

2) 表層の水温、塩分、溶存酸素飽和度、クロロフィル蛍光

湾口 St. 20、湾央 St. 11、14 及び湾奥 St. 8 における表層（0.5 m）の水温、塩分、溶存酸素飽和度、クロロフィル蛍光の推移を図 2-1-3 に示す。

水温は 24℃～31℃の範囲で推移し、8 月までは St. 8 及び St. 11、14 で高く、St. 20 で低い傾向があった。塩分は 31.3～33.6 の範囲で推移し、St. 8 で低く、St. 20 で高い傾向があった。溶存酸素飽和度は 84%～112%の範囲で推移した。クロロフィル蛍光は 0.24～1.47 の範囲で推移した。

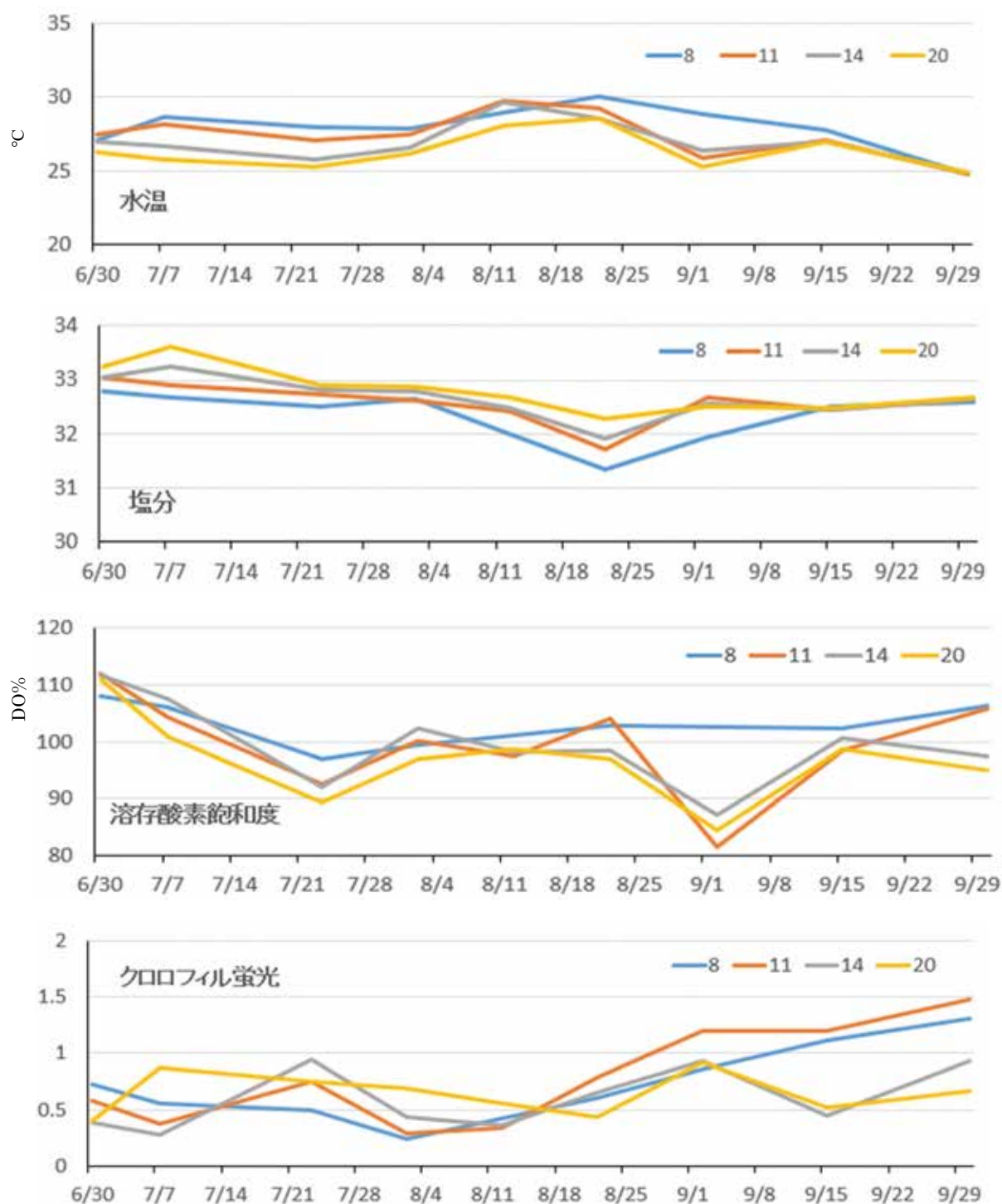


図 2-1-3. St. 8、11、14、20 の表層における水温、塩分、溶存酸素飽和度、クロロフィル蛍光の推移

3) 栄養塩

図 2-1-4 に St. 8、11、14、20 の表層、5m、底層（海底上 1m）ごとの栄養塩濃度 DIN（ $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ ）及び $\text{PO}_4\text{-P}$ を示す。

DIN は $0.00\ \mu\text{M}$ ～ $6.40\ \mu\text{M}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は $0.00\ \mu\text{M}$ ～ $0.74\ \mu\text{M}$ の範囲で推移し、底層の DIN 及び $\text{PO}_4\text{-P}$ は、調査期間を通して高めで推移した。

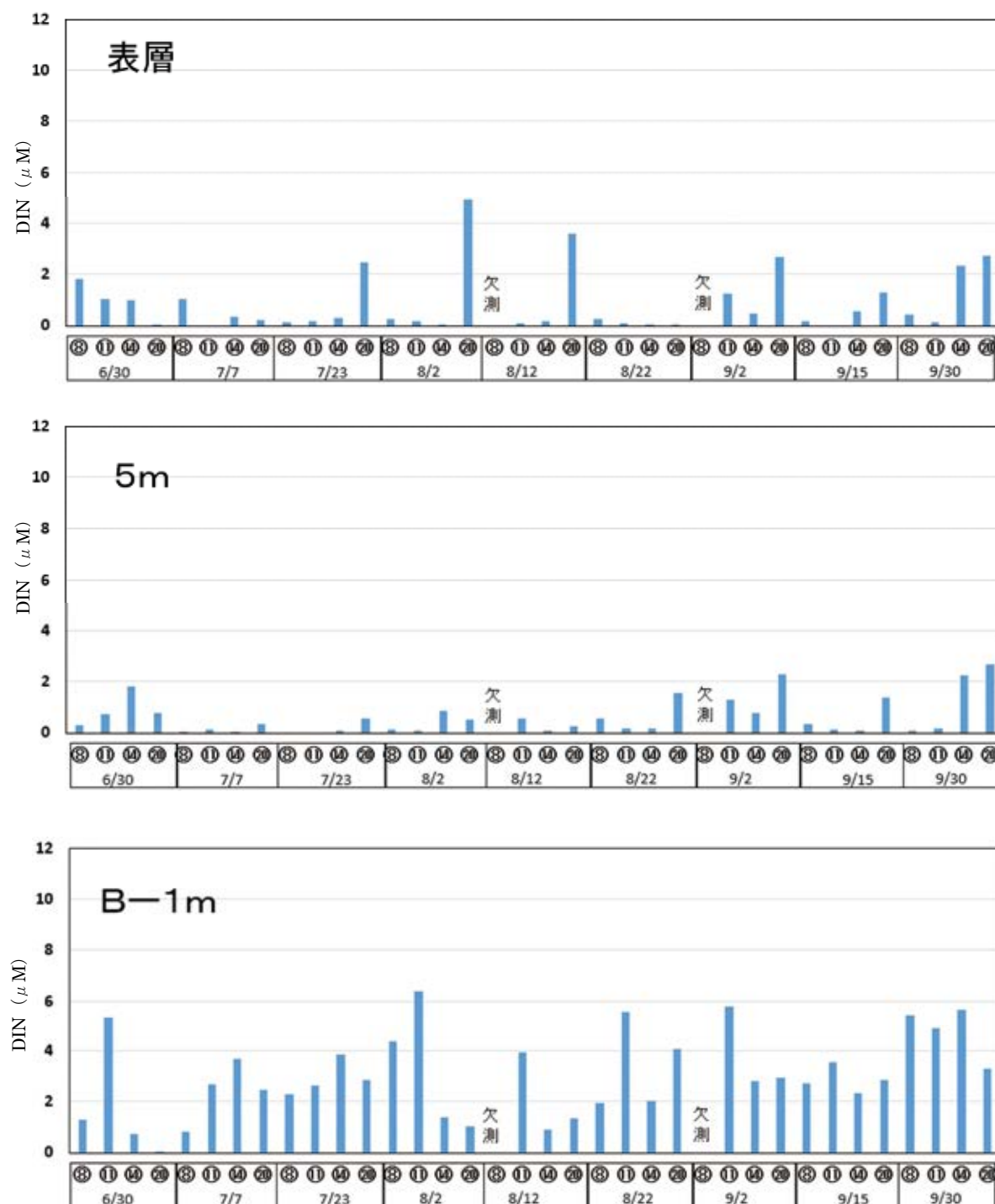


図 2-1-4. 調査点ごとの栄養塩濃度(DIN)

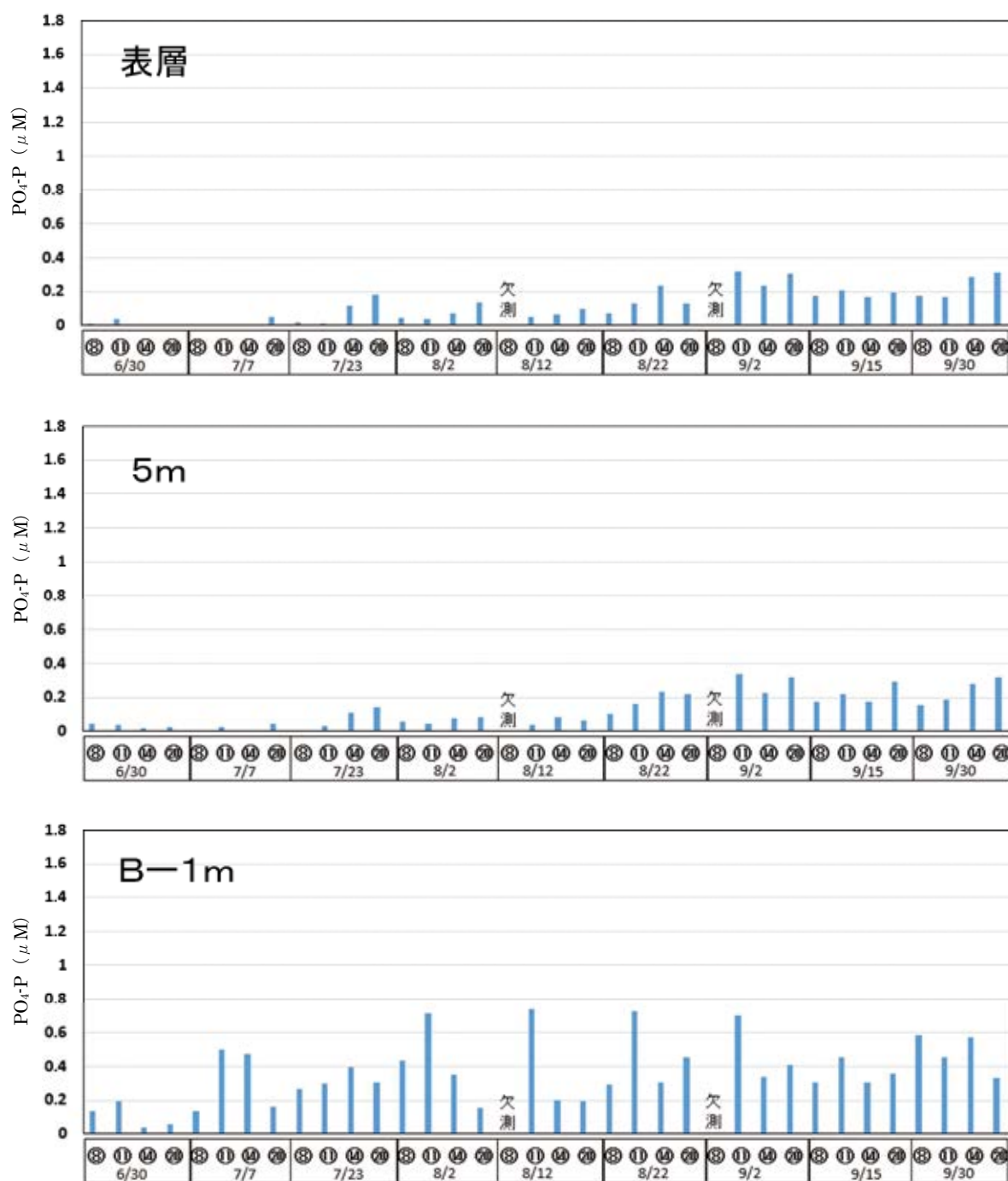


図 2-1-4 (続き). 調査点ごとの栄養塩濃度(PO₄-P)

4) 植物プランクトン

有害プランクトンは、*Karenia mikimotoi* が 6 月 30 日 (St. 8、St. 20)、8 月 2 日 (St. 14)、8 月 12 日 (St. 11)、8 月 22 日 (St. 11) に 1 cell/mL、*Chattonella* sp. が 6 月 30 日に 1 cell/mL、*Cochlodinium polykrikoides* が 7 月 7 日 (St. 14、St. 20)、7 月 23 日 (St. 14)、8 月 2 日 (St. 14)、9 月 2 日 (St. 20) に 1~6 cells/mL 出現した。他の植物プランクトンとしては、珪藻類が全ての調査を通じて 7~418 cells/mL の範囲 (全点全層平均) で出現した。(図 2-1-5)

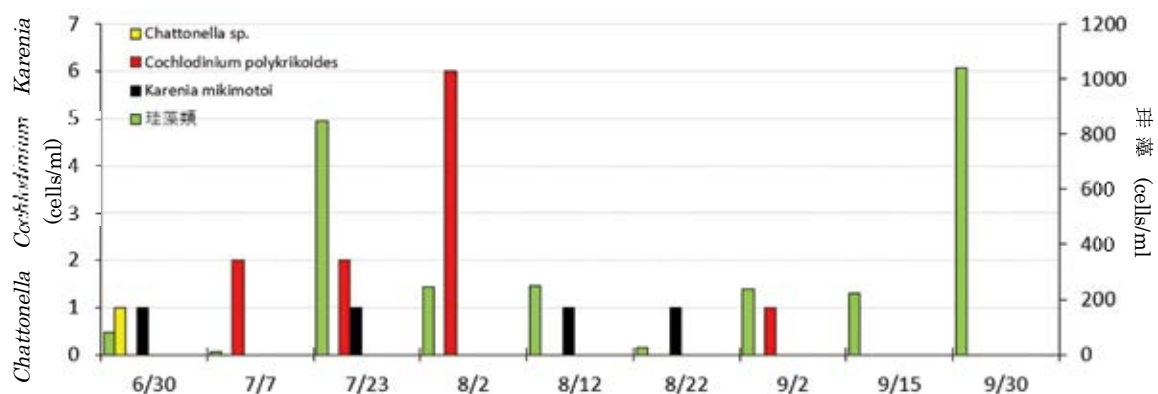


図 2-1-5. 調査日ごとの植物プランクトン最高細胞密度

5) 橘湾湾奥における貧酸素水塊の発生

橘湾は、早崎瀬戸を通じて有明海と外海域を連結する海域であり、加津佐から茂木を結ぶ線を境に湾口部は水深 40 m から 80 m へと落ち込み、湾奥部は 30 m から 40 m と平坦な海底となっており、貧酸素水塊は湾奥部で夏季に発生する。湾奥部で貧酸素化が進行する仕組みとして 2 つの機序が確認されている。ひとつは、有明海の海水が橘湾に流出する際に早崎瀬戸において、表層の軽い海水と底層の重い海水が混合して湾奥部に運ばれ、湾奥部の底層上部に第 2 躍層が形成されるために、海底付近から貧酸素化する場合である（岡山, 2007）。もうひとつは、有明海で発生したシャットネラ等の赤潮が大雨等により低塩分水とともに有明海奥部から橘湾に向けて流される（Aoki et al., 2016）か、湾奥部で発生した赤潮が湾全体に広がり、酸素を消費することで貧酸素化する場合である（木元ら, 2003）。

