が不満だと感じましたか？

A: 生協との付き合い方が今後問題になってくる。儲かるかどうかポイント。また、漁業者が減ると共同出荷による個人の負担・コストが増えることも問題です。

兵庫など新興の牡蠣養殖地と比べると、熱意が足りないと感じる。

牡蠣養殖の不満は儲からないこと。値段が決まっている(上がらない)ので、牡蠣をきれいに剥くなどのやる気が起きない。

地域に対する不満としては、生協に頼りすぎている。

RH-12

Q: 昔と比べて、経済的利益の観点から見た牡蠣養殖の変化は？

A: 海が豊かになった。漁に出て、たくさん獲れて、儲かった。でも、年々難しくなっている気がします。

牡蠣の値段も良かったし、収穫はいつも売り切れ。むき方の技術や販売ルートなど、何もわからないところから始めても、商売が軌道に乗るまで6年くらいはかかります。牡蠣養殖を始めるときの不安はあまりありませんでした。

Q: 家族に事業を継がせることは考えていますか？

A: 子どもができて、一緒に漁師にしようという気持ちはありません。この地域の若者は総じてやりたがらない。親も継がせたくない。

牡蠣養殖のやり方を知るには、若い人に聞くのがいい。先輩農家に聞いても、時代についていけないので、参考にならないような気がします。

現状で一番問題なのは、若い人が参加していないことだと感じています。この問題は海の問題よりも深刻です。人手不足で牡蠣養殖を続ける力がなくなってしまうのではないかと心配です。

Q: 牡蠣の養殖で一番気になる環境問題は？

A: 将来のことを考えると、環境問題(捕食や貝毒など)で種苗が採れなくなることが心配で、子供たちに引き継ぎたくない。

他の漁業(定置網や刺し網)を始める人はいても、カキ養殖を新たに始める人は今後出てこないような気がします。

Q: 日生での牡蠣養殖の将来をどう考えていますか？

A: 牡蠣漁師は他の漁業に比べて儲かりますが、牡蠣漁師を続けられるかどうかは不透明なので、とても不安です。今の段階では、牡蠣の養殖でお金を稼いで、他の漁業に切り替えるのがいいと思う。

今のお年寄りには現状維持を望む人が多い。日生漁業は守っていかなければならないし、日生地域の活性化のために漁師が必要なのは間違いない。

牡蠣だけでなく、春はサワラ、夏はフグなど、季節ごとに漁業を多様化させ、盛り上げていきたい。漁業に従事する人が少なくなっています。

Q: 日生で牡蠣の養殖を続けていくために、将来的に牡蠣の種を買うことをどう考えていますか？

A: 今のところ、人工採苗には懐疑的なので、種苗を購入した方がいいと思います。人工採苗の印象は、デモンストレーションで見たもので、それほど良いものではありませんでした。自然に得られる苗の数と比べると、かなり効率が悪いのでは？

Q: 現在の牡蠣養殖の何が不満だと感じましたか？

A: 共同出荷というやり方には賛成だが、個人販売もしないと利益が出にくい。新しい漁師が増えない。7年間新規加入者はいない。

市場の牡蠣の値段が安すぎる。

五味公設市場は冬(牡蠣のシーズン)だけでいいという人がいるのが不満。でも、今まで存続してこられたのは、他の季節にも開いて経営している人がいるからです。

Q: 牡蠣養殖に関する意思決定プロセスについてどう思いますか？

A: 担当者が私の意見を聞いてくれるようになった気がします。もちろん人にもよりますが、若い人の意見を取り入れて会議で通す60代の人もあります。若い世代の漁師(親が漁師の50代も含む)と、子供がいる50代では、子供のため、将来のためにどうしたいのか、意見が食い違うこともある。

そういう人たちの意見を聞きながら、私たちは古いやり方を試してきた。だからこそ、現状を踏まえながら、新しい方法に挑戦し続けなければならないと思っています。

Q: OAに対応するために必要なことは何だと思えますか？

A: 環境に適応するためには、現状を打破した上で、さまざまな適応策を講じる必要がある。人為的に種苗を採取したり、他から種苗を購入するなどの対策が必要であれば、積極的に取り組んでいきたい。

漁業者としては、対策を講じるのであれば、確たる証拠がなければ始まらないという思いがある。研究者がデータを取れても、自分たちが失敗したら大変なことになるので、しっかりとした対策が必要だと思えます。

Q: 日生でのアマモ再生についてはどうお考えですか？

A: アマモのおかげで海が良くなった(小魚が増えた)という実感はあまりない。ただ、子供たちがアマモについて体験的に学ぶことは良いことだと思います。

RH-17

Q: 家族に事業を継がせることは考えていますか？

A: 息子に継がせることは勧めませんが、本人がやりたければ継がせたいと思います。

Q:牡蠣の養殖で一番気になる環境問題は？

A:イカは増えているが、魚は減っている、牡蠣への影響は不明、といった情報を耳にします。魚が獲れなくなっているのに、牡蠣が獲れなくなっても他の漁業をする気はありません。

現状を打破するためには、乱獲を打破するための放流事業に取り組む必要があると感じています。地元の漁師は魚を獲ることしか考えていないように感じる。

環境について学ぶ勉強会が何よりも必要です。現在、漁師が海に捨てるゴミはタバコの吸殻だけ(他のゴミは持ち帰り)。劣悪な環境を改善するために、カキの殻を撒く実験などに参加したこともあります。

Q:日生での牡蠣養殖の将来をどう考えていますか？

A:個人も地域も、カキ養殖に対する意欲や情熱が失われつつあると感じています。他の地域の牡蠣養殖をうらやましく思うこともあります。

コロナウィルスの影響で外食や業務用の牡蠣需要が減り、一度牡蠣養殖が崩れると再開は難しいのではないかと心配しています。

Q:OAによる牡蠣養殖への影響はどの程度心配していますか？

A:海洋酸性化についての知識が皆無であることが問題であり、目に見えないものであるため、軽視できる問題ではないと感じている。

Q:日生でのアマモ再生についてどうお考えですか？

A:アマモはもう十分なのではないかと感じています。

RH-16

Q:ご家族に事業を継がせることは考えていないのですか？

A:息子に漁業を継がせるつもりはない。

Q:OAによる牡蠣養殖への影響はどの程度心配していますか？

A:酸性化の影響が私たちの漁業で起こっていない限り、漁業者はOAの実験結果を知らされても何もしないでしょう。稚貝が大量に死ぬまでは誰も何もしない。

カキ殻さえ撒けば大丈夫なんでしょう？牡蠣の殻を撒けば、OAの軽減に役立つと思うのですが。

植物プランクトンを増やすのもOA対策では？鉄分を撒くのもいいのでは？現在、鉄線(海水中に鉄イオンを放出するワイヤー)を使って実験中です。

Q:日生でのアマモ再生についてはどうお考えですか？

A: アマモ再生活動など、地域の環境活動が牡蠣養殖に与える実際の影響を知るためのデータを示してくれない限り、私たちはもう貢献したくない。

アマモは牡蠣の殻が落ちたときに傷ついたもので、だから牡蠣の周りにはアマモが生えないのです。

RH-18

Q: 家族に事業を継がせることは考えていますか？

A: 後継者を見つける時期まで事業を続けるかどうかは不明です。天然種苗が採れなくなれば、新たな適応策を取り続けるつもりはない。魚がいない現状を考えると、他の漁業も続けるつもりはない。

