

地方公共団体環境研究機関等と国立環境研究所との共同研究（Ⅱ型）

沿岸海域における新水質環境基準としての底層溶存酸素
（貧酸素水塊）と気候変動の及ぼす影響把握に関する研究

報告書

令和 2（2020）～令和 4（2022）年度

目 次

1. 研究背景と概要	1
2. 宮城県海域公共用水域の環境基準点（松島湾）における栄養塩類とCODに関連する有機物項目について	4
3. 茨城県沿岸鹿島灘における公共用水域水質測定データに基づく表層海水温とDO、CODの長期変動評価	13
4. 東京湾及び太平洋の千葉県沿岸域における水温変動解析	20
5. 東京都の運河部における水温の長期変動傾向の解析	27
6. 沿岸海域の水質データを使用した酒田港CODの水質シミュレーションと行政施策の効果検証	30
7. 新潟東港及び県北海域における鉛直分布調査の結果及びCOD等の長期変動傾向について	32
8. 新潟市沿岸海域公共用水域常時監視点における有機物指標項目及び関連する栄養塩類について	42
9. 富山県沿岸海域におけるCODと関連項目と水質の長期変動について	51
10. 石川県沿岸海域公共用水域環境基準点における栄養塩類とCODに関連する有機物項目について（第4報）	58
11. 浜名湖（細江）における底層溶存酸素量等の連続モニタリング	78
12. 大阪湾湾奥部における水温と底層溶存酸素量の関係の年代別傾向	82
13. 干潟における栄養塩類の遊離（2020～2022年度）	85
14. 徳島県沿岸海域における栄養塩類，COD関連項目の現状と傾向	87
15. 高知県内の閉鎖性海域における水質の鉛直分布と長期変動解析について	94
16. 広島湾における有機物及び栄養塩関連指標の季節変動と溶存性有機態窒素の分解特性	102
17. 博多湾における貧酸素発生状況と季節変動解析	122
18. 長崎県大村湾湾奥部における海況・水質測定及び水温の長期変動解析について	130
19. 鹿児島湾湾奥部におけるCOD関連項目，栄養塩類，多項目水質計の結果及び長期変動解析について	137
20. 資料（研究実施組織，成果発表一覧，全体会合記録）	151

研究背景と概要

1. はじめに (経緯と実施内容)

この報告書は、令和 2 (2020) 年度から令和 4 (2022) 年度に渡って実施した地方公共団体環境研究機関等と国立環境研究所との共同研究 (II 型) 「沿岸海域における新水質環境基準としての底層溶存酸素 (貧酸素水塊) と気候変動の及ぼす影響把握に関する研究」で得られた成果を取りまとめたものである。

本共同研究課題では、全国の公共用水域水質測定対象海域において、2016 年度に水質環境基準生活環境項目として設定された、底層溶存酸素量 (DO) の現場設置 (繫留) 記録計 (ロガー) による連続測定と、過去から長年蓄積されてきた公共用水域水質測定データに基づく長期変動の評価を、底層 DO の他に COD や全窒素 (TN)・全リン (TP) と一部では表層 DO、pH 等の水質環境基準生活環境項目のみならず、気候変動の影響評価の一環として水温も対象にして行ってきた。

一方、参加地方環境研究機関から検討対象項目として依然として要望の多かった、海域における COD 等の有機物指標と、瀬戸内海等のように水産資源との関係が注目されている栄養塩についても現場調査・測定を並行して行ってきた。

具体的には、平成 23~25 年度に実施してきた II 型共同研究課題の「沿岸海域環境の診断と地球温暖化の影響評価のためのモニタリング手法の提唱」、平成 26~28 年度に実施した「沿岸海域環境の物質循環現状把握と変遷解析に関する研究」、および平成 29~令和元年度に実施した「海域における水質管理に係わる栄養塩・底層溶存酸素状況把握に関する研究」において、検討対象としてきた溶存・懸濁有機炭素 (DOC・POC) やクロロフィル a (Chl a)、硝酸・亜硝酸態、アンモニア態窒素 ($\text{NO}_3\cdot\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ 、これらの総計が溶存無機態窒素 [DIN])、リン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$ =溶存無機りん [DIP]) 等の栄養塩、貧酸素水塊形成に寄与する水柱中の易分解性有機炭素を簡易評価するための海域版 BOD、それに溶存有機態窒素 (DON) の分解に伴う DIN 生成、すなわち栄養塩への変換 (回帰) 性の評価についても引き続き実施した。以上の項目は公共用水域水質測定において必ずしも測定されているとは限らないものながら、沿岸海域内湾環境中の物質循環の状態を把握するためには必要な基本的な項目である。

2. 結果概要

2.1 季節調整による水温・水質の長期トレンドの解析

前課題で一部の海域において着手した、公共用水域水質測定 (常時監視) において基本的に毎月一回 (年間 12 回) の頻度で過去 30~40 年間蓄積されてきた水温や DO、COD、TN・TP、DO 等の長期変動トレンドの評価を、本課題においては対象海域を増やして実施した。物質循環に係わる上記の水質環境基準生活環境項目は水温と同様に季節性を示すため、長期トレンドを評価するためには、元の測定データからトレンド成分と季節 (月) 成分と不規則 (ノイズ) 成分に分離する統計学的手法を適用するのが有効であると考えられ、東京湾の水温水質を対象にして適用実績のある季節調整を当共同研究課題でも用いた。

水温の長期変動トレンドは多くの海域で上昇傾向を示し、特に 1980 年代から 2000 年代初期にかけて明確に上昇傾向を示す場合が多く見られたが、その上昇程度は海域や地点毎に相当の差異が有ることが示された。鹿島灘や東京湾では過去 40 年間に 2℃以上の海水温の長期トレンドの上昇が見られるのに対し、高知県の浦ノ内湾や福岡市の博多湾、長崎県の大村湾や鹿児島県の鹿児島湾等ではその上昇程度がずっと小さく、ほとんどの場合 1℃以下であり、中には上昇傾向がほとんど示されない場合も有った。

底層 DO の長期変動トレンドは海域により異なり、漸増・低下傾向、横ばい（変動無し）と様々であったが、水温はおしなべて上昇傾向を示していたことから、底層 DO の長期変動と水温との関係は海域ごとにより異なっていた。COD に関しては多くの海域で漸増傾向を示していたのに対し、TN・TP は漸減傾向を示している場合が見られた。これらの海域は大都市に近い水質総量削減対象となっている閉鎖性海域ではないが、瀬戸内海で近年見られている栄養塩の低下が非閉鎖性海域でも示されている例だと考えられた。

2.2 底層 DO の連続観測

毎夏に底層に貧酸素水塊が発生する博多湾と浜名湖の何れも水深が 10 m にも満たない浅い箇所において 2022 (令和 4) 年に DO 連続記録計 (ロガー) を設置し、底層 DO の低下と回復する時期の把握を行った。博多湾では防波堤に設置されたロガーでの観測結果から、表層水温が 6 月に 22℃を超えた時点で底層 DO が環境基準である 4 mg/L まで低下し、8 月に最低となった後に 10 月後半にならないと 4 mg/L 以上まで回復しなかった。浜名湖では、底層 DO は潮汐と連動して短い周期で変動しており、上げ潮時に低下、下げ潮時に上昇する傾向が認められた。また重回帰分析の結果から、観測された底層 DO の日変動は底層水温、上層と下層の水温差、河川水位、降水量、風速が有意に関係していたことが示されていた。

2.3 COD 等有機炭素と栄養塩類関連項目

これまでの終了課題と同様に、当共同研究課題参加地方環境研究機関が調査対象とされている全国の公共用水域 (海域) で採水された検体について、前述のように独自の項目の測定を本共同研究課題でも引き続き行った。

COD も全有機炭素 (TOC=DOC+POC) も大部分が溶存性のものからなること、POC と Chl a との相関が見られた海域でも、懸濁態 COD (通常の COD から溶存性 [ろ過海水の] COD を差し引いたもの) は Chl a との相関は低いか見られない場合が有ったこと、閉鎖性海域では海域版 BOD (当共同研究終了課題で実施してきた 3 日法で測定) は COD や Chl a と相関が見られたが、COD や Chl a が相対的に高くない海域 (主に非閉鎖性海域) では BOD との相関は見られなかったことが、過去の課題実施時と同様に示されていた。

以上から、植物プランクトンの現存量 (Chl a、内部生産) の高い閉鎖性海域では、COD 等で示される有機炭素も BOD も易分解性の植物プランクトンのバイオマスにより主に構成されていること、逆に植物プランクトンの現存量 (Chl a、内部生産) が相対的に低い非閉鎖性海域では、COD 等で表される有機炭素は難分解性のものが占める割合が高いことが示唆された。

栄養塩類に関しては、夏季は植物プランクトン増殖による消費が活発となるため DIN・DIP は低下し、逆に冬季は植物プランクトンが減少し DIN・DIP が増加（回復）するために、通常その季節間変動（差異）は非常に大きくなる。一方、測定値が DIN・DIP よりもずっと高い DTN・DTP の夏・冬間変動（差異）は DIN・DIP のそれよりも小さく、場合によっては夏季の方が冬季より高くなる例も散見されている（植物プランクトン増殖に伴う DON の増大によるものと考えられる）。そのため DTN と DTP、もしくは未ろ過海水を対象として測定される環境基準項目である TN・TP を「栄養塩」そのものとして捉えて解釈すると、植物プランクトンの増殖（基礎生産）に必要な真の栄養塩（本来は DIN・DIP）濃度そのもののレベルと、その季節変動を誤解しかねないことが示唆された。

また、通常、DIN・DIP は DTN・DTP、TN・TP よりもずっと低い上に、特に上記のように夏季に非常に低くなるため、現状で大半の場合に $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ の定量下限値に定められている 0.01 mg/L を下回る検体値が多く見られ、現行の公共用水域水質測定ではこれらの定量的評価が出来なくなる実状が示された。

以上はこれまでの終了課題での分析結果と同様であった。

3. 今後の課題

公共用水域水質測定データに基づく長期変動トレンドの評価においては、TN・TP や表層 DO を対象にした実施例が少なかった。また近年注目されている栄養塩に関しては、公共用水域水質測定では $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ が健康項目として測定されているがそのデータの蓄積状況、補助項目としての $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ (DIP) の測定状況と測定値が良く把握・整理出来ていない上に、前述のように現状設定されている定量下限値では定量的評価が可能な検体値が十分に存在していることが期待出来ないのが現状である。

このためにも、公共用水域水質測定で確保された検体を対象とした、COD 関連有機炭素指標と共に、十分に低く設定した定量下限値のもとに栄養塩類の独自測定を行っていくことが必要である。

底層 DO の連続記録に関しても、今後、水質環境基準設定とその達成・非達成評価法を検討するためにも、博多湾や浜名湖以外の他海域にも展開してデータの蓄積に努めることが望ましいのは言うまでも無いが、海中に設置した測器に付着する生物の剥離や清掃等の保守作業と、設置に係わる漁協や海上保安部、港湾管理と土木関係の自治体の行政部署のご理解とご協力、認可手続きの把握と必要な労力確保が大きな課題である。

本共同研究課題実施期間中、中国武漢市に端を発した新型コロナウイルス感染拡大に見舞われたのにも拘らず、ご参加と課題遂行頂きました地方環境研究機関の方々全員に対しまして、厚く御礼申し上げます。

2024 年 国立研究開発法人 国立環境研究所
地域環境保全領域 牧 秀明

宮城県海域公共用水域の環境基準点（松島湾）における栄養塩類と COD に関連する有機物項目について

宮城県保健環境センター 水環境部 加藤景輔 下道翔平 牧秀明※1

※1 国立環境研究所

1. はじめに

前II型共同研究「海域における水質管理に係わる栄養塩・底層溶存酸素状況把握に関する研究」に引き続き、「沿岸海域における新水質環境基準としての底層溶存酸素（貧酸素水塊）と気候変動の及ぼす影響把握に関する研究」（令和2～4年度）に宮城県保健環境センターも参画し、県中央部松島湾の2地点において、夏季と冬季の年2回、採水を実施し、栄養塩等の構成要素の測定を行うことで季節変化と項目間の関係について検討した。

2. 調査方法

2. 1 調査地点及び時期

図1に示すとおり、松島湾において環境基準点である桂島（A 類型）及び西浜（B 類型）の2地点で、前課題報告書分の平成23年8月～令和元年12月の間に夏季と冬季の年2回、計18回に加え、令和2年度～令和4年度までの3年間にわたり計6回、水温躍層が形成される8月と循環期に入る12月に採水を行った。



図1 松島湾採水地点図

2. 2 測定項目及び分析方法

COD（化学的酸素要求量）関連項目については、採取した海水をろ過・分注し、試料水及びフィルター類は冷凍処理し国立環境研究所に送付した。

測定項目は、COD 及びその構成要素である溶存性 COD（DCOD）、溶存性有機炭素（DOC）、懸濁性有機炭素（POC）、クロロフィル-a（Chl-a）、また栄養塩類である硝酸態窒素（NO₃-N）、亜硝酸態窒素（NO₂-N）、アンモニア態窒素（NH₄-N）、磷酸態磷（PO₄-P）、溶存性無機態窒素（DIN）、溶存性全窒素（DTN）、溶存性全磷（DTP）、二酸化珪素（SiO₂）である。（COD 及び DCOD は令和元年度より測定取りやめ）

分析は、II型共同研究報告書「茨城県沿岸海域公共用水域環境基準点における栄養塩類とCOD に関連する有機物項目（第3報）と有機態窒素の分解性の東京湾との比較」（国立環境研究所）に記載された方法により、国立環境研究所が実施した。

3. 調査結果

3. 1 COD 環境基準値適合状況

図2及び図3に桂島及び西浜における平成13～30年度までのCOD 75%値を示すが、桂島はA類型の環境基準値2 mg/Lを過去18年間継続的に超過しており、西浜は東日本大震災の影響により平成23年度に基準超過を示したものの、概ねB類型の環境基準値3 mg/Lを達成している。

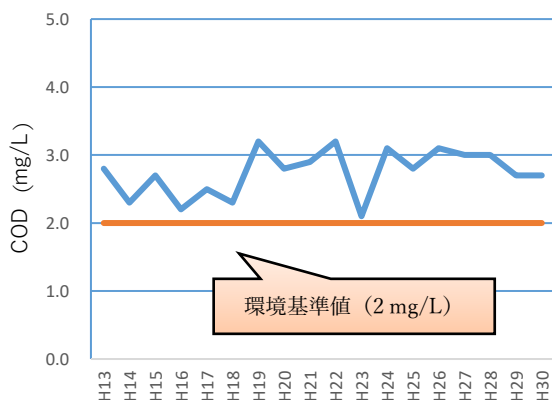


図2 桂島のCOD 75%値

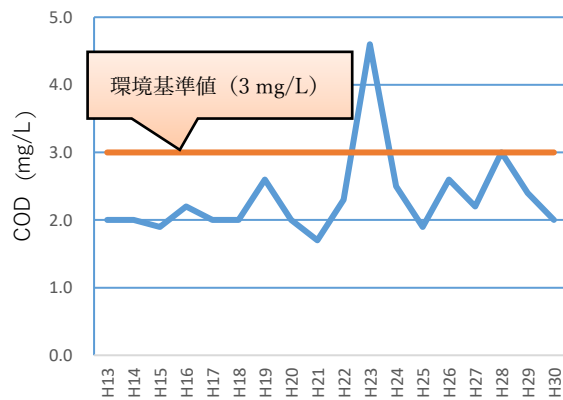


図3 西浜のCOD 75%値

3. 2 COD 構成要素調査結果

図4-1及び図4-2にCOD構成要素の調査結果を示す。桂島と西浜共に、夏季に高く冬季は低い傾向となっており、Chl-aの季節変動は西浜のほうがより顕著となっている。東日本大震災のあった平成23年8月は懸濁性COD (COD-DCOD)が高くなっていたが、その後減少傾向を示している。

それ以外のデータはCODとDCODがほぼ同程度の値となっていることや、POCに比べDOCが高いことからCODと有機炭素の成分は溶存性物質が大部分を占めているものと考えられる。

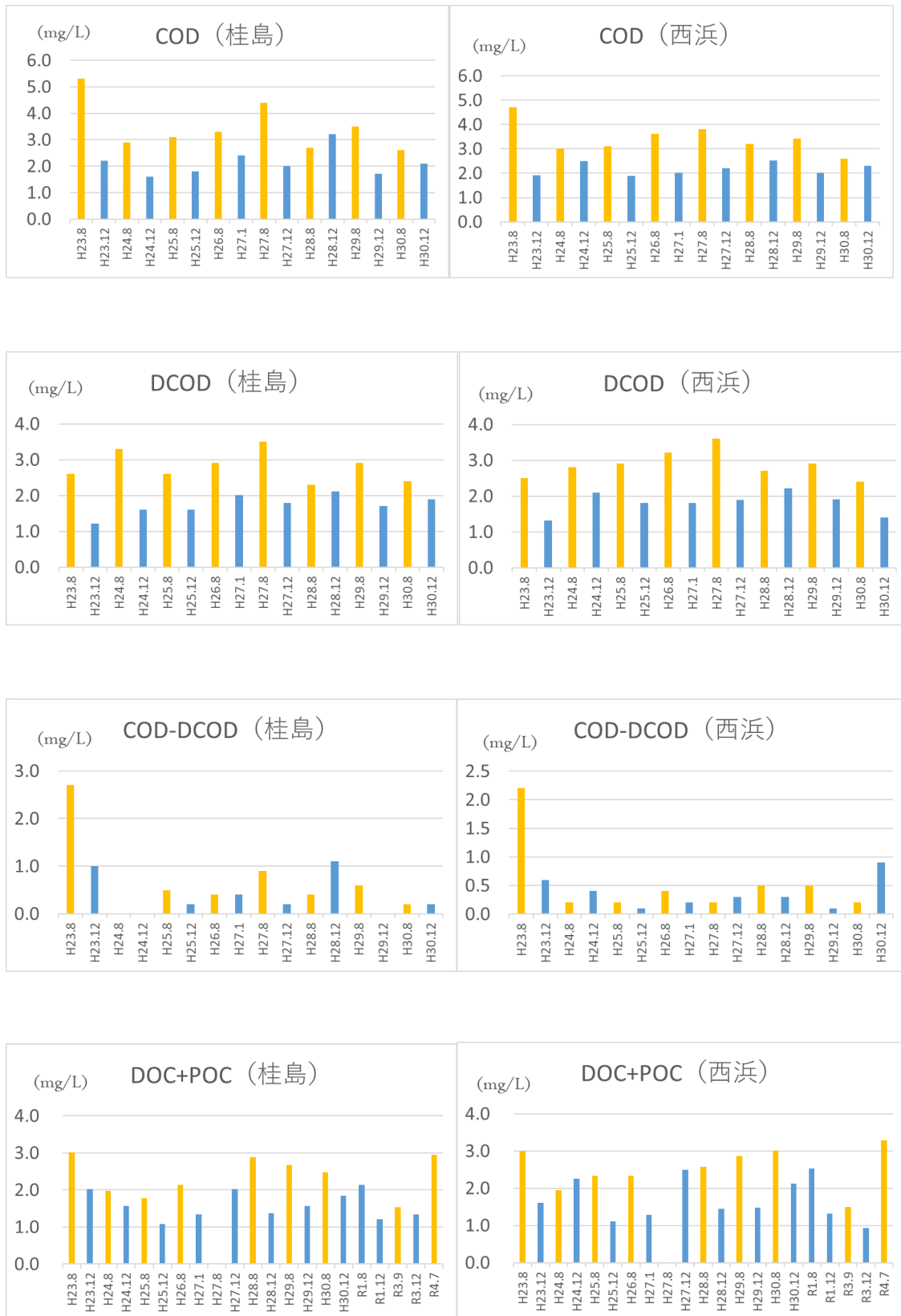
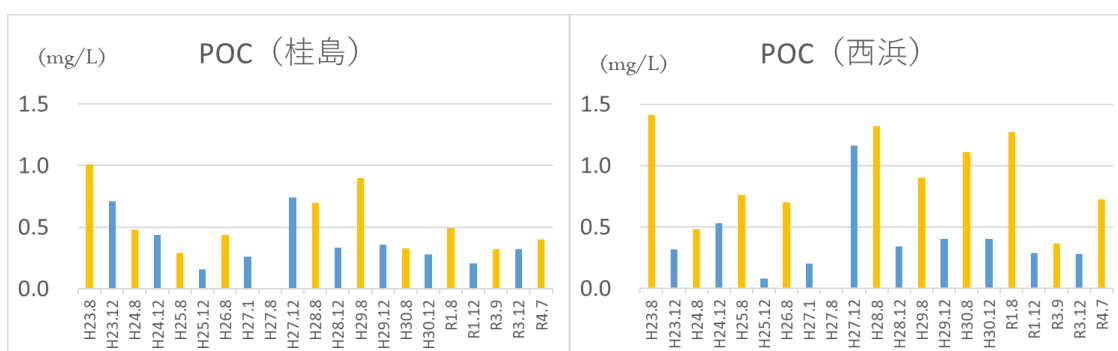
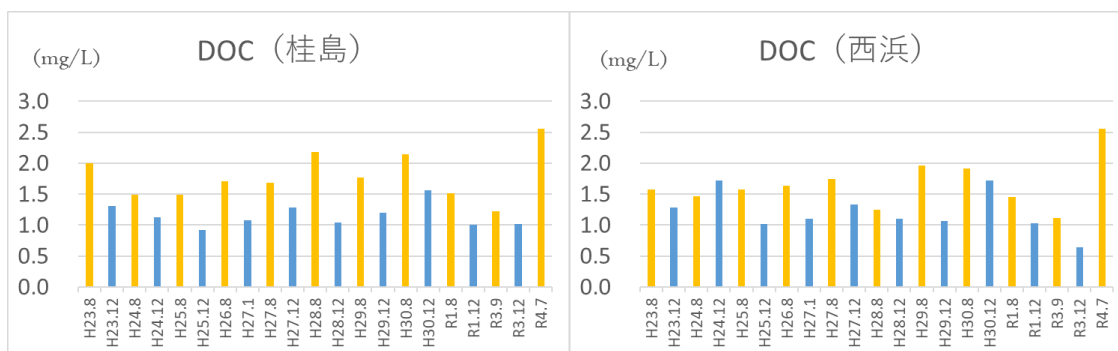
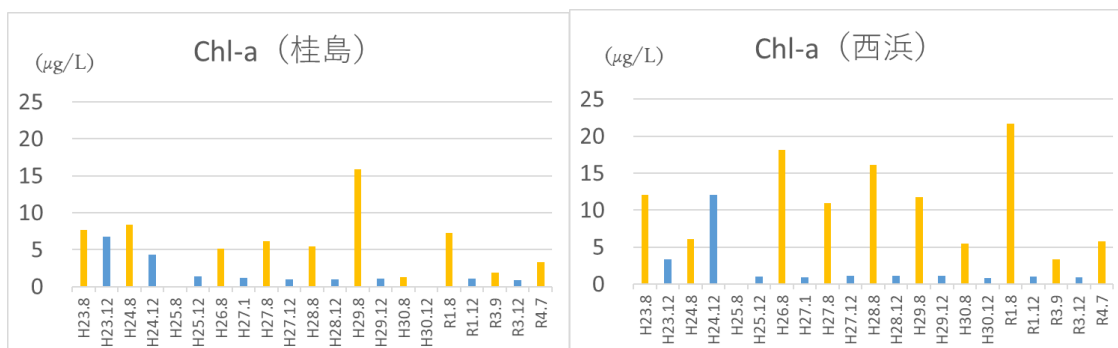


図4-1 COD構成要素調査結果



※H27.8のPOCは欠測



※H25.8のChl-aは欠測

図4-2 COD構成要素調査結果

図5に桂島と西浜におけるCOD関連項目間の関係を示す。POCとChl-aは正の相関を示しているが、懸濁性CODとChl-aの相関はそれほど強いものではなく、Chl-aは有機炭素に関与しているものと考えられる。懸濁性CODとPOCは正の相関を示し、懸濁性CODはPOCの主成分である植物プランクトンの存在量が寄与しているものと考えられる。CODと(DOC+POC)は強い正の相関を示し、有機炭素がCODの主な構成要素と考えられる。なお、桂島と西浜における差異は見られなかった。

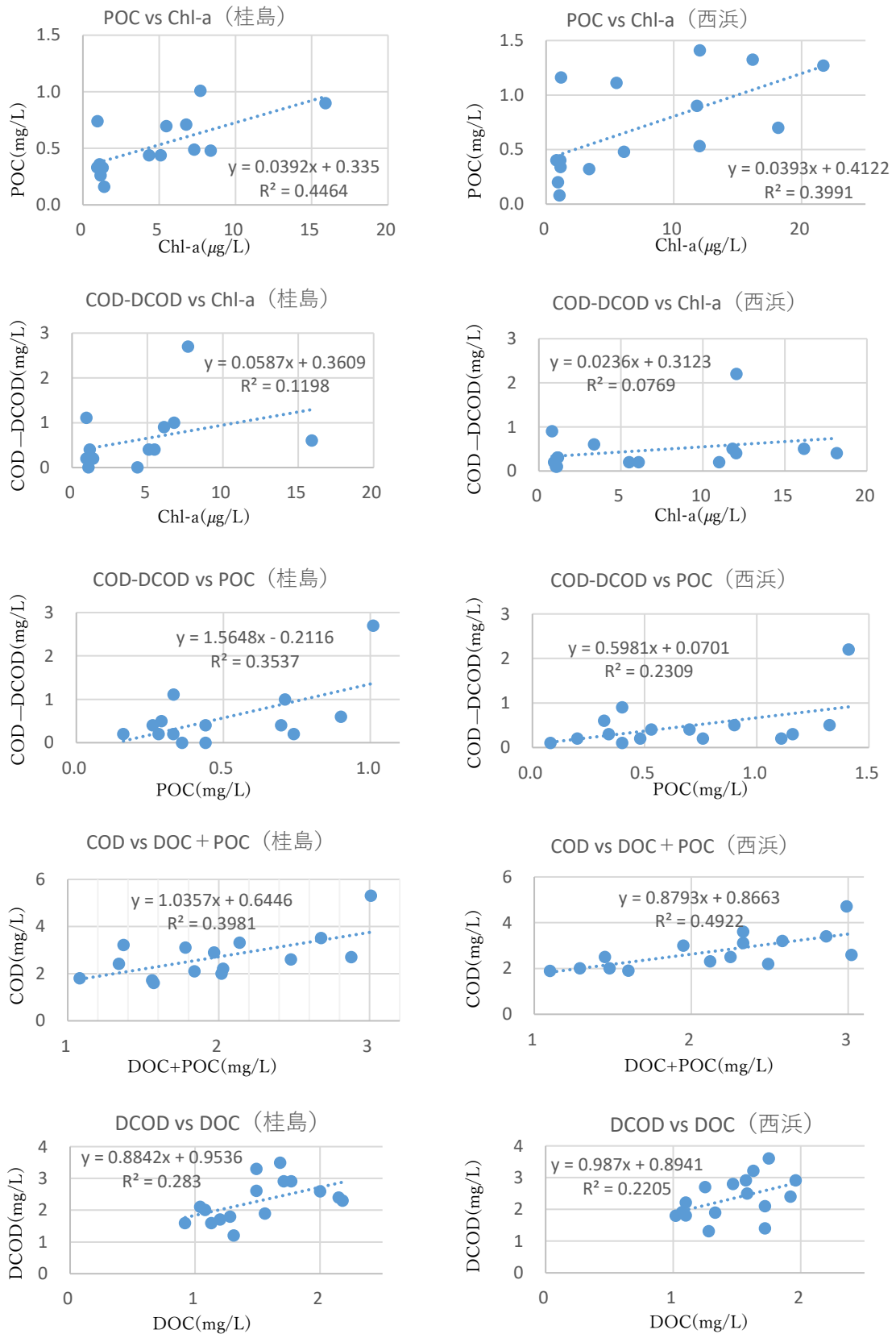


図5 桂島と西浜における COD 関連項目間の関係

3. 3 栄養塩類調査結果

図6-1から図6-3に栄養塩類調査結果を示す。桂島は季節による変動は見られないが、西浜は冬季に比較し夏季の栄養塩濃度が低い傾向にあり、夏季には植物プランクトンの生産活動により栄養塩類が取り込まれているものと考えられる。

令和2年度～4年度はコロナ禍の最中であり、松島湾沿岸部の観光業や水産業といった事業活動が相当に抑制されていた。従って事業活動に伴う排水の湾内への流入も応分に減少していたものと考えられたが、栄養塩類は例年に比べ殆ど変化が見られず、NO₃-N、NH₄-N、DINといった無機態窒素についてはむしろ上昇傾向がみられた。

上記要因としては、「工業排水の処理設備に投入される汚水の量が減少し、硝化工程で過曝気となり脱窒が不十分のまま湾内へ排水されていた」あるいは「コロナ禍での生活様式の変化により生活排水が増加した」等が思料される。

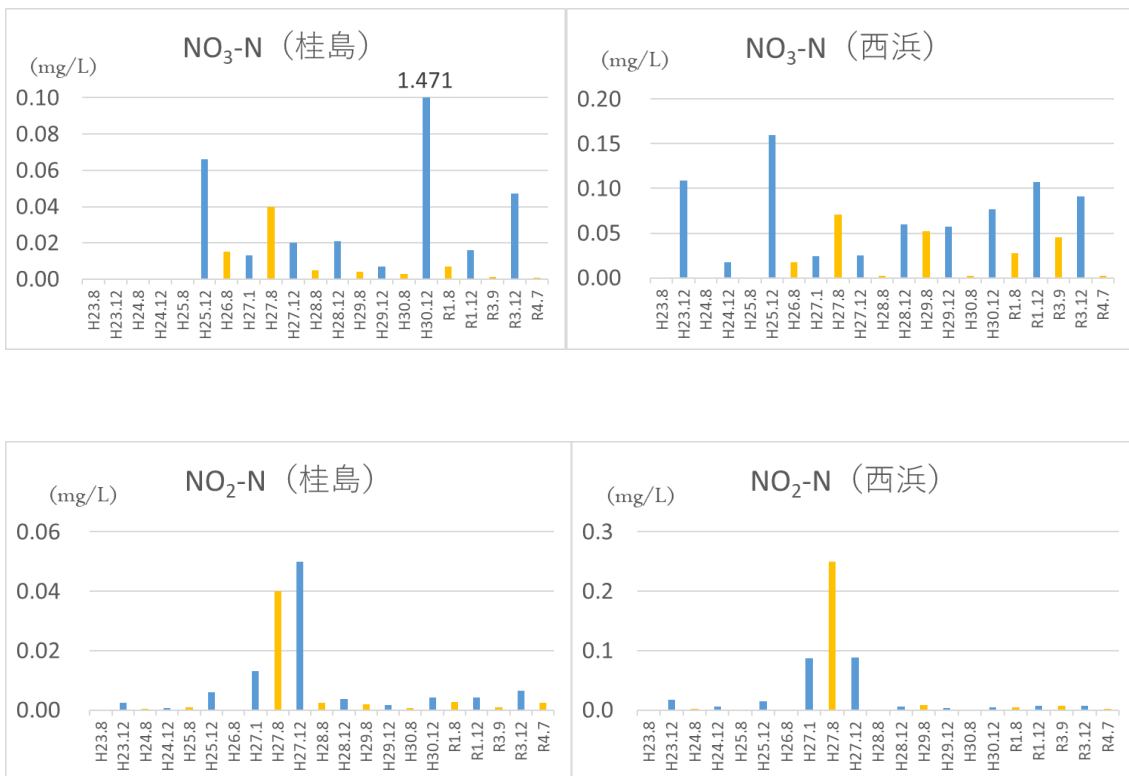


図6-1 栄養塩類調査結果

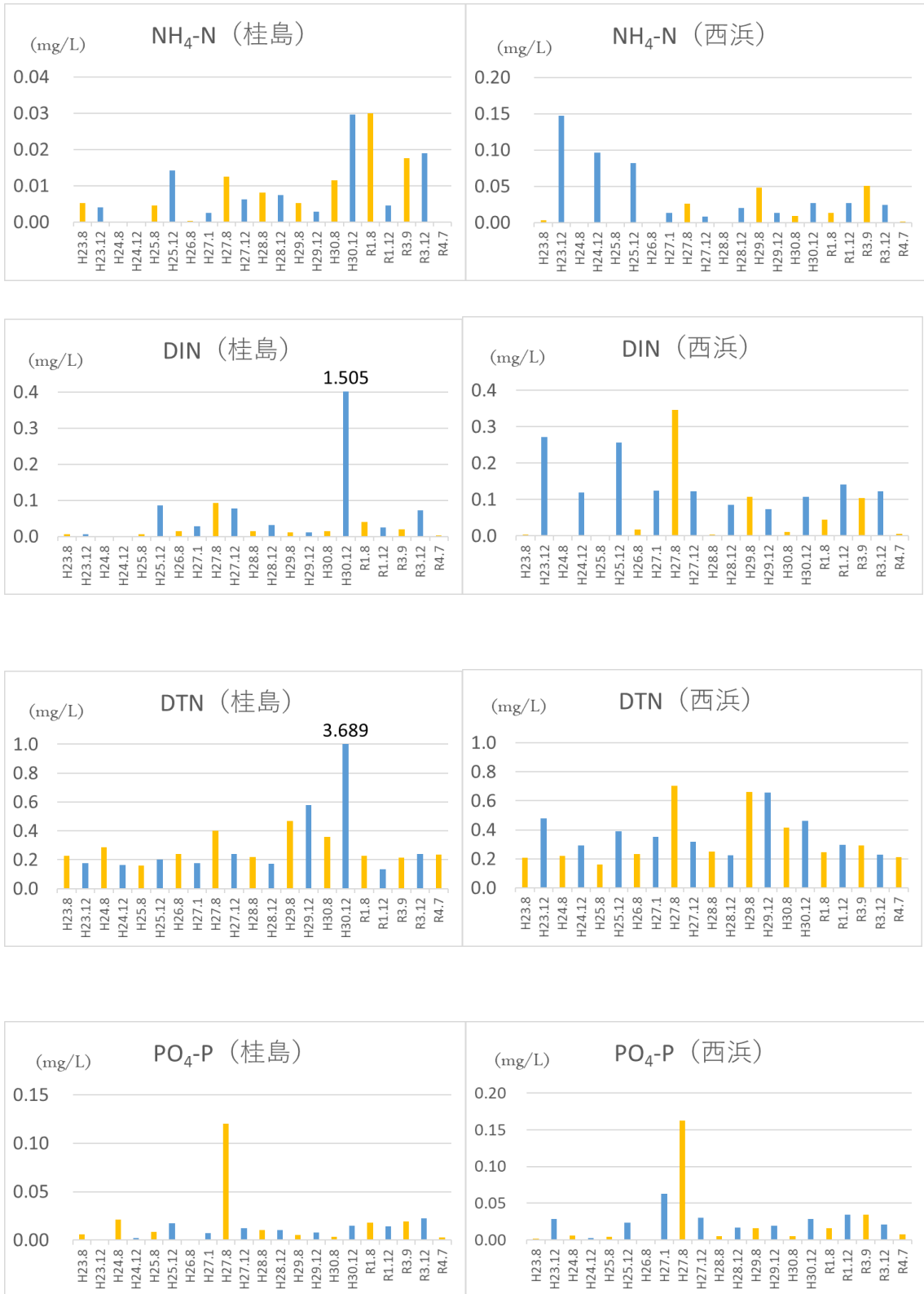


圖 6-2 栄養塩類調査結果

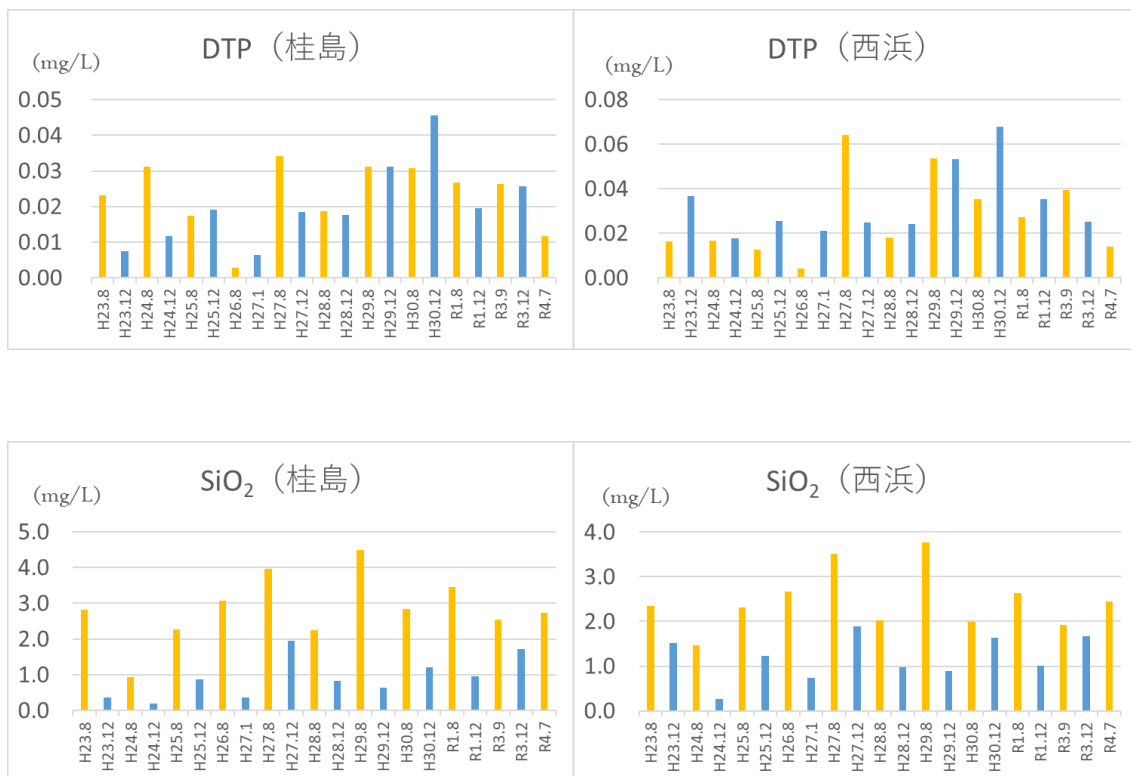


図 6 - 3 栄養塩類調査結果

4. まとめ

- ①松島湾桂島及び西浜における COD 75%値は、桂島は A 類型の環境基準値 2 mg/L を過去 18 年間継続的に超過しており、西浜は B 類型の環境基準値 3 mg/L を東日本大震災のあった平成 23 年度を除き達成している。
- ②COD 構成要素の調査結果では、Chl-a を除き桂島と西浜に際だった差異は見られず、いずれの項目も夏季に高く冬季は低い傾向となっている。
東日本大震災のあった平成 23 年 8 月は懸濁性 COD が高くなっていたが、その後減少傾向を示している。
それ以外のデータは COD と DCOD がほぼ同程度の値となっていることや、POC に比べ DOC が高いことから COD と有機炭素の成分は溶存性物質が大部分を占めているものと考えられる。
- ③COD 関連項目間の関係では、POC と Chl-a は正の相関を示しているが、懸濁性 COD と Chl-a の関係はそれほど強くなく、Chl-a は有機炭素に関与しているものと考えられる。懸濁性 COD と POC は正の相関を示し、懸濁性 COD は POC の主成分である植物プランクトンの存在量が寄与しているものと考えられる。COD と (DOC+POC)

は強い正の相関を示し、有機炭素が COD の主な構成要素と考えられる。DCOD と DOC は弱い正の相関を示している。

- ④栄養塩類調査結果では、桂島は季節による変動は見られないが、西浜は冬季に比較し夏季の栄養塩濃度が低い傾向にあり、夏季には植物プランクトンの生産活動により栄養塩類が取り込まれているものと考えられる。

本報告書は、宮城県のデータをまとめたものであり、II型共同研究参加機関が各々のデータをまとめ、国立環境研究所が全体的にとりまとめ、報告書として完成することから、全国的な傾向が把握できるものと期待される。

5. 参考文献

1) 国立環境研究所 牧秀明

II型共同研究報告書「茨城県沿岸海域公共用水域環境基準点における栄養塩類と COD に関連する有機物項目（第3報）と有機態窒素の分解性の東京湾との比較」

2) 宮城県公共用水域及び地下水の水質測定結果報告書

【平成 13～令和 2 年度】

茨城県沿岸鹿島灘における公共用水域水質測定データに基づく 表層海水温と DO、COD の長期変動評価

国立研究開発法人 国立環境研究所 牧 秀明

1. はじめに

茨城県沿岸鹿島灘周辺海域は、南側から暖水塊系の黒潮、北側から冷水塊系の親潮が流れてきており、これら表層海水温の異なる潮流が複雑に入り乱れているために、短期間で表層海水温が劇的に変化するという特徴が有る（図 1）。鹿島灘に面する鹿島港は日本最大の掘り込み港であり、茨城県で唯一の閉鎖性海域として指定されている。鹿島灘海域では、鹿島港内部も含めて 1970 年代に開始された公共用水域水質測定（常時監視）データが蓄積されており、電子化されたものが県のホームページ上で公表されている。今回、当共同研究課題では、気候変動に対応した表層海水温や水質の長期変動を評価することが実施項目の一つに挙げられており、過去の共同研究終了課題でも鹿島灘を含む、親潮と黒潮が入り組んでいる茨城県から福島県太平洋沿岸海域での表層海水温長期変動の評価は行わなかったことから、鹿島灘と鹿島港において過去 40 年間以上蓄積されてきた公共用水域測定データを用いた表層海水温の長期変動評価を行った。さらに、当共同研究課題で別途、実施項目となっている表層溶存酸素量（DO）と化学的酸素要求量（COD）についても公共用水域水質測定データを用いて長期変動を評価した。

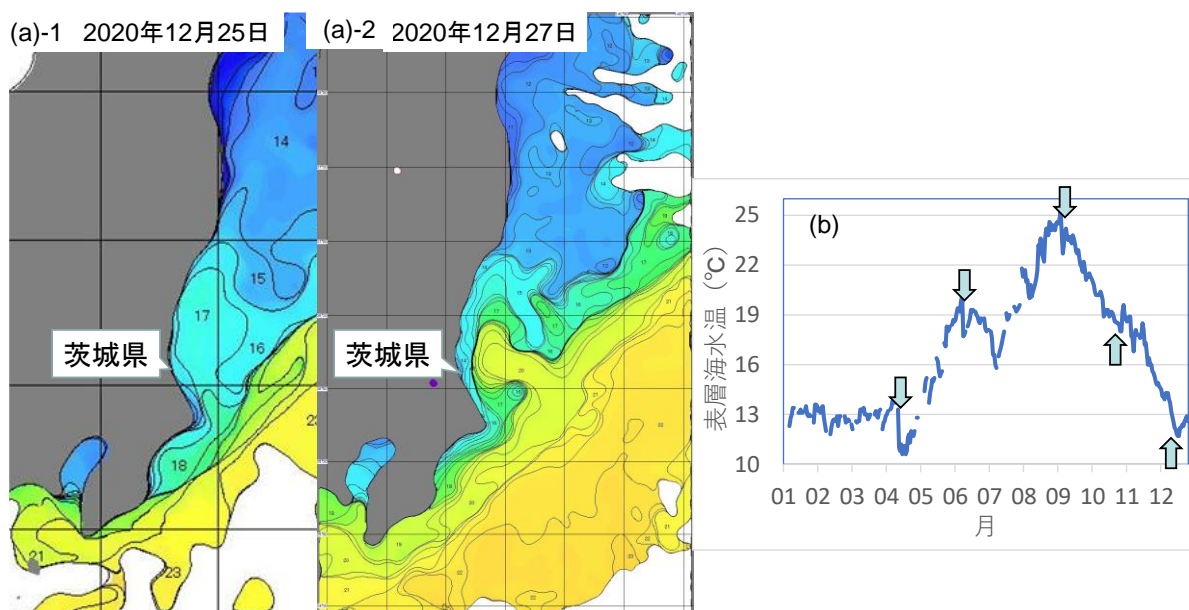


図 1 (a)-1 : 2020 年 12 月 25 日と(a)-2 : 同年 12 月 27 日における千葉県房総半島から東北地方太平洋沿岸南部海域の表面表層海水温分布（NOAA 衛星データ）、(b) 2020 年の 1 年間における那珂湊定地水温、上向き・下向き矢印を付した箇所は 1～7 日間で 1.6～3°C 表層海水温が上昇もしくはは下降が見られた時（共に茨城県水産試験場提供）

2. 使用データと時系列解析方法

2.1 使用データ（公共用水域水質測定値）

前述のように鹿島港を含む鹿島灘では 1970 年代から茨城県による公共用水域水質測定が開始されており、表 1 に示す 7 地点において現在まで測定が継続されて行われている。測定頻度は、年代と地点により不規則に変わってきており、当初は基本的に毎月（年 12 回）実施されていたのが 1980 年代に隔月（年 6 回）に変更され、一部の地点では 1980 年代と 1990 年代それぞれの終わりに毎月（年 12 回）に戻されたが、現在も一部の地点においては隔月（年 6 回）のままである。また隔月（年 6 回）の頻度で測定されていた場合、年度によって測定月が一定ではなく、偶数月と奇数月のどちらかに変更されていた。

表 1 鹿島灘周辺海域における公共用水域水質測定点で解析対象とした測点の諸元

測定点名称	水深 (m)	COD 類型指定	備考
粟生浜沖 1	6～7	B	環境基準点
粟生浜沖 2	9～10	B	補助地点／製鉄所放流口地先
東電沖 1	9～10	C	環境基準点／火力発電所放流口地先
東電沖 2	24～26	A	環境基準点
知手浜沖	16～17	B	環境基準点
中央航路	19～20	C	環境基準点
南航路入口	13～14	C	補助地点

2.2 時系列データ解析

今回、解析対象にしたのは表層の水温と COD と DO であり、これらの項目は明確な季節性を示す。そのために時系列解析には季節調整を適用し、観測値から長期変動（トレンド）成分と季節（月）成分と不規則（ノイズ）成分を分離・推定した。ソフトウェアプログラムとして R を使い、統計数理研究所の提供する Timsac のバージョン 1.3.7 を適用し、decomp プログラムにより季節調整を行った。

表層 DO については測定値そのものと、図 2 上の式で水温和塩分で規定される飽和溶存酸素量(DO)の値から実測 DO 値を差し引いて求められる、見かけ上の酸素消費量(Apparent Oxygen Utilization [AOU])を算定し（図 2 下の式）、その季節調整を行った（ただし、図 2 上の式から飽和 DO 値を求める際に、公共用水域水質測定データには塩分の測定値が無いので、ここでは便宜的に一律に 33.5 を与えて計算した）。

$$\ln O_2 = A_1 + A_2 \times \frac{100}{T_s} + A_3 \times \ln \left(\frac{T_s}{100} \right) + A_4 \times \frac{T_s}{100} + S \left\{ B_1 + B_2 \times \frac{T_s}{100} + B_3 \times \left(\frac{T_s}{100} \right)^2 \right\}$$

$A_1 = -173.4292$ $A_2 = 249.6339$ $A_3 = 143.3483$ $A_4 = -21.8492$
 $B_1 = -0.033096$ $B_2 = 0.014259$ $B_3 = -0.0017$ S : 塩分、 T_s : 水温（絶対温度）
 飽和溶存酸素量 (mg/L) : $O_2 \times 1.42903$

$$AOU = (\text{各々の水温・塩分から求められる理論的飽和溶存酸素量} - \text{実測DO値})$$

図 2 上：海水の塩分と水温から求められる溶存酸素量計算式、下：AOU の算定式

AOUは、理論的に海水中に溶解している酸素濃度から実測値を差し引くことで求められることから、生物的酸素消費の程度を代替的に示す指標と考えられており、大きくなるほど酸素消費が活発だと評価されることになる。

3. 結果と考察

3.1 水温

図3に鹿島港周辺海域における1972～2019年度までの公共用水域水質測定点7地点での表層海水温のトレンドを示す。粟生浜沖2と東電沖1の2測点を除いて1970年代には16.5～17.8℃だったのが1980年代には15.6～15.7℃まで顕著な下降傾向を示し、その下降幅は0.92～2.2℃に及んだ。1980年以降は上記2測点を除いて顕著な上昇傾向を示し、およそ5年おきに小幅の上昇下降を繰り返した後に2010年代以降、さらに明確な上昇が見られ18～19℃にまで達していた。この1980年代から直近の2019年までの表層海水温トレンド上昇幅は2.4～3.3℃であった。なお、鹿島灘海域最寄りの鹿嶋アメダスによる1970年代以降の気温の変動を見たところ、1980年代までの下降傾向と1980年代以降の最近まで顕著な上昇傾向を示しつつ、約5年毎の小幅は上昇と下降を繰り返しており、鹿島灘海域での表層海水温トレンドの変動パターンとよく似ていた（気温データは非呈示）。



図3 鹿島灘水域7地点における1972～2019年度の表層海水温の季節調整後のトレンド

なお、1970～1980年代までの下降傾向も1980年代以降の上昇傾向も見られなかった粟生浜沖2と東電沖1は、表1に示したようにそれぞれ製鉄所と火力発電所の放流口の地先に在るために温排水の影響を強く受け、全体的に他の測点より高水温（トレンドで18℃以上）に一貫して保たれている。そのために、気温や親潮・黒潮の影響が反映されずに、表層海水温のトレンドの変化がほとんど見られなかったと考えられる。

3.2 COD

図4に鹿島港周辺海域における1972～2019年度までの公共用水域水質測定点7地点での表層CODの測定値とトレンドを示す。実測値では水温の高い夏季（6～8月）に高く（測点によっては4月と10月に高くなっている）、水温の低い冬季から春季にかけて低くなるという季節性を示していた。トレンドでは水温ほどの長期の大きな変動は見られず、一測点（南航路入口）を除いてどの測点でも1990年代と2000年代それぞれの後半に小幅な上昇が示された後に最近まで緩やかな減少傾向を示していた。

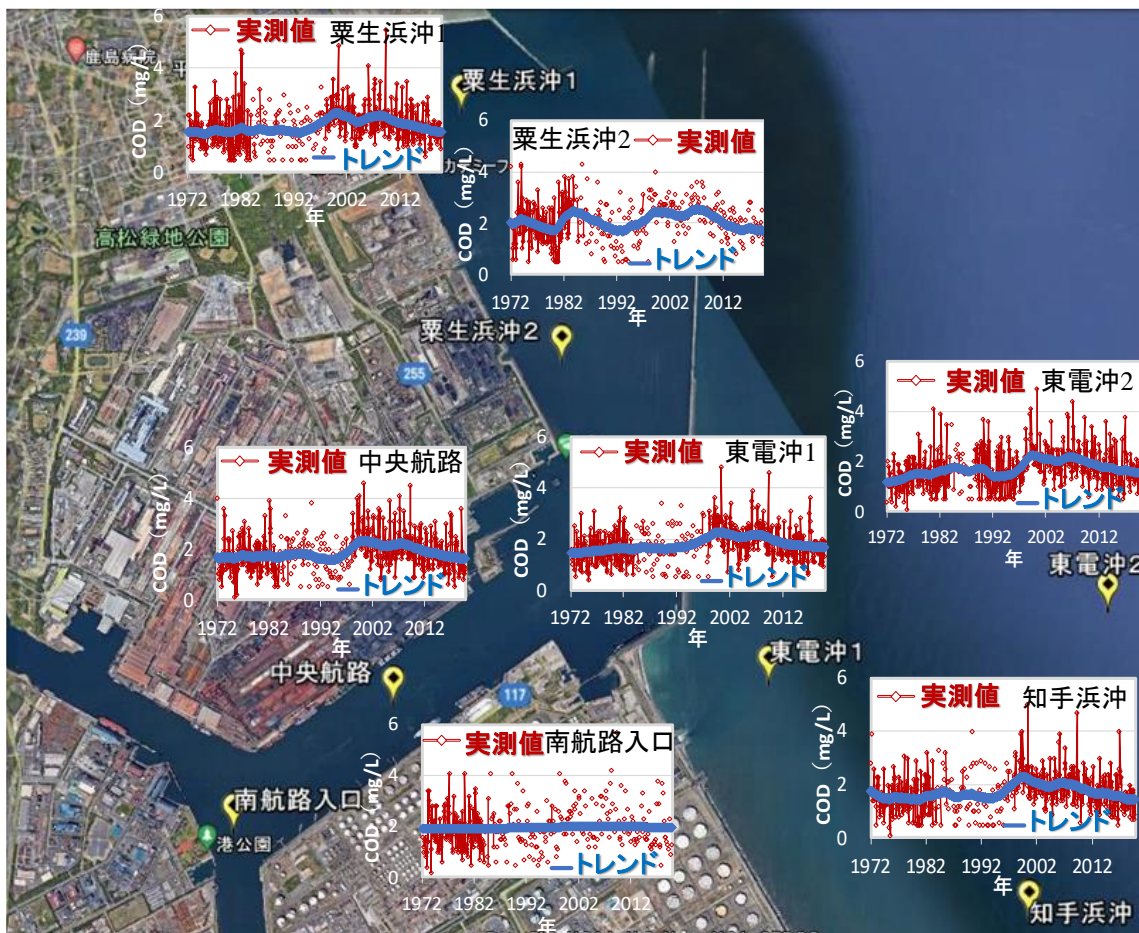


図4 鹿島灘水域7地点における1972～2019年度の表層COD測定値とトレンド

水温トレンドと比較したところ、CODのトレンドでは1970年代から1980年代前半への下降傾向、その後の顕著な上昇といった水温で見られた長期変動は見られなかった。1990年代と2000年代それぞれの後半に、ほぼ5年おきの小幅な上昇・下降が見られたのはCOD

と水温のトレンドで共通して見られたが、両者の因果関係については不明である。一般に水温が上昇した時に植物プランクトン増殖による内部生産が高まると予想される一方、動物プランクトンによるろ食や従属栄養細菌による内部生産由来の有機物の分解も促進されると考えられる。そのために長期的な表層海水温上昇による有機物の代替指標である COD の増減傾向は一概に論ずることが出来ないが、今回検討対象とした鹿島灘海域においては長期的な表層海水温変動と COD 変動との連動は見られなかった。なお、近年では各測点共に COD の環境基準は達成されている。

3.3 DO

図 6 に鹿島港周辺海域における 1972～2019 年度までの公共用水域水質測定点 7 地点での表層 DO と AOU のトレンドを示す。表層 DO の実測値と AOU 共に水温の高い夏季には低く、水温の低い冬季には高いという明確な季節性を示していたが (図 5)、表層 DO は 9～10 月に年間最低となるのに対し、AOU は 8 月に年間最低となった。これは 8 月に水温が年間最高になることから、飽和 DO 値を計算する際に 8 月に大きく低下することによるためであると考えられた。表層 DO のトレンドは一測点 (南航路入口) を除いて 1970 年代から下降傾向を示し、1980 年代後半に最低点を示した後に上昇傾向に転じていた。AOU のトレンドは表層 DO の逆の変動パターンを示し、1970 年代から 1980 年代後半まで上昇傾向を示した後、下降傾向に転じていた。また AOU のトレンドは一貫して負の値を示しており、これは飽和 DO 値よりも実測値が常に高い、すなわち過飽和の状態であることを示していたと考えられる。

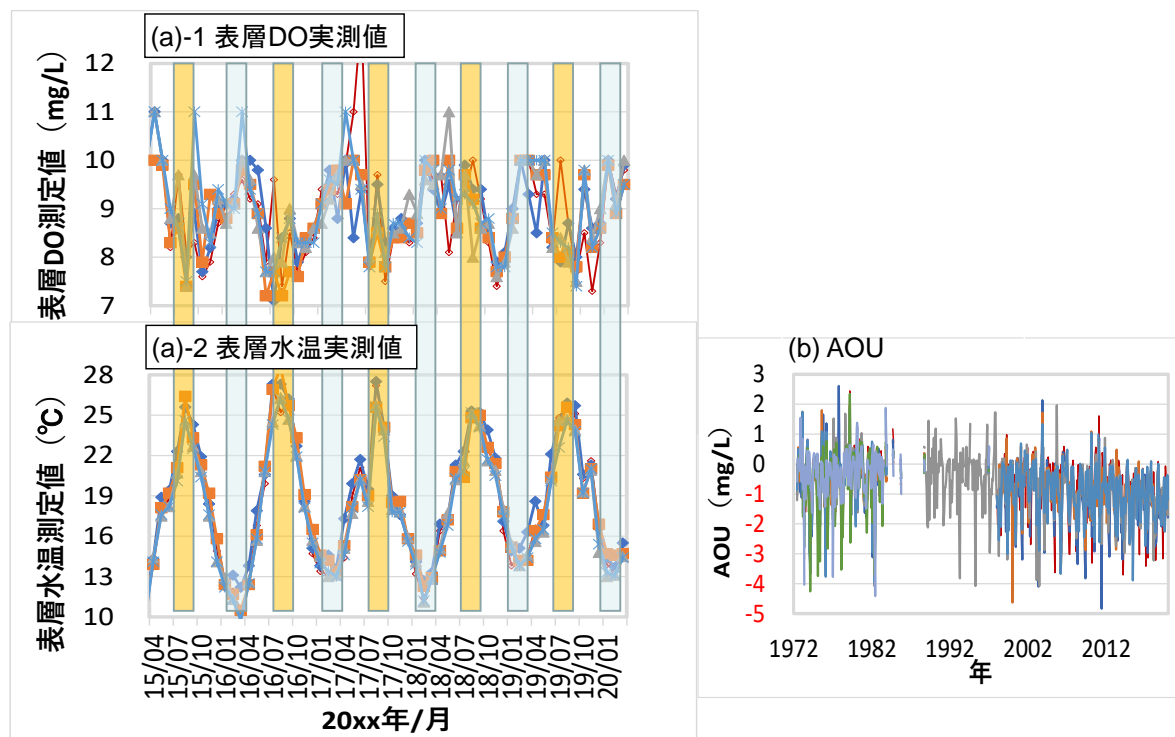


図 5 2015～2019 年度の鹿島灘海域公共用水域水質測定 7 地点における(a)-1 表層 DO 水温と (a)-2 表層海水温それぞれの実測値、橙色と水色の透かし縦帯はそれぞれ夏季と冬季を示す。(b) 1972～2019 年度の同 7 地点で算出された AOU、折れ線グラフが途中で途切れているのは測定頻度が隔月となっていたためである。

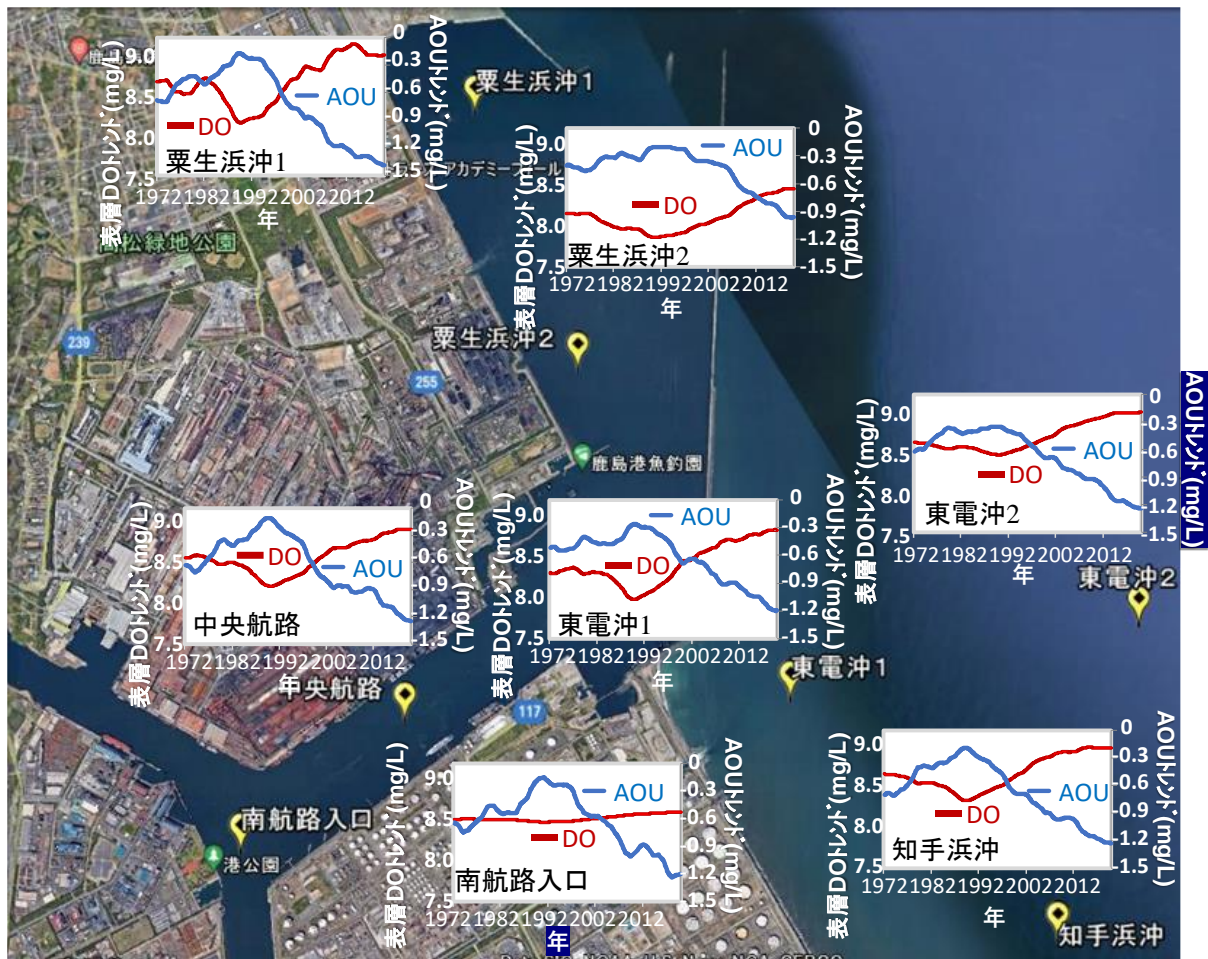


図6 鹿島灘水域7地点における1972～2019年度の表層DOとAOUのトレンド

前述の水温トレンドが1970年代から1980年代まで下降傾向であるのに対し、表層DOとAOUのトレンドはそれぞれ減少・増大傾向を示し、表層水温トレンドが1980年代以降、顕著な上昇傾向を示していた期間は、表層DOとAOUのトレンドはそれぞれ増大・減少傾向を示していた。水温が上昇すると飽和DO値は減少し、主に植物プランクトンから成る有機物生産もDO消費を伴う有機物分解も促進されることから、AOUは上昇するのが妥当だと考えられる。反対に水温上昇により植物プランクトンが増大し、光合成による酸素生産が促進されたとすると、1970年代～1980年代までの水温トレンド下降期間の表層DOトレンドの下降と、1980年代以降の水温トレンド上昇期間における表層DOトレンドの上昇との間には整合性が有ると一見考えられるが、植物プランクトン量増大に伴うCODトレンドの増大傾向は前述のように見られなかったことと、表層DOの上昇傾向が顕著になるのは水温トレンドの上昇が始まる1980年代前半ではなく後半から1990年代であることからタイミングがずれていた。以上のように、今回検討対象にした鹿島灘周辺海域では、表層海水温と表層DO・AOUの変動の間において、整合性が見られなかったと考えられる。

4. まとめ

鹿島灘水域 7 地点における 1972～2019 年度までの 48 年間の表層での公共用水域測定データの季節調整によりトレンド成分を推定したところ：行ったところ、以下のことが示された。

- 表層水温は 1970 年から 1980 年代まで一旦顕著に下降 ($\Delta T: -2.2 \sim -0.9^{\circ}\text{C}$) し、その後、上昇下降を繰り返しながら、全体的に大きく上昇 ($\Delta T: 2.3 \sim 3.4^{\circ}\text{C}$) していた。
- この表層海水温変動パターンは周辺陸地の気温変動に相似しており、水温の下降・上昇程度は異なりながらも 1970 年代から 1980 年代への下降、その後の上昇傾向は、他海域で見られる水温変動パターンと相似していた。
- 表層 COD は 1990 年代前半から後半にかけて上昇した後、現在まで下降傾向を示した。
- 表層 DO は 1970 年代から 1989～1990 年まで下降し、その後、上昇傾向を示し、表層 AOU は DO の真逆の変動パターンを示した。
- 表層 COD と表層 DO・AOU と表層水温の長期変動トレンド間に、合理的に説明可能な整合性の有る関係は見られなかった。

5. 参考資料

1) 茨城県公共用水域水質測定結果

<http://www.pref.ibaraki.jp/seikatsukankyo/kantai/suishitsu/water/kokyoyosuiiki.html>

2) 溶存酸素量計算式- JFE アドバンテック

<https://www.jfe-advantech.co.jp/assets/img/products/ocean-sensor/do.pdf>

3) Keeling R. and H. Garcia (2002) The change in oceanic O₂ inventory associated with recent global warming, Proc. U. S. Natl. Acad. Sci., 99, 7848–7853.

4) Akaike H., T. Ozaki, M. Ishiguro, Y. Ogata, G. Kitagawa, Y.-H. Tamura, E. Arahata, K. Katsura, Y. Tamura (1985) TIMSAC-84 Part 1 & Part 2, Computer Science Monographs, No.22 & 23, The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo.

5) 北川源四郎 (1986) 「時系列の分解 プログラム DECOMP の紹介」統計数理 34 巻 2 号, p255–271.

6) Kashiwagi N., K. Ninomiya, H. Ando, H. Ogura (2003) A space-time state-space modeling of Tokyo Bay pollution, Sustainable Environments: A Statistical Analysis (eds. Ghosh A.K., J.K. Ghosh, B. Mukhopadhyay) 42–62.

7) 二宮勝幸・柏木宣久・安藤晴夫 (1996) 東京湾における水温と塩分の空間濃度分布の季節別特徴. 水環境学会誌, 19, 480–490.

