

海洋酸性化適応プロジェクト 令和2年度報告書

1. 目的

世界的な規模で進む海洋酸性化は、沿岸域でもその進行が報告されている。水産業への影響が懸念されるが、特に脆弱な貝類養殖の適応策は世界でも重要な課題として検討されている。しかし、日本では、国、県、貝類養殖業者も含め、持続可能な漁業生産を守るための適応策は全く検討されていない。特に、沿岸貝類養殖の海洋酸性化への適応策は喫緊の課題であるが、科学的知見の収集、問題解決のためのネットワーク、そして適応策実施に関する具体的な取り組みはない。海洋酸性化による水産業への被害は1兆円を超えるとも言われる。そこで、我が国のカキ養殖産地から2地域のモデル海域を選定し、効率的なモニタリング手法を構築して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」と実践体制を提案しようとするものである。具体的には2020～2022年度の3年間を事業期間として、目指すべき成果として次の目標を掲げた。

(1) 状況把握とモニタリング

- ・モデル地域である岡山県備前市日生海域及び宮城県南三陸町志津川湾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
- ・上記によるモニタリングステーションの増設と拡大、これらモニタリング情報のデータベース化とネットワーク化、プラットフォーム構築に関する提案

(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（レベル0，1，2・・・）の構築とレベルに応じた適応策（短期・中期・長期）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) アウトリーチ活動について

- ・これらの成果に基づく漁業者・漁業団体・漁業界との双方向型アウトリーチ活動の展開
- ・さらに広く一般社会に向けてのアウトリーチ活動による海洋酸性化に対する理解の深化

2. 本年度の実施内容

モデル海域として、岡山県備前市日生町地先と宮城県南三陸町志津川湾を選定した（図1）。本年度については、コロナ禍の影響により協議の場を設けることが困難であったため、カキ浮遊幼生の形態異常を確認するためのラーバ観測や海洋観測等の現地調査に重点を置いて実施した。また、海洋観測の着手にあたっては、海外で生産している部品の入手が滞って観測機器の納期が遅れたり、濃厚接触を避ける観点から海洋観測の技術的な検討が困難になるなどの支障が出たため、2カ月程度の遅れが生じ8月下旬からのスタートとなった。また、海洋酸性化が危険水準に達する年代を推定するための数値モデリングについても、現段階で得られるデータの範囲内で一部着手し、現時点における漁業関係者の海洋酸性化に対する意識を把握するためのアンケート調査についても、限られた対象に試行するなどして、その内容について検討するとともに、全漁連の協力を取り付けるなど今後に向けて広い範囲で調査を実施するための協力体制を整備した。



図1. 事業実施箇所

2-1. プランクトンネットによるカキ浮遊幼生の観測

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、トロコゾア幼生、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及び宮城県南三陸町志津川湾において、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、それぞれ複数の定点を設けて、2020年7～8月にかけてそれぞれ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回でサンプルを採集した。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。

(1) 岡山県備前市日生町

北原式プランクトンネットは目合い $50\mu\text{m}$ のものを用いた。日生町漁協が地先海域 10 定点で 2020 年 7 月 4 日～同年 8 月 31 日にかけて 48 日間採水を行い計 370 検体、西隣に位置する邑久町漁協が地先海域 6 定点で 2020 年 7 月 11 日～9 月 9 日にかけて 55 日間採水を行い 244 検体について顕鏡観察したが、形態異常と思われる浮遊幼生は認められなかった。

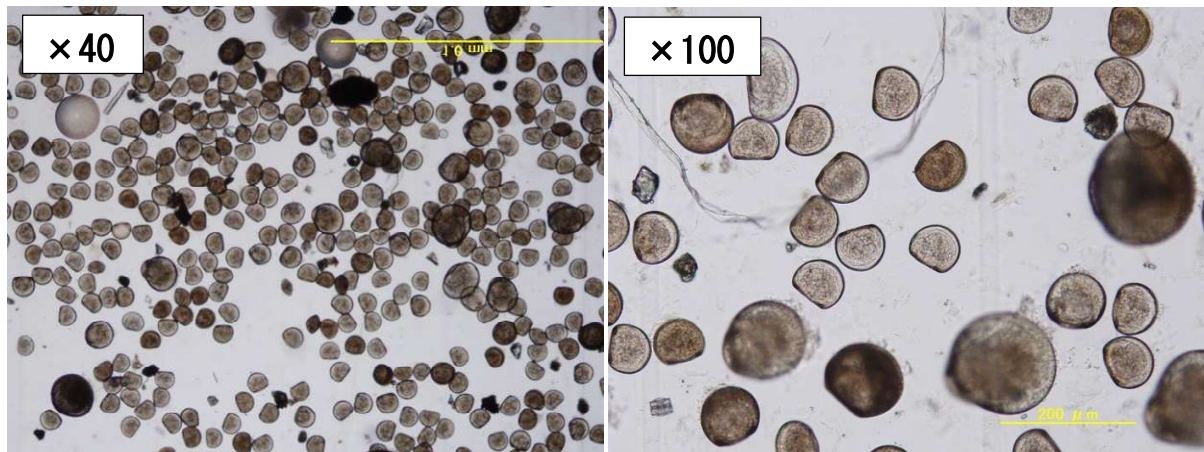


写真 1. 備前市地先で採取された二枚貝類浮遊幼生

(2) 宮城県南三陸町志津川湾

宮城県気仙沼水産試験場が、志津川湾内 10 定点において、2020 年 7 月 27 日、8 月 3 日、8 月 11 日、8 月 17 日、8 月 24 日、9 月 2 日の計 6 回実施した。目合い $100\mu\text{m}$ の北原式プランクトンネットを用いて鉛直曳きで 200 リットルの海水を濾過し、採集されたマガキ幼生をサイズ別に検鏡した。いずれの調査においても形態異常の個体は視認されなかった。

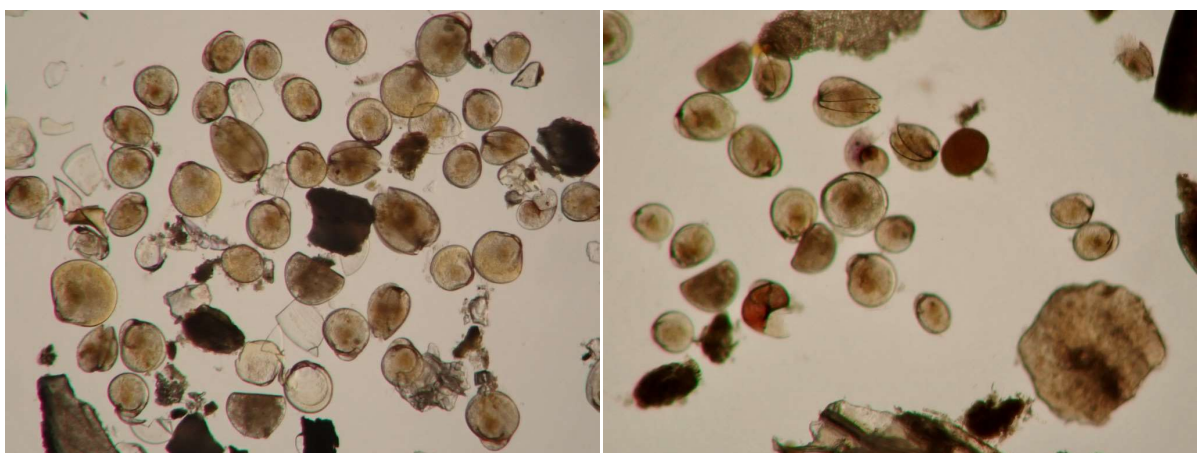
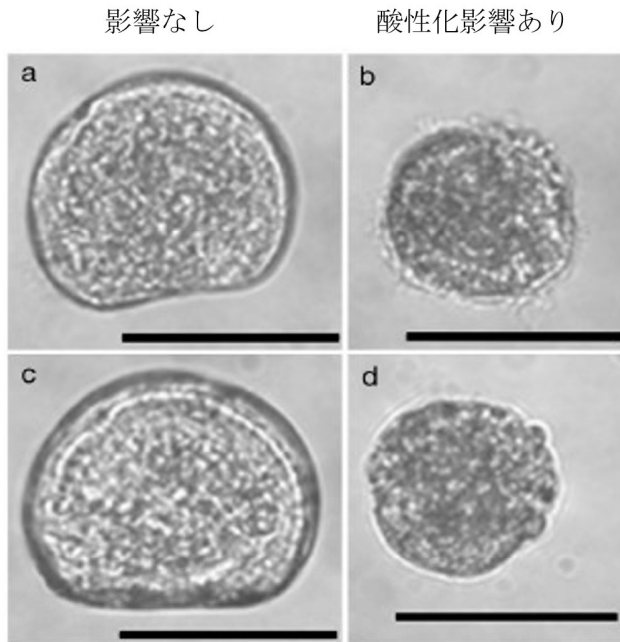


写真 2. 志津川湾で採取された二枚貝類浮遊幼生



ワシントン大学、Terrie Klinge教授から提供された光学顕微鏡写真。右側のb, dが酸性化の影響を受けた幼生

詳細が不明であるが、スケールは、0.05-0.1 mmを表していると考えられる。

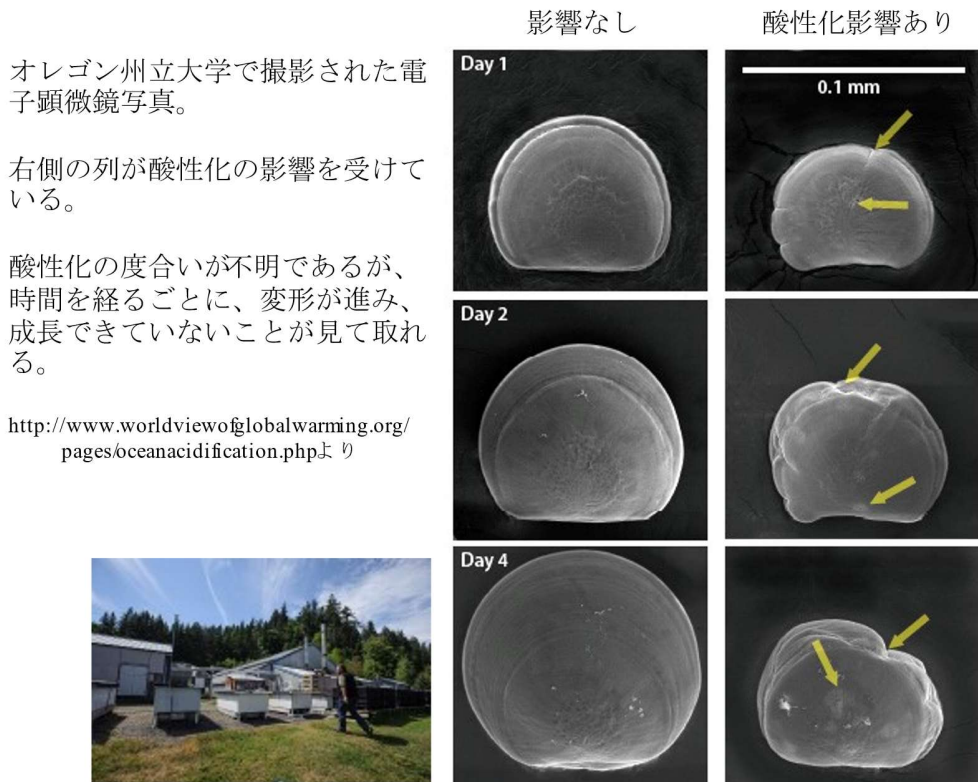


図 2. カキの幼生に対する海洋酸性化の影響

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 du Commandant Silhouette, 33120 Arcachon, France and [†]Institut für Meereskunde,
24105 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

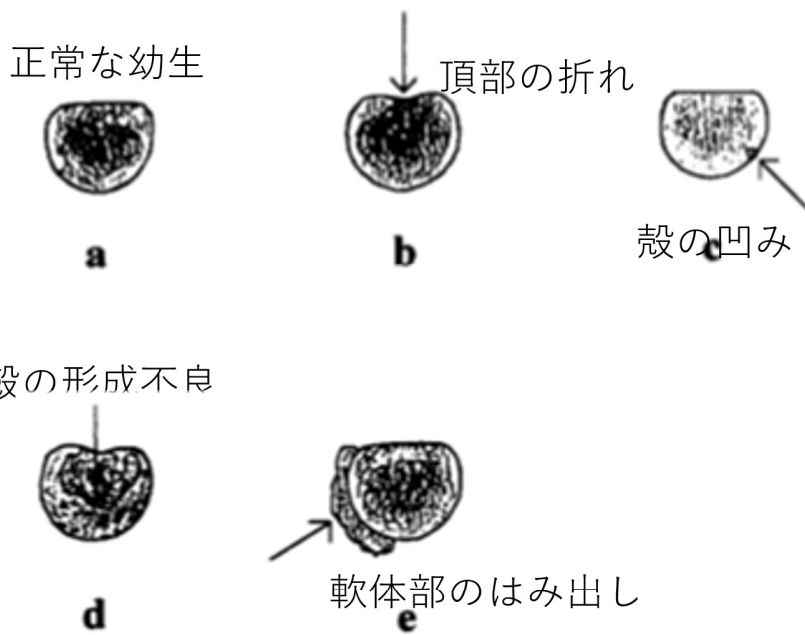


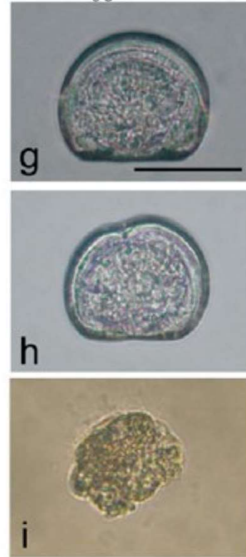
Fig. 1. The different abnormalities observed in D-larvae of oysters, *Crassostrea gigas*: (a) normal larva; (b) convex hinge; (c) indented shell margin; (d) incomplete shell; (e) protruding mantle.