Q: 牡蠣の養殖で最も懸念している環境問題は？

A: 海洋環境に対する懸念といえば、クロダイの捕食による被害が一番大きい。何が牡蠣の成長に影響しているのか特定するのが難しいので、他の環境問題に取り組むのは難しい。

Q: 現在の牡蠣養殖の何が不満だと感じましたか？

A: 労働力が足りない。研修生(外国人労働者)を4人までしか雇えないというルールを、人手不足の現状に合わせて変えなければならない。

Q: 牡蠣養殖に関する意思決定プロセスについてどう思いますか？

A: 牡蠣部会で決めた規制を現状に合わせて変える必要がある。

Q: 日生でのアマモ再生についてどう思いますか？

A: アマモ再生を継続するためには、その良い影響を知る必要がある。個人的には、アマモが筏に絡まるなどのマイナスの影響の方が大きいと感じている。アマモが牡蠣の養殖にどのようなメリットをもたらすのか、納得できるデータが必要で、そうでなければ続ける必要はないと思います。

RH-19

Q: 家族に事業を継がせることは考えていますか？

A: 子どもに牡蠣養殖をやらせるつもりはありませんし、子どもに継いでもらうような状況でもありません。

一方で、他産地からの新規就農者がきちんとルールを守ってくれるかどうかという懸念もあります。

Q: 日生での牡蠣養殖の将来をどう考えていますか？

A: 個体数が減り、漁獲量が減り、このままでは日生協がつぶれてしまうという未来しか見えません。もちろん、個人的には日生での牡蠣養殖は存続させたいと思っています。

Q: 現在の牡蠣養殖の何が不満だと感じましたか？

A: 漁協の経済的損失、設備や人件費の負担を漁師が負う必要がある。

Ⅶ 要 約

1. 2023 年度までの海洋観測の結果と考察

(1) 調査海域ごとの調査結果概要とそれぞれの海域特性

2022 年度には、調査対象海域が志津川湾(宮城県)、日生(岡山県)、廿日市(広島県)、北木島(岡山県)、佐田岬(愛媛県:豊後水道)、内海(愛媛県:豊後水道)、佐伯湾(大分県:豊後水道)の 7 海域であったが、2023 年度には小浜湾(福井県)、生浦湾(三重県)、英虞湾(三重県)、広島市地先(広島県)、姫島(大分県)の 5 海域が加わり 12 海域となった。また、対象養殖種もマガキだけであったのがアコヤガイ(英虞湾)が加わった。12 海域のうち、酸性化傾向が顕著に現れたのは、それぞれ発生頻度や発生期間などは異なるものの志津川湾、小浜湾、生浦湾、英虞湾、日生、北木島、廿日市、広島市地先、姫島の 9 海域で、pH の大幅な低下はないものの塩分と pH の相関が明らかになったのは豊後水道の佐田岬と佐伯湾、pH の大幅な低下もなく塩分と pH の明確な相関も認められなかったのは豊後水道の内海であった。内海では黒潮の影響を強く受けるため瀬戸内海奥部の沿岸酸性化の影響を受けにくく pH の低下が観測されなかったが、これにより少なくとも豊後水道沖の太平洋では海洋酸性化が進行していないことを証明するものである。北木島については、2022 年度調査において出水後に顕著な塩分低下に見舞われてもこれに追従した pH・ Ω_{arag} の低下が認められず、高梁川(岡山県)・太田川(広島県)河口部から 10km 以上離れていることから、河川水は到達しても有機物はこのプロセスで沈降またはトラップされ、沿岸酸性化の影響を受けていないかに見受けられた。しかし、2023 年度に Ω_{arag} が全期を通じて他の海域に比べて常時低い数値であることが判明し、その季節変動等もむしろ廿日市に近く、一転して酸性化が進行している可能性がある海域として注目され、地元のカキ養殖漁師のマガキ成貝の殻が薄くなっているとの主張を裏付ける結果となった。塩分低下、DO 低下が伴う沿岸酸性化は生じていないのに、なぜに Ω_{arag} が低いのか？北木島の観測測器はカキ養殖漁場内のカキ養殖筏に設置している。生浦湾や日生などカキ養殖場に観測測器を設置した観測定点では、出水等により pH・ Ω_{arag} の数値が昼夜で乱高下する。これは 10:00~14:00 頃の日射の強い時間帯は植物プランクトンや付着藻類による光合成が盛んなため上昇し、夜間には呼吸により低下するからであるが、北木島のある笠岡市地先海域は栄養塩濃度が低い貧栄養海域であるため光合成が低調であると考えられ、観測測器の設置場所はカキ養殖筏で、かつ周辺には多くのカキ養殖筏が設置されている。全期を通じて Ω_{arag} が低いのは多くの養殖カキによる呼吸の影響を受けている可能性があるが、さらなる精査が必要である。

Ω_{arag} が閾値 1.5 を下回ったのは 9 海域であるが、CO₂ シープである姫島を除き、その発生頻度が高く、かつ発生期間が長いのは、廿日市>北木島>日生>生浦湾>英虞湾>小浜湾>志津川湾の順であった。北木島を除き、いずれにおいても塩分と DO の低下が伴い、淡水の流入とそれに伴う有機物分解に起因する沿岸酸性化によるものであ

る。2022 年度に大出水により著しく沿岸酸性化が進んだ志津川湾では、2023 年度には 6 月 16 日に出水があっただけで、 Ω_{arag} が閾値 1.5 を下回ったのはその 1 回のみでそれも短期間で終焉した。志津川湾には大きな流入河川が存在しないため、近傍の北上川などの大河川の影響を強く受けていると考えられ、小規模な降雨で受ける影響は小さいのかもしれない。

小浜湾でも、 Ω_{arag} が閾値 1.5 を下回ったのは 2 定点において全期を通じてそれぞれ 2~3 回程度で、発生期間も短かった。ここでは北川と南川の河川水の影響を色濃く受けており、水深 1m という浅い層に強固な塩分躍層が形成されており、これを境に上層と下層で水質環境が大きく異なると考えられる。しかしながら、採水層がちょうど水深 1m で、なおかつ採水に使用した長さ 60 cm ニスキン採水器を縦に使用したため、塩分躍層の上層で採水時にコンタメが生じたものと考えられ、採水分析値のバラツキが著しく、センサーの測定値との不整合も生じた。小浜湾の水塊構造と酸性化の現状を把握するには、塩分躍層の上層と下層に分けて、採水層や連続観測機器の設置個所を見直す必要がある。また、小浜湾では、この 1m 深の塩分躍層の存在が災いしてか、光合成が極く水深 0m の極く表層のみでしかなされておらず、一次生産層が極めて薄いのも特徴的であった。

(2) 瀬戸内海の観測点間の pH 変動パターンの比較

瀬戸内海において日生、笠岡(北木島)、廿日市については複数年のデータが取得され、2023 年 4 月からは姫島も追加されて東西に 4 海域の観測サイトが設けられ、それぞれの pH・ Ω_{arag} の変動パターンの比較や相互の関連性について考察した。