貧酸素化の定義は水産用水基準（日本資源保護協会, 2000）に示された底生生物が生存可能な最低濃度 2.0 ml/L を参考に、水温 25°C、塩分 30 のときの DO に換算すると約 40% となるため、溶存酸素飽和度 40% 以下を貧酸素化とした。

図 2-1-6 のとおり 6 月下旬～7 月中旬までは、底層（海底上 1 m）で貧酸素水塊は確認されなかったが、7 月 23 日には湾中央部（St. 7）で DO の低下がみられ、8 月下旬まで北東海域で継続的に貧酸素化した。9 月上旬には貧酸素化が一旦解消したが、下旬になると湾奥の一部で再び貧酸素化が観測された。また、7 月下旬～8 月下旬ならびに 9 月下旬に貧酸素化した海域の底層水温はその他の海域に比べ低い値を示す傾向がみられた（図 2-1-7 参照）。

図 2-1-6 に底層 DO (%) の推移を示す。6 月下旬～7 月中旬までは、底層（海底上 1 m）で貧酸素水塊は確認されなかったが、7 月 23 日には湾中央部（St. 7）で DO の低下がみられ、8 月下旬まで北東海域で継続的に貧酸素化した。9 月上旬には貧酸素化が一旦解消したが、下旬になると湾奥の一部で再び貧酸素化が観測された。また、7 月下旬～8 月下旬ならびに 9 月下旬に貧酸素化した海域の底層水温はその他の海域に比べ低い値を示す傾向がみられた（図 2-1-7）。10 日スケールで貧酸素水塊の分布が大きく変化しており、海底や底層水の酸素消費を受けながら貧酸素水塊が水平移動をする可能性が示唆される。今後、底層流れ（残差流）と貧酸素水塊の分布との関係を明らかにする必要がある。

図 2-1-8 に St. 4、8、7、11、10、14、20 における水温、塩分、DO の鉛直コンタ図を示す。橘

湾奥部の St. 4 から St. 20 にかけて表層では水温・塩分が徐々に高くなる傾向が見られた。混合域の St. 20 は 7 月 23 日を除き水温と塩分の鉛直分布はほぼ一様であった。したがって、表層は低密度水の混合域への密度流の形成、中層は混合域からの中層貫入があったことが示唆される。これは岡山（2007）と矛盾しない。しかしながら、7 月 23 日には表層での塩分低下が観察された。この 1 週間～2 週間前には筑後川流量の増加（<http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/gaiyou/suishitsu/index.html>）が記録されていたこと、St. 20 では表層塩分が低いため、早崎瀬戸等において完全に混合されずに表層低塩分水が橘湾へ輸送されたと考えられる。その結果、底層水が酸素消費されながら低酸素化した可能性が示唆される（図 2-1-6、7 月 7 日から 23 日）。このプロセスは岡山（2007）とは異なる。

2022 年は、有害プランクトンの細胞数が低く、赤潮と貧酸素水塊との関係が明確に見られなかった（図 2-1-5、図 2-1-8）。赤潮の発生と貧酸素水塊、特に酸素消費との関係は現在のところ不明であるため、酸素消費の内容（生物学的・化学的酸素消費）や主要な酸素消費の場所（海底あるいは底層水）を調査する必要がある。

6) 貧酸素水塊の解消

7 月下旬から 8 月下旬に発生した貧酸素は、9 月に入って解消がみられた。9 月 2 日には欠測による情報不足はあるものの、鉛直混合が起こっている可能性がある。

また 9 月上旬以降は大型の台風の接近があったことから、水温・塩分の躍層はみられなくなった。

7) 操業の効率化

貧酸素調査後は速報（図 2-1-9）を取りまとめ、当日中に関係漁協宛送付し、長崎県漁場テレメーターシステム水質情報（<https://telemeter-area.jp/nagasaki/nagasaki.htm>）に「橘湾情報」としてアップロードした。また、「赤潮ネット（沿岸海域水質・赤潮観測情報）」内の「貧酸素情報」にて公開した（図 2-1-10）。

橘湾で営まれている漁業は、中・小型まき網、小型底びき網、刺網漁業であるが、海底付近から発生する貧酸素水塊が広域化・長期化した場合は、漁獲量が減少する。特にガザミを対象とした刺網漁業では、漁獲物が水揚げ前にへい死することにより収益面で損失となる。

今年度も貧酸素調査終了後に関係漁協へ聞き取りとったところ、漁業者への情報周知を図ることで漁場の選択や休漁などによる操業の効率化等に取り組んでいる様相が示され、貧酸素情報が有効に活用されているものと考えられた。

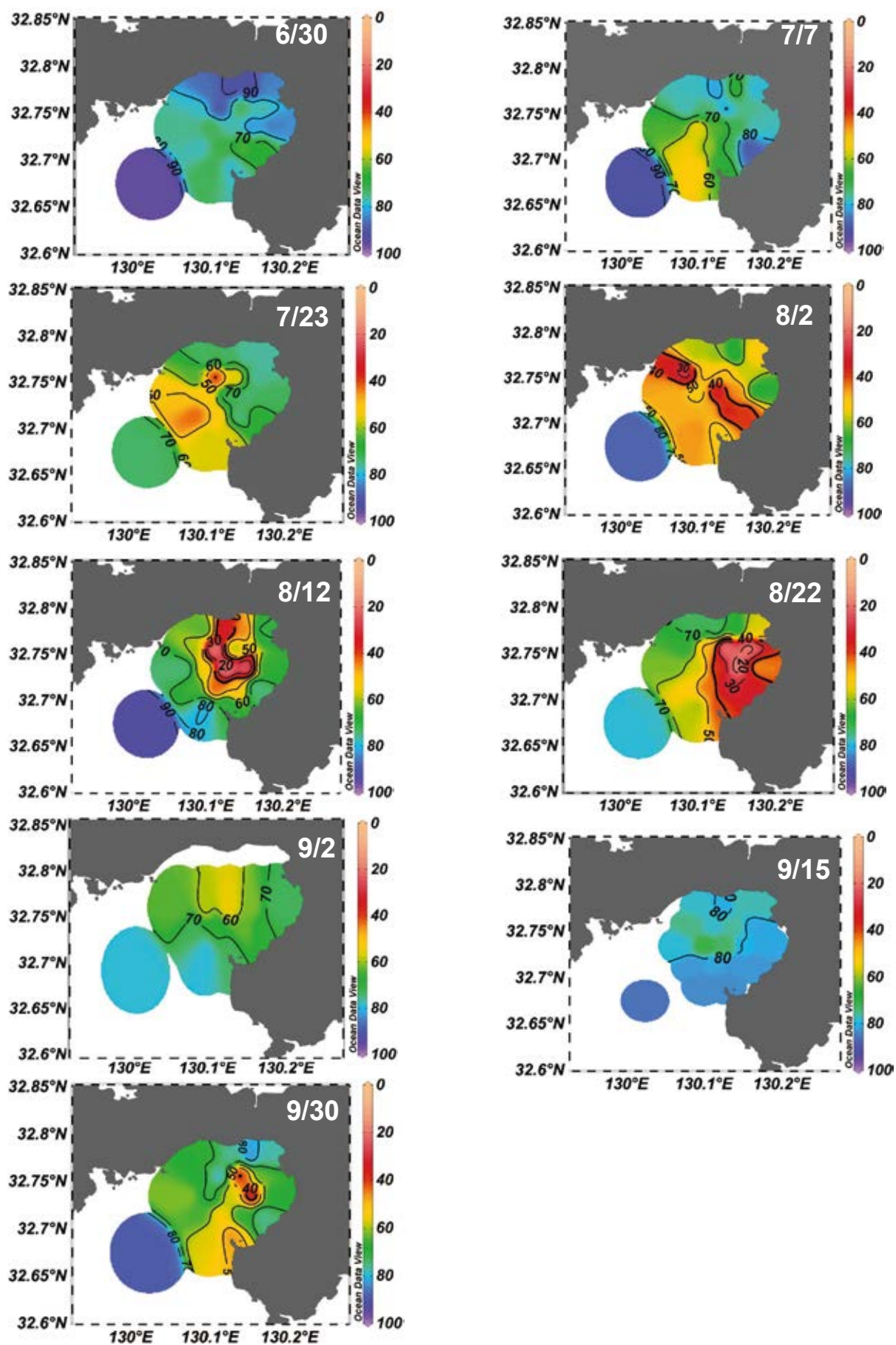


図 2-1-6. 底層(B-1)DO(%)の推移

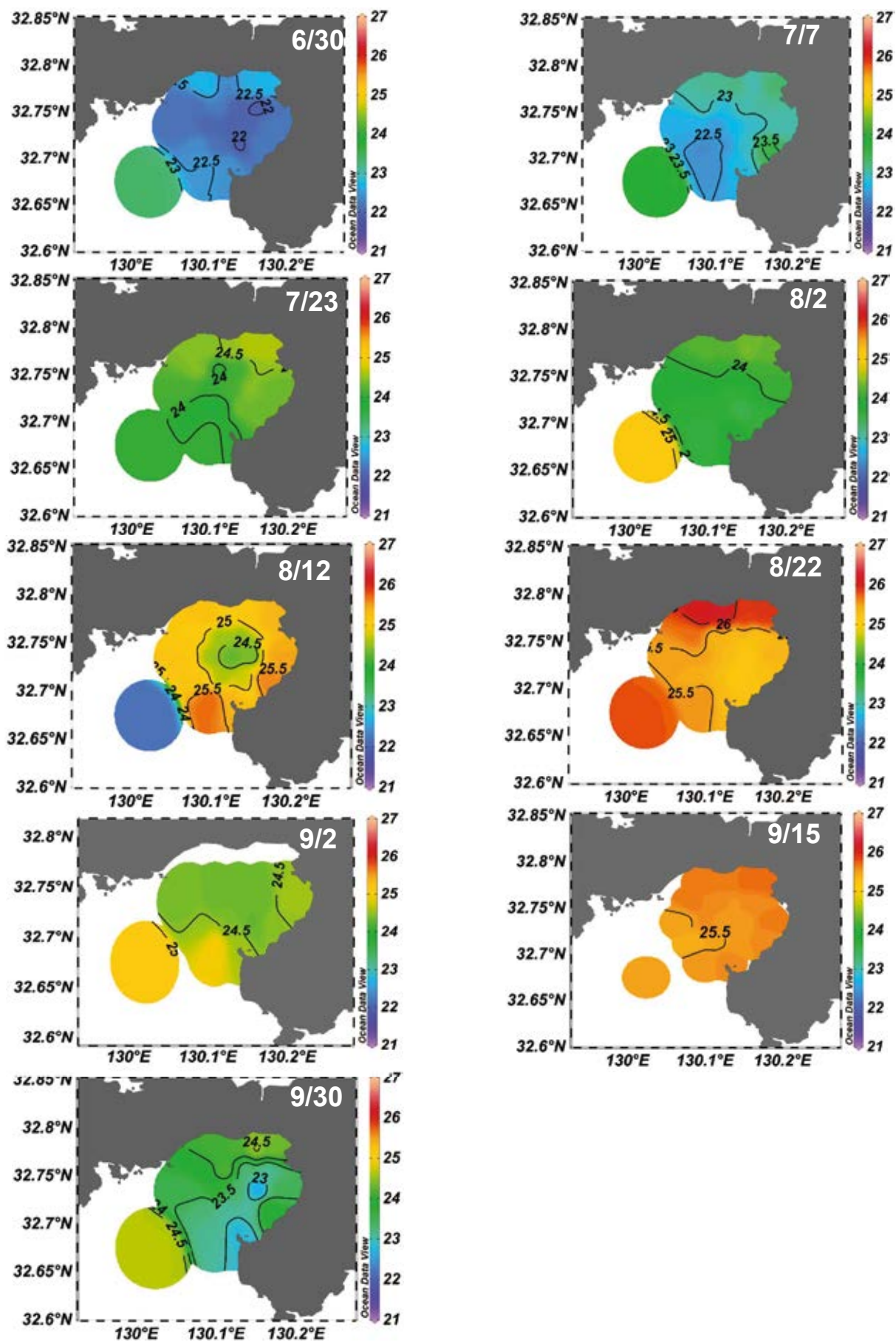


図 2-1-7. 底層(B-1)水温(°C) の推移

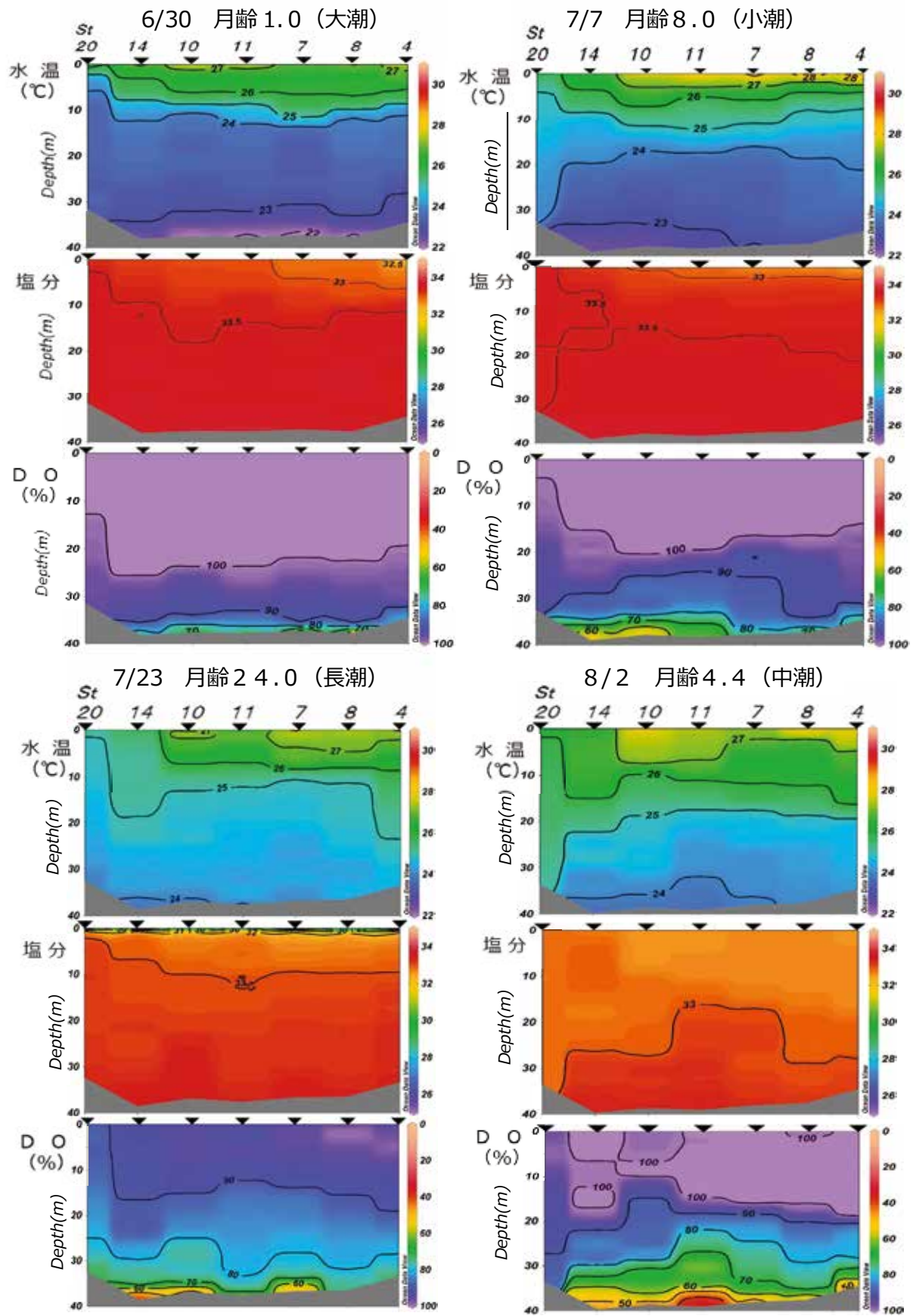


図 2-1-8. St. 4、8、7、11、10、14、20 における水温(°C)、塩分、DO(%)の鉛直コンタ図(6/30-8/2)