図3. カキの幼生に対する海洋酸性化の影響

Images taken 48 Hours after fertilization

Healthy	pH = 8.0
Minor impacts	pH = 7.7
Major problems	pH = 7.45

Control
1000 μatm
2000 μatm

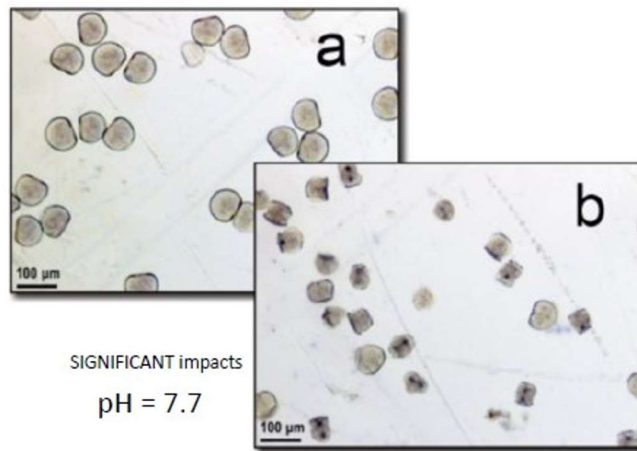


Scale bar = 50 μm

Research by Professor Haruko Kurihara while she was at Nagasaki Univ. Now at the Univ. of Ryukyus

Images taken 48 Hours after fertilization

Healthy
pH = 8.0



SIGNIFICANT impacts
pH = 7.7

Light microscopy of Sydney Rock Oyster larvae reared at 22 °C

- a. under normal pCO₂ 375 ppm (control)
- b. under elevated pCO₂, 1000 ppm for 48 hr.

SOURCE:
http://www.igpp.net/news/features/features/theearlydevelopmentofoystersynergisticeffectsofoceansacidificationandtemperature_5_188e20512db692f2a680005703.html

図4. カキの幼生に対する海洋酸性化の影響

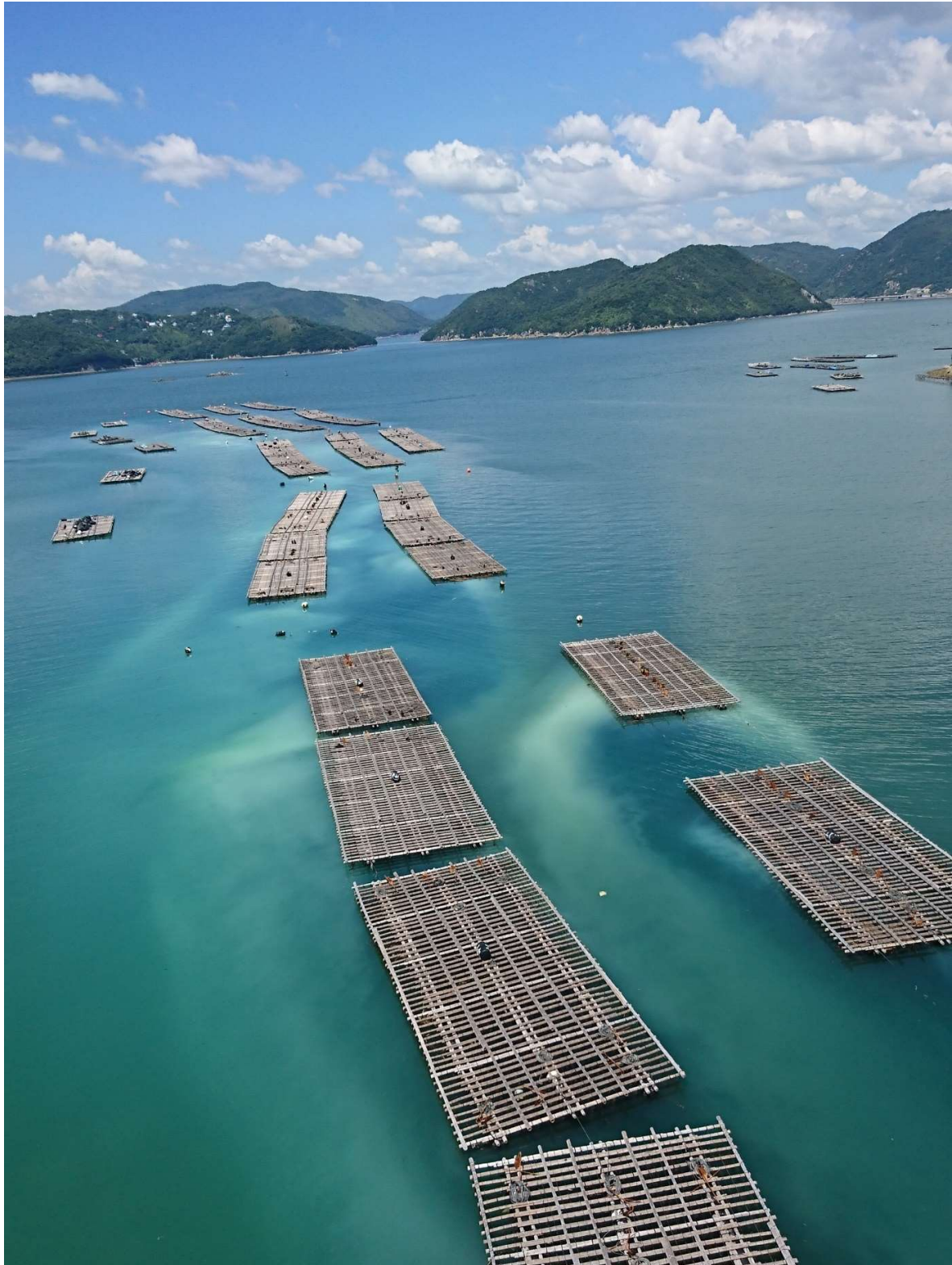


写真3. カキ養殖筏から一斉産卵している状況（2020年8月：備前市日生地先）

2-2. 海洋観測

日生海域および、志津川湾において、4点の調査地点を設けた。それは、1) 淡水供給地点、2) カキの採苗場、3) 主な生態系（日生：アマモ場、志津川湾：ワカメ場）、4) 沖合参照点とした。それぞれの観測点の選定には、地元関係者・漁業者との協議を行い、既存のモニタリングデータや流れの様相など参考とした(図 2, 3).



図 5. 日生地先における調査地点



図 6. 志津川湾における調査地点

2020年8月より定期的な毎月調査として、表層（海面下1.0m）と底層（海底面上1.0m）で水質を採水・機器調査する。項目は、水深(D)、水温(T)、塩分(S)、クロロフィルa (Chl)、栄養塩(NP)、溶存酸素(DO)、水素イオン濃度(pH)、全アルカリ度(A_T)、アラゴナイト飽和度(Ω_a)である。現場での多項目水質計としては、精度・機器の整備状況などを勘案し、日生海域においては、YSI EX02 (YSI/NANOTECH Inc.: D, T, S, Chl, DO, pH) を用い、志津川湾ではCTD RINKO-Profiler ASTD102 (JFE Advantech Co.,Ltd.: D, T, S, Chl, DO) と HI 9829-02041 (HANNA instruments JAPAN: pH)を用いることとした(表1)。栄養塩についてはそれぞれ岡山県水産研究所、宮城県気仙沼水産試験場により分析することとし、A_T、DIC と S については、JAMSTECにおいて滴定など標準手法を用いて分析し、Ω_a は pH と A_T から計算で求めることとしている。滴定で測定された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。

2020年8月から2022年7月にかけて、現地における表層（海面下1.0m）におけるT, S, pHの連続観測も実施する。T, Sについては、INFINITY-CTW ACTW-USB (JFE Advantech Co.,Ltd.) を用い、pHについては、SPS-14 (KIMOTO ELECTRIC Co., Ltd.) を用いる。2020年8月の観測開始時においては、機器の準備の都合から、日生海域に4組のセンサーを設置し、志津川湾ではSt.1のみの設置となった。志津川湾における残り3組のセンサーについては、2020年9月に設置した。

表1. 海洋酸性化適応プロジェクトにおける海洋観測の実施方法および使用機器

		岡山県備前市日生海域	宮城県南三陸町志津川湾		
調査地点 (各海域4地点)		St.H-1: 淡水供給源近傍 St.H-2: カキ採苗場 St.H-3: アマモ場 St.H-4: 沖合海域	St.S-1: 淡水供給源近傍 St.S-2: カキ採苗場 St.S-3: ワカメ養殖場 St.S-4: 沖合海域		
調査項目		測定方法または使用機器			
現地観測 1回/月 表層(海面下1m) 底層(海底上1m)	水深	ワイエスアイ・ナノテック㈱ YSI EX02 多項目水質計 (塩分センサー分解能: 0.01ppt)	JFEアドバンテック㈱ CTD RINKO-Profiler ASTD102		
	水温				
	塩分				
	クロロフィル				
	DO				
	pH				
	(塩分*)			ハンナインスツルメンツ・ジャパン㈱ HI 9829-02041 (センサーケーブル20m)	
	(DO*)				
	栄養塩			採水して岡山県水産研究所で分析	採水して宮城県気仙沼水産試験場で分析
	アルカリ度, DIC, 塩分			採水したサンプルをJAMSTECに送付し滴定法など標準手法により分析 (pHの事後校正にも利用)	
アラゴナイト飽和度	pHと全アルカリ度の観測データから数式により算出				
連続観測 表層(海面下1m) 2020.7~2022.7	水温・塩分	2海域のそれぞれ4地点、計8地点 (St.H-1~4, St.S-1~4) に JFEアドバンテック㈱ ワイパー式メモリー水温塩分計 INFINITY-CTW ACTW-USB を係留設置	2020.7にSt.S-1に紀本電子工業㈱海水用pHメーター SPS-14を1台係留設置、残りの3地点(St.S-2~4)には2020.9に計3台係留設置		
	pH	2020.7に4地点 (St.H-1~4, St.S-1~4) に紀本電子工業㈱海水用pHメーターSPS-14 を計4台係留設置			
二枚貝類のD型幼虫等の形態異常の有無		6~8月に二枚貝類幼虫の出現頻度に応じて数回/週にわたりカキ採苗場周辺でプランクトンネットを曳いて二枚貝類幼虫サンプリングし、顕鏡して形態異常の有無を確認する。	カキ幼虫出現時期に県水産試験場の調査にあわせてプランクトンネットで幼虫をサンプリング (隔週で5~6回程度) し、検鏡して形態異常の有無を確認する。		

2-2-1. 岡山県備前市日生地先

(1)CTDによる定点観測結果(図7-1~7)

水温は、夏季にはH-2で高く、H-4で低かった。秋・冬季にH-2で低く、H-4で高かった。水温の季節較差はH-2で大きく、H-4で小さかった。塩分は、定点間で通常はさほど大きな差はなかったが、降雨後の10月1日、10月30日にはH-2で顕著に値が低くなった。後述する連続観測の結果でも、H-2では降雨後にかなり長期にわたって塩分が低下した状態が続くことが判明している。pHはH-2では夏季に低く、冬季には高くなった。塩分の影響も大きいと考えられた。逆に、H-1では秋季から冬季にかけてpHが低くなった。DOについては、全期を通じて定点間で大きな差は認められなかった。濁度は、定点間で大きな差はなかったが、底層で高い傾向が認められた。クロロフィルaは、定点間でさほど大きく違わなかったが、8月31日のH-1・3では底層付近で高い値が見られ、また、冬季のH-1では中層から底層の間で高い値が見られた。

水温、塩分、pHの項目の調査結果から見て、H-2は閉鎖性の強い片上湾の影響を強く受け、H-4は内湾の影響を受けない日生地先の沿岸の特徴をよく現わしていると考えられた。H-1は、やはり千種川からの陸水の影響を受けているもののそれほど顕著ではなかった。H-3については、観測実施期間がアマモ場の衰退期にあっていたため、アマモ場の影響は明らかではなかった。