日生 Stn.H-2(カキ採苗場)、Stn.H-3(アマモ場近傍)、笠岡(北木島)、廿日市、姫島の水温・塩分の 2023 年 1 月~12 月の推移を図 1 に示した。日生で冬季にやや低いが、パターンはどこもほぼ同様であった。塩分は太田川の影響があるため廿日市が最も低下し変動幅も大きい。日生では、降雨後に断続的に塩分が低下するが、H-2 と H-3 で同じ地先であるにもかかわらず低下するタイミングがずれており、これは日生に河川が流入しているわけではなく、東隣の千種川と西隣の伊里川からの河川水の拡散の具合で変わるものと考えられた。笠岡における塩分の動きは、廿日市とほぼ似通っていた。

塩分変動のドライバーである 2023 年の日降水量を見てみると、降雨は 5~7 月に集中しており、9 月には笠岡だけ比較的多く降ったものの、他ではほとんど降らなかった。塩分低下パターンの地域差は、降雨パターンの差よりも河川流量の地域差の影響の方が大きいと考えられるが、瀬戸内海の主要河川である揖保川(兵庫県)から山国川(姫島の袂)まで 5 河川の河川流量は、2023 年においてはほぼ同じ動きをしていた。これらの動向を踏まえて pH の変動パターンについて考察した。図 3 の左図は 2023 年 1~12 月の pH の生データをプロットしたものであるが、付着生物が増えてくると日変動が大きくなって見にくいので、1 日の最低値だけ抽出してプロットしたものが右図である。2023 年は、日生と笠岡と廿日市で pH・ Ω_{arag} の季節変動の様相がまったく異なっていた。図 4 の左図は

2023 年 1 月～12 月の pH の日平均値、右側はこれを Ω_{arag} に変換したものである。図 4 の左図で見ると、日生では夏季には河川流量が多かったので、塩分が顕著に低下し pH も低下するが、秋季にはそんなに下がらなかった。同じ日生でも H-2(カキ採苗場)では塩分、pH ともに下がったが、H-3(アマモ場近傍)では塩分は下がっても pH は下がらなかった。夏季においても H-3 では H-2 に比べて振れ幅が小さく、塩分が下がっても pH、 Ω_{arag} が低下しなかった。これは、明らかに近傍にあるアマモ場の影響と考えられ、従前から提案している「河口部からカキ養殖場に至るまでの間にアマモ場を再生すれば、陸水に伴って流入する多くの懸濁有機物をトラップして分解し、沿岸酸性化を抑制することができる。」という仮説を立証してくれる結果と考えられる。来年度から、アマモ場内に観測定点を追加し、さらなる証拠固めとメカニズムについて精査する。

廿日市では、2023 年は夏季に複数回のまとまった降雨があり塩分は低下したにもかかわらず、pH が下がったのは 1 回だけであったが、降雨があっても塩分は低下したのに pH はさがらないという現象は 2022 年にも確認された。2020～2021 年には、「降雨→塩分低下→pH・ Ω_{arag} 低下」が顕著に見られたのに(図 5)、何故か 2022 年からこの現象が顕著に発現しなくなり、季節変動だけで秋季に下がるというパターンに切り替わっている。「降雨→塩分低下→pH・ Ω_{arag} 低下」というパターンは沿岸酸性化のメカニズムであり他海域でも頻発しているが、特にカキ採苗時期である夏季における顕著な pH・ Ω_{arag} 低下は大きな脅威である。廿日市でも 2021 年までは「降雨→塩分低下→pH・ Ω_{arag} 低下」が頻発していたのに、何故に廿日市だけが 2022 年から塩分が低下しても pH・ Ω_{arag} が下がらなくなったのか？ 現段階で気付いた点として、2021 年と 2023 年を比較して海洋環境で異なっているのは夏季における DIN 濃度の違いである。2023 年の夏季の DIN 濃度は 2021 年の 1/4 以下と著しく少なかったが(図 6)、2023 年には栄養塩が少なかったために一次生産力が大幅に低下したことが関係しているのかもしれない。2021 年と 2023 年でこれほどに栄養塩濃度の差が生じたのかも不明であるが、塩分が低下しても pH を低下させない河川・海洋トリートメントが特定されて、このメカニズムが解明されれば、沿岸酸性化に対する極めて有効な緩和策・適応策となるものと考えられ、周辺のデータを含めあらゆる観点から洗い直す必要がある。

一方、笠岡は 2022 年まで塩分低下に pH 低下が伴わないので沿岸酸性化の影響は少ないと見られていたが、これは常に Ω_{arag} が低いがために見逃されていた面があり、少なくとも 2023 年においては本プロジェクトの調査対象海域の中で最も悪条件にあると判断された。引き続きモニタリングして、複数年の平均値で評価すべきであろう。

姫島の CO₂ 非噴出域では夏季のデータが欠測しているが、取得されたデータから判断すれば瀬戸内海の平均的な数値を示しており、離島であるためか陸水の影響を受けにくく降雨があっても顕著な塩分低下がないため、今後ともデータを蓄積していけば瀬戸内海の標準的な海域として有用にある可能性があるフィールドである。

(3) 志津川湾における塩分低下時の pH 変動パターンのバリエーション

志津川湾では、降雨後のデータをきめ細かく取得しており、出水後に塩分低下した際の pH・ Ω_{arag} の応答のバリエーションを瀬戸内海など他の海域でも応用できるよう整理解析した。図 7 は、2022 年 7 月の災害に至った大豪雨の際の志津川湾における生物応答であるが、まず大量の有機物流入により濁度が上昇し、有機物が分解されて DO が下がってそれに追従して pH が低下、1 週間ほどのタイムラグの後、有機物分解によって増加した栄養塩を植物プランクトンが取り込んでクロロフィルが増加した。これが沿岸酸性化の典型的なパターンとメカニズムである。したがって、大量の有機物流入を抑制してやれば急激な pH・ Ω_{arag} の低下は避けられるという解釈であった。

ところが、2023 年にはこれまでとまったく異なったパターンが現れた。志津川湾には大きな河川がないのに、2023 年 9 月に 2 週間以上低塩分が続く現象が見られた。1 週間ほどかけて塩分が下がり、また 1 週間ほどかけて徐々に戻っていった。低塩分化の開始時に pH と DO が下がったのはこれまでと同様であるが、塩分が下がったままなのに 4 日後には有機物分解によって栄養塩が供給され pH、DO、クロロフィルが上昇、その後再び pH と DO が低下、さらにその後有機物分解により pH、DO、クロロフィルが上昇した。つまり、2 週間にわたって低塩分と有機物供給が継続することによって 2 段階の増減が生じたが、この間に顕著な濁度の増減はなく濁度ソースが不明であったことから、どこか別の場所で有機物が分解して pH が下がった水塊が流入してきた可能性が見えてきた。

そこで、2023 年 9 月の志津川における降水量と北上川推移の経日変化を調べてみた。志津川の降水量は 9 月 5 日がピークで、志津川湾に流入している河川は短いため 1~2 日で志津川湾に流入するので今回の 2 週間以上にわたって続いた低塩分のソースとは考え難い。一方、2 週間のスパンでゆっくり水位が増減している川を調べてみると北上川がそれに該当し、志津川湾の 9 月の塩分低下は志津川湾内の川ではなく北上川の影響を受けた可能性がある。さらに、2022 年の豪雨時と異なり、2023 年 9 月の降雨は山間部を含めて岩手以南の幅広い範囲で数日間継続しており、南三陸町への降雨と河川流出ではなく、三陸一帯の河川が一斉に増水することで、沿岸の広範囲に低塩分帯を形成されて志津川湾に流入してきたもので、それによって低塩分の継続日数が長期化したことで、淡水流入の初期応答だけでなく、その後の pH・DO の振動現象まで観察できたと考えられる。来年度からは東北地方で大槌湾と宮古の観測定点を増設することとしており、水産研究・教育機構によって取得された塩分データ等も活用しながら、このような広域的な塩分低下による影響も考慮していかねばならない。