東京湾及び太平洋の千葉県沿岸域における水温変動解析

千葉県環境研究センター水質環境研究室 横山智子, 星野武司

1 はじめに

沿岸海域において、底層の溶存酸素量(DO)が低下する貧酸素水塊の生成には、表層と底層間の密度差が大きく関わっている。すなわち密度差は成層の強さを示し¹⁾、その値が大きいほど海水の鉛直混合が起こりにくくなり、表層から底層へのDOの供給が妨げられることになる。そして、海水の密度は、水温と塩分によって決まるため、表層及び底層の水温変動を把握することは、貧酸素水塊の形成を考える上で重要である。

過去に地方公共団体環境研究機関等と国立環境研究所との共同研究(C型)として行われていた「地球温暖化がもたらす日本沿岸域の水質変化とその適応策に関する研究」(以下、C型²⁾)の中で、千葉県環境研究センターは、公共用水域水質測定地点³⁾のデータを用いて東京湾は1981～2010年度、太平洋は1981～2008年度までの水温の変動傾向について統計解析を行っているが、それから10年以上が経過している。そこで今回は、C型と同じ地点において、2021年度までのデータを追加し、C型と同様の方法であるダミー変数を用いた重回帰分析⁴⁾⁵⁾を行うとともに、Decomp⁶⁾によるトレンド解析を用いてC型の解析結果と比較したので報告する。

2 方法

2・1 使用データ

公共用水域水質測定地点のうち、図1に示す東京湾16地点及び太平洋9地点について解析した。各地点の名称及び全水深は表1のとおりであり、東京湾16地点をT1～T28、太平洋9地点をP1～P9として表記した。

観測データは、T28を除く東京湾内の15地点及び太平洋9地点については、1981年4月～2022年3月までの41年間、T28のみ1995年4月～2022年3月までの27年間の公共用水域水質測定結果を使用した。



図1 解析に用いた公共用水域水質測定地点

2・2 解析方法

東京湾の調査地点のT1～20及び28では年12回、また、T24では年6回測定しており、それぞれカテゴリー数12、6としてダミー変数を用いた重回帰分析⁴⁾⁵⁾を行うとともに、Decompによるトレンド解析を行った。また、太平洋の調査地点P1～9では年4回測定を行っているため、その4回を春(5月(3例のみ6月))、夏(8月(2例のみ9月))、秋(11月(3例のみ12

月))，冬(1~3月)の4つのカテゴリーに分けて重回帰分析及びDecompによるトレンド解析を行った。

Decompは、Kitagawa and Gersch (1984)⁶⁾により提案された状態空間モデルを用いた季節調整法⁸⁾で、非定常時系列をトレンド成分、季節成分、不規則成分等のいくつかの成分に分解することができ、長期トレンドの確認に適しているほか、欠測データがある場合にも解析できる利点がある。

調査地点の水質測定実施日は、同じ月であっても上旬から下旬まで年度によって異なるが、解析にあたって実施日の違いは考慮しなかった。なお、解析は各地点の表層(水面下0.5 m)と底層(T1~20及びP2~5は海底上1 m, T24, T28, P1, P6~9は水深15 m)の水温について上昇、下降の傾向を調べた。

表1 解析対象地点の全水深

※ 公共の名称：公共用水域水質測定地点の名称、全水深は2007年度平均値

地点名(公共の名称)	全水深(m)	地点名(公共の名称)	全水深(m)	地点名(公共の名称)	全水深(m)
T1(東京湾1)	7.3	T13(東京湾13)	19.9	P1(太平洋1)	19.5
T3(東京湾3)	5.7	T14(東京湾14)	20.0	P2(太平洋2)	14.8
T4(東京湾4)	10.8	T15(東京湾15)	13.3	P3(太平洋3)	14.5
T5(東京湾5)	8.7	T19(東京湾19)	11.5	P4(太平洋4)	11.8
T7(東京湾7)	9.0	T20(東京湾20)	10.1	P5(太平洋5)	13.5
T8(東京湾8)	17.5	T24(東京湾24)	28.0	P6(太平洋6)	28.8
T9(東京湾9)	15.3	T28(東京湾28)	>500	P7(太平洋7)	77.5
T10(東京湾10)	18.0			P8(太平洋8)	65.5
T11(東京湾11)	16.1			P9(太平洋9)	40.3

3 結果と考察

3・1 重回帰分析による水温のトレンド解析

重回帰分析の結果を表2に示す。今回の解析結果において、C型よりも上昇率が大きくなっている地点をピンク色、上昇率が小さくなっている地点を水色で示した。

表2 重回帰分析による表層と底層の水温のトレンド

海域	地点	C型の解析結果 ³⁾		2021年度までの解析結果		C型の解析結果 ³⁾		2021年度までの解析結果	
		表層水温	危険率	表層水温	危険率	底層水温	危険率	底層水温	危険率
東京湾	T1	0.031	***	0.043	***	0.051	***	0.040	***
	T3	0.042	***	0.054	***	0.051	***	0.042	***
	T4	0.032	***	0.046	***	0.055	***	0.044	***
	T5	0.031	**	0.049	***	0.034	**	0.033	***
	T7	0.047	***	0.067	***	0.052	***	0.039	***
	T8	0.020	*	0.041	***	0.047	***	0.036	***
	T9	0.025	**	0.042	***	0.055	***	0.036	***
	T10	0.021	*	0.040	***	0.025	**	有意でない	
	T11	有意でない		0.032	***	0.052	***	0.034	***
	T13	0.020	*	0.035	***	0.051	***	0.033	***
	T14	0.023	**	0.037	***	0.045	***	0.030	***
	T15	0.026	**	0.041	***	0.039	***	0.029	***
	T19	0.038	***	0.044	***	0.040	***	0.035	***
	T20	有意でない		0.034	***	0.018	*	0.023	***
T24	有意でない		0.053	***	有意でない		有意でない		
T28	有意でない		0.060	***	有意でない		0.043	***	
太平洋	P1	有意でない		0.055	***	0.072	**	0.054	***
	P2	有意でない		0.023	*	0.041	*	有意でない	
	P3	有意でない		0.022	*	有意でない		有意でない	
	P4	有意でない		有意でない		有意でない		有意でない	
	P5	有意でない		有意でない		有意でない		有意でない	
	P6	有意でない		0.040	***	有意でない		0.025	*
	P7	有意でない		0.025	*	有意でない		有意でない	
	P8	有意でない		0.032	**	有意でない		有意でない	
	P9	有意でない		0.028	*	0.043	*	有意でない	

水温:°C/年 危険率; *: 5%未満、**: 1%未満、***: 0.1%未満

表層水温は、C型及び今回の解析結果の両方において有意であった東京湾の地点で、C型研究時の結果よりも年間上昇率が大きくなっていった。最も上昇率の高かった地点は、T7の0.067℃/年であった。一方、底層水温はC型及び今回の解析結果の両方において有意であったT23を除く東京湾の地点及びP1で、C型よりも年間上昇率が小さくなった。

3・2 Decompによる水温のトレンド解析

Decompによる水温のトレンド解析結果を図2に示す。オレンジ色の枠内のT1～T28までが東京湾の地点の結果であり、それ以外のP1～P9までが太平洋の地点の結果である。図2において、東京湾のすべての地点及び太平洋のP1, P6～9で水温上昇が見られた。また、水色の線で示す表層水温と赤色で示す底層水温には、1～2℃の温度差が見られたが、T3のみ表層と底層の水温差がほとんどなかった。このことは、T3は全水深5.7mで、今回の解析地点の中で最も水深が浅い地点であるためと考えられた。1981年と2021年での表層と底層の水温差があまり変わらない地点がある一方で、T5, T7, T10, T14, T15, T19, T20, T24のように水温差が大きくなっている地点があった。

Decompによる水温トレンドの解析結果から、1981～1991, 1991～2001, 2001～2011, 2011～2021の各10年間における表層の水温変化を図3に、底層の水温変化を図4に示す。図3から東京湾の表層水温は1981～1991の10年間の変化は少ないが、1991～2001に東京湾北部で水温上昇が大きくなり、2001～2011には東京湾全域の水温上昇が見られた。太平洋の地点は、銚子沖の河川流入の影響を受けるP1を除き、1981～1991の水温変化は少なかった。太平洋の南側の4地点、P6, P7, P8, P9は、1991～2001, 2001～2011は水温上昇が見られ、2011～2021には水温は下降に転じた。一方で、P1を除く太平洋の北側の4地点、P2, P3, P4, P5は1981～2021までほとんど水温変化は見られなかった。

図4から、東京湾の底層水温は北部を中心に1981～1991に水温上昇が見られ、1991～2001年の10年間で0.5～0.7℃の水温上昇が多く見られた。一方で、2001～2011, 2011～2021では水温上昇はほとんど見られなかった。太平洋の地点は、1991～2001を中心に南側の4地点、P6, P7, P8, P9に緩やかな水温上昇が見られるものの変化の少ない地点が多かった。

図2～4の結果から、重回帰分析の結果と同様に、東京湾のすべての地点の表層及び底層の水温は、解析初年度の1981年に比べて2021年の方が高く年々水温が上昇していることが明らかとなったが、水温の上昇率は一様ではなかった。太平洋の地点は、P2～P5は表層及び底層水温ともにほとんど水温変化がなかった。一方、P6～P8は表層及び底層ともに水温が年々上昇しており、またP9は表層水温が上昇しているものの、底層水温は2010年頃まで上昇した後、下降に転じていた。図1に示すとおり、水温変化の少ないP2～P5は千葉県の太平洋観測地点のうち、北側の地点であり、水温変化の見られたP6～P9は太平洋側の南側の地点である。北側と南側の地点では、海流等の影響が異なると考えられるが、現時点で水温変化に差が出た理由は明らかになっていない。

参考資料

- 1) 横山智子, 飯村晃, 2022. 水質鉛直分布調査による東京湾内湾の底層溶存酸素の中長期変動. 水環境学会誌 45 (5). 239-244.
- 2) 地球温暖化がもたらす日本沿岸域の水質変化とその適応策に関する研究(2011)地方公共団体環境研究機関等と国立環境研究所との共同研究(C型)報告書. 17-22.
URL. https://www.nies.go.jp/kenkyu/chikanken/seika/H20-H22_C_03.pdf (2023年3月時点) .
- 3) 千葉県環境生活部, 2022. 公共用水域地点別水質測定結果データベース.
URL. https://www.pref.chiba.lg.jp/suiho/kasentou/koukyouyousui/data/data_1.html (2023年3月時点) .
- 4) 青木繁伸, 2003. 重回帰分析 ダミー変数について. 統計学自習ノート.
URL. <http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/lecture/Regression/mreg/dummy-variable/dummy.html> (2023年3月時点).
- 5) 二宮勝幸, 柏木宣久, 岡敬一, 岩渕美香, 飯島恵, 2010. 東京湾西部海域における表層水温のトレンド: ダミー変数を用いた重回帰分析による推定. 横浜市環境科学研究所所報 34. 43-45.
- 6) Kitagawa, G. and Gersch, W. (1984). A smoothness priors-state space modeling of time series with trend and seasonality, *J. Amer. Statist. Assoc.*, 79, 378-389.
- 7) 国土交通省国土地理院, 2023. 地理院タイル一欄.
URL. <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (2023年3月時点) .
- 8) 北川源四郎, 1997. 季節調整プログラムDECOMPとその後の展開. 統計数理 45 (2). 217-232.

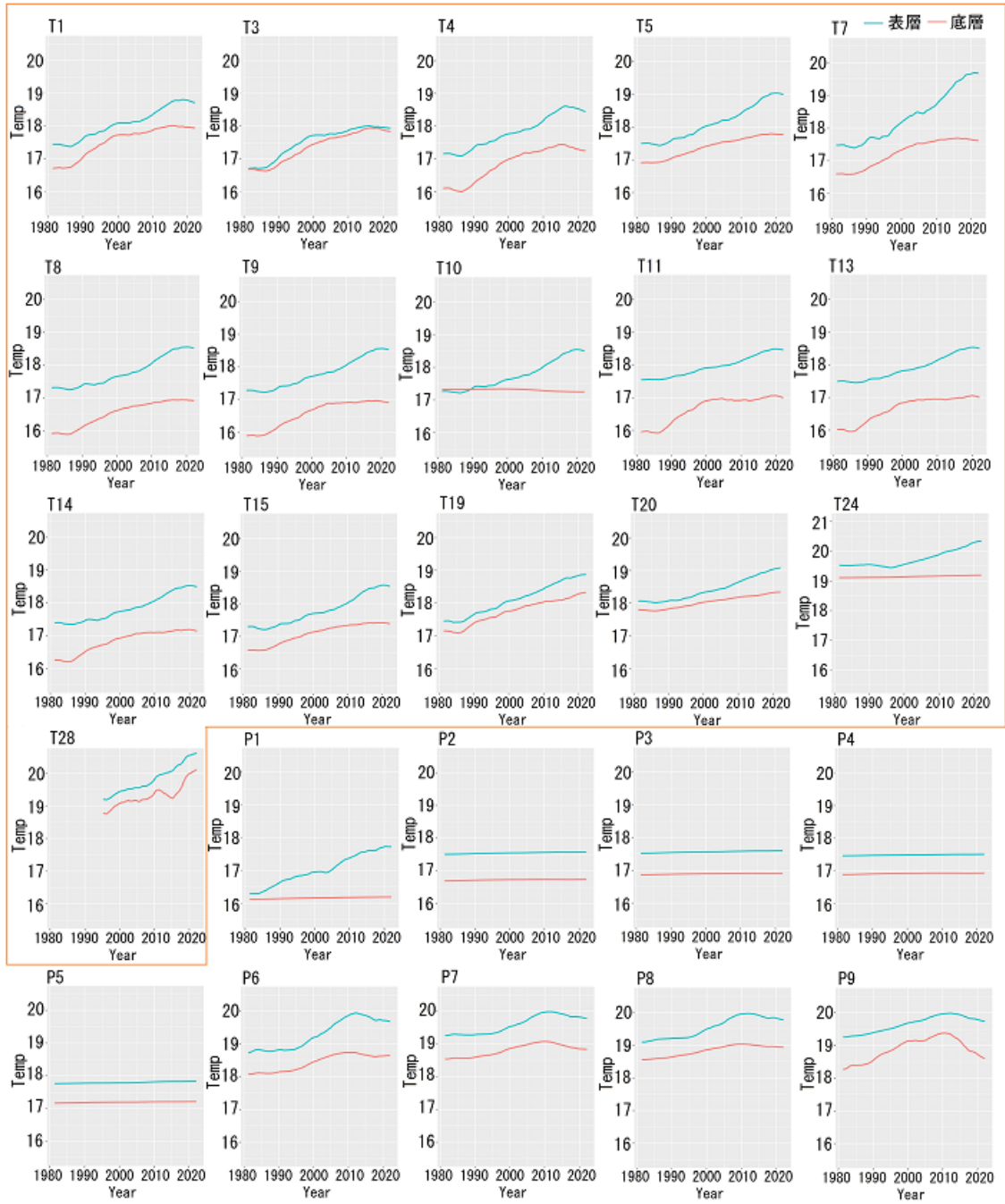
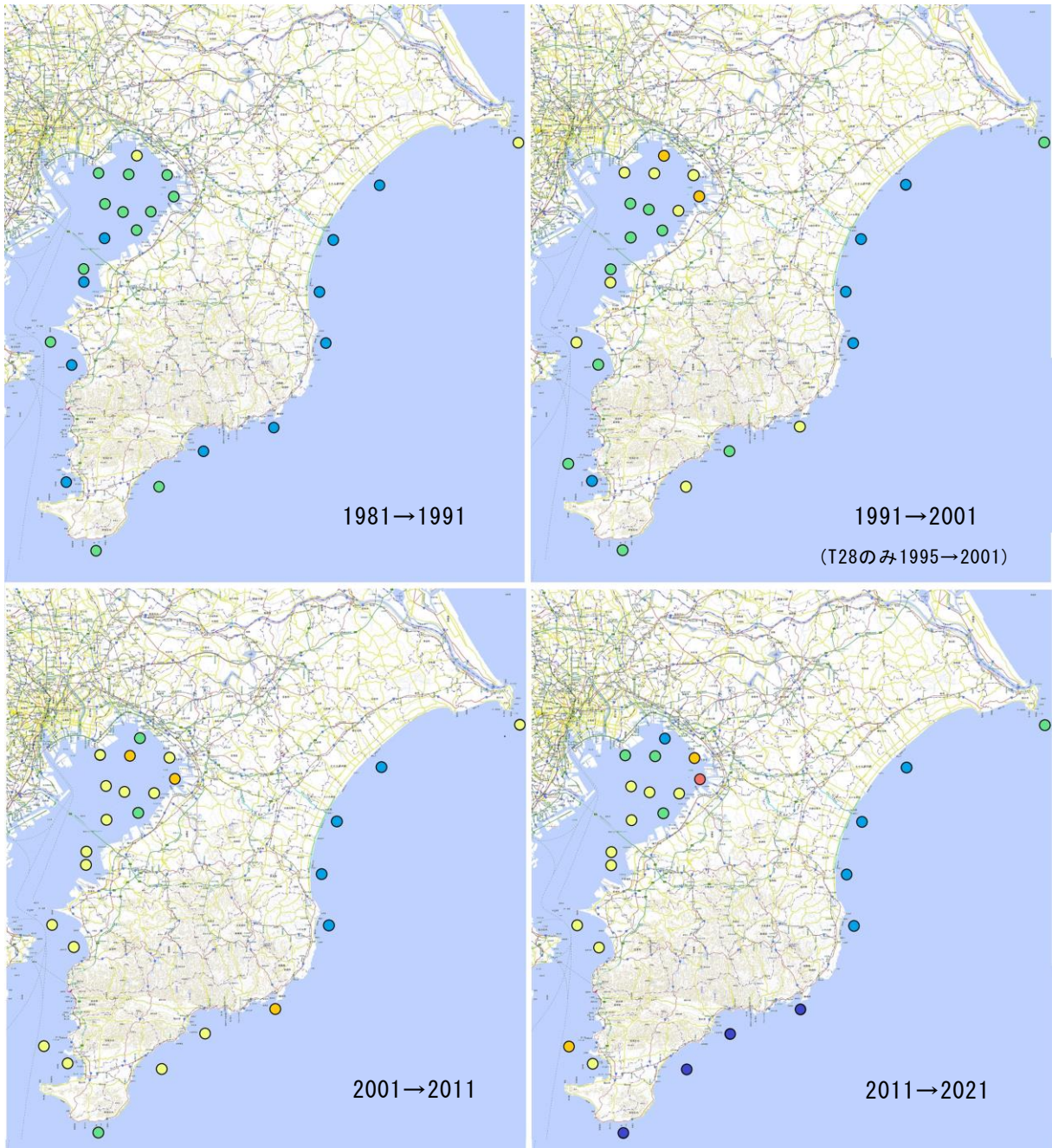


図2 Decomp法による表層と底層の水温のトレンド

期間内の温度変化 (°C)

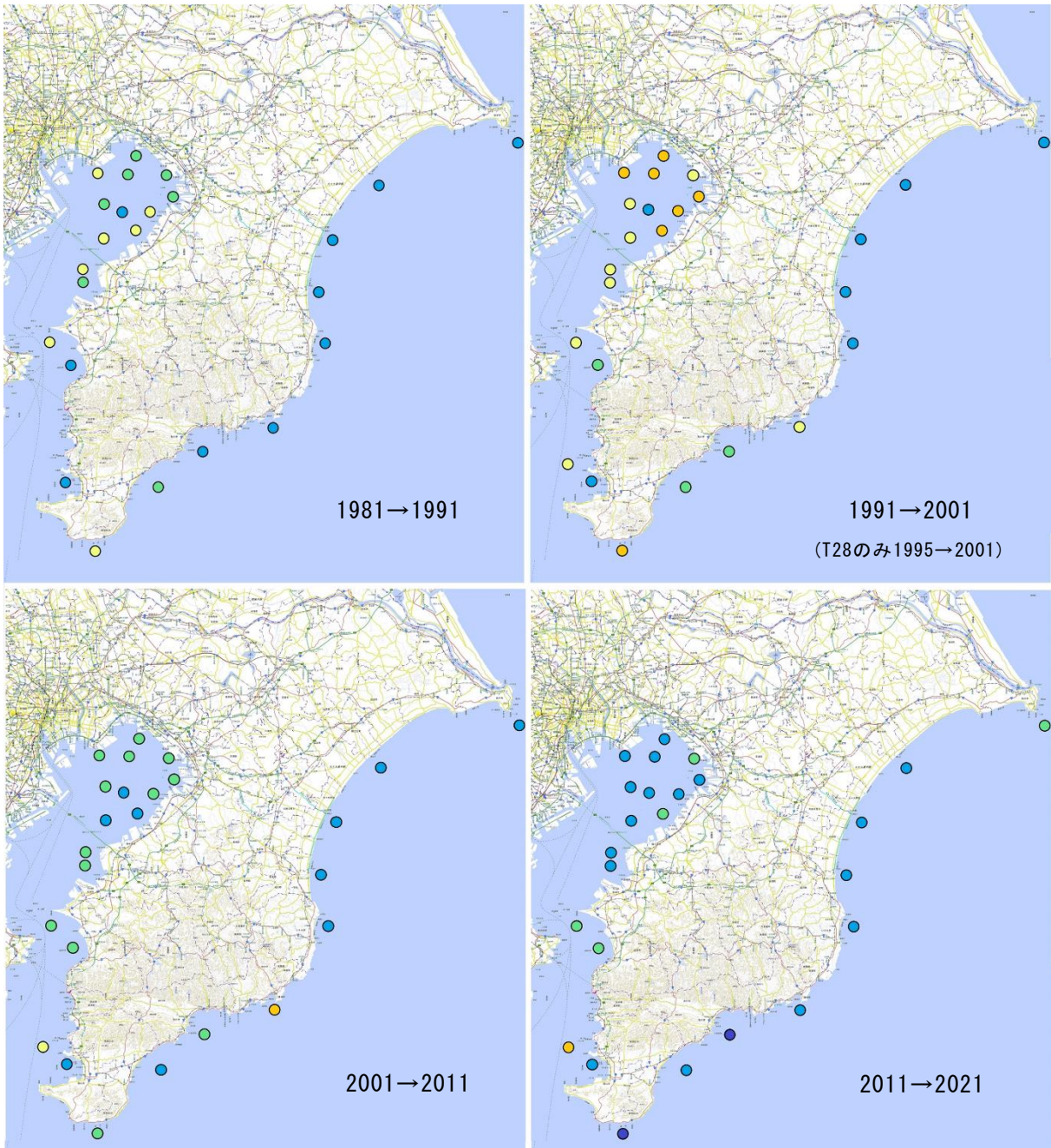
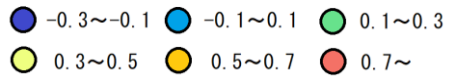
- -0.3~-0.1 ● -0.1~0.1 ● 0.1~0.3
- 0.3~0.5 ● 0.5~0.7 ● 0.7~



出典：地理院タイル⁷⁾一部加工

図3 10年ごとの表層水温の変化

期間内の温度変化 (°C)



出典：地理院タイル⁷⁾一部加工

図4 10年ごとの底層水温の変化

東京都の運河部における水温の長期変動傾向の解析

東京都環境科学研究所 安藤晴夫 石井裕一

1 はじめに

水温は、水生生物の生息状況を支配する要因であり、また赤潮や貧酸素水塊の発生等の水質汚濁現象にも深く関わっている。特に近年は、地球温暖化やヒートアイランド現象による海水温の上昇やそれに伴う水環境への影響が懸念されることから、海域における水温の変動傾向を把握することが重要になっている。

東京都の運河部および内湾部の水温については、過去のC型共同研究において1985年度から2004年度までの20年間を対象期間に、ダミー変数を用いた重回帰分析により直線的な変動傾向の解析が行われ、この期間、運河部および内湾部の全20地点において水温が上昇傾向を示したことが報告されている¹⁾。東京湾全域については、1977年度から2016年度までの40年間を対象に、季節調整法による水温の変動解析が行われ、全42地点で水温は1985年頃に最も低下し、その後上昇傾向に転じたことが報告されている²⁾。

ここでは、東京都の運河部12地点における水温の長期変動傾向について、1977年度から2020年度までの44年間を対象に行った解析の結果を報告する。

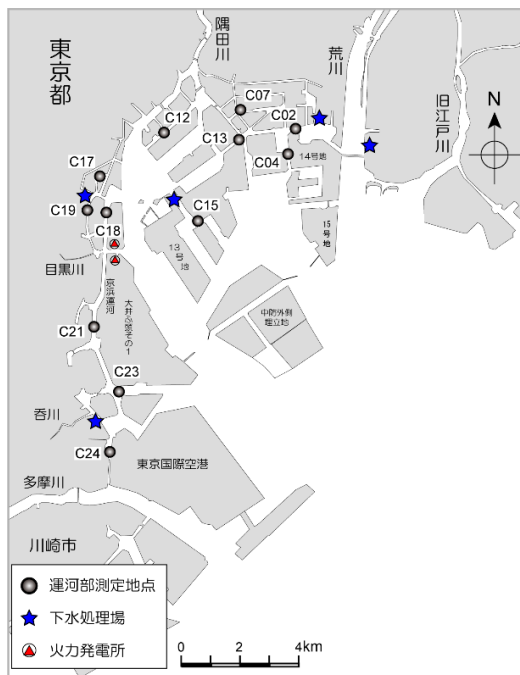


図1 運河部の水質測定地点

2 方法

(1) 使用データ

東京都の公共用水域水質測定結果³⁾から、月1回調査が行われている運河部の主要12地点(図1)を対象とした。各地点とも上層(水深0m)と下層(海底上1m)に分けて解析を行った。対象期間は、1977年度から2020年度の44年間(528ヶ月)とした。なお、1979年度は、12地点とも下層の水温データは、報告されておらず、欠測として処理した。

(2) 解析方法

対象期間が長期であることを考慮して季節調整法を適用した。すなわち、水温時系列データの変動特性から、各時点の値をトレンド成分、季節成分、不規則成分に分解し、そのトレンド成分によって長期変動傾向を推定した。

3 解析結果

季節調整法により運河部 12 地点のトレンドを図 2 に示す。

この解析により、次の点が明らかになった。

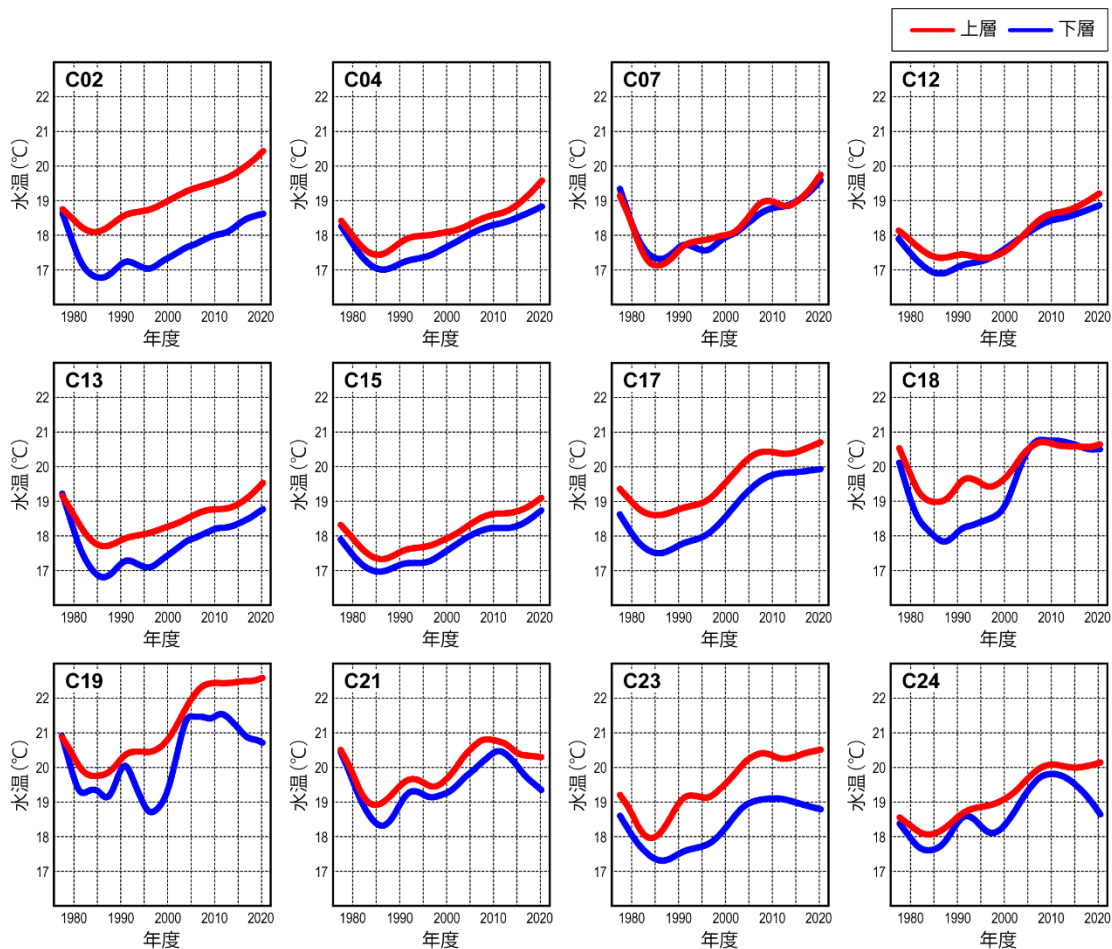


図 2 各地点の水温のトレンド

- ① 解析対象とした 44 年間の水温のトレンドは、大部分の地点で 1985 年頃に最低値を示した。前述の東京湾全域での解析結果でも同様な変動傾向が認められ、そこでは原因として、関東地域の気温との関係が指摘されている²⁾。なお、前述の運河部および内湾部の報告¹⁾における解析対象期間（1985 年度から 2004 年度）は、各地点とも概ね水温が直線的変化（上昇傾向）を示しているが、今回のように対象期間内に下降傾向と上昇傾向を含む時系列データの場合には、全期間の変動傾向を一つの直線回帰式で表すことが難しいことを示唆している。
- ② 各地点とも総じて上層の水温は下層に比べて高い値で推移しているが、C02、C04、C13、C18 等では、解析期間の当初は、上下層間の水温差が小さい。これらの地点の水深について見ると、C02 では当初の約 4 m から 1995 年頃には約 8 m に、C04 で

は、約 3 m からその約 10 年間後には 5.5 m に増大していた。その原因としては、底泥の浚渫等が考えられる。一般に水深が大きくなると海水の上下混合が起り難くなり、その結果、水温差は増大すると考えられる。そして C02、C04 の初期の水温差の拡大は、これを支持する結果を示している。ただし、C18 や C21 では、水深はほぼ一定な値で推移しているにもかかわらず初期の水温差に同様な傾向が認められた。このため、水深変化以外に、1979 年度の下層データの欠測が統計処理結果に影響した可能性も考えられ、更に検討する必要がある。

- ③ 隅田川と荒川には含まれた C02～C15 の地点では上下層とも 1985 年以降は概ね上昇傾向が認められた。一方、都内湾の西岸部に位置する C17～C24 の水温は、2005～2010 年頃に上昇傾向が止まり、特に C19～C24 の下層では、下降傾向を示している。東京湾の西側の川崎市以南の海域では、2000 年以降に上下層とも水温が上昇から横ばいに転じた地点が多いことが報告されており²⁾、その原因については湾外からの海水流入等が考えられるが、このことについても今後の検討課題となっている。
- ④ 2020 年度時点で比較すると 12 地点のうちでは、上層では C19、下層では C18、C19 の水温が最も高い。これらの地点は、下水処理場や火力発電所の近傍にあり、そこからの処理水や冷却水の影響が示唆される。

以上で述べたように、東京都の運河部では、水温上昇が続いている地点が多く、底層（下層）水の貧酸素化を促進する可能性がある。一方で、運河沿いの地域は、多数の住民が接する憩いの水辺でもあることから、水温の変動傾向については常に監視していく必要がある。

参考資料

- 1) 地方公共団体環境研究機関等と国立環境研究所との共同研究(C型)「地球温暖化がもたらす日本沿岸域の水質変化とその適応策に関する研究」報告書（平成 20～22 年度）
- 2) 安藤ら(2020) 東京湾の水質の長期変化について、第 53 回日本水環境学会年会要旨集
- 3) 東京都公共用水域及び地下水の水質測定結果:昭和 52～令和元年度

沿岸海域の水質データを使用した酒田港 COD の水質シミュレーションと行政施策の効果検証

山形県環境科学研究センター 水環境部 後藤 優奈

1. はじめに

山形県酒田市の最上川河口に隣接する酒田港（図 1）は、近年、港内の COD が増加傾向にある。代表的な地点である No. 5、No. 7 地点の COD75% 推移を図 2 に示す。この増加傾向は、当所でのこれまでの原因調査により、防波堤の延伸による閉鎖性の高まりから汚濁物質が港内に滞留しやすいことに加え、植物プランクトンの過剰な増殖によることが明らかになっている。

国立環境研究所との II 型共同研究「沿岸海域における新水質環境基準としての底層溶存酸素（貧酸素水塊）と気候変動の及ぼす影響把握に関する研究（令和 2～4 年度）」に前課題から引き続き参加し、水質測定を行うとともに、水質の将来予測及び水質改善対策の提案のため国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所から提供を受けた「伊勢湾シミュレーター STOC-LT」を用い、数理モデル計算による水質シミュレーションを実施した。

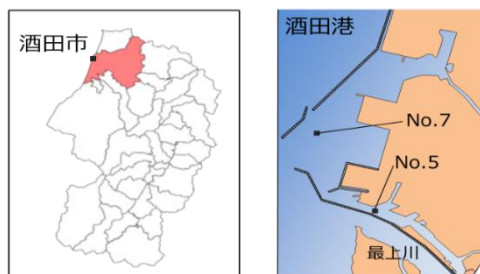


図 1 酒田港の概略

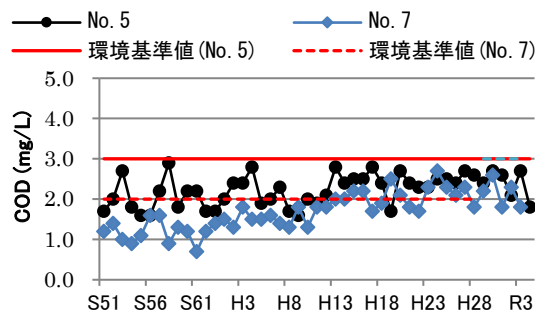


図 2 COD75% 値の推移

2. 方法

(1) 計算に用いる入力データの作成

酒田港周辺の地図を 100 m 四方のメッシュで区切り、各メッシュに水深を入力し、計算の場となるメッシュ地図を作成した。次に、酒田港に関する気象、潮位、河川及び開境界の水質並びに開境界の流速データを収集し、フィッティングや補間などの処理を行って入力データを作成した。河川及び開境界の水質の項目は、下記を用いた。

炭素成分：POC, DOC, Chl-a 栄養塩類：PON, DON, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , POP, DOP, PO_4^{3-} , SiO_2

(2) COD の予測と予測精度の確認

(1) で作成したマップと入力データを用い、以下の時間条件で図 1 中の No. 5、No. 7 地点における COD の予測値を計算した。また、得られた予測値を実測値と比較し、予測の精度を確認した。

計算期間：2018. 1. 1～2019. 9. 13, $\Delta t = 30$ 秒

(3) 水質改善対策の効果の検証

酒田港内に流入する河川について、(1) で作成したデータの水質項目のうち、窒素またはリンの濃度を 4 分の 1 に設定し、栄養塩類の流入負荷が削減したと仮定して入力データを作成した。これを用いて下記の時間条件で計算を行い、植物プランクトン量 (PHY) 及び COD の予測値を比較した。

計算期間：2020. 1. 1～2024. 12. 31, $\Delta t = 30$ 秒

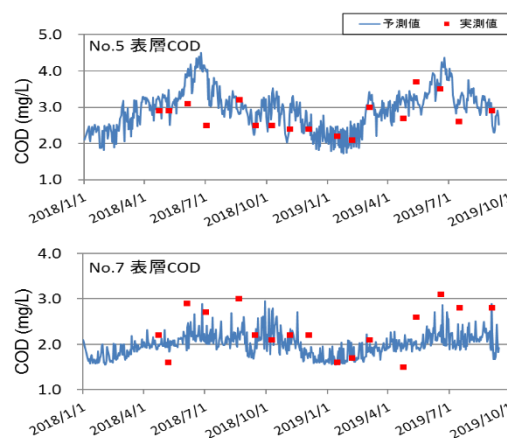


図 3 COD の予測値と実測値の比較

3. 結果と考察

(1) COD の予測と予測精度の確認

図3に、No. 5、No. 7地点の表層におけるCODの予測値と実測値を示す。どちらの地点でも夏季に高く冬季に低くなる増減の傾向は一致した。しかし、No. 7地点で夏季にCODが上昇している時等、予測値と実測値の不一致が見られる。これは、No. 5地点は河口に近い流入する河川の水質がほぼ予測値に反映されるのに対し、No. 7地点は河口から離れた沖側にあり、河川の水質の影響よりも海水の流動やプランクトンの活動による影響が大きくなるためであると考えられる。

(2) 水質改善対策の効果の検証

図4、5に、河川の水質データのうち窒素を4分の1に削減した場合、リンを4分の1に削減した場合及び(1)と同じ条件(削減なし)の場合の、No. 5地点の植物プランクトン量(PHY)とCODの予測値を示す(No. 7も同様の傾向であったため省略)。PHY、CODともに、窒素を4分の1に削減した場合は、条件変更なしの場合とほぼ同じ推移となった。これに対しリンを4分の1に削減した場合は、条件変更なしの場合と比較して特に夏季のPHYが大きく減少した。このことから、酒田港内での植物プランクトンの増殖に寄与している栄養塩類はリンであり、河川からのリンの流入負荷を削減することで夏季の植物プランクトンの増殖を抑制でき、夏季のCODを5~15%程度抑制できることが確認された。

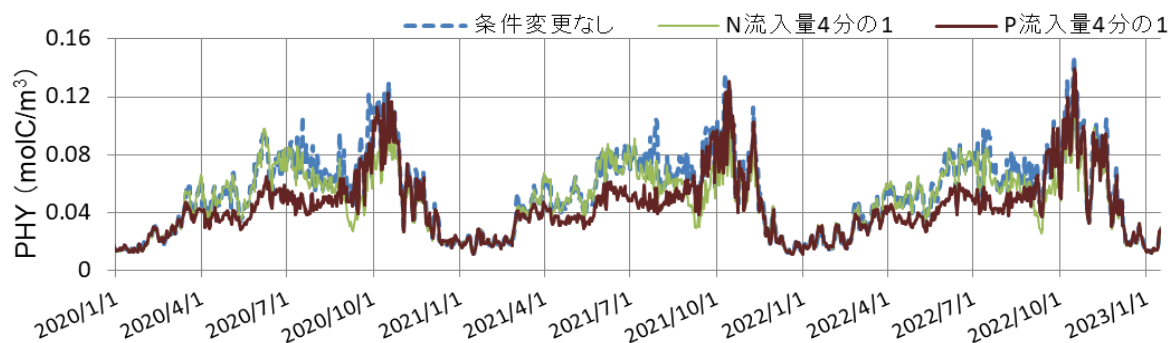


図4 河川からの流入負荷を削減した場合の植物プランクトン量(PHY)の予測

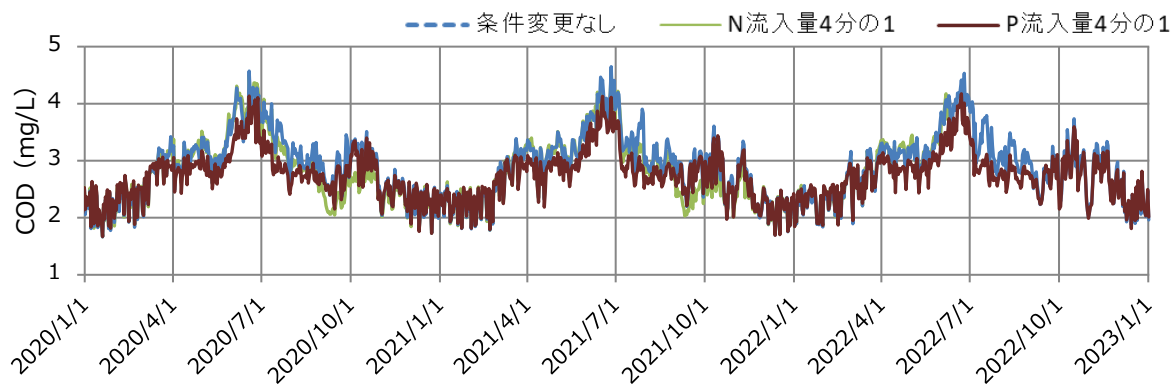


図5 河川からの流入負荷を削減した場合のCODの予測値

4. 結論

酒田港に関する様々なデータを収集し、数理モデル計算による水質シミュレーションを行った。港内のCODの予測値と実測値を比較したところ、時季の変動傾向は一致したが、No. 7で一部予測値と実測値の不一致が見られた。また、水質改善対策として、河川からの栄養塩類(リン)の流入負荷を削減して検証したところ、夏季の植物プランクトンの増殖を抑制でき、CODを抑制できることが確認された。

新潟東港及び県北海域における鉛直分布調査の結果及び COD 等の長期変動傾向について

新潟県保健環境科学研究所
調査研究室 水質科学科

1. はじめに

新潟市北区と聖籠町にまたがる新潟東港は 1969 年に開港し、周辺には工業地帯が広がっている。港内は波堤で囲まれた閉鎖性の高い水域となっており、新発田川放水路や福島潟放水路が接続している。近年は港内の化学的酸素要求量（COD）が環境基準値を超過する状況が続いており、当県北部の県北海域においても COD の漸増傾向がみられている¹⁾。

一般に、COD は富栄養化による植物プランクトンの増加などによって高くなる²⁾。また、東京湾などの COD の高い閉鎖性の海域では、夏季の高水温期に底層の貧酸素化が進むことが知られており³⁾、沿岸海域環境への悪影響が懸念される。

当研究所では、2011 年度から国立環境研究所とのⅡ型共同研究に参加し、新潟東港（新潟海域 No. 15）及び県北海域（県北海域 No.4）の水質及び溶存酸素量（DO）等の鉛直分布を調査している。

今回、2020 年度から 2022 年度の調査期間において、当該海域における水質調査及び鉛直分布調査を引き続き実施した。さらに海域における気候変動の影響評価を目的として、過去 30 年間における両海域の COD 等の公共用水域データについて長期変動傾向の解析を実施したので併せて報告する。

2. 方法

2. 1 調査地点及び測定日

測定は公共用水域常時監視（環境基準）点である新潟海域 No.15（新潟東港、以下 N15 と表記）及び県北海域 No. 4（以下 K4 と表記）で実施した。それぞれの位置を図 1 に示す。N15 は生活環境の保全に関する環境基準の海域 B 類型に指定されており、COD の環境基準値は 3 mg/L である。一方、K4 は海域 A 類型に指定されており、COD の環境基準値は 2 mg/L である。新潟県が実施する公共用水域常時監視に併せて、2020 年度から 2022 年度までにクロロフィル a（Chl.a）濃度の測定及び鉛直分布調査を毎年、夏期（7～9 月）と冬期（10 月）の 2 回、計 6 回実施した。

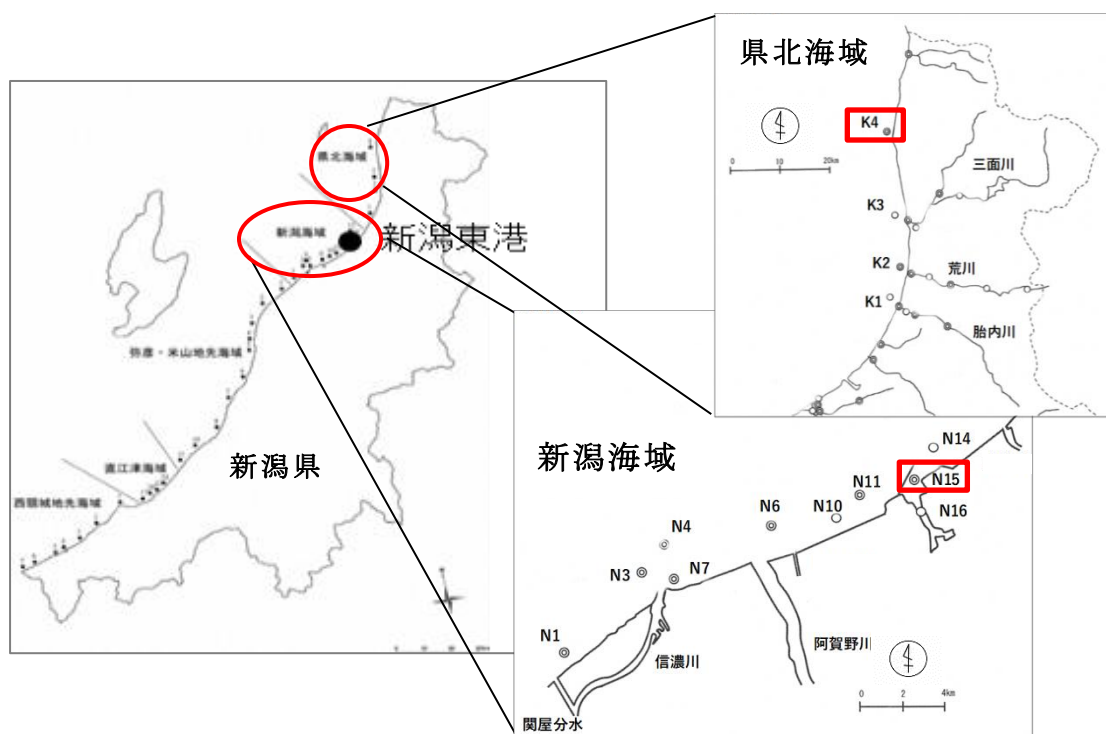


図 1 N15 及び K4 の位置

2. 2 水質調査

公共用水域常時監視において、水温、全水深、透明度及び表層・中層混合試料液（水深 0 m 及び 3 m の海水を等量混合したもの）の COD、全窒素（T-N）及び全燐（T-P）を当所で測定した。また、混合試料液の Chl.a 濃度については国立環境研究所が測定した⁴⁾。

2. 3 鉛直分布調査

当所所有の多項目水質計（EXO2，ザイレムジャパン製）を使用して調査地点の海面から海底付近まで鉛直方向に約 4 秒に 1 m の速さで沈めながら DO、塩分、水温及び Chl.a 濃度をそれぞれ測定した。

2. 4 公共用水域データの長期変動傾向解析

1991～2020 年度の概ね 4～10 月において、新潟県が実施した公共用水域常時監視⁵⁾によって取得した COD、T-N、T-P 及び水温のデータについて、長期変動を把握するためにグラフの作成や決定係数（ R^2 値）の導出を行った。

3. 結果及び考察

3. 1 水質調査

N15 及び K4 での調査日における現地概況、T-N、T-P、COD 及び Chl.a 濃度の分析結果を表 1 及び表 2 に示す。濃度範囲は N15 において、T-N が 0.24~0.60 mg/L、T-P が 0.012~0.041 mg/L、COD が 1.9~6.0 mg/L、そして Chl.a が 6.2~32µg/L であった。また、K4 において、T-N が 0.07~0.23 mg/L、T-P が 0.008~0.030 mg/L、COD が 1.3~3.3 mg/L、そして Chl.a が 0.46~12 µg/L であった。

表 1 N15 における現地概況及び分析結果

調査日	天候	水温 (°C)	全水深 (m)	透明度 (m)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	COD (mg/L)	Chl.a (µg/L)
2020年7月13日	曇り	25.0	14	1	0.60	0.037	6.0	32
2020年10月28日	晴れ	18.0	-	3.5	0.28	0.041	2.2	9.2
2021年9月8日	雨	23.5	15	3	0.24	0.027	1.9	11
2021年10月5日	曇り	23.5	13	2	0.49	0.031	2.3	20
2022年8月2日	晴れ	29.5	16	2	0.32	0.032	3.3	20
2022年10月25日	薄曇り	19.5	14	4	0.33	0.012	2.2	6.2

※「-」は欠測を示す。

表 2 K4 における現地概況及び分析結果

調査日	天候	水温 (°C)	全水深 (m)	透明度 (m)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	COD (mg/L)	Chl.a (µg/L)
2020年7月13日	晴れ	24.5	22	2	0.23	0.030	3.3	12
2020年10月28日	晴れ	19.0	-	4	0.14	0.019	1.6	6.5
2021年9月8日	曇り	24.0	22	8	0.07	0.008	1.3	0.46
2021年10月5日	曇り	23.0	21	2	0.16	0.014	2.8	9.0
2022年8月2日	曇り	28.0	23	15	0.08	0.009	1.6	7.8
2022年10月25日	晴れ	20.5	21	3	0.09	0.010	1.4	0.72

※「-」は欠測を示す。

ここで、両地点における COD と Chl.a 濃度との散布図を図 2 に示す。いずれの地点でも正の傾きで、かつ R² 値が 0.7 を超えており強い正の相関が認められたため、植物プランクトンの増殖が COD 増加の一因となっていることが示唆された。

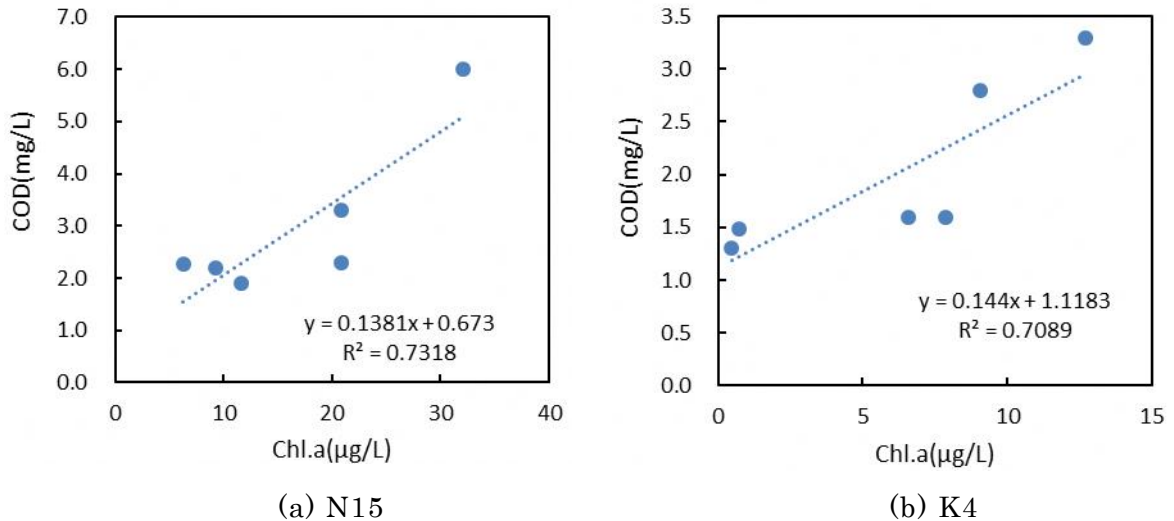


図 2 COD と Chl.a 濃度との散布図（2020～2022 年度）

3. 2 鉛直分布調査

N15 及び K4 の各年度における水深 1 m ごとの DO、水温、塩分及び Chl.a 濃度の鉛直分布を図 3～8 に示す。いずれの調査日においても、全水深（表 1 及び表 2）と多項目水質計による測定 of 最大深度がほぼ同じであったことから、測定地点の海底付近まで測定できていたと考えられる。

両地点ともに表層部で塩分が低く、DO と Chl.a が高くなる現象が見られた。N15 では過去の調査でも当該現象が観測されており、既報⁶⁾では塩分低下と DO 上昇が淡水流入の影響、Chl.a 上昇が植物プランクトンの光合成による酸素供給の影響とそれぞれ指摘している。本調査期間においても、同様の機構が作用したと考えられる。

K4 の場合は塩分の鉛直分布について N15 と比較すると、概ね傾向が一致していることが分かった。K4 の南方には三面川、荒川、胎内川の 3 河川が存在するが、松崎ら（2020）⁷⁾は当該 3 河川からの有機物の流入影響が少ないことや、新潟海域及び県北海域の塩分分布から、当該海域における海流が北に向かっていることを明らかにしている。そして K4 は N15 を含む新潟東港及びその周辺からの移流の影響を大きく受けているとしており、本調査においてもそれを支持する結果が得られたと考える。

また、両地点において概ねすべての調査日で底層部における DO が表層と比べて減少する傾向が見られたが、DO の最低値は、N15 で 2022 年 8 月の 6.24 mg/L（水深 14 m）、K4 で 2021 年 10 月の 6.82 mg/L（同 22 m）であり、4 mg/L を下回ることなく、いずれの調査日においても底層の貧酸素化は確認されなかった。

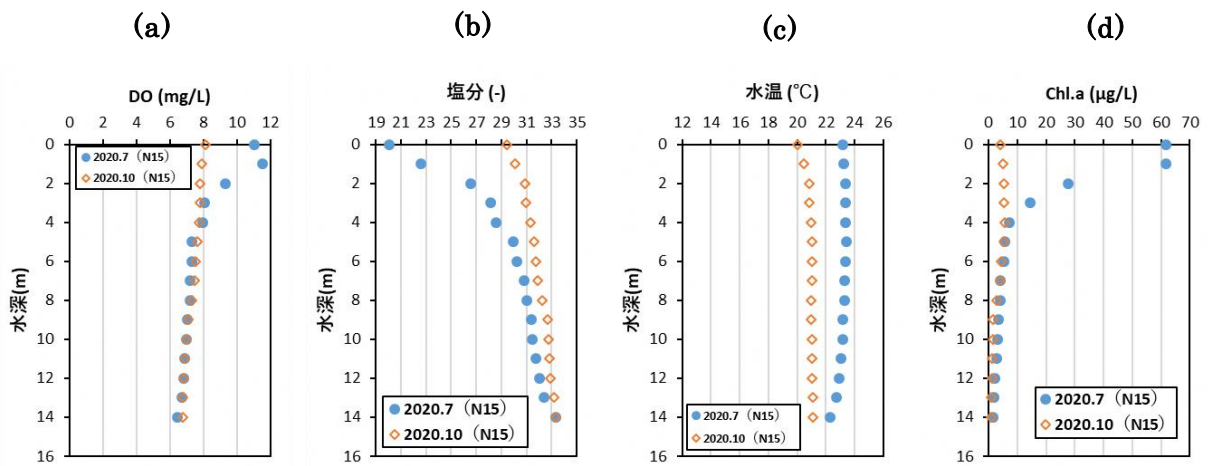


図3 2020年度におけるN15の (a) DO、(b) 塩分、(c) 水温、(d) Chl.a

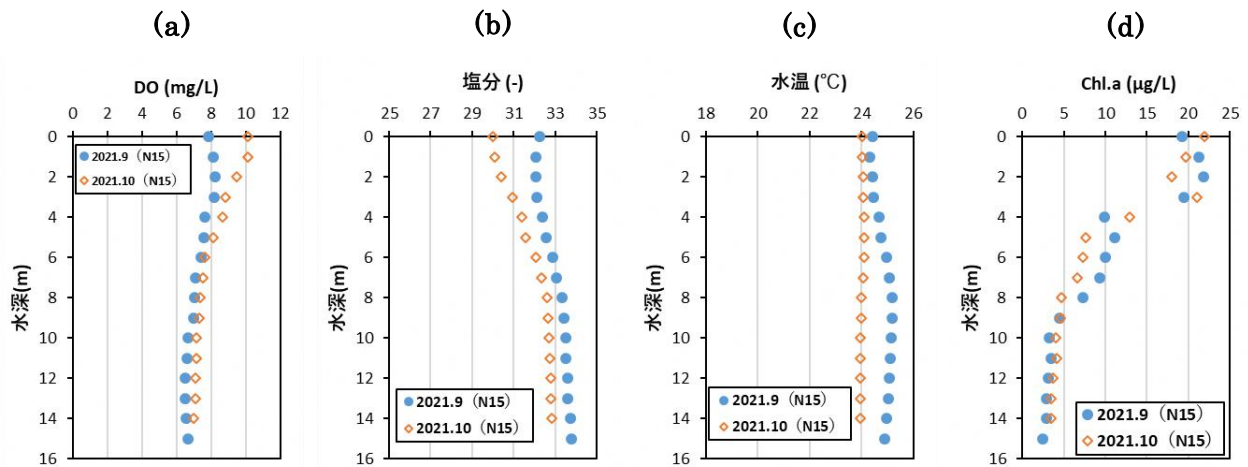


図4 2021年度におけるN15の (a) DO、(b) 塩分、(c) 水温、(d) Chl.a

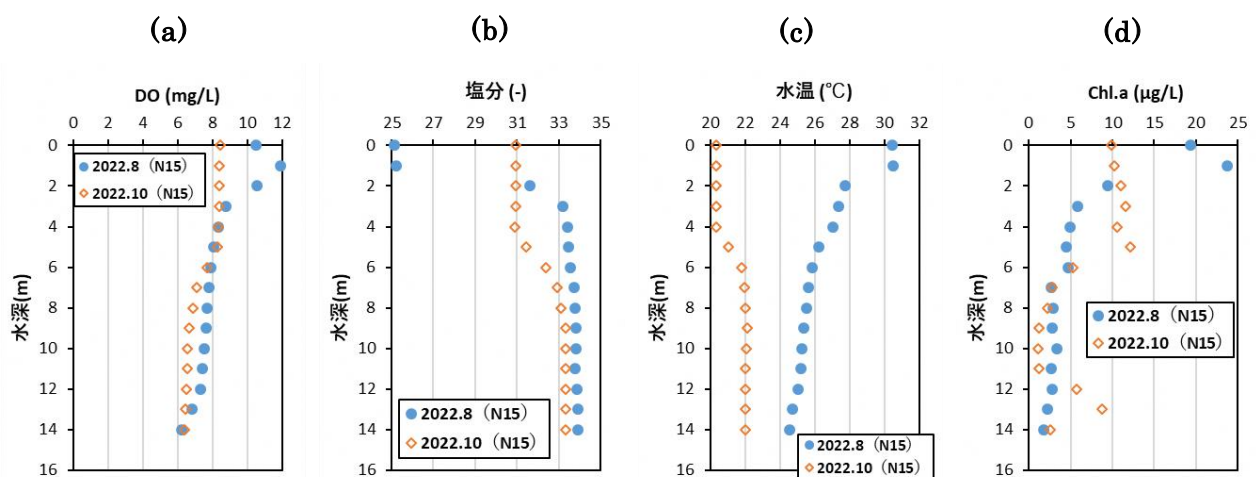


図5 2022年度におけるN15の (a) DO、(b) 塩分、(c) 水温、(d) Chl.a

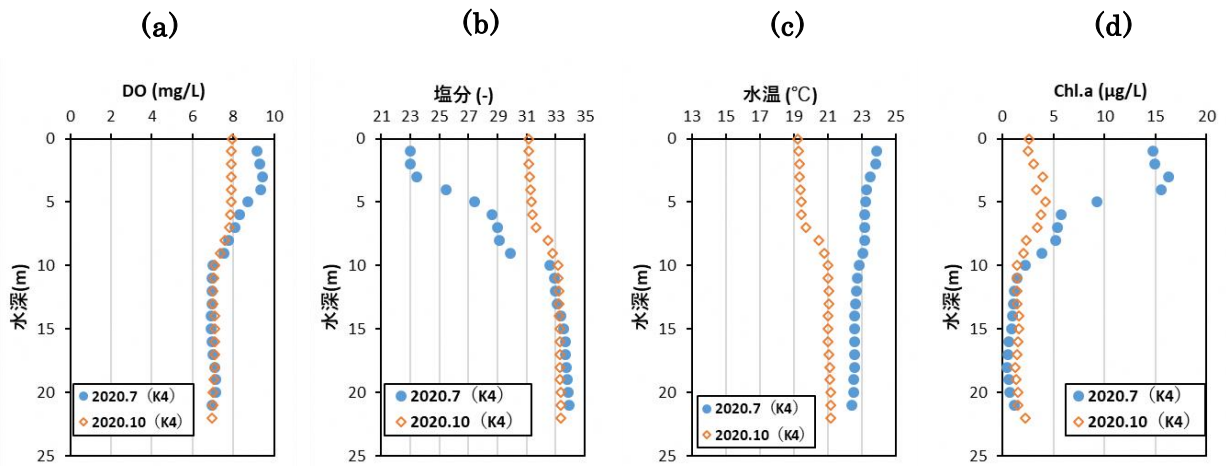


図 6 2020 年度における K4 の (a) DO、(b) 塩分、(c) 水温、(d) Chl.a

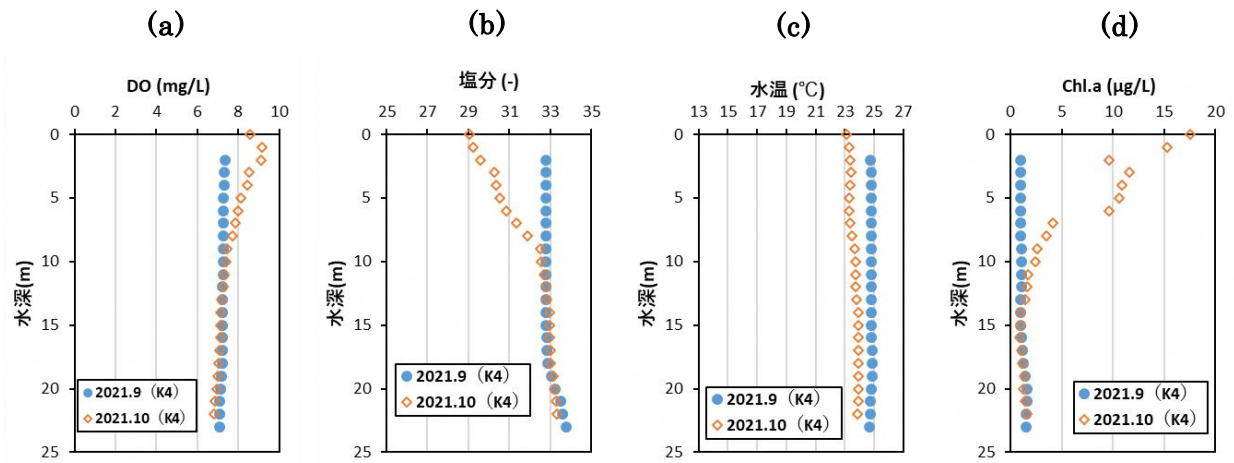


図 7 2021 年度における K4 の (a) DO、(b) 塩分、(c) 水温、(d) Chl.a

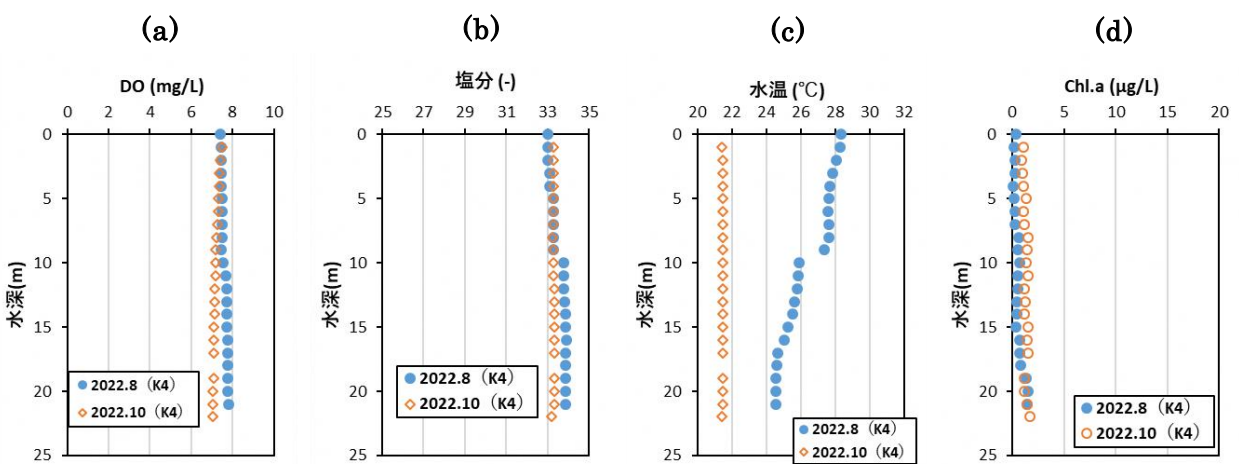


図 8 2022 年度における K4 の (a) DO、(b) 塩分、(c) 水温、(d) Chl.a

3. 3 公共用水域データの長期変動傾向解析

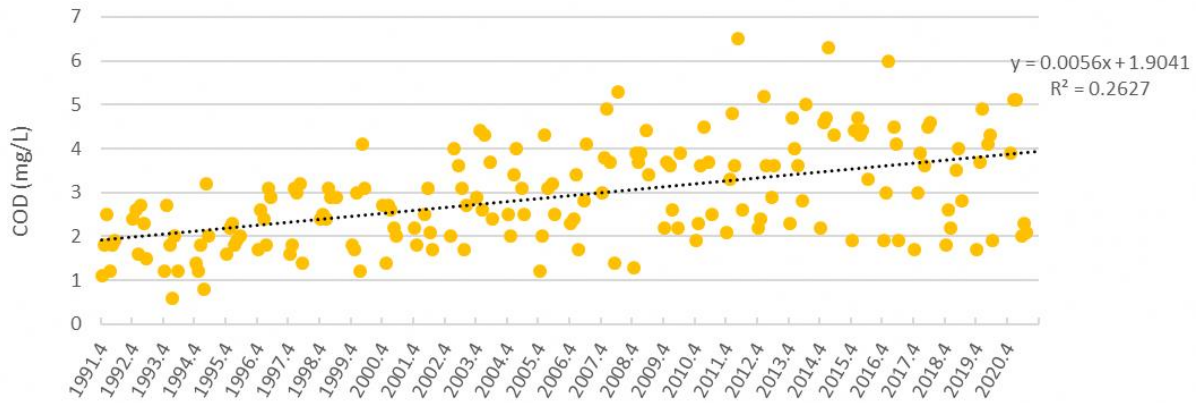
N15 及び K4 の 1991 年 4 月から 2020 年 11 月までの COD、T-N 及び T-P の長期変動を、それぞれ図 9 及び図 10 に示す。

まず、COD については N15 及び K4 のいずれも上昇傾向が見られた。松崎ら (2020) ⁷⁾は、N15 が位置する新潟東港及びその周辺における COD 値の増加は磷濃度の増加が影響していると報告している。実際、N15 の T-P は増加傾向であることが図 9 (c)から読み取れる。これは、図 2 で示したとおり COD と Chl.a との間には正の相関があり、一般的に植物プランクトンの増殖には窒素や磷といった栄養塩類が利用されることから、N15 における COD 増加傾向は T-P の増加が関与していると考えられる。