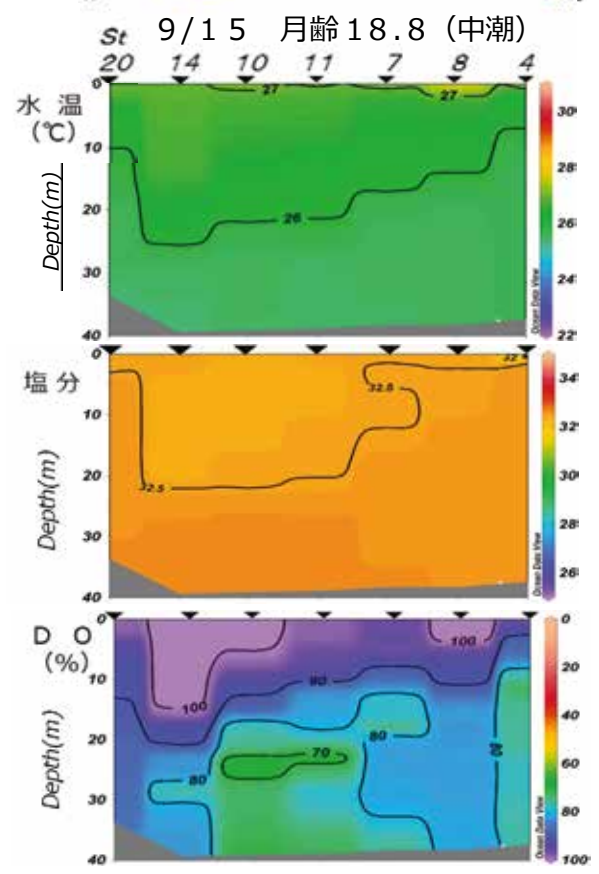
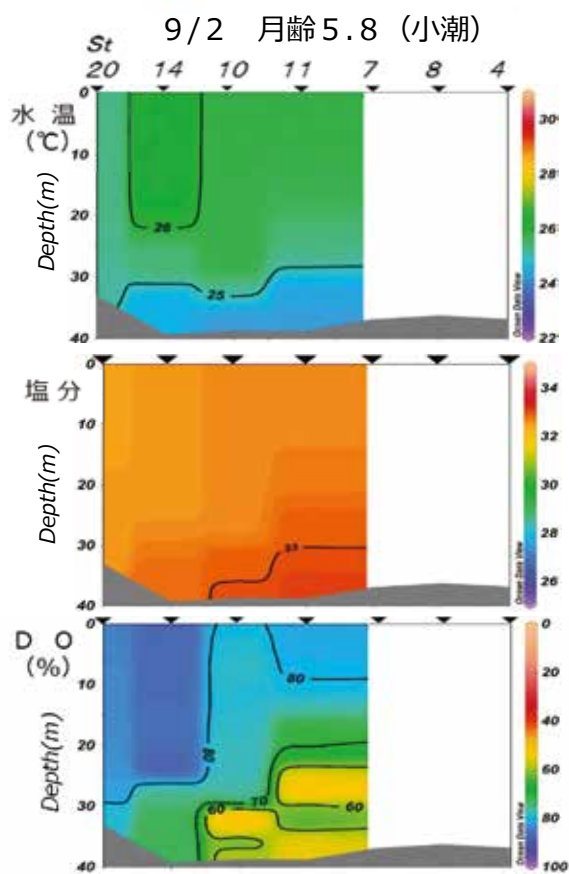
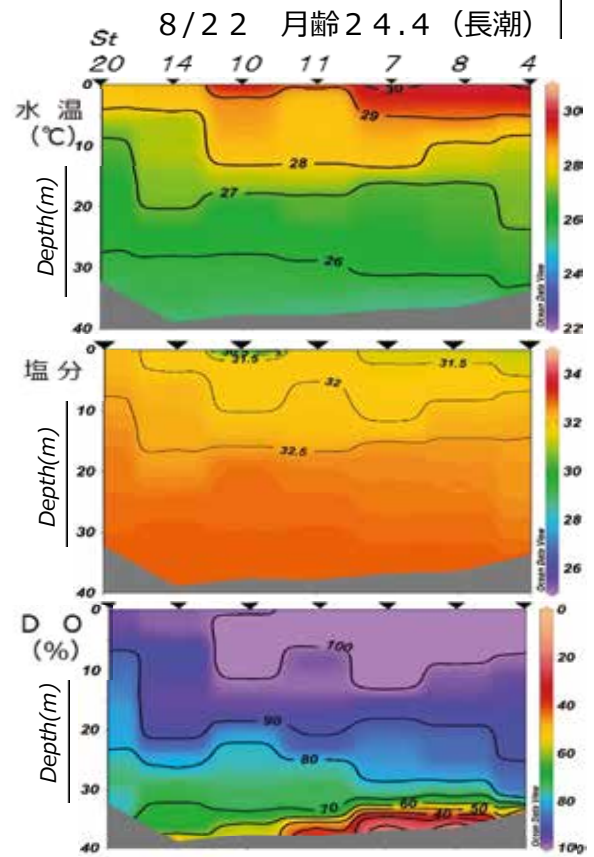
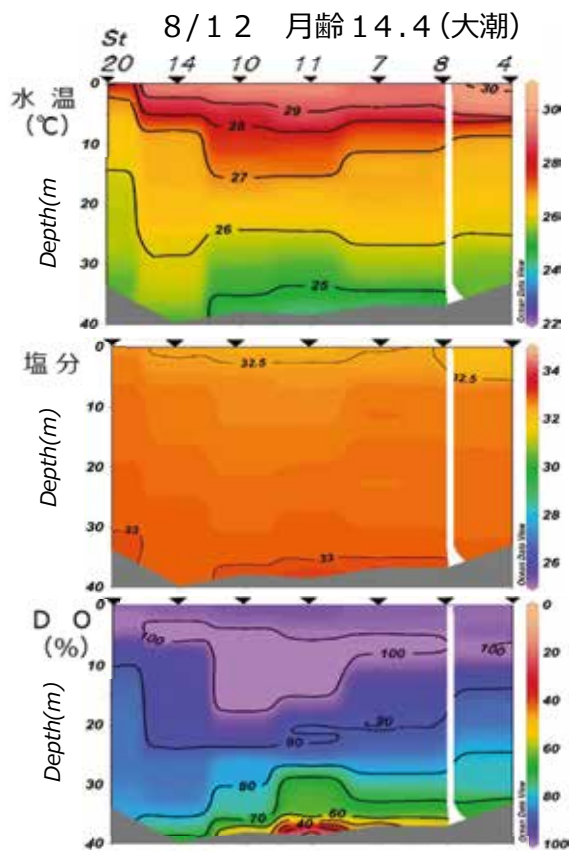


図 2-1-8 (続き). St. 4、8、7、11、10、14、20 における水温(°C)、塩分、DO(%)の鉛直コンタ
図(8/12-9/15)

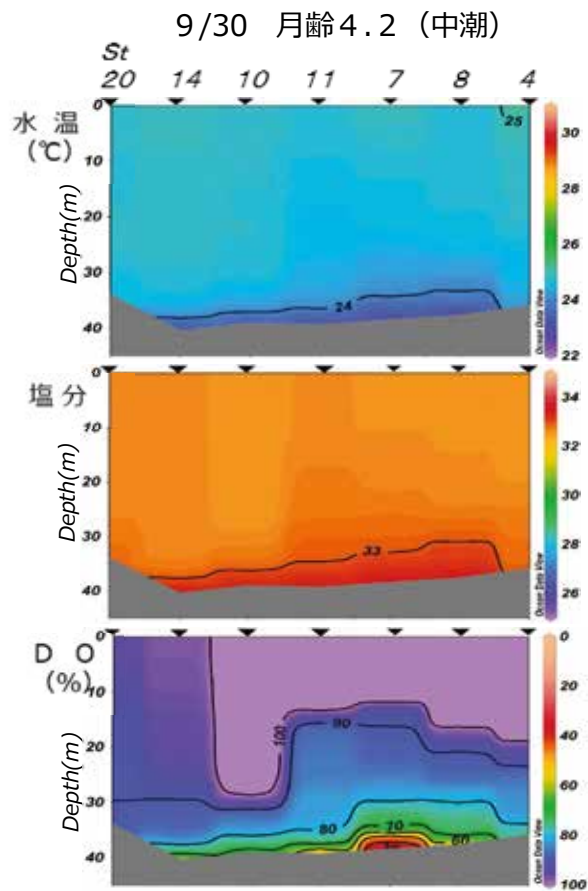


図 2-1-8(続き). St. 4、8、7、11、10、14、20 における水温 (°C)、塩分、DO(%)の鉛直
コンタ図(9/30)



図 2-1-10. 貧酸素情報

図 2-1-9. 貧酸素調査結果速報

3. 5年間のまとめ

2018～2022年には、表 2-1-2 に示す期間に貧酸素水塊の発生が観測された。

この間には橘湾での広域的な赤潮発生がなく、これまでの観測結果から有明海からの低塩分水が1週間～2週間後に橘湾に流入することや高水温躍層形成後に底層の貧酸素化が進行したと考えられた。

このメカニズムについては、河川由来の有明海の低塩分水に伴い形成される塩分躍層や気温上昇による水温躍層形成後に底層が貧酸素化すること、早崎瀬戸で混合された海水が侵入し第2躍層を形成することにより第2躍層下で貧酸素化が促進される可能性が考えられた。

また貧酸素は、台風の接近や外海水の流入による攪拌、または表層水温の低下により成層化が崩れることで解消方向に進むと考えられた。

一方で、貧酸素情報に対しては関係漁業者の関心が高く、漁獲物へい死による損失回避や操業方法の検討のみならず操業意欲にも関連する情報であると考えられた。

表 2-1-2. 調査定点の緯度経度と調査実施状況

年	貧酸素発生時期	旬数
2018	7月下旬～8月上旬	4旬
2019	7月上旬、7月下旬～9月上旬	8旬
2020	7月下旬～8月上旬	4旬
2021	7月中旬～8月上旬、8月下旬	4旬
2022	7月中旬～8月下旬、9月下旬	5旬

参考文献

岡山紘介（2007）：夏季の橘湾底層における低酸素水塊の発達・消滅機構．長崎大学修士論文
木元克則・西内耕・岡村和磨（2003）有明海における溶存酸素分布．月刊 海洋，35，4，261-265

Kazuhiro Aoki, Manabu Shimizu, Hiroshi Kuroda, Toshifumi Yamatogi, Naoya Ishida, Shigeru Kitahara, Keiji Hirano（2016）：Numerical study for specifying the major origin of low salinity water associated with *Chattonella* (Raphidophyceae) blooms in Tachibana Bay, Japan. Journal of Oceanography, 72 : 811-816.

日本資源保護協会（2000）：水産用水基準（2000年版）

2) 貧酸素水塊による被害軽減技術の開発

イ. 東京湾で発生する貧酸素水塊の被害軽減技術の開発

① 干潟浅海域を生息場とする有用魚介類の生活史に与える貧酸素水塊の影響 解明と軽減策検討

千葉県水産総合研究センター

資源研究室 井上雅之、田中美帆

東京湾漁業研究所 渡邊晟也、石井光廣

国立研究開発法人水産研究・教育機構

水産技術研究所 高田宜武、西本篤史

1. 全体計画

(1) 目的

東京湾に産卵場や生育場が限定されている種については、東京湾東部の干潟浅海域が重要な生育場としての役割を果たしている可能性が高い。例えばイシガレイ等を対象に、これらの沿岸浅海域における成長段階における貧酸素水塊の影響把握と軽減策を検討する。

また、内湾に点在する周囲より水深の浅くなったマウンド等は、周囲に比べ貧酸素水塊が波及しにくく、底質が良好で生息する底生生物種が豊富である。これらの場所が生物の成育場もしくは避難場として機能しているか把握し、貧酸素水塊による影響軽減策を検討する。

(2) 試験等の方法

東京湾東岸の棚状もしくはマウンド状の浅海域でソリネットによる分布調査を行い、イシガレイ等の稚魚の出現状況を把握する。

稚魚・幼体の生育場もしくは避難場としての機能を把握するため、環境調査（水質・底質・底生生物）を実施する。

2. 令和4年度（2022年度）計画および結果

(1) 目的

東京湾東岸の棚状もしくはマウンド状の浅海域における稚魚・幼体の出現状況を把握するとともに、稚魚・幼体の生育場もしくは避難場としての機能を把握する。

(2) 試験等の方法

1) 調査海域および調査点

東京湾の東岸の富栄養化の影響が強い北側から「養老川河口」、人工岸壁前面に広がる棚状の浅海域である「五井」、岸壁から離れたところに出来たマウンド状の浅場「北袖」、人工岸壁前面からなだらかに傾斜する「南袖」、貧酸素水塊のみられない対照海域として南部の自然干潟「盤洲」の沖合、以上5海域を調査海域に設定した。調査点は、各調査海域で水深の異なる2地点を設定し、養老川河口、五井、南袖、盤洲では水深約5mと水深約10mの2地点、北袖ではマウンド上の水深約10mとマウンド下の水深約15mの2地点、合計10地

点にて調査を実施していたが、2021 年 5 月以降は、各調査海域で水深の異なる 2 地点または 3 地点を設定し、養老川河口、南袖、盤洲では水深約 5 m と水深約 10 m と水深約 15 m の 3 地点、五井では水深約 5 m と水深約 10 m の 2 地点、北袖ではマウンド上の水深約 10 m とマウンド下の水深約 15 m の 2 地点、合計 13 地点にて調査を実施した（図 2-2-1、図 2-2-2、表 2-2-1）。