(4) 表層・底層の pH 変動パターンのバリエーション

廿日市では 2022 年から、志津川湾、日生では 2023 年から底層(海底上 1m)にも観測測器を設置し、底層から表層への影響を始めとした相互の関連性などを考慮した pH・ Ω_{arag} の変動パターンを整理し検討した。廿日市では、特に底層で 2023 年 7~9 月に

かけて pH と Ω_{arag} が低下し、3 カ月にわたって Ω_{arag} が閾値 1.5 を下回り、10 月に入って鉛直混合によって解消するという動きを示した。

志津川湾と日生においても、それぞれ Stn.S-3 と Stn.H-S において 2023 年度から底層（海底上 1m）で観測を開始した。志津川湾では水深が深いため、水温は 10 月以降は表層・底層で均質化するものの、春から夏にかけては底層が表層に比べて 3~5°C 程度低く推移した（図 11）。水深が深いため、塩分は底層では全期を通じてほとんど変動せず安定していた。pH は、廿日市と同様に夏季に底層で表層よりも顕著に低下し秋季に解消するというパターンを示したが、底層 Ω_{arag} は閾値 1.5 を頻繁に下回り、廿日市に比べて水深差が大きいため、pH・ Ω_{arag} ともに表層と底層で大きな差が生じた。横軸に表層と底層の水温差、縦軸に表層と底層の pH 差とって関係を見ると（図 12）、両者は正の相関にあり、成層化すると表層と底層の差が大きくなり、成層が解消されると表層と底層の差がなくなる。廿日市で見られたように、成層が解消されて鉛直混合は起きると底層の酸性化水の影響で表層の酸性化が一気に進むこともある。

日生ではまた異なるパターンを示した。水深が浅いために、廿日市や志津川湾のような表層と底層の明瞭な水温差がなく、底層でもきっちりと塩分変動が存在し、表層よりも底層の方が pH が高く、変動幅が小さく安定しており、有光層が底層まで達して光合成が行われているような動向を示した。これを見る限り、水深の浅いところでは表層の pH が底層に引っ張られて低下する懸念はなく、降雨の影響等により表層の方が pH 低下を招きやすい。これら複数の海域で表層と底層の関係を明らかにすることで、どの程度の水深で成層構造や成層の強弱によって底層の酸性化と底層が表層に及ぼす影響などを予測することが可能となる。

2. マガキ浮遊幼生の観測結果

2023 年度については、日生、志津川湾、小浜湾、広島湾において 2023 年 6 月から 9 月にかけて北原式プランクトンネットによってマガキ浮遊幼生を採集し、顕微鏡観察により形態異常の有無について観測した。使用したプランクトンネットの目合いは、日生のうち日生町漁協と小浜湾は 50 μm 、広島湾は 72 μm 、日生のうち邑久町漁協と志津川湾は 100 μm であった。

2020 年度から日生および志津川湾、2013 年度からは小浜湾および広島湾において、膨大な数のマガキ浮遊幼生の検体を採集し観測を実施し、形態異常の有無を調査してきたが、世界的にマガキ浮遊幼生に悪影響を与える閾値とされる $\Omega_{\text{arag}}1.5$ を複数回にわたり比較的長期にわたって大きく下回った場合を含め、いずれの海域においてもマガキ浮遊幼生の形態に異常が確認された事例はまったく認められていない。ただ、海外ではマガキの天然採苗が行われておらず、 $\Omega_{\text{arag}}1.5$ という閾値もアメリカ西海岸で飼育実験によって得られた数値であり、複合的な要因に晒される自然海域で、しかも日本沿岸海域で適用できるかの確証は得られていない。また、マガキ浮遊幼生の形態異常の調査にあたって

は、D型幼生になって以降のすべての発育ステージの幼生を確認する必要があり、目合い 50 μm のプランクトンネットを使用することが望ましいが、日生のうち日生町漁協と小浜湾では 50 μm を使用しているものの、日生のうち邑久町漁協、志津川湾は 100 μm 、広島市地先は 72 μm と統一されていない。形態異常判定手法の構築と併せ、プランクトンネットの目合いの統一など観測手法の見直しと確立が求められる。

3. 自然海域におけるマガキ浮遊幼生の形態異常判定手法の構築

形態異常の判定基準は観察者によって異なるものと考えられ、客観的に誰もが正しく判定することができる判定手法の確立が求められる。カキ幼生は卵から生まれたばかりのサイズは 0.08mm 程度で、海水中の植物プランクトン他の餌を食べながら成長し、約 2 週間後に着底する。カキ幼生は成長するにつれて左殻の厚みが増すので、画像解析をする際に投影面積が安定しないため(図 14)、形態異常を判定する対象は D 型幼生に絞ることとした。蛍光抗体法によるマガキ幼生の同定方法を組み合わせて野外試料からマガキ幼生だけを選んで形態を判別することとし、低 pH 下での飼育実験により形態異常を発現したマガキ D 型幼生は直線部分の屈曲が顕著であるとの既往知見が得られたので、D 型幼生に長方形を当てはめて長辺の長さで判定することとした。マガキ幼生の各種のサイズを計測し形態異常を検討するにあたっては、先行研究である「画像解析システムを用いた二枚貝幼生の自動識別方法の試み(寺崎誠,・浜口昌巳,・薄浩則,・石岡宏子. 2003, *Lamer*, 39, 87-93.)」を参考にし、福井県立大学 八杉准教授の協力を得て、マガキ浮遊幼生の形態異常等を誰でもが簡便に判定できるように画像解析システムを開発に取り組んだ。併せて行った低 pH 下でのマガキ浮遊幼生飼育実験では、貝殻がまともに形成されず、

当初考えていたように D 型幼生の直線部分の長さや屈曲度では評価することができなかった。そこで、D 型幼生の投影面積を算定して比較した結果、対照区と 2 つの低 pH 群の間で有意な差が生じた(Kruskal-Wallis test $P < 0.01$) ので、形態異常は投影面積で評価することにし(図 17)、この方法によって全国各地でのマガキ浮遊幼生の形態異常を調べるための画像解析システムを開発することができた。

4. 飼育実験によるカキ幼生および稚貝への酸性化影響評価

pH 環境下におけるマガキ幼生の発生実験により、低 pH 環境下の晒されると貝殻形成の遅延や形成異常が生じることを確認した。特に、受精からトロコフォア幼生までの 2-3 時間に低 pH 環境下に晒されると、マガキの発生初期の生残率が下がると推測された。このことにより、海水の酸性化が、1990 年以降に広島湾において発生頻度が高まっている採苗不良の一因である可能性が浮上してきた。

マガキ幼生および稚貝の発現遺伝子解析から、低 pH 条件下で発現量が増す遺伝子マーカーが発見され、今後は、これらをマーカーとして現場観測チームと連携することによって、低 pH 等の環境とマガキへの影響の関係を調べるができる体制が整った。