図7-1. 2020.8.31

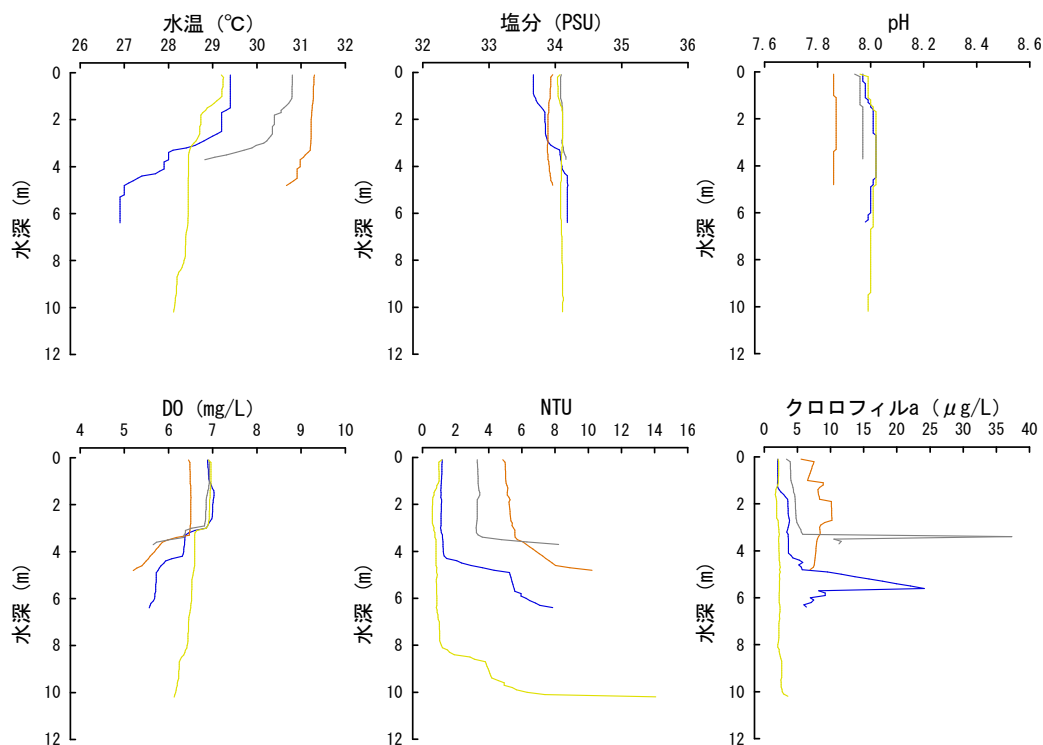


図 7-2. 2020. 10. 11

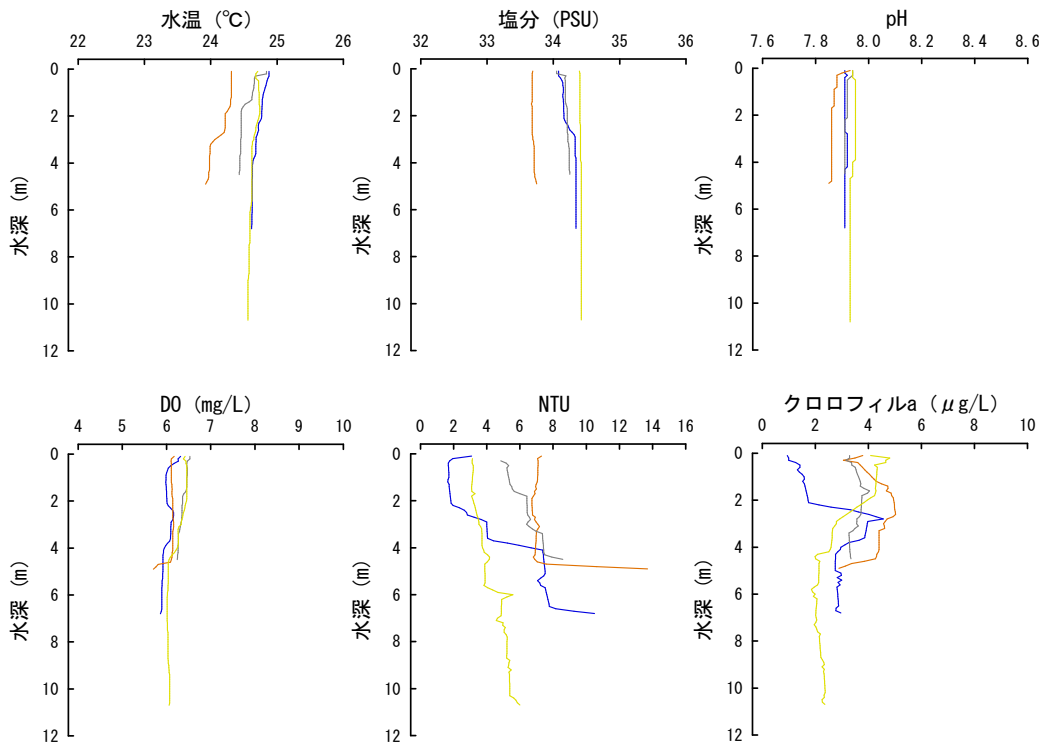


図 7-3. 2020. 10. 30

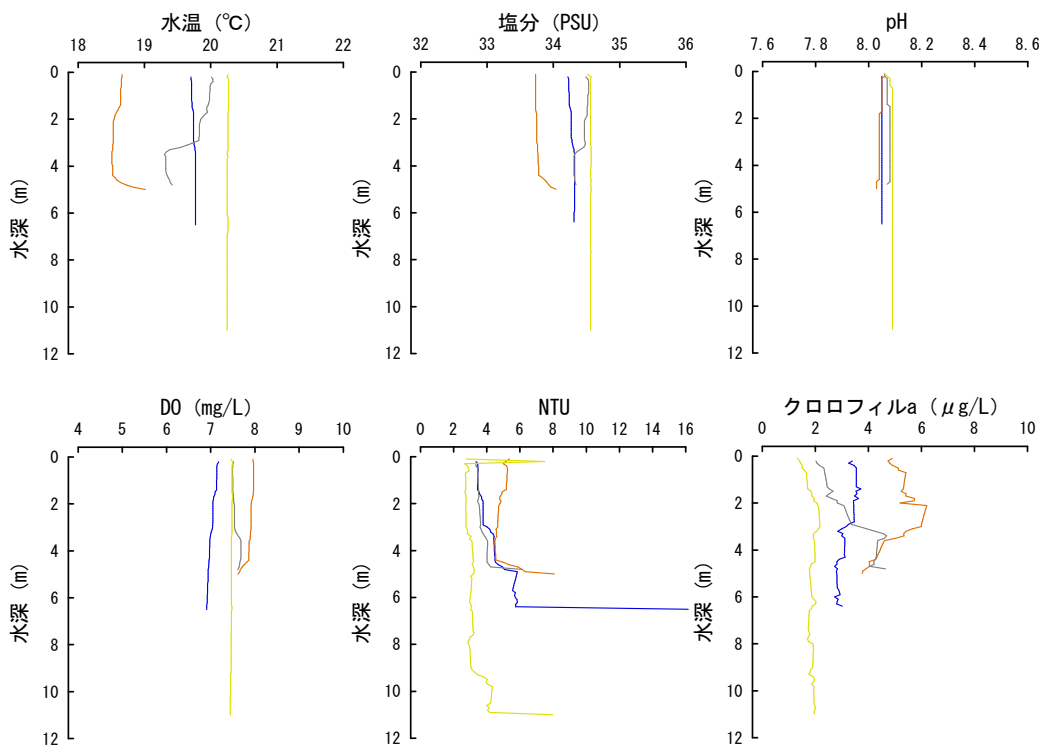


図 7-4. 2020. 11. 13

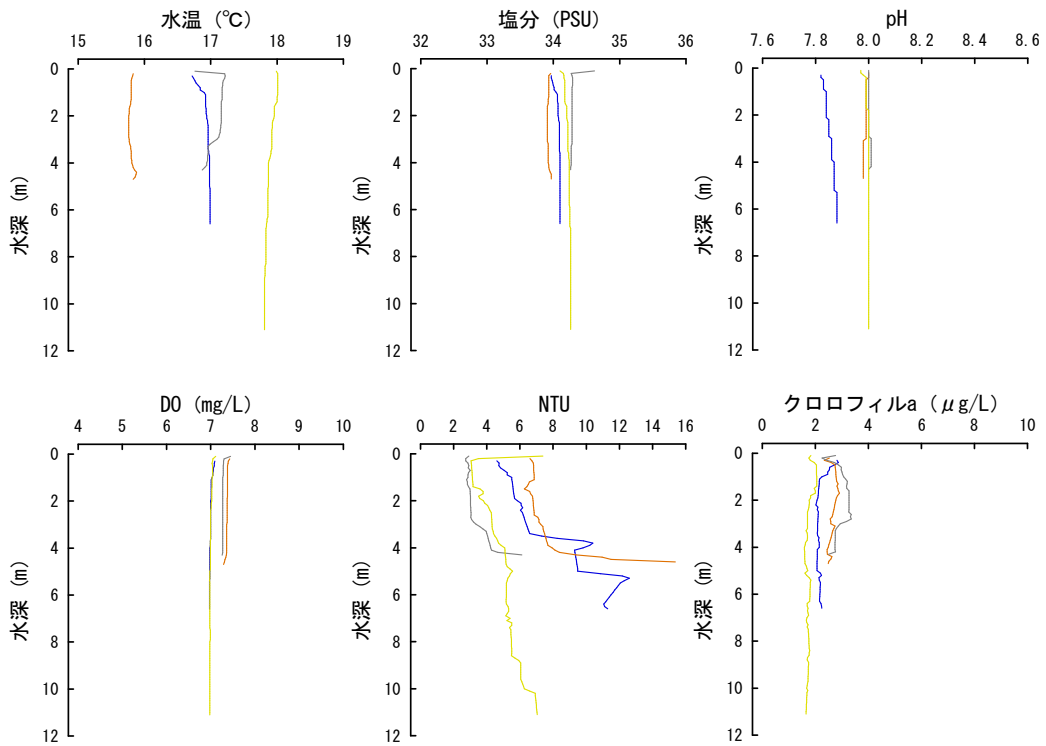


図 7-5. 2020. 12. 22

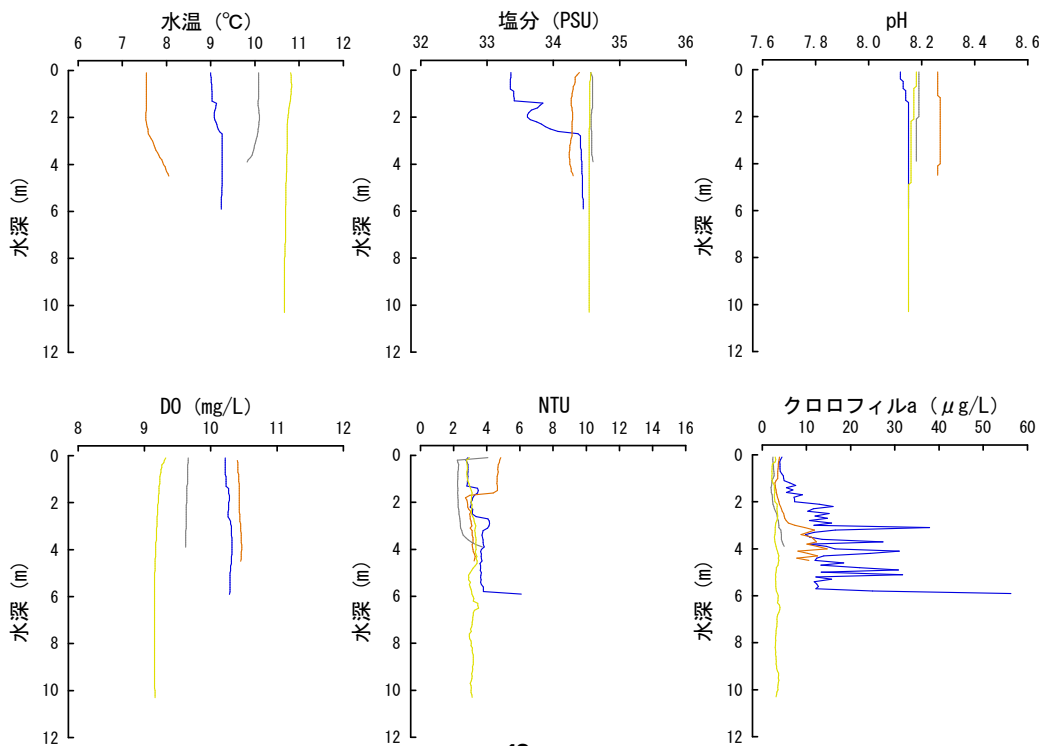


図 7-6. 2021. 1. 14

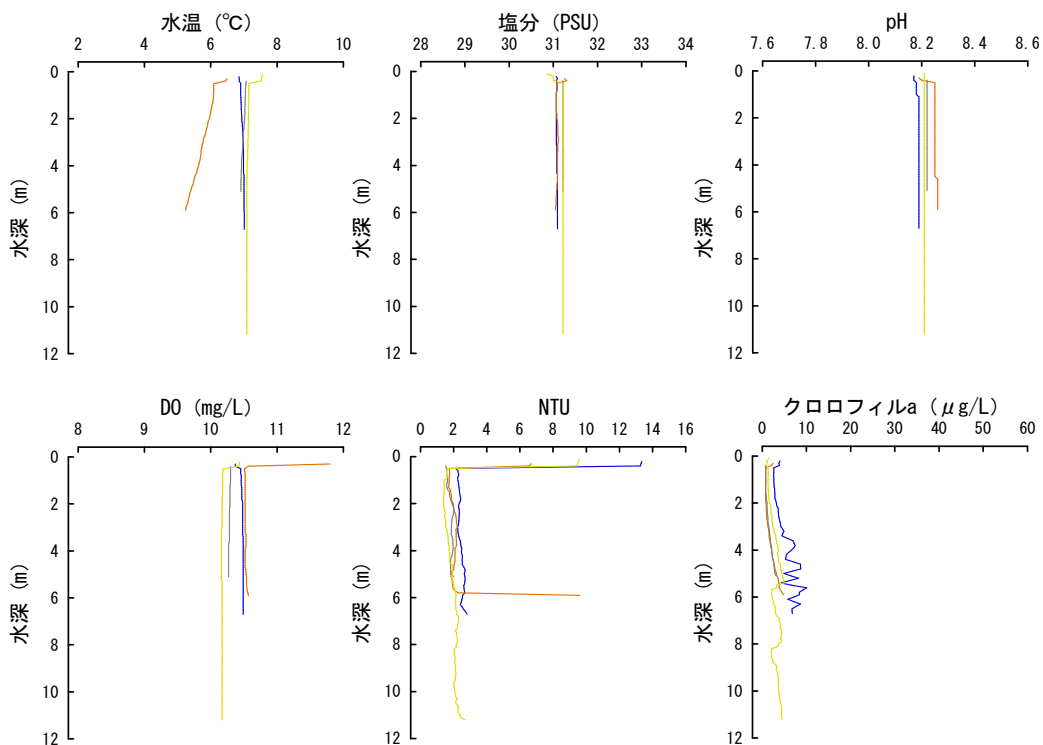
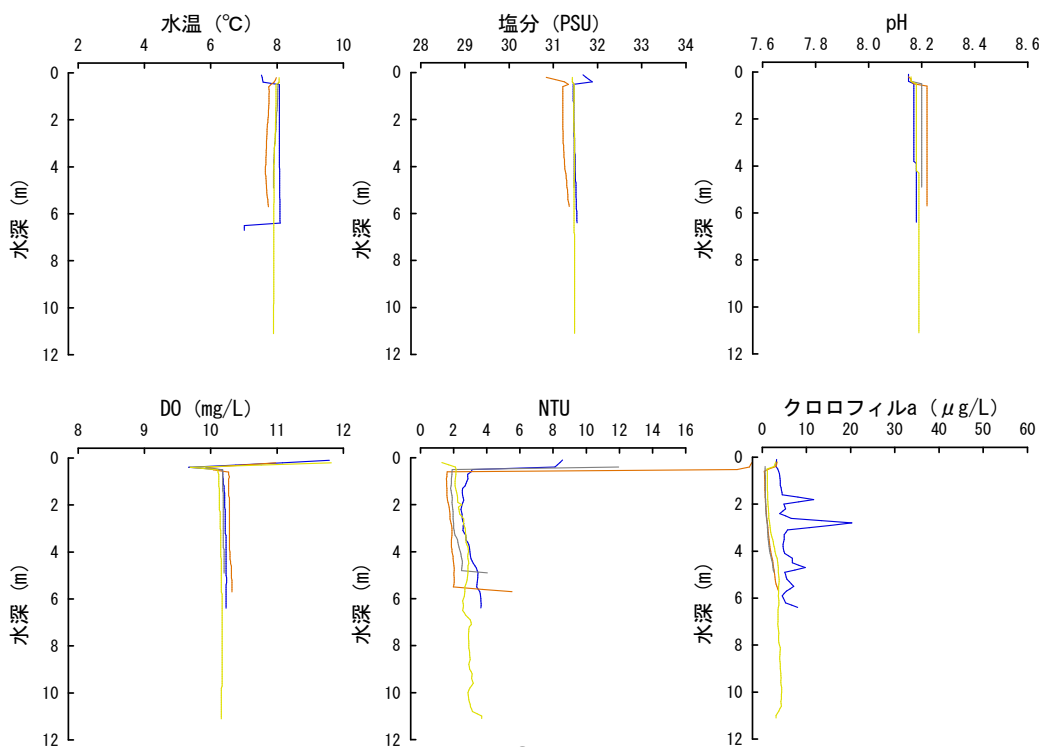