2) 環境調査（水質、底質、底生生物）

①調査期間と調査頻度

調査は、2022 年 5 月 2 日（4 月分）、6 月 1 日（5 月分）、7 月 1 日（6 月分）、7 月 25 日、8 月 3 日、9 月 7 日、10 月 20 日、11 月 28 日、12 月 15 日に計 9 回行った。

②調査方法

環境調査は、千葉県水産総合研究センター東京湾漁業研究所の東京湾調査・指導船「ふさなみ」（以下ふさなみ）で行った。水質観測は、多項目水質計（Model 6600 または ProDSS、ザイレムジャパン）を海面から海底直上約 0.5 m まで 0.1 m/s の速度で降下し、水深、水温、塩分、溶存酸素量（以下 DO）、酸化還元電位（Eh、以下 ORP）等を鉛直観測した。また、採泥はスミス・マッキンタイヤ式採泥器（採泥面積 0.1 m²、離合社）を用いて、各調査点で 2 回行い、底質分析と底生生物分析試料を採取した。底泥の ORP（Eh）はポータブル ORP 計（HM-40P、東亜ディーケーケー）を用いて、船上で毎回測定した。底質は毎月強熱減量を測定したほか、11 月に粒度分析も実施した。底生生物試料は、目合 1 mm のふるいで濾し、ふるいに残った底生生物（マクロベントス）を対象とした。水産有用種は個体ごとの大きさと湿重量を測定し、その他の生物は種もしくは分類群ごとの個体数と合計湿重量を測定した。

3) ソリネット調査

①調査期間と調査頻度

調査は、2022 年 4 月 25 日、6 月 2 日（5 月分）、6 月 30 日、7 月 29 日、8 月 5 日、8 月 30 日（9 月分）、10 月 21 日、11 月 24 日、12 月 16 日に計 9 回行った。盤洲 15m は、調査時に破網が頻発したため、2021 年 9 月以降取りやめた（表 2-2-2）。解析には前年度実施した 2022 年 1 月 20 日、2 月 3 日、3 月 17 日のデータを併せて使用した。

②調査方法

調査は「ふさなみ」で行った。各調査点で改良西海区水研Ⅲ型ソリネット（図 2-2-3、網口幅 1.5 m、高さ 0.3 m、長さ 4 m、目合 5 mm）を船速約 1 ノットで 30～60 秒曳網した。曳網距離は、曳網開始時と終了時の GPS 位置情報から算出した。

採集物から船上で試料生物を全数拾い出し、採集地点ごとに氷蔵した状態で実験室に持ち帰り凍結した。試料とする生物は、魚類、甲殻類、貝類、イカ・タコ類、ナマコ類、ウニ類とした。試料は解凍後に可能な限り種まで同定し、種もしくは分類群ごとに個体数を計数した。貝類のうち、有機物汚染の指標種であるチョノハナガイとシズクガイは、船上で 1～10 個体（+）、11～100 個体（2+）、101 個体以上（3+）に区分して計数した。加えて、有用魚介類とハタタテヌメリは、破損個体を除き、個体ごとに大きさ（魚類、

イカ・タコ類、ナマコ類は全長、甲殻類は全長、体長または全甲幅、貝類は殻長または殻高)と湿重量を測定した。

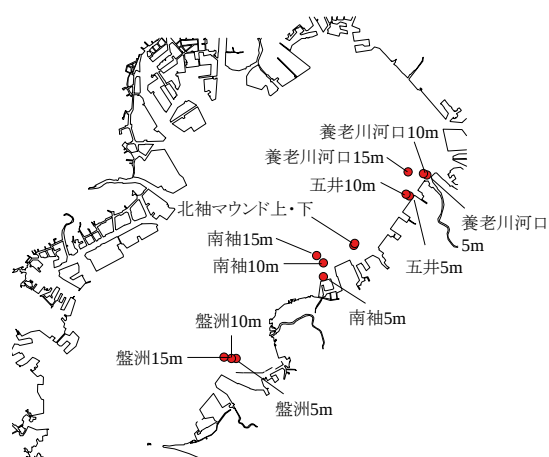
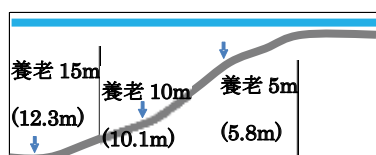


図 2-2-1. 調査点図

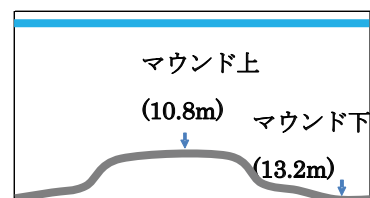
表 2-2-1. 調査点位置と水深

調査点名	緯度	経度	水深 m
養老川河口	5m N35° 32.81'	E140° 03.89'	5.8
	10m N35° 32.88'	E140° 03.67'	10.1
	15m N35° 32.97'	E140° 02.69'	12.3
五井	5m N35° 31.72'	E140° 02.77'	5.7
	10m N35° 31.81'	E140° 02.56'	15.2
北袖マウンド	上 N35° 29.15'	E139° 59.23'	10.8
	下 N35° 29.25'	E139° 59.29'	13.2
南袖	5m N35° 27.52'	E139° 57.29'	5.0
	10m N35° 28.24'	E139° 57.29'	9.9
	15m N35° 28.62'	E139° 56.86'	14.7
盤洲	5m N35° 23.27'	E139° 51.73'	7.9
	10m N35° 23.27'	E139° 51.43'	10.0
	15m N35° 23.34'	E139° 50.96'	13.7

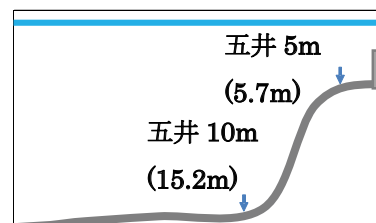
養老川河口



北袖マウンド



五井



南袖

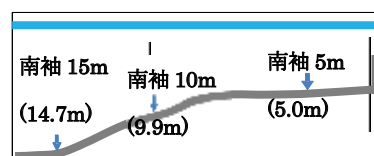


図 2-2-2. 調査点図. () は実水深

表 2-2-2. ソリネット調査の実施状況

調査日	養老川河口			五井		北袖マウンド		南袖			盤洲		
	5m	10m	15m	5m	10m	上	下	5m	10m	15m	5m	10m	15m
4/25	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
6/2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
6/30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
7/29	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
8/5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
8/30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
10/21	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
11/25	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
12/16	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—

○：実施。 —：未実施

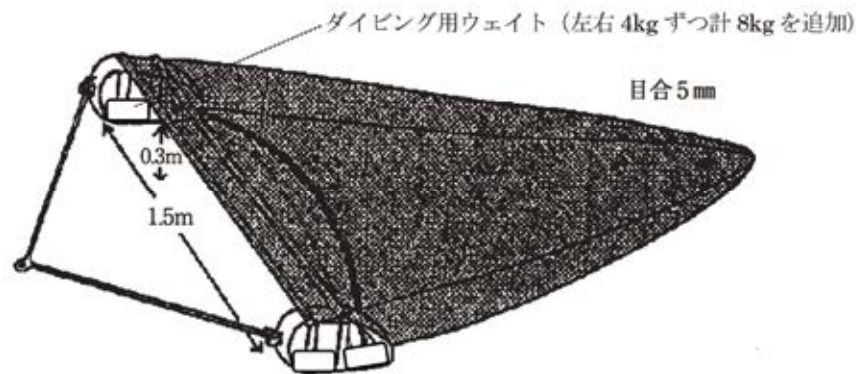


図 2-2-3. 改良西海区水研Ⅲ型ソリネット

4) 生物群集組成の多変量解析

ソリネット調査および採泥によって得られた底生生物群集のデータを用いて、地点間で群集の組成が相対的にどのように異なるのかを見るために、群集組成の多変量解析を行なった。小サンプルによる偏りを防ぐため、サンプル当たりの総個体数が 2 以下のサンプルは解析から除外したため、ソリネットでは全体として 280 サンプル 176 分類群による群集データとなった。採泥器では、さらに群体性の底生生物やヤドカリ類など欠測値のある分類群を除外し、282 サンプル 109 分類群の群集データを解析に用いた。

解析には、2018 年より得られた月別地点別の底生生物サンプルの中から、冬季（1～3 月）および夏季（7～9 月）に得られたサンプルを抽出した。それらの種類別の個体数を $\log(x+1)$ 変換したのち、サンプル間の種類組成の類似度を Bray-Curtis 指数によって求め、非線形多次元尺度法（nMDS）によってサンプルの二次元配置図を描画した。これによって、配置図上で、種類組成が近似しているサンプル同士が近い距離に、組成の似ていないサンプル同士は遠い距離に配置される。さらに、これらの群集組成と環境変数との関係を見るために、冗長性分析（RDA）を行った。用いる説明変数は溶存酸素量（DO）、底質酸化還元電位（SORP）という溶存酸素に直接関係する変数のほか、水温（Temp）、塩分（Sal）、クロロフィル量（Chla）の計 5 変数を用いた。いずれも、調査地点の中間部分に当たる五井と北袖における水深の違いを他のサンプルの中から着目することとした。解析は、採泥器とソリネットそれぞれ別々に行った。データの解析には R ver. 4.2.1 およびパッケージ vegan 2.6-4 を用いた。

5) ガザミ類のサンプリング

東京湾内におけるガザミ類（ガザミおよびタイワンガザミ）の分布および移動生態を明らかにするため、東京湾の内湾（神奈川県横浜市漁業協同組合・柴支所）と外湾（千葉県館山漁業協同組合）において、刺網漁業で漁獲されるガザミ類を定期的にサンプリングし、炭素・窒素安定同位体比を用いた移動履歴推定を実施した。

採取した試料は、外部形態を用いた種同定の後、全甲幅、甲幅の計測、湿重量の測定を行った。その後、炭素・窒素安定同位体比分析用に、鉗脚もしくは遊泳脚から筋肉試料を切り出した。切り出した筋肉試料は、真空凍結乾燥した後、クロロフォルム・メタノール混合液およびメタノールを用いた脱脂処理を施した。0.8 mg を目安に錫箔に詰めた試料を、elementar 社製の

vario microcube（元素分析計）と IsoPrime 100（質量分析計）の連結システムにかけ、C/N 比（重量）および炭素・窒素安定同位体比を求めた。

（３）結果および考察

環境調査およびソリネット調査については、2018 年 7 月から 2021 年 12 月までの 4 か年分の主な項目、①表底層の密度差（ σ_t ）、②底層 DO（mL/L）、③底層の ORP（Eh）、④底泥の ORP（Eh）、⑤多毛類の分布密度（個体数+1/m²：対数目盛）、⑥ソリネット採集生物の分布密度（個体数+1/100m²：対数目盛）の推移を海域ごとに報告する。2022 年のソリネット採集生物は表 2-2-3 に示した。

1）養老川河口

養老川河口における調査点別月変化を図 2-2-4 に示した。

① 表底層の密度差

表底層の密度差は、3 地点とも夏季に増加した。

② 底層 DO

底層 DO は夏季に低下した。5 m、10 m は 7 月後半に一時的に回復したが、15 m は夏季を通して 2 mL/L 以下で推移した。

③ 底層 ORP

底層 ORP は、2022 年は 7、8 月に測定できなかったため、夏季の状況はわからない。

④ 底泥 ORP

底泥 ORP は、夏季にマイナス（還元状態）に低下した。15 m は通年マイナス傾向にあった。

⑤ 多毛類の分布密度

底泥中の多毛類の分布密度は、5 m、10 m では、分布密度に顕著な差はみられず、100 個体/m² 以上で推移した。一方、15 m では夏季に分布密度が低下した。

⑥ ソリネット採集生物の分布密度

ソリネット採集生物の分布密度は、他の海域と比べて高く、変動が大きい。水深別にみると、浅場ほど高い傾向であった。季節変化をみると、3 地点とも夏季に低下した。2022 年は 8 月 30 日に 5 m で消滅したが、8 月 22～23 日、30 日～9 月 1 日に市川航路～千葉中央航路で青潮が発生していた。

＜養老川河口のまとめ＞

養老川河口は湾奥寄りであることから貧酸素化しやすい海域であり、夏季には底層 DO が 1 mL/L 以下に低下する。底質は浅場も含めて夏季に還元状態になりやすい。生物分布は、多毛類では 10 m 以浅まで良好であったが、ソリネット採集生物では 15 m 以深で夏季に顕著な密度低下がみられた。また、5 m でも無生物状態になることもあった。この生物分布の変化は、上記の水質、底質の特徴から判断すると、底層 DO の低下が影響していると推察される。

< 養老川河口 >

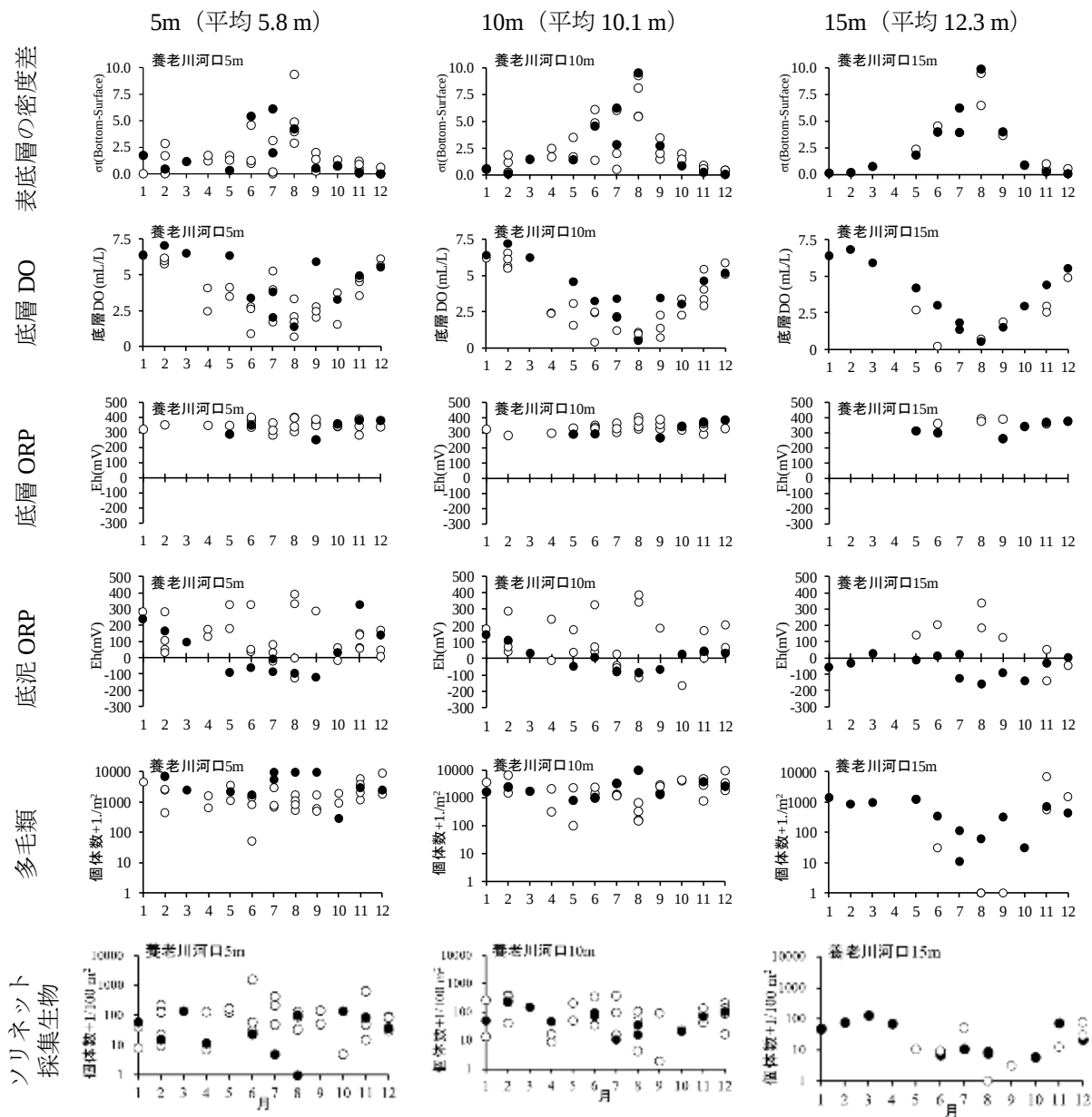


図 2-2-4. 養老川河口における月別調査点別の表底層の密度差、底層 DO、底層の ORP、底泥の ORP、多毛類の分布密度、ソリネット採集生物の分布密度の推移 (2018 年 7 月～2022 年 12 月) ○ : 2018～2021 年、● : 2022 年