引き続き、マガキ幼生や稚貝の低 pH 条件下の影響評価を行い、発現遺伝子解析について網羅的に調べることによって低 pH と関連するマーカー候補を発掘する。

今年度見つかったマーカーを使って現場観測チームと連携し、例えば pH 変動が大きな海域を選定し、観測機器類と共にマガキ稚貝を垂下して定期的にサンプリングして観測値とマガキの応答の関連性を解析することを検討することができる。

5. 数値モデリングによる海洋酸性化影響評価

(1) 富栄養海域の東京湾と貧栄養海域の比較検証

栄養環境面で両極にある東京湾(富栄養化海域)と宮古湾(貧栄養化海域)において、これからどのような地域適応策を考えていくべきかの指針を得る基礎資料とするため、数値モデリングを試みた。

モデル結果は貧栄養海域である宮古湾と、富栄養海域である東京湾で観測された物理・生物化学過程の季節変動を現実的に再現できた。人為起源 CO₂ を大幅に削減しない限り、今世紀末までに海洋酸性化は貝類幼生にとって危険水準に到達すると予測された。現行のモデル結果では、貧酸素化は宮古湾の表層と底層、東京湾の表層では深刻なレベルには到達しないとの示唆が得られた。但し、底層との相互作用を考慮していないため、今後、これらを考慮した検討が必要である。

貧栄養海域では河川からの栄養塩の投入が表層の海洋酸性化と貧酸素化を緩和する可能性がある。河川からの淡水と栄養塩の流入過程のモデルでの考慮は不十分であり、東京においては、下水や工場排水の流入も考慮する必要がある。

(2) 瀬戸内海豊後水道海域における海洋酸性化の現状と将来予測の検討

本プロジェクトの調査対象海域である佐田岬、佐伯湾、内海、廿日市、笠岡、姫島の6海域が含まれる瀬戸内海西部のモデルを作成した。外洋では境界条件にグローバルなデータセットを使用できるので比較的容易に取り組めるが、瀬戸内海のような内海では河川水等の影響を強く受けるなど複雑で、境界条件などモデリングの設定が困難である。

2020年5月1日～2022年3月7日(スピニアップ期間2カ月)の期間で、廿日市、姫島、佐田岬(図9)での本プロジェクトによるモニタリング結果をモデルの初期値・境界値・参照値としてモデルを駆動させ、パラメーターを較正したうえで再現性を評価した。pH と Ω_{arag} は水温、塩分、全アルカリ度(TA)、溶存無機炭素(DIC)の値から CO₂SYS (Pierrot et al., 2006)を用いて計算した。

現時点では、塩分濃度の大幅な低下、pH とオメガアラグのダウンシフトを再現できない。前半においては塩分濃度、年末にかけては pH と Ω_{arag} のミスマッチが大きい。一般的に塩分濃度のミスマッチが大きい。pH と Ω_{arag} の観測値の変動はモデルよりもはるかに大きいことから、河川流出量の過大評価が原因かもしれない。RCP8.5 条件下での 2098～

2099 年の Ω_{arag} はマガキ浮遊幼生の閾値 1.5 を下回る予測結果が得られた。

(3) 海洋酸性化による国内水産業への経済的損失の検証

日生および志津川湾において、人為起源 CO₂ の排出が高排出(RCP 8.5)シナリオで推移した場合、海洋酸性化の影響による今世紀半ば 2050 年にマガキ養殖生産量と生産額への影響について予測した。

これにより試算したところ、2050 年には日生では「稚貝の正常な発達率」低下により、4,470 千円、「成貝の石灰化」低下により 198,800 で、計 203,270 千円の減収、志津川湾では同様に、2,390 千円、67,700 千円で、計 91,600 千円減収の見込みとなった

海洋酸性化がこのまま RCP8.5 シナリオで進行すれば、2050 年には養殖マガキの稚貝の正常な発達や成貝の石灰化に影響が及び始め、2090 年代にはマガキの生活史のすべてにおいて影響が顕在化し、カキ養殖に大きな打撃を与えると予測された。稚貝の正常な発達や成貝石灰化に支障が出始めた場合には、他地域からのマガキ種苗の購入、マガキ人工採苗技術の導入等により新たな支出が増加するとともに、養殖密度など養殖方法の見直しも必要になってくる。しかし、パリ協定基準の低排出(RCP 2.6)シナリオに抑えることができれば、深刻な打撃は回避することができることが定量的に示された。

6. 世界における酸性化に対する政策・適応策の分析

気候変動に起因する海洋酸性化(OA)は、世界の生態系に急激な変化をもたらし、海洋生物に大きな脅威を与えている。世界的・地域的に海洋酸性化問題に対処するためには、トップダウンの視点に立った政府の政策と、ボトムアップの視点に立った適応戦略が必要であり、より効果的かつ総合的な解決策が求められている。さらに、OA が他の環境問題と関連していることから、OA を海洋の他の文脈、例えば、生物多様性や汚染体制などの文脈の中に位置づけることが極めて重要であり、それは、OA の原因と結果の両方を緩和するのに役立つと同時に、一般市民の OA に対する認識を容易に受け入れられる方法で高めることになるであろう。

(1) 世界における OA 研究の最新情報

OA 研究は、生物学的、物理学的、化学的、社会経済的な観点から、世界中で急速に発展している。例えば、センサーは多くの地域で広く応用されており、“箱入り GOA-OA ” からポータブル pHyter に至るまで、様々な地域の需要や手頃な価格に応じて開発されている。国際的には、OA アライアンスや海洋財団のように、さまざまなスケールで OA 緩和と適応のためのデータと証拠の必要性を特定し、各国が政策や法律を通じて OA を削減できるようにするために、より多くの組織が行動を起こしている。地域的には、OA 研究を可能にするため、OA に向けた地域の能力が構築され、OA に脆弱な地域を支援するため、より多くの支援を得るために、地域のニーズや課題も聞かれるようになった。化学的パラメータ

の代わりに、例えば人間の健康や生態系サービスなど、OA 状況の深刻さを定量化するための他の指標も提案されている。

(2) OA ガバナンスと政策立案

OA ガバナンスは、海洋酸性化への適応をより効果的かつ効率的に進めるのに役立つ。いくつかの国(カナダ、アメリカなど)は、現在進行中の OA 問題とその影響に取り組むために、OA に関連したガバナンスと政策の枠組みを提案している。取水に関する既存の政策は、水質目標を策定し、沿岸環境の回復力を向上させるために活用されてきた。気候変動とともに、海洋酸性化と低酸素症も、水質をよりよく管理するための優先課題トップ 5 に挙げられている。国際的な場では、生物多様性条約のような多国間環境協定も OA に対応している。

しかし、OA ガバナンスの実施や行動には課題も存在する。例えば、動機づけがあり、厳密で、一般市民から広く支持されるような新しい政策を見つけるのは難しい。さらに、生物多様性条約は長期に渡ってゆっくりと進行する環境問題であるため、生物多様性条約に対処するための方策は長期的に有効でなければならず、そのためには継続的な資金調達と管理が必要である。その一方で、OA を防ぐための行動を生み出すために、国連などのハイレベルな交渉機関が主導するいくつかの国際的イニシアチブの成果は、まだほとんど見られていない。