図 7-7. 2021. 2. 12



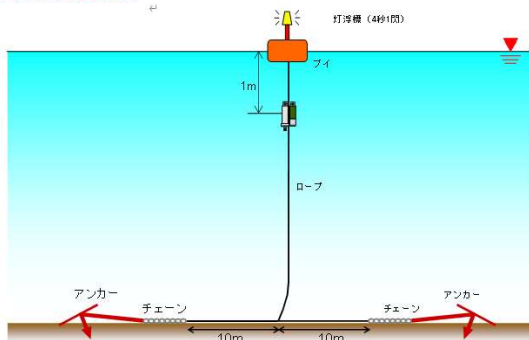
(2) 観測機器の係留設置による連続観測

ア. 観測機器の設置方法

連続観測のための水温・塩分計 INFINITY-CTW ACTW-USB (JFE Advantech Co., Ltd.) と pH メーター SPS-14 (KIMOTO ELECTRIC Co., Ltd.) については、センサー部分をまとめて結束し (写真4) 浮体から水面下 1m の位置に垂下して固定した。



H-1 点の機器設置方法



H-2・3・4 点の機器設置方法

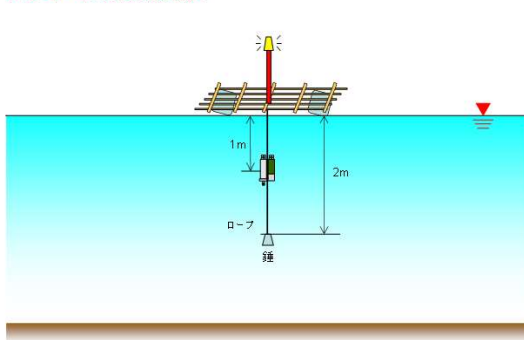


図 8. 備前市日生町地先における定点毎の観測機器設置方法

浮体としては、H-2・3・4では日生町漁協に依頼して間伐材を用いて筏を作成してこれを用いたが、H-1については波当たりが強く筏ではアンカーで固定することは困難と思われたため、ブイを2丁アンカーで固定する方法を採用した（図8）。



写真4. 観測測器の設置方法

イ. 観測結果

2020年10月1日の観測時に大量のフジツボ等の付着生物が付着していることが確認され（写真5）、8～9月の塩分の観測値に異常値が認められた（図9）。10月には降雨による影響とみられる水温上昇やpH上昇、植物プランクトンのブルームなどが見られた（図10）。1月上旬の寒波襲来時に水温が最低値を記録し、H-2では4℃を下回った（図11）また、冬季にはH-1のみでpHが低い値を示し続けた（図11）。

今後、採水分析値を用いて自動観測機器のドリフトの補正を要するほか、キャリブレーション溶液（中性リン酸）の特性で補正值がズレる可能性があるので注意を要する。特にガラス電極に対しては付着生物の影響が厳しく出るので、メンテナンスの頻度を2週間に1回程度まで増やす必要がある。8-9月の異常値については、採水による分析値等によって校正してからの値で議論すべきこと、観測値については観測現場で生じている現象に着目して解釈することが重要であることを関係者で確認した。また、降雨後のpHの低下などの変化に着目すべきことが指摘され、河川からの栄養塩との関係の可能性が示唆された。

特筆すべきは、9月10日前後から9月20日前後にかけて、H-2において著しいpHの低下が見られ7.5以下に下がっている点である（図8）。付着生物の状況から観測値の補正は必要と考えられるものの、驚くべきことに、H-2において10月に採水したサンプルで Ω アラゴナイト分析値が1.6程度を示した。これはセンサーによる観測値ではなく実測値を基にした数値であるので、実際に起きている現象と捉えられ、実験値ではマガキ幼生が海洋酸性化の影響を受ける Ω アラゴナイトの臨界値は1.6と報告されている。採水が行われるのは専ら光合成が卓越する昼間なので、夜間にはもっと下がっている可能性がある。連続観測データからの Ω アラゴナイトの推定値では、さらに低い数値が試算されている。H-2は、6～8月には日生町漁協・邑久町漁協のメインのカキ採苗場になるため、これが事実であり、現在の状

況がさらに進行すれば、岡山県のカキ養殖業は大打撃を被ることは必至である。本年度に得られた全アルカリ度、塩分、栄養塩など Ω アラゴナイトと相関のある観測データの検証と確認を確実に行うとともに、来年度 5~9 月採水・分析の頻度を大幅に増やして補正值の精度を向上させることが重要である。また、H-2 を含む主要なカキ種場になっている海域については、片上湾を通じて淡水域からの粒状有機物の影響による可能性が高いため、従前の測定項目に加えて DO、濁度、クロロフィルの連続観測が是非とも必要である。

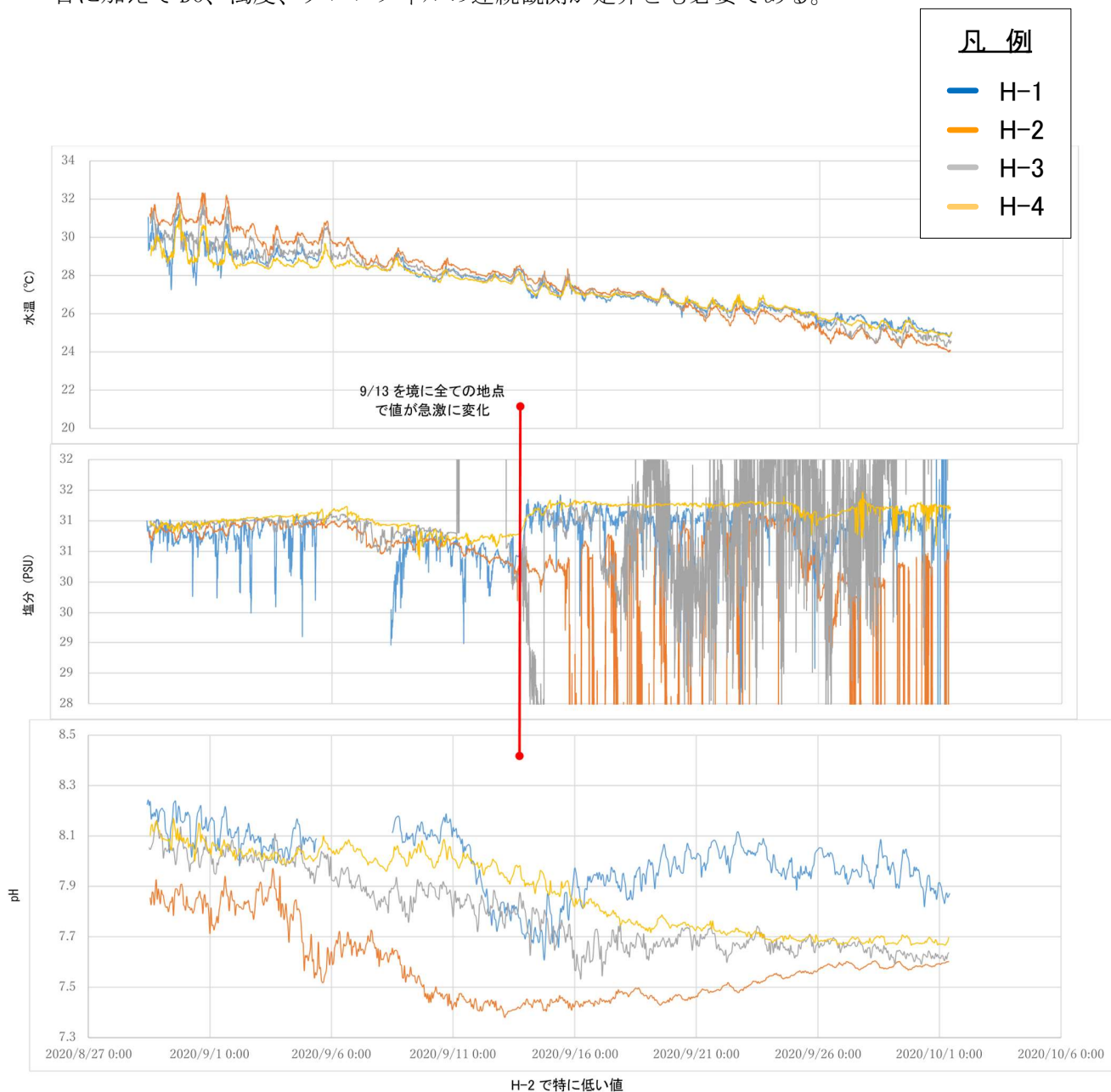


図 9. 備前市日生町地先 4 定点における連続観測結果 (2020 年 8 月 31 日~10 月 1 日)

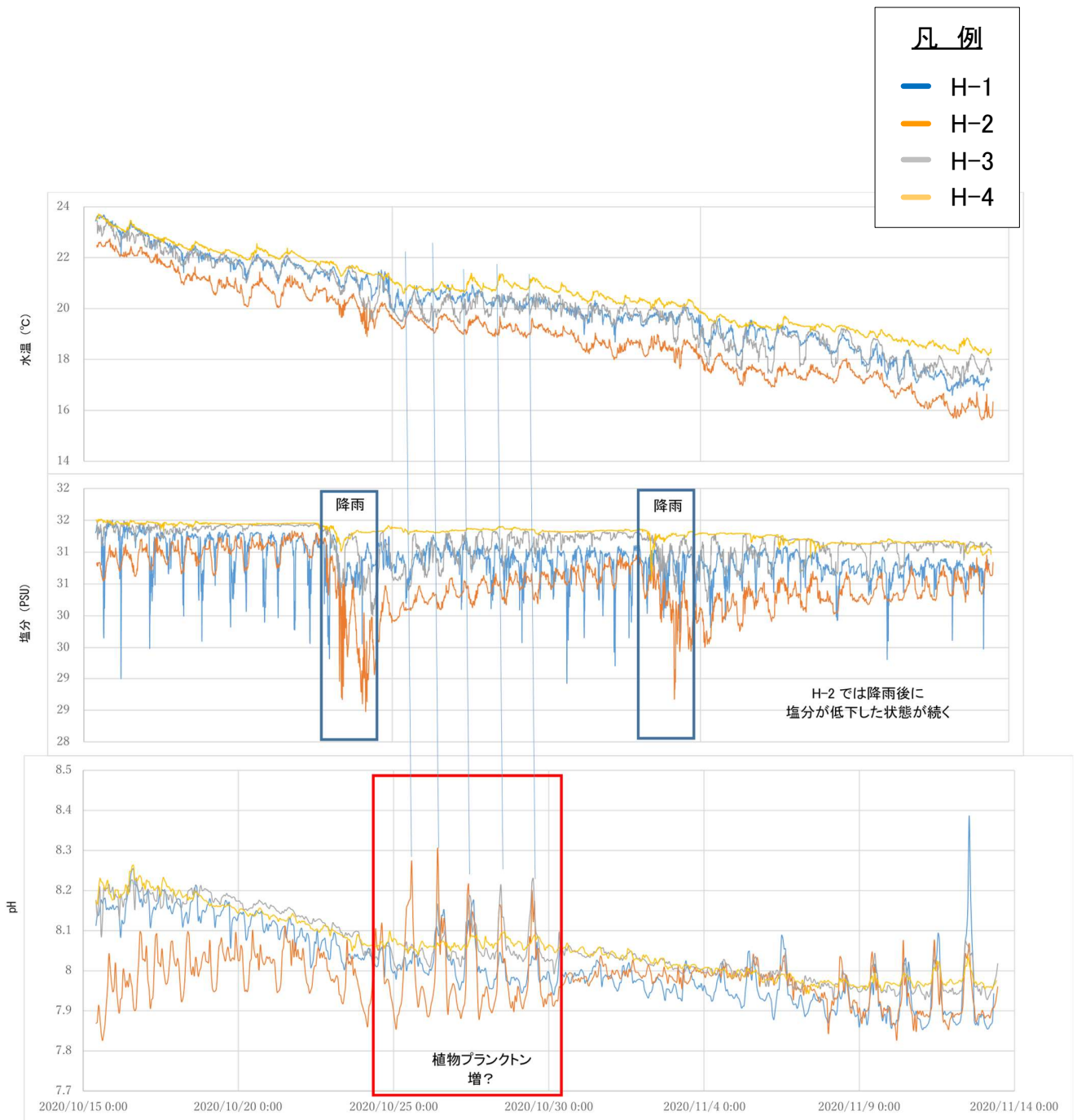


図 10. 備前市日生町地先 4 定点における連続観測結果 (2020 年 10 月 15 日～11 月 13 日)