2) 五井

五井における調査点別月変化を図 2-2-5 に示した。

① 表底層の密度差

表底層の密度差は、深場で高く、2 地点とも夏季に増加したが、5 m では、最大となる夏季においても 3.5 未満であった。

② 底層 DO

底層 DO は、深場で低く、2 地点とも夏季に減少した。5 m では、2.5 mL/L 以上で推移した。10 m（実水深 15 m）では、夏季に 1 mL/L 以下まで低下した。

③ 底層 ORP

底層の ORP は、2022 年は 7、8 月に測定できなかったため、夏季の状況はわからない。

④ 底泥 ORP

底泥 ORP は、深場で低かった。過去 4 年では、5 m で通年プラス傾向であった。10 m で、2021 年夏季にプラス傾向であったが、2022 年は通年マイナスであった。

⑤ 多毛類の分布密度

底泥中の多毛類の分布密度は、浅場で高く、5 m では夏季における減少はみられず、通年で 100 個体/ m² 以上であった。10 m では、2020 年までは、通年で無生物状態が続いたが、2021 年以降、春季で分布密度が増加した。夏季では無生物状態が続いた。

⑥ ソリネット採集生物の分布密度

ソリネット採集生物の分布密度は、他の海域と比べて低い。水深別にみると、夏季には浅場の方が高い傾向であった。季節変化をみると夏季に深場で低くなった。2022 年 8 月には浅場で無生物状態になり、深場では 6 月、8 月に無生物状態になった。

<五井のまとめ>

五井は養老川河口と同様に湾奥寄りであり、夏季には深場の底層 DO が 1 mL/L 以下に低下することがあり、貧酸素水塊の影響を強く受ける。底質は深場が通年で還元状態で、その期間は他海域に比べて長い。生物分布密度は、5 m では多毛類が 100 個体/m² 以上となるなど良好であったが、10 m（実水深 15 m）では夏季に無生物状態となった。この生物分布の変化は、上記の水質、底質の特徴から判断すると、底層 DO、底泥 ORP の低下が影響していると推察される。

<五井>

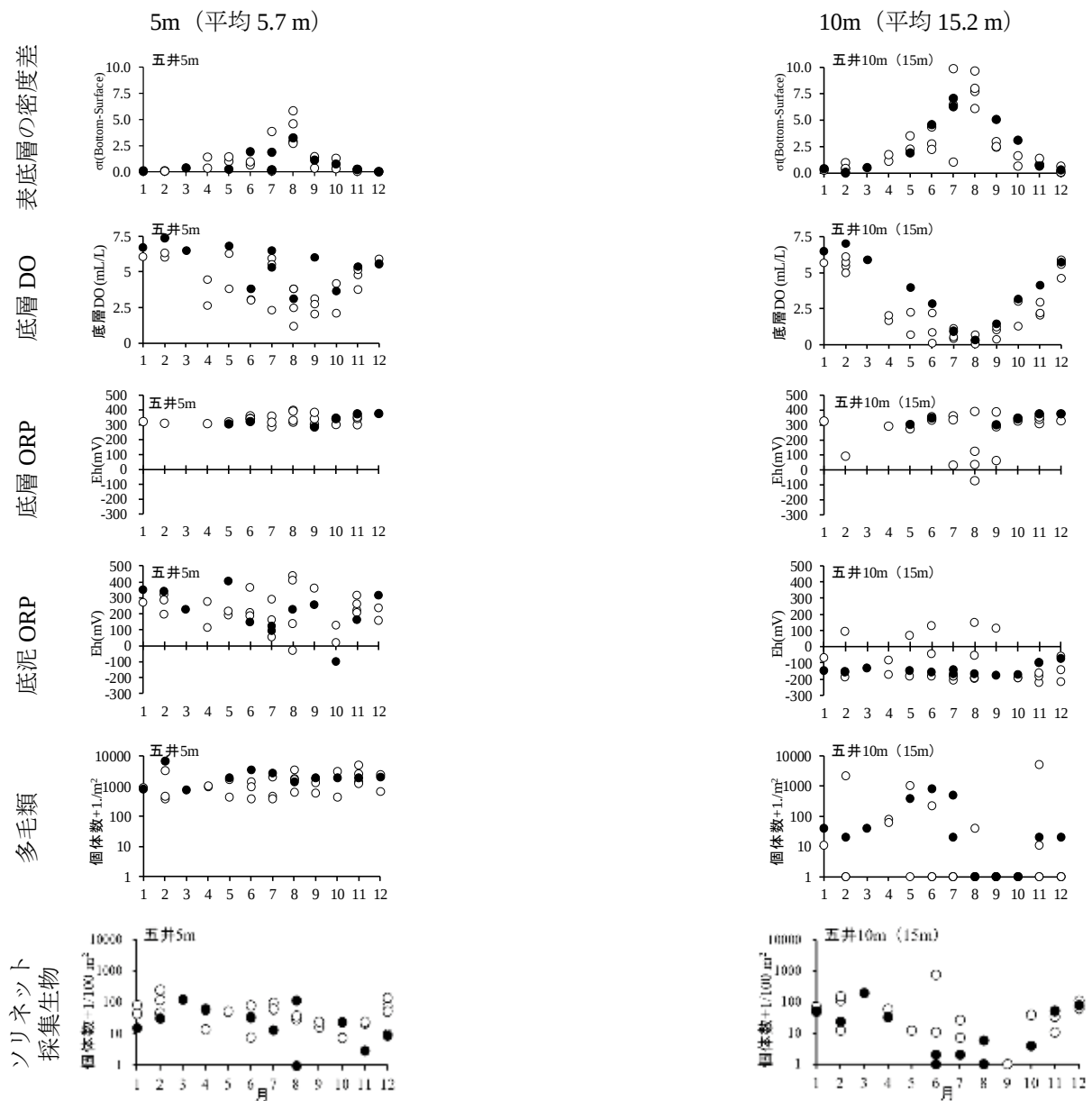


図 2-2-5. 五井における月別調査点別の表底層の密度差、底層 DO、底層の ORP、底泥の ORP、多毛類の分布密度、ソリネット採集生物の分布密度の推移 (2018 年 7 月～2022 年 12 月) ○ : 2018～2021 年、● : 2022 年

3) 北袖

北袖における調査点別月変化を図 2-2-6 に示した。

① 表底層の密度差

表底層の密度差は、2 地点で顕著な違いはみられなかった。2 地点とも夏季に増加した。

② 底層 DO

底層 DO は、2 地点で顕著な違いはみられなかったが、夏季に減少した。2 地点ともに、8 月に 1 mL/L 以下まで低下した。

③ 底層 ORP

底層 ORP は、2022 年は 7、8 月に測定できなかったため、夏季の状況はわからない。

④ 底泥 ORP

底泥 ORP は、深場で低かった。マウンド上（実水深 11 m）は 2018 年 7 月を除き通年プラスであった。マウンド下（実水深 13 m）は、2021 年では概ねプラスであったが、その他 4 年では概ねマイナスであった。

⑤ 多毛類の分布密度

底泥中の多毛類の分布密度は、浅場で高かった。マウンド上では夏季の分布密度の低下はみられず、通年で 100 個体/m² 以上であった。マウンド下では 8、9 月に分布密度が低下した。

⑥ ソリネット採集生物の分布密度

ソリネット採集生物の分布密度は、他の海域と比べて高い。水深別にみると、夏季以外は深場のマウンド下の方が高い傾向であった。季節変化をみると、2 地点とも夏季に低下した。2022 年は夏季に 2 地点とも同様に低下した。

<北袖のまとめ>

北袖は養老川河口と盤洲の中間の海域であり、夏季には底層 DO が 1 mL/L 前後になりやすい。底質は深場で還元状態になりやすく、還元状態の期間は他海域に比べて長い。生物分布密度は、マウンド上ではソリネット採集生物が南袖に次いで多く、多毛類は 100 個体/m² 以上となり、良好であった。また、無生物状態になることもなかった。マウンド下では夏季に顕著な密度低下がみられ、無生物状態となることもあった。この生物分布の変化は、上記の水質、底質の特徴から判断すると、底層 DO、底泥 ORP の低下が影響していると推察される。

<北袖>

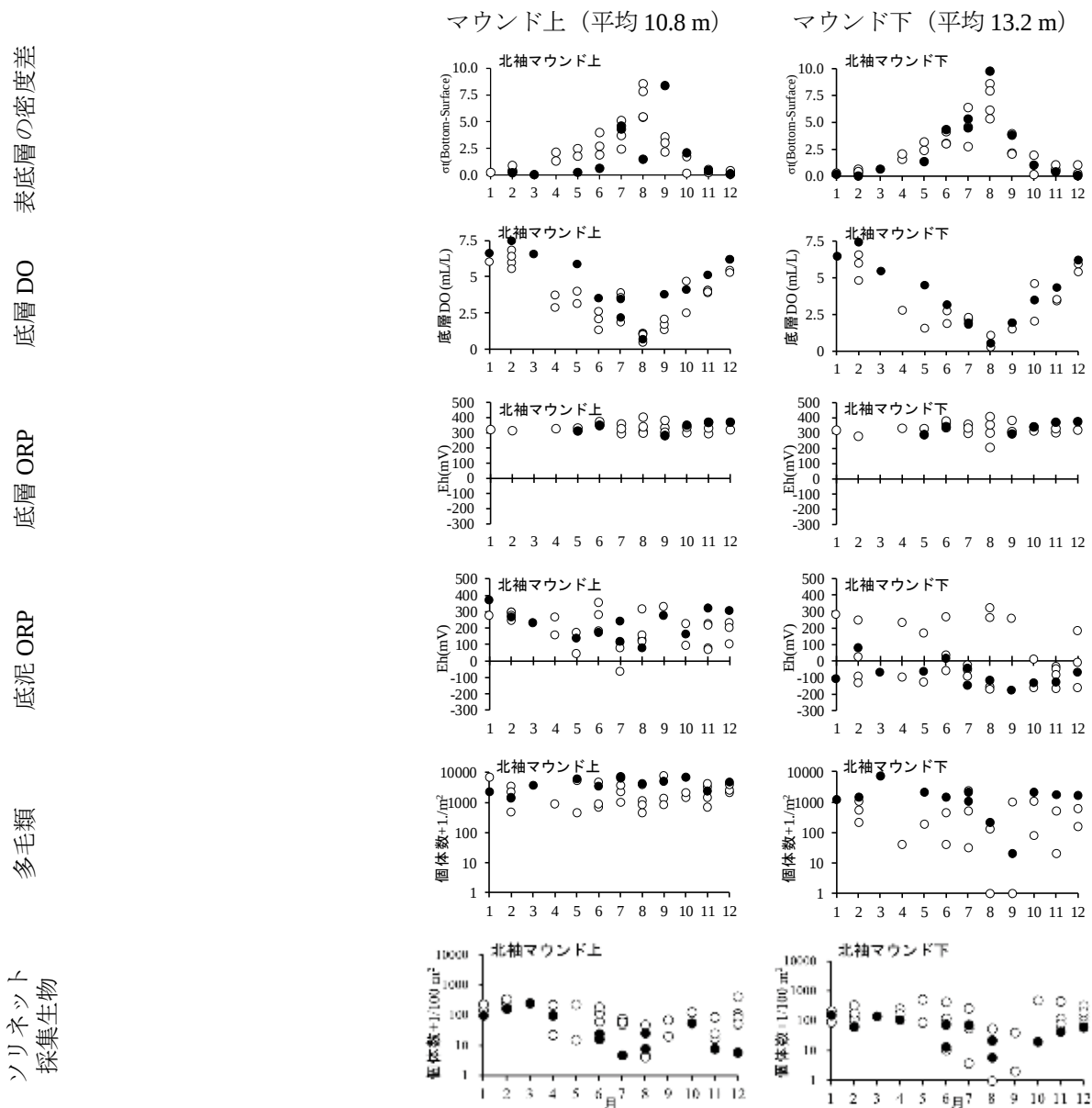


図 2-2-6. 北袖における月別調査点別の表底層の密度差、底層 DO、底層の ORP、底泥の ORP、多毛類の分布密度、ソリネット採集生物の分布密度の推移 (2018 年 7 月～2022 年 12 月) ○ : 2018～2021 年、● : 2022 年

4) 南袖

南袖における調査点別月変化を図 2-2-7 に示した。

① 表底層の密度差

表底層の密度差は、深場ほど高く、全地点で夏季に増加した。5 m では、最大となる夏季においても 5 未満であった一方で、10 m、15 m では 8 月に 7 以上に拡大した。

② 底層 DO

底層 DO は、深場ほど低く、3 地点とも夏季に減少した。5 m では、夏季においても 2 mL/L 以上であった。10 m、15 m では、8 月に 1 mL/L 以下まで低下した。

③ 底層 ORP

底層 ORP は、2022 年は 7、8 月に測定できなかったため、夏季の状況はわからない。

④ 底泥 ORP

底泥 ORP は、10 m 以浅では夏季に低下傾向がみられたが、概ねプラスであった。15 m では、2021 年で通年プラスであったが、2022 年で概ねマイナスであった。

⑤ 多毛類の分布密度

底泥中の多毛類の分布密度は、3 地点で顕著な違いはみられなかった。全地点、通年で 100 個体/m² 以上で推移した。15 m では 2021 年夏季に無生物状態がみられたが、2022 年夏季には顕著な低下は見られなかった。

⑥ ソリネット採集生物の分布密度

ソリネット採集生物の分布密度は、10 m、15 m では他の海域と比べて高い。水深別にみると、浅場の 5 m より深場の 10 m、15 m の方が高く、10 m が最も高い傾向であった。季節変化をみると、5 m、10 m では他の海域のように夏季に分布密度が低下することはなかった。2022 年は 15 m では 8 月に無生物状態になった。