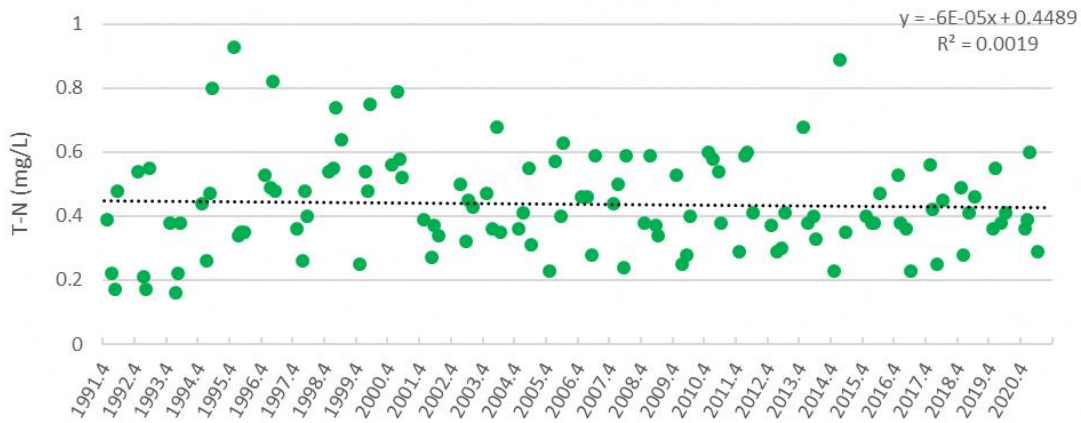
また、K4 の COD 上昇は 3.2 でも述べたとおり、3 河川からの流入よりも N15 を含む新潟東港及びその周辺からの移流等の影響を強く受けているものと考えられる。これは図 10 (c)のとおり、K4 の T-P においても N15 周辺からの移流によるものと考えられる上昇傾向が見られることから示唆される。

一方、直近 10 年間では依然として COD 値は高い状態が続いているものの、増加傾向は弱まっているため、今後も両海域における COD 値の動向を注視していきたい。

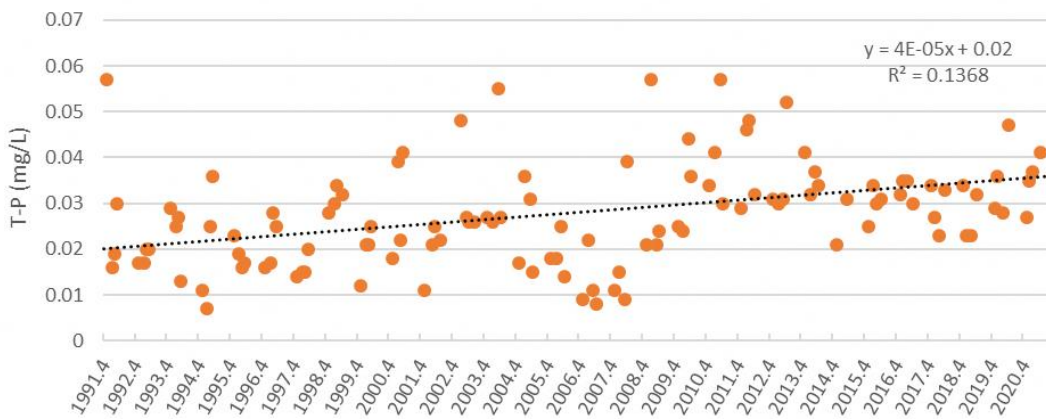
なお、両地点における水温については、今回の解析において何らかの傾向を見ることはできなかった。



(a) COD

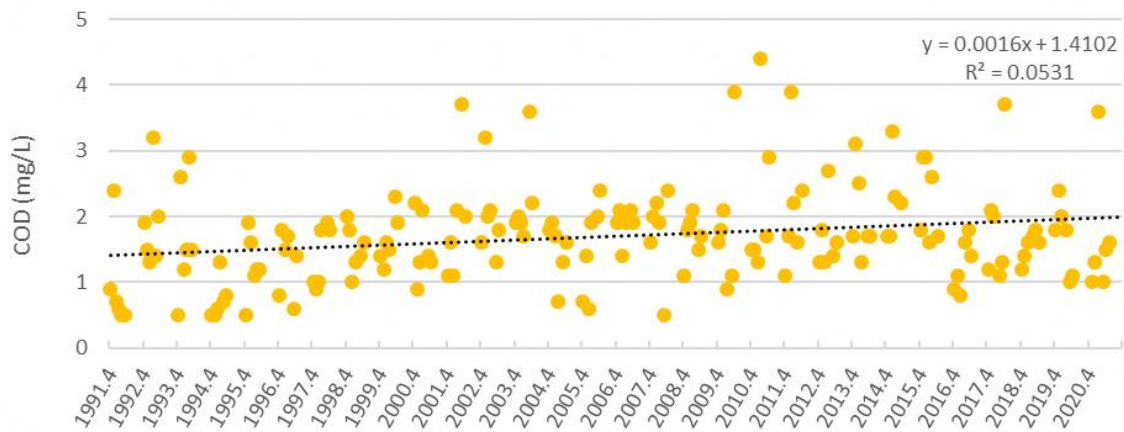


(b) T-N

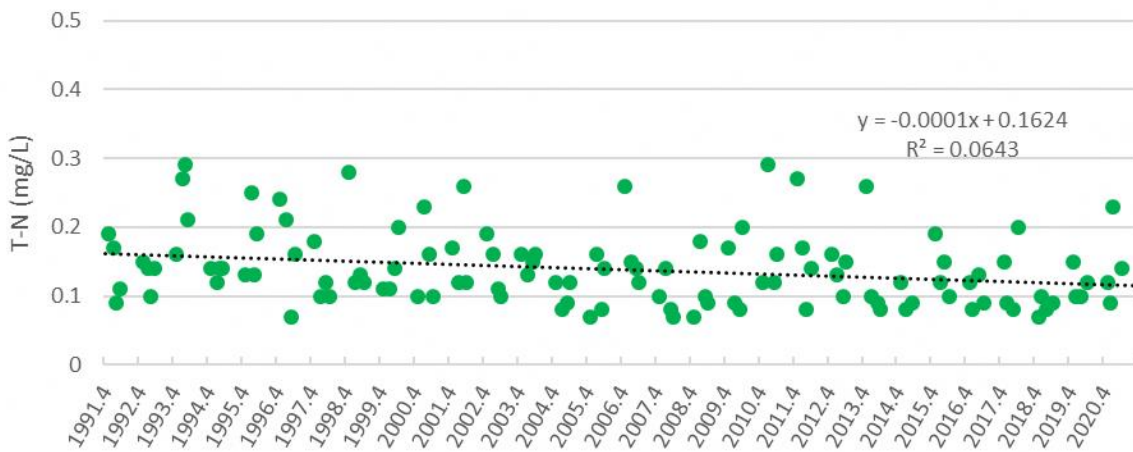


(c) T-P

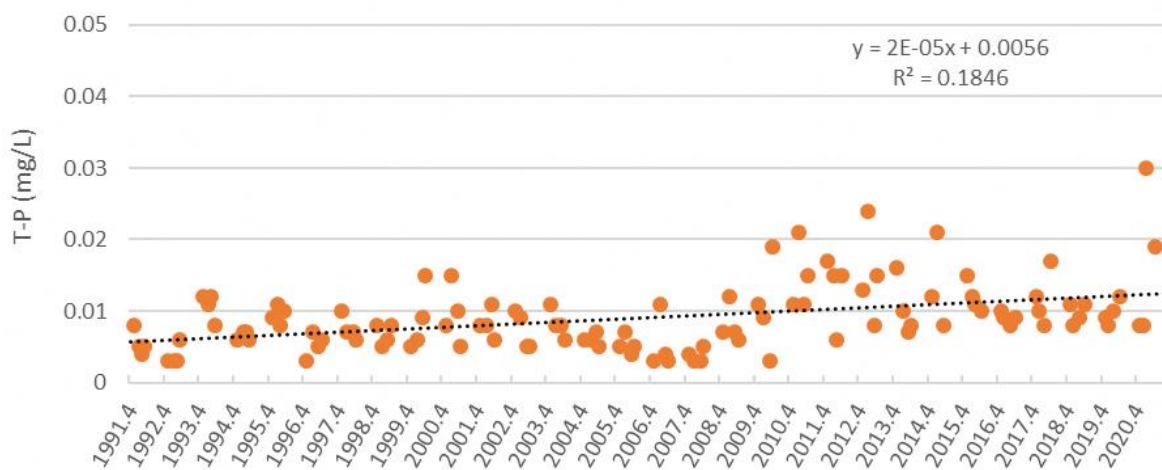
図 9 1991年4月～2020年11月におけるN15の公共用水域データの長期変動



(a) COD



(b) T-N



(c) T-P

図 10 1991年4月～2020年11月における K4 の公共用水域データの長期変動

4. まとめ

- ・ N15 及び K4 における COD と Chl.a との相関から、両地点での植物プランクトンの増殖が COD の増加につながっている可能性が示唆された。
- ・ N15 及び K4 において DO が 4 mg/L を下回ることはなく、貧酸素化は見られなかった。
- ・ 1991 年 4 月から 2020 年 11 月における公共用水域データの長期変動傾向解析により、N15 及び K4 において COD の上昇傾向が認められた。

参考資料

- 1) 新潟県水環境保全基本方針（令和 3 年 3 月）、<https://www.pref.niigata.lg.jp/sec/kankyotaisaku/2021mizu-houshin-honbun.html>（最終閲覧日：令和 4 年 12 月 1 日）
- 2) 星加ら：大阪湾における富栄養化と内部生産有機物、水環境学会誌、21、756～771（1998）
- 3) 二宮ら：東京湾における COD と DO の空間濃度分布の季節別特徴、水環境学会誌、19、741～748（1996）
- 4) 国立研究開発法人国立環境研究所：茨城県沿岸海域公共用水域環境基準点における栄養塩類と COD に関連する有機物項目（第 3 報）と有機体窒素の分解性の東京湾との比較、「海域における水質管理に係わる栄養塩・底層溶存酸素状況把握に関する研究」報告書、12～16（2021）
- 5) 新潟県 公共用水域の水質測定結果、<https://www.pref.niigata.lg.jp/site/opendata/1254822231356.html>（最終閲覧日：令和 5 年 2 月 28 日）
- 6) 新潟県保健環境科学研究所：新潟東港における水質及び有機体窒素分解試験の結果について、「海域における水質管理に係わる栄養塩・底層溶存酸素状況把握に関する研究」報告書、30～35（2021）
- 7) 松崎ら：県北海域における COD 値に及ぼす要因に関する調査結果について、令和元年度新潟県保健環境科学研究所年報、35、70～75（2020）

新潟市沿岸海域公共用水域常時監視点における 有機物指標項目及び関連する栄養塩類について

新潟市衛生環境研究所 齋藤 真

1 はじめに

新潟市では、水質汚濁防止法に基づき沿岸海域 9 地点について環境基準監視を 4 月から 10 月の期間に 6 回実施している。

近年、全国的に沿岸海域の化学的酸素要求量（COD）上昇や、閉鎖性海域等での底層の溶存酸素量（DO）の低下などが懸念されているが、新潟市沿岸においても、閉鎖性海域ではないものの、COD の環境基準超過や漸増傾向が続いている。この原因を探るため、国立環境研究所とのⅡ型共同研究「沿岸海域における新水質環境基準としての底層溶存酸素（貧酸素水塊）と気候変動の及ぼす影響把握に関する研究（令和 2 年度から 4 年度）」に前課題から引き続き参加し、COD と有機物指標及び栄養塩類を測定し、項目間の関係について検討した。また、近年の水質変動について解析を行った。

2 調査地点

調査対象とした海域 2 地点を図 1 に示した。弥彦・米山地先海域（弥彦地先）No.2（以下、弥彦 No.2）付近には常時流入する大きな河川はないが、新潟海域 No.6（以下、新潟 No.6）は阿賀野川河口沖に位置しており、海流（西から東に流れる）により信濃川の影響も受ける可能性がある。水深は弥彦 No.2 で約 13 m、新潟 No.6 で約 19 m であり、両地点ともに COD の環境基準は 2 mg/L である。COD に関しては、新潟 No.6 は若干の低下傾向を示しながらも基準の超過が多く、弥彦 No.2 は漸増傾向が見られているのが近年の状況である。（図 2）



図 1 調査地点図

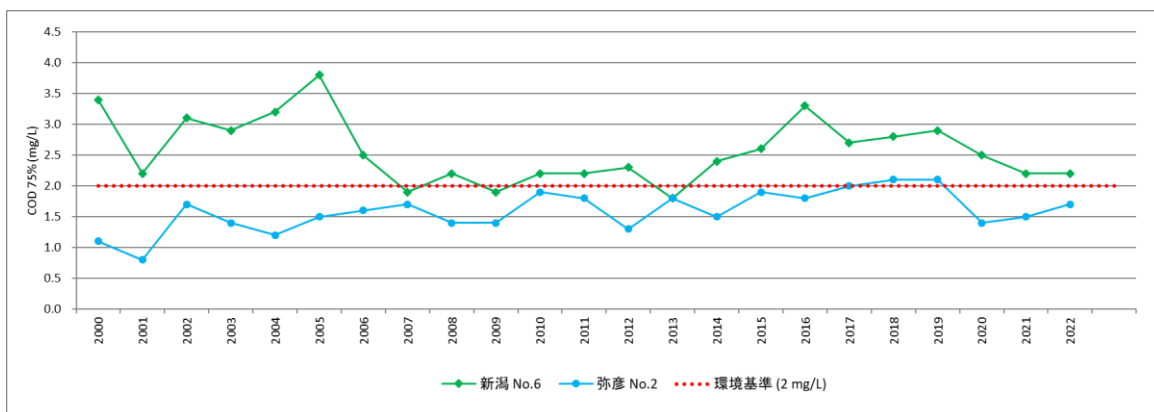


図2 COD75%値の経年推移（2022年度は速報値）

3 有機物指標項目及び栄養塩類の調査について

(1) 調査時期および測定項目について

令和2年度から令和4年度の夏と秋の年2回、計6回採水・調査を行った。

有機物指標項目及び栄養塩類については、採水当日にろ過・分注し、試料水及びフィルター類は冷凍処理し国立環境研究所に送付した。測定項目は、溶存性有機炭素（DOC）、懸濁性有機炭素（POC）、クロロフィルa（Chl.a）、溶存性全窒素（DTN）、溶存性全りん（DTP）、硝酸態窒素（NO₃-N）、亜硝酸態窒素（NO₂-N）、アンモニア態窒素（NH₄-N）、溶存性無機窒素（DIN）、りん酸態りん（PO₄-P）、珪酸塩（Dsi）である。分析方法はⅡ型共同研究報告書「茨城県沿岸海域公用水域常時監視点におけるCODと関連する有機物項目について」（国立環境研究所）¹⁾に記載された方法により、国立環境研究所が実施した。ほか、COD、溶存態COD（D-COD）、塩化物イオン（Cl）については、JIS K 0102により当所で分析を行った。

(2) 各地点の特徴について

今回の調査結果のほか、前課題²⁾の2017年からのデータを加えて解析を行った。

弥彦No.2と新潟No.6のCODについて、溶存態（D-COD）と懸濁態（P-COD）をグラフ（図3）に示した。両地点ともにD-CODの割合が高いが、夏季と秋季の間に明確な違いは認められなかった。CODとしては、特に新潟No.6において夏季に高い傾向が見られた。

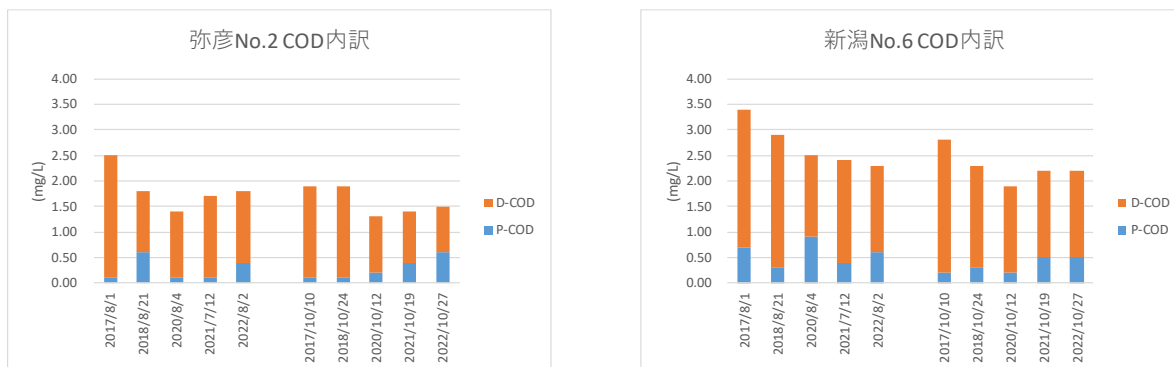


図3 弥彦No.2と新潟No.6のCOD内訳

両地点の P-COD と Chl.a の関係についてグラフ（図 4）に示した。

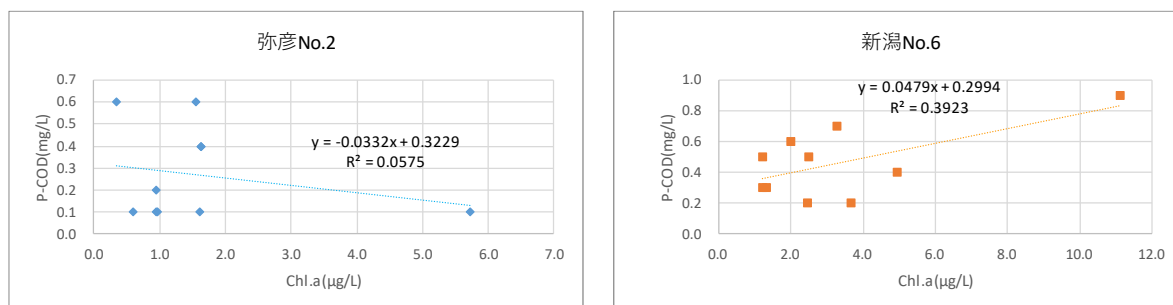


図 4 弥彦 No.2 と新潟 No.6 の P-COD と Chl.a との関係

両地点ともに明確な傾向は見られず、植物プランクトンの増殖による P-COD の増加は明らかではない。新潟 No.6 については弱い正の相関が見て取れるが、1 データの影響が強いため、傾向把握のためにはさらなるデータの蓄積が望まれる。

両地点の D-COD と DOC の関係についてグラフ（図 5）に示した。

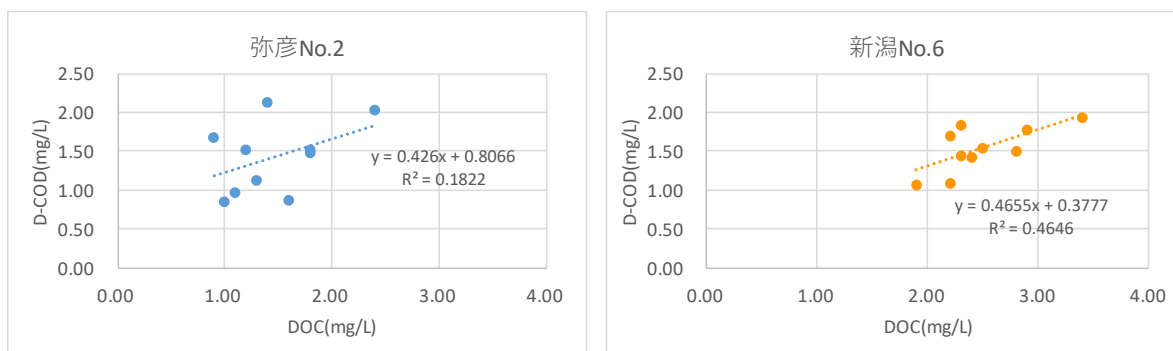
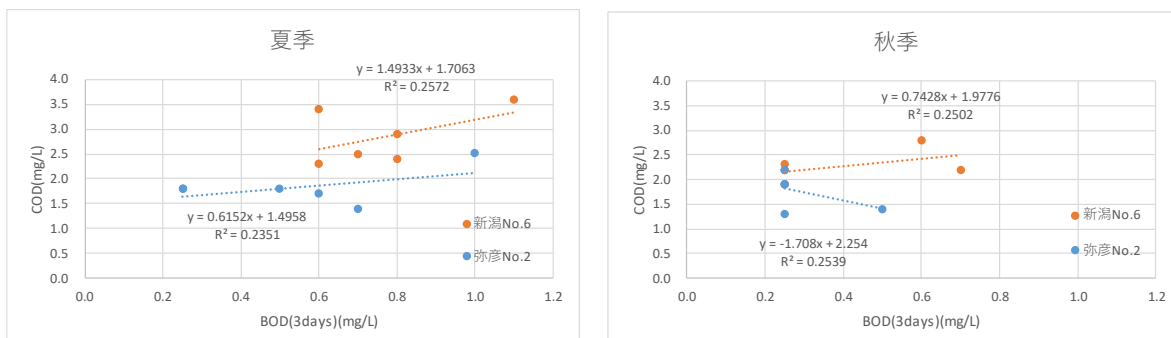


図 5 弥彦 No.2 と新潟 No.6 の DOC と D-COD との関係

両地点ともに前報告²⁾と同様の傾向を示した。弥彦 No.2 には正の相関は認められず、D-COD が高いにも関わらず DOC が低い場合が見られることから、炭素以外に由来する成分が COD に寄与していることが考えられた。新潟 No.6 については正の相関がみられ、COD には炭素成分の寄与が大きいことが考えられた。

BOD(3days)と COD の関係を夏季と秋季に分けてグラフ（図 6）に示した。なお、BOD(3days)が定量下限値（0.5 mg/L）未満となったものは 0.25 mg/L として処理している。



※2022年の秋季はBOD欠測

図6 BOD(3days)とCODの関係

両地点ともに定量下限値付近の値が多くみられ、COD等との関係を整理するには至らなかった。CODを構成する成分の生物分解性については、長期分解試験等の別の手法の検討が必要と考えられた。

両地点の栄養塩類及びChl.aについてグラフ(図7)に示した。



図7 弥彦No.2と新潟No.6の栄養塩類及びChl.aの推移

新潟No.6は弥彦No.2に比べて有機態、無機態ともに高い結果であった。新潟No.6は流入河川からの豊富な供給があることがその理由と考えられた。

溶溶性窒素および溶溶性りんとChl.aの関係を見ると、弥彦No.2において、Chl.aの濃度が溶溶性PO₄-Pの濃度と連動する様子が伺えることから、溶溶性PO₄-Pが植物プランクトンの増殖に関する

制限因子である可能性がある。

弥彦 No.2 においては図 4 の通り、Chl.a の P-COD に対する寄与は明らかではなく、また COD に占める P-COD の割合も高くない（図 3）ことから、近年の COD 漸増傾向に対しての溶存性 PO₄-P の寄与は大きくないと考えられた。

新潟 No.6 は、弥彦 No.2 に比べて溶存性窒素、りんともに高く、特に NO₃-N、PO₄-P が高くなっており、枯渇している様子は見られない。これら栄養塩類と Chl.a に明確な関係は見られないことから、植物プランクトンの増殖に関しては他の要因が制限因子となっていると考えられる。新潟 No.6 の Chl.a は弥彦 No.2 に比べて高いものの、Chl.a の P-COD に対する寄与は明らかではなく（図 4）、また COD に占める P-COD の割合も高くない（図 3）ことから、近年の COD の変動に対しての植物プランクトンの寄与は大きくないと考えられた。

両地点の Cl 濃度（図 8）を示した。

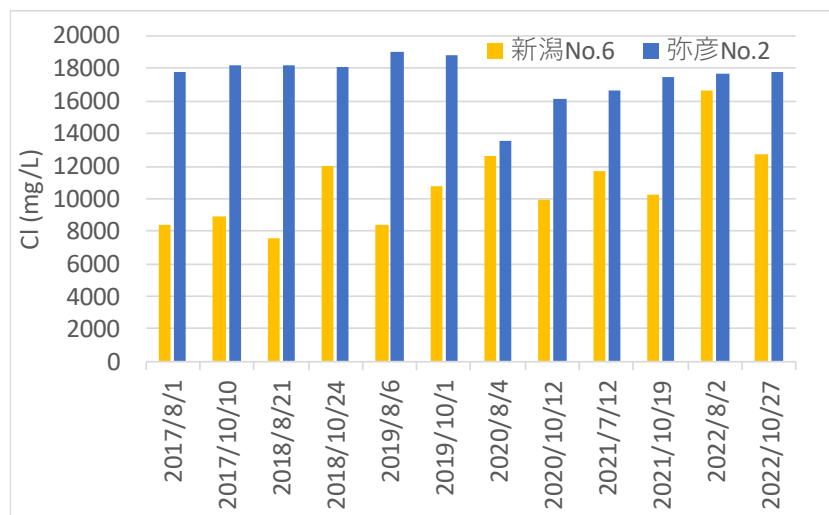


図 8 弥彦 No.2 と新潟 No.6 の Cl 濃度

弥彦 No.2 は 2020 年 8 月に Cl の低下が見られるが、他の調査日には目立った低下は認められなかった。新潟 No.6 は、弥彦 No.2 と比較して Cl の大幅な低下が見られ、またその程度もバラつきがあり、河川水の流入状況が異なる様子であった。新潟 No.6 の近年の COD 変動は、流入河川の水質や流入割合の変動による影響が大きいと考えられた。

4 弥彦 No.2 の長期水質変動解析について

(1) COD の変動要因について

新潟 No.6 の変動は、流入する河川水の影響が大きいと考えられるため、ここでは弥彦 No.2 の変動要因を中心に解析を行った。図 3 に示した通り、夏季に COD が高めとなる傾向が見られたことから、2000 年から 2022 年の期間で、その年の 4 月の結果を 1 とした場合の各調査月の比を算出し、月別に比毎の現れる頻度の割合を集計した（図 9）。夏季を中心に COD の上昇が見られる頻度が高い結果であった。また、10 月も比較的高い値となる割合が大きいことから、今後は季節間の違いを検討するには 4 月と 9 月を比較するのが適当と考えられた。

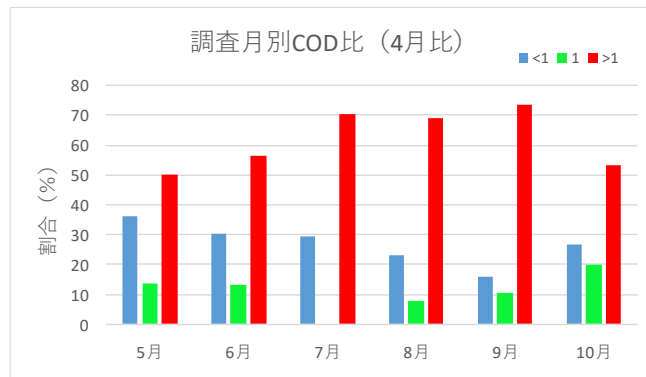


図9 弥彦 No.2 の COD 推移 (4月比)

同期間における調査月別の推移 (図 10) を示した。年により調査月が変更となる場合があり、グラフの途切れる点がある。いずれの調査月も増加傾向を示しているが、特に 7 月と 9 月に特にその傾向が強く見られた。夏季を中心とした COD の強い増加傾向が、近年の COD の漸増傾向の主たる原因と考えられた。

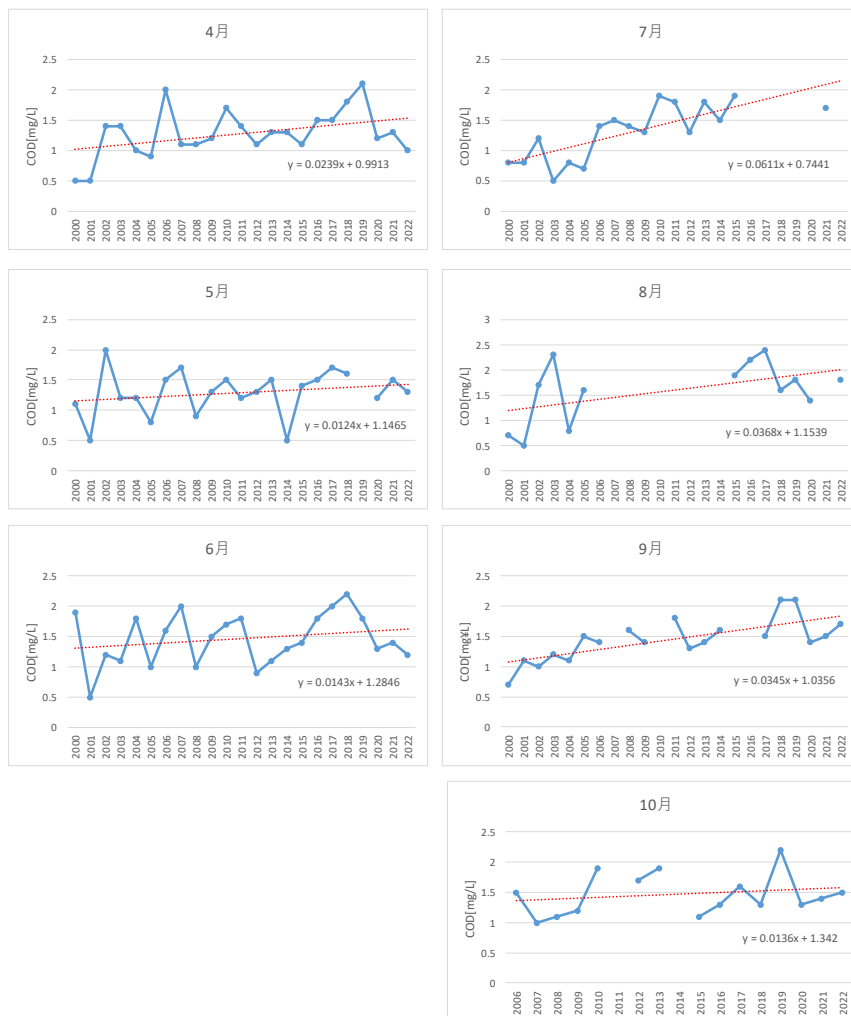


図 10 弥彦 No.2 の調査月別 COD 推移

同期間における水温の推移（図 11）をみると、7月に若干の増加傾向が伺えるが9月には低下の傾向も見られる。COD の増加傾向との関連は明らかではないが、今後も注視していく。

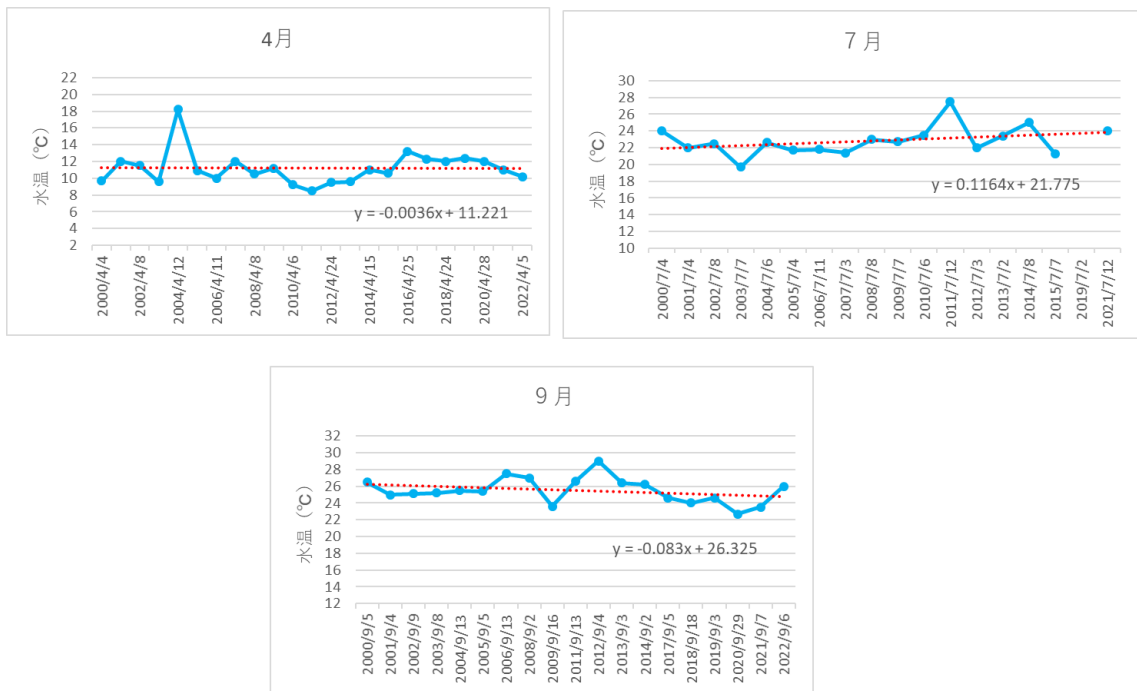


図 11 弥彦 No.2 の月別水温の推移

(2) Cl の低下について

弥彦 No.2 の Cl は図 8 の通り 16000 mg/L から 18000 mg/L の範囲となっているが、2020 年 8 月に顕著に低下が見られた。2000 年から 2022 年の期間の Cl のデータ (N=132) を整理した結果、中央値 (18300 mg/L) に比べて顕著に低いデータが 8 つあり、その範囲は 11900 mg/L から 15700 mg/L であった。これらは四分位法では外れ値となる値であった。ここから、通常ではない Cl の低下、つまり不定期な陸水の流入があるということが示唆された。データ数が少ないため COD との関係など詳細な解析は困難であったが、2020 年 8 月 4 日に Cl が 13600 mg/L となった際、Dsi が特徴的に高かった (図 12)。

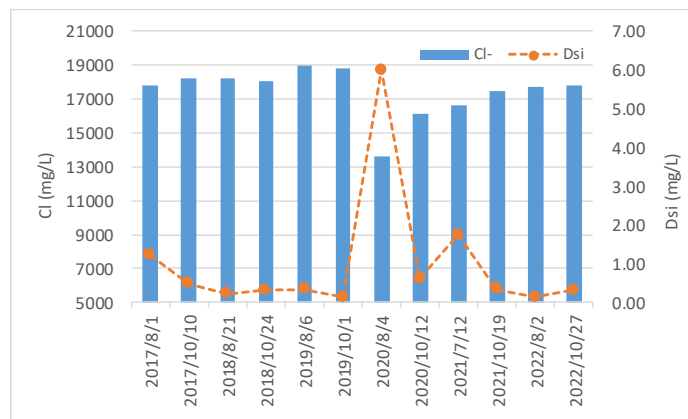


図 12 弥彦 No.2 の Cl と Dsi 濃度の推移

弥彦 No.2 近傍に常時流入する大きな河川はないが、西南に洪水対策等のために整備された放水路がある。この放水路は新潟市西蒲区周辺の雨水等を直接海に排出するもので、放流口のすぐ近傍に弥彦 No.3 が位置している（図 13）。2000 年から 2022 年の期間の弥彦 No.3 の Cl (N=109) を整理した結果、弥彦 No.2 と同様に顕著に低いデータがより多く見られ（図 14）、その平均値は弥彦 No.2 と比較して有意($p<0.05$)に低く、陸水の影響をより強く受けていると考えられた。

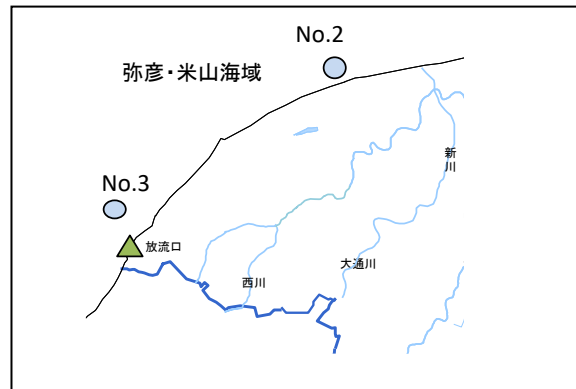


図 13 弥彦 No.2 と No.3 および放流口の位置図

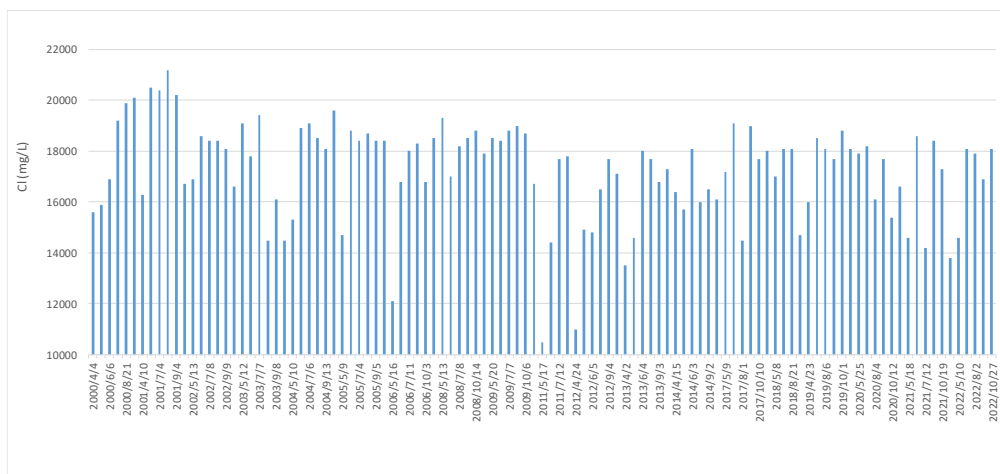


図 14 弥彦 No.3 の Cl 濃度

5 まとめと今後の展開

新潟県沿岸海域の 2 地点について、COD の基準値超過と漸増傾向の原因を探るため、有機物指標及び関連する栄養塩類等の調査を行い、これまでの測定結果を加えた解析を行った。その結果、以下のことが分かった。

- 弥彦 No.2、新潟 No.6 とともに、COD に占める割合は D-COD が多く、P-COD および Chl.a の COD への寄与は大きくはない。
- D-COD と COD の関係から、新潟 No.6 においては D-COD は炭素成分の寄与が大きいと見られたが、弥彦 No.2 においては炭素以外の成分の寄与があるものと見られた。
- 弥彦 No.2、新潟 No.6 とともに、BOD(3days)の値が低く、COD との関係は明らかではなかった。今後は BOD の静置期間を延長するなどの工夫が必要と考えられた。

- ・栄養塩類については、弥彦 No.2 に比べて新潟 No.6 は豊富であり、河川からの供給が考えられた。Chl.a との関係を見ると、弥彦 No.2 においては PO₄-P が植物プランクトン増殖の制限因子となっている様子が伺えた。
- ・新潟 No.6 の Cl から、河川の流入は常にあるにせよ、その流入割合は大きく変動していることがわかり、この変動が近年の COD の変動に大きく寄与していると考えられた。
- ・弥彦 No.2 の月別の水質変動解析から、7月の COD の上昇が顕著であることがわかった。
- ・弥彦 No.2 においては不定期な Cl の低下がみられたことから、近傍の放水路からの不定期の排水の影響が考えられた。

新潟県は7月を中心に降水量が多く³⁾、近年では1時間降水量が50mmを超える雨の発生回数が増えていると見られている⁴⁾。悪天候時等に海域へ放流する放水路が、弥彦 No.3、No.2 の不定期の Cl の低下や、弥彦 No.2 の7月を中心とした COD の増加傾向に影響している可能性が考えられる。その放流水の水質や水量などについては不明な部分が多いため、今後実態について調査していきたい。また、その影響の有無については、より西南に位置する弥彦 No.4 の状況等を加味して評価する必要があると思われた。

6 参考資料

- 1) 「茨城県沿岸海域公共用水域常時監視点における COD と関連する有機物項目について」独立行政法人 国立環境研究所 牧 秀明，平成 26 年度～平成 28 年度，Ⅱ型共同研究報告書
- 2) 「新潟県内沿岸海域公共用水域常時監視点における有機物指標項目及び関連する栄養塩類について」新潟市衛生環境研究所 藤田裕美，松田哲明，平成 29 年度～令和元年度，Ⅱ型共同研究報告書
- 3) 新潟地方気象台ホームページ 新潟県の大雨
(ア) <http://www.data.jma.go.jp/niigata/menu/bousai/heavyrain.html>
(イ) 令和 5 年 3 月 2 日閲覧
- 4) 新潟県の気候変動「日本の気候変動 2020」(文部科学省・気象庁)に基づく地域の観測・予測情報リーフレット 令和 4 年 3 月 新潟地方気象台・東京管区気象台

富山県沿岸海域におけるCODと関連項目と水質の長期変動について

富山県環境科学センター 中易 佑平

1. はじめに

富山県の年平均降水量は約2,500 mmと豊富で、富山湾に大小様々な河川を通じて有機物や栄養塩類を供給している。富山湾の環境基準点におけるCODは年間評価で環境基準を100%達成しているが、夏季を中心に内部生産によるCODの環境基準値の超過が確認されている。¹⁾ 本調査では、前Ⅱ型共同研究「海域における水質管理に関わる栄養塩・底層溶存酸素状況把握に関する研究」に引き続き、現地調査と採水、CODと有機物指標及び栄養塩類を測定し、項目間の関係について検討し、過去38年間の公共用水域調査結果を元に長期変動傾向解析を行った。

2. 調査地点及び測定方法

2. 1 調査地点

富山湾の環境基準点である神通5「J-5」(図1)を調査地点とした。本地点は神通川河口海域中央に位置し水深約200 mである。

調査は2020年8月から2022年9月にかけて夏季3回、冬季2回の計5回、公共用水域の常時監視調査と同時に行った。

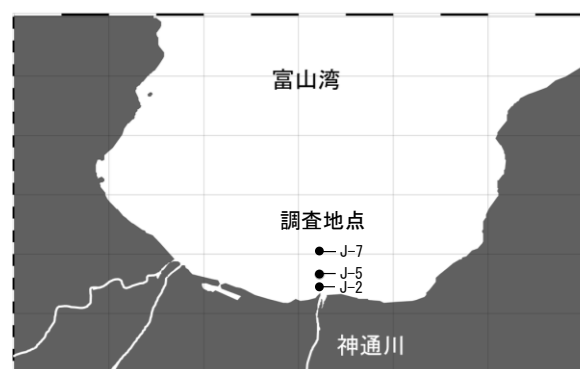


図1 調査地点

2. 2 観測及び測定方法

2. 2. 1 直読式総合水質計による観測

直読式総合水質計による水温、塩分、溶存酸素量(DO)の鉛直分布の観測を、船上から海中に垂下して表層から水深100 m付近まで行った。

2. 2. 2 採水、DOの消費速度の測定及びCODと関連する有機物項目の測定

試料は表中層(水深0.5 m層及び水深2 m層の海水を等量混合)及び10 m層を採取した。採水した海水はその日のうちに分注、ろ過を行った。BODは未ろ過とろ過した海水をそれぞれ曝気したのちDOを滴定で測定し、さらに20℃で暗所にて3日、5日、7日及び10日間培養したもののうち、ろ過を行わなかったものをBOD3、BOD5、BOD7及びBOD10、ろ過を行ったものをD-BOD3、D-BOD5、D-BOD7及びD-BOD10として求めた。

CODと溶存性COD(D-COD)は測定し、懸濁性COD(P-COD)はCODとD-CODの差から求めた。懸濁性有機炭素(POC)は海水をろ過したろ紙を、溶存性有機炭素(DOC)はろ過した海水を冷凍し、栄養塩類は、硝酸性窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸性窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、アンモニア性窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)、溶存性全窒素(DTN)、りん酸性りん($\text{PO}_4\text{-P}$)、溶存性全りん(DTP)及びケイ酸(SiO_2)を、ろ過、分注した海水とろ紙を冷凍して国立環境研究所に送付し、「茨城県沿岸海域公共用水域常時監視点におけるCODと関連する有機物項目について」に記載されてい

る方法により国立環境研究所が実施した。

2. 2. 3 沿岸環境における栄養塩の変遷状況把握

2020年8月と2021年8月の試料を用いて溶存性有機態窒素（DON）の分解・溶存性無機態窒素（DIN）への変換評価試験を実施した。試験の方法は、海水をガラス繊維フィルターGF/Cでろ過したものを三角フラスコに入れてアルミ箔で遮光して約20℃で0、1、2、4、6及び8週間放置したものの各態窒素の測定を行った。なお、DONはDTNからDINを差し引いて算定した。

2. 3 公共用水域の常時監視データを用いた長期変動解析

神通川河口海域の神通2「J-2」、神通5「J-5」、神通7「J-7」（図1）を対象に、公共用水域調査の1981年4月から2019年3月までの年12回38年間の水温、DO、CODの季節別のトレンド解析を行った。解析には統計数理研究所で開発されたTIMSACに含まれるdecomp関数を用いた。

3. 結果

3. 1 直読式総合水質計による鉛直分布の観測結果

直読式総合水質計による水温、塩分及びDOの観測結果を図2に示す。水温は2020年8月と2021年8月の水深約2 mで最も高く、水深が深くなるにつれて低くなる傾向が見られた。2022年9月には水深約20 mで最も高かった。水温躍層は2020年8月には水深約60 mから、2021年8月には水深約50 mから、2022年9月には水深20 mから見られた。冬季の水温は夏季に比べて表層から下層まで変化が小さく、観測した水深100 m付近まで鉛直混合していることが確認できた。塩分は夏季の表層が最も

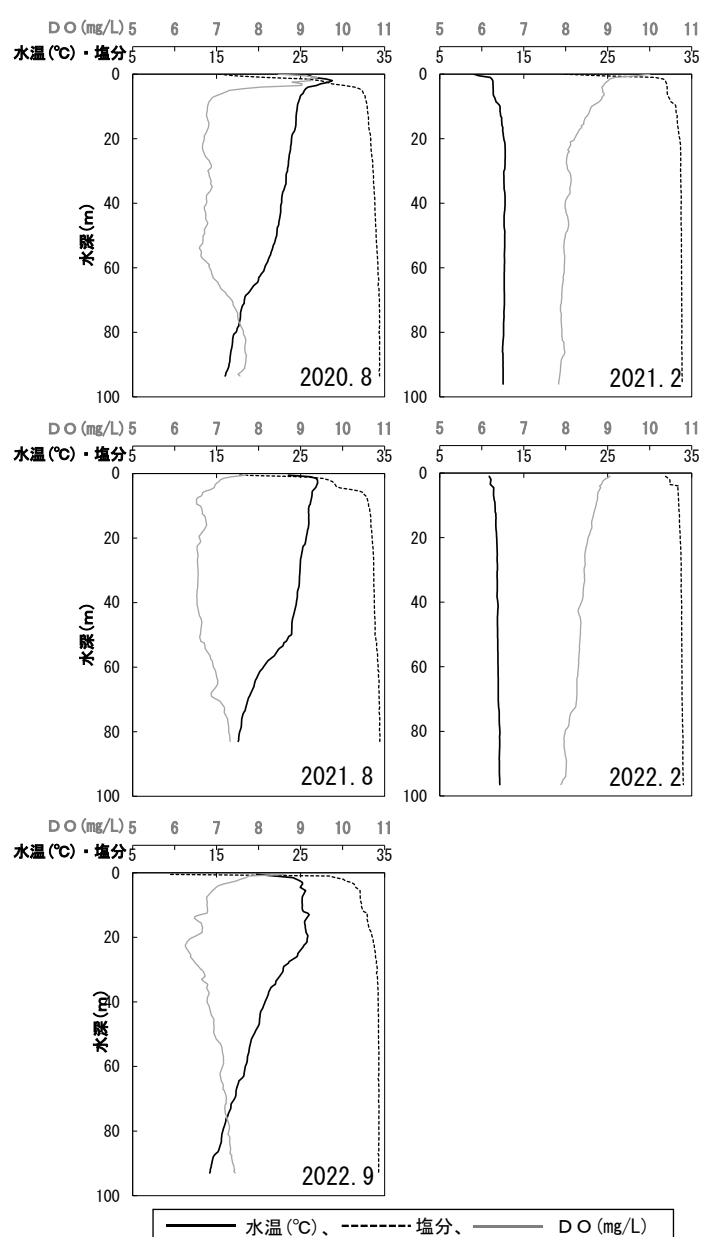


図2 神通川河口海域（J-5）における水温、塩分及びDOの鉛直分布

低く、水温躍層以深では33.8～34.4と一定であった。冬季は水深20 m以深では33.6～34.0と一定であったが夏季よりも低い値であった。DOは2022年9月に水深20～25 m付近 (6.2 mg/L) で最も低かったが、本調査で貧酸素状態 (DO: 4.0 mg/L以下) は確認されなかった。また、夏季の水温躍層以深では上昇傾向が見られた。

これらの結果から、前回の調査²⁾と同様に夏季に水温躍層が形成され、冬季には鉛直混合により水深90 m以深に酸素が供給されていると考えられる。そして、冬季に供給された酸素が夏季まで水温躍層以深に存在していると考えられる。

3. 2 有機物関連項目

3. 2. 1 有機物関連項目

気温、水温、透明度及び塩化物イオン濃度を表1、COD関連項目を表2に示す。表1から、水温は8月の表中層は10 m層より高く、9月は表中層より10 m層が高かった。冬季は表中層と10 m層の温度差は小さかった。塩化物イオン濃度は表中層と10 m層の両方で夏季の方が冬季より低く、調査地点の夏季の水質は河川水の影響を強く受けていると考えられる。

表2から、CODとTOCに占める溶存性の有機物であるD-CODとDOCの割合は大きい傾向があった。また、CODが高いときに塩化物イオン濃度(表1)が低くなる傾向があり、河川水の流入量がCODに影響していることが確認できた。

表1 気温・水温・透明度・塩化物イオン濃度の測定結果

地点	時季	採水層	採水年月	気温 ℃	水温 ℃	透明度 m	塩化物イオン濃度 mg/L
神通5 J-5	夏季	表中層	2020/08/06	26.0	27.3	2.0	11,700
			2021/08/27	25.3	27.0	7.0	14,900
			2022/09/29	21.2	21.3	5.0	13,800
		10m層	2020/08/06	-	24.7	-	18,300
			2021/08/27	-	26.1	-	18,100
			2022/09/29	-	24.8	-	17,200
	冬季	表中層	2021/02/08	2.1	10.3	5.0	15,500
			2022/02/04	2.1	10.3	10.0	17,200
		10m層	2021/02/08	-	10.8	-	18,500
2022/02/04	-		10.1	-	19,000		

表2 COD関連項目の測定結果

(単位: mg/L)

地点	時季	採水層	採水年月	COD	D-COD	P-COD (COD-DCOD)	TOC (DOC+POC)	DOC	POC	Chl-a μg/L
神通5 J-5	夏季	表中層	2020/08/06	2.8	1.8	1.0	2.1	1.1	0.95	2.4
			2021/08/27	1.9	1.5	0.4	1.1	0.79	0.30	3.2
			2022/09/29	2.0	1.4	0.6	2.2	1.8	0.45	4.0
		10m層	2020/08/06	1.6	1.1	0.5	1.2	0.97	0.25	1.1
			2021/08/27	1.7	1.5	0.2	0.94	0.76	0.18	1.4
			2022/09/29	1.7	1.4	0.3	1.9	1.8	0.18	0.86
	冬季	表中層	2021/02/08	1.3	1.2	0.1	0.98	0.74	0.24	1.2
			2022/02/04	1.6	1.2	0.4	0.85	0.69	0.15	1.3
		10m層	2021/02/08	1.3	1.0	0.3	1.0	0.82	0.20	1.2
			2022/02/04	1.5	1.1	0.4	0.68	0.53	0.15	1.2

3. 2. 2 栄養塩類

栄養塩類濃度を表3に示す。各形態別の窒素は表中層が10 m層より高い傾向が見られ、河川からの供給が窒素の濃度に影響していることが考えられる。また、冬季の方が夏季より栄養塩類濃度が高くなる傾向が見られた。特に冬季のPO₄-Pは夏季に比べて表中層と10 m層の両方で高かった。これは、冬季に植物プランクトンによるPO₄-Pの消費が減ったことや、鉛直混合による下層からの供給があったことなどの要因が考えられる。

表3 栄養塩類の測定結果

(単位：mg/L)

地点	時季	採水層	採水年月	NO ₃ -N	NO ₂ -N	NH ₄ -N	DIN	DTN	PO ₄ -P	DTP	SiO ₂
神通5 J-5	夏季	表中層	2020/08/06	0.003	0.001	0.008	0.013	0.16	<0.001	0.005	1.7
			2021/08/27	0.040	0.003	0.034	0.078	0.21	<0.001	0.006	1.5
			2022/09/29	0.050	0.021	0.003	0.075	0.21	0.001	0.006	2.1
		10m層	2020/08/06	0.002	<0.001	0.012	0.015	0.14	0.001	0.005	0.30
			2021/08/27	0.002	<0.001	0.009	0.012	0.14	<0.001	0.005	0.34
			2022/09/29	0.005	0.011	<0.001	0.018	0.14	<0.001	0.004	0.28
	冬季	表中層	2021/02/08	0.16	0.005	0.086	0.25	0.42	0.010	0.014	2.5
			2022/02/04	0.10	0.003	0.061	0.16	0.32	0.007	0.011	1.4
			2021/02/08	0.060	0.003	0.009	0.073	0.22	0.007	0.013	0.60
		10m層	2021/02/08	0.060	0.003	0.009	0.073	0.22	0.007	0.013	0.60
			2022/02/04	0.053	0.002	<0.001	0.055	0.18	0.006	0.009	0.37
			2022/02/04	0.053	0.002	<0.001	0.055	0.18	0.006	0.009	0.37

3. 2. 3 BOD関連項目

BODの測定結果を表4に示す。夏季の表中層でBODが高くなる傾向が見られた。10 m層と冬季では0.5 mg/L未満～0.6 mg/Lであった。D-BODは2020年8月の表中層を除き0.5 mg/L未満であった。BOD10とCODを比較したところ相関があり(図3)、酸素消費量として適当な値を示していると考えられた。

表4 BODの測定結果

(単位：mg/L)

地点	時季	採水層	採水年月	BOD3	BOD5	BOD7	BOD10	D-BOD3	D-BOD5	D-BOD7	D-BOD10
神通5 J-5	夏季	表中層	2020/08/06	1.0	1.5	1.7	2.0	<0.5	0.5	0.5	0.7
			2021/08/27	<0.5	0.5	0.6	0.8	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
			2022/09/29	0.5	0.7	0.8	1.0	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
		10m層	2020/08/06	<0.5	<0.5	<0.5	0.6	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
			2021/08/27	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
			2022/09/29	<0.5	0.5	0.5	0.6	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
	冬季	表中層	2021/02/08	<0.5	<0.5	0.6	0.6	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
			2022/02/04	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
			2021/02/08	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
		10m層	2021/02/08	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
			2022/02/04	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
			2022/02/04	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

夏季の表中層ではBODとD-BODには明らかな差が見られ、D-BODは大部分の検体で0.5 mg/L未満であった。COD関連項目の測定結果でD-CODがP-CODより大きな値となっていたことから、D-BODが0.5 mg/L未満となった原因として考えられるのは、ろ過によって懸濁性の有機物が除かれたほかに、有機物を分解して酸素を消費する微生物も取り除かれた可能性がある。

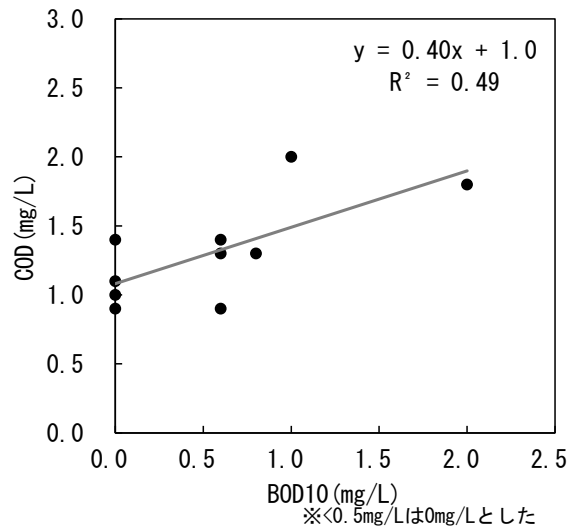


図3 BOD10とCODの関係

3. 2. 4 沿岸環境における栄養塩の変遷状況把握

各形態別の態窒素の分解試験結果を図4に示す。2020年8月の表中層では1週目にNH₄-Nが生成し、8週目でNH₄-NはNO₂-Nに硝化されていた。10 m層では6週目にNO₂-Nの生成がみられたことから4週目から6週目の間にNH₄-Nが生成していたことが考えられる。2021年8月の表中層では6週目でNH₄-Nの大部分がNO₂-Nに硝化され、8週目にはNO₂-NがNO₃-Nに硝化されていた。10 m層では2週目から4週目の間にNH₄-Nが生成し、NO₂-Nに硝化され、8週目まで

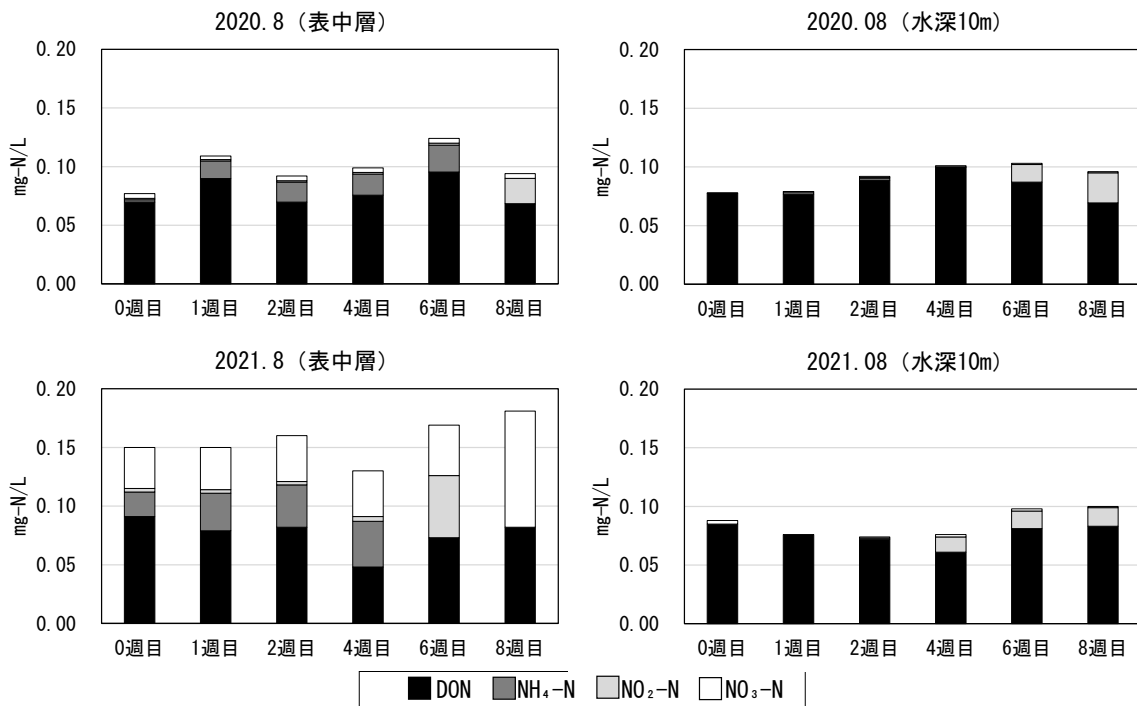


図4 各態窒素の分解試験結果

NO₂-Nの状態が存在していた。DONのDINへの変換は表中層のほうが10 m層よりも早期に起きていることが確認できたが、DONのDINへの変換量はDONの総量の1～2割程であった。

3. 2. 5 公共用水域の常時監視データを用いた長期変動解析結果

長期変動解析結果を図5に示す。水温は全地点で1986年から2000年頃まで約0.5~1.5℃増加し、2016年頃まで緩やかに減少しており、変化量は河川に近い地点で大きい傾向があった。DOは1991年から2000年頃にかけて若干減少し、2000年以降は2019年まで緩やかに増加していた。1999年頃からJ-5がJ-2より高くなる傾向があった。CODは1999年をピークに増加し、その後は減少していた。2009年頃からはJ-5がJ-2より高くなる傾向があった。

水温の変化は、DOの飽和溶存酸素量や、CODの増加の要因である植物プランクトンの増殖に関係しており、これらが連動している可能性は考えられるが、河川水の流入量などの要因や調査の時刻など的人為的な要因が項目に与える影響についても検証する必要がある。

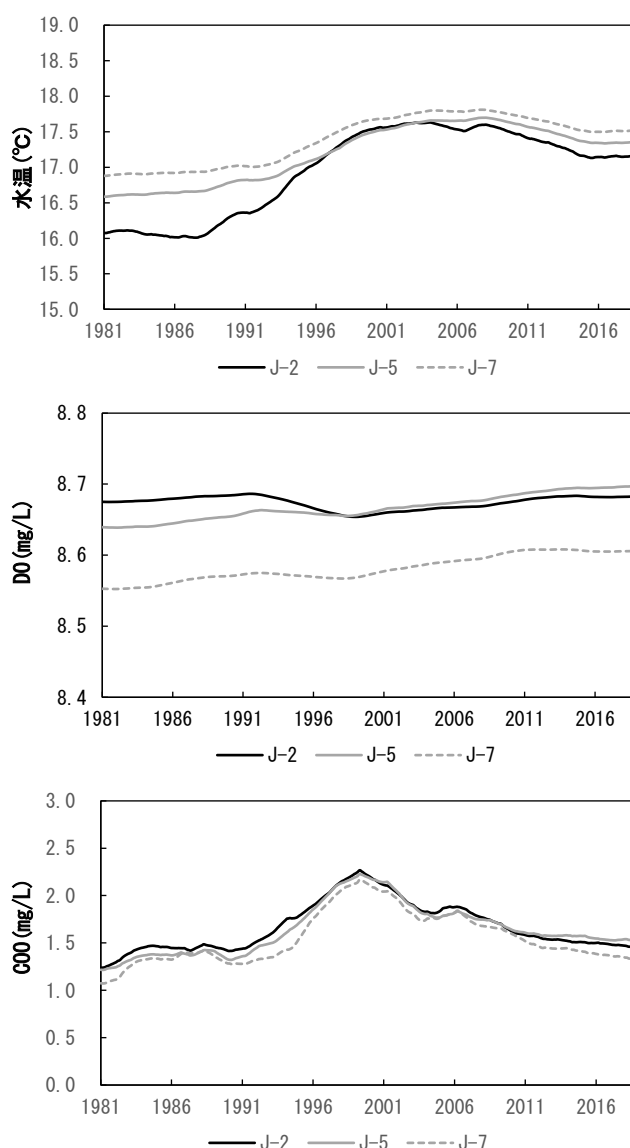


図5 長期変動解析結果

4. まとめ

富山湾沿岸海域において一連の調査・採水を行ったところ、次のことが分かった。

- ・ 前回の報告²⁾と同様に、冬季に鉛直混合で供給された酸素が、夏季の水温躍層以深に消費されずに存在している可能性がある。
- ・ BODによる海域の有機物分解の酸素消費量の評価は、懸濁態と溶存態の存在状況によってCODとは異なった結果となった。一方、各形態別の態窒素の分解試験結果では、大部分のDONが分解されずに8週間存在していた。
- ・ 水温とDO、CODの長期変動は、1999年から2005年頃に特徴のあるピークが見られたことから水温と各成分の長期変動は連動している可能性があるが、沿岸海域の他の地点との比較や、河川流量など他の成分との関係についても詳細に解析する必要がある。

5. 参考資料

- 1) 藤島ら「富山湾沿岸部の水質環境について（Ⅱ）—富山湾沿岸部でのCTD 観測結果と表層の水質—」富山県環境科学センター年報第44号，87-94，2016
- 2) 中易 富山県沿岸海域におけるCODと関連する有機物項目について，地方公共団体環境研究機関等と国立環境研究所との共同研究（Ⅱ型）「海域における水質管理に係わる栄養塩・底層溶存酸素状況把握に関する研究」報告書，45-50，2019

石川県沿岸海域公共用水域環境基準点における栄養塩類と CODに関連する有機物項目について(第4報)

金曾将弘*・堅田勉*・前田空人**・重吉祐生*・原田由美子*

1 はじめに

本研究は、前Ⅱ型共同研究「沿岸海域環境の診断と地球温暖化の影響評価のためのモニタリング手法の提唱」(平成23年(2011年)-25年(2013年))、「沿岸海域環境の物質循環現状把握と変換解析に関する研究」(平成26年(2014年)-28年(2016年))及び「海域における水質管理に係わる栄養塩・底層溶存酸素量状況把握に関する研究」(平成29年(2017年)-令和元年(2019年))の3課題に引き続き、「沿岸海域における新水質環境基準としての底層溶存酸素(貧酸素水塊)と気候変動の及ぼす影響把握に関する研究」(令和2年(2020年)-4年(2022年))として、地方環境研究所と国立環境研究所が共同で実施しているものである。

石川県では閉鎖性海域の七尾湾と、日本海に面している加賀沿岸海域の白山市笠間沖の2地点で夏季と冬季の年2回採水し、栄養塩類と化学的酸素要求量(COD)に関連する有機物項目について平成23年(2011年)より調査を行っている。本報では、令和2年(2020年)からの測定データを追加した12年間分のデータを用いて、項目毎の関係や季節変化の検討を行ったほか、石川県沿岸海域の水質変化の概況について検討したので報告する。

2 調査地点, 測定・分析方法

2.1 調査・採水時期

平成23年(2011年)8月~令和4年(2022年)11月の間に夏季と冬季の年2回、計24回行った。夏季については8月、冬季については平成23年度(2011年度)及び24年度(2012年度)は3月、それ以降は11月の採水とした。また、水温等の変化については、公共用水域及び地下水の水質測定結果報告書(石川県)等から引用した、水質汚濁防止法に基づく常時監視測定調査の結果(昭和56年(1981年)~令和3年(2021年))を使用した。

2.2 調査地点

図1に示す県北東部に位置する七尾南湾中央部と県南西部の加賀沿岸海域の白山市笠間沖の2地点の表層で採水を行った。これら2地点は公共用水域の水質環境基準点であり、その類型は共にA(COD 2 mg/L)である。¹⁾ また、令和2年(2020年)8月及び9月に、七尾湾及びその沿岸海域において、水質鉛直分布を調査した。測定地点について、8月は公共用水域水質常時監視地点(図2)とし、9月は図3とした。