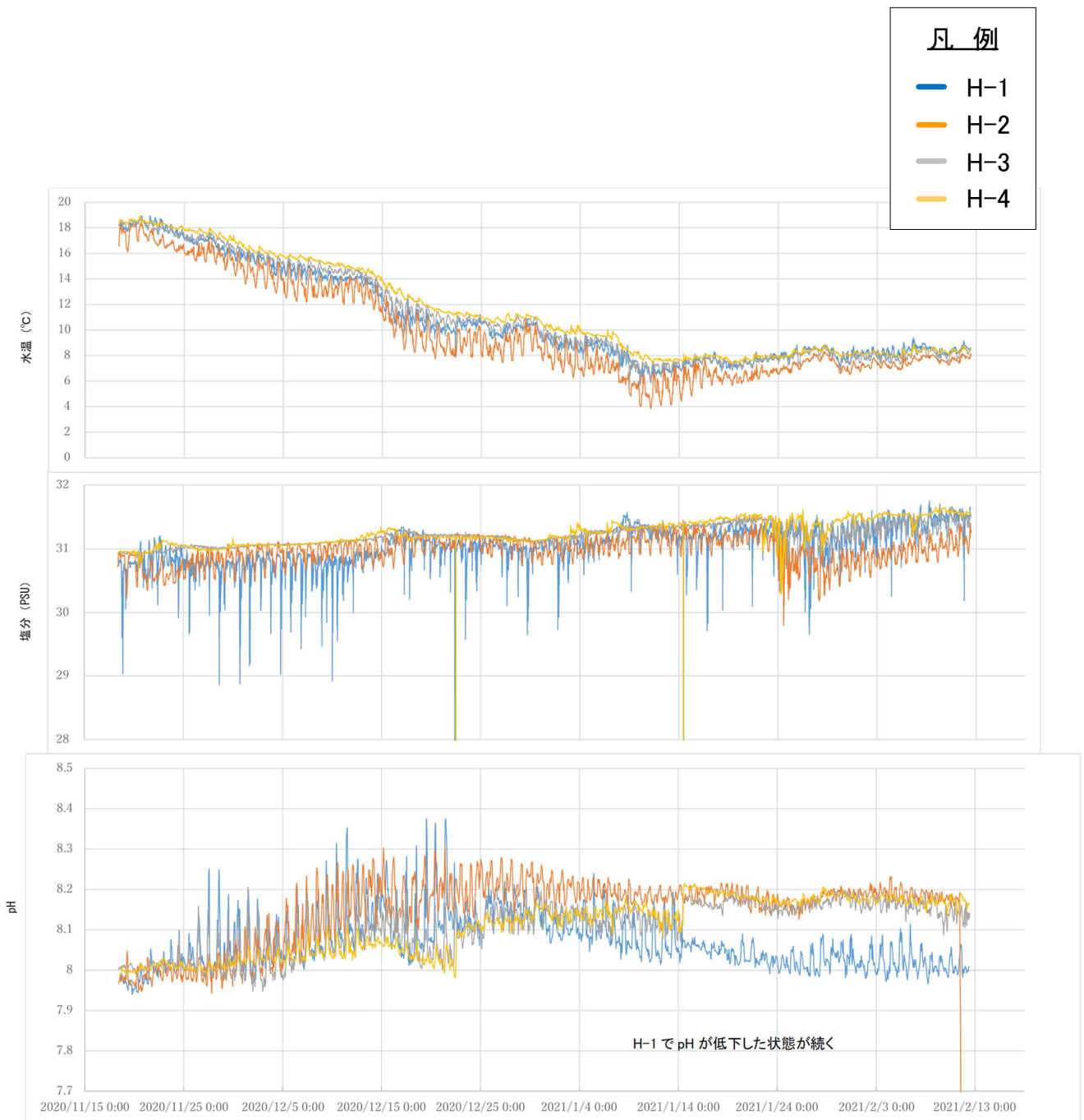


図 11. 備前市日生町地先 4 定点における連続観測結果 (2020 年 11 月 18 日～2021 年 2 月 12 日)

	H-1	H-2	H-3	H-4	
10/1					H-1 では藻類、H-2・3 ではフジツボの付着が多い H-4 ではどちらも少ない
10/30					全ての地点で生物付着が少ない フジツボの付着のピークが終了
11/13					全ての地点で生物付着が少ない 藻類の付着が始まる
12/22					藻類（ラン藻？）の付着が増える（特にH-3・4） ワレカラも多く付着 ワイバーは作動
1/14					H-3・4 で藻類（ラン藻？）とワレカラの付着が多い H-1・2 では付着生物が少ない
2/12					H-3・4 で藻類（ラン藻？）とワレカラの付着が多い H-1 ではワカメが多く付着 H-2 では付着生物が少ない

写真 5. 連続観測機器への付着生物の着生状況

2-2-2. 宮城県南三陸町志津川湾

(1) CTD による定点観測結果 (図 12~16)

志津川湾においては、当初の 4 定点がすべて湾内に含まれることから、さらに沖合の湾口部付近の S-5 を加えて 5 定点において、CTD による水温、塩分、D0、クロロフィル a を測定した。DIC、TA、塩分、栄養塩については St. S-1~St. S-4 の表層 (-1m) と底層 (海底より+1m) で採水し分析に供した。

水温は例年に比べて高めに推移した (図 12)。夏季は表層で 27°C に達し、各定点とも成層の形成が確認された。冬期は水温・塩分とも水深による差が小さく、鉛直混合が起こっていることが推測された。塩分は冬期に高く (34psu)、成層期は表層で低く、水深にしたがって高くなる傾向が見られた (図 13)。成層期の表層の塩分は河川影響の強い S-1 が最も低く、沖に行くに従い高くなった。D0 は夏季に低く、冬季に高い (図 14)。内湾の底層では 5mg/L 未満の値を示すこともあったが、概ね生物の生息に問題のない値であった。クロロフィルは各定点・水深で 1 μ g/L に満たないことも多く全体的に低めで推移した (図 15)。また、中層で極大になる亜表層クロロフィル極大とみられる現象が観測された。

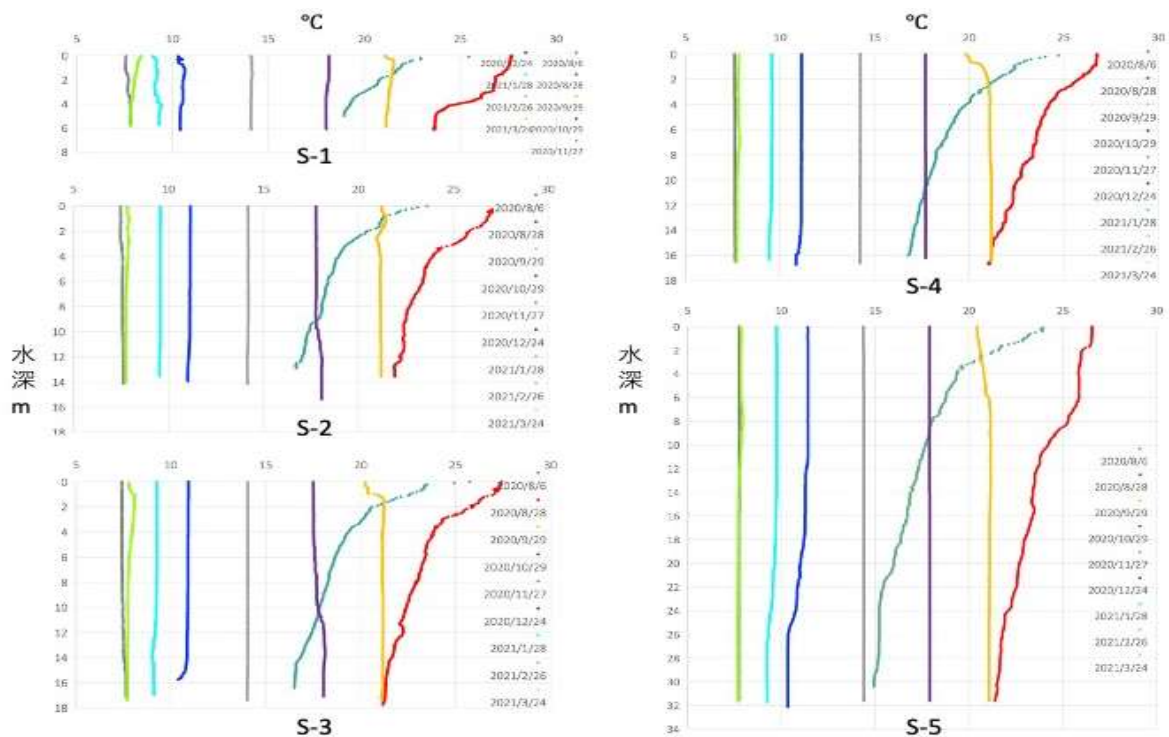


図 12. 志津川湾における CTD 観測結果 (水温)

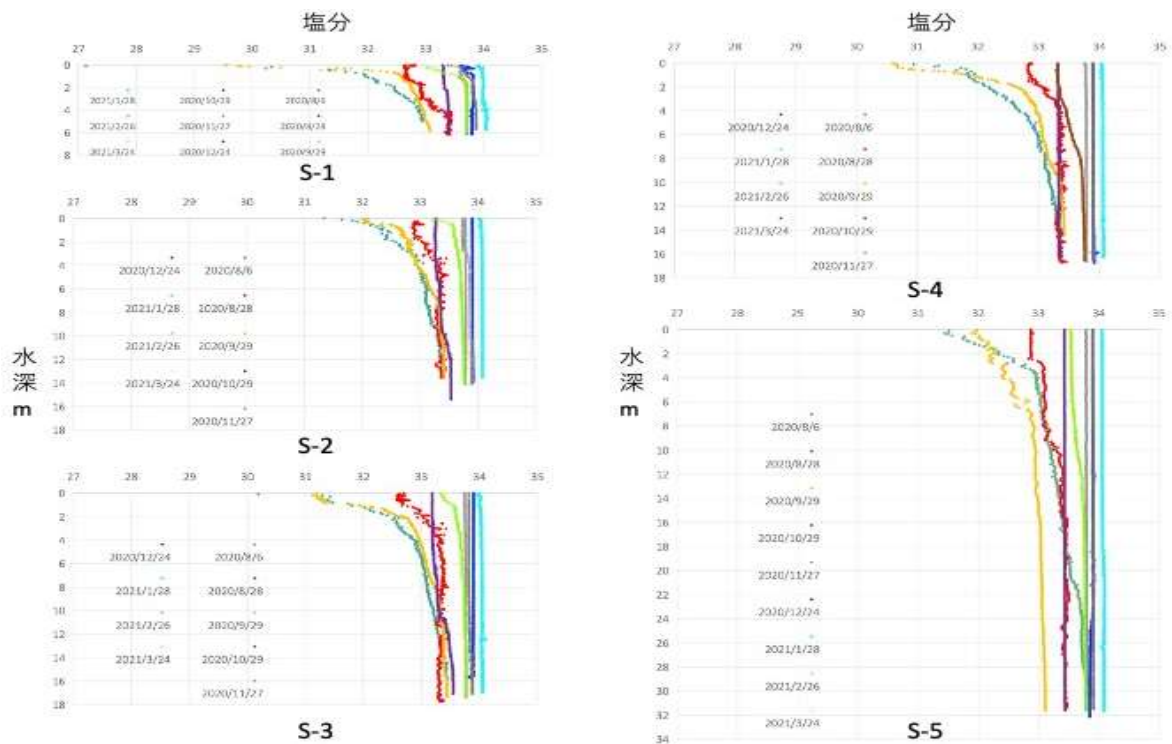


図 13. 志津川湾における CTD 観測結果 (塩分)

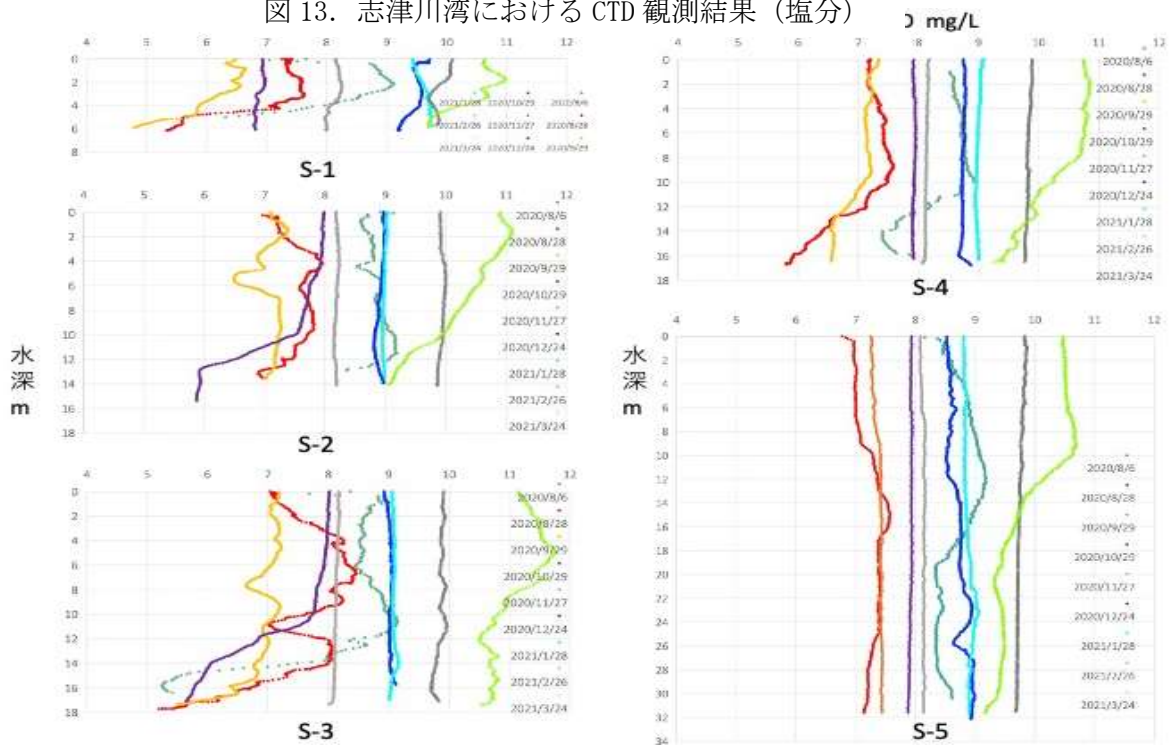


図 14. 志津川湾における CTD 観測結果 (溶存酸素)