(3) OA 適応戦略

海洋酸性化と低酸素症の脅威に対する回復力を構築するためには、地域経済と社会の安定を維持するための沿岸コミュニティからのボトムアップ・アプローチが中心であることが分かっている。このようにして、研究者、漁業者、NGO、管理機関、沿岸コミュニティなどを巻き込んだ強力で協調的なアプローチを確立し、OA 課題に立ち向かうことができる。環境的なストレスに加え、規制や政治的なストレスにも対処する必要がある。このように、いくつかの地域の貝類養殖コミュニティで実施・提案されている OA に対する適応戦略として、「政策とネットワーク」、「養殖場管理」、「科学」の 3 つのカテゴリーが強調されている。

しかし、これらの適応戦略を成功させるのは容易ではない。課題としては、養殖業者が OA で提示された課題を現実の問題として解釈する能力に限界があること、政策に多くの規制や制限があり、養殖業者が適応戦略を利用しにくいことなどが挙げられる。したがって、OA に取り組むためには、政治的ガバナンスと適応戦略の間の大きな協力が不可欠である。

(4) OA に対する認識と科学的コミュニケーション

OA が貝類養殖の生産に強く影響するため、OA 状況をタイムリーに把握するためには、貝類養殖業者の OA に対する認識が必要である。中国、フランス、カナダ、米国、日本、韓国などの国々で貝の生産量が多いにもかかわらず、これらの国々における貝産業の OA 意識について明らかにした研究はほとんどない。

全体として、米国とカナダの貝類養殖業者は OA に対して高い意識を持っており、OA がもたらす結果に直面することへの懸念を表明している。科学者、利害関係者、政策立案者と協力し、多くの貝類養殖業者は OA への適応に前向きである。しかし、メディアからの情報共有により、一般市民の OA に対する理解が弱い可能性があること、また、貝類養殖セクターからの声が非常に少ないことも判明しており、今後、最前線で働く人々にスポットを当てる必要がある。

世界各国の OA 政策、適応、国民意識について調査した結果、OA 問題への対応には、それぞれの道筋で進展と課題があることがわかった。また、本年度は、日本の状況、特に海外から日本の状況へ移行する可能性のある政策、日本の貝類養殖業者から提案された適応策、そして最終的に世界の他の地域と比較した意識について議論した。今後の作業では、これらの観点を統合し、日本の OA 適応のためのテーラーメイドで効果的かつ先進的な枠組みを設計し、将来の OA 状況によりよく備えるための OA 政策、適応戦略、およびデリバリーを提供することを目指さなければならない。

参考文献

- Agostini, S., Heitzman, J., Iijima, L., Mitushasi, G., Spatafora, D., Wada, S., ... & Kurihara, H. (2024). Turf algae drives coral bioerosion under high CO₂.
- Akpan, A. E., Ugbaja, A. N., Okoyeh, E. I., & George, N. J. (2018). Assessment of spatial distribution of contaminants and their levels in soil and water resources of Calabar, Nigeria using geophysical and geological data. *Environmental earth sciences*, 77, 1-19.
- Anglada-Ortiz, G., Meilland, J., Ziveri, P., Chierici, M., Fransson, A., Jones, E., & Rasmussen, T. L. (2023). Seasonality of marine calcifiers in the northern Barents Sea: Spatiotemporal distribution of planktonic foraminifers and shelled pteropods and their contribution to carbon dynamics. *Progress in Oceanography*, 218, 103121.
- Bakker, D. C., Alin, S. R., Becker, M., Bittig, H. C., Castaño-Primo, R., Feely, R. A., ... & Wilson, D. (2022). Surface Ocean CO₂ Atlas Database Version 2022 (SOCATv2022)(NCEI Accession 0253659).
- Bernal Bravo, C., & Angulo Rasco, F. J. (2022). Las pruebas estandarizadas en educación De qué estamos hablando?. *Las pruebas estandarizadas en educación De qué estamos hablando?*, 1-226.
- Boteler, C., Dowd, M., Oliver, E. C., Krainski, E. T., & Wallace, D. W. (2023). Trends of Anthropogenic Dissolved Inorganic Carbon in the Northwest Atlantic Ocean Estimated Using a State Space Model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, e2022JC019483.
- Botta, R., Asche, F., Borsum, J. S., & Camp, E. V. (2020). A review of global oyster aquaculture production and consumption. *Marine Policy*, 117, 103952.

- Burton, I., R. W. Kates & G. F. White. (1993). *The environment as hazard*, 2nd edition. Guilford, NY: The Guilford Press.
- Cattano, C., Calò, A., Di Franco, A., Firmamento, R., Quattrocchi, F., Sdiri, K., ... & Milazzo, M. (2017). Ocean acidification does not impair predator recognition but increases juvenile growth in a temperate wrasse off CO₂ seeps. *Marine Environmental Research*, 132, 33-40.
- Cattano, C., Giomi, F., & Milazzo, M. (2016). Effects of ocean acidification on embryonic respiration and development of a temperate wrasse living along a natural CO₂ gradient. *Conservation physiology*, 4(1), cov073.
- Ciuriak, N. (2012). The quiet tsunami: the ecological, economic, social, and political consequences of ocean acidification. *Paterson Review of International Affairs* (2012), 12, 123-143.
- Cross, J. N., Turner, J. A., Cooley, S. R., Newton, J. A., Azetsu-Scott, K., Chambers, R. C., ... & Wickes, L. (2019). Building the knowledge-to-action pipeline in North America: Connecting ocean acidification research and actionable decision support. *Frontiers in Marine Science*, 6, 356
- D'Anna, L. M., & Murray, G. D. (2015). Perceptions of shellfish aquaculture in British Columbia and implications for well-being in marine social-ecological systems. *Ecology and Society*, 20(1).
- de las Nieves, L. S. (2017). *Mäerl Calcification, Photosynthesis and Respiration in an Acidified Ocean*(Doctoral dissertation, Universidade do Algarve (Portugal)).
- Dickson, A. (2010). *Ocean Acidification Impacts on Shellfish Workshop: Findings and Recommendations*.

- Drope, N., Morin, E., Kohfeld, K., Ianson, D., & Silver, J. J. (2023). Media Representations and Farmer Perceptions: A Case Study of Reporting on Ocean Acidification and the Shellfish Farming Sector in British Columbia, Canada. *Environmental Communication*, 1-12.
- Dugan, D., Janzen, C., McCammon, M., Evans, W., & Bidlack, A. (2017, September). The evolution of ocean acidification observing efforts in Alaska and the development of an Alaska Ocean acidification network. In *OCEANS 2017-Anchorage*(pp. 1-6). IEEE.
- Duke, P. J., Hamme, R. C., Ianson, D., Landschützer, P., Ahmed, M. M., Swart, N. C., & Covert, P. A. (2023). Estimating Marine Carbon Uptake in the Northeast Pacific Using a Neural Network Approach. *EGUsphere*, 2023, 1-38.
- Dupont, S., & Metian, M. (2023). General considerations for experimental research on ocean alkalinity enhancement. *State of the Planet*, 2, 1-11.
- Ekstrom, J. A., Suatoni, L., Cooley, S. R., Pendleton, L. H., Waldbusser, G. G., Cinner, J. E., ... & Portela, R. (2015). Vulnerability and adaptation of US shellfisheries to ocean acidification. *Nature climate change*, 5(3), 207-214.
- Falkenberg, L. J., Bellerby, R. G., Connell, S. D., Fleming, L. E., Maycock, B., Russell, B. D., ... & Dupont, S. (2020). Ocean acidification and human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(12), 4563.
- Fassbender, A. J., Carter, B. R., Sharp, J. D., Huang, Y., Arroyo, M. C., & Frenzel, H. (2023). Amplified subsurface signals of ocean acidification. *Global Biogeochemical Cycles*, 37(12), e2023GB007843.