<南袖のまとめ>

南袖は人工岸壁と盤洲干潟の境界の海域であり、8 月には深場の底層 DO が 1 mL/L 前後になりやすいが、北袖以北に比べて 1 mL/L 以下になる期間が短い。底質は北袖以北に比べて還元状態になりにくい。生物分布は、10 m 以浅で比較的良好であったが、15 m で夏季に多毛類、ソリネット採集物とも密度低下がみられ、無生物状態になることがあった。この生物分布の変化は、上記の水質、底質の特徴から判断すると、底層 DO の低下が影響していると推察される。

<南袖>

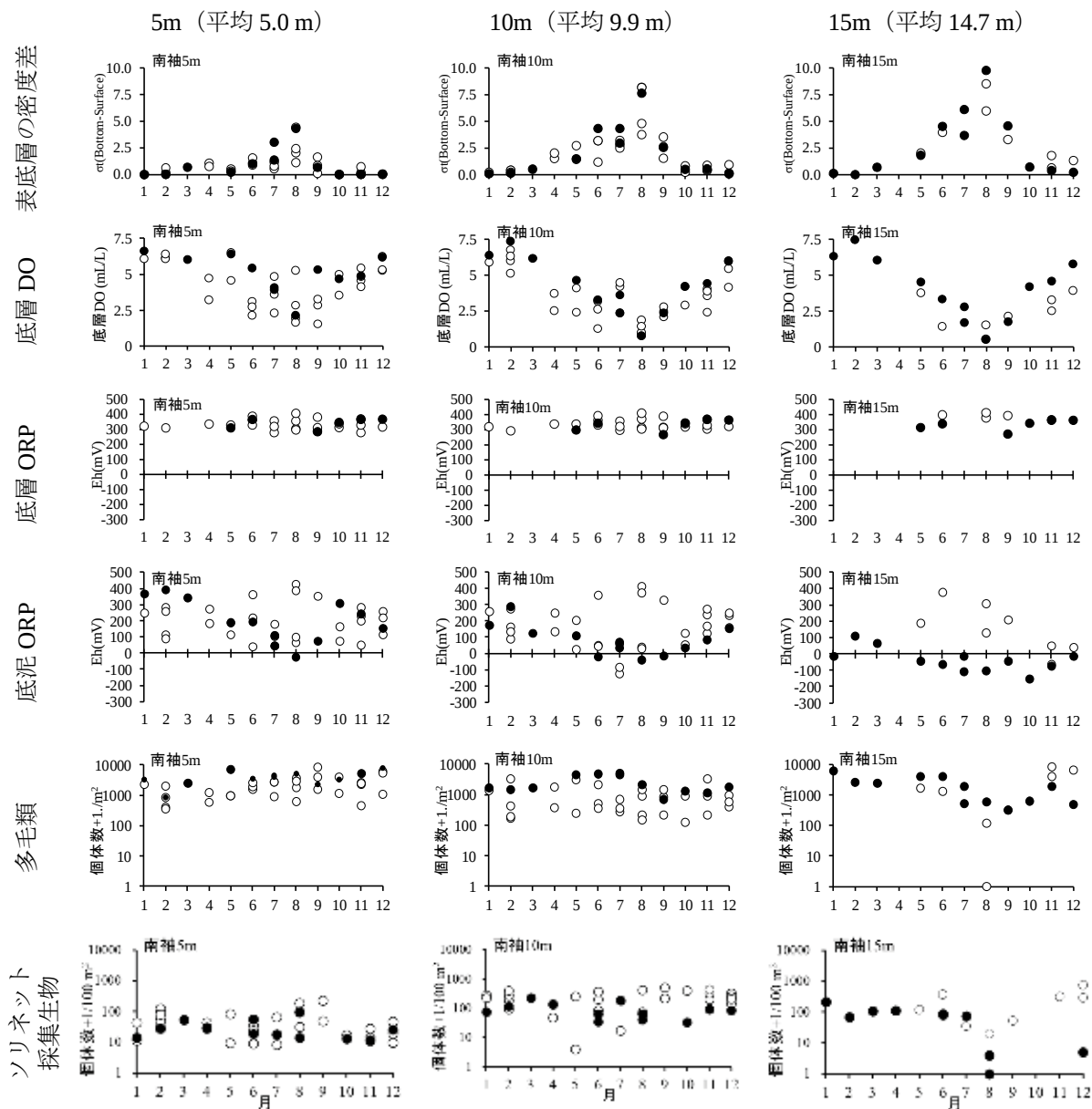


図 2-2-7. 南袖における月別調査点別の表底層の密度差、底層 DO、底層の ORP、底泥の ORP、多毛類の分布密度、ソリネット採集生物の分布密度の推移 (2018 年 7 月～2022 年 12 月) ○ : 2018～2021 年、● : 2022 年

5) 盤洲

盤洲における調査点別月変化を図 2-2-8 に示した。

① 表底層の密度差

表底層の密度差は、3 地点で顕著な違いはみられず、3 地点とも夏季に増加した。ただし、最大でも 5 未満であり、他海域に比べて小さかった。

② 底層 DO

底層 DO は、深場ほど低く、3 地点とも夏季に減少したが、他海域に比べて 2.5 mL/L 以下になることが少なかった。5 m、10 m では、夏季においても 2 mL/L 以上であった。15 m では、8 月に 1 mL/L 以下に低下した。

③ 底層 ORP

底層 ORP は、2022 年は 7、8 月に測定できなかったため、夏季の状況はわからない。

④ 底泥 ORP

底泥 ORP は、3 地点とも通年プラスであった。3 地点で顕著な差はみられなかった。

⑤ 多毛類の分布密度

底泥中の多毛類の分布密度は、3 地点とも概ね通年で 100 個体/m² 以上であった。他海域と異なり、15 m においても、夏季に顕著な低下はみられなかった。

⑥ ソリネット採集生物の分布密度

ソリネット採集生物の分布密度は、他の海域と比べて低い。水深別にみると、深場ほど高い傾向であった。2022 年は 8 月に 5 m で無生物状態になった。

<盤洲のまとめ>

盤洲は貧酸素水塊の影響の少ない内湾南部に位置する自然干潟の海域であり、夏季でも 2.5 mL/L 以下になることが少ない。底質は還元状態になりにくく、生物分布は 3 地点とも良好であった。

<盤洲>

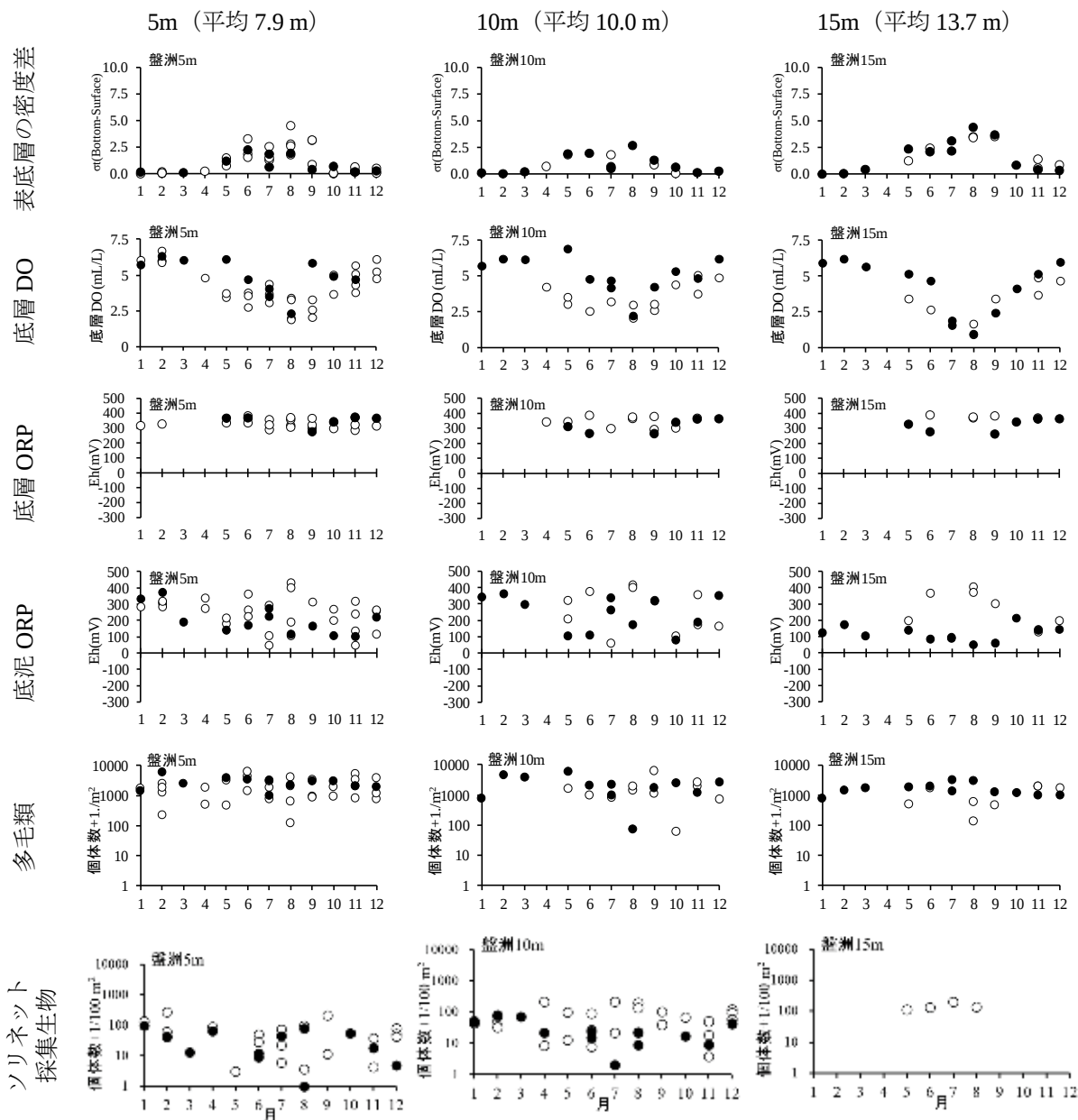


図 2-2-8. 盤洲における月別調査点別の表底層の密度差、底層 DO、底層の ORP、底泥の ORP、多毛類の分布密度、ソリネット採集生物の分布密度の推移 (2018 年 7 月～2022 年 12 月) ○ : 2018～2021 年、● : 2022 年

6) 生物の分布密度と底層 DO の関係

2018 年 7 月～2022 年 12 月の環境調査における調査点別の多毛類の分布密度（個体数+1/ m²：対数目盛）と底層 DO（mL/L）の関係を図 2-2-9 に示した。多毛類の分布密度は、水深 15 m 地点かつ底層 DO が概ね 2 mL/L 以下になると大きく低下する傾向がみられた。五井 10 m（実水深 15 m）では、底層 DO が 2 mL/L 以上でも無生物になる時があるが、多毛類は一旦消滅すると新たに着底しないと復活できないためであり、本調査点は底層 ORP がマイナスになる（無酸素化する、底層水が還元状態になる）ことが影響したと考えられる。

2018 年 10 月～2022 年 12 月のソリネット調査における調査点別の主要魚類（ハタテヌメリ、キララハゼ属の一種、ヒメハゼ）、主要甲殻類（イッカククモガニ、エビジャコ属の一種）、主要貝類（サルボウ、サルボウ属の一種、トリガイ）の分布密度（個体数+1/100 m²：対数目盛）と同月の環境調査時の底層 DO（mL/L）の関係を図 2-2-10、図 2-2-11、図 2-2-12 に示した。主要魚類の分布密度は、海域や水深に関係なく、底層 DO が概ね 2 mL/L 以下になると大きく低下する傾向がみられた。一方、主要甲殻類と主要貝類には明瞭な関係がみられなかった。

魚類は甲殻類や貝類と異なり遊泳力があるため、底層 DO の低下に伴い、貧酸素水塊の影響の少ない海域に逃避したと考えられる。大型底生生物は、底層 DO が 1 mL/L 以下の状態が 2 週間未満であれば死滅しないとの報告があるが（大畑ほか 2015）、2022 年の夏季は貧酸素水塊が長期間発生していたことから甲殻類や貝類を死滅させる状態まで底層 DO が低下した状態であったと考えられた。