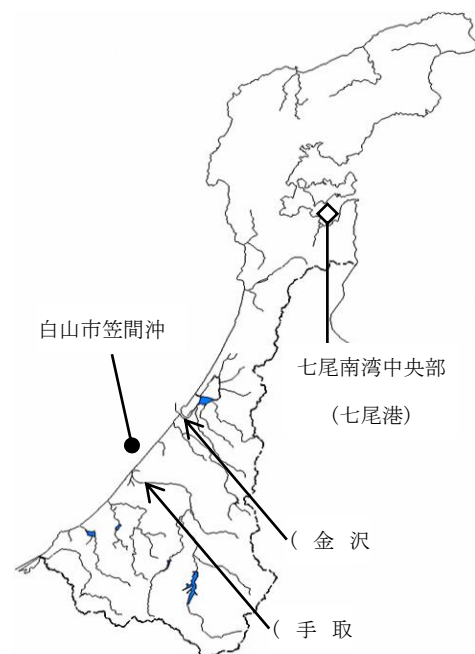


図1 調査地点

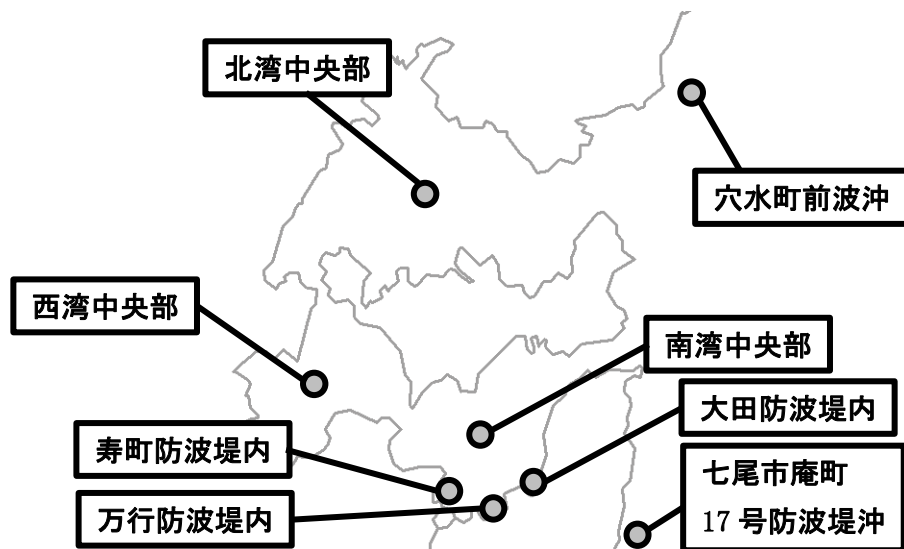


図2 七尾湾及びその沿岸海域における水質鉛直分布調査地点(8月)

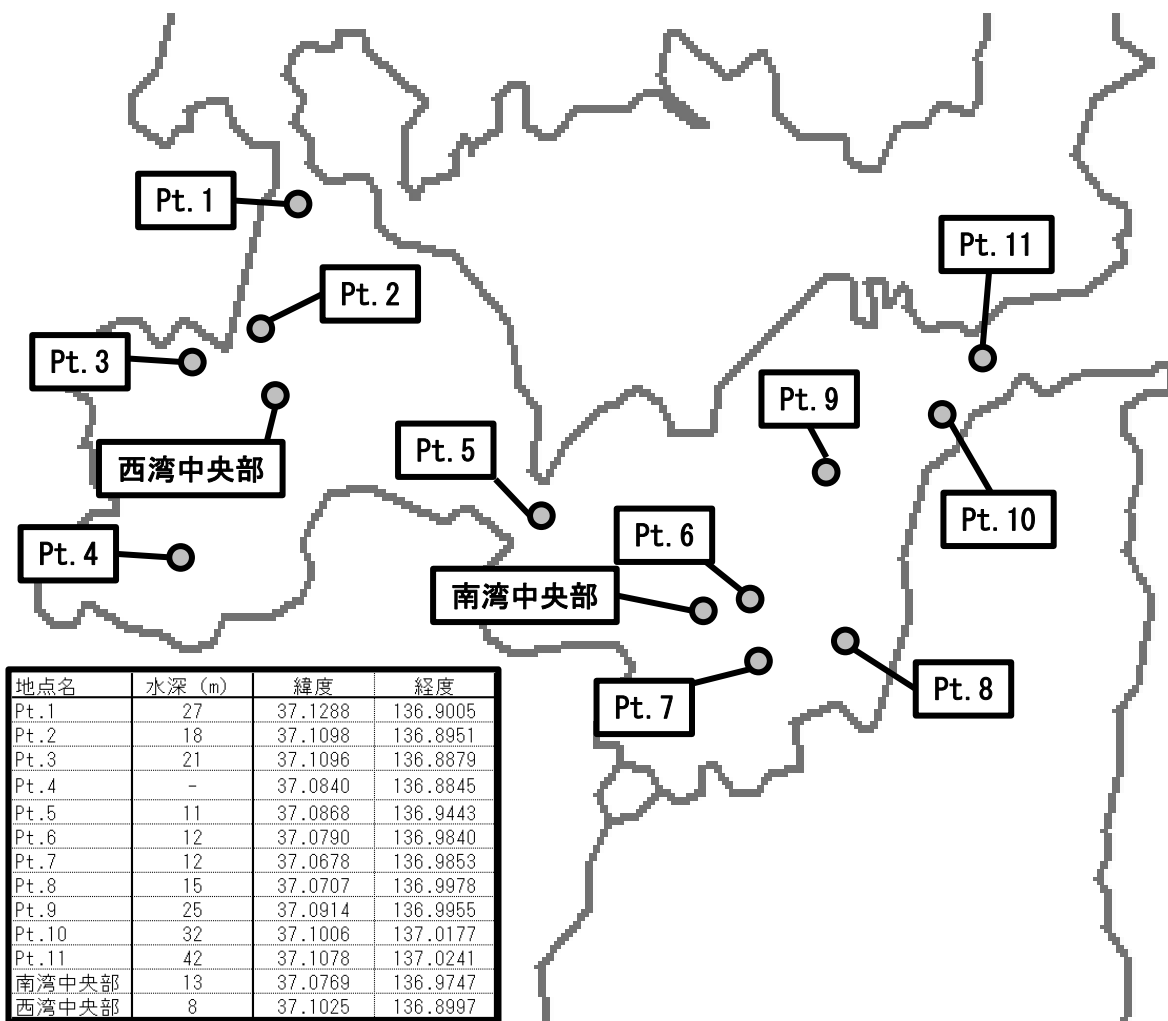


図3 七尾西湾及び南湾における水質鉛直分布調査地点(9月)

2.3 分析方法

採取した海水は、その一部を、450°Cで4時間焼成処理したガラス繊維フィルターを用いて、その日の内にろ過・分注した。クロロフィル a (Chl a)の分析用には47 mm径のガラス繊維フィルターGF/Cを用い、そのろ液は溶存性成分の分析用とした。懸濁性有機炭素(POC)の分析用には25 mm径のガラス繊維フィルターGF/Cを用いてろ過した。

これらの試水・フィルター類は冷凍後に国立環境研究所へ送付した。生物化学的酸素要求量(BOD)を除く項目の分析はⅡ型共同研究報告書に記載された方法²⁾により国立環境研究所が分析した。BODは当センターにおいて、JIS法に従って未ろ過海水を用いて測定を行った。ただし、フラン瓶による培養は5日間ではなく3日間経過した時点で溶存酸素量(DO)を滴定して求め、消費されたDOをBOD3として求めた。

平均値の有意差の検定はMicrosoft社製Excel 2016を用いて、Welchのt検定により行った。有意水準は5%とした。

水質鉛直分布は、多項目水質計(HACH社製 Hydrolab DataSonde DX5)を用いて水温、塩分、DO、Chl a、濁度の鉛直分布を測定した。測定値のうち、濁度が100を超えた以降の深さのデータは底質の巻き上がりの影響が懸念されるため結果から除外した。

トレンドの抽出はR言語(version: 4.1.2)においてtimsac package (version: 1.3.7)³⁾を利用しdecomp関数により行った。トレンド抽出に係る数値の取り扱いについては、「環境基本法に基づく環境基準の水域類型の指定及び水質汚濁防止法に基づく常時監視等の処理基準について」(平成13年5月31日付け環水企第92号)を踏まえ、定量下限値未満の場合は定量下限値として処理した。データは月間値として処理した(同一月に複数の採水が行われていた場合は、月間平均値を用いた)。水素イオン活量 a_{H} は記録されたpHに対して、 $\text{pH} = -\log_{10}(a_{\text{H}})$ の関係により求めた。トレンド抽出の為のパラメータ(Trend order, AR order 及び Seasonal order)は、地点及び項目ごとに赤池情報量基準(Akaike's information criterion: AIC)が最も小さくなるものを選んだ。探索範囲はtrend order = 1~3, AR order = 1~4, seasonal order = 0~2とした。また、numerical differencing については、2 sidedとした。

クラスタへの分割は、python (version: 3.9.13)のtslearn package (version: 0.5.2)⁴⁾を利用しk-means++法により行った。

3 結果と考察

3.1 採水調査結果

3.1.1 栄養塩類

本調査で採取した試料の栄養塩類の硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)、溶存性無機窒素(DIN, $\text{NO}_3\text{-N} \cdot \text{NO}_2\text{-N}$ 及び $\text{NH}_4\text{-N}$ の和)、溶存性全窒素(DTN)、溶存性無機態リン(DIP, リン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)), 溶存性全リン(DTP)及び珪酸塩(シリカ: SiO_2)の平成23年(2011年)夏季から令和4年(2022年)冬季までの測定結果の平均値と標準偏差を表1に示す。なお検出下限値未満の値は0として処理した。

地点間の比較では、 SiO_2 などで白山市笠間沖の方が七尾南湾中央部より高い傾向が見られた。特にDTNに対するDINの割合の平均値を季節別で見ると、白山市笠間沖では夏季が21%、冬季が33%であったのに対し、七尾南湾中央部では夏季が5%、冬季が4%となり、同一の季節間で統計的

に有意差がみられた。DTPに対するDIPの割合の平均値についても、白山市笠間沖では夏季が38%、冬季が54%であったのに対し、七尾南湾中央部では夏季が17%、冬季が28%と同様に同一の季節間で統計的に有意差がみられた。これは、閉鎖性水域である七尾南湾においては白山市笠間沖に比べプランクトンが増殖しやすく、無機態の窒素及びリンが消費され有機態に変換されやすいことを反映している可能性があるが、流入する窒素及びリンの形態が違う可能性もあり原因は判然としない。

表1 白山市笠間沖と七尾南湾中央部における季節別の栄養塩類

地点	時季	NO ₃ -N	NO ₂ -N	NH ₄ -N	DIN	DTN	DIN/DTN
白山市 笠間沖	夏季	0.041 (0.036)	0.003 (0.004)	0.007 (0.007)	0.051 (0.038)	0.24 (0.09)	0.21 (0.13)
	冬季	0.099 (0.091)	0.007 (0.005)	0.016 (0.021)	0.122 (0.108)	0.35 (0.17)	0.33 (0.23)
七尾南湾 中央部	夏季	0.004 (0.010)	0.001 (0.002)	0.004 (0.007)	0.010 (0.012)	0.21 (0.08)	0.05 (0.05)
	冬季	0.006 (0.009)	0.001 (0.002)	0.001 (0.002)	0.008 (0.011)	0.24 (0.11)	0.04 (0.04)

地点	時季	DIP	DTP	DIP/DTP	SiO ₂
白山市 笠間沖	夏季	0.006 (0.005)	0.014 (0.007)	0.38 (0.26)	1.54 (0.76)
	冬季	0.012 (0.010)	0.022 (0.017)	0.54 (0.23)	1.99 (1.57)
七尾南湾 中央部	夏季	0.002 (0.002)	0.013 (0.007)	0.17 (0.11)	0.86 (0.77)
	冬季	0.003 (0.002)	0.011 (0.005)	0.28 (0.17)	0.82 (0.61)

(注：商を除き単位は全て mg/L. 括弧内の数字は不偏標準偏差)

また、季節間の比較では笠間沖で平均値について冬季のほうが全体的に高い結果となっているが、統計的な有意差は確認できなかった。七尾湾についても平均値について統計的な有意差は確認できず、季節変動の有無を把握するためには更なるデータの蓄積が必要であると思われる。

3.1.2 BOD 関連項目

本調査で採取した試料のBOD及び関連項目の溶存性有機炭素(DOC)、POC、DOC+POC及びChl aの平成23年(2011年)夏季から令和4年(2022年)冬季までの測定結果の平均値と標準偏差を表2に示す。

2地点間について比較すると、BOD3及びChl aは夏季、冬季ともに七尾南湾中央部が白山市笠間沖よりも高い結果であったが、統計的な有意差は確認できなかった。DOCは七尾南湾中央部の方が白山市笠間沖より高く、POCは白山市笠間沖の方が七尾南湾中央部より高い傾向が見られ、夏のDOC同士、冬のPOC同士は有意差があった。DOC+POCは有意差は確認できなかった。

季節間について比較すると、両地点ともにBOD3は夏季、Chl aは冬季に平均値が高い結果であ

ったが、有意差は確認できなかった。この差が栄養塩類の濃度などによるものなのか、それとも偶然誤差であるのかについては更なるデータの蓄積が必要である。その他の項目については、七尾南湾中央部の DOC と DOC+POC が冬季に比べて夏季が有意に高い結果となったが、そのほかは有意差は確認できなかった。

表 2 白山市笠間沖と七尾南湾中央部における季節別の BOD 関連項目

地点	時季	BOD3*	DOC	POC**	DOC+POC**	Chl a
白山市 笠間沖	夏季	0.59 (0.27)	1.28 (0.25)	0.38 (0.16)	1.67 (0.35)	1.64 (1.00)
	冬季	0.55 (0.23)	1.06 (0.37)	0.39 (0.10)	1.45 (0.37)	2.27 (1.05)
七尾南湾 中央部	夏季	0.78 (0.22)	1.52 (0.29)	0.28 (0.12)	1.81 (0.30)	2.28 (1.72)
	冬季	0.65 (0.26)	1.20 (0.42)	0.27 (0.09)	1.46 (0.46)	2.77 (1.79)

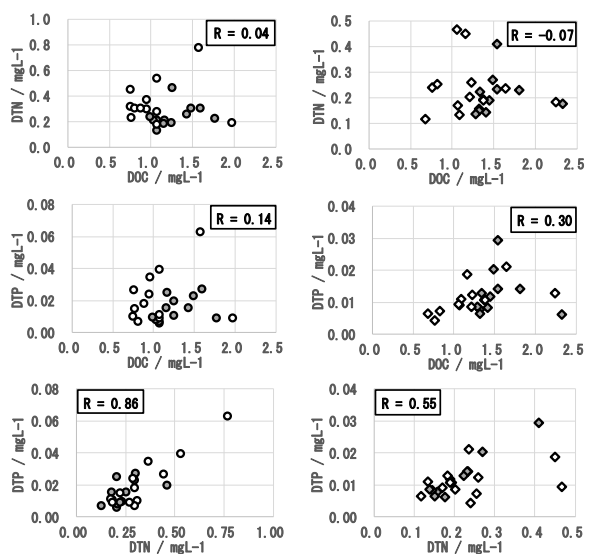
* H26 年 8 月以降測定 ** H27 年 8 月分の POC は欠測
(注：単位は Chl a は $\mu\text{g/L}$ ，他は全て mg/L ，括弧内の数字は不偏標準偏差)

3.1.3 項目間の関係

溶存性物質である DOC, DTN, DTP の間の関係性を図 4 に示す。DOC と DTN, DTP の間には明確な関連性は見受けられなかったが、DTN と DTP の間には白山市笠間沖で $R=0.86$ (R は相関係数，以下同じ)，七尾南湾中央部で $R=0.55$ と正の相関がみられた。溶存性の炭素，窒素，リンの発生源については陸域からの流入，底質からの溶出，海流・生物による海域内での運搬，生物による大気からの固定(リンを除く)などが考えられるが，これらの主な発生源が窒素とリンでは同じ一方，炭素と窒素，炭素とリンの間では異なるためにこのような相関となった可能性が考えられる。

プランクトン関連項目として BOD3, POC, Chl a の間の関係性を図 5 に示す。項目間でほとんど相関は見られなかったが，七尾南湾中央部の POC と Chl a の間では $R=0.58$ と正の相関がみられた。この原因としては，七尾南湾が閉鎖性水域であるため日本海に面する白山市笠間沖よりも内部生産による影響が大きく，POC に占める植物プランクトン量が七尾南湾中央部では白山市笠間沖に比べて多いことが考えられる。

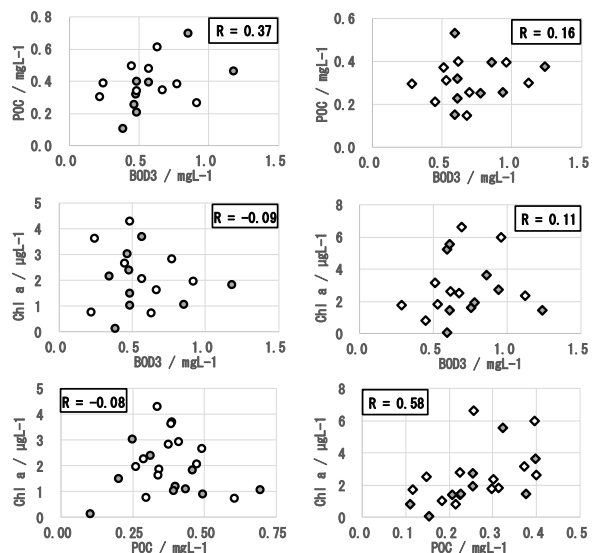
植物プランクトンの指標である Chl a と，栄養塩類の指標である DIN 及び DIP 並びに水温の関係性を図 6 に示す。いずれの項目とも Chl a との相関は小さい結果となった。栄養塩類の濃度によ



(注：塗りつぶしは夏季のデータ，白抜きは冬季のデータを示す)

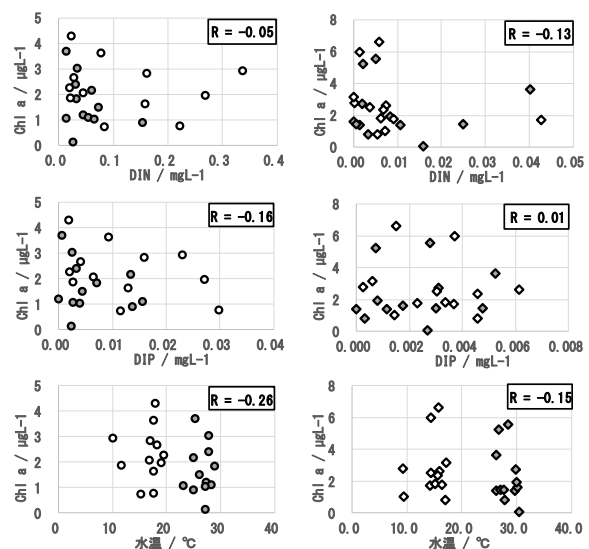
図 4 白山市笠間沖(左, 凡例○)と七尾南湾中央部(右, 凡例◇)における DOC, DTN, DTP の関係

る植物プランクトン増殖の律速をみる指標として、半飽和定数がある。半飽和定数は、植物プランクトンの最大栄養塩取り込み速度の半分の取り込み速度を与える栄養塩濃度であり、現場環境の栄養塩濃度が半飽和定数以下ならば、植物プランクトンの栄養塩取り込みが50%以上制限されていることになり、増殖速度も制限されていると考えられる。⁵⁾ 笠間沖及び七尾湾における植物プランクトンの半飽和定数については研究例が確認できないが、過去に三河湾で行われたシミュレーションでは、無機態窒素の半飽和定数は0.042 mg/L、無機態リンの半飽和定数は0.003 mg/Lとして設定された。⁶⁾ この値が仮に笠間沖及び七尾湾においても当てはまるとすると、七尾南湾中央部においては平均的にDINが半飽和定数を下回っており、窒素不足による増殖制限の状態であったため、DINが消費された後の状態を観測した結果Chl aとDINとの間に相関がみられなかった可能性がある。一方、白山市笠間沖ではこの値を上回っているにも関わらず、Chl a濃度とDIN、DIP、水温との間に明確な関連性は見受けられない。当該海域のDIN濃度の供給が十分で安定している場合、仮にDINの取り込みが植物プランクトン増殖の律速過程であればDIN濃度が高いときに増殖速度が大きくなり、Chl a濃度が高くなるはずであるがその傾向はみられていない。このことから、白山市笠間沖における植物プランクトン増殖の律速因子は、DINではなく、また同様に考えてDIP、水温のいずれでもなく、重金属イオンなどの別の因子である可能性がある。



(注：塗りつぶしは夏季のデータ、白抜きは冬季のデータを示す)

図5 白山市笠間沖(左, 凡例○)と七尾南湾中央部(右, 凡例◇)におけるBOD3, POC, Chl aの関係



(注：塗りつぶしは夏季のデータ、白抜きは冬季のデータを示す)

図6 白山市笠間沖(左, 凡例○)と七尾南湾中央部(右, 凡例◇)におけるChl aとDIN, DIP, 水温の関係

3.2 七尾湾及び近隣沿岸海域における多項目水質計による観測と測定項目間の関係

3.2.1 七尾湾及び近隣沿岸海域における水質鉛直分布

2020年(令和2年)8月の七尾湾及び近隣沿岸海域における水質鉛直分布を図7に示す。

すべての地点において、水深3~4 m付近に水温躍層が生じているほか、七尾湾内においては、同水深で塩分躍層も生じている。

D0についてみると、湾外の穴水町前波沖及び七尾市庵町17号防波堤沖の2地点では表層と底層で大きな違いはなかったが、七尾湾内の各地点では、万行防波堤内を除き底層付近でD0の低下が確認された。万行防波堤内においては他地点に比べ水深が浅いためにD0の低下が確認されなかったものと推定される。底層では南湾中央部において底層D0の生物1類型の基準値(4 mg/L)を下回った水深があったものの、ほかの地点では生物1類型の基準値を満たしていた。なお、当該水域では底層D0の類型指定はされていない。

Chl aについてみると、湾内では底層付近で増加する傾向がみられる。表層から沈降してきた植物プランクトンが滞留し、底層でChl a濃度が高くなった可能性が考えられる。

2020年(令和2年)9月の七尾西湾及び南湾における水質鉛直分布を図8-1と図8-2に示す。南湾のPt.6~Pt.9において、水深2~3 m付近に水温躍層が形成されている。また、湾の出口に近いPt.9~11については、水深15 m付近に水温の変曲点が存在している。

D0についてみると、全般として底層に向かうにつれD0の低下傾向がみられた。特にPt.4~8及び南湾中央部においては、底層付近でのD0の低下が確認された。南湾中央部において底層D0の生物1類型の基準値(4 mg/L)を下回った水深があったものの、ほかの地点では生物1類型の基準値を満たしていた。

Chl aについてみると、水深5~10 m付近に極大を持つ地点が多くみられた。鹿児島湾で行われた同様の調査では、水深10 m層でChl aが極大となり光合成が活発に行われていると考えられており⁷⁾、七尾湾においてもこの水深で光合成が活発に行われていることがうかがわれる。

8月と9月で共通して測定されている西湾中央部及び南湾中央部の結果を比較すると、両地点とも8月には水温躍層がみられたが、9月には消失していた。底層D0は南湾中央部では8月と9月ではほぼ変動がなかった一方、西湾中央部では8月に見られた底層付近でのD0の減少が9月には確認されず、貧酸素傾向が解消していた。Chl aについては、南湾中央部で8月には水深11.7 m(底層付近)で最大となった一方、9月には水深7.7 m付近で最大となった。

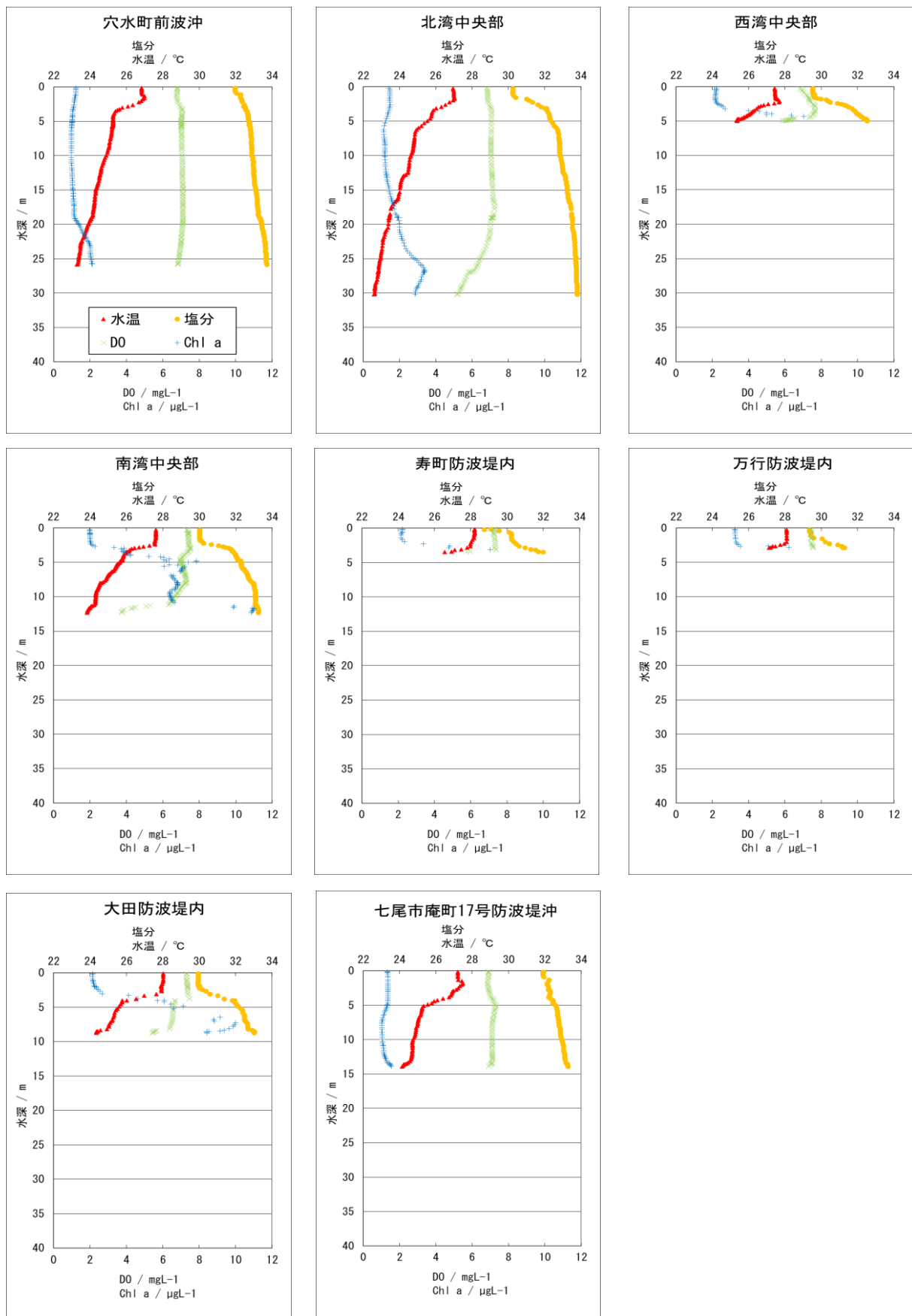


図7 七尾湾及び近隣沿岸海域における水質鉛直分布 (2020/8)

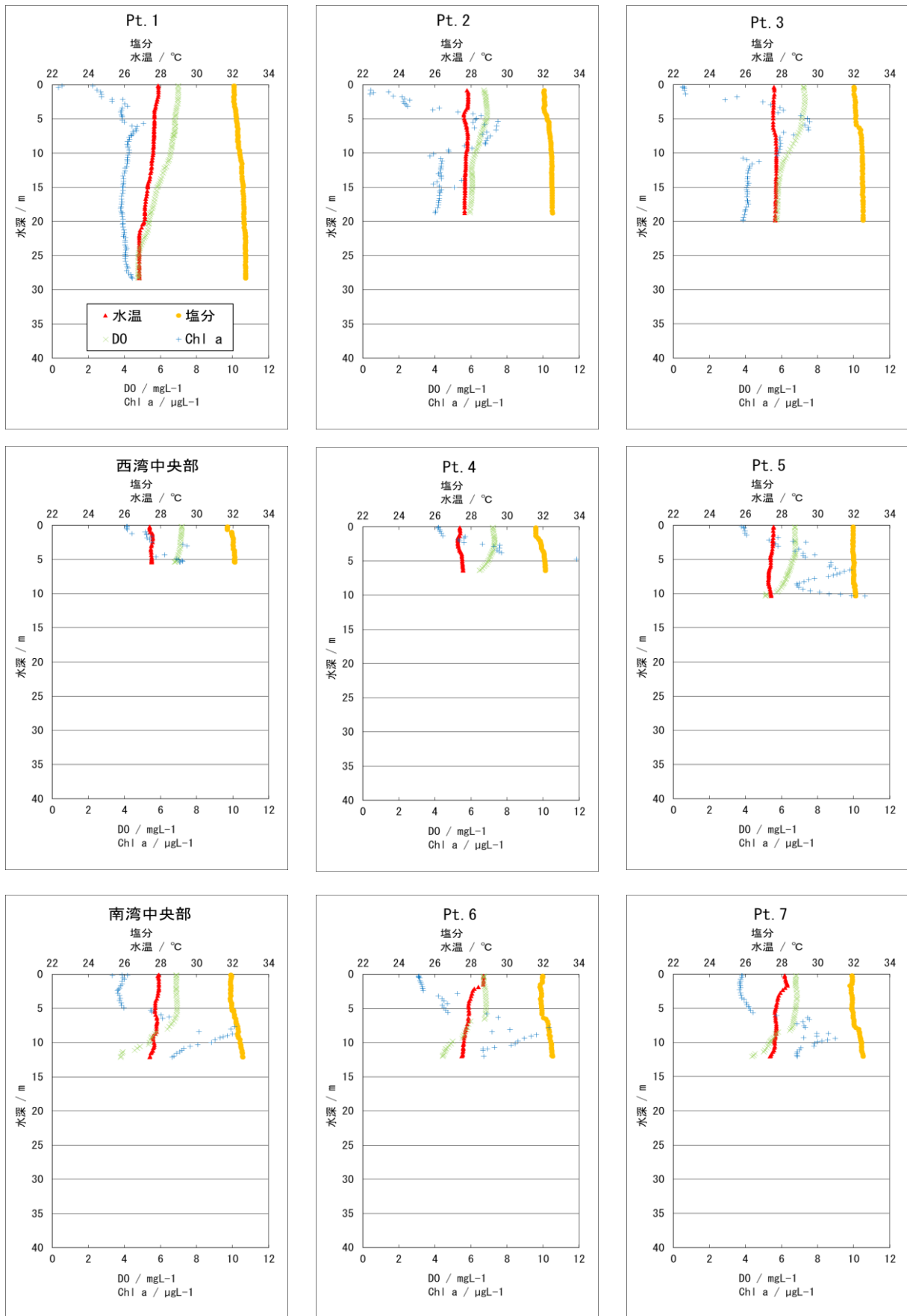


図 8-1 七尾西湾及び南湾における水質鉛直分布 (2020/9)

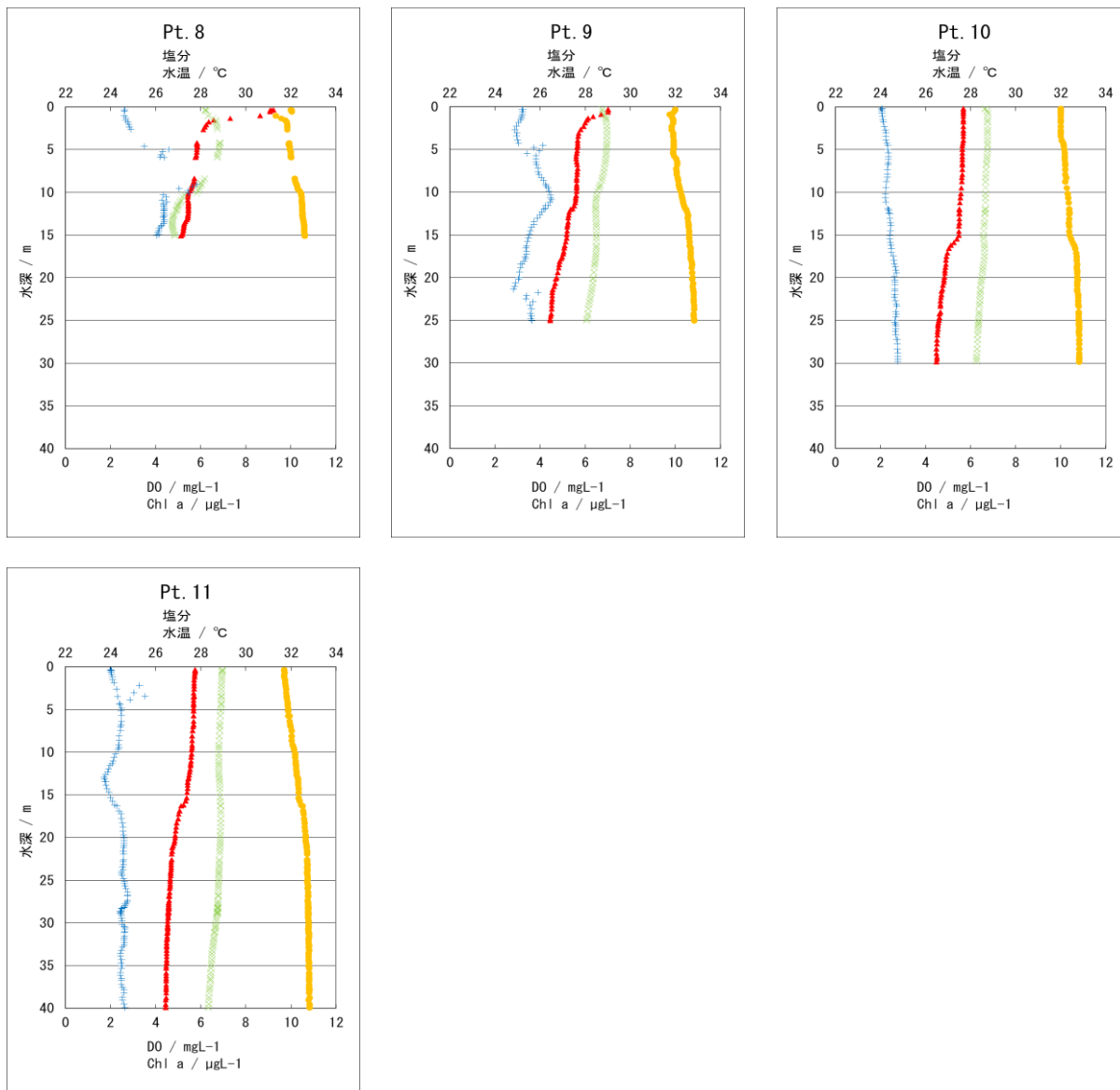


図 8-2 七尾西湾及び南湾における水質鉛直分布 (2020/9)

3.2.2 七尾湾における測定項目の相関

過去の公共用水域水質常時監視測定調査結果を用いて、七尾南湾海域4地点(南湾中央部、寿町防波堤内、万行防波堤内、大田防波堤内)における測定項目ごとの相関関係について整理した。対象とする項目は気温、水温、pH、DO、COD、全窒素(T-N)、硝酸性窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸性窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、アンモニア性窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)、全有機性窒素(Org-N)、全リン(T-P)、無機性リン又はリン酸態リン(DIP)、有機性リン(Org-P)とした。なお、T-PとDIPの差分によりOrg-Pを定義した。地点間については、同一採水日の結果どうしで相関関係を調べた。相関係数の一覧を表3-1と表3-2に示す。 $R>0.7$ 、 $R>0.4$ 、 $R<-0.4$ のものにはそれぞれ赤、橙、水色に着色を行った。

まず、地点内の相関関係についてみる。CODについてみると、4地点とも、窒素・リン関連項目との相関はいずれも小さかった($R<0.4$)。このことから七尾南湾において窒素・リンの増加がCODに及ぼす影響は小さく、CODの変動には富栄養化以外の要因があるものと推定される。

また、T-N・T-P間の相関については、南湾中央部及び大田防波堤内では相関が見られなかった($R=0.27$ 及び 0.12)が、寿町防波堤内及び万行防波堤内では相関が見られた(ともに $R=0.50$)。寿町防波堤内及び万行防波堤内は前2地点に比べ都市圏に近いため、御祓川などからの生活排水の流入影響による可能性が考えられるが、詳細は不明である。

窒素の形態別に見ると、4地点とも、T-N・ $\text{NO}_3\text{-N}$ 間及びT-N・ $\text{NO}_2\text{-N}$ 間に比べ、T-N・ $\text{NH}_4\text{-N}$ 間及びT-N・Org-N間が高い正の相関を示す。このことから、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び $\text{NO}_2\text{-N}$ が $\text{NH}_4\text{-N}$ より優先的に消費されてOrg-Nに変換されている可能性や、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び $\text{NO}_2\text{-N}$ に比べて $\text{NH}_4\text{-N}$ 及びOrg-Nの流入量が多い可能性が考えられるが、詳細は不明である。

このほか、気温と水温の間にも正の相関が見られ、気温及び水温とDOの間には負の相関が見られた。これは、気温が上昇すると水温が上昇し、それに伴い飽和溶存酸素量が減少することに由来すると考えられる。

次に、地点間の相関関係を見ると、各地点の気温・気温間、水温・水温間、DO・DO間、COD・COD間に一定の正の相関が見られた。この4地点を同一の採水日に採水していることで、気象などの条件が似ること由来すると考えられる。

表 3-1 七尾南湾海域における測定項目間の相関係数

		南湾中央部												寿町防波堤内													
		気温	水温	pH	DO	COD	T-N	NO3-N	NO2-N	NH4-N	Org-N	T-P	DIP	Org-P	気温	水温	pH	DO	COD	T-N	NO3-N	NO2-N	NH4-N	Org-N	T-P	DIP	Org-P
南湾中央部	気温	1.00	0.93	0.25	-0.67	0.24	0.19	-0.07	0.00	0.17	0.18	0.35	0.18	0.32	0.99	0.93	0.21	-0.67	0.21	-0.04	-0.25	-0.05	0.01	0.14	0.16	0.14	0.14
	水温	0.93	1.00	0.21	-0.68	0.22	0.14	-0.04	0.03	0.12	0.15	0.36	0.18	0.33	0.92	0.99	0.19	-0.69	0.22	-0.02	-0.17	-0.03	-0.02	0.12	0.18	0.17	0.12
	pH	0.25	0.21	1.00	-0.11	0.15	0.10	-0.08	0.00	0.09	0.10	0.17	0.11	0.15	0.26	0.23	0.47	-0.15	0.18	-0.05	-0.22	-0.09	0.03	0.06	-0.02	-0.01	-0.03
	DO	-0.67	-0.68	-0.11	1.00	-0.25	-0.18	0.07	-0.02	-0.24	-0.11	-0.35	-0.16	-0.33	-0.67	-0.69	-0.22	0.80	-0.20	0.02	0.24	0.12	0.00	-0.18	-0.08	-0.09	-0.03
	COD	0.24	0.22	0.15	-0.25	1.00	0.23	0.01	0.00	0.16	0.20	0.14	0.10	0.11	0.25	0.23	-0.02	-0.20	0.47	0.17	-0.02	-0.06	0.14	0.21	0.07	0.05	0.08
	T-N	0.19	0.14	0.10	-0.18	0.23	1.00	0.37	0.14	0.55	0.87	0.27	0.35	0.12	0.18	0.15	0.10	-0.17	0.13	0.24	-0.12	-0.08	0.16	0.39	-0.14	-0.10	-0.13
	NO3-N	-0.07	-0.04	-0.08	0.07	0.01	0.37	1.00	0.33	0.06	0.15	0.37	0.45	0.18	-0.08	-0.06	-0.11	0.07	-0.02	0.04	0.13	-0.02	-0.08	0.02	-0.10	-0.11	-0.04
	NO2-N	0.00	0.03	0.00	-0.02	0.00	0.14	0.33	1.00	0.02	0.06	0.27	0.24	0.19	-0.01	0.01	0.02	0.03	-0.04	-0.07	-0.06	0.01	-0.07	-0.02	-0.03	-0.07	0.04
	NH4-N	0.17	0.12	0.09	-0.24	0.16	0.55	0.06	0.02	1.00	0.18	0.25	0.36	0.10	0.17	0.15	0.13	-0.19	0.04	0.21	-0.19	-0.12	0.44	0.20	-0.08	-0.05	-0.08
	Org-N	0.18	0.15	0.10	-0.11	0.20	0.87	0.15	0.06	0.18	1.00	0.09	0.11	0.04	0.18	0.15	0.10	-0.14	0.17	0.16	-0.10	-0.05	-0.02	0.36	-0.11	-0.08	-0.12
	T-P	0.35	0.36	0.17	-0.35	0.14	0.27	0.37	0.27	0.25	0.09	1.00	0.57	0.88	0.34	0.36	0.15	-0.33	0.09	-0.01	-0.11	-0.11	0.08	0.02	0.11	0.04	0.16
DIP	0.18	0.18	0.11	-0.16	0.10	0.35	0.45	0.24	0.36	0.11	0.57	1.00	0.10	0.16	0.18	0.04	-0.18	0.08	0.11	-0.03	-0.05	0.16	0.10	0.12	0.20	-0.06	
Org-P	0.32	0.33	0.15	-0.33	0.11	0.12	0.18	0.19	0.10	0.04	0.88	0.10	1.00	0.31	0.33	0.15	-0.29	0.06	-0.07	-0.12	-0.10	0.00	-0.03	0.06	-0.07	0.23	
寿町防波堤内	気温	0.99	0.92	0.26	-0.67	0.25	0.18	-0.08	-0.01	0.17	0.18	0.34	0.16	0.31	1.00	0.94	0.23	-0.66	0.22	-0.04	-0.26	-0.07	0.01	0.14	0.15	0.13	0.13
	水温	0.93	0.99	0.23	-0.69	0.23	0.15	-0.06	0.01	0.15	0.15	0.36	0.18	0.33	0.94	1.00	0.23	-0.69	0.20	-0.06	-0.23	-0.04	-0.02	0.11	0.16	0.14	0.11
	pH	0.21	0.19	0.47	-0.22	-0.02	0.10	-0.11	0.02	0.13	0.10	0.15	0.04	0.15	0.23	0.23	1.00	-0.08	-0.21	-0.36	-0.51	-0.33	-0.25	0.02	-0.32	-0.27	-0.26
	DO	-0.67	-0.69	-0.15	0.80	-0.20	-0.17	0.07	0.03	-0.19	-0.14	-0.33	-0.18	-0.29	-0.66	-0.69	-0.08	1.00	-0.16	-0.02	0.22	-0.04	-0.13	-0.11	-0.22	-0.26	-0.07
	COD	0.21	0.22	0.18	-0.20	0.47	0.13	-0.02	-0.04	0.04	0.17	0.09	0.08	0.06	0.22	0.20	-0.21	-0.16	1.00	0.44	0.24	0.12	0.31	0.31	0.39	0.31	0.34
	T-N	-0.04	-0.02	-0.05	0.02	0.17	0.24	0.04	-0.07	0.21	0.16	-0.01	0.11	-0.07	-0.04	-0.06	-0.36	-0.02	0.44	1.00	0.58	0.32	0.70	0.67	0.50	0.48	0.32
	NO3-N	-0.25	-0.17	-0.22	0.24	-0.02	-0.12	0.13	-0.06	-0.19	-0.10	-0.11	-0.03	-0.12	-0.26	-0.23	-0.51	0.22	0.24	0.58	1.00	0.34	0.26	-0.05	0.46	0.41	0.34
	NO2-N	-0.05	-0.03	-0.09	0.12	-0.06	-0.08	-0.02	0.01	-0.12	-0.05	-0.11	-0.05	-0.10	-0.07	-0.04	-0.33	-0.04	0.12	0.32	0.34	1.00	0.26	-0.01	0.41	0.39	0.28
	NH4-N	0.01	-0.02	0.03	0.00	0.14	0.16	-0.08	-0.07	0.44	-0.02	0.08	0.16	0.00	0.01	-0.02	-0.25	-0.13	0.31	0.70	0.26	0.26	1.00	0.22	0.47	0.49	0.23
	Org-N	0.14	0.12	0.06	-0.18	0.21	0.39	0.02	-0.02	0.20	0.36	0.02	0.10	-0.03	0.14	0.11	0.02	-0.11	0.31	0.67	-0.05	-0.01	0.22	1.00	0.08	0.08	0.05
	T-P	0.16	0.18	-0.02	-0.08	0.07	-0.14	-0.10	-0.03	-0.08	-0.11	0.11	0.12	0.06	0.15	0.16	-0.32	-0.22	0.39	0.50	0.46	0.41	0.47	0.08	1.00	0.90	0.72
DIP	0.14	0.17	-0.01	-0.09	0.05	-0.10	-0.11	-0.07	-0.05	-0.08	0.04	0.20	-0.07	0.13	0.14	-0.27	-0.26	0.31	0.48	0.41	0.39	0.49	0.08	0.90	1.00	0.35	
Org-P	0.14	0.12	-0.03	-0.03	0.08	-0.13	-0.04	0.04	-0.08	-0.12	0.16	-0.06	0.23	0.13	0.11	-0.26	-0.07	0.34	0.32	0.34	0.28	0.23	0.05	0.72	0.35	1.00	
万行防波堤内	気温	0.99	0.93	0.27	-0.67	0.25	0.19	-0.07	-0.01	0.18	0.19	0.35	0.17	0.31	1.00	0.94	0.23	-0.67	0.22	-0.04	-0.26	-0.06	0.01	0.15	0.16	0.13	0.13
	水温	0.93	0.99	0.21	-0.68	0.22	0.15	-0.04	0.02	0.13	0.15	0.37	0.18	0.33	0.93	0.99	0.20	-0.68	0.22	-0.02	-0.17	-0.02	-0.02	0.12	0.19	0.17	0.13
	pH	0.25	0.21	0.51	-0.07	0.02	0.06	-0.06	0.02	0.15	0.03	0.23	0.13	0.21	0.25	0.22	0.45	-0.09	0.03	-0.02	-0.14	-0.11	0.07	0.04	-0.01	0.01	-0.03
	DO	-0.61	-0.64	-0.14	0.87	-0.27	-0.22	0.04	0.00	-0.22	-0.17	-0.28	-0.14	-0.25	-0.61	-0.63	-0.14	0.78	-0.24	0.03	0.22	0.14	0.01	-0.16	-0.05	-0.06	0.00
	COD	0.17	0.20	0.15	-0.22	0.51	0.12	-0.01	-0.03	-0.01	0.15	0.09	0.04	0.09	0.18	0.20	-0.04	-0.18	0.55	0.10	0.03	-0.04	0.00	0.15	0.09	0.04	0.12
	T-N	0.03	0.02	0.08	-0.10	0.12	0.40	0.06	0.02	0.30	0.33	0.21	0.05	0.22	0.04	0.03	-0.06	-0.07	0.18	0.36	0.09	0.06	0.21	0.36	0.04	0.00	0.09
	NO3-N	-0.33	-0.29	-0.12	0.22	-0.02	0.02	0.14	-0.03	-0.08	0.01	-0.13	-0.07	-0.11	-0.32	-0.27	-0.17	0.25	0.05	0.14	0.32	0.05	0.02	-0.03	-0.01	0.01	-0.03
	NO2-N	-0.03	-0.02	-0.01	0.03	0.01	-0.02	-0.02	0.02	-0.02	0.00	-0.09	-0.07	-0.07	-0.03	-0.01	-0.09	0.00	0.08	0.04	0.03	0.59	0.02	-0.02	0.04	0.04	0.01
	NH4-N	0.04	0.00	0.14	-0.15	0.17	0.37	0.00	-0.02	0.60	0.14	0.18	0.14	0.13	0.05	0.02	0.08	-0.12	0.16	0.29	-0.08	-0.09	0.40	0.26	-0.04	-0.04	-0.02
	Org-N	0.17	0.17	0.09	-0.14	0.08	0.32	0.01	0.04	0.10	0.36	0.24	0.01	0.28	0.17	0.16	-0.05	-0.13	0.15	0.27	0.03	0.09	0.05	0.36	0.09	0.02	0.16
	T-P	0.12	0.15	0.11	-0.12	0.11	0.09	-0.02	0.01	0.06	0.07	0.25	0.08	0.25	0.13	0.16	-0.08	-0.14	0.21	0.15	0.18	0.12	0.09	0.02	0.28	0.22	0.25
DIP	0.05	0.11	0.07	-0.17	0.07	0.03	-0.01	-0.02	0.07	-0.01	0.09	0.25	-0.03	0.06	0.13	-0.06	-0.24	0.14	0.03	0.07	0.13	0.04	-0.05	0.14	0.23	-0.06	
Org-P	0.12	0.10	0.09	-0.01	0.09	0.10	-0.01	0.03	0.02	0.10	0.26	-0.12	0.38	0.12	0.09	-0.05	0.03	0.16	0.18	0.19	0.04	0.09	0.08	0.25	0.08	0.41	
大田防波堤内	気温	0.99	0.92	0.27	-0.67	0.24	0.19	-0.07	0.00	0.18	0.19	0.35	0.17	0.32	0.99	0.94	0.23	-0.67	0.22	-0.04	-0.26	-0.06	0.02	0.14	0.15	0.13	0.13
	水温	0.93	0.99	0.23	-0.68	0.22	0.16	-0.05	0.02	0.14	0.16	0.36	0.18	0.33	0.93	0.99	0.20	-0.69	0.22	-0.03	-0.20	-0.03	-0.01	0.13	0.18	0.17	0.11
	pH	0.28	0.27	0.68	-0.08	0.13	0.03	-0.14	0.01	0.09	0.04	0.20	0.12	0.17	0.29	0.26	0.37	-0.16	0.21	0.05	-0.13	-0.07	0.14	0.08	0.04	0.05	0.01
	DO	-0.65	-0.65	-0.14	0.91	-0.27	-0.26	0.02	-0.02	-0.25	-0.19	-0.34	-0.17	-0.31	-0.66	-0.66	-0.27	0.78	-0.17	0.07	0.30	0.20	0.03	-0.18	-0.01	-0.04	0.04
	COD	0.18	0.19	0.14	-0.21	0.66	0.21	0.05	-0.01	0.05	0.23	0.06	0.04	0.04	0.19	0.19	-0.01	-0.12	0.50	0.15	0.04	0.01	0.01	0.20	0.06	0.00	0.12
	T-N	0.17	0.11	0.09	-0.18	0.18	0.65	0.08	-0.01	0.38	0.59	0.07	0.09	0.04	0.18	0.13	0.04	-0.11	0.17	0.24	-0.12	-0.08	0.08	0.43	-0.13	-0.13	-0.08
	NO3-N	-0.27	-0.23	-0.18	0.10	0.02	0.04	0.28	0.03	-0.04	-0.01	-0.02	0.06	-0.06	-0.25	-0.20	-0.18	0.17	-0.04	-0.01	0.12	-0.01	-0.13	-0.01	-0.13	-0.11	-0.11
	NO2-N	-0.10	-0.08	-0.06	0.07	0.00	-0.01	0.05	0.17	-0.05	-0.01	0.00	0.00	0.01	-0.10	-0.07	-0.16	0.04	0.00	-0.07	-0.08	0.08	-0.13	0.04	-0.12	-0.11	-0.07
	NH4-N	0.16	0.11	0.09	-0.24	0.13	0.46	-0.01	-0.03	0.83	0.14	0.20	0.22	0.11	0.16	0.14	0.07	-0.19	0.03	0.13	-0.19	-0.13	0.40	0.11	-0.11	-0.09	-0.10
	Org-N	0.20	0.15	0.12	-0.13	0.14	0.52	0.01	-0.02	0.06	0.62	-0.01	-0.01	0.00	0.21	0.15	0.06	-0.10	0.19	0.22	-0.07	-0.04	-0				

表 3-2 七尾南湾海域における測定項目間の相関係数

万行防波堤内													大田防波堤内													測定項目	区域
気温	水温	pH	DO	COD	T-N	NO3-N	NO2-N	NH4-N	Org-N	T-P	DIP	Org-P	気温	水温	pH	DO	COD	T-N	NO3-N	NO2-N	NH4-N	Org-N	T-P	DIP	Org-P		
0.99	0.93	0.25	-0.61	0.17	0.03	-0.33	-0.03	0.04	0.17	0.12	0.05	0.12	0.99	0.93	0.28	-0.65	0.18	0.17	-0.27	-0.10	0.16	0.20	0.16	0.08	0.16	気温	南湾中央部
0.93	0.99	0.21	-0.64	0.20	0.02	-0.29	-0.02	0.00	0.17	0.15	0.11	0.10	0.93	0.99	0.27	-0.65	0.19	0.11	-0.23	-0.08	0.11	0.15	0.20	0.12	0.16	水温	
0.27	0.21	0.51	-0.14	0.15	0.08	-0.12	-0.01	0.14	0.09	0.11	0.07	0.09	0.27	0.23	0.68	-0.14	0.14	0.09	-0.18	-0.06	0.09	0.12	0.01	0.02	-0.01	pH	
-0.67	-0.68	-0.07	0.87	-0.22	-0.10	0.22	0.03	-0.15	-0.14	-0.12	-0.17	-0.01	-0.67	-0.68	-0.08	0.91	-0.21	-0.18	0.10	0.07	-0.24	-0.13	-0.18	-0.11	-0.16	DO	
0.25	0.22	0.02	-0.27	0.51	0.12	-0.02	0.01	0.17	0.08	0.11	0.07	0.09	0.24	0.22	0.13	-0.27	0.66	0.18	0.02	0.00	0.13	0.14	0.07	0.05	0.05	COD	
0.19	0.15	0.06	-0.22	0.12	0.40	0.02	-0.02	0.37	0.32	0.09	0.03	0.10	0.19	0.16	0.03	-0.26	0.21	0.65	0.04	-0.01	0.46	0.52	-0.02	0.00	-0.04	T-N	
-0.07	-0.04	-0.06	0.04	-0.01	0.06	0.14	-0.02	0.00	0.01	-0.02	-0.01	-0.01	-0.07	-0.05	-0.14	0.02	0.05	0.08	0.28	0.05	-0.01	0.01	0.03	0.07	-0.03	NO3-N	
-0.01	0.02	0.02	0.00	-0.03	0.02	-0.03	0.02	-0.02	0.04	0.01	-0.02	0.03	0.00	0.02	0.01	-0.02	-0.01	-0.01	0.03	0.17	-0.03	-0.02	0.07	-0.02	0.13	NO2-N	
0.18	0.13	0.15	-0.22	-0.01	0.30	-0.08	-0.02	0.60	0.10	0.06	0.07	0.02	0.18	0.14	0.09	-0.25	0.05	0.38	-0.04	-0.05	0.83	0.06	0.07	0.06	0.04	NH4-N	
0.19	0.15	0.03	-0.17	0.15	0.33	0.01	0.00	0.14	0.36	0.07	-0.01	0.10	0.19	0.16	0.04	-0.19	0.23	0.59	-0.01	-0.01	0.14	0.62	-0.09	-0.06	-0.08	Org-N	
0.35	0.37	0.23	-0.28	0.09	0.21	-0.13	-0.09	0.18	0.24	0.25	0.09	0.26	0.35	0.36	0.20	-0.34	0.06	0.07	-0.02	0.00	0.20	-0.01	0.33	0.15	0.34	T-P	
0.17	0.18	0.13	-0.14	0.04	0.05	-0.07	-0.07	0.14	0.01	0.08	0.25	-0.12	0.17	0.18	0.12	-0.17	0.04	0.09	0.06	0.00	0.22	-0.01	0.14	0.28	-0.09	DIP	
0.31	0.33	0.21	-0.25	0.09	0.22	-0.11	-0.07	0.13	0.28	0.25	-0.03	0.38	0.32	0.33	0.17	-0.31	0.04	0.04	-0.06	0.01	0.11	0.00	0.32	0.01	0.47	Org-P	
1.00	0.93	0.25	-0.61	0.18	0.04	-0.32	-0.03	0.05	0.17	0.13	0.06	0.12	0.99	0.93	0.29	-0.66	0.19	0.18	-0.25	-0.10	0.16	0.21	0.16	0.08	0.16	気温	寿町防波堤内
0.94	0.99	0.22	-0.63	0.20	0.03	-0.27	-0.01	0.02	0.16	0.16	0.13	0.09	0.94	0.99	0.26	-0.66	0.19	0.13	-0.20	-0.07	0.14	0.15	0.21	0.14	0.17	水温	
0.23	0.20	0.45	-0.14	-0.04	-0.06	-0.17	-0.09	0.08	-0.05	-0.08	-0.06	-0.05	0.23	0.20	0.37	-0.27	-0.01	0.04	-0.18	-0.16	0.07	0.06	-0.05	0.00	-0.08	pH	
-0.67	-0.68	-0.09	0.78	-0.18	-0.07	0.25	0.00	-0.12	-0.13	-0.14	-0.24	0.03	-0.67	-0.69	-0.16	0.78	-0.12	-0.11	0.17	0.04	-0.19	-0.10	-0.14	-0.10	-0.10	DO	
0.22	0.22	0.03	-0.24	0.55	0.18	0.05	0.08	0.16	0.15	0.21	0.14	0.16	0.22	0.22	0.21	-0.17	0.50	0.17	-0.04	0.00	0.03	0.19	0.08	0.05	0.07	COD	
-0.04	-0.02	-0.02	0.03	0.10	0.36	0.14	0.04	0.29	0.27	0.15	0.03	0.18	-0.04	-0.03	0.05	0.07	0.15	0.24	-0.01	-0.07	0.13	0.22	-0.03	-0.05	0.01	T-N	
-0.26	-0.17	-0.14	0.22	0.03	0.09	0.32	0.03	-0.08	0.03	0.18	0.07	0.19	-0.26	-0.20	-0.13	0.30	0.04	-0.12	0.12	-0.08	-0.19	-0.07	0.03	0.02	0.03	NO3-N	
-0.06	-0.02	-0.11	0.14	-0.04	0.06	0.05	0.59	-0.09	0.09	0.12	0.13	0.04	-0.06	-0.03	-0.07	0.20	0.01	-0.08	-0.01	0.08	-0.13	-0.04	-0.03	0.01	-0.06	NO2-N	
0.01	-0.02	0.07	0.01	0.00	0.21	0.02	0.02	0.40	0.05	0.09	0.04	0.09	0.02	-0.01	0.14	0.03	0.01	0.08	-0.13	-0.13	0.40	-0.05	-0.01	-0.01	0.00	NH4-N	
0.15	0.12	0.04	-0.16	0.15	0.36	-0.03	-0.02	0.26	0.36	0.02	-0.05	0.08	0.14	0.13	0.08	-0.18	0.20	0.43	-0.01	0.04	0.11	0.45	-0.08	-0.10	-0.01	Org-N	
0.16	0.19	-0.01	-0.05	0.09	0.04	-0.01	0.04	-0.04	0.09	0.28	0.14	0.25	0.15	0.18	0.04	-0.01	0.06	-0.13	-0.13	-0.12	-0.11	-0.06	0.12	0.06	0.12	T-P	
0.13	0.17	0.01	-0.06	0.04	0.00	0.01	0.04	-0.04	0.02	0.22	0.23	0.08	0.13	0.17	0.05	-0.04	0.00	-0.13	-0.11	-0.11	-0.09	-0.07	0.06	0.14	-0.07	DIP	
0.13	0.13	-0.03	0.00	0.12	0.09	-0.03	0.01	-0.02	0.16	0.25	-0.06	0.41	0.13	0.11	0.01	0.04	0.12	-0.08	-0.11	-0.07	-0.10	-0.01	0.18	-0.09	0.36	Org-P	
1.00	0.93	0.26	-0.61	0.18	0.04	-0.32	-0.03	0.05	0.17	0.12	0.06	0.12	1.00	0.93	0.29	-0.66	0.18	0.17	-0.26	-0.10	0.16	0.20	0.16	0.08	0.16	気温	万行防波堤内
0.93	1.00	0.22	-0.62	0.20	0.02	-0.29	-0.02	-0.01	0.17	0.15	0.12	0.10	0.93	0.99	0.26	-0.64	0.20	0.12	-0.20	-0.07	0.12	0.15	0.21	0.13	0.17	水温	
0.26	0.22	1.00	0.03	-0.19	-0.18	-0.44	-0.18	-0.04	-0.02	-0.19	-0.22	-0.06	0.25	0.23	0.67	-0.05	-0.07	-0.01	-0.33	-0.24	0.06	0.06	-0.04	-0.11	0.06	pH	
-0.61	-0.62	0.03	1.00	-0.19	-0.06	0.24	0.09	-0.08	-0.14	-0.07	-0.16	0.05	-0.61	-0.63	-0.08	0.89	-0.22	-0.16	0.10	0.05	-0.23	-0.11	-0.13	-0.10	-0.10	DO	
0.18	0.20	-0.19	-0.19	1.00	0.29	0.28	0.17	0.24	0.13	0.39	0.32	0.24	0.17	0.19	0.08	-0.23	0.65	0.21	0.10	0.12	0.05	0.18	0.13	0.05	0.15	COD	
0.04	0.02	-0.18	-0.06	0.29	1.00	0.44	0.27	0.66	0.80	0.50	0.27	0.43	0.04	0.03	0.01	-0.10	0.14	0.50	0.14	0.12	0.36	0.36	0.12	-0.02	0.21	T-N	
-0.32	-0.29	-0.44	0.24	0.28	0.44	1.00	0.29	0.30	-0.01	0.47	0.41	0.26	-0.32	-0.29	-0.26	0.18	-0.01	0.09	0.45	0.14	-0.02	-0.01	0.08	0.11	0.00	NO3-N	
-0.03	-0.02	-0.18	0.09	0.17	0.27	0.29	1.00	0.28	0.04	0.24	0.24	0.11	-0.03	-0.01	0.01	0.06	0.02	0.03	0.03	0.13	-0.03	0.03	-0.05	-0.02	-0.05	NO2-N	
0.05	-0.01	-0.04	-0.08	0.24	0.66	0.30	0.28	1.00	0.19	0.34	0.24	0.24	0.05	0.01	0.11	-0.16	0.08	0.34	0.01	-0.01	0.62	0.10	0.07	-0.02	0.12	NH4-N	
0.17	0.17	-0.02	-0.14	0.13	0.80	-0.01	0.04	0.19	1.00	0.28	0.05	0.35	0.17	0.17	0.06	-0.13	0.15	0.44	-0.01	0.10	0.14	0.43	0.10	-0.07	0.23	Org-N	
0.12	0.15	-0.19	-0.07	0.39	0.50	0.47	0.24	0.34	0.28	1.00	0.69	0.73	0.12	0.15	0.00	-0.10	0.20	0.16	0.19	0.13	0.11	0.08	0.40	0.21	0.37	T-P	
0.06	0.12	-0.22	-0.16	0.32	0.27	0.41	0.24	0.24	0.05	0.69	1.00	0.01	0.05	0.11	-0.04	-0.14	0.14	0.09	0.30	0.20	0.11	-0.04	0.29	0.39	0.01	DIP	
0.12	0.10	-0.06	0.05	0.24	0.43	0.26	0.11	0.24	0.35	0.73	0.01	1.00	0.12	0.10	0.04	0.00	0.15	0.13	-0.02	-0.02	0.05	0.14	0.28	-0.08	0.50	Org-P	
1.00	0.93	0.25	-0.61	0.17	0.04	-0.32	-0.03	0.05	0.17	0.12	0.05	0.12	1.00	0.93	0.29	-0.66	0.17	0.17	-0.26	-0.10	0.16	0.20	0.16	0.08	0.16	気温	大田防波堤内
0.93	0.99	0.23	-0.63	0.19	0.03	-0.29	-0.01	0.01	0.17	0.15	0.11	0.10	0.93	1.00	0.29	-0.65	0.18	0.13	-0.22	-0.07	0.14	0.15	0.20	0.13	0.16	水温	
0.29	0.26	0.67	-0.08	0.08	0.01	-0.26	0.01	0.11	0.06	0.00	-0.04	0.04	0.29	0.29	1.00	-0.08	0.01	-0.03	-0.41	-0.18	0.00	0.07	-0.04	-0.06	0.01	pH	
-0.66	-0.64	-0.05	0.89	-0.23	-0.10	0.18	0.06	-0.16	-0.13	-0.10	-0.14	0.00	-0.66	-0.65	-0.08	1.00	-0.19	-0.21	0.08	0.08	-0.26	-0.15	-0.15	-0.09	-0.13	DO	
0.18	0.20	-0.07	-0.22	0.65	0.14	-0.01	0.02	0.08	0.15	0.20	0.14	0.15	0.17	0.18	0.01	-0.19	1.00	0.22	0.14	0.07	0.08	0.18	0.17	0.06	0.19	COD	
0.17	0.12	-0.01	-0.16	0.21	0.50	0.09	0.03	0.34	0.44	0.16	0.09	0.13	0.17	0.13	-0.03	-0.21	0.22	1.00	0.25	0.26	0.45	0.87	0.12	0.10	0.08	T-N	
-0.26	-0.20	-0.33	0.10	0.10	0.14	0.45	0.03	0.01	-0.01	0.19	0.30	-0.02	-0.26	-0.22	-0.41	0.08	0.14	0.25	1.00	0.56	0.15	-0.06	0.33	0.33	0.14	NO3-N	
-0.10	-0.07	-0.24	0.05	0.12	0.12	0.14	0.13	-0.01	0.10	0.13	0.20	-0.02	-0.10	-0.07	-0.18	0.08	0.07	0.26	0.56	1.00	0.13	0.07	0.23	0.25	0.09	NO2-N	
0.16	0.12	0.06	-0.23	0.05	0.36	-0.02	-0.03	0.62	0.14	0.11	0.11	0.05	0.16	0.14	0.00	-0.26	0.08	0.45	0.15	0.13	1.00	0.02	0.19	0.15	0.13	NH4-N	
0.20	0.15	0.06	-0.11	0.18	0.36	-0.01	0.03	0.10	0.43	0.08	-0.04	0.14	0.20	0.15	0.07	-0.15	0.18	0.87	-0.06	0.07	0						

3.3 石川県沿岸海域の水質変化の概況

石川県内において水質常時監視測定調査が実施されている沿岸海域38地点の水温、pH、 a_H 、DO、CODについて、トレンドの抽出を行い、トレンド抽出された値についてクラスタ分割を実施した。

クラスタ数の決定のため、クラスタ数 n を1~10まで変化させたときのクラスタ内の誤差平方和 (Sum of Squared errors : SSE) の変化について確認した。初期乱数を変更して1000回クラスタリングを実施したときのSSEの平均値及び最小値を、クラスタ数 n に対してプロットしたものを項目別に図9に示す。このエルゴード法による結果と実際のクラスタリング結果を勘案し、クラスタ数を決定した。SSE最小を与えるクラスタを、最適クラスタとして下記の解析に採用した。