- Fassbender, A. J., Sabine, C. L., & Palevsky, H. I. (2017). Nonuniform ocean acidification and attenuation of the ocean carbon sink. *Geophysical Research Letters*, 44(16), 8404-8413.
- García-Ibáñez, M. I., Fernández-Guallart, E., Lucas, A., Pascual, J., Gasol, J. M., Marrasé, C., ... & Pelejero, C. (2024). Two new coastal time-series of seawater carbonate system variables in the NW Mediterranean Sea: rates and mechanisms controlling pH changes.
- Gazeau, F., Alliouane, S., Bock, C., Bramanti, L., López Correa, M., Gentile, M., ... & Ziveri, P. (2014). Impact of ocean acidification and warming on the Mediterranean mussel (*Mytilus galloprovincialis*). *Frontiers in Marine Science*, 1, 62.
- Ghosh, A., & Bhadury, P. (2019). Methods of assessment of microbial diversity in natural environments. In *Microbial Diversity in the Genomic Era* (pp. 3-14). Academic Press.
- Gledhill, D. K., Jewett, E. B., Arzayus, K., Bennet, J., Newton, J., Salisbury, J., & Sutton, A. J. AN INTEGRATED COASTAL OCEAN ACIDIFICATION OBSERVING SYSTEM (ICOAOS).
- Gledhill, D. K., Wanninkhof, R., & Eakin, C. M. (2009). Observing ocean acidification from space. *Oceanography*, 22(4), 48-59
- Gómez-Reyes, R., Galindo-Sánchez, C. E., Lafarga-De la Cruz, F., Hernández-Ayón, J. M., Valenzuela-Wood, E., & López-Galindo, L. (2023). Individual Pattern Response to CO₂-Induced Acidification Stress in *Haliotis rufescens* Suggests Stage-Specific Acclimatization during Its Early Life History. *Sustainability*, 15(18), 14010.

- Gordon-Smith, D. A. D., & Greenaway, A. M. (2019). Submarine groundwater discharge and associated nutrient fluxes to Discovery Bay, Jamaica. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 230, 106431.
- Green, K. M., Spalding, A. K., Ward, M., Levine, A., Wolters, E. A., Hamilton, S. L., & Rice, L. (2023). Oregon shellfish farmers: Perceptions of stressors, adaptive strategies, and policy linkages. *Ocean & Coastal Management*, 234, 106475.
- Gurr, S. J., Dwyer, I. P., Goleski, J., Lima, F. P., Seabra, R., Gobler, C. J., & Volkenborn, N. (2021). Acclimatization in the bay scallop *Argopecten irradians* along a eutrophication gradient: Insights from heartbeat rate measurements during a simulated hypoxic event. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 54(1), 23-49.
- Hall-Spencer, J. M., & Harvey, B. P. (2019). Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation. *Emerging Topics in Life Sciences*, 3(2), 197-206.
- Harrould-Kolieb, E. R. (2020). Framing ocean acidification to mobilise action under multilateral environmental agreements. *Environmental Science & Policy*, 104, 129-135.
- Harrould-Kolieb, E. R., & Hoegh-Guldberg, O. (2019). A governing framework for international ocean acidification policy. *Marine Policy*, 102, 10-20.
- Harrould-Kolieb, E. (2021). Enhancing synergies between action on ocean acidification and the post-2020 global biodiversity framework. *Conservation Biology*, 35(2), 548-558.
- Hassoun, A. E. R., Bantelman, A., Canu, D., Comeau, S., Galdies, C., Gattuso, J. P., ... & Ziveri, P. (2022). Ocean acidification research in the Mediterranean Sea: Status, trends and next steps. *Frontiers in Marine Science*, 9.

- Hassoun, A. E. R., Bantelman, A., Canu, D., Comeau, S., Galdies, C., Gattuso, J. P., ... & Ziveri, P. (2022). Ocean acidification research in the Mediterranean Sea: Status, trends and next steps. *Frontiers in Marine Science*, 9.
- Hauri, C., Gruber, N., Plattner, G.-K., Alin, S., Feely, R., Hales, B., Wheeler, P., 2009. Ocean acidification in the California current system. *Oceanography* 22. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2009.97>.
- Huang, X., Leung, J. Y., Hu, M., Xu, E. G., & Wang, Y. (2022). Microplastics can aggravate the impact of ocean acidification on the health of mussels: Insights from physiological performance, immunity and byssus properties. *Environmental Pollution*, 308, 119701.
- Imrit, Y. A., Ramessur, R. T., & Boodhoo, K. (2023). A study of hypoxia and ocean acidification related physico-chemical parameters in selected coastal waters around Mauritius. *Regional Studies in Marine Science*, 59, 102815.
- Jagers, S. C., Matti, S., Crépin, A. S., Langlet, D., Havenhand, J. N., Troell, M., ... & Anderson, L. G. (2019). Societal causes of, and responses to, ocean acidification. *Ambio*, 48, 816-830.
- Kelly, R. P., Cooley, S. R., & Klinger, T. (2014). Narratives can motivate environmental action: the Whiskey Creek ocean acidification story. *Ambio*, 43, 592-599.
- Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Crim, R., Hendriks, I.E., Ramajo, L., Singh, G.S., Duarte, C.M., Gattuso, J.-P., 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global Change Biol.* 19, 1884–1896. <https://doi.org/10.1111/gcb.12179>.

- Krug, L., Sarker, S., Huda, S., Gonzalez-Silvera, A., Edward, A., Berghoff, C., ... & Betancur, S. (2021). Putting training into practice: an alumni network global monitoring program. *Oceanography*, 18-19.
- Kuliński, K., Rehder, G., Asmala, E., Bartosova, A., Carstensen, J., Gustafsson, B., ... & Undeman, E. (2022). Biogeochemical functioning of the Baltic Sea. *Earth System Dynamics*, 13(1), 633-685.
- Lange, N., Fiedler, B., Álvarez, M., Benoit-Cattin, A., Benway, H., Buttigieg, P. L., ... & Tanhua, T. (2023). Synthesis Product for Ocean Time-Series (SPOTS)—A ship-based biogeochemical pilot. *Earth System Science Data Discussions*, 2023, 1-38.
- Lindgren, M., Brander, K., 2018. Adapting fisheries and their management to climate change: a review of concepts, tools, frameworks, and current progress toward implementation. *Rev. Fish. Sci. Aquacult.* 26, 400–415. <https://doi.org/10.1080/23308249.2018.1445980>.
- Lupo, C., Amigo, A. O., Mandard, Y. V., Peroz, C., & Renault, T. (2014). Improving early detection of exotic or emergent oyster diseases in France: Identifying factors associated with shellfish farmer reporting behaviour of oyster mortality. *Preventive Veterinary Medicine*, 116(1-2), 168-182.
- Mabardy, R. A., Waldbusser, G. G., Conway, F., & Olsen, C. S. (2015). Perception and response of the US west coast shellfish industry to ocean acidification: the voice of the canaries in the coal mine. *Journal of Shellfish Research*, 34(2), 565-572.
- Makomere, R., & McDonald, J. (2020). Responding to ocean acidification beyond climate governance. In *Research Handbook on Climate Change, Oceans and Coasts* (pp. 330-347). Edward Elgar Publishing