<多毛類>

浅 ←—————→ 深

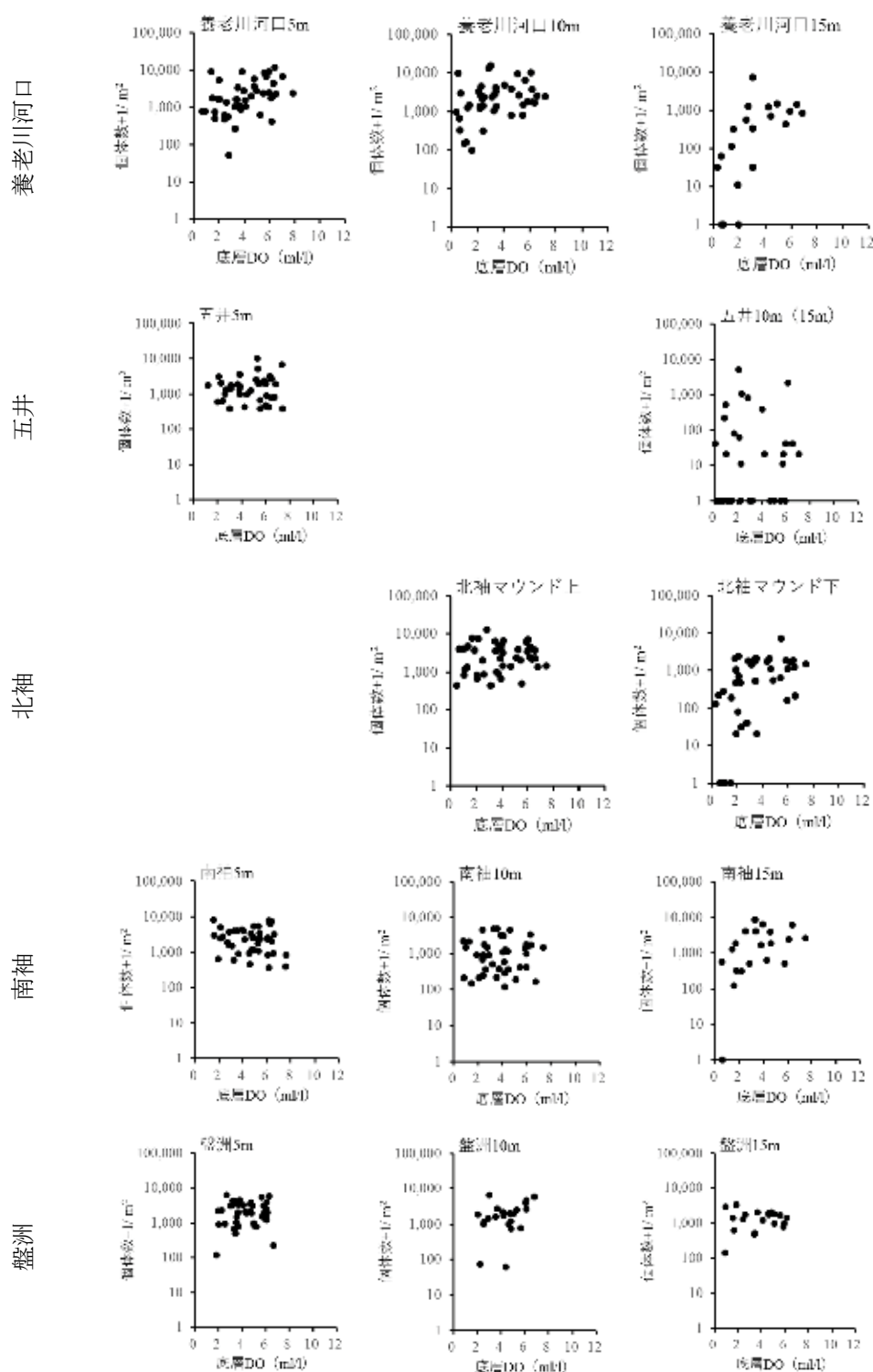


図 2-2-9. 2018 年 7 月～2022 年 12 月の環境調査における調査点別の多毛類の分布密度（個体数+1/m²）と底層 DO（mL/L）の関係

<主要魚類>

浅 ←————→ 深

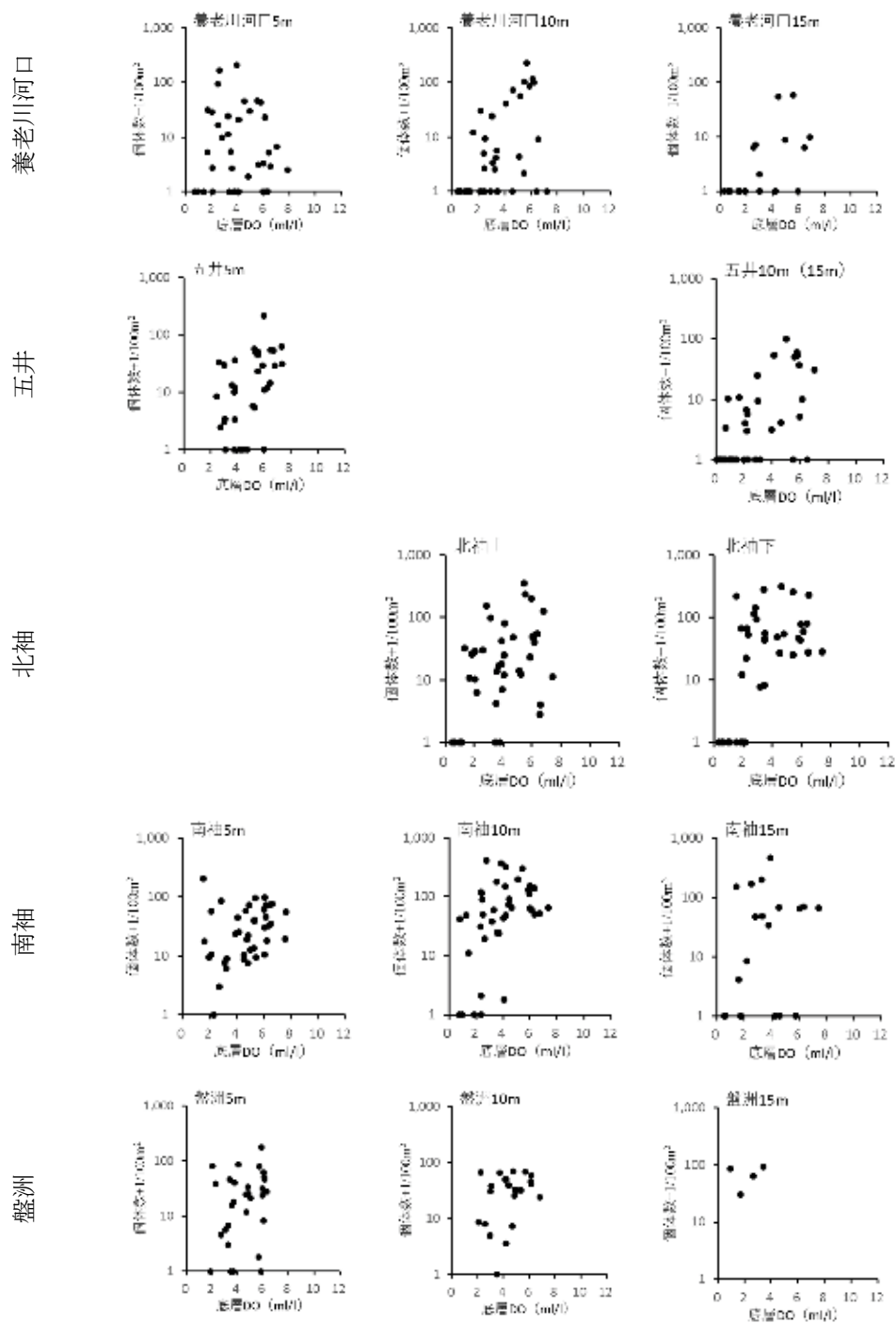


図 2-2-10. 2018 年 10 月～2022 年 12 月のソリネット調査における調査点別の主要魚類（ハタタテヌメリ、キララハゼ属の一種、ヒメハゼ）の分布密度（個体数+1/100m²）と同月の環境調査時の底層 D0 (mg/L) の関係

< 主要甲殻類 >

浅 ←—————→ 深

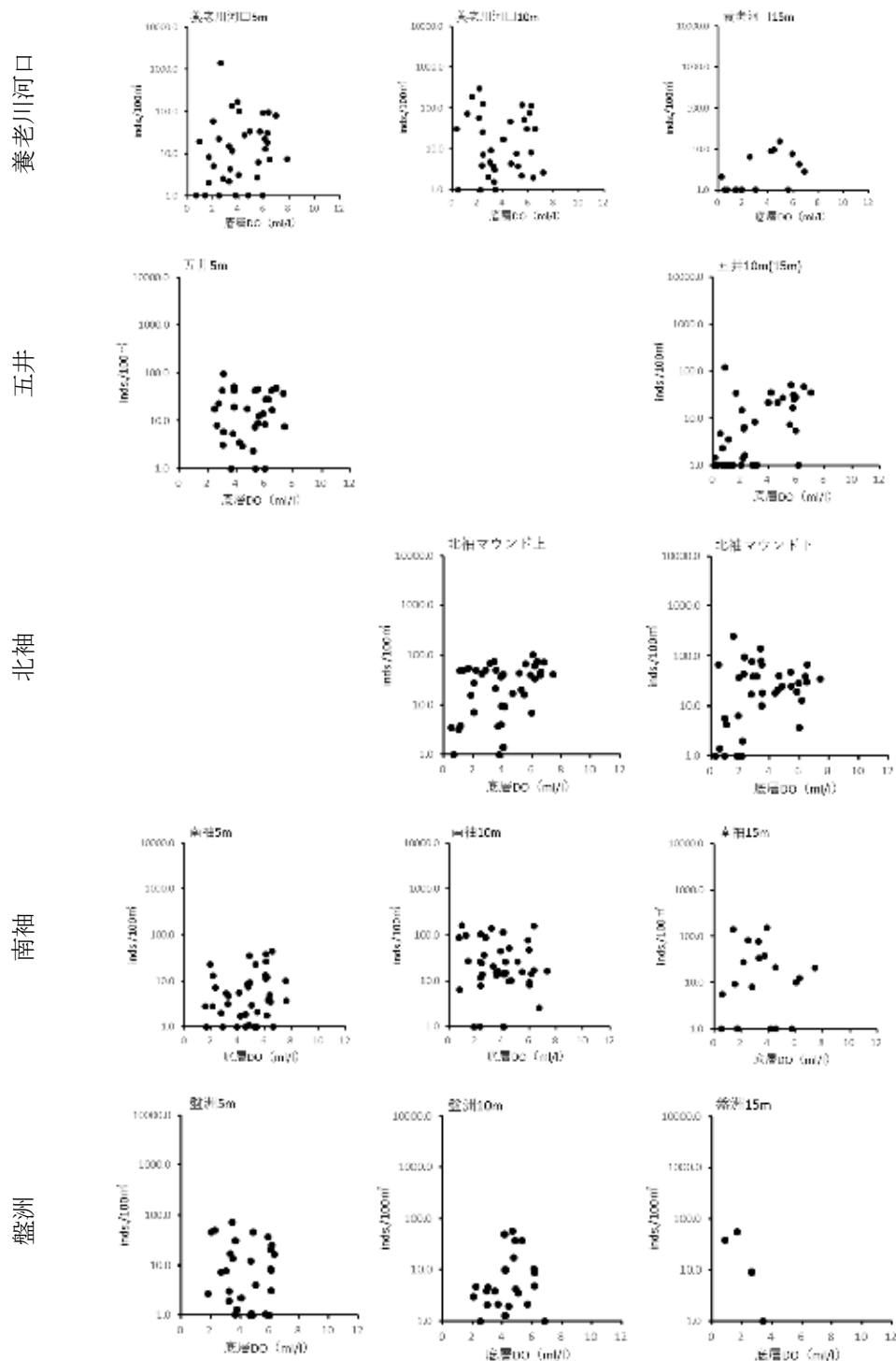


図 2-2-11. 2018 年 10 月～2022 年 12 月のソリネット調査における調査点別の主要甲殻類（イッカクモガニ、エビジャコ属の一種）の分布密度（個体数+1/100m²）と同月の環境調査時の底層 DO（mL/L）の関係

< 主要貝類 >

浅 ←—————→ 深

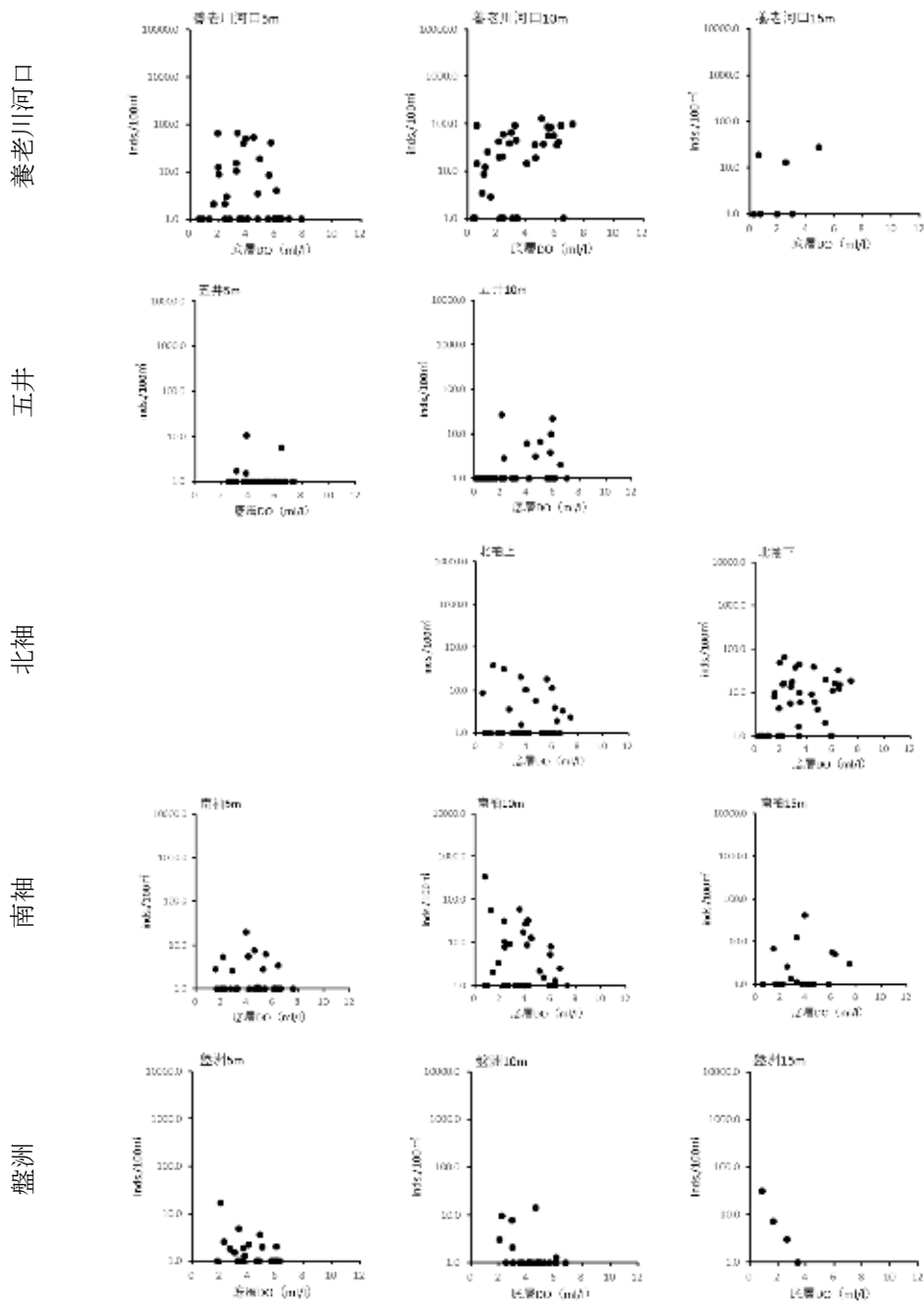


図 2-2-12. 2018 年 10 月～2022 年 12 月のソリネット調査における調査点別の
主要貝類（サルボウ、サルボウ属の一種、トリガイ）の分布密度
（個体+1/100m²）と同月の環境調査時の底層 DO（mL/L）の関係

7) 生物群集組成の多変量解析

nMDS の二次元配置の結果 (図 2-2-13)、ストレス値は冬季のソリネットの結果以外目安となる 0.2 未満であるため、ほぼ妥当な配置が得られたと考えられる。

冬季のソリネットではストレス値がわずかに 0.2 を上回るため、nMDS の配置にはやや慎重な解釈が必要であるが、冬季、夏季ともに地域および水深による群集組成の違いが有意 (PERMANOVA、 $p < 0.05$) となった。北袖および五井に着目すると、ともに図上の包摂多角形が、冬季では明らかに水深によって異なる位置にあり、夏季も北袖の重なりが大きいものの異なる位置を占めており、異なる群集組成であることがわかる。

RDA では欠測などで解析可能なサンプル数が少なくなった (図 2-2-13)。冬季は 1 軸のみ有意 ($p < 0.05$) で有意な環境変数は Sal のみであるものの、2 軸の正方向 DO と SORP という酸化的環境と関連する変数が高くなり、北袖および五井の水深による群集組成の違いが酸化的環境と関係が深いことを示している。夏季では RDA は 2 軸まで有意となり DO、Sal、Temp が有意な変数となったため、調査範囲全体に溶存酸素を含むこれらの環境変数が大きく影響していることを示唆している。五井では DO と相関の高い 1 軸の負方向に水深の高い地点が配置されており、北袖では明らかではないものの、全体的に水深・DO・群集組成の関連を示唆している。

採泥器によるサンプルでも、図上の配置は異なるものの同様の解釈が可能である。冬季は Gid21_01 は外れ値であり、地域による群集組成の違いが有意 (PERMANOVA、 $p < 0.05$) となったが、水深では有意差が認められなかった。夏季は Ksd21_07 が外れ値であるものの、地域および水深による群集組成の違いが有意であった。北袖および五井に着目すると、重なりがあるものの、図上の包摂多角形が水深によって異なる位置にあり、異なる群集組成であることを示している。