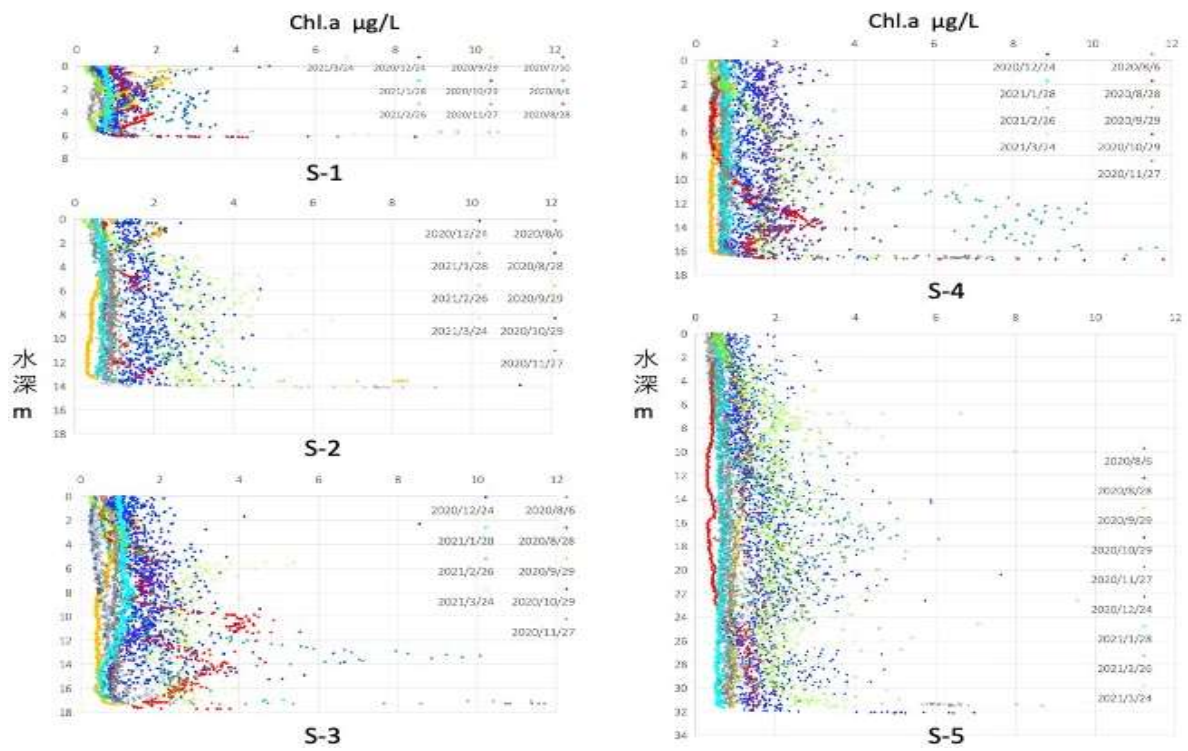


図 15. 志津川湾における CTD 観測結果 (クロロフィル a)

採水により DIC、TA、塩分の値を測定し、そこからアラゴナイト飽和度 (Ω_{ara}) 及びカルサイト飽和度 (Ω_{cal}) を算出した (図 14)。各採水日におけるアラゴナイト飽和度は、カキやウニの幼生にすぐさま影響を与える値ではなかった。

栄養塩は定点間の差より採水日の違いによる差が大きかった。8 月はいずれの定点においても低い値を示した。

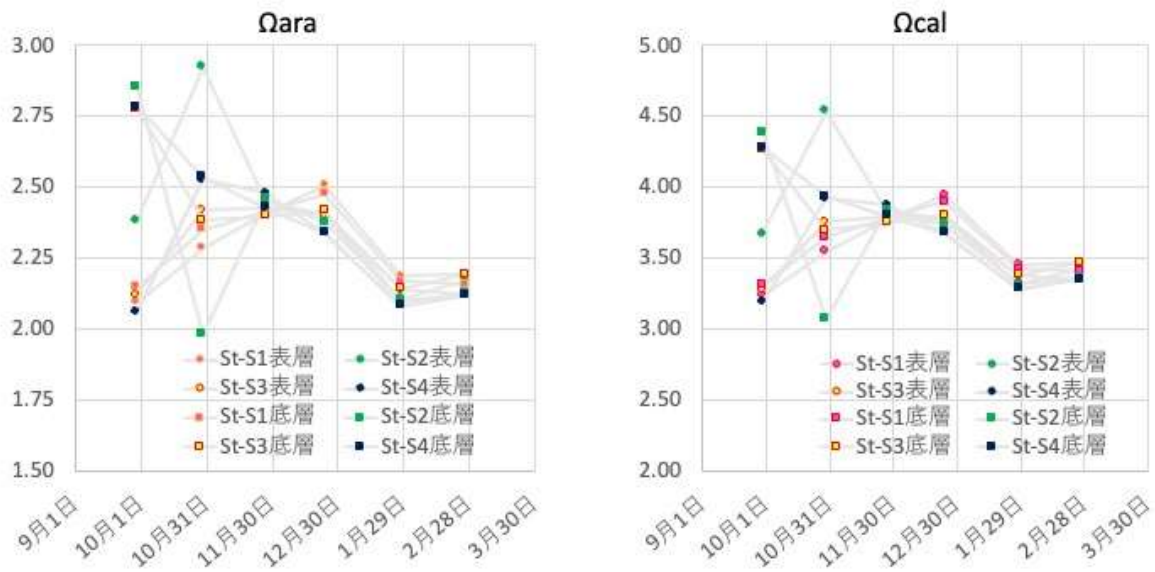


図 16. 志津川湾におけるアラゴナイト飽和度・カルサイト飽和度の変動

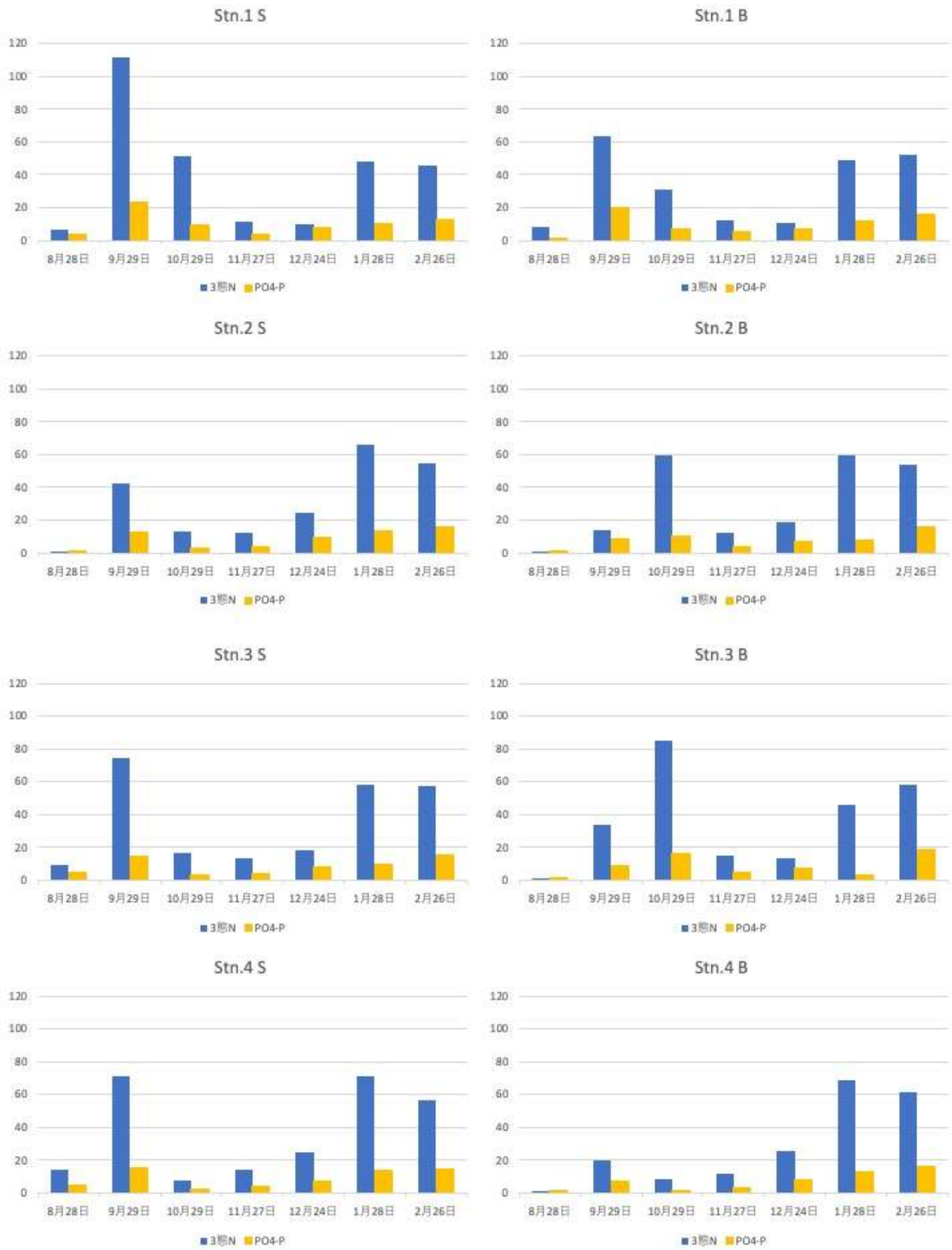


図 17. 志津川湾における栄養塩の変動

(2) 観測機器の係留設置による連続観測

ア. 観測機器の設置方法

連続観測のためのS-1～4の4定点に、水温・塩分計 INFINITY-CTW ACTW-USB (JFE Advantech Co., Ltd.) と pH メーター SPS-14 (KIMOTO ELECTRIC Co., Ltd.) を設置した (図 18)。S-1 についてはシロザケ稚魚の中間育成施設、S-2 は標識灯係留施設、S-3 は戸倉地区青年研究会の養殖試験施設、S-4 についてはカキ養殖施設に取り付けた。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 (図 19)。設置から 1 カ月で多数の付着生物の付着が確認されたため、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うことにした。

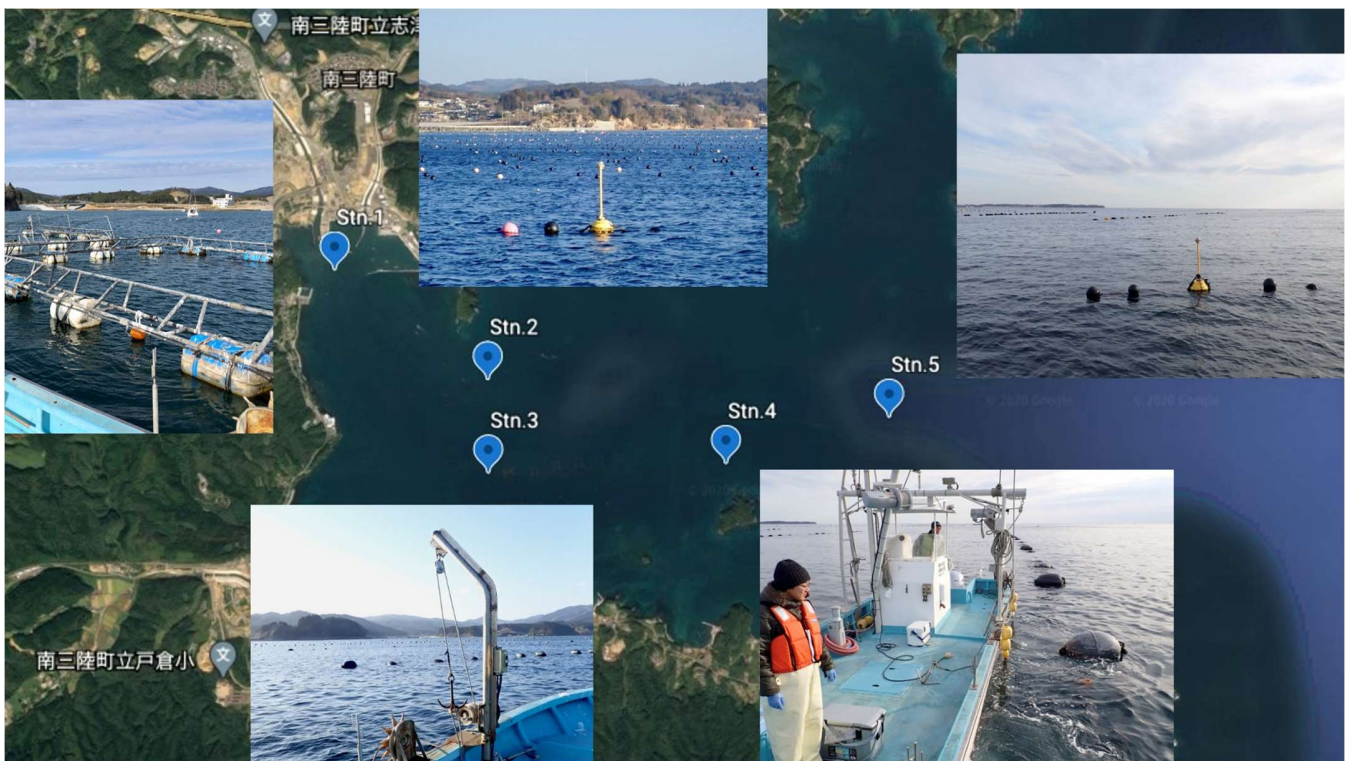


図 18. 志津川湾における観測機器の設置場所



図 19. 志津川湾における観測機器の設置状況

イ. 観測結果

水温・塩分の連続観測結果を示す（図 20）。水温・塩分の連続観測では、湾内の各調査点で定期的な塩分低下が見られ、降水の影響による湾内の一時的な塩分の低下の様子を良く捉えていることが見て取れる。欠測期間は測器回収から設置までの間に海況が悪化するなどして再設置までに時間を要したことによるが、S-4 の 2020 年 9 月 17 日から 29 日にかけての塩分の欠測は、付着生物の影響で塩分計測部のつまりが起きたことによる（図 21 中段左）。これは 2020 年 8 月 6 日の設置時から 9 月にかけては、マカキやフジツボなどの付着盛期にあたり、付着量が多かったこと、また、ワイパーの作動間隔が長めの設置だったことに起因する。その後はワイパーの作動間隔を短く設定し直しており、同様の事象は起こっていないが、付着盛期には、2 週間に 1 回程度のセンサー部の清掃が必要と思われる。

次に pH の連続観測結果を示す（図 22）。pH メーターの設置は、機器の調達の関係で S-3 のみ 2020 年 8 月 6 日から、他の 3 地点は 10 月 2 日から実施した。10 月以降の計測値は、いずれの調査地においても設置や清掃から半月ほど経過すると、急激な pH の上昇と下降を繰り返す日変動が見られるようになった。これはセンサー部に付着珪藻が増殖して覆ってしまうことによるものと推測され（図 21 下段）、真の pH 値を推定する際にこの影響を除去する必要がある。本報告では、単純に採水で求めた pH 値で補正した結果をドリフト補正值としてプロットした。