- Martz, T. R., Daly, K. L., Byrne, R. H., Stillman, J. H., & Turk, D. (2015). Technology for ocean acidification research: Needs and availability. *Oceanography*, 28(2), 40-47.
- McDonald, J., Brent, K., McCormack, P., & McGee, J. (2023). Greenhouse gas removal in Australian climate law: A positive role for negative emissions. *The University of New South Wales Law Journal*, 46(1), 79-110.
- Meléndez, M., Salisbury, J., Gledhill, D., Langdon, C., Morell, J. M., Manzello, D., ... & Sutton, A. (2018). Seasonal Net Ecosystem Metabolism of the Near-Shore Reef System in La Parguera, Puerto Rico. *Biogeosciences discussions*, 2018, 1-50
- Meléndez, M., Salisbury, J., Gledhill, D., Langdon, C., Morell, J. M., Manzello, D., ... & Sutton, A. (2020). Seasonal variations of carbonate chemistry at two western Atlantic coral reefs. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(8), e2020JC016108.
- Miller, D.D., Ota, Y., Sumaila, U.R., Cisneros-Montemayor, A.M., Cheung, W.W.L., 2018. Adaptation strategies to climate change in marine systems. *Global Change Biol.* 24, e1–e14. <https://doi.org/10.1111/gcb.13829>.
- Mossler, M. V., Bostrom, A., Kelly, R. P., Crosman, K. M., & Moy, P. (2017). How does framing affect policy support for emissions mitigation? Testing the effects of ocean acidification and other carbon emissions frames. *Global environmental change*, 45, 63-78.
- Nina, B., Bleuenn, G., Canu, D., Charles, G., Roberta, G., Simona, S., ... & Zunino, S. (2023). Ocean Governance Knowledge Systems, Policy Foundations and Thematic Analyses Ocean Acidification as a Governance Challenge in the Mediterranean Sea: Impacts from Aquaculture and Fisheries. MARE PUBLICATION SERIES.

- Osborne, E., Hu, X., Hall, E. R., Yates, K., Vreeland-Dawson, J., Shamberger, K., ... & Dash, P. (2022). Ocean acidification in the Gulf of Mexico: Drivers, impacts, and unknowns. *Progress in oceanography*, 102882.
- Pardis, W., Grabb, K. C., DeGrandpre, M. D., Spaulding, R., Beck, J., Pfeifer, J. A., & Long, D. M. (2022). Measuring Protons with Photons: A Hand-Held, Spectrophotometric pH Analyzer for Ocean Acidification Research, Community Science and Education. *Sensors*, 22(20), 7924.
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., ... & Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science advances*, 9(37), eadh2458.
- Sastri, A. R., Christian, J. R., Achterberg, E. P., Atamanchuk, D., Buck, J. J., Bresnahan, P., ... & Tsunoda, T. (2019). Perspectives on in situ sensors for ocean acidification research. *Frontiers in Marine Science*, 6, 653.
- Smith, C. J., Papadopoulou, K. N., Barnard, S., Mazik, K., Elliott, M., Patrício, J., ... & Borja, A. (2016). Managing the marine environment, conceptual models and assessment considerations for the European Marine Strategy Framework Directive. *Frontiers in Marine Science*, 3, 144.
- Su, J., Cai, W. J., Hussain, N., Brodeur, J., Chen, B., & Huang, K. (2019). Simultaneous determination of dissolved inorganic carbon (DIC) concentration and stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$ -DIC) by Cavity Ring-Down Spectroscopy: Application to study carbonate dynamics in the Chesapeake Bay. *Marine Chemistry*, 215, 103689.
- Tallis, H. M., Ruesink, J. L., Dumbauld, B., Hacker, S., & Wisheart, L. M. (2009). Oysters and aquaculture practices affect eelgrass density and productivity in a Pacific Northwest estuary. *Journal of Shellfish Research*, 28(2), 251-261.

- Thor, P., Vermandele, F., Bailey, A., Guscelli, E., Loubet-Sartrou, L., Dupont, S., & Calosi, P. (2022). Ocean acidification causes fundamental changes in the cellular metabolism of the Arctic copepod *Calanus glacialis* as detected by metabolomic analysis. *Scientific Reports*, 12(1), 22223.
- Green, K. M., Spalding, A. K., Ward, M., Levine, A., Wolters, E. A., Hamilton, S. L., & Rice, L. (2023). Oregon shellfish farmers: Perceptions of stressors, adaptive strategies, and policy linkages. *Ocean & Coastal Management*, 234, 106475.
- Tittensor, D.P., Beger, M., Boerder, K., Boyce, D.G., Cavanagh, R.D., Cosandey-Godin, A., Crespo, G.O., Dunn, D.C., Ghiffary, W., Grant, S.M., Hannah, L., Halpin, P.N., Harfoot, M., Heaslip, S.G., Jeffery, N.W., Kingston, N., Lotze, H.K., McGowan, J., McLeod, E., McOwen, C.J., O’Leary, B.C., Schiller, L., Stanley, R.R.E., Westhead, M., Wilson, K.L., Worm, B., 2019. Integrating climate adaptation and biodiversity conservation in the global ocean. *Sci. Adv.* 5, eaay9969 <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay9969>.
- Turner, J., Gassett, P., Dohrn, C., Miller, H., Boylan, C., & Laschever, E. (2021). Opportunities for US State Governments and in-Region Partners to Address Ocean Acidification through Management and Policy Frameworks. *Coastal Management*, 49(5), 436-457.
- Wada, S., Agostini, S., Harvey, B. P., Omori, Y., & Hall-Spencer, J. M. (2021). Ocean acidification increases phytoplankton carbon fixation and export in a warm-temperate system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 250, 107113.
- Wada, S., Ishii, M., Kosugi, N., Sasano, D., Matsushita, W., Omori, Y., & Hama, T. (2020). Seasonal dynamics of seawater CO₂ system at a coastal site near the southern tip of Izu Peninsula, Japan. *Journal of oceanography*, 76, 227-242.

- Ward, M., Spalding, A. K., Levine, A., & Wolters, E. A. (2022). California shellfish farmers: Perceptions of changing ocean conditions and strategies for adaptive capacity. *Ocean & Coastal Management*, 225, 106155
- Whitefield, C. R., Braby, C. E., & Barth, J. A. (2021). Capacity Building to Address Ocean Change: Organizing Across Communities of Place, Practice and Governance to Achieve Ocean Acidification and Hypoxia Resilience in Oregon. *Coastal Management*, 49(5), 532-546.
- Zhang, J., J. Fleming & R. Goericke. 2012. Fishermen's perspectives on climate variability. *Mar. Policy* 36:466–472
- Ziveri, P., Delpiazzo, E., Bosello, F., Eboli, F., & van den Bergh, J. (2017). Adaptation policies and strategies as a response to ocean acidification and warming in the Mediterranean Sea. In *Handbook on the Economics and Management of Sustainable Oceans* (pp. 339-352). Edward Elgar Publishing