冬季の RDA では有意な軸は無いものの Chla と SORP が有意な変数となった。北袖および五井に着目すると、1 軸の負方向に酸化的で水深の浅いサンプルが配置されている。夏季には RDA は 1 軸が有意となり、変数では DO、SORP、Chla が有意であった。北袖および五井に着目すると、北袖では包摂多角形の重なりがあるものの、1 軸の正の方向が溶存酸素の増加方向であり、より水深の浅いサンプルが配置されている。

以上のことから、東京湾東岸での底生生物群集は、地点、季節による変異に富む群集組成を示し、特に貧酸素水塊からの回復期に当たる冬季と貧酸素水塊の影響が拡大する直前 (もしくは初期) の夏季における、東岸中央部の北袖と五井に着目して、溶存酸素および底質 ORP と群集組成との関連を示した。五井のような沿岸にある浅場のみならず、北袖のような沖合にあるマウンド状の浅場であっても、水深による群集組成の違いは明らかであり、水深による酸化的環境の違いがこの一因であると考えられる。

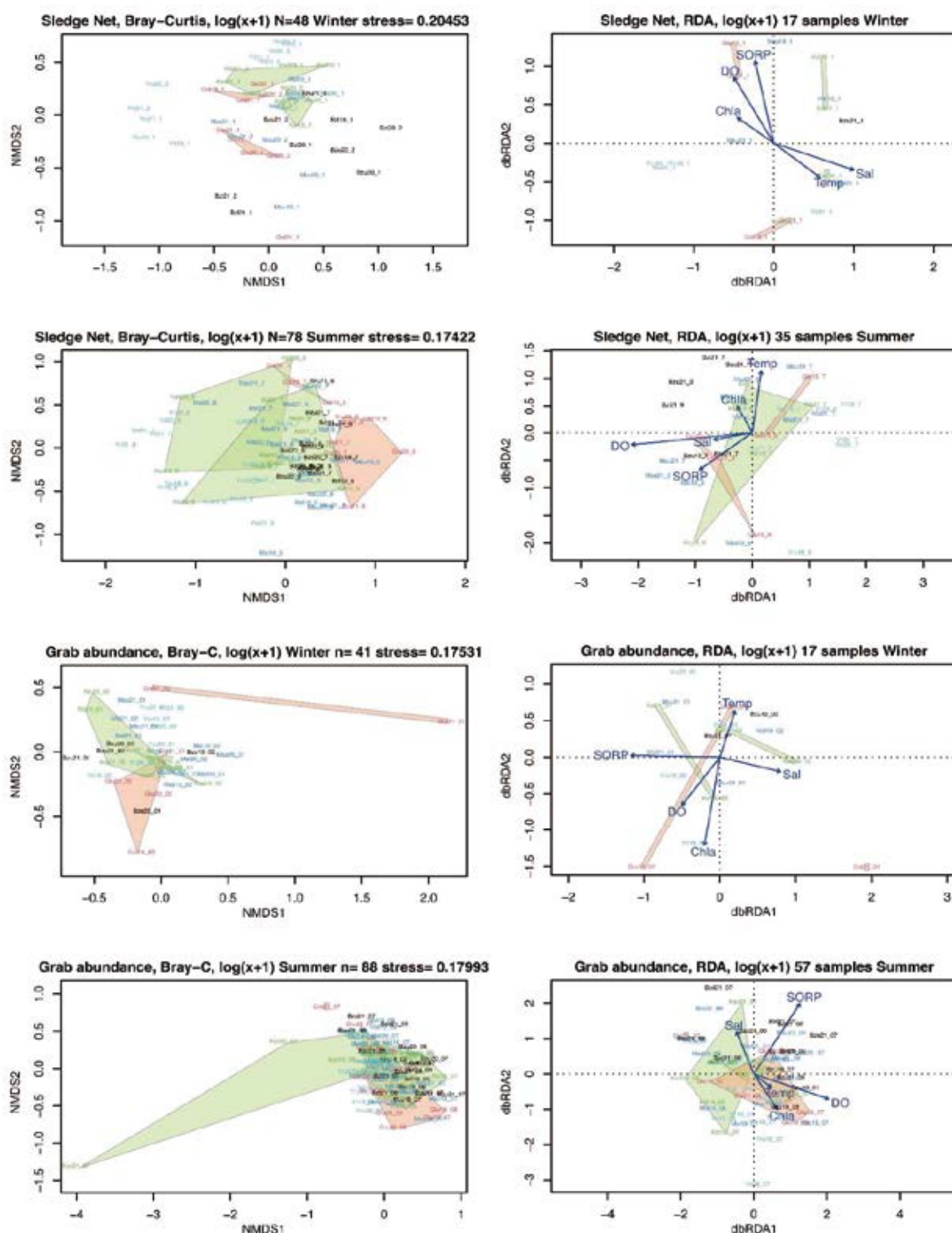


図 2-2-13. ソリネット（上半分）および採泥器（下半分）で得られた冬季と夏季の底生生物群集の nMDS による二次元配置図（右側）および RDA による 2 軸までの配置図。図中の文字はサンプルのコードで左端の 2 文字が地点（養老:Yr、五井:Gi、北袖:Ks、南袖:Ms、盤洲:Bz）、次の 1 文字が水深（5m: u、10m: l、15m: d）、次の 2 文字が調査年、アンダーバーの右側 2 文字が調査月で、色は地点ごとに異なっている。また、図中の多角形は五井（赤）および北袖（緑）のサンプルを水深別に包摂する多角形。

8) ガザミ類の移動履歴推定

東京湾では、内湾に棲息する個体と外湾に棲息する個体が、それぞれ特徴的な炭素・窒素安定同位体比を示すことが明らかになっている。そこで、この炭素・窒素安定同位体比を用いた移動履歴推定を行った結果、温帯種のガザミは東京湾を内湾から外湾にかけて広く移動するのに対して、亜熱帯種のタイワンガザミは地先への定着性が強いことが分かった（令和2年度報告書）。この移動生態の違いは、種による好適水温の違いによって説明可能である。つまり、亜熱帯種のタイワンガザミは夏季の高水温期においても、内湾の浅場を生息場として利用できる一方で、温帯種のガザミは夏季の高水温期に、低水温を求めて、内湾の深場もしくは外湾へと移動すると考えられる。

そこで、令和2年から令和4年にかけて採取したタイワンガザミの炭素・窒素安定同位体比を教師データとして、内湾で漁獲された個体と外湾で漁獲された個体を分ける線形判別関数を求めた。その結果、タイワンガザミは高い確率で、内湾にて漁獲された個体と外湾にて漁獲された個体を分けることが出来た（内湾：97.9% [183/187]、外湾：99.2% [237/239]）。外湾で漁獲されたガザミの炭素・窒素安定同位体比をテストデータとしてこの関数に当てはめることで、内湾の特徴を持つ個体と外湾の特徴を持つ個体との判別を行い、月ごとにそれぞれの割合を算出した（図2-2-14）。

その結果、内湾由来（内湾から移動してきた）の個体が占める割合が、年によって大きく変動することが明らかになった。具体的には、2020年には、内湾由来の個体が半数近くを占めていたが、2021年には、内湾由来の個体はほとんど漁獲されなかった。先述した、種による好適水温の違いに着目し、貧酸素水塊の拡大する7月の底層水温（千葉県：東京湾海況情報）および貧酸素水塊の規模（千葉県：貧酸素水塊速報）を、2020年から2022年の間で比較した。その結果、2021&2022年には、底層水温が上がる前に、貧酸素水塊の規模が拡大したことを確認した。こうした条件下では、ガザミが低水温帯を求めて外湾へと移動する前に、内湾域で貧酸素水塊が発達することで、内湾域に生息していたガザミが死滅したと考えられる。つまり、ガザミの生残のためには、貧酸素水塊の発達の前に、東京湾内湾域の水温が上昇し、ガザミが外湾へと移動する必要がある。

この研究結果は、東京湾において、貧酸素水塊が温暖化による魚種交代を促進するメカニズムについての仮説を提唱するものであり、今後、長期のデータを積み上げて行くことで、この仮説を検証していく必要がある。

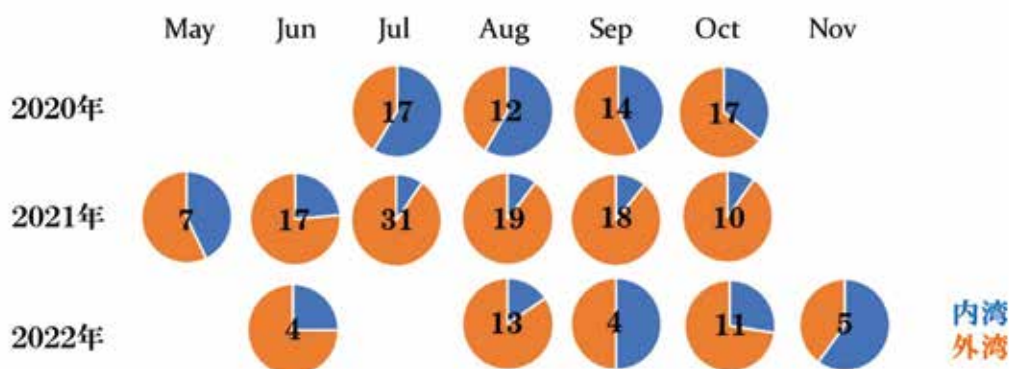


図2-2-14. 外湾で採取したガザミの月別の炭素・窒素安定同位体比

3. 5年間のまとめ

(1) 各地点の5年間まとめ

1) 養老川河口

養老川河口は湾奥寄りに位置する海域であり、夏季に底層 DO が 1 mL/L 以下になりやすい。底質は浅場も含めて夏季に還元状態になりやすい。生物分布は、多毛類では 10 m 以浅まで良好であったが、ソリネット採集生物では 15 m 以深で夏季に顕著な密度低下がみられた。また、5 m でも無生物状態になることもあった。

2) 五井

五井は養老川河口と同様に湾奥寄りであり、夏季には深場の底層 DO が 1 mL/L 以下になりやすく、底層 ORP がマイナスになることも観察されることから、貧酸素水塊の影響が強い。底質は深場が通年で還元状態になりやすく、還元状態の期間は他海域に比べて長い。生物分布密度は、5 m では多毛類が 100 個体/m² 以上となるなど良好であったが、10 m（実水深 15 m）では夏季に無生物状態となった。

3) 北袖

北袖は養老川河口と盤洲の中間の海域であり、夏季には底層 DO が 1 mL/L 前後になりやすい。底質は深場で還元状態になりやすく、還元状態の期間は他海域に比べて長い。生物分布密度は、マウンド上ではソリネット採集生物が南袖に次いで多く、多毛類は 100 個体/m² 以上となり、良好であった。また、無生物状態になることもなかった。マウンド下では夏季に顕著な密度低下がみられ、無生物状態となることもあった。

4) 南袖

南袖は人工岸壁と盤洲干潟の境界の海域であり、8 月には深場の底層 DO が 1 mL/L 前後になりやすいが、北袖以北に比べて 1 mL/L 以下になる期間が短い。底質は北袖以北に比べて還元状態になりにくい。生物分布は、10 m 以浅で比較的良好であったが、15 m で夏季に多毛類、ソリネット採集物とも密度低下がみられ、無生物状態になることがあった。

5) 盤洲

盤洲は貧酸素水塊の影響の少ない内湾南部に位置する自然干潟の海域であり、夏季でも 2.5 mL/L 以下になることが少ない。底質は還元状態になりやすく、生物分布は 3 地点とも良好であった。他の海域の環境改善を検討する際に参考となる海域である。

(2) 全地点まとめ

湾奥寄りの養老川河口、五井、北袖マウンドでは、深場ほど長く、強く貧酸素化する傾向にあり、夏季には浅場の方が生物の分布密度が高い傾向がみられた。10 m 以浅では無生物状態になりやすいが、15 m では夏季を中心に無生物状態になる年もみられた。南袖以南では、北袖以北に比べて貧酸素の影響が短く軽微で、夏季に深場でも無

生物状態になりにくい傾向がみられた。多毛類および主要魚類（ハタテヌメリ、キラハゼ属の一種、ヒメハゼ）は、底層 DO が概ね 2 mL/L 以下になると分布密度が低下する傾向がみられた。

（３）貧酸素水塊による影響軽減策の検討

近年、東京湾でも海水の栄養塩が低下し、生物生産に影響する貧栄養化が懸念されるようになったことから、陸域からの負荷量の削減についてもやや見直される可能性がある。一方、貧酸素水塊の規模は、近年縮小傾向にあるが、依然として大きく、貧栄養塩の問題を考えると、短期間での貧酸素水塊の解消は望めない。そのため、貧酸素水塊対策としては、局所的にでも貧酸素化しない海域を造成し、底生生物が消滅させない工夫が必要である。

底層 DO を 2 mL/L 以上に保つ環境を整備することで、生物の生息量を増やせる可能性がある。内湾北部の養老川河口～南袖の深場において、浅場造成やマウンド造成を行うことで貧酸素水塊による影響が軽減され、生物の生息量を増やせる可能性がある。

参考文献

大畑聡・赤羽祥明・小宮朋之・児玉圭太・李政勲・堀口敏宏（2015）：東京湾北部海域において底層 DO の減少が大型底生生物の生息に及ぼす影響．千葉県水産総合研究センター研究報告，9，27-34.

表 2-2-3. ソリネット調査で採集された試料生物の個体数 (2022 年)

[illegible]

2) 貧酸素水塊による被害軽減技術の開発

イ. 東京湾で発生する貧酸素水塊の被害軽減技術の開発

②浅海域の貧酸素化に対する水産有用種の生存技術の開発

神奈川県水産技術センター栽培推進部

木下淳司、岡部 久

国立研究開発法人水産研究・教育機構

西本篤史

1. 全体計画

(1) 目的

東京湾南西部海域（神奈川県沿岸）において、貧酸素水塊の波及状態と、近年漁獲量が減少しているトリガイ等の有用二枚貝の分布から、貧酸素環境がトリガイ資源に与える影響を明らかにする。また、資源の有効利用を図るため、貧酸素水塊による影響の軽減策を検討する。

(2) 試験等の方法

東京湾南西部海域（神奈川県沿岸）のトリガイ等分布海域においてトリガイ等分布及び環境調査を実施し、貝の分布と漁場環境との関係を解析することで貧酸素水塊による影響の軽減策を検討する。

2. 令和4年度計画および結果

(1) 目的

東京湾で夏季に発生する貧酸素水塊は、生物の生息や再生産に大きな影響を及ぼすが、平成30年度から令和2年度にかけて本事業で我々が行った調査の結果から、特に貝類など移動性に乏しい生物への影響は大きく、中でも嫌氣的代謝機構を持たないトリガイは、夏場に数日間継続する無酸素状態に耐えることができず、へい死する可能性が高いと考えられた。本種は貧酸素水塊が解消した秋以降に稚貝が加入するが、次の夏までしか生きられないため、トリガイが漁獲対象として価値が高まるサイズまで育つことができない。そこで令和3年度および4年度は、夏場に大きく減耗するトリガイ資源の有効利用を図るため小型のトリガイの垂下養殖試験を実施し、水域環境、生残率及び成長速度等から本種の養殖の可能性について検討する。

(2) 試験等の方法

1) 試験海域

①水質調査

トリガイの餌が豊富と推測される東京湾の6調査地点（図2-2-15の●）で実施した。

②垂下養殖試験

貧酸素水塊の影響が小さいと推測される横須賀市新安浦港（図2-2-15の●）で実施した。