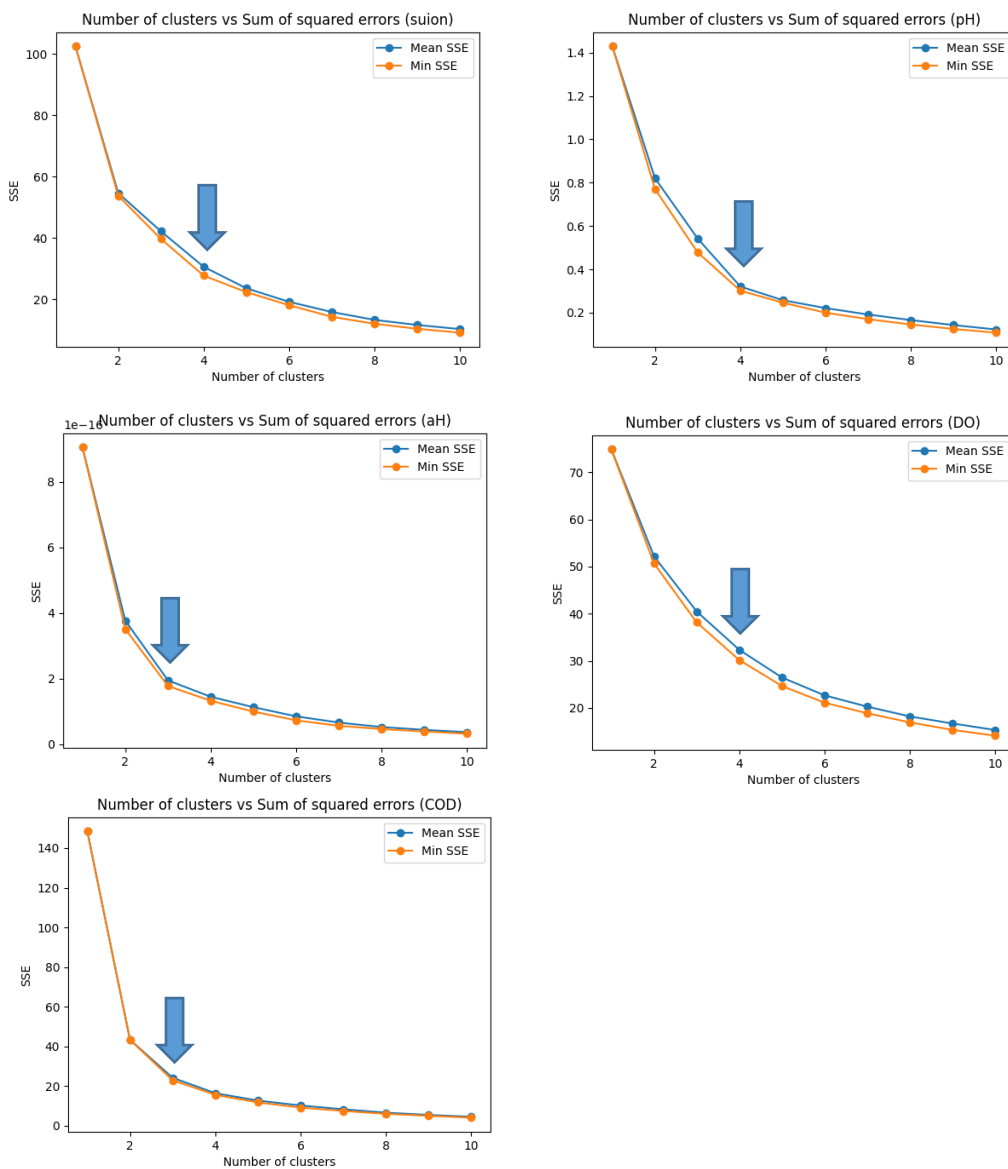


図9 クラスタ数に対するSSEの変化 (青矢印は決定したクラスタ数)

クラスタ別のトレンドを図10-1~3及び表4に示し、各クラスタの区分を実際の測定地点に落とし込んだものを図11に示す。図10-1~3中の細かい線は各地点のトレンド、太い線はクラスタの重心を表す。

(1) 水温

ほとんど変動のないもの(クラスタ 1), 弱く上昇しているもの(クラスタ 2), 強く上昇しているもの(クラスタ 3), 上昇下降を繰り返しているもの(クラスタ 4)に分類された。クラスタ 4 に分類された 3 地点は, 梯川沖, 手取川沖, 犀川沖であり, いずれも大きな河川の沖合であったことから, 河川からの影響の可能性がある。また, 加賀沿岸～能登沿岸まで広い範囲でクラスタ 2 又は 3 に分類され, 水温の上昇傾向が見られた一方, 七尾湾内は変動が小さい結果であった。

(2) pH

ほとんど変動のないもの(クラスタ 1), 下降後ほぼ変動のないもの(クラスタ 2), 下降後上昇するもの(クラスタ 3), 緩やかに上昇するもの(クラスタ 4)に分類された。

(3) a_H

ほとんど変動のないもの(クラスタ 1), 上昇後下降するもの(クラスタ 2), 緩やかに下降するもの(クラスタ 3)に分類された。St. 36 万行防波堤内を除き, pH でクラスタ 1 又は 2 に分類された地点がクラスタ 1 に, クラスタ 3 に分類された地点がクラスタ 2 に, クラスタ 4 に分類された地点がクラスタ 3 に分類された。なお, JIS Z8802(pH 測定方法)に規定されたガラス電極法により測定された pH について, 濃度 0.1 mol/L 以下, pH 3~10 の緩衝液については水素イオン活量によって定義される pH 値と ± 0.02 の範囲で一致するものとされている。⁸⁾しかしながら海水はこの前提条件を満たしていないため, $\text{pH} = -\log_{10}(a_H)$ の関係により求めた今回の a_H が, 理論的な水素イオン活量と必ずしも物理化学的に対応する量とは限らないことに留意する必要がある。

(4) DO

変動の小さいもの(クラスタ 1), 前半は変動が小さく, 後半に山のあるもの(クラスタ 2), 緩やかに上昇するもの(クラスタ 3), 緩やかに上昇し, 後半に山のあるもの(クラスタ 4)に分類された。加賀地域でクラスタ 3 又は 4 に分類されるものが多く, 上昇傾向が見られた。また, 能登地域は 1 又は 2 に分類されるものが多く, 変動が小さい傾向が見られた。

(5) COD

1.5 mg/L 程度のもの(クラスタ 1), 2.5 mg/L 程度のもの(クラスタ 2), 3.5 mg/L 程度のもの(クラスタ 3)に分類された。値の経年変化ではなく, 値の大小により区分される結果となった。閉鎖性水域である七尾湾や, 流域人口の多い河川の下流にある金沢港周辺などでクラスタ 2 又は 3 に分類され, 値が高い傾向が見られた。

表4 地点番号・地点名称・クラスタ分類結果

地点番号	地点名称	クラスタ番号				
		水温	pH	ah	DO	COD
St.01	加賀市塩屋沖	1	1	1	1	4
St.02	加賀市橋立漁港沖	2	2	2	1	4
St.03	新堀川沖	1	2	1	1	4
St.04	小松市安宅新沖	2	2	1	1	4
St.05	小松市安宅漁港沖	4	3	2	3	3
St.06	能美市根上沖	2	2	1	1	4
St.07	白山市美川漁港沖	4	3	2	3	3
St.08	白山市笠間沖	3	2	1	1	4
St.09	倉部川沖	3	2	1	1	4
St.10	金沢市下安原町沖	3	2	1	1	4
St.11	金沢市金石本町沖	4	3	2	4	2
St.12	金沢市大野町沖	3	2	1	1	4
St.13	泊地中央	3	4	3	3	3
St.14	泊地出口	3	4	3	3	3
St.15	西防波堤出口	3	1	1	1	3
St.16	内灘町沖	3	2	1	1	4
St.17	かほく市白尾沖	3	2	1	1	4
St.18	かほく市高松沖	3	2	1	1	4
St.19	宝達志水町今浜沖	2	1	1	1	2
St.20	宝達志水町出浜沖	2	2	1	1	4
St.21	羽咋市千里浜沖	2	1	1	1	2
St.22	志賀町高浜沖	2	2	1	1	4
St.23	志賀町福浦灯台沖	2	2	1	1	2
St.24	輪島市門前町鹿磯沖	3	1	1	1	1
St.25	輪島市門前町大川沖	1	1	1	1	1
St.26	珠洲市三崎町寺家沖	3	1	1	1	1
St.27	能登町布浦沖	3	1	1	1	1
St.28	能登町市之瀬沖	2	1	1	1	2
St.29	能登町越坂沖	2	1	1	1	2
St.30	能登町藤波沖	2	1	1	1	1
St.31	穴水町前波沖	3	1	1	1	1
St.32	北湾中央部	1	2	1	1	2
St.33	西湾中央部	1	2	1	1	2
St.34	南湾中央部	1	2	1	1	2
St.35	寿町防波堤内	1	3	2	2	2
St.36	万行防波堤内	1	3	1	1	2
St.37	大田防波堤内	1	2	1	1	2
St.38	七尾市庵町17号防波堤沖	2	2	1	1	1

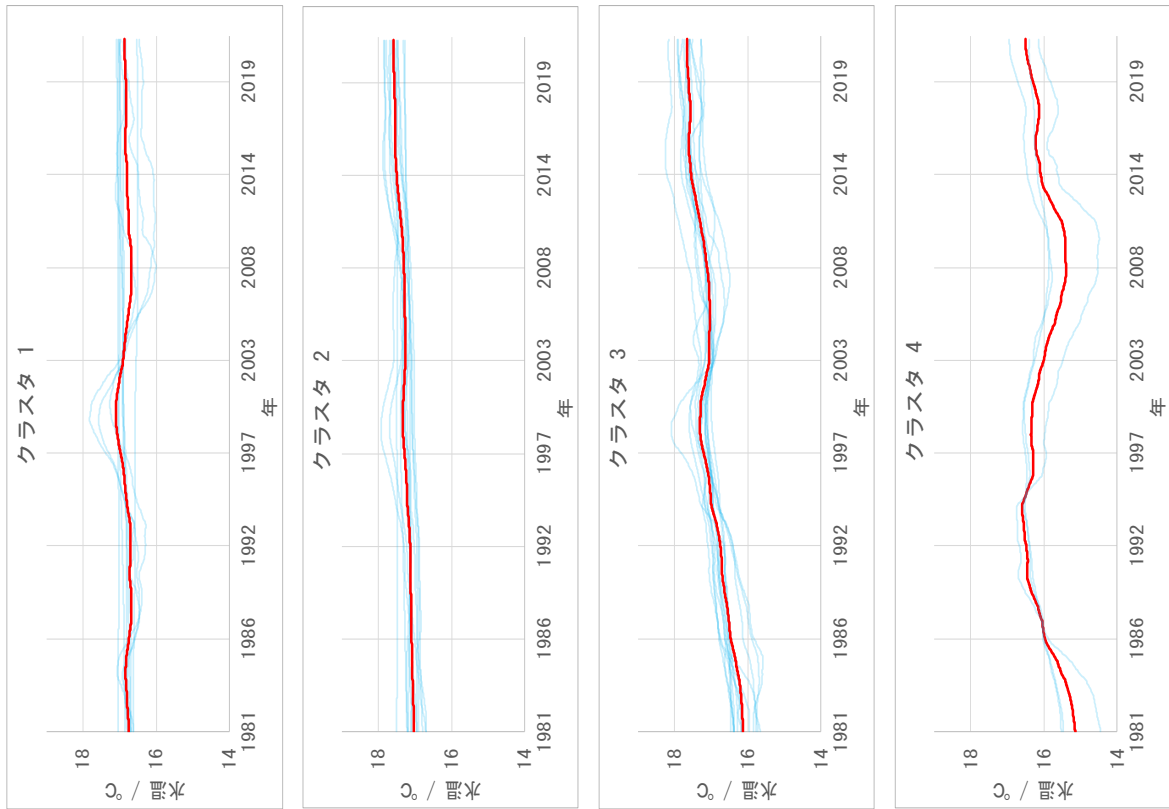


図10-1 クラスタ別のトレンド(水温)

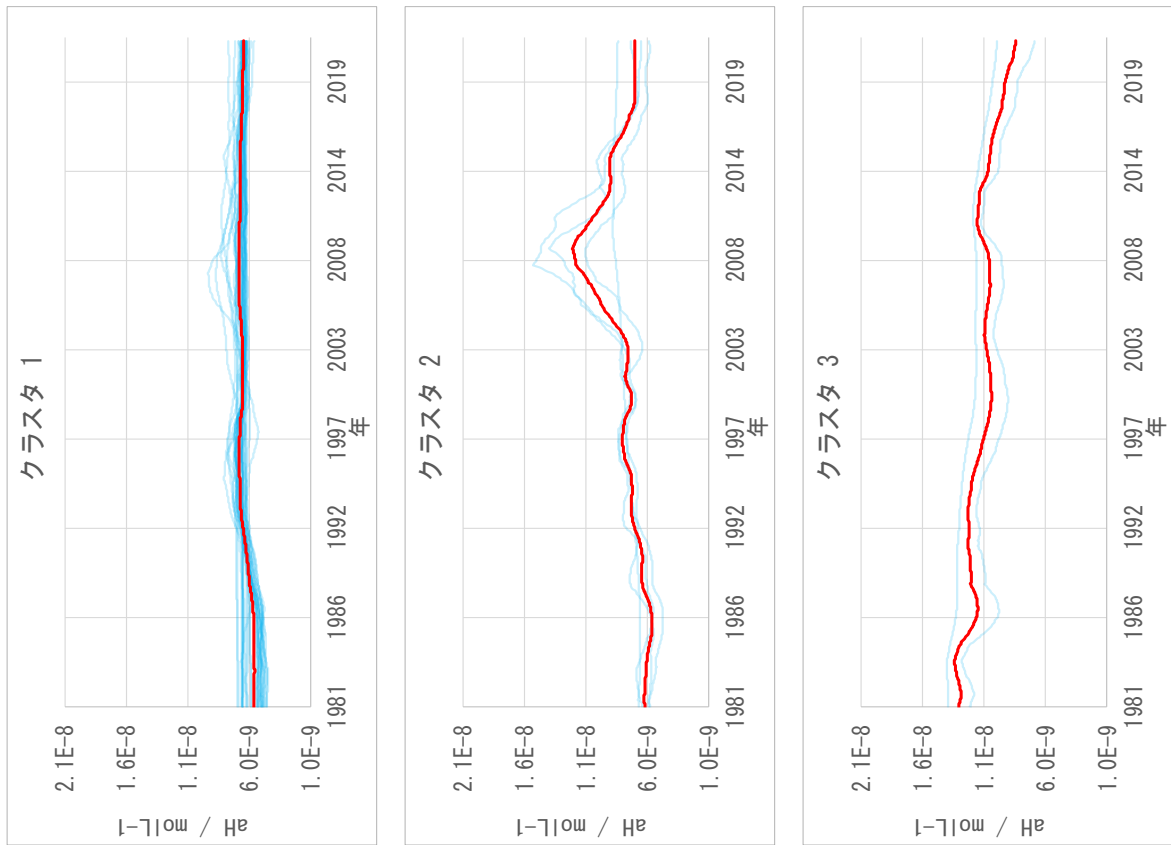
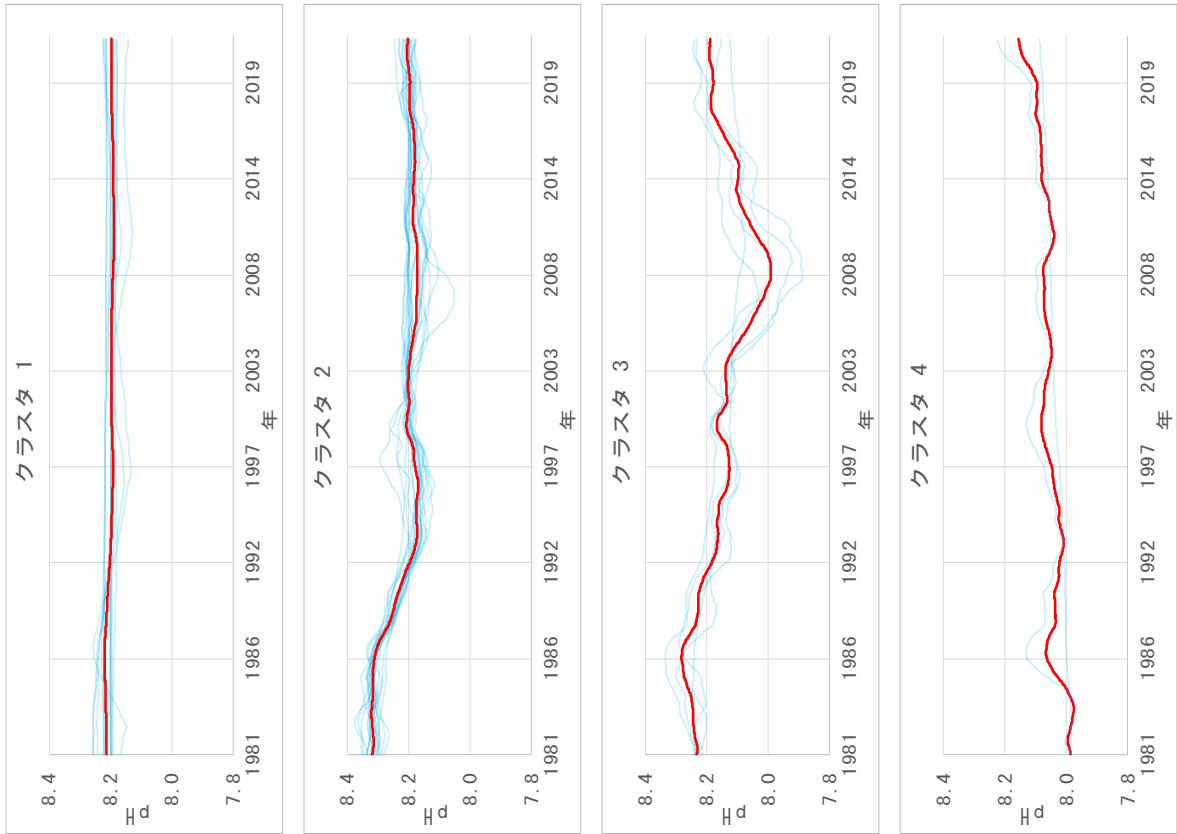


図 10-2 クラスタ別のトレンド(pH, a_H)

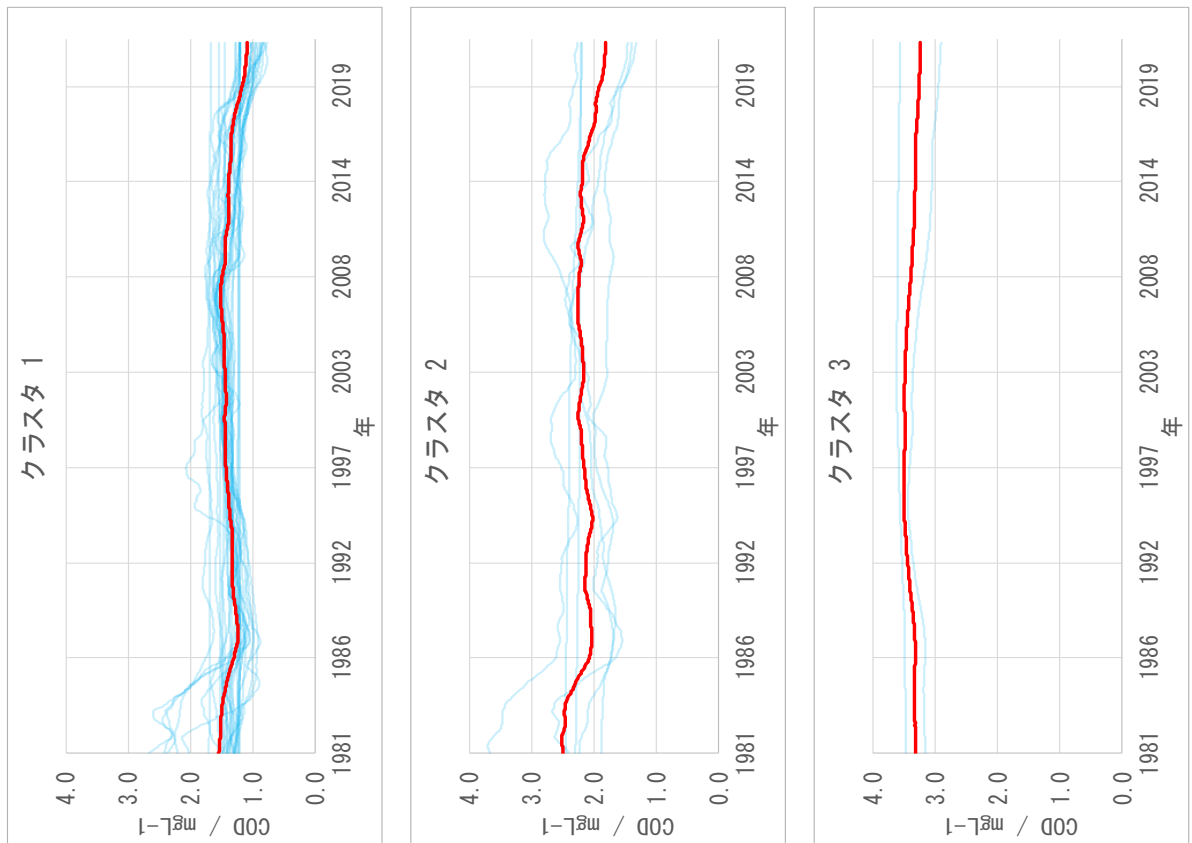
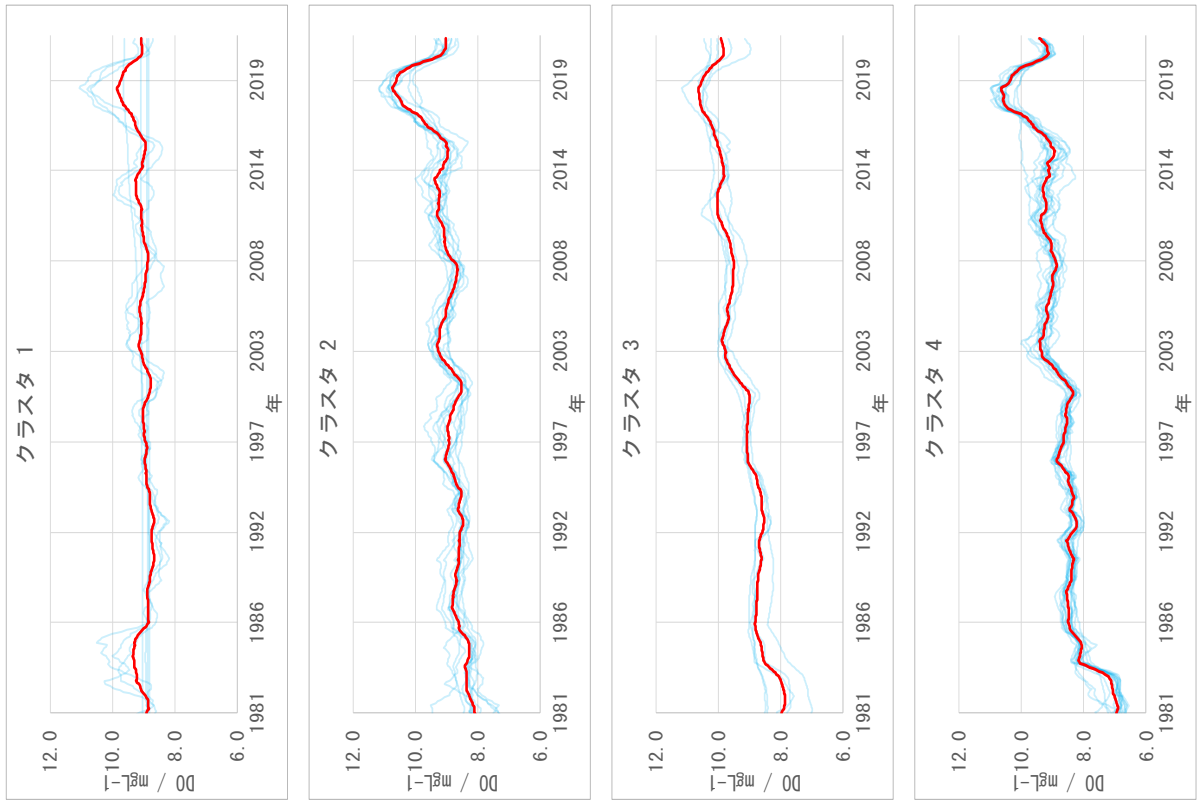


図 10-3 クラスタ別のトレンド(DO, COD)

凡例：

地点番号(水温クラスタ番号, pHクラスタ番号

aqクラスタ番号, DOクラスタ番号, CODクラスタ番号)

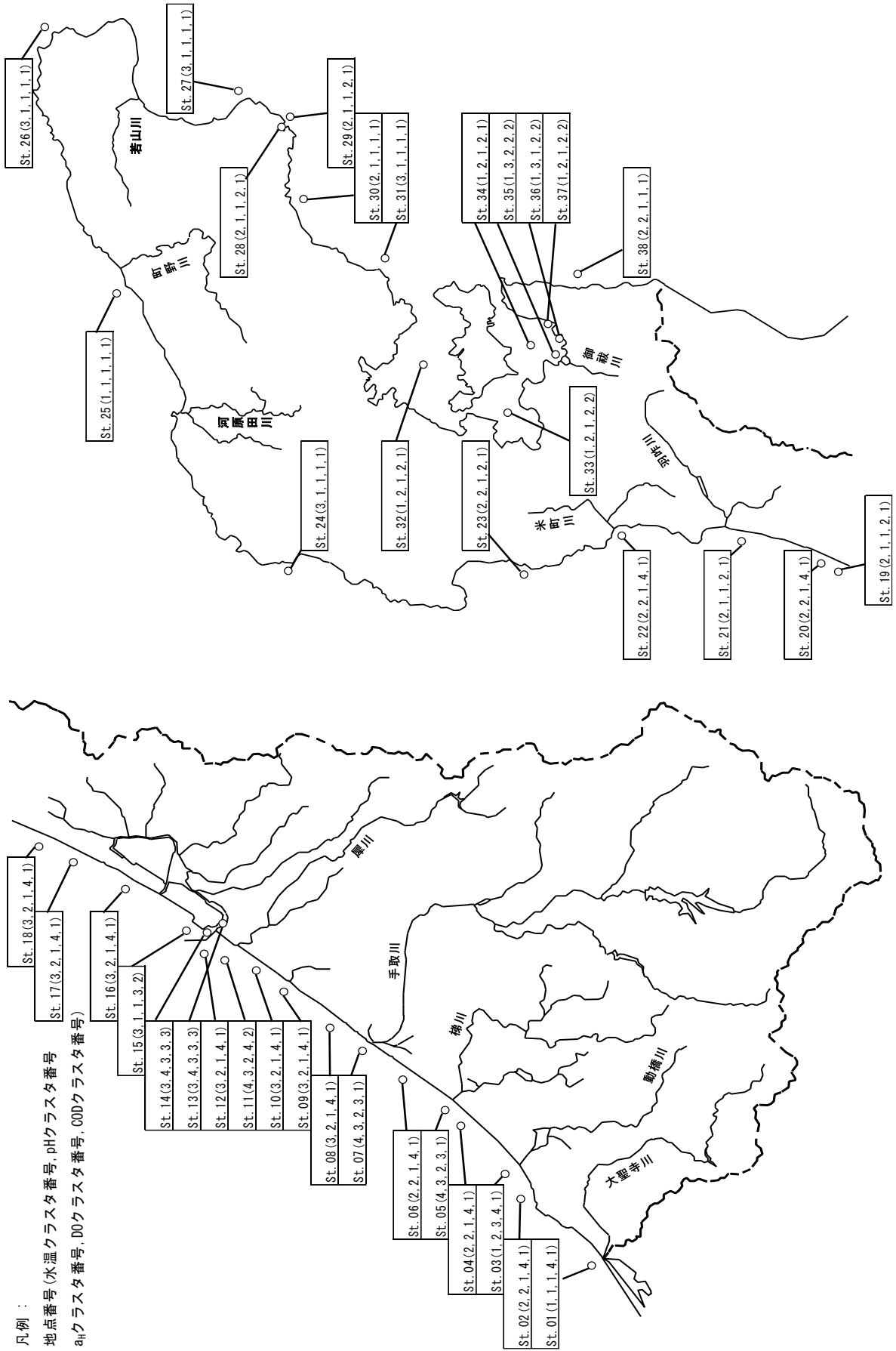


図 11 クラスタ分類結果

4 まとめ

平成 23 年(2011 年)8 月～令和 4 年(2022 年)11 月の間、七尾南湾中央部と白山市笠間沖の 2 地点で採水を行い一連の測定を行ったほか、過去からの常時監視測定調査データを解析した結果、以下のことがわかった。

- ・栄養塩類については七尾南湾中央部で、白山市笠間沖に比べて DTN に対する DIN の割合及び DTP に対する DIP の割合が低い結果となった。
- ・BOD3 及び Chl a は夏季、冬季ともに七尾南湾中央部が白山市笠間沖に比べて高い結果であったが、統計的な有意差は確認できなかった。
- ・七尾南湾中央部と白山市笠間沖の両地点とも、DTN と DTP の間に一定の相関がみられた。
- ・多項目水質計による調査では、南湾中央部において底層 DO の生物 1 類型の基準値を下回った水深があったものの、他の地点では生物 1 類型の基準値を満たしていた。
- ・七尾南湾海域における過去の調査データを整理した結果、COD と窒素・リン関連項目の間に相関はみられなかった。
- ・石川県沿岸海域における水温のトレンドをクラスタリングにより区分したところ、広い範囲で水温上昇傾向がみられるクラスタが分布していたが、七尾湾の各地点は横ばい傾向のクラスタに分類された。

5 引用

- 1) 石川県 (2022), 令和 4 年度 水質測定計画
- 2) 牧 秀明 (2020), 茨城県沿岸海域公共用水域環境基準点における栄養塩類と COD に関連する有機物項目(第 3 報)と有機態窒素の分解性の東京湾との比較, 地方公共団体環境研究機関等と国立環境研究所との共同研究(II 型)「海域における水質管理に係わる栄養塩・底層溶存酸素状況把握に関する研究」報告書, p12-16.
- 3) 統計数理研究所 TIMSAC for R package <https://jasp.ism.ac.jp/ism/timsac/>
- 4) Romain Tavenard et al. (2020), Tsllearn, A Machine Learning Toolkit for Time Series Data, Journal of Machine Learning Research, Vol.21, p1-6.
- 5) 品田 晃良 (2005), 夏季の北海道オホーツク海沿岸海域における *Alexandrium tamarense* の増殖制限因子, 北水試験報, 69, p117-121.
- 6) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (2009), 国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告 No 28 流域における物質循環の動態と水域環境への影響に関する研究
- 7) 右田 裕二 他 (2020), 鹿児島湾湾奥部における COD 関連項目, 栄養塩類, 下層 DO について, 地方公共団体環境研究機関等と国立環境研究所との共同研究(II 型)「海域における水質管理に係わる栄養塩・底層溶存酸素状況把握に関する研究」報告書, p134-140.
- 8) 日本規格協会 (2019), JIS 使い方シリーズ 詳解 工場排水試験方法[JIS K 0102:2019]改定第 6 版, 68.

浜名湖（細江）における底層溶存酸素量等の連続モニタリング

静岡県環境衛生科学研究所

大気水質部 中桐健志, 白岩誉裕希, 平井一行, 杉浦秀治

はじめに

浜名湖は、本湖の他、猪鼻湖、細江湖、庄内湖などの付属湖を有する面積約 70 km² の汽水湖である。幅約 200 m の狭い湖口で遠州灘に接続し、閉鎖性内湾の環境を呈している。湖南部は平均水深 2.5 m と浅く、湖中央で急激に深くなり、湖北部は平均水深 7 m の盆状となっている。(図 1)

湖内の水質は季節的に大きく変化しており、夏季には湖北部で底層溶存酸素量（以下、「底層 DO」という。）が低下し貧酸素水塊が発生する。また、秋季の成層解消時や荒天時にしばしば苦潮が発生し漁業被害等が発生すること等が知られている。

底層 DO の経年的な変動は、近年上昇傾向にあり、夏季の貧酸素水塊も縮小傾向にある¹⁾。これら要因を明らかにすることは、浜名湖水質の将来予測に資すると考えられることから、今回は底層 DO の短期的な変動に着目し、変動要因を検討することとした。

浜名湖における底層 DO の連続モニタリングについては、過去に湖心や猪鼻湖で実施された事例^{2,3)}はあるが、

モニタリング期間が数日又は数週間と限定的であり、貧酸素水塊の発生から解消に至るまでの一連の連続測定の事例はあまり知られていない。そこで、本研究では湖北部の細江湖において 2022 年 4 月から 9 月まで底層 DO 等の連続モニタリングを実施し、それらの周期性や変動要因を解析したので報告する。

方法

1 底層 DO 等の連続モニタリング

2022 年 4 月 12 日から 9 月 27 日までの間、細江湖内のカキ筏に、DO ロガー（PME 社製、MiniDOT ワイパー付き）、水温ロガー（Onset 社製、TidbiT V2）、水位ロガー（Onset 社製、HOBO U-20L）を装着した係留装置を設置（図 2）し、1 時間ごとの値を連続的に記録した。水温ロガーは、湖底から 0.5 m (B0.5)、2 m (B2)、4 m (B4)、6 m (B6) にそれぞれ設置した。また、水位データの大気圧補正のため、静岡県水産・海洋技術研究所浜名湖分場敷地内に圧力ロガー（Onset 社製、HOBO U-20L）を設置した（図 1）。なお、測定精度を確保するため、係留装置は 1 か月毎に引き上げ付着生物を除去した。

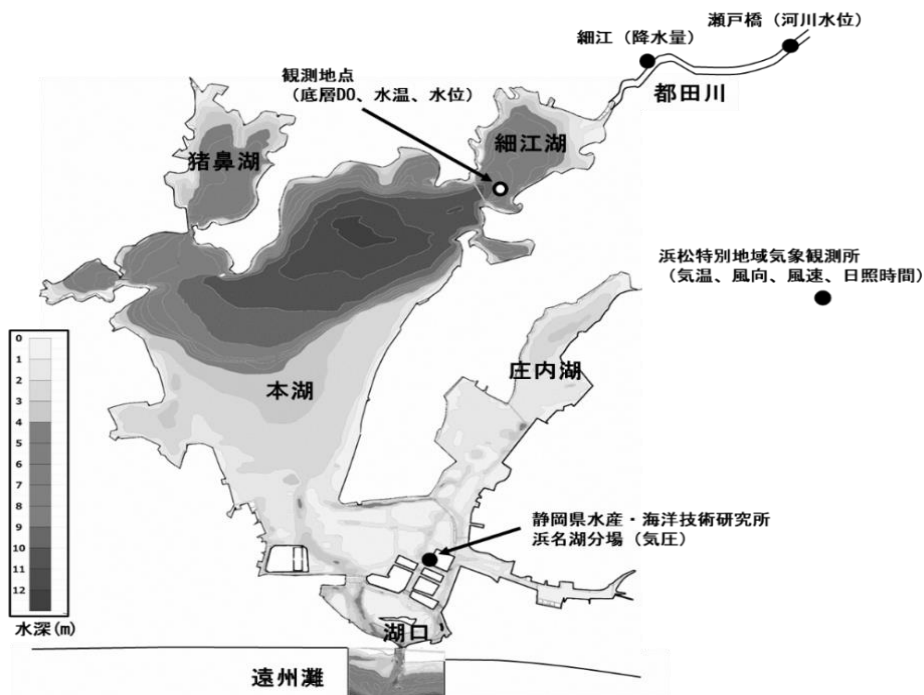


図 1 浜名湖の地形と観測地点(観測項目)

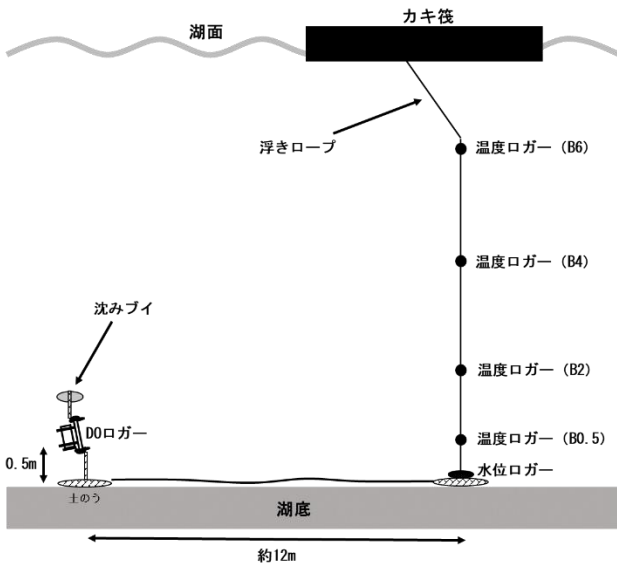


図2 係留装置

2 周期性の確認

R パッケージ TSSS のプログラム period を用いて底層 DO, 水温, 水位の変動の周期性を確認した. なお, 単位時間は1時間とした.

3 変動解析

連続測定した底層 DO, 水温, 水位, 気圧の他, 気象庁観測データ (「浜松特別地域気象観測所」の気温, 風向, 風速, 日照時間) や静岡県土木総合防災情報データ (「都田川瀬戸橋」の河川水位, 「細江」の降水量) (図1) を用いて, それら項目間の関連性等を検証した.

1) 時間変動の解析

1時間毎のデータを用いて, 底層 DO が変動したタイミングで他項目がどのように変動していたか確認した.

また, 潮汐の影響を確認するため, 上げ潮時及び下げ潮時の底層 DO 及び水温の変動分布を解析した.

2) 日変動の解析

各種項目の日平均値又は日積算値を算出し, 底層 DO を目的変数, その他項目を説明変数とする重回帰分析を実施した. 説明変数は, 各種項目が底層 DO に及ぼす影響の日数差等を考慮し, 底層 DO との相互相関関数から最も相関性の大きい日のデータを採用した. また, 多重共線性を取り除くため, 著しく相関の高い底層水温と前日気温のうち, 前日気温を説明変数から除外した. さらに, 目的変数の正規性を高めるため, 底層 DO は対数処理した.

結果および考察

1 底層 DO 等の連続モニタリング

モニタリング期間中の底層 DO 及び水温の変動について, 図3, 4 に示した. 4月から6月末にかけて, 上層と

下層の水温差が徐々に広がっていくのにあわせ, 底層 DO は低下していった. その後, 水温差が7月初旬に最大化し, 完全な貧酸素状態に移行した. 9月の後半に水温差が急激に解消されると同時に, 底層 DO 回復の兆候が認められた.

本研究においては, 4月から6月末までを「移行期」, 7月から9月17日までを「定着期」, 9月18日以降を「解消期」としてその後の解析をすすめることとした.

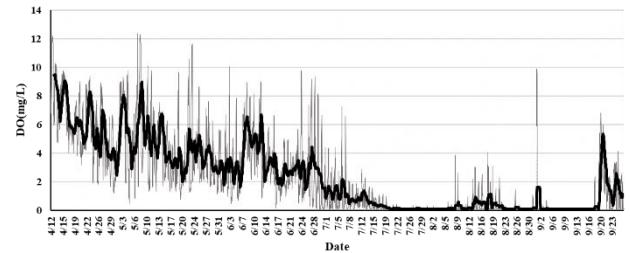


図3 底層 DO の変動(観測期間全体)

細線:実測値, 太線:24時間移動平均値

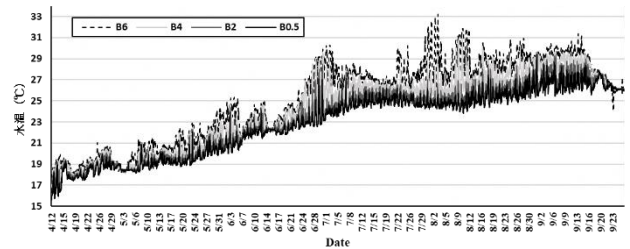


図4 水温の変動(観測期間全体)

2 周期性の確認

底層 DO のピリオドグラムを図5に示した. 0.0397 (25.2時間), 0.0794 (12.6時間)に周波数成分(周期)が認められた. これらは水位の周期性の特徴と一致しており, 潮汐の影響が底層 DO の変動へ影響している可能性が考えられた.

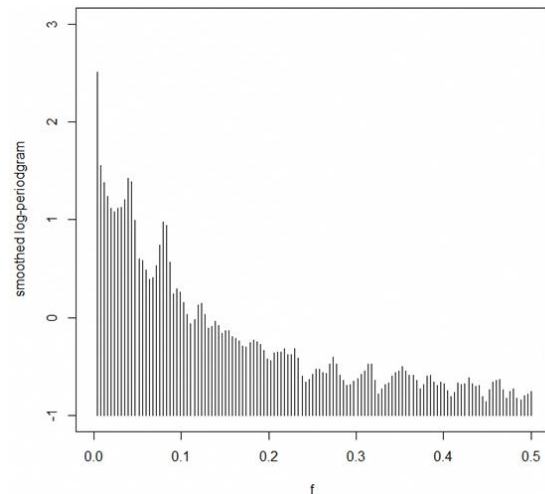


図5 底層 DO のピリオドグラム

3 変動解析

1) 時間変動の解析

① 底層 DO の急激な低下

移行期に 67 回の急激な底層 DO の低下が認められ、そのうち 65 回でほぼ同時に下層側の水温が低下している現象が認められた。さらにそのうち、51 回が上げ潮のタイミングであった。一例を図 6 に示した。

② 底層 DO の一時的な回復

定着期は底層 DO が概ね 0 mg/L の状態であったが、全 79 日間のうち、一時的な DO 回復が 7 月に 25 日間、8 月に 18 日間、9 月に 3 日間確認された。回復したタイミングに着目すると、下層水温が上昇するとともに、下げ潮のタイミングと一致している傾向が認められた。一例を図 7 に示した。

③ 貧酸素解消の兆し

9 月 18 日から上層と下層の水温差が減少しはじめ、9 月 19 日の夜間には 0°C になり、同時に底層 DO が急激に回復した(図 8)。台風 14 号の影響により気圧が低下するとともに雨、風が強まり急激に気温が低下したことによると考えられた。連続測定期間は 9 月 27 日までであったが、同年 10 月以降の常時監視(月 1 回)で貧酸素は確認されておらず、9 月 19 日の急激な DO 回復が貧酸素解消の引き金となった可能性が考えられた。

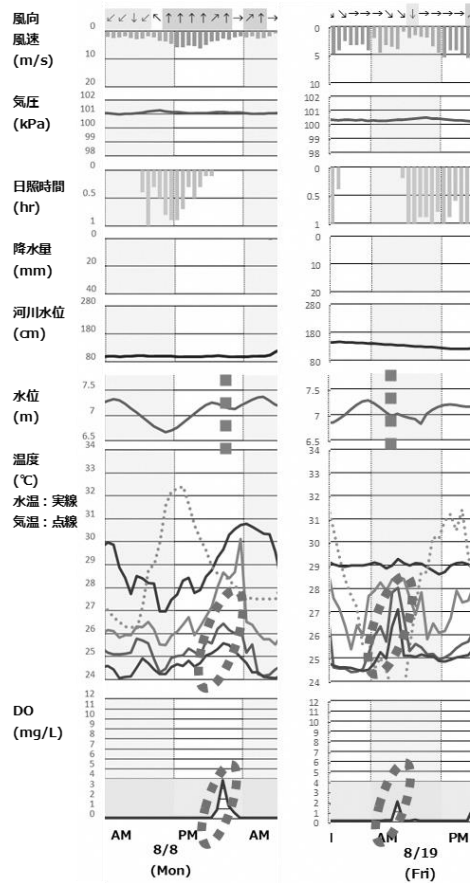


図 7 定着期の時間変動例

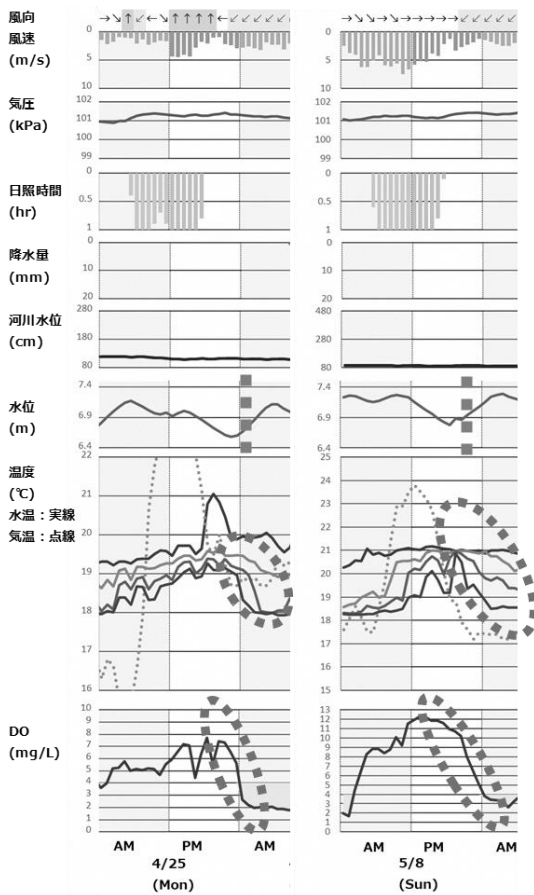


図 6 移行期の時間変動例

※図 6~8 の水温は高い方から B6, B4, B2, B0.5

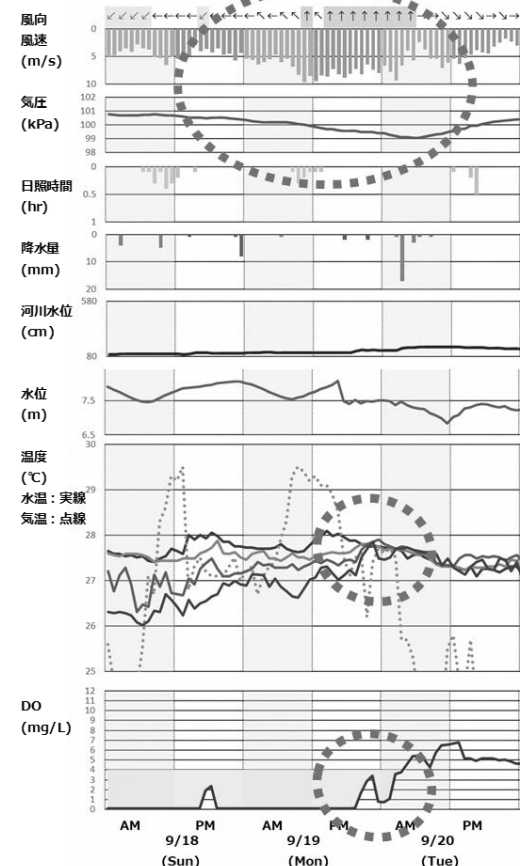


図 8 貧酸素解消時の時間変動

④ 潮汐の影響

上げ潮と下げ潮時の底層 DO 及び水温の 1 時間あたりの変動について、箱ひげ図(図 9)に示した。底層 DO、水温ともに上げ潮時に低下し、下げ潮時に上昇する傾向があり、上層の水温を除き有意な差が認められた。上述した底層 DO の周期性と同様、潮汐が湖内の底層 DO 及び水温の日内変動に影響を及ぼしていることが示唆された。これら変動は、上げ潮時には周辺海域深部からの水の流入、下げ潮時には周辺海域浅部からの水の流入又は河川水流入に伴う下層での循環流の発生によるものと推察された。

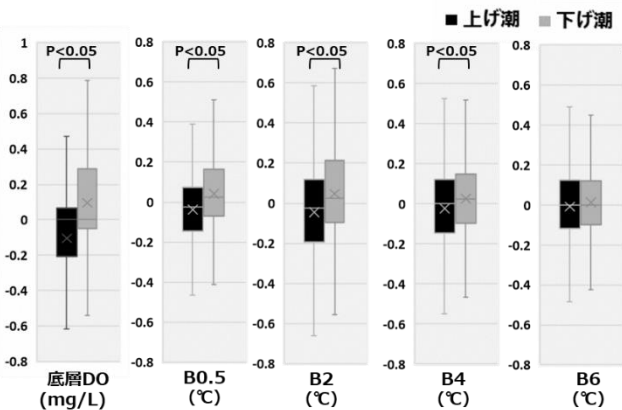


図 9 底層 DO 及び水温変動の箱ひげ図

2) 日変動の解析

重回帰分析の結果を表 1 に示した。VIF が 10 未満、決定係数が 0.72 の当てはまりの良いモデルが得られた。標準化偏回帰係数から、底層 DO の変動に対し、底層水温、河川水位(2 日前)、水温差が強く影響しており、その他、降水量(3 日前)、日照時間(2 日前)、風速(前日)も影響していることが示唆された。これらは、「気温上昇や日照に伴う底層水温の上昇」、「水温差の増大(温度成層強化)」による底層 DO の低下、「降水に伴う河川水量の増加」、「風速の増大」による底層 DO の上昇を示していると考えられた。

表 1 重回帰分析結果

	偏回帰係数	標準化偏回帰係数	t値	p値	VIF
底層水温	-0.159	-0.66	-11.251	< 2e-16 ***	1.96
河川水位 (2日前)	-0.004	-0.24	-3.382	0.00091 ***	2.87
水温差	-0.108	-0.21	-3.812	0.0002 ***	1.70
降水量 (3日前)	0.005	0.19	2.701	0.00769 **	2.75
日照時間 (2日前)	-0.016	-0.11	-2.334	0.02087 *	1.17
風速 (前日)	0.077	0.10	2.207	0.02882 *	1.20
水位	-0.344	-0.07	-1.303	0.19446	1.48
降水量 (当日)	0.001	0.03	0.652	0.5156	1.07
気圧 (3日前)	-0.027	-0.02	0.406	0.68556	1.20

※***: p<0.001、** : p<0.01、* : p<0.05

※回帰モデル : p値<0.001、調整済み決定係数=0.72、定数項=9.37

まとめ

2022 年 4 月から 9 月にかけて細江湖内で底層 DO の連続モニタリングを実施し、貧酸素水塊の発生から解消の兆しが見え始めるところまでの短期的な変動を確認し、得られた知見は以下のとおりであった。

- 底層 DO の時間変動は潮汐と連動しており、上げ潮時に低下、下げ潮時に上昇する傾向が認められた。
- 重回帰分析の結果、底層 DO の日変動は底層水温、上層と下層の水温差、河川水位、降水量、風速が有意に影響していた。

謝辞

本研究を実施するにあたり、連続モニタリング及び解析手法に係る技術的な支援をいただきました国立環境研究所の牧秀明氏、係留装置の設置回収及びメンテナンスに協力を賜りました舞阪町養かき組合の方々に深謝いたします。

また、本研究の一部は、II 型共同研究「沿岸海域における新水質環境基準としての底層溶存酸素(貧酸素水塊)と気候変動の及ぼす影響把握に関する研究」による支援を受けて実施しました。

文献

- 1) 内山道春：浜名湖「湖心」における貧酸素水塊の経年変化と海域 BOD 測定の評価、II 型共同研究「沿岸海域環境の物質循環現状把握と変遷解析に関する研究」報告書(平成 26~28 年度), 72-77
- 2) 青木伸一他：猪鼻湖における貧酸素水塊の消長に及ぼす気象擾乱の影響、海岸工学論文集, 49, 1036-1040(2002)
- 3) 松田義弘他：極閉鎖性内湾・浜名湖における貧酸素素の変動、沿岸海洋研究, 48, 1, 45-55(2010)

大阪湾湾奥部における水温と底層溶存酸素量の関係の年代別傾向

地方独立行政法人 大阪府立環境農林水産総合研究所
環境研究部環境調査グループ 森 育子、上田真彩子、上田真由美、田中咲絵

1. はじめに

閉鎖性海域である大阪湾は、外海と海水が交換されにくいいため、汚濁物質が海域内部に蓄積しやすいという特徴を持っている。また、夏季には、海面の水温上昇と河川からの淡水の流入により成層構造が発達し、海水が鉛直方向に混合しにくくなるため、底層の溶存酸素量(DO)が低下しやすいという特徴も有している。このため「水質総量削減制度」の導入により水質の改善が進んだものの、湾奥部においては、夏季に貧酸素水塊の発生が続いている。

このたび大阪湾の湾奥部について、令和4年12月に底層DOに係る水質環境基準の水域類型が「生物3(2.0 mg/L以上)」に指定された。しかし、湾奥部には、夏場を中心に底層DOが2.0 mg/Lを下回る地点があり、環境基準達成に向けたさらなる取組の推進が必要とされている。

このような現況を踏まえ、大阪府公共用水域等環境データベースシステムの1981年から2019年度までの湾奥部の環境基準点のひとつのC-3地点のデータを用いて、底層DOと水温の年代別の関係と経年変化についてとりまとめた結果を報告する。



図1 C-3地点

2. データセット

貧酸素水塊の発生が多発している大阪湾の湾奥部の環境基準点のひとつであるC-3地点(図1)の大阪府公共用水域等環境データベースシステムの1981年から2019年度までの月1回の調査データを使用した。なお、調査地点の水深は12 m前後であった。

3. 結果及び考察

3-1. 表層と底層の水温差と底層DOの年代別の関係

C-3地点における1981~2019年度の全データについて、表層と底層の水温差に対して、底層DOをプロットしたところ、表層と底層の水温差が大きいときに、底層DOが低い傾向は認められたが、 r^2 は0.31程度であった(図2)。底層DOが2 mg/L未満の月別日数が最も大きかった8月(表1)のみを抽出した場合も、同様の傾向で、 r^2 は0.17とさらに小さかった(図3)。

しかし、年代別にみると、1981～1999年は水温差が大きいときに底層 DO が低い傾向が認められ、 r^2 も 0.69 と比較的高い値であった（図 3）。この傾向から、1999 年以前は、表層と底層の水温差の拡大による鉛直混合の障害が底層 DO 低下の要因のひとつであったことが推察された。一方、2000 年以降は、水温差が大きいときに底層 DO が低い傾向が認められなかった。2000 年前後に C-3 地点の環境が変わった可能性が考えられた。

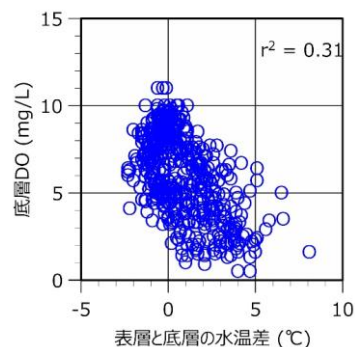


図 2 1981～2019 年度の C-3 地点における表層と底層の水温差に対して底層 DO をプロットした図

表 1 月別の底層 DO が 2 mg/L 未満の日数
(1981～2019 年度、C-3 地点)

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
非達成 日数	0	0	0	0	0	1	6	12	4	0	0	0

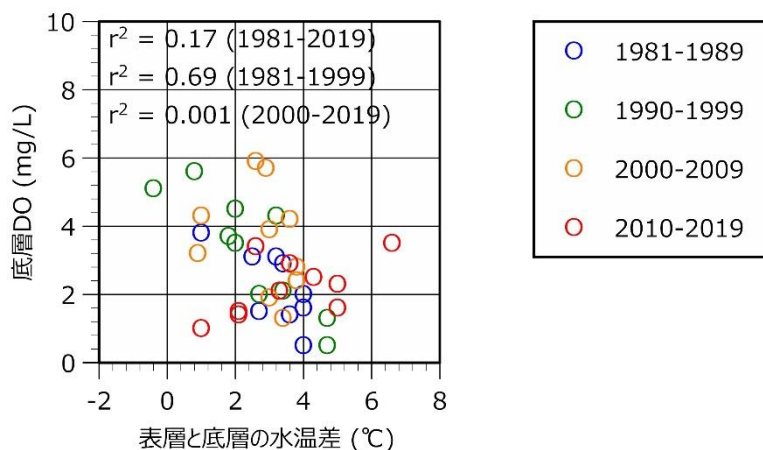


図 3 C-3 地点における 8 月の表層と底層の水温差に対する底層 DO の年代別プロット

3-2. 水温・底層 DO の年代別経年変化

C-3 地点における 8 月の気温・表層水温・底層水温・表層と底層の水温差・底層 DO の 3 年の移動平均の経年変化を図 4 に示す。表層水温は気温と同調的に変動していた。底層水温も 2000 年以前は、同様の傾向が認められたが、2001 年からその傾向が不明瞭となり、2007 年以降は大きな変動がなく 24℃前後を維持していた。底層 DO は、2000 年以前は表層と底層の水温差と逆相関的な変動を示していたが、2001 年以降その傾向が不明瞭となった。これらの結果から、2000 年前後に底層の環境が変化したことが推察された。

なお、3 年の移動平均値を用いた場合、気温・表層水温及び底層水温については、トレンド解析により上昇の傾向が認められたが、水温差及び底層 DO については、上昇・低下どちらの傾向も認められなかった。

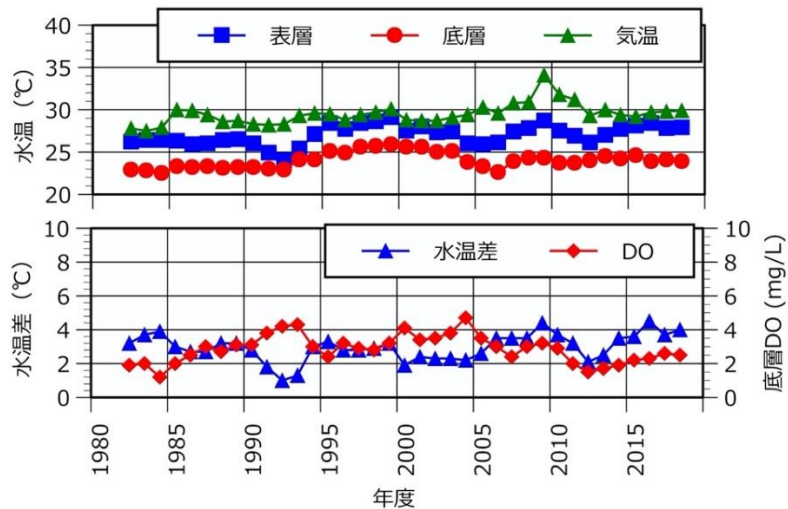


図4 C-3地点における1981年から2019年8月の気温・水温・水温差・底層DOの3年の移動平均値

4. まとめ

大阪府公共用水域等環境データベースシステムの1981年から2019年度までの8月（底層DOが2 mg/L未満の月別日数が最多の月）のデータを用いて、湾奥部のC-3地点における底層DOと水温の関係について解析を行ったところ、以下が明らかになった。

- 表層と底層の水温差と底層DOの関係
 - ・ 1981～1999年は水温差が大きいときに底層DOが低い傾向が認められ、1999年以前は、表層と底層の水温差の拡大による鉛直混合の障害が底層DO低下の要因のひとつであったことが推察された。
 - ・ 2000年以降は、水温差が大きいときに底層DOが低い傾向が認められず、2000年前後にC-3地点の環境が変わった可能性が考えられた。

- 水温と底層DOの経年変化
 - ・ 表層水温は気温と同調的に変動していた。
 - ・ 底層水温は2000年以前は、表層水温と同様の傾向が認められたが、2001年からその傾向が不明瞭となった。
 - ・ 底層DOは、2000年以前は表層と底層の水温差と逆相関的な変動を示していたが、2001年以降その傾向が不明瞭となった。
 - ・ これらの結果から、2000年前後に底層の環境が変化したことが推察された。

干潟における栄養塩類の遊離（2020～2022年度）

（公財）ひょうご環境創造協会 兵庫県環境研究センター 宮崎 一

1 目的

兵庫県が面する播磨灘においては、近年、栄養塩類濃度の低下が懸念されている。兵庫県では下水処理施設の季節別管理運転やため池のかいぼりを行い、2019年には全窒素及び全りんの水質目標値（下限値：窒素 0.2 mg/L、全りん 0.02 mg/L）を播磨灘北部と大阪湾西部に設定して栄養塩類濃度の適正化に向けた対応を実施しているが、他に実施例のない取り組みであり、多様な方策の検討が望まれる。

「浅海域の底質中の微生物は複雑な有機化合物の酸化分解や一次生産に不可欠な窒素・りんは無機化再生に重要な役割を果たしている。」¹⁾とされることから、当センターでは干潟における栄養塩類の遊離（再生産）を有望な方策として考え、窒素について検討した結果を報告する。



図1 底質を採取した御前浜の位置(▲)

2 調査方法

大阪湾奥に位置する干潟である御前浜(図1)にて、砂分が多い St. ①及び泥分が多い St. ②の表層から 5cm までの底質を採取した。これらの底質中に含まれる有機態窒素を、同じく底質中に存在する微生物が分解・無機化することを利用して底質から

の DIN (溶存態無機窒素) 遊離を行った。この実験は図2に示す手法により実施し、遊離量の経時変化、底質採取地点による違いを検討した。

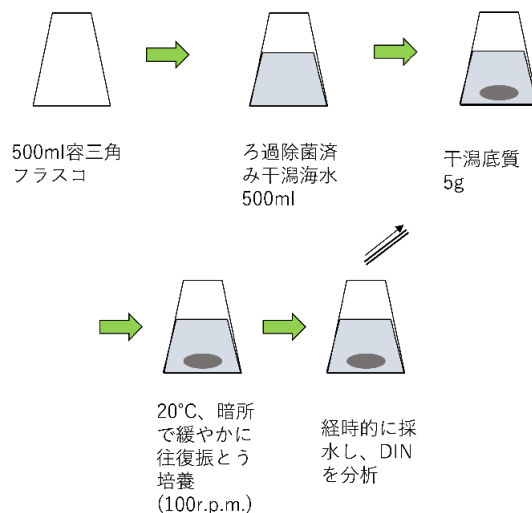


図2 底質からの DIN 遊離実験操作手順及び実験中の試料（ガラス器具は 180℃、2 時間の乾熱滅菌を実施後使用し、海水のろ過除菌にはオートクレーブ済みのニトロセルロースフィルター（孔径 0.2 μm）を使用した。）

また、同様の実験を干潟底質の代わりに、御前浜において最も頻繁に認められる河川流下物であるリター（植物の遺骸）を試料として、干潟由来の微生物による分解・無機化実験を実施した。

なお、本調査の実施にあたっては 2017 年度に、本 II 型研究の前身である II 型研究「海

域における水質管理に係わる栄養塩・底層溶存酸素状況把握に関する研究(2017-2019)」において実施した「有機態窒素の分解試験」を参考とした。

3 結果と考察

御前浜の底質を試料とした実験では St. ①及び St. ②ともに DIN の濃度が 2 週間後に実験開始時の 2.5 倍を超え、DIN の遊離が認められた。

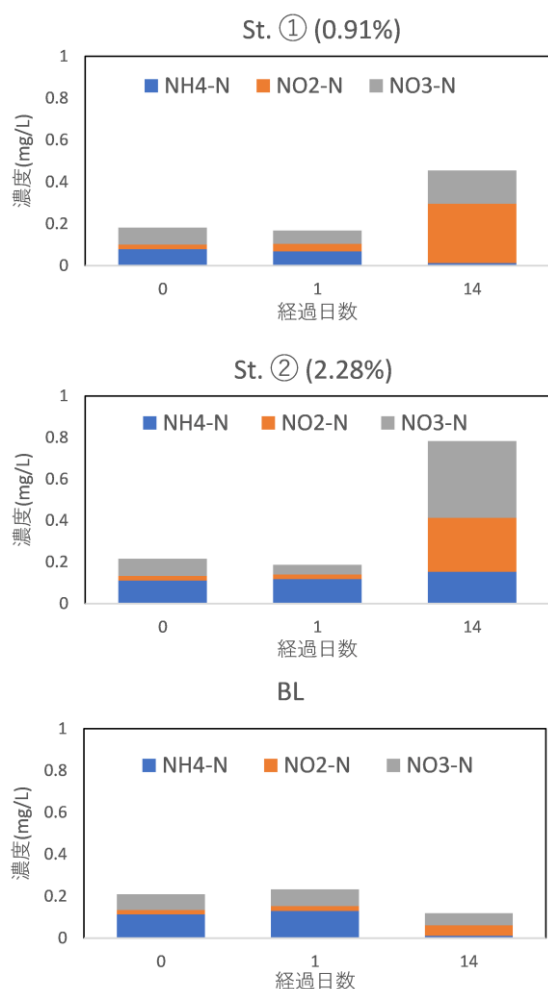


図3 底質からの DIN の遊離
(NH₄-N: アンモニア性窒素、
NO₂-N: 亜硝酸性窒素、
NO₃-N: 硝酸性窒素)

図上の ()内は IL:強熱減量(%)、BL は
ブランクを示す。

また、泥分が多く IL (強熱減量)が高い(有機物含量が高い)干潟(St. ②)の方が DIN の遊離量が多いことが示唆された(図3)。

DIN の存在割合としては実験開始当初認められた NH₄-N の割合が減少し、実験日数の経過に伴い NO₂-N、NO₃-N が増加した。これは有機態窒素中での窒素の主な存在様式であるアミノ基からの遊離、環境中での酸化の過程を経たことが理由と考えられた。

リターを試料とした実験では、リターが河川を流下する過程において易分解性の有機態窒素は分解されており、干潟では主にリター中に残留した比較的難分解の有機態窒素を分解することになる。このため、リター実験においては底質からの遊離実験と比較して分解に係る経過日数を長く設定した(最長 26 日間 図4)。また、泥分が多

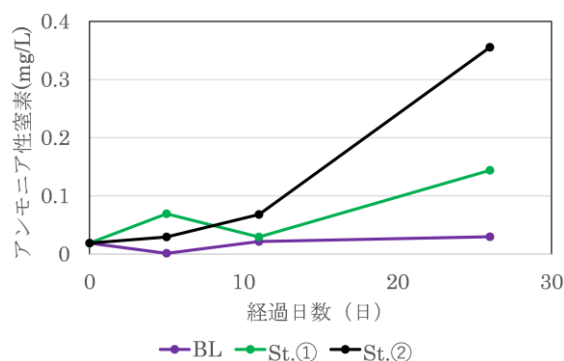


図4 リターからの NH₄-N の遊離

く IL が高い干潟(St. ②)の方が NH₄-N の遊離量が多くなることは底質を試料とした実験と同様であった。

今後は、干潟底質中の微生物による環境中の含窒素有機物の分解と窒素供給の関係、干潟の性状及び水質、泥分、水温等の環境条件がこの分解と窒素供給に与える影響の検討を行う予定である。