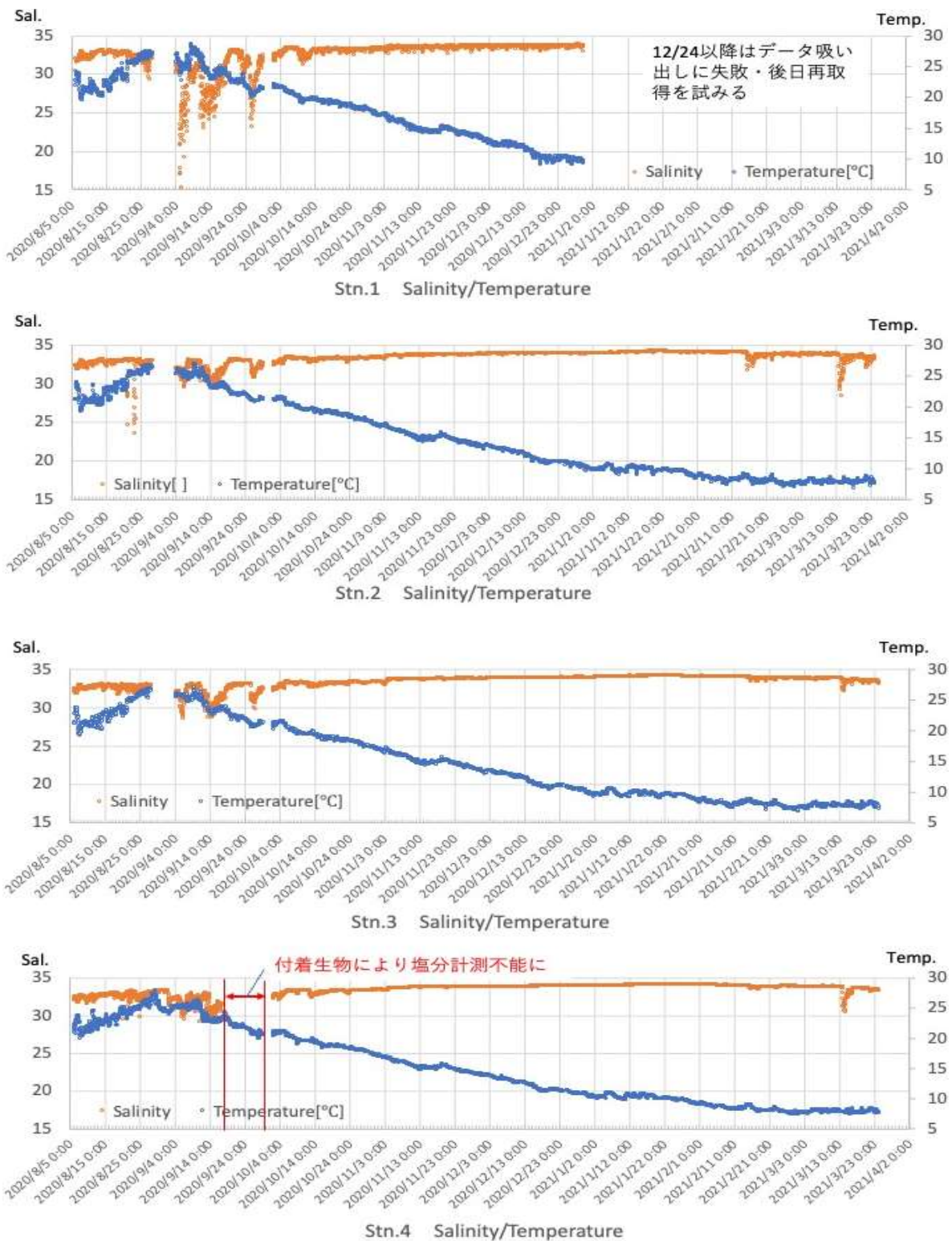


図 20. 志津川湾の各調査点における水温・塩分の連続観測結果

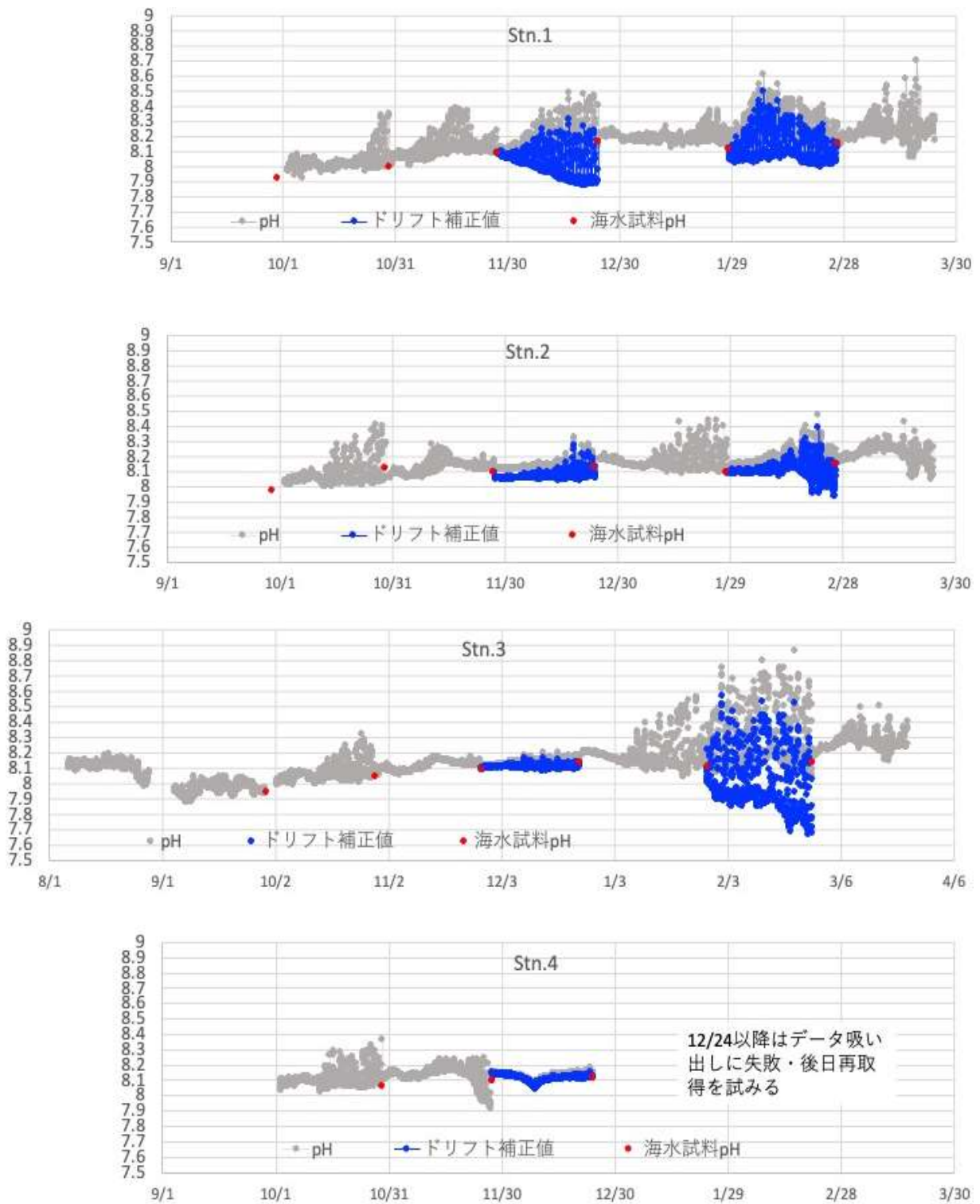


図 21. 志津川湾の各調査点における pH の連続観測結果

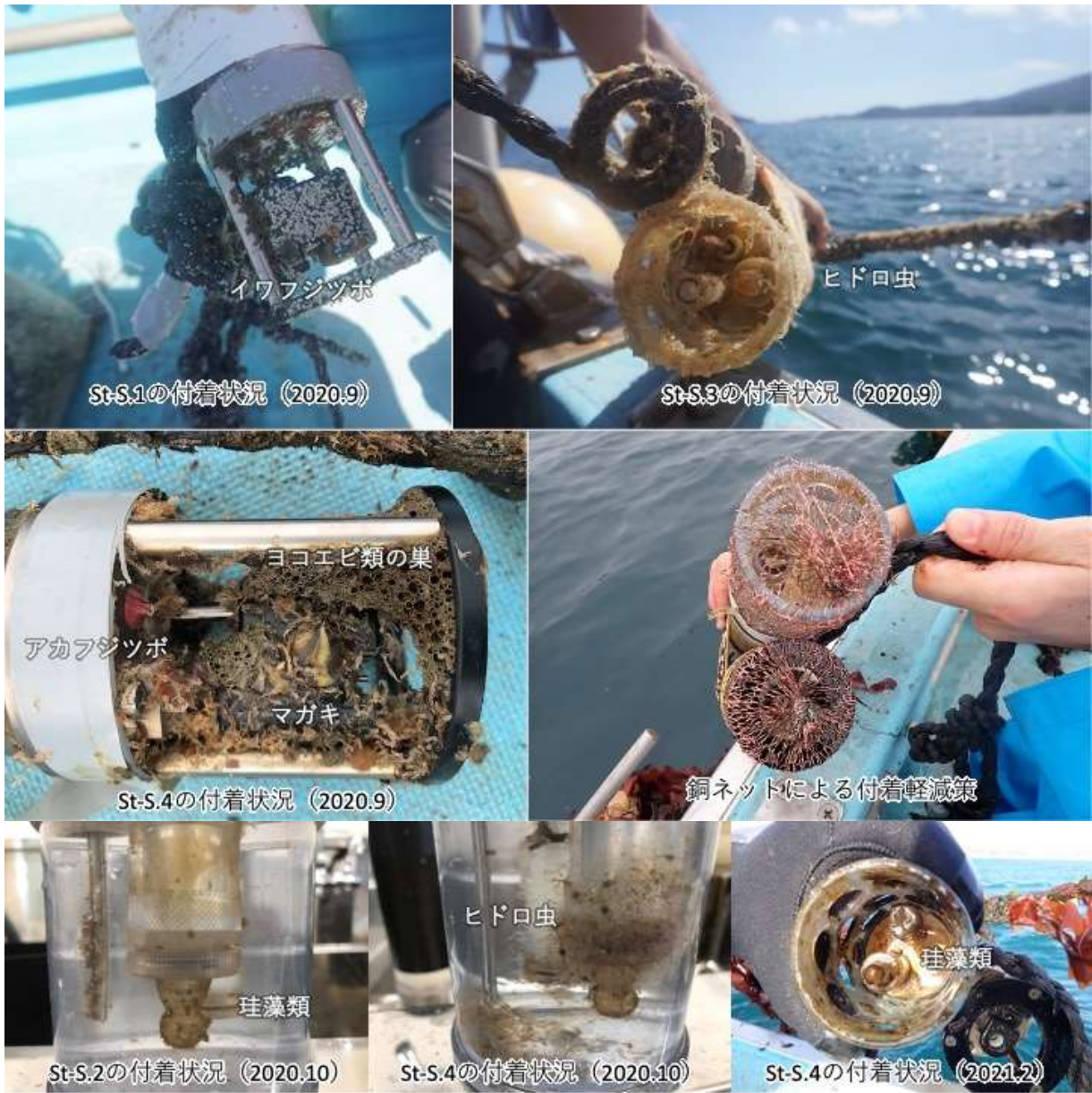


図 22. 測器への付着生物の付着状況

9-10月の定点間pHの比較では著しい差が見られた(図23)。また先行研究の計算式を用いて塩分などから推定したアラゴナイト飽和度(Ω_{ara})は、S-3においては1.7まで低下していた(図24)。さらに、その回復が塩分回復に比べて遅いことなどが判明し、プランクトンの日周変動による影響や、河川起源の有機物の分解の影響が示唆された(図25)。また、観測された Ω_{ara} 1.7という値はウニ幼生に悪影響を及ぼす範囲に入っており、またこの値がカキ幼生への影響の閾値である1.6に近いことから、この Ω_{ara} の低下の原因について、検討を進める必要がある。特に、低塩分と Ω_{ara} の反応の整理、雨の前後での変化をカキ幼生の状況と合わせて解析することが求められ、溶存酸素、濁度、クロロフィルなどの環境項目の連続測定や、ヨシ原や藻場による有機物のトラップに関する効果の検討を進めることが必須であり、追加の環境測定項目について、予算の確保も含め、機器の追加、採水調査の実施について確実にステップを進めるべきである。