4 参考文献

- 1) FEMS Microbiology Reviews 23 (1999) 563-590

徳島県沿岸海域における栄養塩類，COD 関連項目の現状と傾向

徳島県立保健製薬環境センター 辻真拓

1 緒言

徳島県は、播磨灘（瀬戸内海）、紀伊水道、太平洋と三つの性質の異なる海域に囲まれ、豊かな水産資源に恵まれている。特に播磨灘と紀伊水道は、特徴のある地形や黒潮の影響で内外交流種が多く生物多様性や生産性が高いことから、漁船漁業と藻類養殖業が盛んに営まれている。また、水質汚濁については、県内海域の環境基準点における全窒素・全りんや COD において環境基準をほぼ 100%達成している。今回、上記の 3 海域について、公共用水域常時監視点から各 1 地点を選び、栄養塩類，COD，COD に関連する有機物指標を夏季と冬季の年 2 回測定し、各項目と地点別の関係について検討した。

2 方法

2.1 調査・採水時季

2020 年 8 月，2021 年 2 月及び 8 月，2022 年の 2 月及び 8 月の計 5 回行った。

2.2 調査地点

徳島県沿岸海域の公共用水域常時監視点のうち、図 1 及び表 1 に示す県北沿岸海域、紀伊水道海域、県南沿岸海域の 3 地点の表層（海面下 0.5 m 位置）で調査・採水を行った。この 3 地点の水質環境基準生活環境項目の類型はいずれも A（COD 2 mg/L 以下）である。



提供元：徳島県総合地図提供システム

図 1 調査地点

表 1 各調査地点の特徴

地点	県北沿岸海域 608-1 (Ha-1)	紀伊水道海域 609-2 (Ki-2)	県南沿岸海域 607-3 (Ka-3)
水域	瀬戸内海 (播磨灘)	瀬戸内海 (紀伊水道)	太平洋
類型	A II	A II	A
水深	約 35 m	約 31 m	約 86 m
地点の特徴	播磨灘南部に位置し、閉鎖性海域に属している	太平洋、播磨灘、吉野川に接しており、それぞれの影響を受ける恐れがある	太平洋に面し、黒潮の影響を受けやすい

2.3 分析方法

採水した海水試料は、当日に分注・ろ過を行った。

ろ過をせず分注した試料は、COD の分析に使用した。

試料 1 L を、450 °C で 4 時間焼成処理した 47 mm 径のガラス繊維フィルターGF/C を用いて吸引ろ過し、ろ紙をクロロフィル a (Chl a) の分析に使用した。ろ液は、溶存性 COD (D-COD)、BOD_{3,7} (D-BOD_{3,7})、有機炭素 (DOC)、全窒素 (DTN)、全りん (DTP)、硝酸態窒素 (NO₃-N)、亜硝酸態窒素 (NO₂-N)、アンモニア態窒素 (NH₄-N)、りん酸態りん (PO₄-P) 及び珪酸塩 (シリカ, SiO₂) の分析に使用した。なお、BOD は、ろ液と未ろ過試料を用いて 3 日後と 7 日後の溶存酸素量を測定し、JIS K 0102 21 に準じて BOD₃、BOD₇、D-BOD₃ 及び D-BOD₇ を求めた。

また、試料 500 mL を、450 °C で 4 時間焼成処理した 25 mm 径のガラス繊維フィルターGF/F を用いて吸引ろ過し、ろ紙を懸濁性有機炭素 (POC) の分析に使用した。

分注・ろ過した試水及びフィルター類は冷凍して国立環境研究所に送付し、COD、D-COD、BOD 及び D-BOD は当センターで測定した。

いずれの項目についても n=1 で分析を行い、計 5 つずつ (夏季 3、冬季 2) の分析データを得た。

3 結果と考察

3.1 栄養塩類

栄養塩類の測定結果を表 2 に示す。前回の調査 (2017~2019 年¹⁾) と同様に、珪酸塩以外の項目については、夏季より冬季で高くなる傾向が見られた。

また、2011 年~2022 年における季節別の DIN、DTN、DIP 及び DTP の推移を図 2 に示す。この期間においても栄養塩類の濃度は夏季よりも冬季で高く、DIN 以外の項目については県南沿岸海域が他の海域よりも低い傾向が見られた。

表2 2020年8月～2022年8月の夏季及び冬季の栄養塩類の平均値
(単位はすべて mg/L, カッコ内の数字は当該時季における全測定データの標準偏差)

地点	時季	DIN				
		(NO ₃ -N+NO ₂ -N +NH ₄ -N)	DTN	DIP (PO ₄ -P)	DTP	SiO ₂
県北沿岸 (Ha-1)	夏季	0.008 (0.001)	0.18 (0.006)	0.007 (0.0007)	0.013 (0.002)	0.65 (0.41)
	冬季	0.006 (0.004)	0.18 (0.011)	0.011 (0.003)	0.018 (0.003)	0.16 (0.17)
紀伊水道 (Ki-2)	夏季	0.006 (0.004)	0.18 (0.047)	0.005 (0.003)	0.010 (0.003)	0.81 (0.15)
	冬季	0.032 (0.016)	0.20 (0.004)	0.010 (0.003)	0.019 (0.0009)	0.21 (0.04)
県南沿岸 (Ka-3)	夏季	0.007 (0.003)	0.16 (0.024)	0.002 (0.002)	0.008 (0.002)	0.43 (0.19)
	冬季	0.030 (0.015)	0.19 (0.004)	0.010 (0.003)	0.015 (0.004)	0.32 (0.02)



図2 季節別のDIN, DTN, DIP, DTPの推移

3.2 COD 及び COD 関連項目

COD 関連項目の測定結果を表 3 に示す。懸濁性 COD (P-COD) は COD と D-COD の差から求め、全有機炭素 (TOC) は DOC と POC の和から求めた。COD, D-COD 及び P-COD は冬季より夏季で高くなる傾向が見られた。2020 年夏～2022 年夏における COD 年間平均値は、県北沿岸海域は 1.84 mg/L, 紀伊水道海域は 1.53 mg/L, 県南沿岸海域は 1.11 mg/L であり、前回の調査結果¹⁾と比べやや低い結果であった (2017 年夏～2020 年冬における COD 年間平均値はそれぞれ 1.95 mg/L, 2.04 mg/L, 1.79 mg/L)。

2002 年冬～2022 年夏 (冬は 2 月頃, 夏は 8 月頃) における地点別の COD の推移を図 3 に示す²⁾。いずれの地点においても COD は冬季より夏季で高くなる傾向が見られ, 全期間を通じて県南沿岸海域の COD は他の 2 地点よりも低い傾向が見られた。また, 3 地点とも環境基準(2 mg/L 以下)の達成率は 9 割以上であった。

表 3 2020 年 8 月～2022 年 8 月の夏季及び冬季の COD 関連項目の平均値
(単位は Chl a は $\mu\text{g/L}$, 他はすべて mg/L,
かっこ内の数字は当該時季における全測定データの標準偏差)

地点	時季	COD	D-COD	P-COD (COD-D-COD)	DOC	POC	TOC (DOC+POC)	Chl a
県北沿岸 (Ha-1)	夏季	2.18 (0.264)	1.71 (0.292)	0.46 (0.325)	1.59 (0.244)	0.31 (0.071)	1.46 (0.314)	0.83 (0.397)
	冬季	1.34 (0.60)	1.21 (0.502)	0.13 (0.099)	1.16 (0.004)	0.32 (0.032)	1.48 (0.027)	2.97 (1.149)
紀伊水道 (Ki-2)	夏季	1.87 (0.112)	1.52 (0.215)	0.35 (0.161)	1.27 (0.212)	0.43 (0.176)	1.70 (0.387)	1.55 (0.638)
	冬季	1.03 (0.594)	0.99 (0.537)	0.04 (0.056)	0.95 (0.214)	0.26 (0.049)	1.22 (0.263)	1.66 (0.776)
県南沿岸 (Ka-3)	夏季	1.35 (0.122)	1.26 (0.162)	0.087 (0.140)	1.18 (0.494)	0.24 (0.105)	1.42 (0.444)	0.99 (0.647)
	冬季	0.75 (0.353)	0.72 (0.254)	0.03 (0.099)	0.71 (0.163)	0.14 (0.024)	0.85 (0.188)	0.49 (0.360)

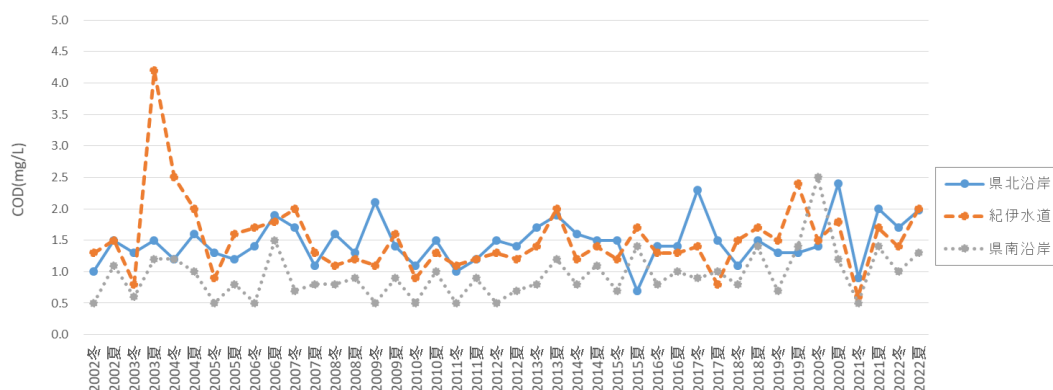


図 3 COD の推移

3.3.1 COD 関連項目の推移と比較

2011 年夏～2022 年夏における地点別の COD, D-COD 及び P-COD の推移を図 4 に示す。前回の調査²⁾と同様、COD の大半は D-COD が占めており、本県の COD は D-COD に依るところが大きいといえる。

2011 年夏～2022 年夏における D-COD の推移を図 5 に示した。なお、算出の結果 P-COD が負の値となった測定結果は外れ値として除いた。D-COD について、県北沿岸海域で最も高く、県南沿岸海域で最も低い傾向がみられた。過去の調査（2011～2014 年）³⁾では、陸水の流入により塩分と D-COD とは逆相関を示している。県南沿岸海域は他の 2 地点よりも塩分が高い傾向にあり、陸水の影響が少ない地点の特徴を反映していると考えられる。

(2022 年塩分平均値 県北沿岸海域 32.18, 紀伊水道海域 32.46, 県南沿岸海域 34.00)

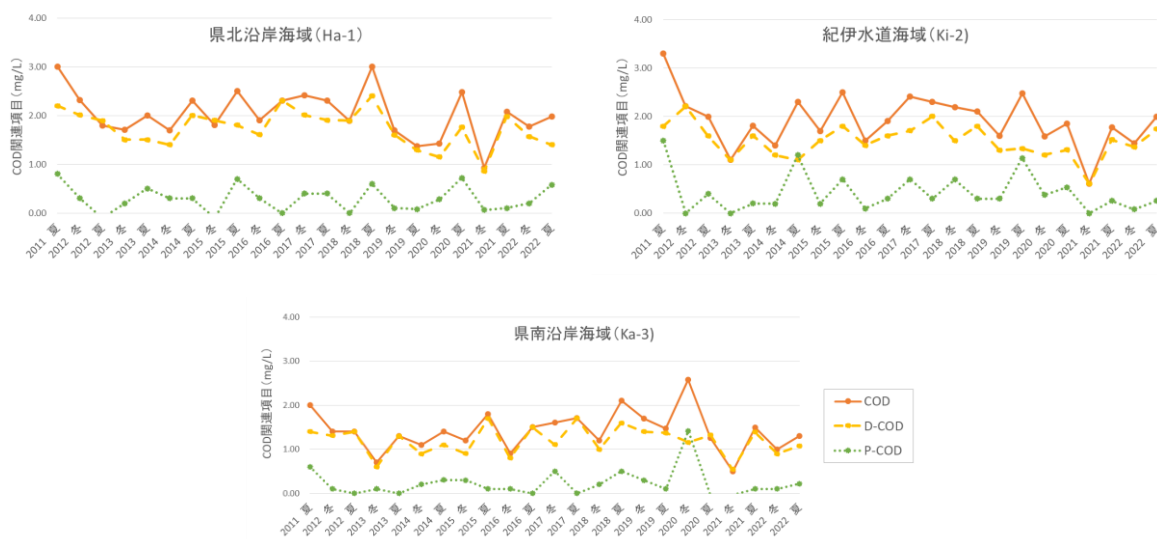


図 4 COD, D-COD, P-COD の推移

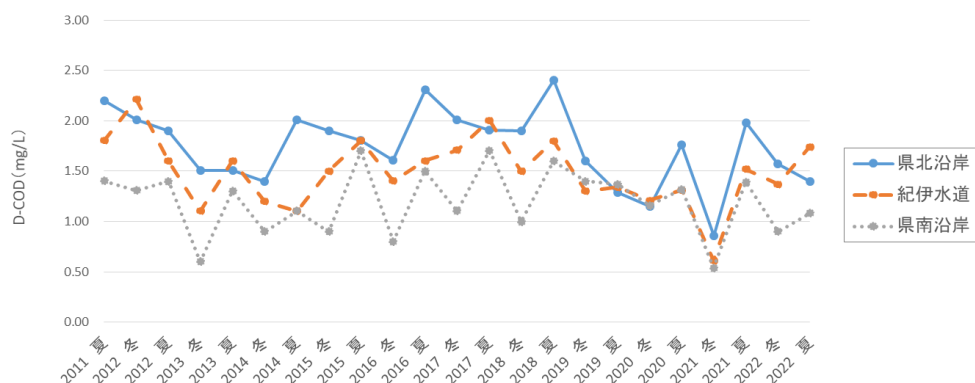


図 5 D-COD の推移

3.3.2 BOD の推移と比較

2014年夏～2022年夏における未ろ過検体とろ過検体の BOD₃・BOD₇ (3日間, 7日間の BOD) を図 6 に示す。また, BOD₃ (D-BOD₃) に対する BOD₇ (D-BOD₇) の関係を図 7 に示す。なお, 算出の結果 BOD が負の値となったものは, 誤差の範囲内とみなし 0 として扱った。県北沿岸海域を除く 2 地点で BOD₃ と BOD₇ に強い正の相関が見られたが, 図 8 に示す地点別の COD に対する BOD₃ と BOD₇ の関係では, 全ての地点において明確な相関関係はみられなかった。

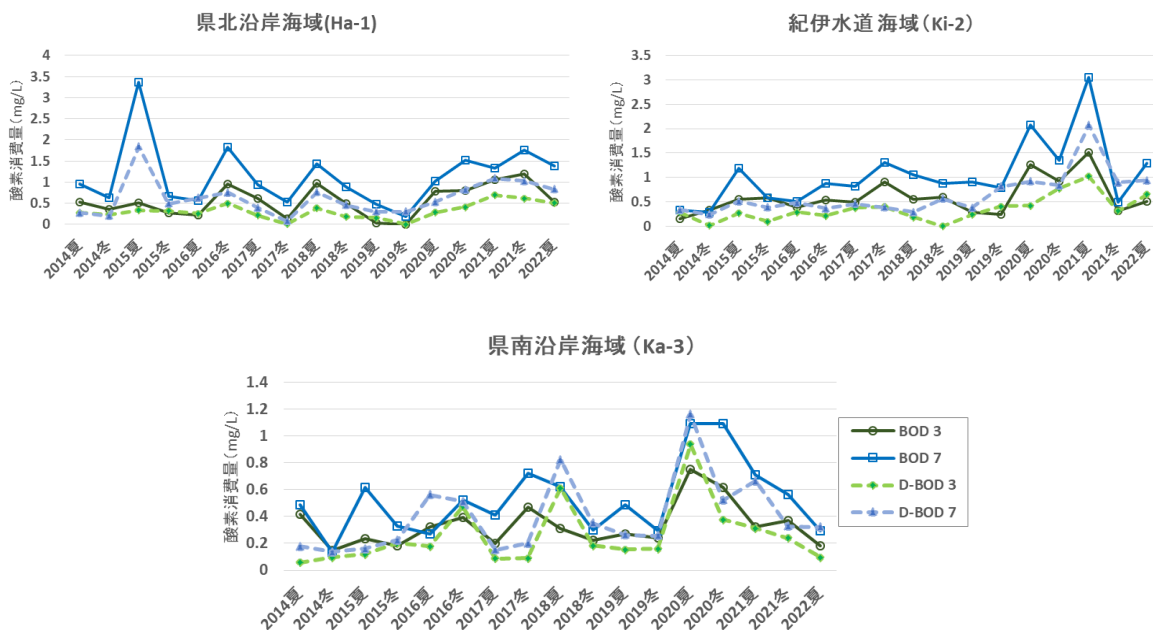


図 6 BOD の推移

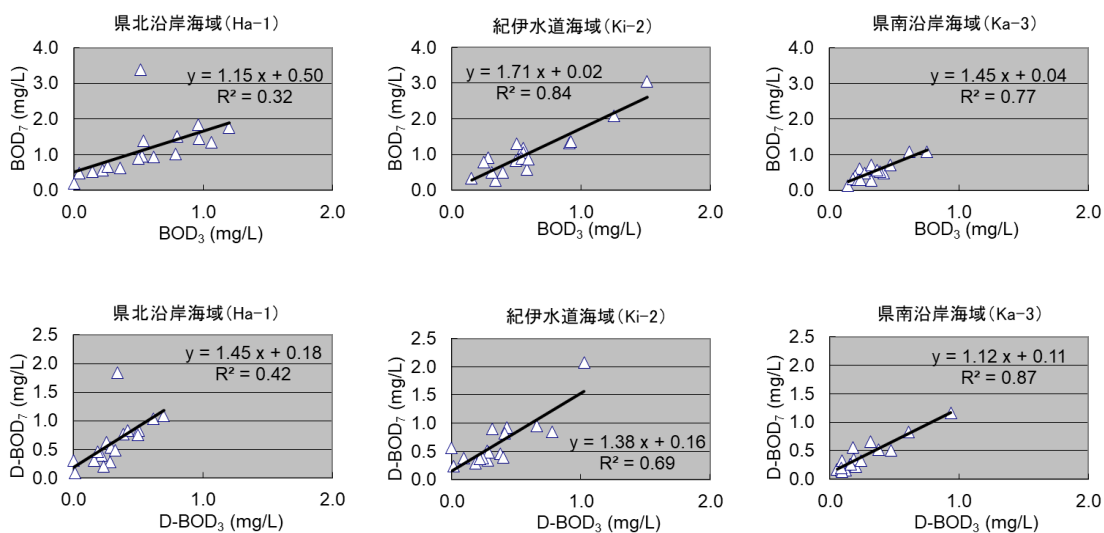


図 7 BOD₃ (D-BOD₃) と BOD₇ (D-BOD₇) との関係

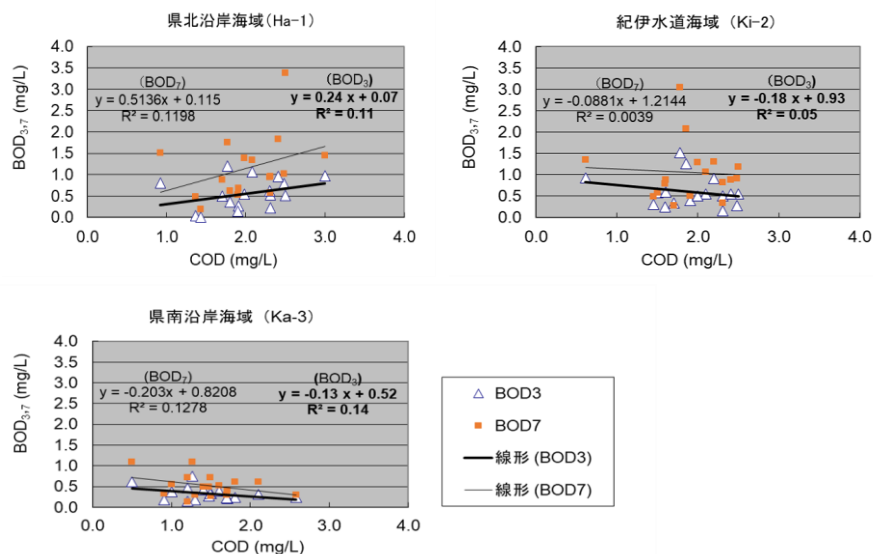


図8 BOD_{3,7}とCODとの関係

4 まとめ

徳島県沿岸海域3地点において2020年8月～2022年8月に調査・採水を行ったところ、次のことがわかった。

- (1) 珪酸塩以外の栄養塩類は冬季で高くなる傾向があり、DTN、DIP、DTPは県南沿岸海域で最も低い傾向が見られた。
- (2) CODは冬季よりも夏季に高く、県南沿岸海域において最も低い傾向がある。また、D-CODは県北沿岸海域で最も高く、県南沿岸海域で最も低い傾向が見られた。
- (3) BOD₃とBOD₇、D-BOD₃とD-BOD₇との間に正の相関がみられたが、CODとBODには相関は認められなかった。

5 文献

- 1) II型共同研究, 2017-2020, 「海域における水質管理に係わる栄養塩・底層溶存酸素状況把握に関する研究」, 78-85
- 2) 公共用水域及び地下水の水質測定結果(平成14年～令和3年度), 徳島県
- 3) II型共同研究, 2011-2014, 「沿岸海域環境の診断と地球温暖化の影響評価のためのモニタリング手法の提唱」報告書, 87-92.

高知県内の閉鎖性海域における水質の鉛直分布と長期変動解析について

高知県 衛生環境研究所

内田 圭亮・笹岡 尚矢*

富田 比菜・古田 和美**

*高知県環境対策課(エコサイクル高知派遣)

**高知県安芸福祉保健所

1. はじめに

高知県内の二つの閉鎖性海域のうち、浦ノ内湾は土佐湾の中央部に位置し、面積 12.37 km²、奥行き 8.8 km で須崎市浦ノ内に向かって西に広がっている湾である¹⁾。波が穏やかで非常に閉鎖性が高く、とくに夏季の湾内底層部において貧酸素水塊の形成が報告されている²⁻⁵⁾。浦戸湾は高知市中央部の南側に位置し、面積 7 km²、奥行き 6 km¹⁾の南北方向に縦長の湾で、多くの河川が湾に流れ込んでいる¹⁾。

当所では、国立研究開発法人国立環境研究所との共同研究に継続参加し、浦ノ内湾の水質の状況把握を行ってきた。本研究では浦戸湾を調査対象に加え、水質鉛直分布の測定及び公共用水域水質常時監視データを用いた解析を通して高知県内の閉鎖性海域の特徴を明らかにすることを目的とした。

2. 調査概要

2. 1 水温, 塩分, DO の鉛直分布の測定

2. 1. 1 調査地点

図 1 に調査地点を示す。浦ノ内湾については過去の調査研究の地点の中から、前期課題で試料採取による詳細な水質検査を実施していた 4 地点を選定した⁵⁻⁶⁾。浦戸湾については全窒素、全りん的环境基準点である 3 地点を選定した。

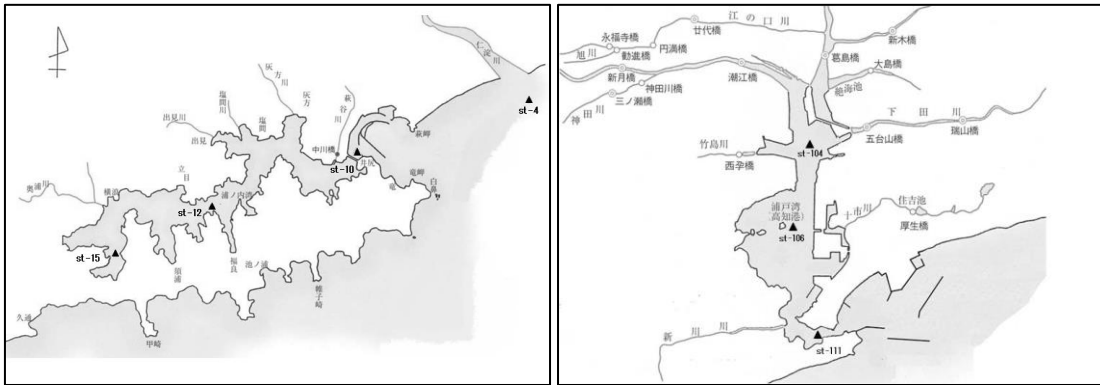


図1 調査地点図

(左：浦ノ内湾 st-4、st-10、st-12、st-15、右：浦戸湾 st-104、st-106、st-111)

2. 1. 2 調査時期

調査は、先行研究⁵⁾で貧酸素状態が確認された5～9月(夏季)と回復状態にあった11月～2月(冬季)に行うものとし、表1に示す日程で測定を行った。

表1 各閉鎖性海域における調査日

調査海域	調査日(夏期 / 冬期)
浦ノ内湾	2020年9月28日 / 2020年12月8日
浦戸湾	2020年7月21日 / 2020年12月7日
	2021年7月6日 / 2021年12月14日
	2022年7月26日 / 2022年12月20日

2. 1. 3 調査方法

鉛直分布測定は、多項目水質計（Hydrolab DataSonde5,環境システム株式会社）（以下、「水質計」という。）を用いた。船上から海中に向けて約 10~30 cm/s の速度で水質計を垂下させ、表層から海底付近まで測定を行った。

2. 2 公共用水域常時監視データを用いた経年変化のトレンド解析

鉛直分布測定を実施した浦ノ内湾の 4 地点、浦戸湾の 3 地点を対象に、水温、DO、COD の全層平均の経年変化のトレンド解析を行った。対象とするデータは 1981 年 5 月から 2021 年 2 月までの公共用水域常時監視の測定結果を用いた（測定時期によって年間 6 回~2 回）。また、解析は統計数理研究所で開発提供された TIMSAC for R package ver. 1.3.6 に含まれるプログラムの `decomp` を用いて行った⁷⁾。

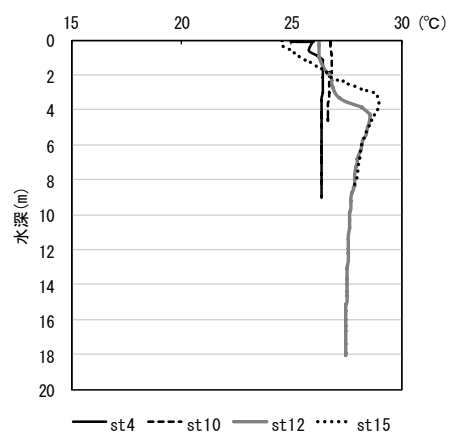
3. 結果

3. 1 水温、塩分、DO の鉛直分布の測定結果

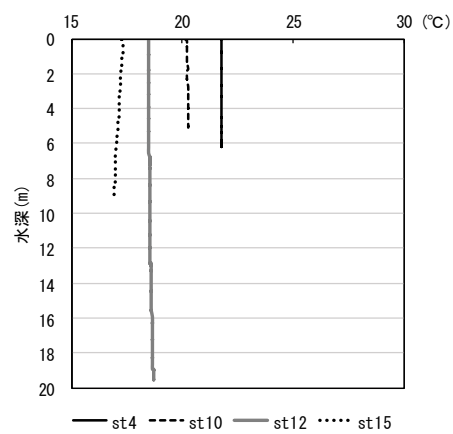
浦ノ内湾においては先行研究⁵⁾と同様の測定結果が得られた（図 2）。特に夏季の湾奥部(st-12、st-15)では水深 5 m 付近で急激な DO の低下が見られ、貧酸素水塊の形成が確認された。

浦戸湾においては夏季の表層で DO の過飽和状態が見られ、底層にかけて DO の低下が見られたものの先行研究⁵⁾で貧酸素状態と定義している 4.0 mg/L 未満となることは無かった。また浦ノ内湾と比較すると、全ての測定項目で地点間の差が少ない傾向が見られた一方、冬季においても表層から下層にかけて緩やかに水質が変化していることが確認された。

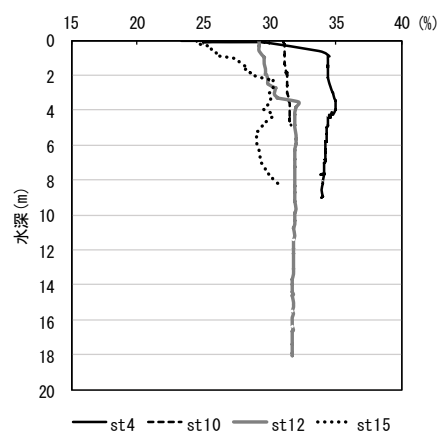
水温-夏季



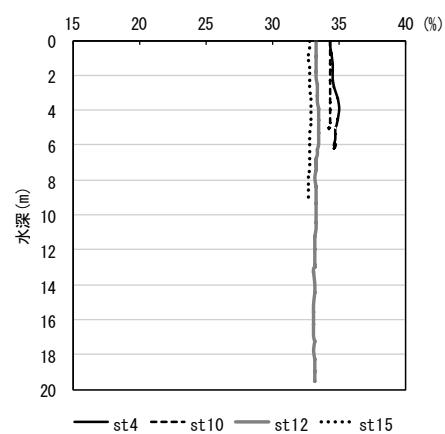
水温-冬



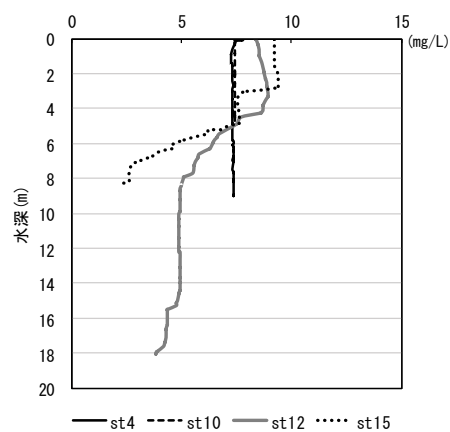
塩分-夏季



塩分-冬季



DO-夏季



DO-冬季

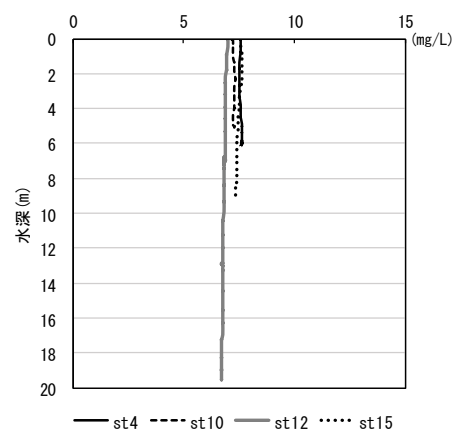
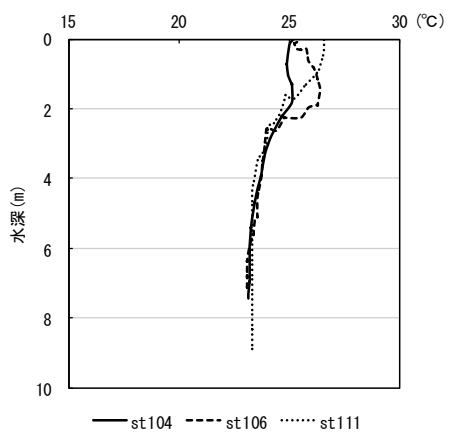
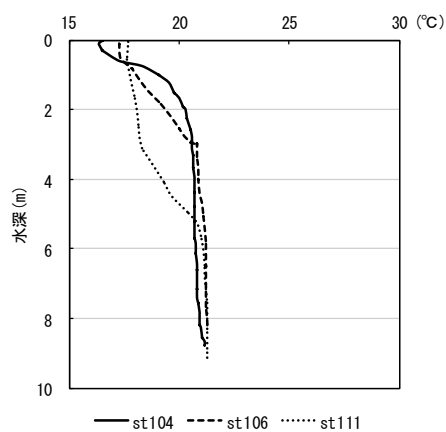


図 2 浦ノ内湾（2020 年度）の鉛直分布測定結果

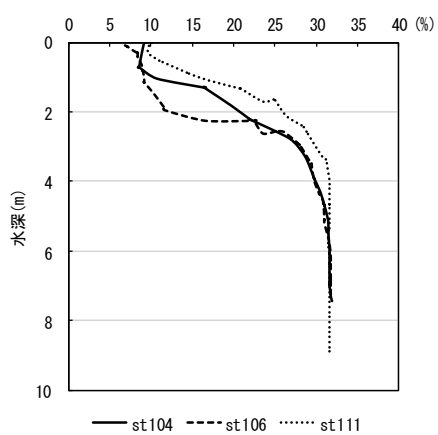
水温-夏季



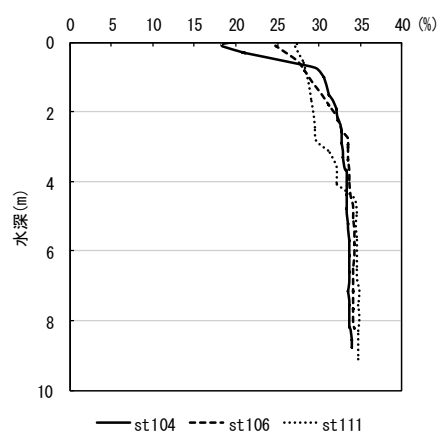
水温-冬



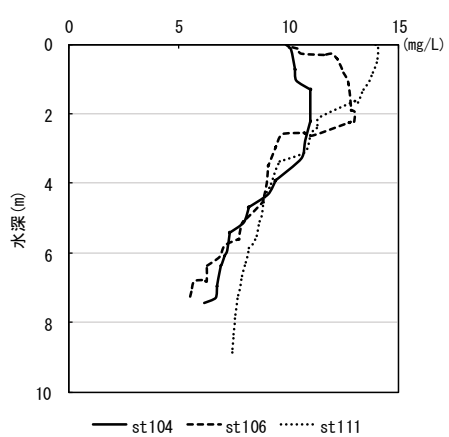
塩分-夏季



塩分-冬季



DO-夏季



DO-冬季

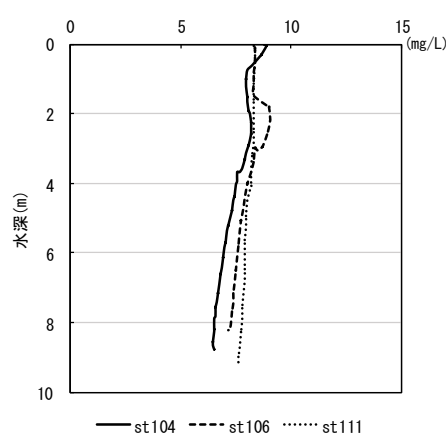


図3 浦戸湾（2020年度）の鉛直分布測定結果

(※同様の結果であったため 2021年度、2022年度は掲載省略)

3. 2 公共用水域常時監視データを用いた経年変化のトレンド解析結果

浦ノ内湾については、水温は全地点で横ばいで推移しており、DOは横ばいで推移している st-15 を除き、2001 年頃を境に緩やかな増加傾向が見られた。COD も同様に st-15 は 3.0 mg/L 付近でほぼ一定であったのに対して、他 3 地点では 1996 年頃まで緩やかな増加し、その後は概ね横ばいで推移していた。浦ノ内湾 4 地点のトレンド解析の結果では最奥部の st-15 がその他の地点と異なる特徴を示していた(図 4)。

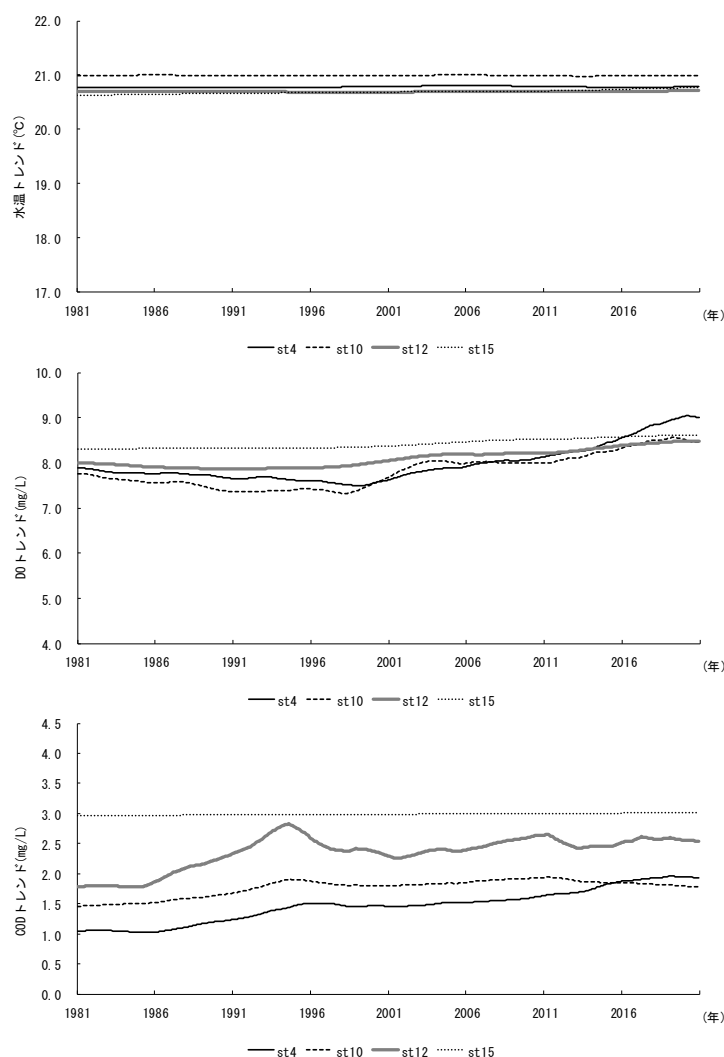


図 4 浦ノ内湾における水質の経年変化(上段から水温、DO、COD)

浦戸湾については、水温は 1991 年から 2001 年頃にかけて上昇傾向にあり、特に河口側の st-104 で顕著であった。DO については 3 地点とも同様の挙動を示し、1996 年頃から緩やかな増加が見られた。COD も各地点ともに、2006 年頃をピークに増加から減少へ転じていた。浦戸湾 3 地点のトレンド解析の結果では水温の変動幅に差は見られるものの、各項目で概ね同様の挙動を示していた(図 5)。

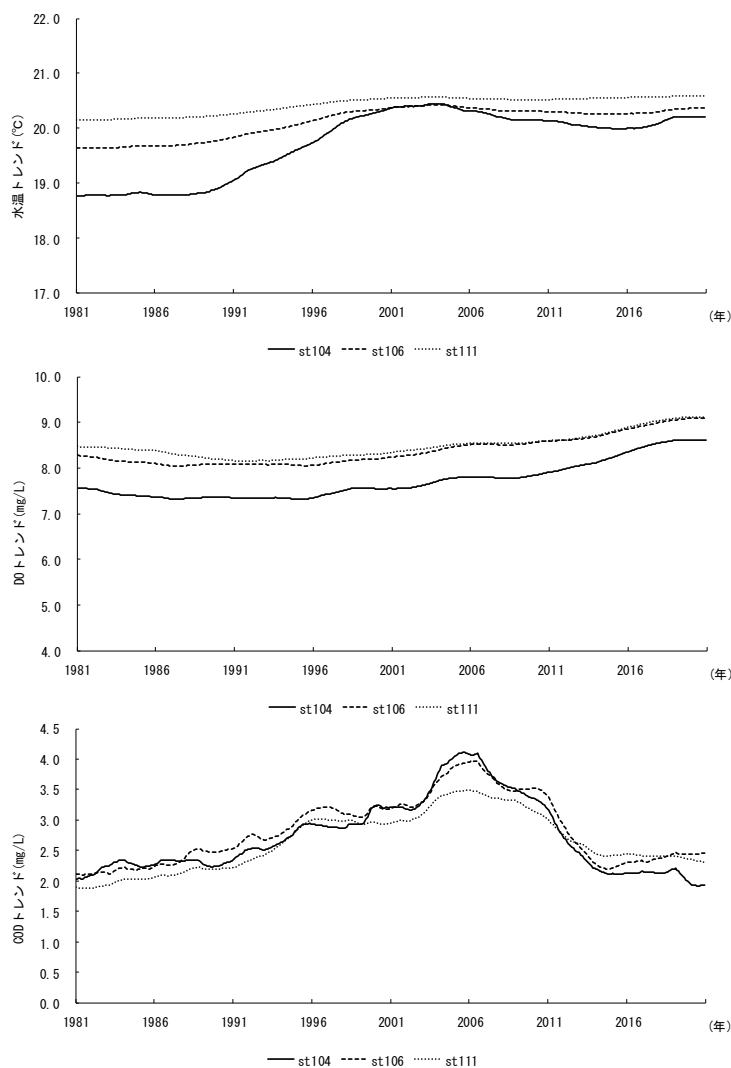


図5 浦戸湾における水質の経年変化(上段から水温、DO、COD)

4. 考察

浦ノ内湾の鉛直分布測定の結果について浦戸湾と比較すると、浦戸湾では下層ほどDOの値は下がるものの夏季でも貧酸素状態とならないことから、浦ノ内湾はより閉鎖性の高い海域であることが考えられた。特に浦ノ内湾のst-15は経年変化のトレンド解析において他の地点と異なる挙動を示すなど、湾内でも特に閉鎖性の高い地点であることが示唆された。このことから、浦ノ内湾は先行研究⁴⁾において、夏季に貧酸素水塊が形成され冬季に解消される周期的な鉛直方向の水の循環が生じていることが明らかとなっているが、湾奥部への水平方向については水の移動が乏しいことが考えられた。

解析に用いた約40年間の水質の変動をみると、浦戸湾では全体としてDO、CODで水質の改善傾向が見られたのに対し、浦ノ内湾ではst-15を除く3地点で緩やかなCOD

の上昇が見られるなど、高知県内における二つの閉鎖性水域においても特徴の違いが明らかとなった。底層溶存酸素量が環境基準に設定され、東京湾や琵琶湖をはじめとする全国の各水域で基準値の設定や施策による対策が進められる中、本県においても海域毎の特徴に応じた対応が必要になると考えられた。

謝辞 本研究において現地調査に御協力いただいた高知市環境保全課の皆様及び、本継続課題の前身である共同 C 型研究「地球温暖化がもたらす日本沿岸海域の水質変化とその適応策に関する研究」の頃から長きにわたり御教示いただきました国立環境研究所 地域環境保全領域 海域環境研究室 牧秀明氏に深謝いたします。

参考文献

- 1) 環境省：閉鎖性海域ネット
https://www.env.go.jp/water/heisa/heisa_net/index.html (アクセス日 2023 年 3 月 10 日)
- 2) 白木恭一ら：浦ノ内湾の水質調査（窒素，リンを中心にして），高知県環境研究センター所報，13，51-57，1996
- 3) 田嶋誠，西山泰彦：高知県沿岸の閉鎖性水域における多項目水質計を用いた鉛直分布測定結果と COD 等の関連項目について，高知県環境研究センター所報，30，39-50，2013
- 4) 刈谷玲菜，田嶋誠：浦ノ内湾における底層 DO の測定結果と COD に関連する有機物指標について，高知県環境研究センター所報，33，89-99，2016
- 5) 笹岡尚矢ら：高知県浦ノ内湾における水質鉛直分布と関連する有機物項目及び栄養塩類等について，地方公共団体環境研究機関等と国立環境研究所との共同研究（II 型）「海域における水質管理に係わる栄養塩・底層溶存酸素状況把握に関する研究」報告書，86-102，2019
- 6) 笹岡尚矢ら：浦ノ内湾における形態別有機物及び栄養塩類等の特徴について，高知県衛生環境研究所報，2，73-81，2021
- 7) 統計数理研究所 TIMSAC for R package <http://jasp.ism.ac.jp/ism/timsac/> (アクセス日 2023 年 3 月 16 日)

広島湾における有機物及び栄養塩関連指標の季節変動と溶存性有機体窒素の分解特性

実施機関：広島県立総合技術研究所保健環境センター

担当者：濱脇 亮次，後田 俊直，小田 新一郎*

※現：広島県立総合技術研究所保健環境センター総務企画部（令和4年3月31日時点）

1. はじめに

富栄養化は、沿岸域の生態系にとって大きな脅威であり、河川水や生活排水等といった様々な有機物と栄養塩が多量に投入されたことにより引き起こされる現象である。陸地からの海域に流入する有機物や栄養塩は、沿岸域や河口域の生産性を高め、生態系サービスを提供する上で重要な役割を果たしている。しかし、有機物や栄養塩の過剰供給は、赤潮（有害植物プランクトンの異常増殖）や貧酸素水塊の発生等を引き起こす要因となるため、適切な管理が求められる。日本最大の閉鎖性海域である瀬戸内海は沿岸域の急速な経済発展により、著しく富栄養化が進行した海域であったが、瀬戸内海環境保全特別措置法（以後、瀬戸内法）の制定により、富栄養化に関する指標（化学的酸素要求量（COD）、全窒素（TN）及び全リン（TP））の濃度は1995年以降減少傾向を示している¹⁾。しかし、近年瀬戸内海ではノリの色落ち等といった海域の栄養塩類の不足による海域生態系のバランスの崩れによる生物生産性の低下が懸念されている²⁾。栄養塩は海域における低次生態系から高次生態系に至るまでの生態系ピラミッドを支える土台でもあり、海域の生物生産はその量に依存するとも言える。この状況を考慮し、令和3年の改正瀬戸内法では、海域の栄養塩管理を通じて生物生産の向上を図る栄養塩類管理制度が創設された³⁾。この制度では主に海域の栄養塩管理から生態系の基礎となる動植物プランクトンの基礎生産を管理するものである。海域の水質を管理するには、公共用水域を管理する自治体が主導となってCODや溶存性無機態窒素・リン（DIN, DIP）に代表される有機物及び栄養塩関連指標をモニタリングデータする必要があるが、広島県沿岸域では、COD, TN, TPのみが測定されているだけで、DIN) 及びDIPの栄養塩関連項目は平成12年以降測定されていない⁴⁾。

また、海水中の有機物は粒子状有機物（POM）と溶存態有機物（DOM）に大別され、POMに含まれる炭素、窒素、リンは粒子状有機体炭素（POC）、粒子状有機体窒素（PON）粒子状有機体リン（POP）と呼ばれ、DOMに含まれる炭素、窒素、リンは溶存性有機体炭素（DOC）、溶存性有機体窒素（DON）、溶存性有機体リン（DOP）と呼ばれる。海域におけるPOMは主に動植物プランクトン、バクテリア等であり、DOMはゲル状物質、内部生産によって生成した有機物や生活排水に含まれる溶存性有機物が含まれると言われており⁵⁾、POM, DOMをそれぞれ測定することで海域の状況をより詳細に把握することが可能になると考えられる。POM及びDOMは海域の物質循環の過程において、バクテリア等によって分解されて、最終的には無機態炭素（DIC）、DIN及びDIPに変化する。特に、多田や柳らは瀬戸内海における生物生産が低下した要因の一つとして、DOMが過去に比べて難分解化したことを指摘しており^{6), 7)}、海域の健全性を評価する上では、海域の水質指標を測定するだけでなく、DON・DOPの分解性も併せて評価する必要がある。本研究では、瀬戸内海西部に位置する広島湾の北部海域付近におけるPOM, DOM及び栄養塩関連項目の季節変化を把握し、さらには広島湾におけるDONの分解特性を評価したので、その結果を報告する。

2 調査地点の概況及び分析方法

2-1 広島湾の概況

広島湾は湾口にあたる南部に屋代島、東部に倉橋島があり、湾外水と隔てられているため、瀬戸内海西部では最も閉鎖性の強い内湾である（図 1）。また、大野瀬戸、厳島海峡、奈佐美瀬戸、江田島屋形石と坂町及び呉市の境界線を結んだ線により区分される海域を北部海域、厳島から湾口までを南部海域と呼ぶ（図 1）。今回調査対象とした広島湾北部海域は面積 160 km²、平均水深 18 m、容量 2.8 k m³の水域で主な流入河川は 1 級河川の太田川、2 級河川の八幡川と瀬野川であり、河川総流入量は約 7.6×10⁶ m³/日である。そのうち、太田川が全体約 90%を占め、北部海域に流入する負荷量への寄与が極めて大きいと言われている。また、北部海域の沿岸部には自動車、機械、食品等の企業や 1980 年以降岸域の宅地化に伴い下水道処理場が整備され、これらも広島湾に流入する主な負荷源である。

□

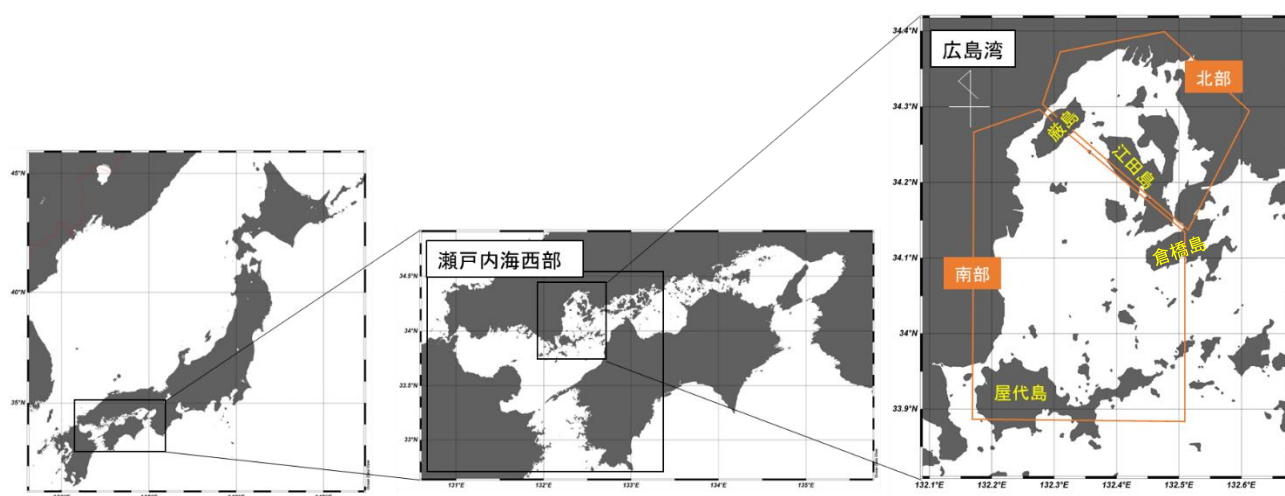


図1 広島湾南部及び北部海域の地図

2-2 調査方法

主な調査地点は、St. 1 (31-21)、St. 2 (32-14)、St. 3 (32-12) の 3 地点で平均水深はそれぞれ 12、20、32 m である（図 2、表 1）。有機物及び栄養塩関連項目は 2020 年度から 2022 年度の 3 年間で四季毎に 1 回（全 12 回、2020 年 5 月、2020 年 8 月、2020 年 11 月、2021 年 2 月、2021 年 5 月、2021 年 8 月、2021 年 11 月、2022 年 3 月、2022 年 5 月、2022 年 8 月、2022 年 11 月、2023 年 2 月）調査を行った。また、夏季及び冬季の広島湾北部海域の鉛直方向における有機物及び栄養塩関連目を把握するため、St. 4 (32-29) 及び St. 5 (本川河口) についても調査を行った（図 2、表 1）。それぞれの平均水深は 12 m、10 m である。また、採水は春季及び秋季は表層（0.5 m）及び B-1 m（底泥より 1 m 上層）の 2 層とし、夏季及び冬季は表層（0.5 m）、2 m、5 m、10 m（水深 15 m 以上）、B-1 m の 4～5 層とした。

採水した海水試料は 450℃で 2 時間加熱処理したガラス繊維ろ紙（Whatman GF/C、孔径：1.2 μm）によりろ過を行い、懸濁態と粒子態に分離し、表 2 に示す方法に従って、有機物及び栄養塩関連目を分析した。また、本研究では海域における新たな汚濁指標としての有用性が期待されている海域版生物化学的酸素要求量（BOD3）を測定し、さらには、海域の健全性を評価するため、DON の生分解試験を行った。これらの方法は以下のとおりである。

海域版 BOD3 は採水した試料を実験室に持ち帰り、直ちに恒温槽中で海水中の水温を 20℃となるよう調整し、DO を測定して空気が入らないよう密栓する。これを 20℃で 3 日間（72 時間）培養した後、同様に DO を測定し、培養前後における DO 消費量から BOD3 を算出した。

DON の生分解試験はろ過した海水試料 300 mL を 500 mL デュラン瓶に加えた後に、通気状態を保つため、アルミ箔やシリコン栓等で蓋をし、20℃の暗所にて 60 回/分の振とう条件で約 2 カ月間培養した。また、試験開始 7, 14, 28, 42, 56 日目に試料を分取し、それぞれの経過日数に応じた DON 及び DOP の分解特性を評価した。

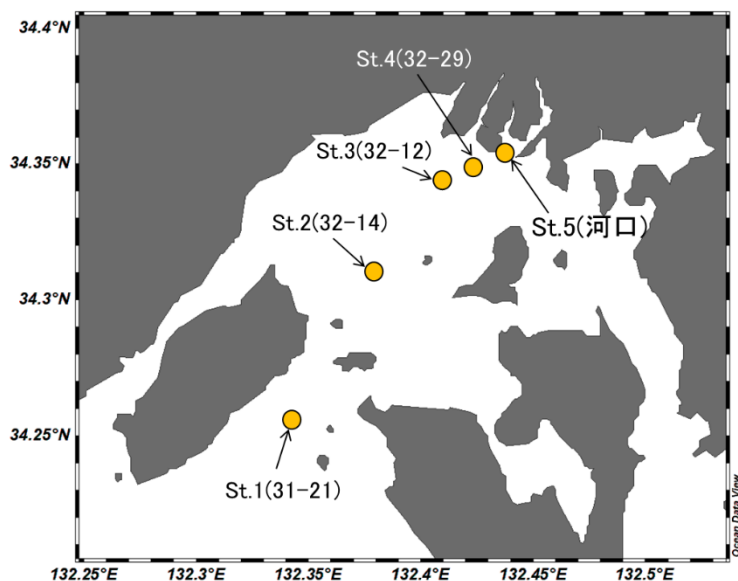


図2 調査地点

表1 調査地点の概要

地点	河口からの距離	緯度	経度	平均水深(m)
河口	—	34° 21′ 12″ N	132° 26′ 14″ E	10
3229	1.6km	34° 20′ 54″ N	132° 25′ 21″ E	12
3212	3.3km	34° 20′ 36″ N	132° 24′ 33″ E	12
3214	7.5km	34° 18′ 36″ N	132° 22′ 45″ E	20
3121	13.3km	34° 15′ 21″ N	132° 20′ 33″ E	31

表2 測定方法一覧

項目	測定方法
塩分	海洋観測ガイドライン Vol.4 Chap.3 塩分(日本海洋学会)
水素イオン濃度(pH)	JIS K 0102 12.1(ガラス電極法)に定める方法
DO	JIS K 0102 32に定める方法
COD	JIS K 0102 17(100°C過マンガン酸カリウムによる酸素消費量)に定める方法
溶溶性COD(D-COD)	予め450°C、1.5時間加熱処理したガラス繊維ろ紙(GF/C)を用いてろ過した海水をCODと同様に測定
粒子態COD(P-COD)	CODからD-CODを差し引いた値
全有機体炭素(TOC)	JIS K 0102及び備考2
溶溶性TOC(DOC)	D-COD同様、ろ過した海水をTOCと同様に測定
粒子状有機体炭素(POC)	TOCからDOCを差し引いた値
全窒素(TN)	流れ分析法による水質試験方法-第3部(JIS K 0170-3)に定める方法
全リン(TP)	JIS K 0170-4に定める方法
アンモニア態窒素(NH ₄ -N)	JIS K 0170-1に定める方法
亜硝酸態窒素(NO ₂ -N)	JIS K 0170-2に定める方法
硝酸態窒素(NO ₃ -N)	JIS K 0170-3に定める方法
リン酸態リン(PO ₄ -P)	JIS K 0170-4に定める方法
クロロフィルa(Chl-a)	海洋観測ガイドラインVol.4 Chap.4 植物色素(日本海洋学会)

3 結果及び考察

3-1. 水質基本指標(水温、塩分、DO及びクロロフィルa(Chl-a))の季節変動

2020年度における基本項目の季節変動を図3に示した(2021年度:別図1-1, 2022年度:別図1-2)。水温は、気温の変動と同じ挙動を示し、春季から夏季にかけて上昇、秋期から冬季にかけて低下した。また、春季から夏季にかけて水温躍層が確認され、夏季が最も躍層強度が大きくなった。秋季及び冬季は気温低下と風により海水が混合され、水温躍層はなくなった。塩分は太田川及び下水道放流水等の影響を受けて、年間を通じて河口付近で低くなった。pHは、海域の内部生産の活性が高い春季及び夏季は海水の二酸化炭素が光合成に利用されるため、表層付近のpHは海水の標準的なpHである8.1よりもややアルカリ性を示し(pH:8.4~8.7)、秋季及び冬季は水温の低下やバクテリアの活性低下等により表層pHは8.1~8.2となった。また、深度別でpHを見ると秋季及び冬季は全層同じ値を示しているが、春季及び夏季は表層から底層に向かうほど低くなった。これは、水塊中の微生物及び植物プランクトンが海水中の酸素を消費して有機物を好気分解することで生成したCO₂の影響と考えられる。

DOについても、水塊中の微生物の活動と関連する項目であるが、pH同様、春季及び夏季は植物プランクトン及び細菌類の活性が活発であるため、光合成が盛んに行われることから生成>消費となり、表層DOは過飽和となった。これに対し、底層は光合成の影響が小さくなるため生成<消費となり、溶存酸素は下層(B-1 m)にかけて減少した。特に、夏季の底層DOは環境基準値である4 mg/Lを下回る地点が多く見受けられた。過去に伊達らは広島湾において長期的な水質調査結果を行い、広島湾では沿岸部のみが貧酸素水塊(底層DO:4 mg/L以下)の起こりやすい海域であることを報告している⁸⁾。しかし、本調査結果によれば、St.2からSt.4の沿岸部だけでなく、St.5においても夏季にはDOの低下が確認されている。これは過去とは状況が異なっているため、広島湾全域における貧酸素水塊の形成機構について調査を行う必要がある。生態関連項目指標であるChl-aは、高水温の春季及び夏季に高くなり、低水温期の冬季は低くなった。また、春季にはブルームの影響により、St.3で顕著に高くなる年度が見受けられた。

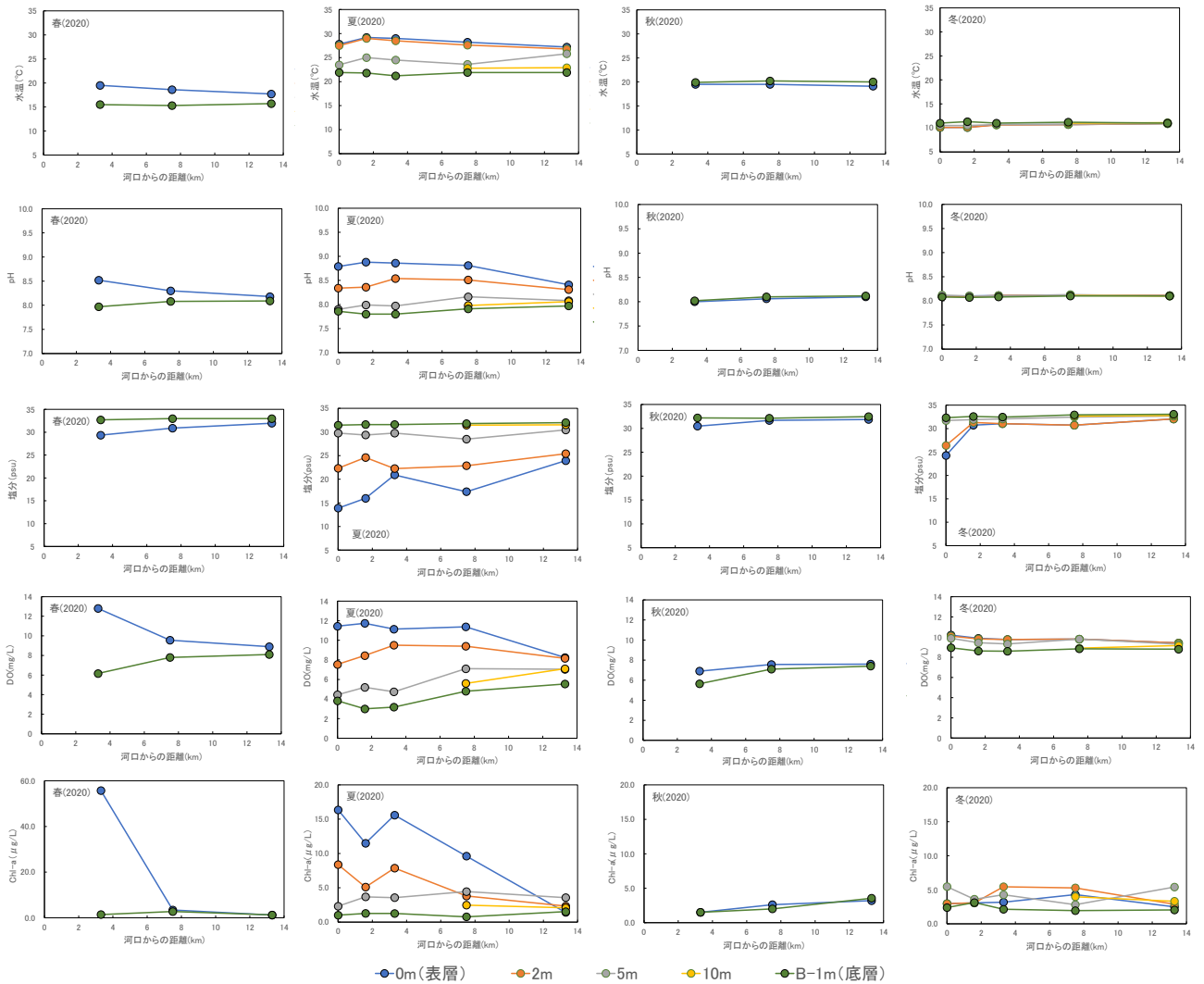


図3 広島湾における水質基本指標の季節変動(2020年度)
 (水質項目:上から水温, pH, 塩分, DO, Chl-a, 季節:左から春季, 夏季, 秋季, 冬季)

3-2 有機物関連指標 (COD 及び全有機炭素 (TOC)) の季節変動

有機物関連項目の季節変化(2021年度)を図4に示した(2020年度:別図2-1, 2022年度:別図2-2)。CODについては、水温躍層が見られる春期及び夏季に高くなり、混合期である秋期及び冬季には低くなった。特に、春季及び夏季の表層CODは懸濁態、溶存態ともに高く、内部生産の影響を受けているものと考えられた。また、COD(懸濁態を含む)の大半(約70~95%)は溶存性COD(D-COD)であり、CODの主成分はD-CODと考えられた。この結果は他海域でも同様の結果であり、広島湾における有機物の質も同様であると考えられる。また、いずれも季節においてもD-CODは2020年度:1.5 mg/L, 2021年度:1.2 mg/L, 2022年度:1.0 mg/Lを下回ることはなかった。従って、広島湾のバックグラウンドCODは2020年度:1.5 mg/L, 2021年度:1.2 mg/L, 2022年:約1.0 mg/Lであり、接続海域の状況等に応じて変化しているものと考えられた。

TOCもCODと同様の傾向を示しており、水温躍層が見られる春季及び夏季に大きくなり、混合期には小さくなった。特に、春季及び夏季の表層TOCは懸濁態、溶存態ともに高く、内部生産の影響を受けている

ものと考えられた。また、COD同様、TOC（懸濁態を含む）も大半（約70～95%）がDOCであり、TOCの主成分はDOCと考えられた。COD同様、DOCは2020年度：1.0 mg/L、2021年度：1.2 mg/L、2022年度：1.1mg /Lを下回ることにはなかった。従って、広島湾のバックグラウンドTOCは2020年度：1.0 mg/L、2021年度：1.2 mg/L、2022年：約1.1 mg/Lであり、接続海域の状況等に応じて変化しているものと考えられた。

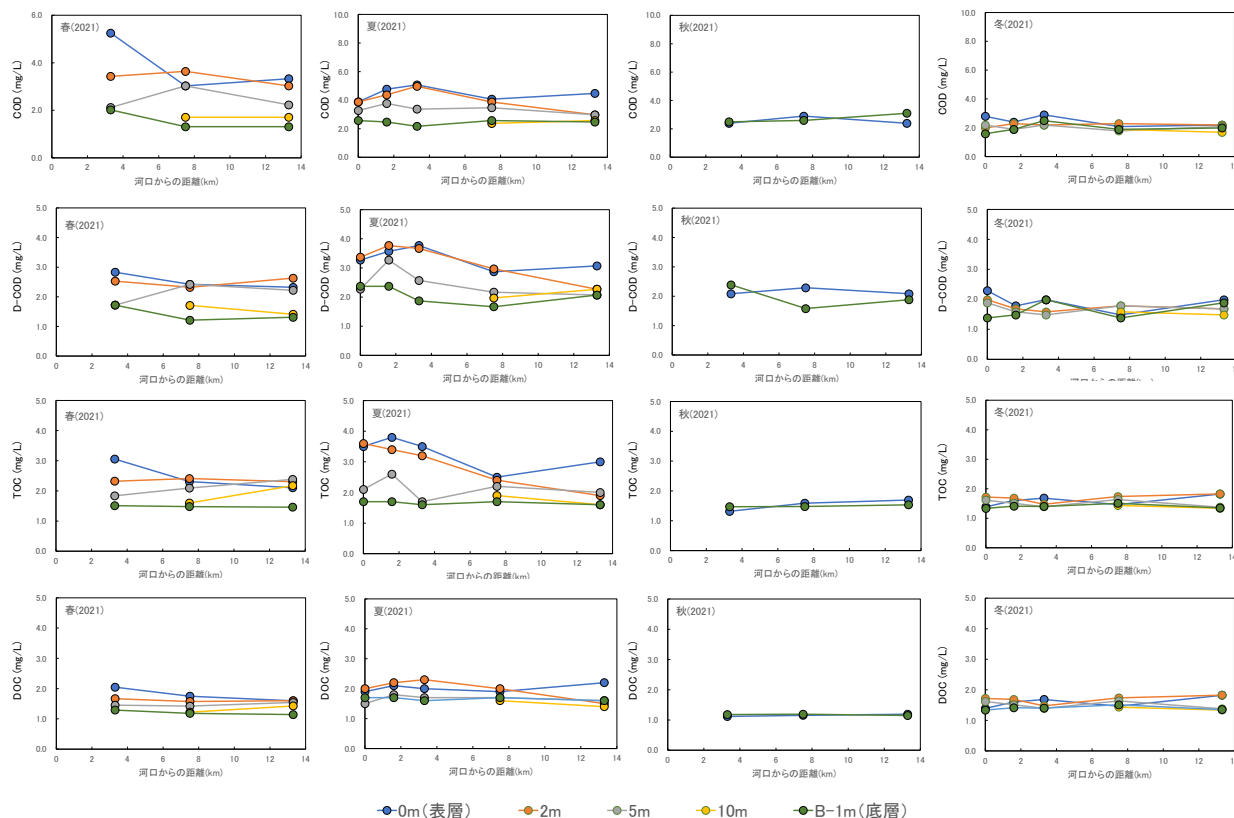


図4 広島湾における有機物関連指標の季節変動(2021年度)
 (水質指標:上からCOD, D-COD, TOC, DOC, 季節:左から春季, 夏季, 秋季, 冬季)

また、2021年度におけるTOCとCODの関係性を図5に示した。CODとTOC(図5(a))、D-CODとDOC(図5(b))には良好な相関がみられた ($a: R^2=0.72(p<0.05)$, $b: R^2=0.74(p<0.05)$) 一方、粒子態COD(P-COD)とPOC(図5(c))に良好な相関関係 ($c: R^2=0.17(p<0.05)$) はなかった。これは早川らによって指摘されている粒子態の存在によるCODの検出率の低下と考えられ⁹⁾、有機物指標については、測定方法の見直しも必要になると考えられる。

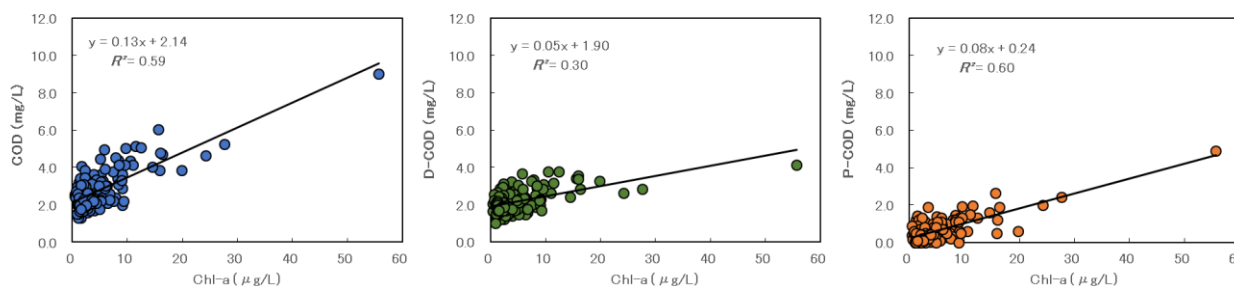


図5 広島湾における有機物関連指標(各態TOC及びCOD)の関係性

3-3 栄養塩関連指標 (TN, DTN, DIN, TP, DTP 及び DIP) の季節変動

2022 年度における栄養塩関連項目の季節変化を図 6 及び図 7 に示した (2020 年度: 別図 3-1 及び 3-2, 2021 年度: 別図 3-3 及び別図 3-4)。窒素 (TN 及び DIN) については, Chl-a や COD 等と同様に, 春季及び夏季に高くなった。特に, 春季及び夏季には植物プランクトンと考えられる PON の占める割合が大きくなった。これとは対比的に DIN ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ 及び $\text{NO}_3\text{-N}$ の合計値) は, 海域の基礎生産が活発な春季及び夏季の表層付近の DIN は枯渇状態 (0.003 mg/L 以下) であった。また, 夏季は, 貧酸素水塊形成に伴う DIN (主に $\text{NH}_4\text{-N}$) の溶出が認められ, $\text{NH}_4\text{-N}$ が主体であったことから, 底泥表面に蓄積された有機物の酸化分解により生じたものと考えられた。底質の有機物量 (TOC) と酸素消費の関係性については, 明らかになっていない点が多々あるため, この点についても今後検討を進めていく必要がある。DTN については, 底質から DIN の溶出が認められた夏季を除き, 年間を通じて変化が少なかった。

続いて, TP (DTP 及び DIP) は, 窒素とは若干挙動が異なるが, TP は全地点において, 夏季は表層よりも底層が高い値を示した。これは, 底質から溶出するリン (DIP が主体) に起因するものと考えられる。例年, 広島湾では夏季には北部海域に南部海域の沿岸域では貧酸素水塊が公共用水域の常時監視結果でも確認されている。この貧酸素水塊の影響により底質からの DIP 溶出が確認され, 北部海域の底層は DIP, DTP 及び TP の値は上昇した。

2020 年から 2022 年度にかけて広島湾の海域環境に大きな変化は認められなかったが, 粒子態, 溶存態の各態有機物及び栄養塩関連指標を測定することで, 2020 年から 2022 年度における季節別の広島湾の海域環境をより詳細に把握することができた。現在, 広島県の公共用水域常時監視測定結果では, COD, TN 及び TP に関する水質調査は行われているものの, DIN 及び DIP の分析は未だ行われておらず, COD, TN, TP だけでは広島湾の状況を把握することは非常に難しいと考えられる。現在, 改正瀬戸内法では自治体による水質管理が求められているが, 測定地点の見直しだけでなく, 調査を行う指標・頻度等についても再度見直す必要があると考えられる。

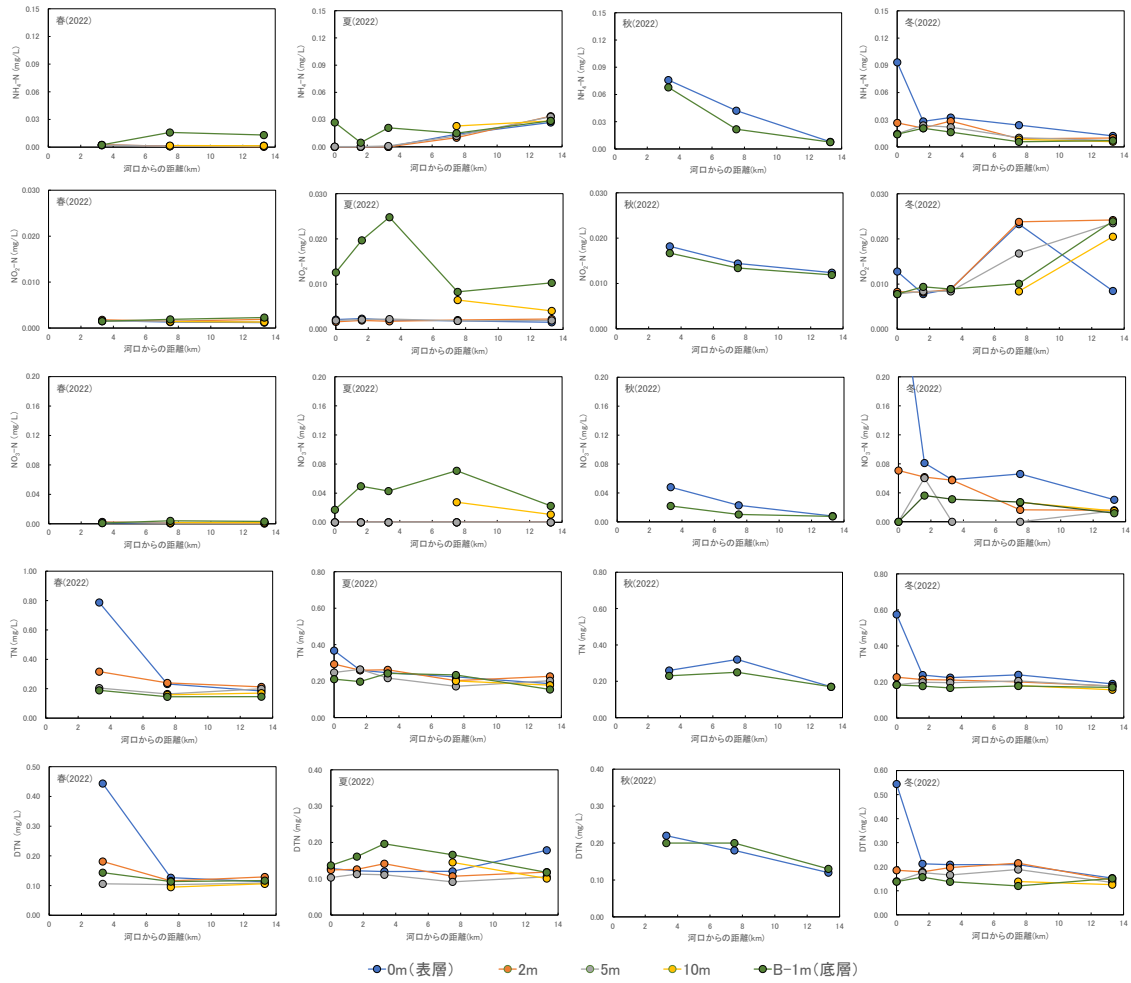


図6 広島湾における栄養塩関連指標の季節変動(2022年度)
 (水質指標: 上から $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, TN, DTN, 季節: 左から春季, 夏季, 秋季, 冬季)

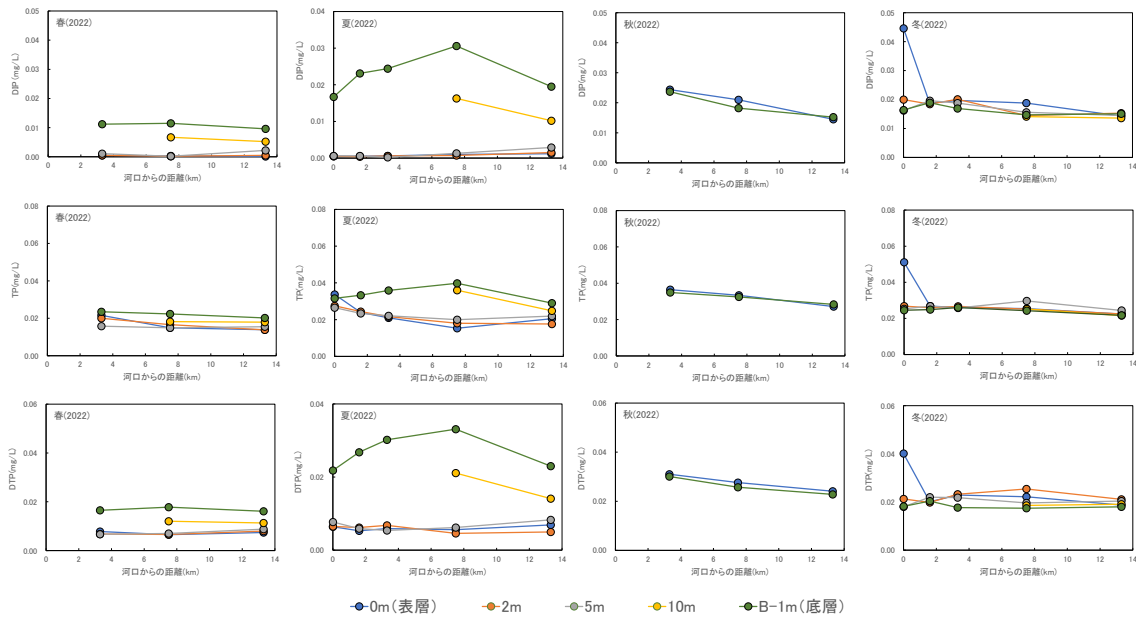


図7 広島湾における栄養塩関連指標の季節変動(2022年度)
 (水質指標: 上からDIP(PO_4), TP, DTP, 季節: 左から春季, 夏季, 秋季, 冬季)

3-4 BOD3の季節変動

河川には微生物による自浄作用を評価するため、水質基準の指標としてBODが用いられるが、湖沼・海域では水質基準の指標としてCODが用いられる。これは、湖沼や海域には植物プランクトンが多く存在し、光合成の作用により酸化炭素を吸収し酸素を排出するという性質が測定値に影響を及ぼすためである。そのため、これまで海域における公共用水域調査ではBODの測定は行われていない。

近年、日本の多くの閉鎖性水域・湖沼において、富栄養化対策として窒素・リンの流入負荷削減が行われ、水域のTN・TP濃度は低下した。しかし、一方でCODが増加・横ばいで推移という乖離現象が日本各地の閉鎖性水域で確認されている。これは有機物の質の変化によるものと考えられており、以然に比べて微生物では分解されにくい有機物（難分解性有機物）の蓄積が懸念されている⁹⁾。前述したがBODは微生物によって分解できる有機物量であり、CODが難分解性有機物の指標を指すのであれば、BODは易分解性有機物の量を指す指標と考えることもできる。そこで、本報では2020年から2022における広島湾海水中の易分解性有機物であるBODの季節変動について評価した。

図8に2020年から2022年の3年間にわたる表層BOD3の季節変動を示した。3地点ともに年度によって値に変動が見られるが、BOD3は春季及び夏季に高く、秋季及び冬季に低くなった。BOD3と溶存態BOD3（D-BOD3）の差から求めた粒子態BOD3（P-BOD3）がBOD3に占める割合を図9に示した。P-BOD3の占める割合は春季及び夏季に占める割合が高く、秋季及び冬季にはその割合が減少した。これは表層POCやP-COD、Chl-aも同様の傾向を示しており、表層BOD3は内部生産と密接に関連する高い指標であると考えられた。従って、海域版BODは海域における表層における易分解性有機物を示す指標として有効と考えられる。また、表層BOD3はTOC、COD等の有機物指標と特に高い相関を示した（TOC： $R^2=0.92$ ($p<0.05$), COD： $R^2=0.90$ ($p<0.05$))。CODは水質汚濁防止法による公共用水域の常時監視が開始されてからモニタリングされている水質指標であることから表層付近のBOD3については、過去に遡って推定することも可能であると考えられる。しかしながら、難分解性有機物を含むと考えられるD-CODやDOCは表層、底層ともにBOD3との相関は良好ではなかった（いずれも $R^2:0.2$ 以下）。従って、難分解性有機物を評価するためには別の指標を併用して評価する必要があると考えられる。

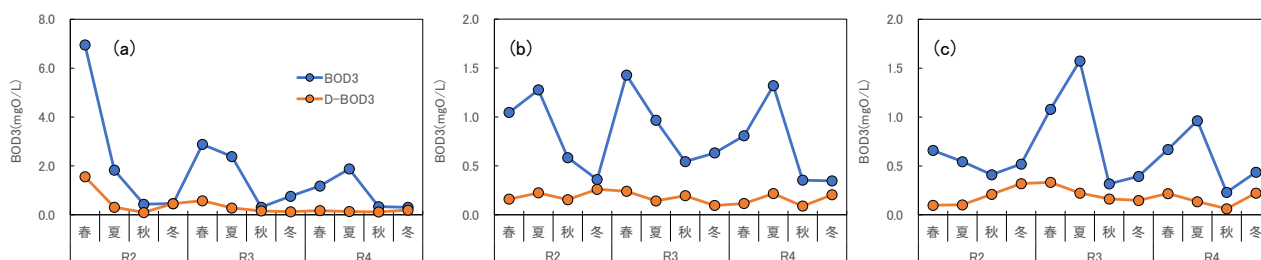


図8 広島湾におけるBOD3の季節変動
(a: St.3(3212), b: St.4(3214), c: St.5(3121))

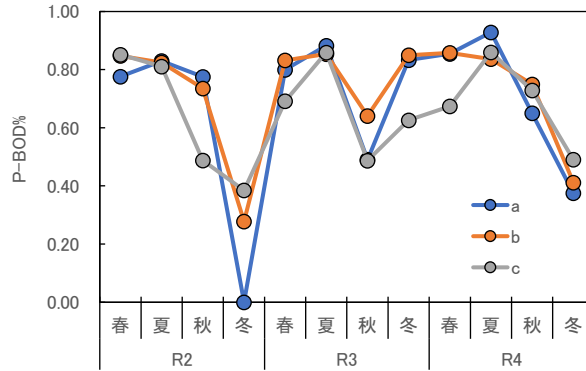


図9 BOD3にP-BOD3が占める割合
(a: St.3(3212), b: St.4(3214), c: St.5(3121))

3-5 広島湾における DON の分解特性

海水中の窒素には PON, DON 及び DIN がある。中でも PON 及び DON は生物分解を受けて、DIN へ変化する。PON は動植物プランクトンが主体であると考えられ、ほぼ全量が生物分解されて、DIN へ変化すると思われる。一方、DON の一部はプランクトンに限らず、河川や陸域から供給されたものも存在する。そのため、一部の DON は生物が利用できない難分解有機窒素として水中に残存するが、広島湾沿岸域における DON 分解特性に関する知見はこれまで報告されていない。DON の分解に伴い生成する DIN は海域の生物生産を維持するファクターの一つであると考えられるため、広島湾沿岸域 3 地点 (St. 3, St. 4 及び St. 5) において採水した試料の生分解試験を行い、DON の分解特性を評価した。

2020 年の夏季における St. 3, St. 4 及び St. 5 の DON 及び DIN の時間変化を図 10 に示した。試験開始 2 週間後から DON の分解に伴う DIN の生成が確認され、生成した DIN は $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ の順で形態が変化した。海水中の DON の構成成分としては、内部生産等によって生成した溶存性有機物 (タンパク質等) と考えられているが、これらが酸化分解する際も同様の機構で分解が起こる⁶⁾。従って、分解した DON は内部生産由来の有機物と考えられた。

また、これまで実施した 5 回の生分解試験 (2020 年 8 月, 2021 年 2 月, 2021 年 8 月, 2022 年 3 月及び 2022 年 8 月) における試験結果を図 11 に示した。2020 年の冬を除き、すべての試験において、DON の分解に伴う DIN 生成が確認された。試験前後における DON の分解率 (2020 年冬を除く) は St. 3: 9~26%, St. 4: 4~62%, St. 5: 4%~11% であり、沿岸部は DON の分解率が高く、沖合は DON の分解率が低くなった。ただし、St. 3 から St. 5 はいずれも試験前後で DON 濃度に大きな変化は見られず、DON の大半は難分解性であると考えられた。

近年、閉鎖性水域・湖沼では水域の COD 濃度が下がらない現象が起こっている。広島湾も同様の状況であるが、これは DON の難分解化も可能性の一つと考えられ、DON の質を変化させる対策を講じる必要があると考えられた。

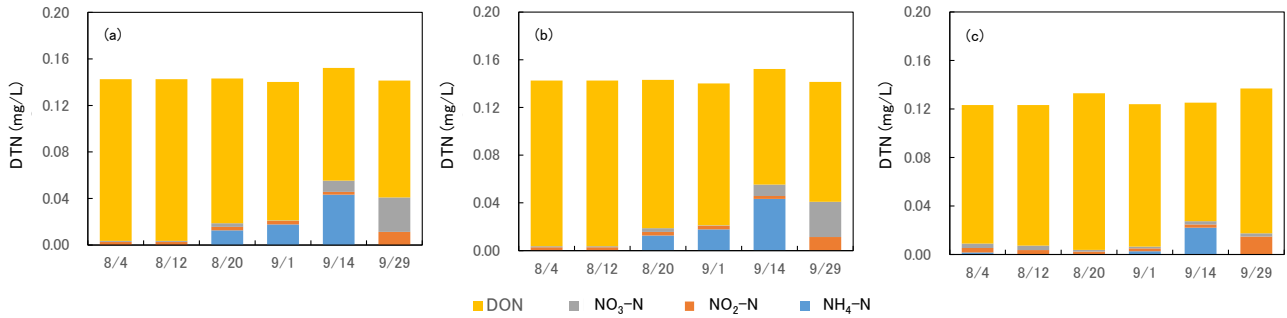


図10 生分解試験におけるDONの分解特性
(a:St.3(32-12), b:St.4(32-14), c:St.5(32-12))

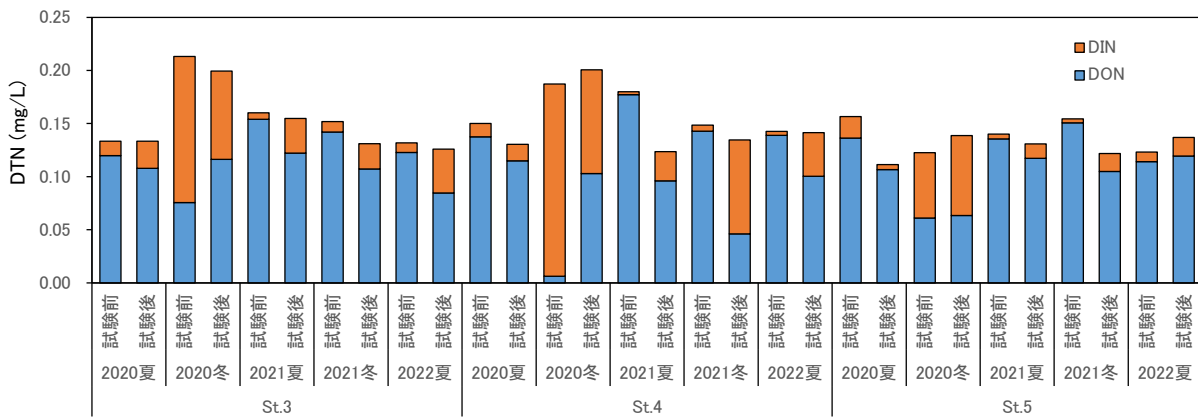


図11 生分解試験におけるDONの変化

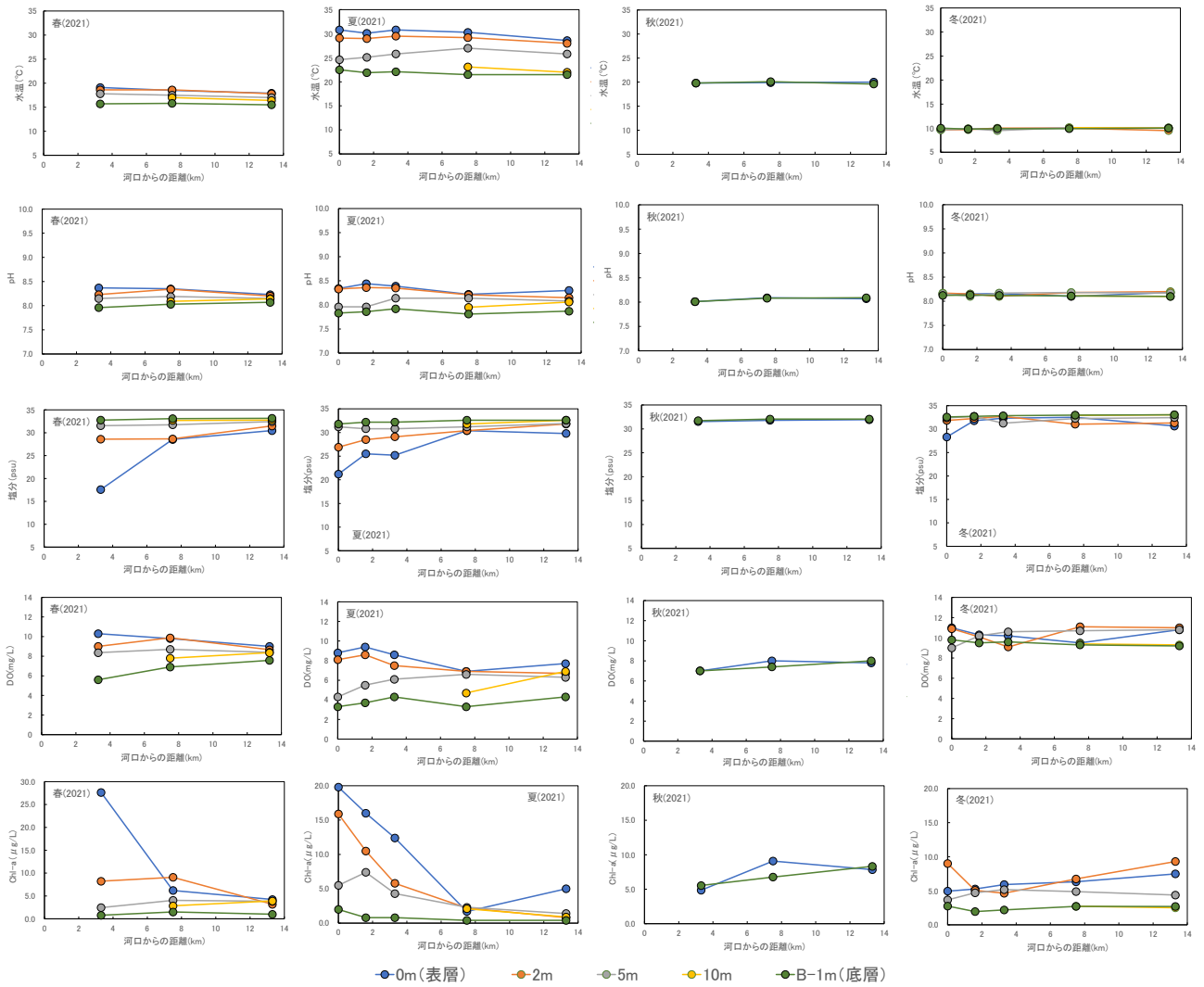
4 まとめ

広島湾における有機物及び栄養塩関連指標の現状を把握することを目的として、2020年度から2022年度にかけて形態別に調査を行った。その結果、海域の内部生産が活発となる春季及び夏季には粒子態有機物及び溶存性有機物の濃度上昇が確認された。その一方で、秋季及び冬季は有機物濃度に顕著な上昇等は確認されなかった。また、栄養塩関連指標は春季及び夏季には表層の栄養塩類は枯渇し、底層からは貧酸素水塊の形成等による栄養塩類の溶出が確認された。

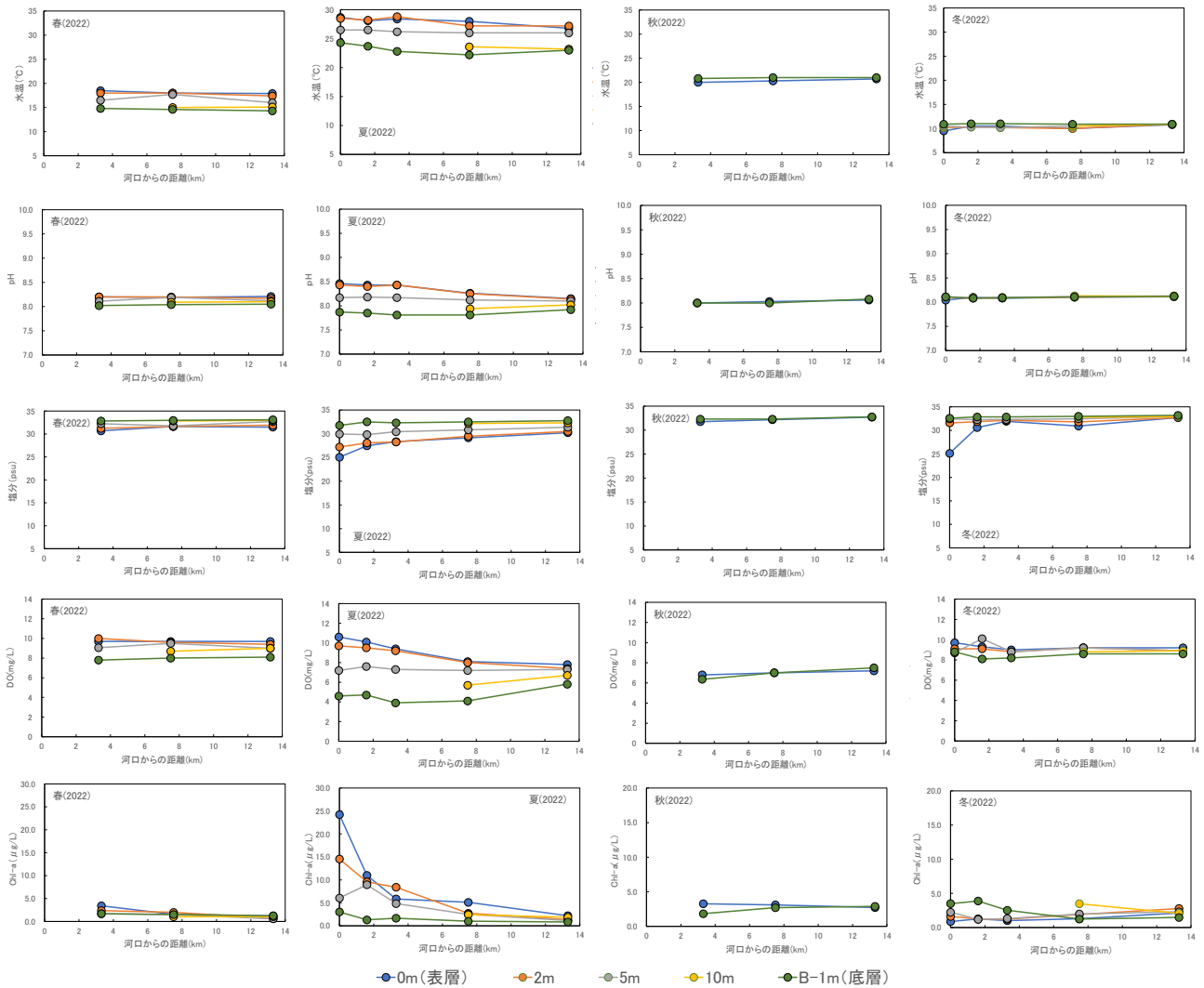
また、新たな水質指標として海域版 BOD についても測定を行い、その有用性を評価した。その結果、海域版 BOD は表層の COD, TOC, Chl-a と非常に相関を示し、海域の易分解性有機物量を表す指標として有用である可能性が示唆された。これに加えて、海域の健全性を評価するため、DON の生分解性試験を行った。その結果、生分解試験によって分解した有機物は内部生産によって生成した有機物が主体であると考えられた。ただし、広島湾において停滞している DON はその多くが難分解性であり、海域の COD が下がらない要因の一つであると考えられた。

5 参考文献

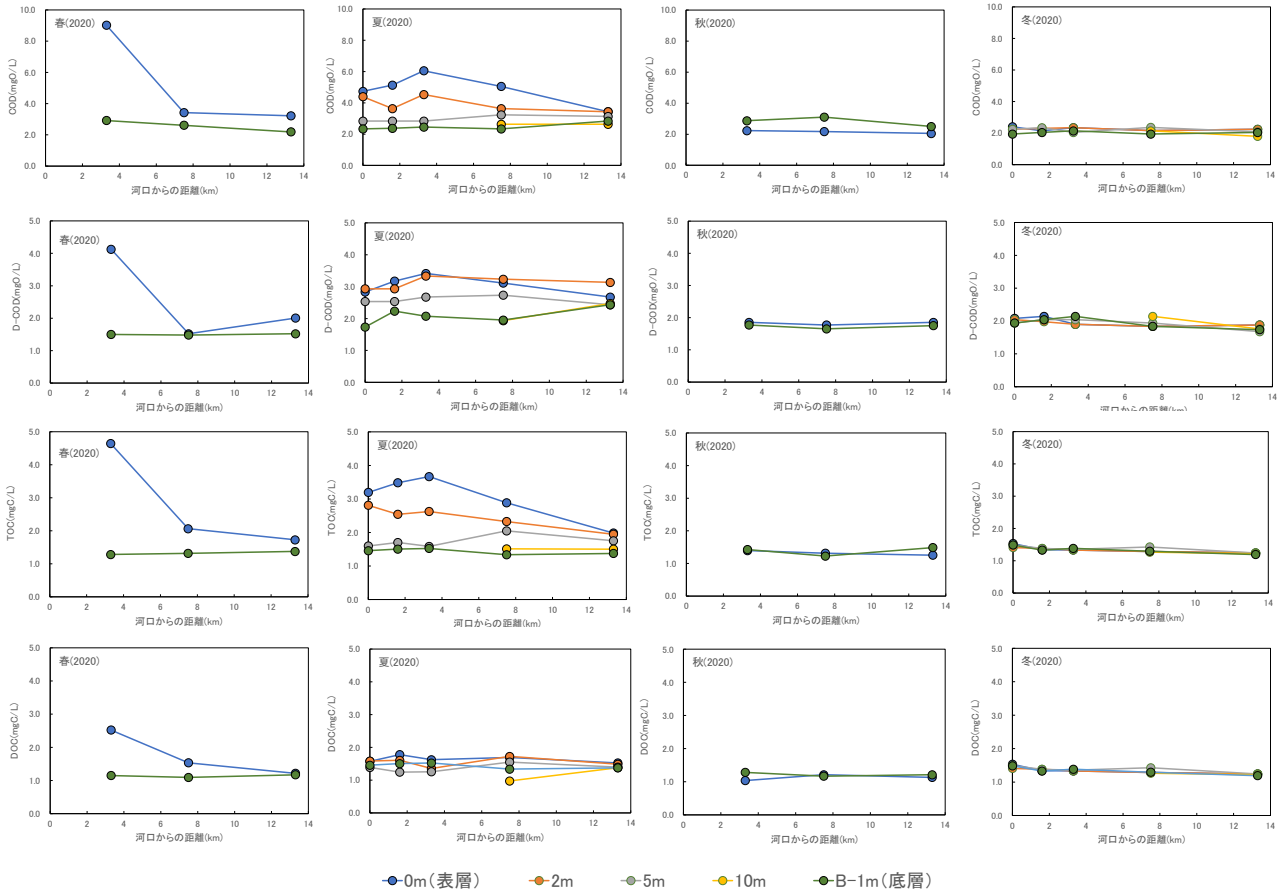
- 1) 環境省：せとうちネット,
https://www.env.go.jp/water/heisa/heisa_net/setouchiNet/seto/g2/g2cat01/suishitsu/index.html (2023. 3. 18 アクセス)
- 2) Yamamoto T., The Seto Inland Sea-eutrophic or oligotrophic? *Marine Pollution Bulletin*. **47**, 37-42, 2003
- 3) 瀬戸内海環境保全特別措置法の一部を改正する法律について, 環境省, URL :
https://www.env.go.jp/water/heisa/setonaikai_law_rev.html(アクセス日:2023年3月18日)
- 4) 広島県：広島県環境情報サイト「ecoひろしま」URL :
<https://www.pref.hiroshima.lg.jp/site/eco/e-e4-kokyo-index.html> (2023. 3. 18 アクセス)
- 5) 宮崎雄三, 海洋表層の生物生産が駆動する海洋大気有機エアロゾルの生成, エアロゾル研究, 35(3), 183-191, 2020
- 6) 柳 哲雄, 瀬戸内海における富栄養化・貧栄養化の力学, 沿岸海洋研究, 52(1), 3-10, 2014
- 7) 多田 邦尚ら, 瀬戸内海の水質環境とノリ養殖, 分析化学, 59(11), 945-955, 2010
- 8) 伊達悦二ら, 広島湾の貧酸素水塊の分布とその形成機構, 広島県保健環境センター研究報告, 14, 1-11, 2006
- 9) 早川和秀ら, 低濃度有機汚濁水域における有機物指標の特性把握: 琵琶湖流域における COD(Mn), BOD, TOC の比較から, 水環境学会誌, 41(6), 193-203, 2018



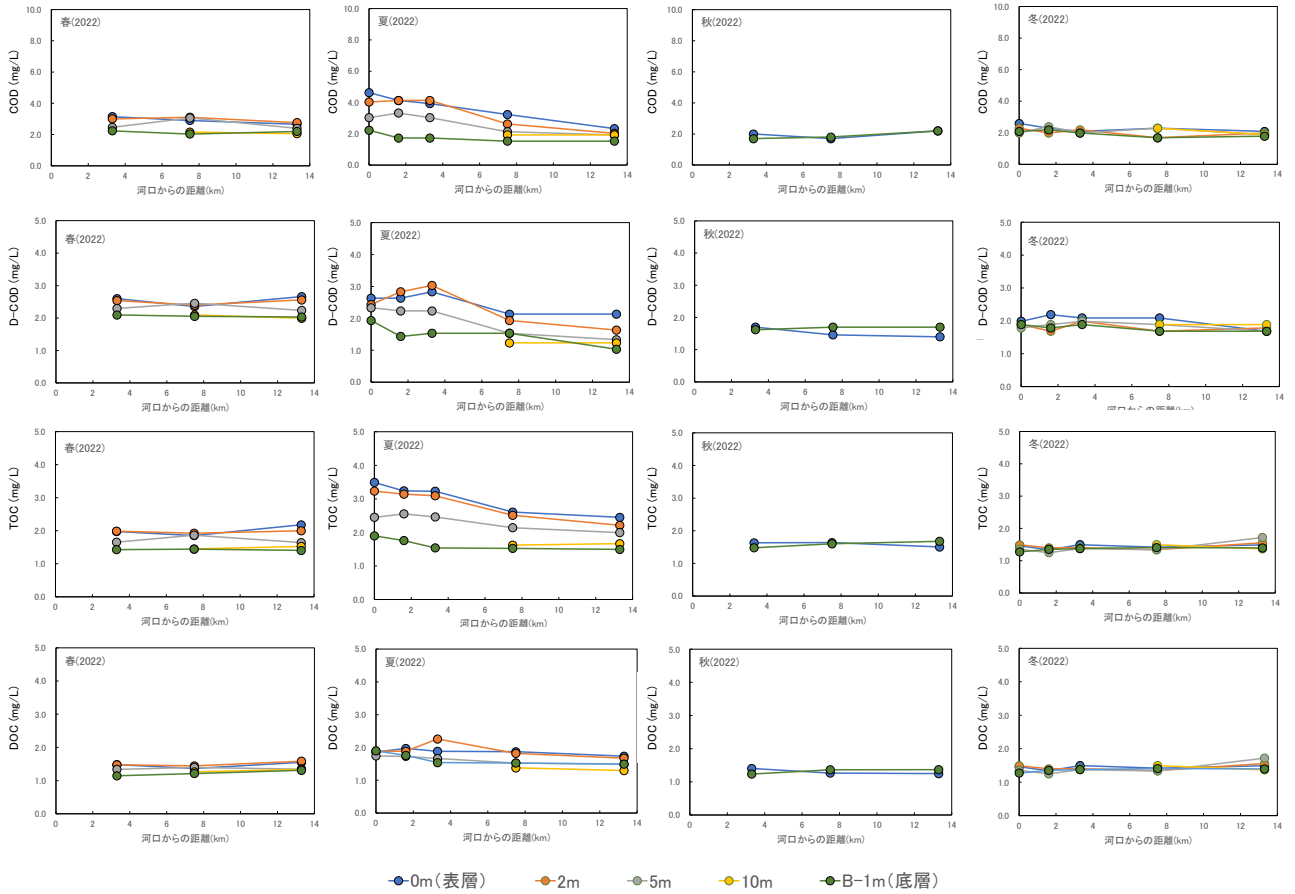
別図1-1 広島湾における水質基本指標の季節変動(2021年度)
 (水質項目:上から水温, pH, 塩分, DO, Chl-a, 季節:左から春季, 夏季, 秋季, 冬季)



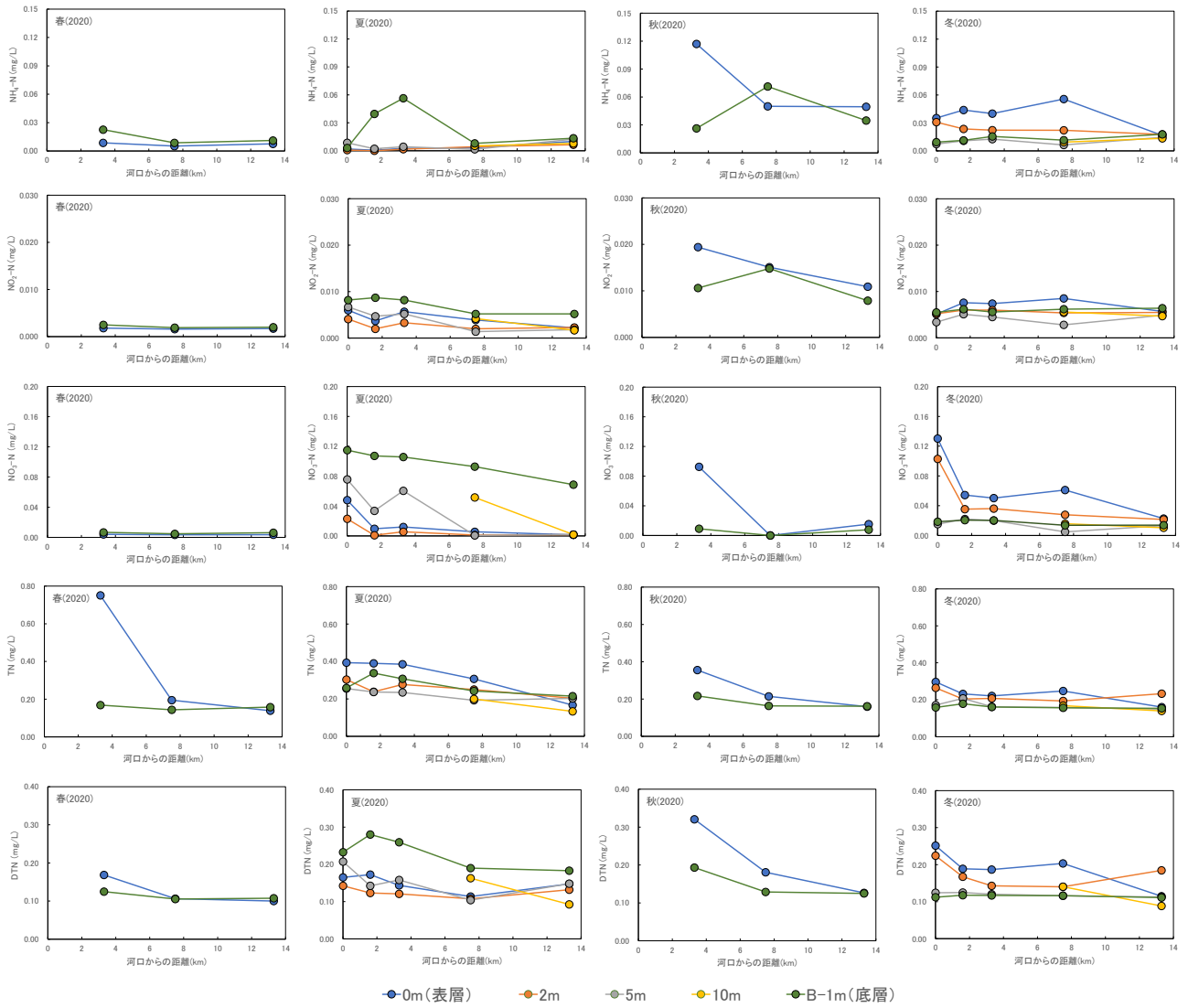
別図1-2 広島湾における水質基本指標の季節変動(2022年度)
 (水質項目:上から水温, pH, 塩分, DO, Chl-a, 季節:左から春季, 夏季, 秋季, 冬季)



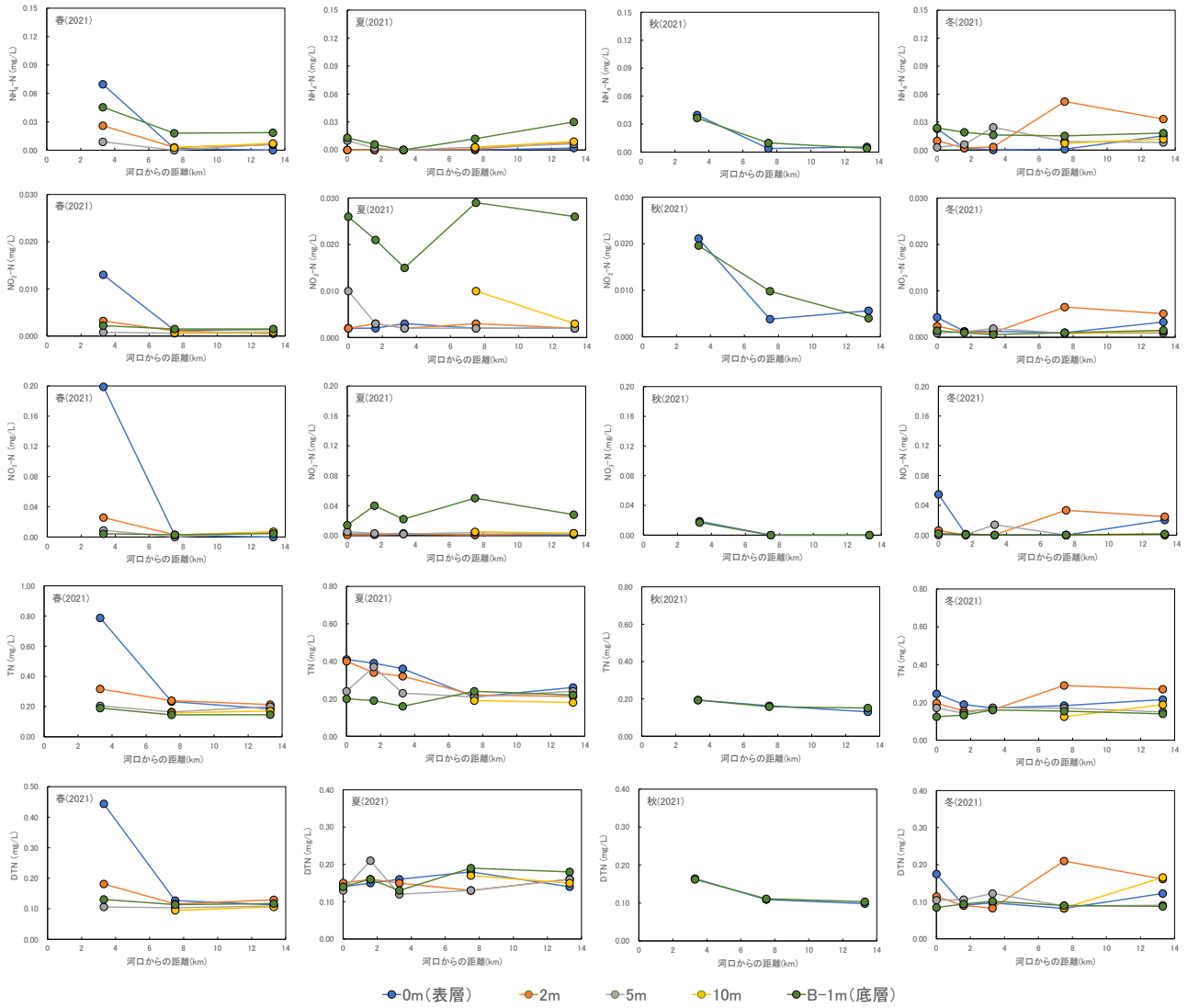
別図2-1 広島湾における有機物関連指標の季節変動(2020年度)
 (水質項目:上からCOD, D-COD, TOC, DOC, 季節:左から春季, 夏季, 秋季, 冬季)



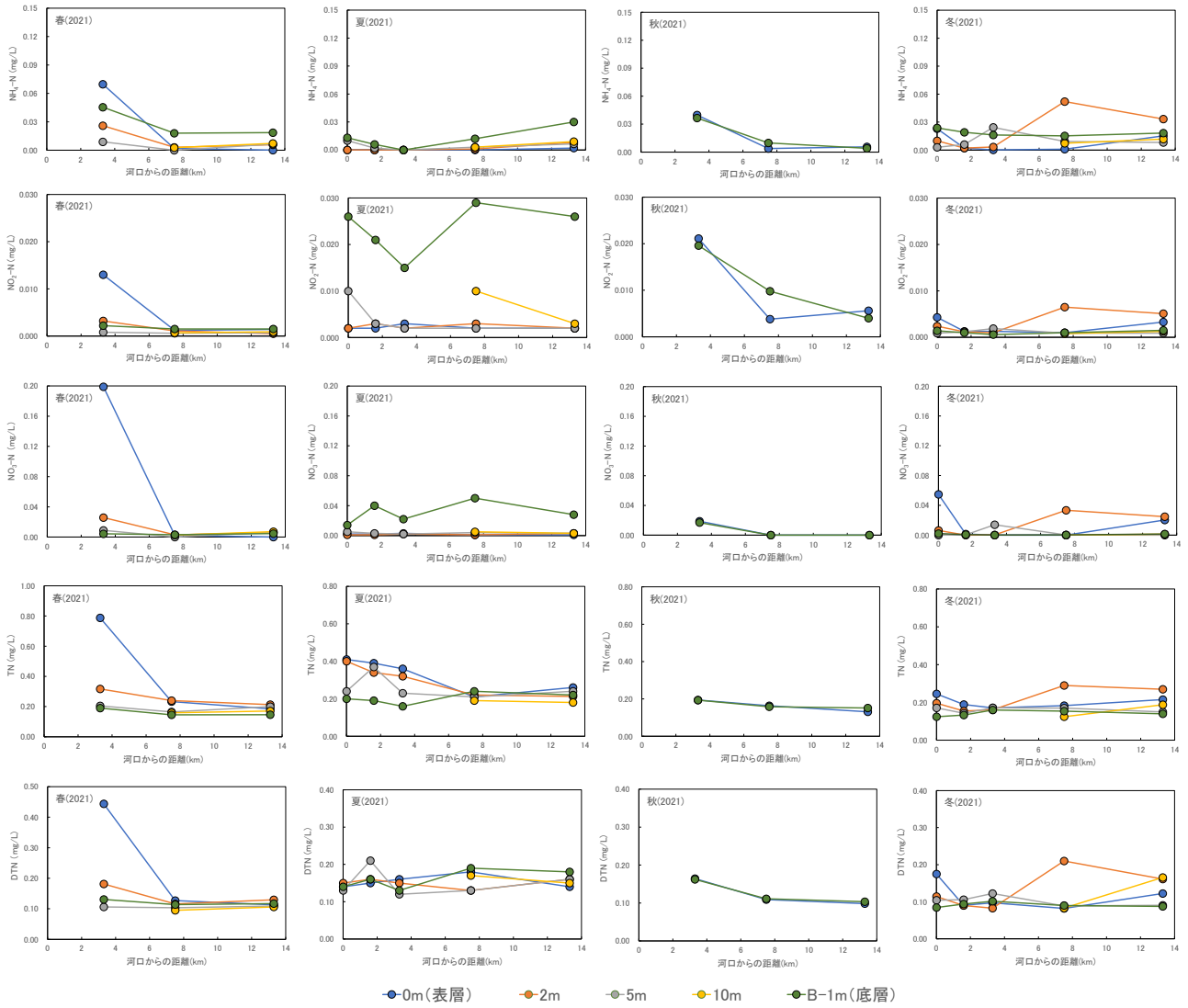
別図2-2 広島湾における有機物関連指標の季節変動(2022年度)
 (水質項目: 上からCOD, D-COD, TOC, DOC, 季節: 左から春季, 夏季, 秋季, 冬季)



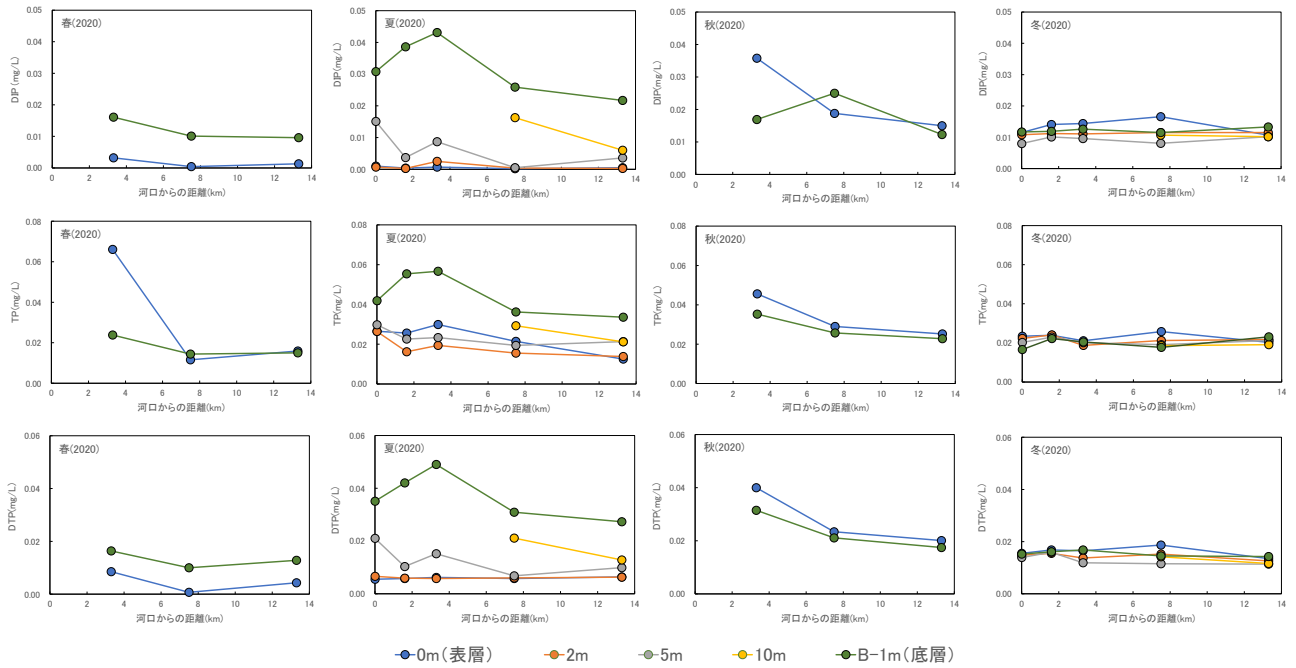
別図3-1 広島湾における栄養塩関連指標の季節変動(2020年度)
 (水質指標: 上からNH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, TN, DTN, 季節: 左から春季, 夏季, 秋季, 冬季)



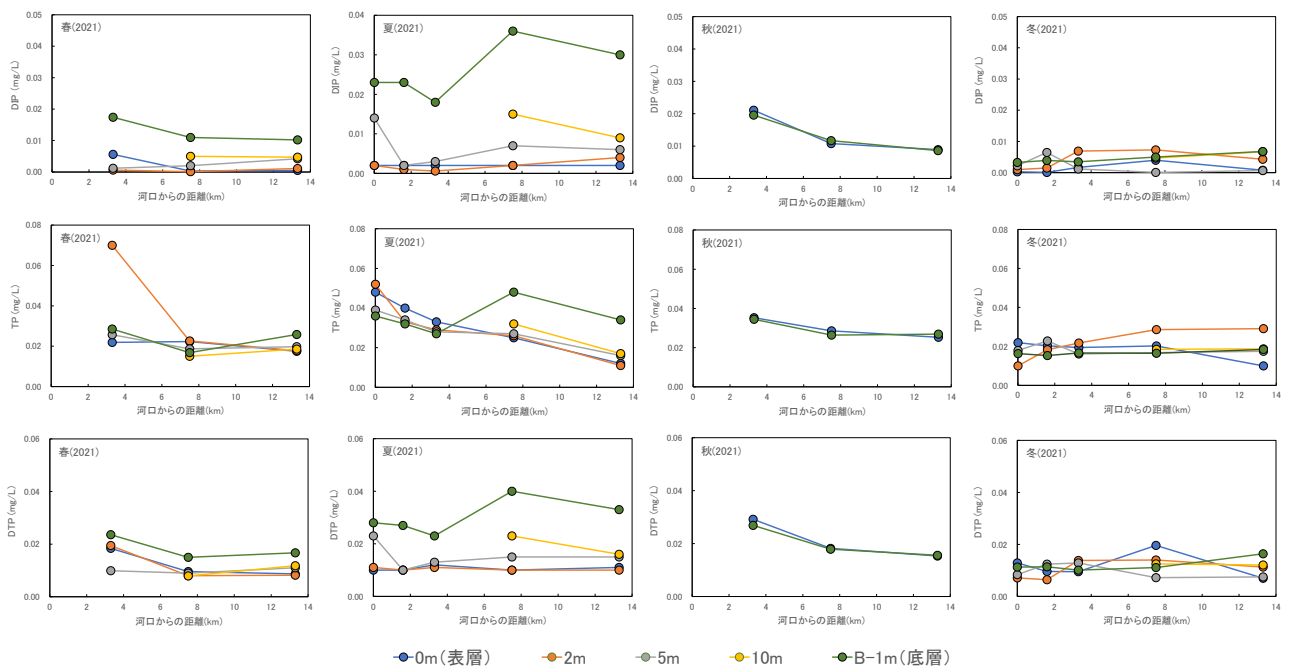
別図3-2 広島湾における栄養塩関連指標の季節変動(2021年度)
 (水質指標: 上からNH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, TN, DTN, 季節: 左から春季, 夏季, 秋季, 冬季)



別図3-2 広島湾における栄養塩関連指標の季節変動(2021年度)
 (水質指標:上から NH_4 , NO_2 , NO_3 , TN, DTN, 季節:左から春季, 夏季, 秋季, 冬季)



別図3-3 広島湾における栄養塩関連指標の季節変動(2020年度)
 (水質指標: 上からDIP(PO₄), TP, DTP, 季節: 左から春季, 夏季, 秋季, 冬季)



別図3-4 広島湾における栄養塩関連指標の季節変動(2021年度)
 (水質指標: 上からDIP(PO₄), TP, DTP, 季節: 左から春季, 夏季, 秋季, 冬季)

博多湾における貧酸素発生状況と季節変動解析

福岡市保健医療局保健環境研究所環境科学課
生物担当 有本圭佑, 大平良一, 中山恵利

1.はじめに

閉鎖性の高い博多湾においては、例年、夏季に湾奥部や沿岸域などで貧酸素水塊（溶存酸素量(DO)=4.0 mg/L未滿の「貧酸素状態」にある水塊）が発生し、生物の生息・生育への影響が懸念されている。さらに、夏季の降雨による栄養塩類供給量の増加に伴う赤潮発生などで有機物汚濁が助長され、T-N及びT-Pは環境基準をほぼ達成しているものの、CODの環境基準は一部の海域で達成していない¹⁾。

また、近年、気候変動による気温の有意な上昇が相次いで報告されており、博多湾においても水温が上昇傾向であることが報告されている。さらに、環境省の気候変動適応計画でも水環境への影響が指摘されていることから、博多湾においても気候変動によって想定される水環境への影響について注視していく必要がある。

これらの現状を踏まえ、福岡市保健環境研究所では地方公共団体環境研究機関等と国立環境研究所の共同研究（II型共同研究）「沿岸海域における新水質環境基準としての底層溶存酸素（貧酸素水塊）と気候変動の及ぼす影響把握に関する研究」に参加し調査を行っており、その一環として、博多湾沿岸域における貧酸素水塊の発生状況を把握するため、愛宕浜防波堤にてDOの連続測定を行った。さらに、博多湾の長期的な水質の変化を明らかにするために公共用水域の常時監視データを用いた長期変動解析も併せて行ったので報告する。

2.調査方法

2.1 底層DOの連続測定

博多湾沿岸域における貧酸素水塊の発生状況を把握するため、令和4年5月27日から10月31日の期間に愛宕浜防波堤（図1）の水深4 m前後の場所において海底1 m（底層）と3 m地点（表層）にロガー（PME社製 miniDOT, HOBO社製 U26-001）を設置し、DOの連続測定を行った。なお、愛宕浜防波堤の設置地点における通常時の塩分濃度は海水と同じである。ロガーデータの値については定期的にロガーのメンテナンスを行う際に多項目水質計（Hydrolab社製 DS5X）を用いて整合性があることを確認した。

2.2 博多湾の長期水質変動解析

長期変動解析は公共用水域の常時監視データを用いて行い、地点は湾内の環境基準点、西部海域からW-3、中部海域からC-4、東部海域からE-2を対象とした（図2）。項目は季節変動が確認された表層及び底層の水温、pH、COD、T-N、T-P及び底層DOを対象とした。解析期間は1981年4月から2022年3月までとした。

季節調整法による長期変動解析は、統計数理研究所で開発提供されたTIMSAC for R

package ver.1.3.7 に含まれるプログラムの decomp を用いて行った²⁾。



図1 設置地点

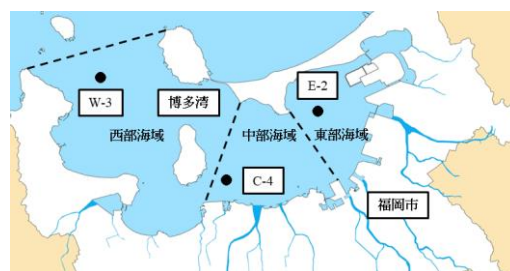


図2 解析対象地点

3.結果及び考察

3.1 貧酸素発生状況の調査

図3に測定期間内の底層DOの推移を示す。底層DOは日周変動を示し、令和4年度は6月11日に初めてDOが4.0 mg/L未滿の貧酸素を記録し、最後に貧酸素が記録されたのは10月23日であった。1時間毎に取得できた3,747データのうち貧酸素を記録したのは524データ(14%)で、表層水温が22~31°Cのときに貧酸素の発生が確認された。貧酸素状態の表層と底層の水温差のヒストグラムを図4に示す。表層が底層に比べ水温が高いときに貧酸素が発生したのは443データと84.5%を占め、水温による密度差の要因が示唆された。

図5に調査期間中の貧酸素発生状況を示す。貧酸素が発生すると複数日連続して確認される傾向が見られ、気象条件の影響を受けることから発生頻度にムラがあった。

貧酸素が最も長く継続し、解消を含む期間として8月23日から9月6日までの底層DO等の推移を図6に示す。8月28日には底層DOの最低値0.8 mg/Lを記録した。9月4日は終日にわたり貧酸素が継続して確認された。また、9月6日には台風11号の影響を受け貧酸素が解消されていた。

降雨の影響を受けていない期間として、令和4年8月27日から8月31日(5日間)を見ると、気温は正午頃に1日の最高値となり、底層水温が最高値になるのは午後6時前後と時間差があり、底層が表層に比べ水温が高い時間帯が深夜まで継続していることが確認された。未明から表層は底層に比べ水温が高くなり、表層と底層の水温差が拡大するに伴い、底層DOが低下し、貧酸素になることが確認された。

次に時刻毎の貧酸素発生頻度(図7)を示す。底層において貧酸素が発生する時間帯は午前7時が最も多く、午後8時が最も少ない結果となった。これは日周変動により未明の時間帯に貧酸素が多く発生し、底層水温が上昇する午後6時前後が少なくなる傾向と一致していた。なお、水深が浅い海域の日周変動については日射が重要な役割を果たしていると考えられている³⁾。

底層が表層に比べ水温が高いときに底層DOの上昇が確認されたことから、表層と底層の密度差により垂直混合され貧酸素が解消したものと推測された。

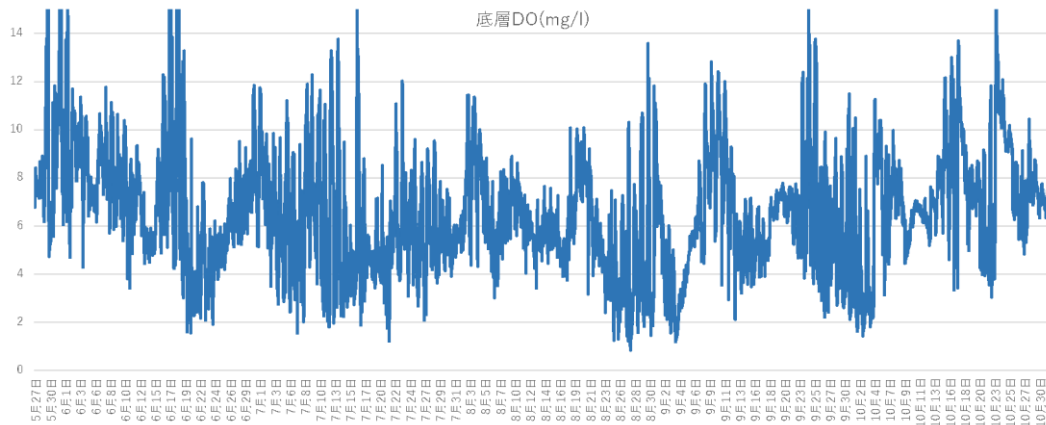


図3 測定期間内の底層 DO の推移

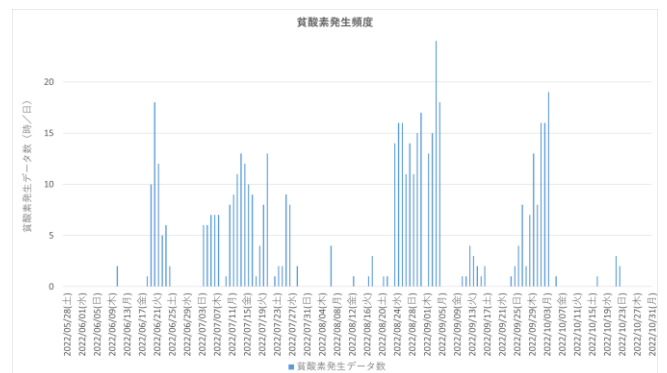
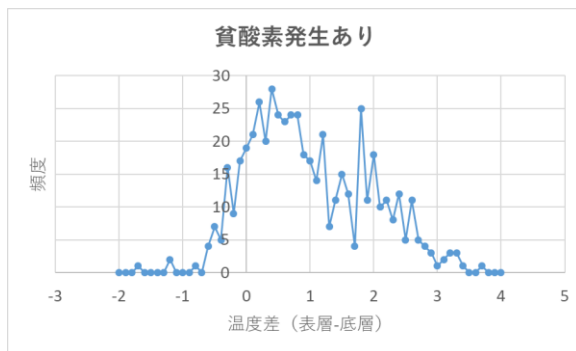