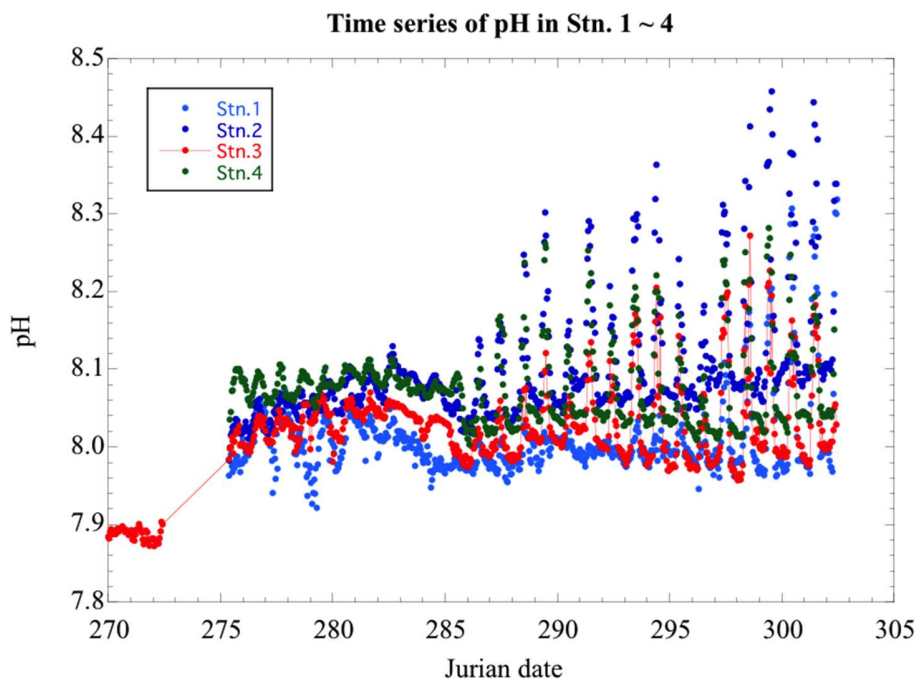


図 23. 志津川湾における 4 定点の pH の推移

アラゴナイト飽和度の経日変化 Aug28 - Oct27

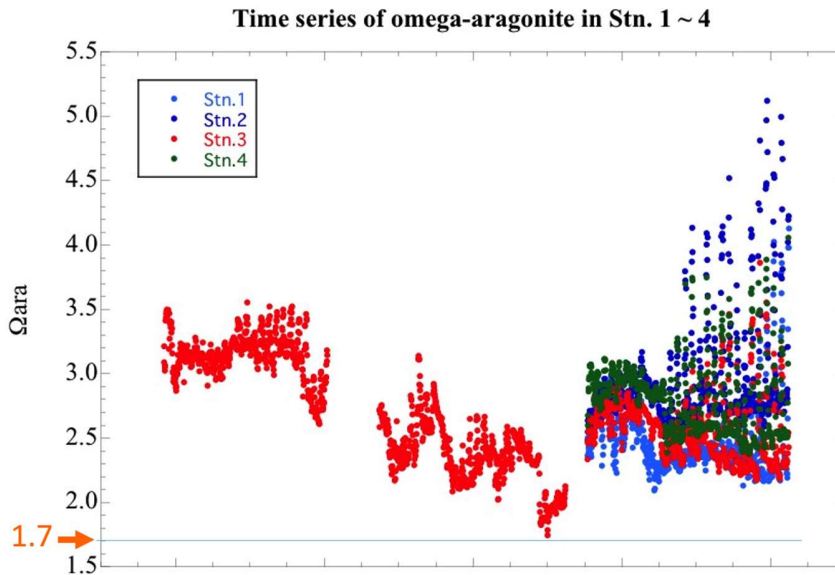


図 24. 志津川湾における 4 定点のアラゴナイト飽和度の推移

アラゴナイト飽和度と環境変数との比較
(time series of Ω_{ara} and other parameters, Stn.3)

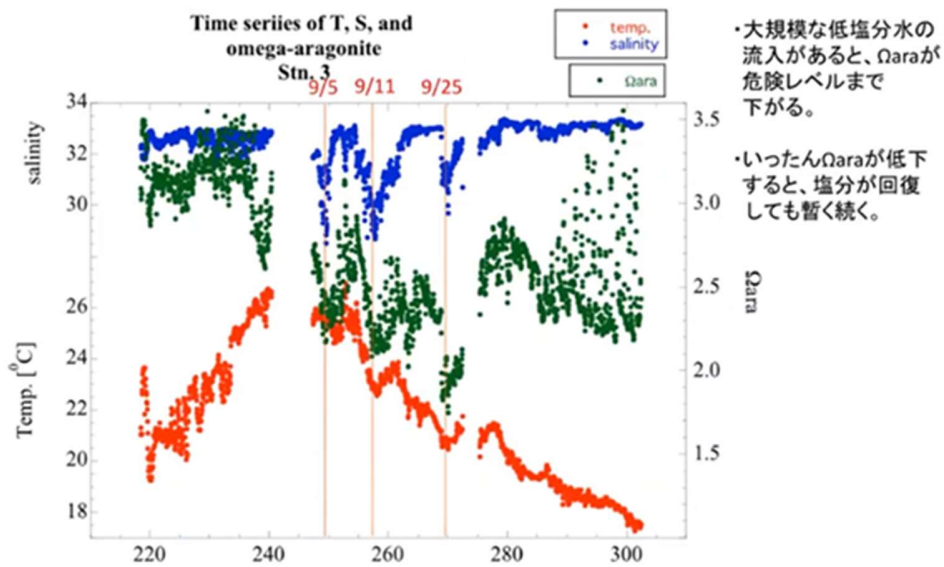


図 25. 志津川湾における 4 定点のアラゴナイト飽和度の推移

2-3. 備前市日生町及び南三陸町志津川湾におけるカキ養殖業に関する数値モデリングによる予測

科学的知見に基づいた将来のカキ生産のあり方を評価することを目的として、1) 数値モデリングによる地域レベルでのシミュレーション、2) モデリング結果の地域間での比較、3) カキ生産への影響評価を行い、経済評価までを視野に研究について、現在準備段階に入った。

志津川湾での計算結果では、気候変動のシナリオ毎の Ω_{ar} やpHの変化傾向が示され、カキ稚貝の浮遊期への影響は少ないのではないかという見解が示された。その上で、pHなどの変化によるカキの生産額の変化を定式化し、経済評価を行う方法論を検討する。

検討事項として、モデリングに対しては、各値の再現性の向上（特に塩分の過大評価やpHの季節変動のパターンが逆）、日周変動などの考慮（溶存酸素など）の必要性が指摘されており、経済評価については、生産量を生産額に直す際の価格変動の影響や、影響緩和のための対策コストの組み込みなどの必要性がある。

モデリングに関しては、降雨や河川からの影響を取り入れることも必要で、要求される精度が、結果の利用方法（機構解明の科学的検討なのか、対策検討のための実務的検討のかなど）により異なってくるが、今後の方向性については総合的な判断を要する。

〈今後の研究内容〉

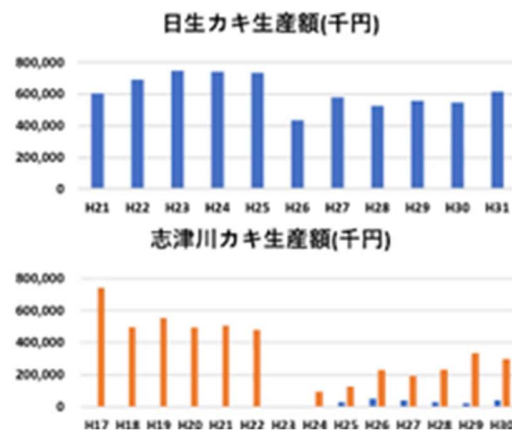
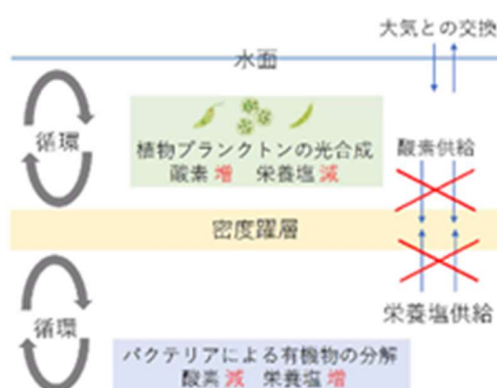
モデリング

- ・日生、広島での将来予測
- ・ワシントン州沿岸域でのモデリング地域決定、将来予測(ウィラバ湾等)
- ・分析の際に他の要素(貧酸素化と海洋酸性化の複合影響など)の検討
- 貧酸素化は海洋酸性化や地球温暖化と合わさることでより広範な影響が予測される (IPCC, 2018, IPCC1.5°C特別報告書)

経済評価

- ・式の作成(Ω の値との関係に視点を置いて論文検索)、他の要素の検討
- ・生産額の情報収集(データの使い方の検討)

出典：赤松, 2020(左)
日生町漁業協同組合, 2020(右1)
南三陸町統計室, 2020(右2)



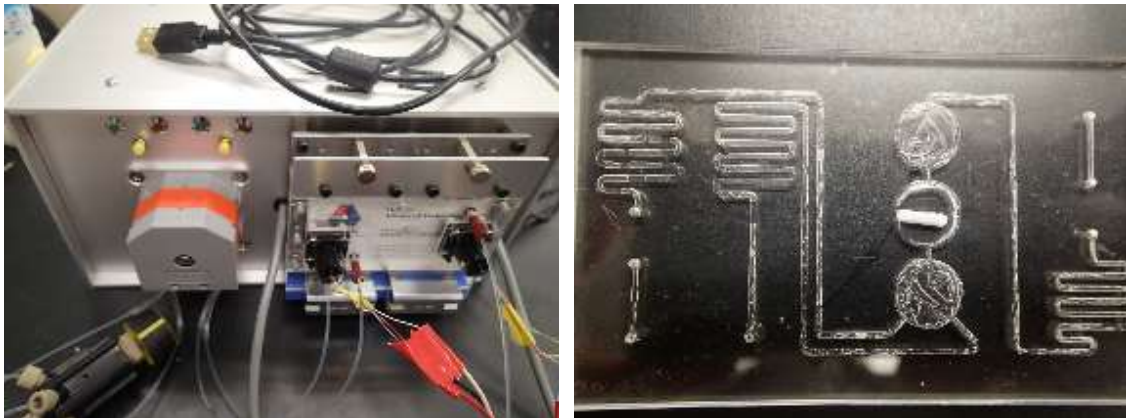
2-4. アルカリ度・pH 新測定システムについて

海洋酸性化適応プロジェクトにおいて、必須となる炭酸系水質項目の測定にあたっては、観測機器が高価で取り扱いにも習熟した技術が求められ、分析用の採水にあたっては、塩化第2水銀のような生命の危険が伴う毒物を使用しなければならないなどの制約が多く、化学系の専門家が加わらないと着手が困難な状況にある。今後、海洋酸性化に関するモニタリングを簡素化し、汎用性を持たせるためには、まずはデータの取得にあたってのハードルをクリアしなければならない。アルカリ度・pH 新測定システムについては、海洋酸性化等も視野に入れた炭酸系の観測を合理化、効率化することを目指して開発されているものであり、開発者によればすでに実用化段階に到達しているとされている。

しかし、有用かどうかは現場条件や取組体制、人材の多様性にも左右されるため、モニタリングの汎用化を目指す本プロジェクトの要望を満足するかを慎重に判断しなければならない。デモンストレーションにも参画し、本プロジェクトのメンバーにより実際に試用する段階を迎えようとしているが、その後、コロナ禍により順延している状況である。これまでの検討結果は次の通りである。

①アルカリ度・pH 新測定システムの概要

下図に示すシステムにより pH とアルカリ度を測定する。ペリスタポンプによってチューブからサンプルと塩酸をアクリル板に送液する。アクリル板には溶液の通る流路、反応室、混合室があり、ここでアルカリ度を測定する。本システムは pH1 点法により、従来の滴定法と同等の精度のアルカリ測定を短時間で実行できる。また、サンプルを循環させることで連続測定が可能である。



アルカリ度測定システムの外観とアクリル板

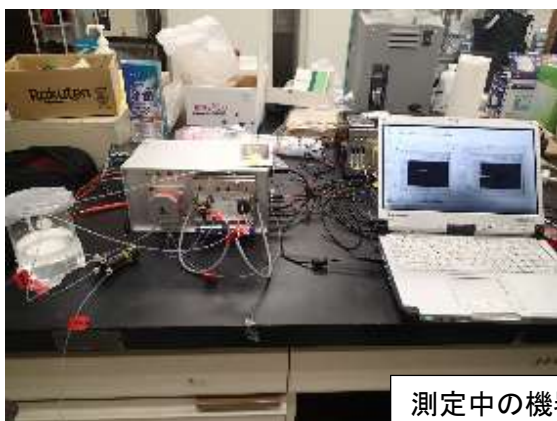
下図は別途開発されている pH のみの連続測定システムである。上図のアルカリ度システムも小型化を目指すようである。



pH 連続測定システム

②本システムによる測定について

- ・事前にチューブや測定部に劣化がないかを確認する。
- ・測定開始時は海水を循環させて、センサーをならす必要がある（2～3 時間程度）。
- ・その際に測定値が安定しているか、流路内で液漏れが無いかを確認する。
- ・測定はサンプルと塩酸にチューブを入れてシステムの電源を入れるだけで良い。
- ・測定データの取得はシステム内にあるメモリーを取り出すことで行う。
- ・測定中に USB ケーブルを PC に接続し、アルカリ度をリアルタイムで確認することも可能である。
- ・使用後のメンテナンスは、純水を循環させて流路を洗浄する。
- ・廃液処理の方法には留意が必要である。
- ・どの海域の海水でも測定可能であるが、キャリブレーションが必要である。また、既存のアルカリ度計（滴定法）と比較することが望ましい。
- ・連続測定中のメンテナンスは特に不要であるが、定期的にシステムの状態やデータを確認する。



<実験室で測定する場合>

- ・採取したサンプルは変質を防ぐために現地で固定液を添加して保存する。
- ・サンプルと塩酸は 100ml 程度で十分に測定可能である。

<現地で測定する場合>

- ・システムを陸上（船上）に設置し、海水を循環させて計測する。
- ・現地の海水をポンプ等で陸上（船上）まで汲み上げる必要がある。
- ・海水を循環させることで長期的な連続測定が可能である。
- ・海水と塩酸は 1ml/min 程度必要である。

③海洋酸性化プロジェクトへの導入に際して

- ・連続的かつ短時間でアルカリ度を計測したい場合、本システムを採用する利点は大きいにある。
- ・現状では試験的な計測しか見学していないが、機器のセッティング等が完全に安定しているわけではなく、求める精度の測定値が直ちに得られるか再確認が必要である。
- ・プロジェクトにおいても、当面は滴定法と本システムを並行して実施し、両者を比較しながら精度等を確認する必要があると考える。今後に向けて、簡素化は是非とも必要である。
- ・本システムの導入に際は、実際にシステムを使用し、測定データの安定性や精度を体感することが必要であると考ええる。
- ・今後予定している連続測定の実験では、実際の試料を用いて、機器のセッティングからデータの取得までの一連の動作を体験することとしている。

2-5. アンケート調査の進め方について

ワシントン大学と協議して作成したアンケート調査については、まず、協力体制が確立されている備前市 ICM 協議会等に依頼し、70%の回収率が得られたが、漁業界を対象に拡大するにあたっては、質問内容について再度よく吟味する必要があると考えられる。アンケート調査の内容の検討については、農林中金総合研究所の協力の下に進めていくこととしているが、配布回収作業についても、全漁連の協力が得られることとなり、今後はカキ養殖業者を中心に、全国規模のアンケート調査を実施すべく調整していくこととしている。