図4 貧酸素発生時の水温差（表層－底層）の頻度分布
 図5 貧酸素（底層 DO が 4.0 mg/L 未満）発生状況

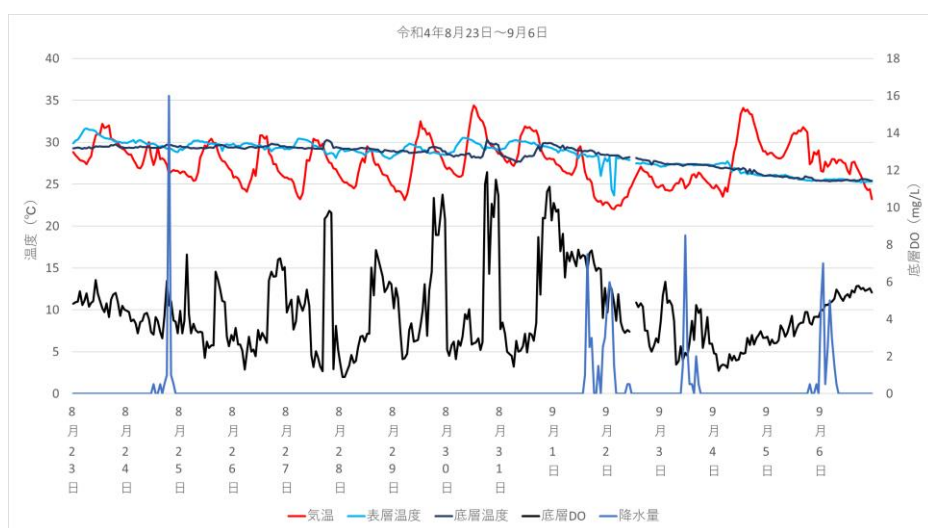


図6 底層 DO 等の推移（令和4年8月23日～9月6日）

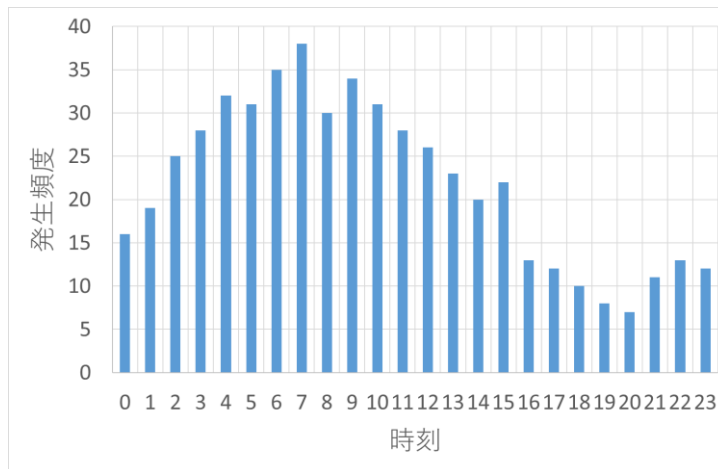


図7 時刻毎の貧酸素発生頻度

3.2 博多湾の長期水質変動解析

図8に水温の解析結果を示す。水温の解析結果は、水温は西部海域のW-3が他の地点に比べ最も高く、これは外洋に最も近いいためその影響を受けたものと推測された。また、全海域ともに気温の上昇が一因と思われる上昇傾向を示し、表層と同様に底層でも上昇傾向を示した。

図9にpHの解析結果を示す。pHの解析結果は、外洋に面した地点である西部海域のW-3表層では大きな変化はなく底層のみが下降傾向、他の海域では表層、底層ともに下降傾向となり、内湾の酸性化が示唆された。底層のpHについては、有機物の分解に伴う炭酸生成により底層のpHが低下し、底層では表層に比べ顕著な下降傾向が見られたものと考えられる。

図10に底層DOの解析結果を示す。底層DOの解析結果は、全海域ともに2000年頃までは明確な方向性を示さなかったが、西部海域と東部海域は近年緩やかな下降傾向であり、特に中部海域において2009年頃から顕著な下降傾向を示した。

図11にCODの解析結果を示す。CODの解析結果は、表層、底層ともに西部海域、中部海域、東部海域いずれの海域においても1993年頃をピークに下降、近年は概ね横ばい傾向となった。

図12に福岡市の下水道の普及状況を示す。下水道の人口普及率は1981年時点では46.4%と海域への負荷が大きかった頃に比べ、1993年頃には下水道の人口普及率も94.7%となり、海域への負荷も大幅に減ってきたころから、CODのトレンドも1993年頃をピークに減少か横ばいの傾向に転じたものと考えられる。

図13にT-Nの解析結果を示す。T-Nの解析結果は、西部海域と中部海域は表層、底層ともに概ね横ばい傾向、湾奥部の東部海域は下水道の普及が進んだ1993年以降は概ね横ばい傾向であった。

図 14 に T-P の解析結果を示す。T-P の解析結果は、表層、底層ともに同様の傾向で西部海域では横ばい傾向であったが、中部海域と東部海域では 1993 年頃から 2000 年頃にかけて顕著な下降傾向がみられた。

図 15 に博多湾における T-N と T-P の負荷量と下水処理人口の推移を示す。1992 年と 2013 年を比較して処理人口は増加しているものの T-N の負荷量はやや減少していることに対し、T-P の負荷量は約半分に減少している。さらに、福岡市では 1993 年より下水の高度処理でりんの削減を行っており、博多湾においては全りんの流入量の約 7 割が下水処理水に由来すると試算されていることから、T-P の下降傾向は福岡市で 1993 年から順次導入された下水の高度処理の効果と考えられた。

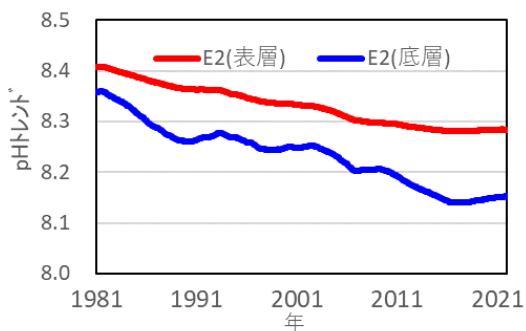
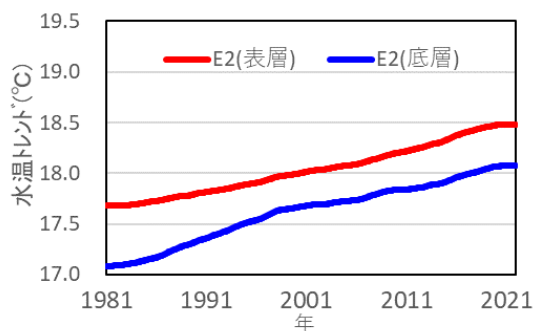
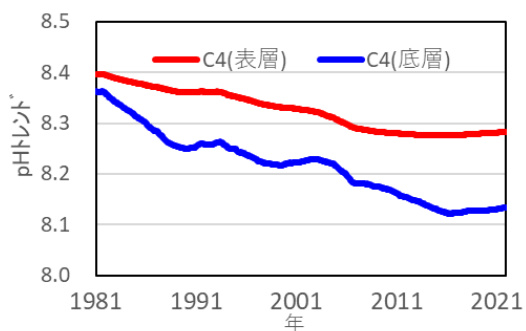
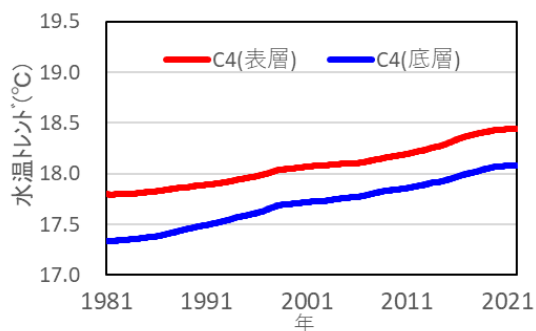
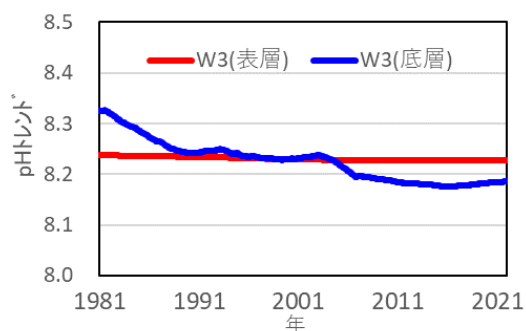
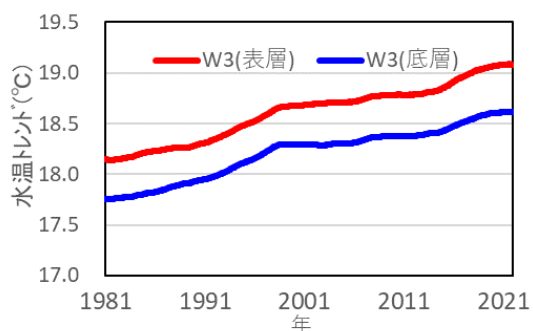


図 8 水温トレンド

図 9 pHトレンド

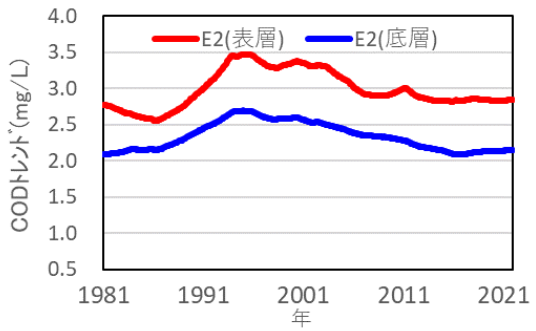
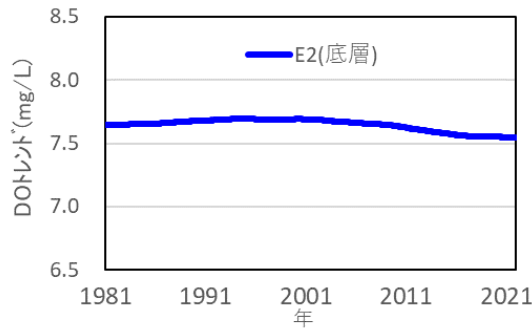
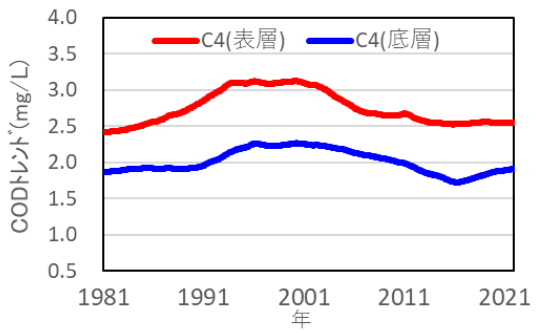
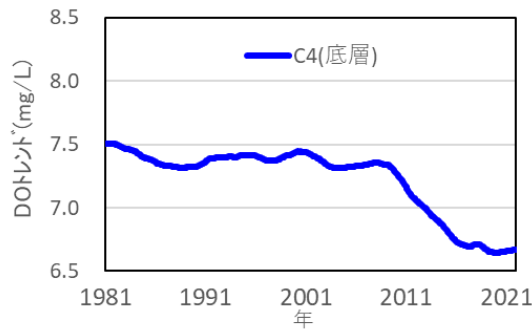
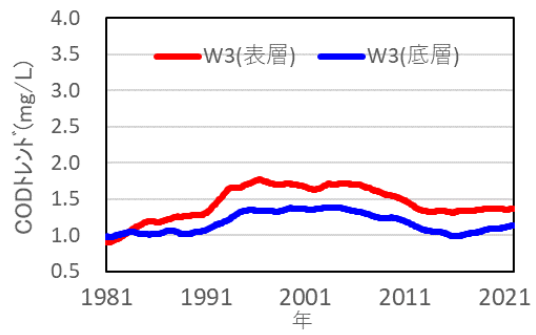
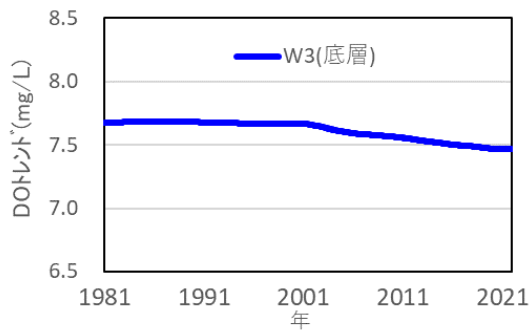
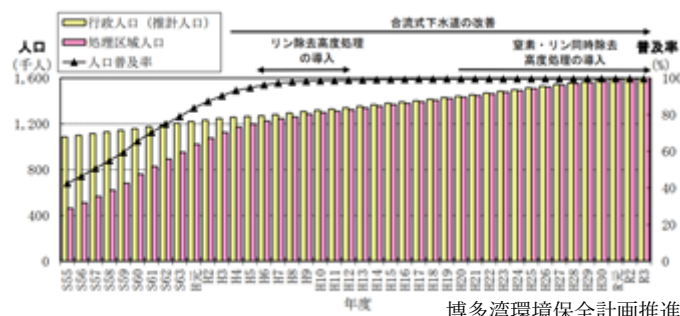


図10 底層 DO トレンド

図11 COD トレンド



博多湾環境保全計画推進委員会 HP より

図12 下水道の普及率の推移

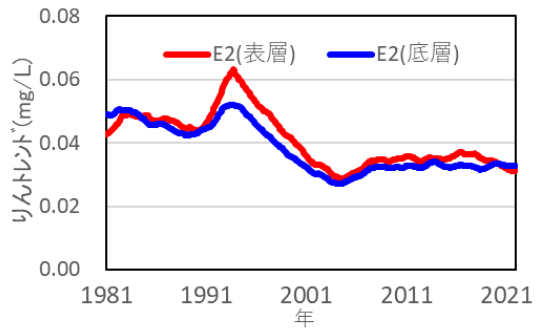
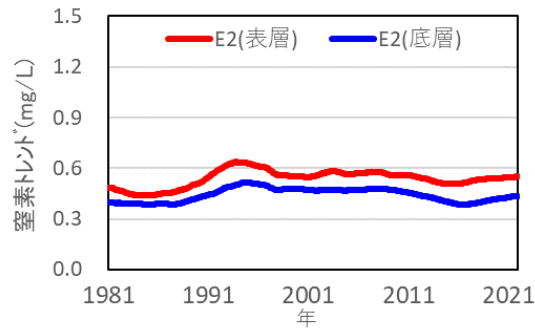
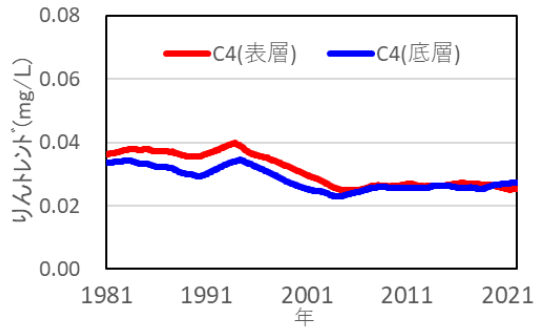
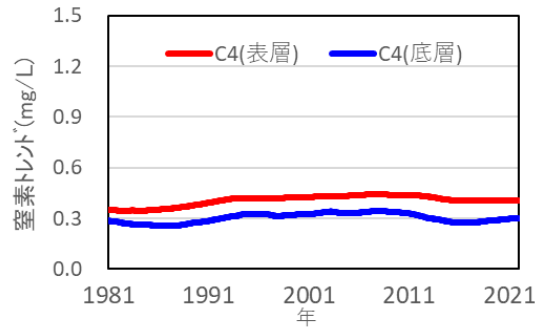
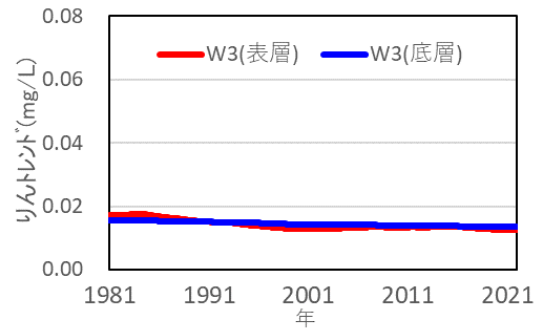
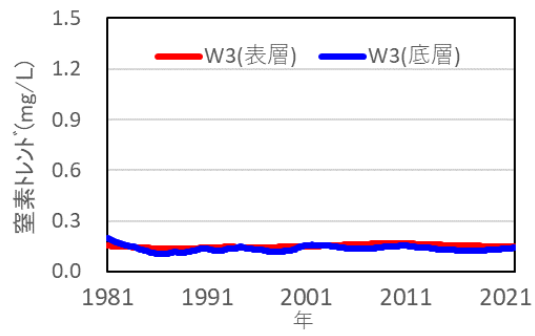


図 13 T-N トレンド

図 14 T-P トレンド

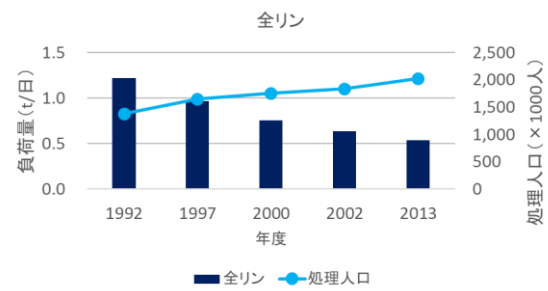
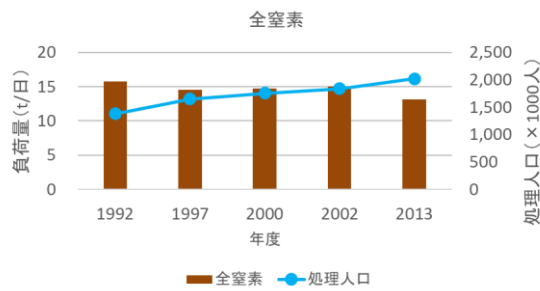


図 15 全窒素及び全リンの処理人口及び負荷量

4.まとめ

(底層DOの連続測定)

調査期間中、1時間毎に取得できた3,747データのうち貧酸素を記録したのは524データで、そのうち表層が底層に比べ水温が高いときに貧酸素が発生したのは443データ(84.5%)であり、水温による密度差が貧酸素発生の要因になっていることが示唆された。また、表層水温が22°C以上で貧酸素の発生が確認された。

底層DOが4.0 mg/L未満の「貧酸素」が確認されたのは令和4年6月11日、最後に記録されたのは10月23日、最低値は8月28日に記録した。

博多湾沿岸域である愛宕浜の表層水温・底層DOは明確な日周変動をしていた。愛宕浜の底層において貧酸素が発生する時間帯は午前7時が最も多く、午後8時が最も少ない結果となり、4 m前後の浅い水深であるにも関わらず、貧酸素の発生、解消を繰り返していた。

なお、多項目水質計で計測した際、降雨後に表層と底層の塩分差が確認できることがあり、水温だけではなく塩分による密度差も生じていた可能性がある。

(博多湾の長期水質変動解析)

今回、博多湾の常時監視データに対して季節調整法を適用したところ、トレンドデータから長期的な水質の変動を把握することができた。長期的な変動として、水温は気温の上昇が一因と思われるような上昇傾向を示し、底層でも同様に上昇傾向がみられた。pHについては、内湾の酸性化を示唆するような下降傾向がみられた。COD、T-N、T-Pについては、湾奥部ほど下水処理による影響を反映する結果となった。

5.参考資料

- 1) 福岡市：博多湾環境保全計画（第二次）資料編 平成28年9月
- 2) 統計数理研究所 TIMSAC for R package <http://jasp.ism.ac.jp/ism/timsac/>
- 3) 灘岡和夫，内山雄介，瀬崎智之：夏季の内湾性砂浜海岸周辺の水温・DO・クロロフィルaの変動特性について；海岸工学論文集，43，[2] 1101～1105 (1996)

1. はじめに

長崎県本土のほぼ中央に位置する大村湾は、南北約 26 km、東西約 11 km、面積約 320 km² の海域であり、佐世保湾を介して狭い針尾瀬戸と早岐瀬戸だけで外海と通じている閉鎖性の強い湾である。大村湾は海域 A 類型に指定されており、化学的酸素要求量(COD)の基準値は 2.0 mg/L で、17 環境基準地点における平均値は基準値を超過した状態が続いていたが、近年は水質の改善が進み、基準値付近を横ばいに推移している。本調査では、前 II 型共同研究「海域における水質管理に係わる栄養塩・底層溶存酸素状況把握に関する研究」に引き続き、大村湾湾奥部の 2 地点(久山港沖と祝崎沖)において、海況調査と採水を行って栄養塩類等の測定を行った。また、長期的な水温の変化を明らかにするために、長崎県公共用水域水質調査のデータを用いて、表層水温の長期変動解析を行った。

2. 現場調査、測定・分析方法

2.1 調査点

調査点は大村湾の環境基準点である久山港沖と祝崎沖である(図 1)。両調査点は大村湾湾奥部の支湾である津水湾内にあり、それぞれの水深は、久山港沖で約 6 m、祝崎沖で約 15 m である。

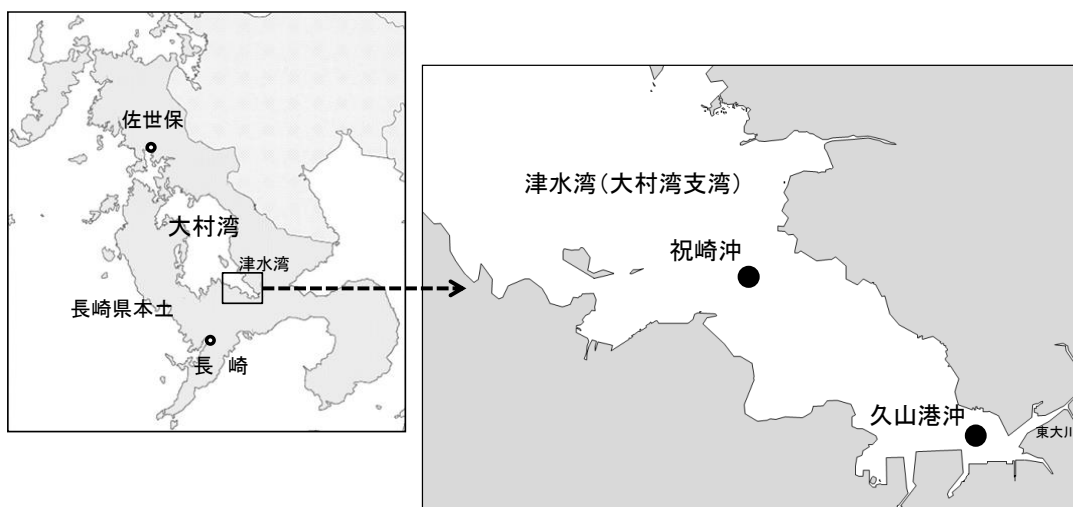


図 1 調査点位置図

2.2 現場測定・採水・分析

調査は 2020 年 9 月から 2023 年 1 月の間に、夏季と冬季の年 2 回、合計 6 回実施した。各測定では多項目水質計(JFE アレック電子製 AAQ-RINKO)を用いて水温、塩分及び DO を鉛直的に連続に記録した。さらに、採水バケツ及びバンドーン採水器を用いて、久山港沖では表層と底層、祝崎沖では表層、中層、底層から採水した。中層とは水深の 1/2 の深度、底層とは海底から 1 m の深度である。採取した海水はクーラーボックスで冷却しながら持ち帰り、焼成処理をしたガラス繊維ろ紙を用いてろ過を行い、ろ過・分注した試水・フィルター類は冷凍して国立環境研究所に送付して一連の分析を行った。

3. 結果と考察

3.1 水温、塩分、DO の鉛直分布

2022年9月(夏季)及び2023年1月(冬季)における祝崎沖及び久山港沖の水温、塩分及びDOの鉛直分布を図2に示す。

水温は、夏季において、どちらの地点でも水深が深くなるにつれて水温が下がり、水面付近と底層で1℃以上の差が見られた。一方で、冬季の水温は鉛直的に一様であった。

塩分は、時期や地点によらず、鉛直的に一様であった。夏季では塩分が31.5~31.8であったのに対して、冬季では32.2~32.5であり、冬季の塩分が高くなっている。これは、夏季の降雨量が多く、淡水の流れ込みが多かったためと考えられる。

DOは、夏季において祝崎沖では水深7m付近から減少しはじめ、海底直上では0.6mg/Lまで減少しており、貧酸素水塊 (<3.6mg/L)¹⁾となっていた。久山港沖では、水深3m付近から減少しはじめ、海底直上では3.7mg/Lであった。一方、冬季においてはどちらの地点も表層と底層で1mg/L以上の差はなく、鉛直的にほぼ一様であった。

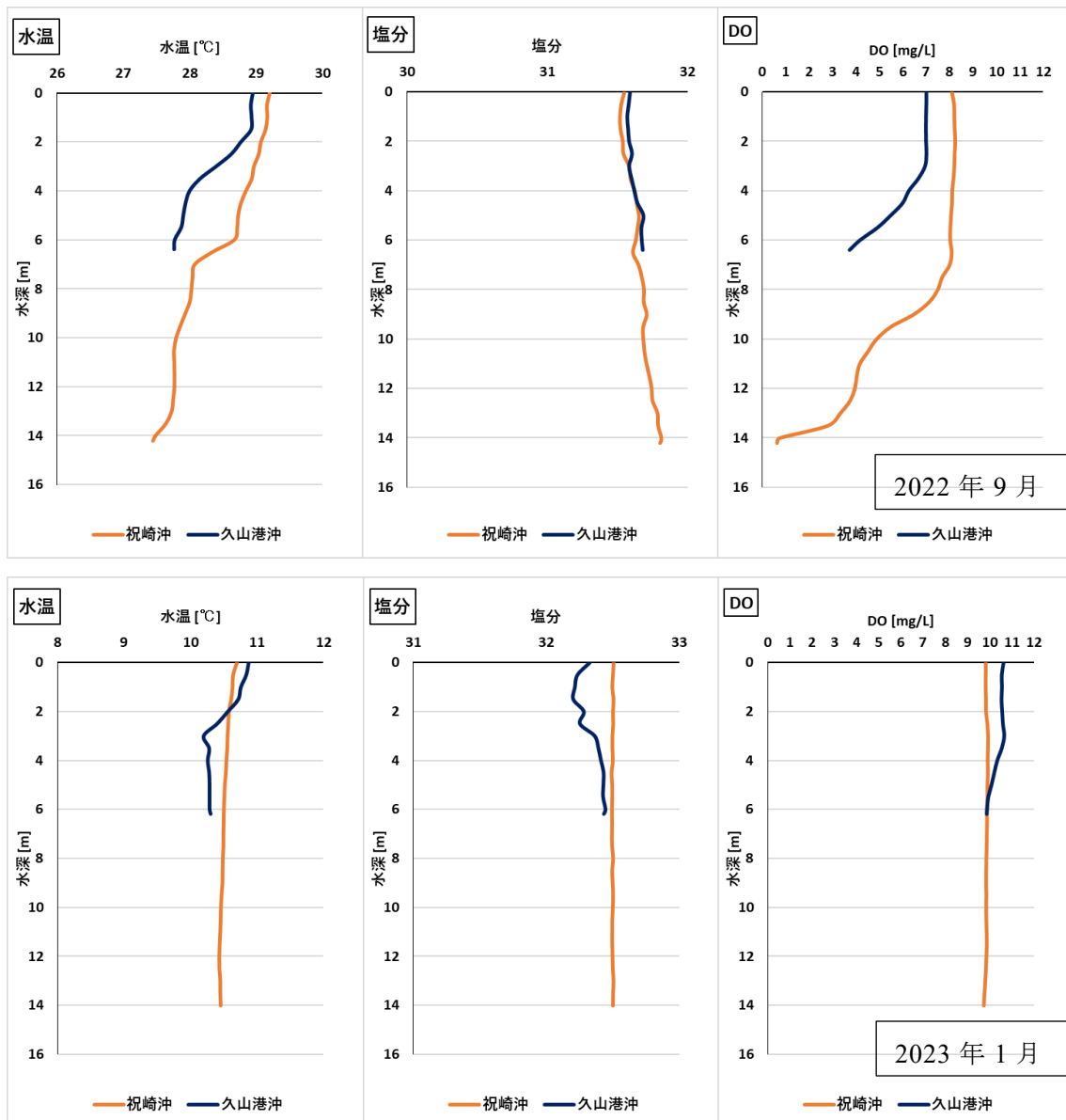


図2 祝崎沖及び久山港沖における水温、塩分、DOの鉛直分布

3.2 栄養塩類

2022年1月(冬季)、2022年9月(夏季)の調査における栄養塩類の測定結果を表1に示す。溶存態無機窒素(DIN:硝酸態窒素[NO₃-N]及び亜硝酸態窒素[NO₂-N]、アンモニア態窒素[NH₄-N]の総和)、溶存態全窒素(DTN)、リン酸態リン(PO₄-P)、溶存態全リン(DTP)、珪酸塩(SiO₂)。

水深ごとの結果を地点別・季節別で比較すると、祝崎沖の夏季では、DIN、DTN、PO₄-P、DTPといった項目で表層よりも底層で高い結果となった。これは、夏季において底層が貧酸素状態となりやすく、底層が貧酸素化すると底泥からDIN(特にNH₄-N)とPO₄-Pが溶出しやすくなることが要因だと考えられる。一方で、夏季の久山港沖における濃度は、底層よりも表層が高くなる場合も見られ、これは、久山港沖の方が祝崎沖より水深が浅く、貧酸素状態になりにくいことや、河口に近いこと、陸域からの流れ込みが影響しているものと考えられる。

表1 栄養塩類の測定結果 (単位:mg/L)

採水年月	調査地点	採水層	NO ₃ -N	NO ₂ -N	NH ₄ -N	DIN	DTN	PO ₄ -P	DTP	SiO ₂
2022年1月 (冬季)	祝崎沖	表層	0.006	0.000	0.004	0.010	0.185	0.002	0.079	0.08
		中層	0.005	0.001	0.009	0.015	0.317	0.002	0.071	0.07
		底層	0.002	0.000	0.005	0.007	0.205	0.002	0.110	0.11
	久山港沖	表層	0.006	0.001	0.005	0.012	0.175	0.003	0.034	0.03
底層		0.005	0.001	0.009	0.015	0.213	0.003	0.043	0.04	
2022年9月 (夏季)	祝崎沖	表層	0.001	0.002	0.000	0.004	0.292	0.002	0.018	0.02
		中層	0.002	0.005	0.000	0.007	0.243	0.002	0.013	0.02
		底層	0.007	0.008	0.015	0.030	0.310	0.016	0.026	0.42
	久山港沖	表層	0.002	0.003	0.001	0.006	0.212	0.003	0.016	0.07
底層		0.001	0.002	0.002	0.004	0.202	0.004	0.017	0.04	

3.3 有機炭素

2022年1月(冬季)、2022年9月(夏季)の調査における有機炭素の測定結果を表2に示す(TOC:全有機炭素、DOC:溶存態有機炭素、POC:懸濁態有機炭素)。なお、DOCとPOCの和をTOCとした。

どの採水時期、調査地点、水深においても、DOCがPOCを上回っており、祝崎沖及び久山港沖における有機炭素の大半が溶存態有機物として存在していることが確認された。また、冬季におけるPOCの割合が、祝崎沖では25~28%であるのに対して、久山港沖では31~42%であった。これは、久山港沖が祝崎沖と比べて河口に近く、水深が浅いことから、陸域からの懸濁粒子の流入や底泥の巻き上げの影響が出ている可能性が考えられる。

表2 TOC、DOC、POCの測定結果 (単位:mgC/L)

採水年月	調査地点	採水層	TOC	DOC	POC	溶存態割合(%)	懸濁態割合(%)
2022年1月 (冬季)	祝崎沖	表層	1.73	1.24	0.485	72	28
		中層	2.55	1.85	0.706	72	28
		底層	1.88	1.40	0.479	75	25
	久山港沖	表層	2.26	1.55	0.707	69	31
底層		2.18	1.26	0.916	58	42	
2022年9月 (夏季)	祝崎沖	表層	2.53	2.44	0.084	97	3
		中層	2.28	2.20	0.079	97	3
		底層	2.69	2.56	0.131	95	5
	久山港沖	表層	2.48	2.34	0.133	95	5
底層		2.46	2.33	0.130	95	5	

4 祝崎沖、久山港沖における水温の長期変動解析

長期的な水温の変化を明らかにするために、長崎県における公共用水域水質調査のデータ²⁾を用いて、表層水温の長期変動解析を行った。なお、祝崎沖では1978年度から2020年度まで、久山港沖では1985年度から2020年度までのデータを使用した。

4.1 12ヶ月移動平均による解析結果

はじめに、季節調整の手法の一つである12ヶ月移動平均による解析を行った³⁾。12ヶ月移動平均により季節調整を行った単回帰分析結果を図3,4に示す。グレー線は実測値、黄線は12ヶ月移動平均した値、赤線は12ヶ月移動平均値の線形分析(単回帰分析)の結果を示している。その結果、12ヶ月移動平均から求めた表層水温のトレンドは、祝崎沖で $0.0024(^{\circ}\text{C}/\text{月})$ 、久山港沖で $0.0033(^{\circ}\text{C}/\text{月})$ であった。

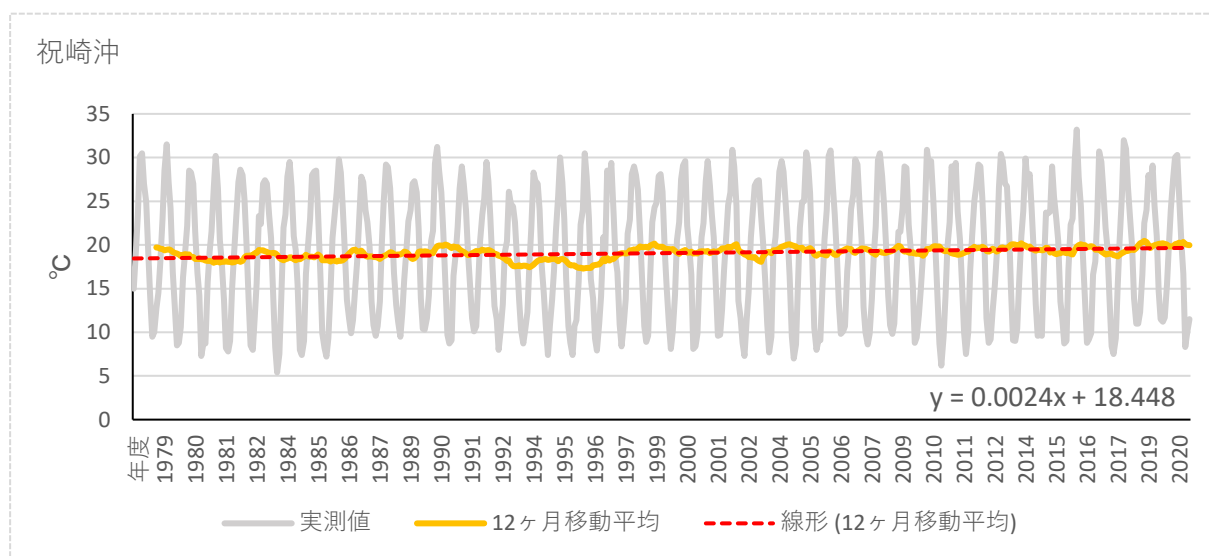


図3 12ヶ月移動平均(祝崎沖 水温)

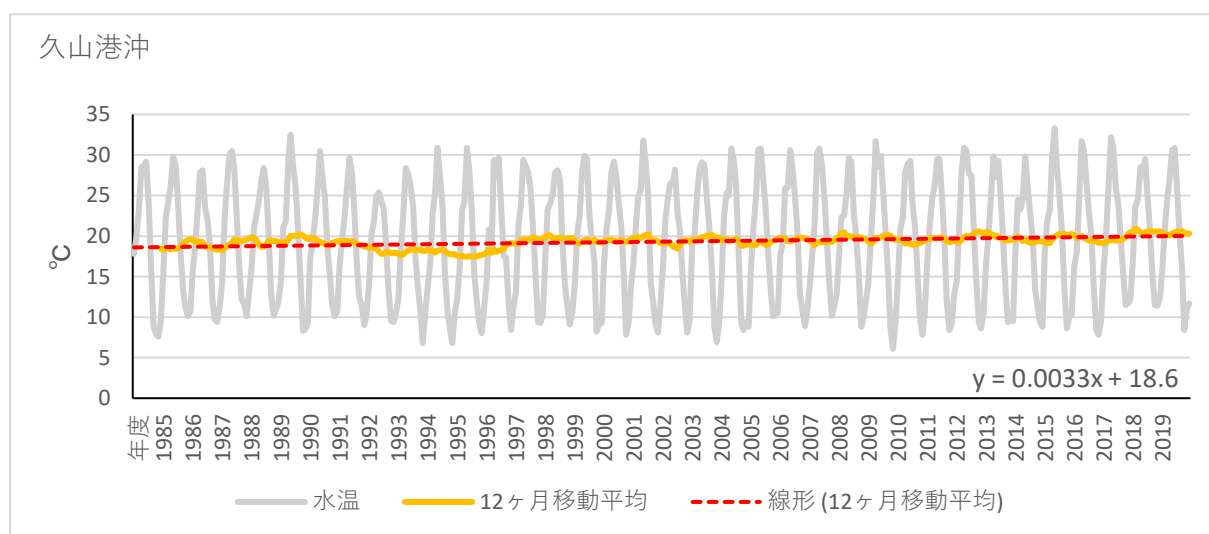


図4 12ヶ月移動平均(久山港沖 水温)

4.2 ダミー変数を用いた重回帰分析結果

表 3 に示すとおり、目的変数と説明変数の表を作成し、ダミー変数を用いた重回帰分析を行った($Y = \text{トレンド成分} + \text{季節変動成分} + \text{残差}$)^{3,4)}。

ダミー変数を用いた重回帰分析結果を表 4 に示す。傾き効果(°C/月)は、月あたりの水温上昇率を示し、各月の値は、重回帰分析で得られた季節効果の係数である。

祝崎沖及び久山港における傾き効果については、有意水準1%で有意な結果が得られ、祝崎沖でのトレンドが0.0022(°C/月)、久山港でのトレンドが0.0032(°C/月)となった。4.1での表層水温トレンドとほぼ同様の値であった。今回の観測データで見ると、祝崎沖は42年間で約1.10°C上昇、久山港沖は35年間で約1.34°C上昇という結果が得られた。

表 3 ダミー変数を用いた重回帰分析における目的変数と説明変数

年度	月	目的変数 水温実測値	傾き効果	説明変数											
				季節効果											
				4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	
1978	4	Y ₁	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1978	5	Y ₂	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.
.
1978	2	Y ₁₁	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
1978	3	Y ₁₂	12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
1979	4	Y ₁₃	13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
.	
.	
2020	3	Y ₅₁₆	516	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	

表 4 ダミー変数を用いた重回帰分析(水温)

地点名	祝崎沖	久山港沖
傾き効果(°C / 月)	0.0022	0.0032
4月(°C)	-3.7329	-3.6273
5月(°C)	1.0670	1.1860
6月(°C)	4.1043	4.3466
7月(°C)	8.5160	8.3989
8月(°C)	10.0648	10.1484
9月(°C)	8.6021	8.7757
10月(°C)	4.8393	4.9807
11月(°C)	0.0928	-0.2725
12月(°C)	-5.0047	-5.5313
1月(°C)	-9.4396	-9.5735
2月(°C)	-10.4256	-10.2296

4.3 R TIMSAC decomp を用いた水温データの季節調整法によるトレンド解析

TIMSAC とは、統計数理研究所で開発された時系列データの解析、予測、制御のための総合的プログラムパッケージであり、R 言語と TIMSAC に含まれる decomp 関数を用いて季節調整を行い、水温のトレンド解析を行った（ $Y = \text{トレンド成分} + \text{AR 成分} + \text{季節変動成分} + \text{曜日効果} + \text{白色雑音}$ ）⁵⁾。

図 5 及び図 6 における黄線が解析結果であり、表層水温のトレンドは、どちらの地点でも 1980 年代は 19℃前後を推移しているが、2010 年代では 20℃ほどになっており、海水温の上昇トレンドが確認された。また、2004 年度から測定されている底層水温のデータを同様に解析し、表層水温のトレンドと比較したグラフを図 7 に示す。ほぼ横ばいの底層水温のトレンドと比べて、表層水温のトレンドが上昇しており、表層及び底層水温の差が広がっている。

今後、温暖化の進行により、さらなる海水温上昇が予想される。これにより、夏季の成層が発達しやすくなり、久山港沖のような水深が浅い海域でも貧酸素化やそれに伴う底質からの栄養塩類の溶出や内部生産の増加が懸念される。

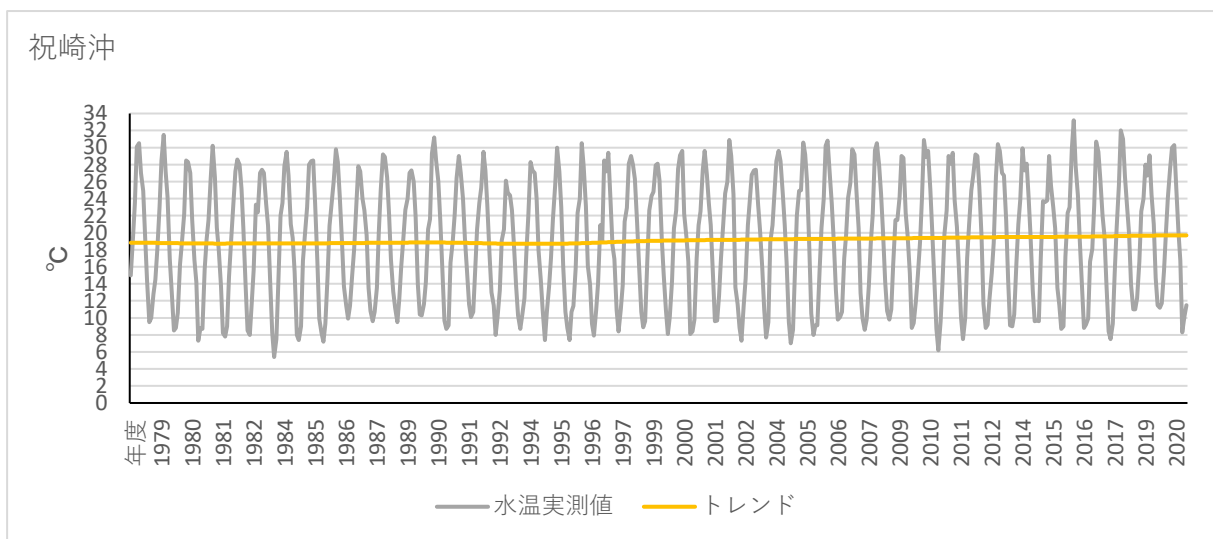


図 5 R TIMSAC decomp(祝崎沖 水温)

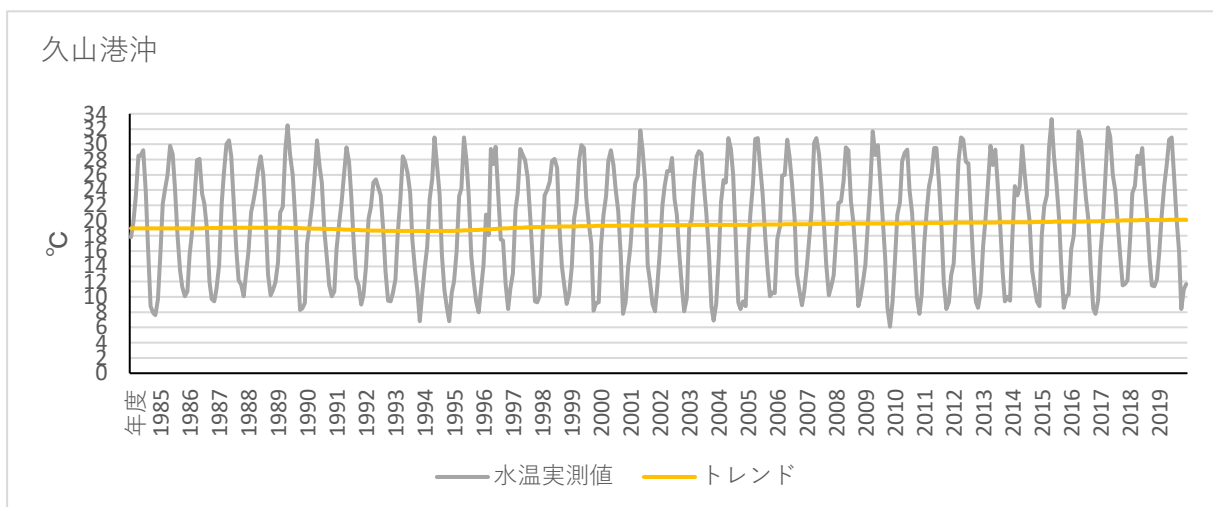


図 6 R TIMSAC decomp(久山港沖 水温)

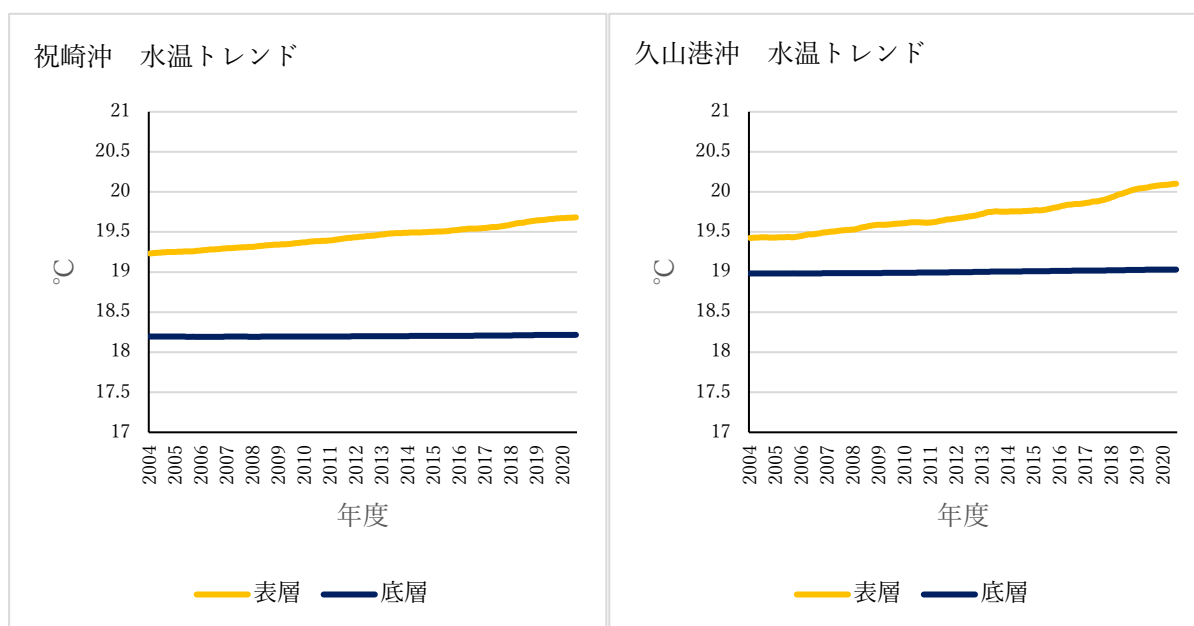


図 7 表層及び底層水温のトレンド(2004 年度～2020 年度)

5. まとめ

- 夏季の祝崎沖において、海底直上の DO が 0.6 mg/L となっており、貧酸素水塊となっていた。また、夏季の祝崎沖では、DIN、DTN、PO₄-P、DTP といった項目で表層よりも底層で高い結果となった。これは、底層が貧酸素化したために、底泥から DIN (特に NH₄-N) と PO₄-P が溶出しやすくなることが要因だと考えられる。一方で、夏季の久山港沖における濃度は底層よりも表層が高くなる場合も見られ、これは、久山港沖の方が祝崎沖より水深が浅く、貧酸素状態になりにくいことや、河口に近いこと、陸域からの流れ込みが影響しているものと考えられる。
- 12ヶ月移動平均、ダミー変数を用いた重回帰分析、R TIMSAC decomp を用いた解析によって、水温の長期変動解析を行ったところ、祝崎沖と久山港沖どちらも海水温の上昇トレンドが確認された。表層水温と底層水温のトレンドを比較すると、表層と底層の温度差が広がっていることが確認された。今後、温暖化の進行により、さらなる海水温上昇が予想される。これにより、夏季の成層が発達しやすくなり、久山港沖のような水深が浅い海域でも貧酸素化やそれに伴う底質からの栄養塩類の溶出や内部生産の増加が懸念される。

参考文献

- 柳哲雄: 貧酸素水塊の生成・維持・変動・消滅機構と化学・生物的影響: 海の研究, 13 (5), 451-460, 2004
- 長崎県環境部地域環境課 公共用水域及び地下水の水質測定結果
- 福地信一、阿部郁子他: 宮城県沿岸域における表層水温のトレンドーダミー変数を用いた重回帰分析による推定ー: 宮城県保健環境センター年報 第 29 号 2011
- 二宮勝幸、柏木宣久他: 東京湾西部海域における表層水温トレンドーダミー変数を用いた重回帰分析による推定ー: 横浜市環境科学研究所所報 第 34 号 2010
- 「TIMSAC for R package 統計数理研究所 2020 年 07 月 (Ver.1.3.7)」
<https://jasp.ism.ac.jp/ism/timsac/> (最終アクセス 2023 年 3 月 8 日)

鹿児島湾湾奥部におけるCOD関連項目，栄養塩類，多項目水質計の結果及び長期変動解析について

鹿児島県環境保健センター

有西 聡美 伊口 航平 柴田 英介
前畑 健太 吉留 加奈子

1 はじめに

当県では1979年5月に鹿児島湾水質環境管理計画（鹿児島湾ブルー計画）を策定し，以来，各種の環境保全対策を講じている。一方，特に湾奥部は閉鎖性が高いため夏季には環境基準値を上回る化学的酸素要求量（COD）が測定されることが多く，また，赤潮や貧酸素水塊の発生も報告されていることから湾奥部の水質状況を把握することを目的として，国立環境研究所との共同研究（II型）に参加している。

2020～2022年度にかけて前課題²⁾に引き続き，公共用水域常時監視地点においてCOD関連項目，栄養塩類の測定及び多項目水質計による底層DO等の現地測定を実施し，加えて海域における気候変動の影響評価として水温・水質について長期変動傾向の解析を行ったので，結果について報告する。

2 鹿児島湾の概要

鹿児島湾は南北約80 km，東西約20 kmの細長く入り込んだ内湾であり，桜島以北の湾奥と南部の湾央，湾入口の湾口部に大別される。湾奥部と湾央部は図1のとおり水深約40 m，幅約1.9 kmの西桜島水道で接続しており，すり鉢を2つ繋げたような形状のため，特に湾奥部は海水の交換が少ない閉鎖性の高い水域となっている。

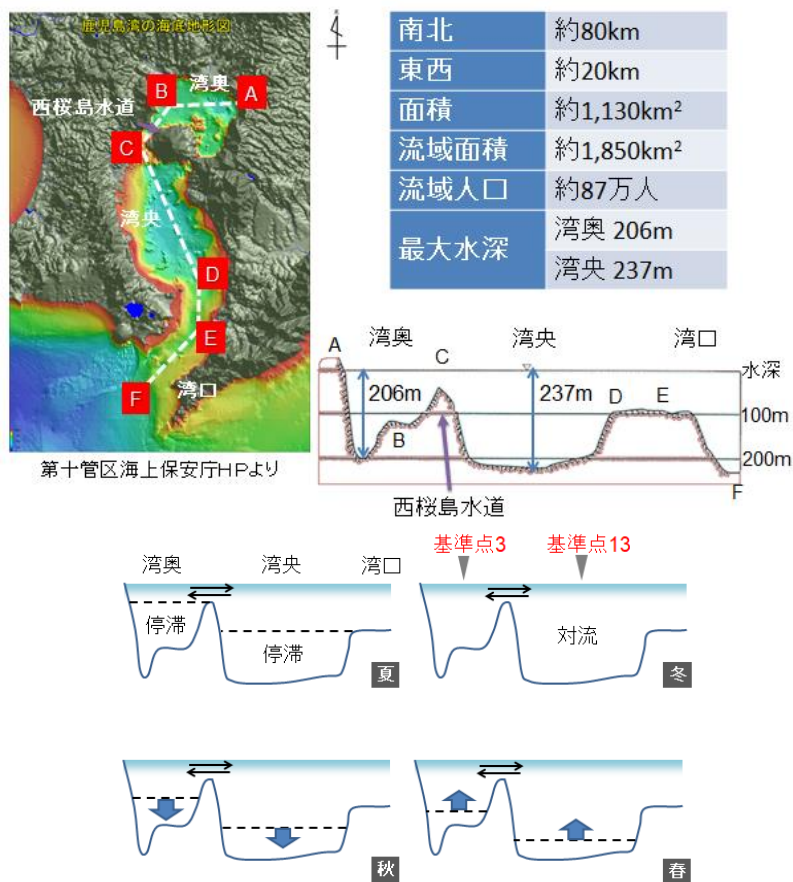


図1 鹿児島湾の概要

3 調査方法

3.1 調査地点

調査地点を図2に示す。調査地点は湾奥沿岸部の基準点1，湾奥で最も流量の多い天降川の河口沖である基準点2，湾奥中央部の基準点3とした。水深は基準点1が約107m，基準点2が約109m，基準点3が約142mとなっている。当該水域は生活環境保全に関する環境基準のA類型（COD 2 mg/L以下）に指定されている。

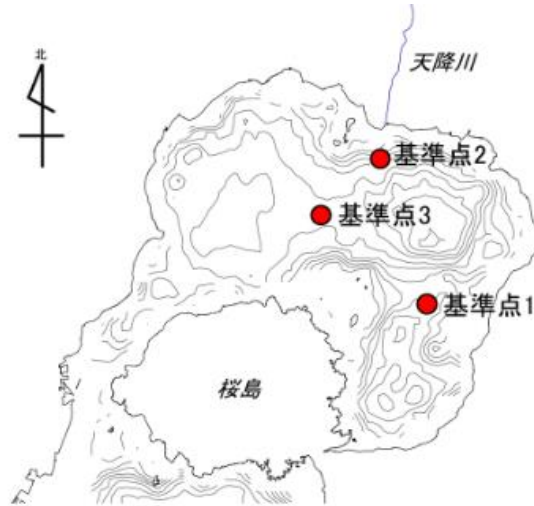


図2 調査地点

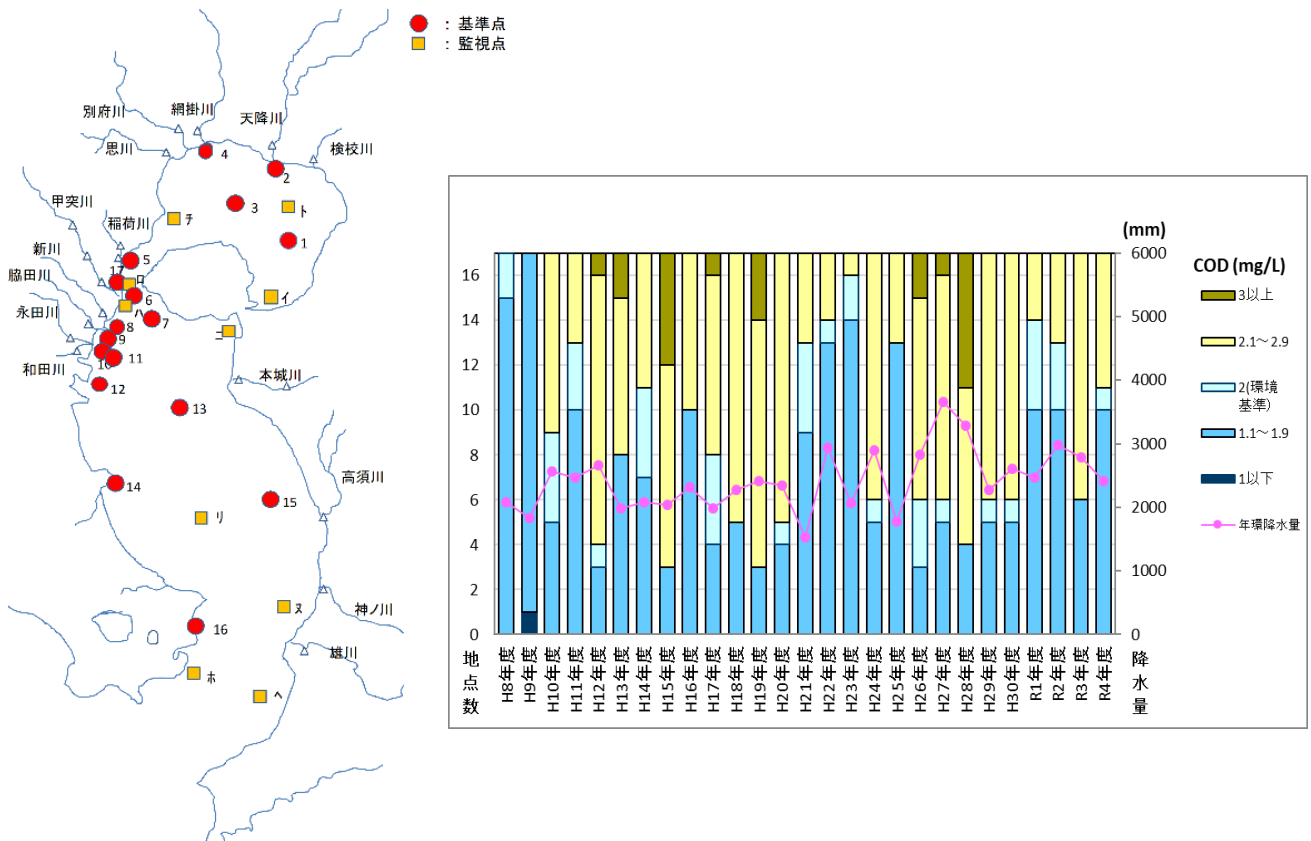


図3 鹿児島湾COD年間評価（75%値）の推移

3. 2 調査項目（対象データ），調査時期，調査機関

3. 2. 1 COD関連項目

COD関連項目の調査期間は2011～2022年度とした。

調査項目は基準点1及び基準点2の海域版BOD, COD, 溶存態COD (D-COD), 溶存態有機炭素 (DOC), 懸濁態有機炭素 (POC), クロロフィルa (Chl-a) とした。なお, CODからD-CODを差し引いたものを懸濁態COD (P-COD), DOCとPOCの合計を全有機炭素 (TOC) とした。採水層は基準点1, 2ともに表層 (0.5 m) 及び下層 (2013年度までは100 m, 2014年度以降は90 m) とした。

調査は年2回, 2011, 2012年度は8月及び12月, 2013年度は9月及び12月, 2014年度は11月及び1月, 2015～2022年度は9月及び1月に行った。8月, 9月, 11月を夏季, 12月, 1月を冬季とし, 項目毎に時季別, 層別平均値を算出した。

COD, D-CODは2013～2018年度は国立環境研究所において統一分析を行い, 2019～2022年度は当センターで分析した。なお, 海域版BODについては2015年度から当センターで分析している。その他の項目については, 国立環境研究所において統一分析が行われた。

3. 2. 2 栄養塩類

栄養塩類の調査期間は2011～2022年度とした。鉛直分布については, 今回は2021年度の結果を報告する。

① 夏季と冬季の比較

調査項目は基準点1及び2の硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$), 亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$), アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$), 溶存態全窒素 (DTN), リン酸態りん ($\text{PO}_4\text{-P}$), 溶存態全りん (DTP), シリカ (SiO_2) とした。なお, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ の合計を溶存態無機窒素 (DIN) とし, $\text{PO}_4\text{-P}$ を溶存態無機りん (DIP) とした。

調査は年2回, COD関連項目と同じ月に行い, 8月, 9月, 11月を夏季, 12月, 1月を冬季とし, 項目毎に時季別, 層別平均値を算出した。

栄養塩類については, 国立環境研究所において統一分析が行われた。

② 経月変化及び鉛直分布

調査項目は基準点3の $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, 懸濁態窒素 (PN), 溶存有機態窒素 (DON) とした。なおPNは全窒素 (T-N) からDTNを引いたものとし, DONは, DTNからDINを引いたものとした。

調査は年6回, 2011～2022年度の原則奇数月に行い, 当センターで分析を行った。

3. 2. 3 多項目水質計による現場測定

多項目水質計による水温, 塩分, 溶存酸素 (DO), Chl-aの鉛直測定を当センターで行った。

調査は奇数月に実施しており, 今回は基準点3における2020～2022年度の結果を報告する。

3. 2. 4 長期変動傾向の解析

基準点3の水温, DO, CODについて, 統計解析ソフトウェアTIMSAC for R (バージョン R x64 3.5.0) を用いて季節調整法によるトレンド解析を行った。

データについては, 当センターで分析を行った1994～2022年度の29年間を対象とし, 原則, 1994～2005年度は偶数月, 2006年～2022年度は奇数月の結果を用いている。

3. 3 分析方法

国立環境研究所で分析したものについては、あらかじめ450°Cで4時間焼成処理したガラス繊維フィルターGF/Cを用いて採水試料500 mLをろ過し、得られたろ液をD-COD, DOC, NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, PO₄-P, SiO₂測定用とした。同様に1Lろ過したフィルターをChl-a測定用とした。これらの試料と、未ろ過のCOD測定用試料は冷凍保管して国立環境研究所へ送付し、II型共同研究報告書「茨城県沿岸海域公共用水域環境基準点における栄養塩類とCODに関連する有機物項目（第3報）と有機態窒素の分解性の東京湾との比較」（国立環境研究所）に記載された方法で分析が行われた。

当センターで分析したCOD, D-CODについては、100°Cにおける過マンガン酸カリウムによる酸素消費量によって求め、NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, TN, DTN, PO₄-P, TP, DTPについては、連続流れ分析法（BL-TEC社製 QuAAtro 39）で測定した。

海域版BODは、採水試料の水温を20°Cに調整して1時間曝気後、300 mLふらん瓶（5本）に分注し、1検体は分注直後にDOの測定を行い、その他の4検体は20°Cのふらん器に静置（暗条件）し、それぞれ3, 5, 7, 14日後のDOをよう素滴定法で測定した。

多項目水質計（Hach Hydrolab社製, DS5）による塩分、水温、DO、Chl-aの測定は、船上から海中に垂下して表層から海底まで、1~2 m間隔で行った。

長期変動傾向の解析に使用したDOはよう素滴定法、水温はメモリー水深水温計（ALEC ELECTRONICS社製 ABT1）を用いて測定した。

4 結果及び考察

4. 1 COD関連項目

4. 1. 1 海域版BODとCOD, Chl-aの相関

COD関連項目について、表層（0.5 m）の測定結果の平均を表1-1に示す。ここで扱うBODは、20°Cで3日間静置したとき消費されたDOの量（O mg/mL）から求めた値である。基準点1, 2とも夏季、冬季を比較すると、Chl-aについてはばらつきが大きいものの、全ての項目で夏季の方が高かった。夏季のCODに対するD-CODの割合は、基準点1が83%, 基準点2が78%, TOCに対するDOCの割合は、基準点1が81%, 基準点2が76%と、溶存態が大部分を占めていた。また、冬季のCODに対するD-CODの割合は、基準点1が77%, 基準点2が83%, TOCに対するDOCの割合は、基準点1が89%, 基準点2が84%と、夏季同様、溶存態が大部分を占めていた。

表1-1 COD関連項目の測定結果（表層 2011~2022年度の平均値）

下段はn数、括弧内は標準偏差

単位：mg/L（Chl-aはμg/L）

地点名	時季	BOD	COD	D-COD	P-COD	TOC	DOC	POC	Chl-a
基準点1	夏季	0.75	2.39	1.98	0.41	1.75	1.42	0.32	1.89
		8,(0.26)	12,(0.54)	12,(0.45)	12,(0.34)	12,(0.40)	12,(0.31)	12,(0.17)	12,(1.22)
	冬季	0.32	1.37	1.05	0.33	1.10	0.98	0.16	1.47
		8,(0.11)	12,(0.55)	11,(0.22)	11,(0.49)	10,(0.25)	12,(0.27)	10,(0.08)	11,(1.35)
基準点2	夏季	0.62	2.37	1.86	0.56	1.56	1.18	0.38	1.47
		8,(0.20)	12,(0.64)	11,(0.46)	11,(0.41)	12,(0.43)	12,(0.34)	12,(0.23)	12,(1.11)
	冬季	0.26	1.28	1.06	0.23	1.10	0.92	0.21	0.94
		8,(0.11)	12,(0.20)	11,(0.26)	11,(0.20)	10,(0.26)	12,(0.27)	10,(0.04)	11,(1.02)

下層（90 m）の測定結果の平均を表1-2に示す。下層では地点間、季節間の差異は小さく、表層と比較し全体的に低い値となっており、夏季のCODに対するD-CODの割合は、基準点1が87%、基準点2が89%、TOCに対するDOCの割合は、基準点1が88%、基準点2が94%であり、表層と同様に溶存態が大部分を占めていた。また、冬季のCODに対するD-CODの割合は、基準点1が84%、基準点2が85%、TOCに対するDOCの割合は、基準点1が80%、基準点2が88%であり、表層と同様に溶存態が大部分を占めていた。

夏季、表層においてCOD関連項目が高くなっていたことから、植物プランクトンによる内部生産の影響が考えられた。

表1-2 COD関連項目の測定結果（下層 2011～2022年度の平均値）

下段はn数、括弧内は標準偏差

単位：mg/L（Chl-aはμg/L）

地点名	時季	BOD	COD	D-COD	P-COD	TOC	DOC	POC	Chl-a
基準点1	夏季	0.30	1.26	1.10	0.15	1.16	1.02	0.14	0.15
		7,(0.08)	11,(0.36)	11,(0.28)	11(0.25)	12,(0.37)	12,(0.35)	12,(0.06)	12,(0.08)
	冬季	0.23	1.34	1.12	0.22	1.24	0.99	0.31	0.34
		8,(0.11)	11,(0.51)	11,(0.46)	11,(0.30)	10,(0.55)	12,(0.29)	10,(0.48)	11,(0.16)
基準点2	夏季	0.27	1.32	1.17	0.15	1.09	1.02	0.14	0.15
		8,(0.07)	11,(0.35)	11,(0.36)	11,(0.12)	12,(0.50)	12,(0.33)	12,(0.06)	9,(0.07)
	冬季	0.16	1.10	0.93	0.17	1.13	0.99	0.14	0.22
		8,(0.10)	11,(0.26)	11,(0.33)	11,(0.14)	10,(0.40)	12,(0.37)	10,(0.05)	11,(0.14)

海域版BODは分解されやすい有機物（易分解性有機物）の指標²⁾として考えられる一方、CODは易分解性有機物に加え、難分解性有機物や還元性物質等を反映していると考えられ、BODよりも高い値となっていた。

基準点1におけるBODとCOD、Chl-aのそれぞれの関係を図4-1に、基準点2におけるBODとCOD、Chl-aのそれぞれの関係を図4-2に示す。

基準点1において、CODとBODに正の相関が確認されたが、基準点2では明瞭な関係は見られなかった。BODとChl-aには、基準点1の夏季についてはばらつきが見られたものの、いずれの地点においても正の相関が見られた。

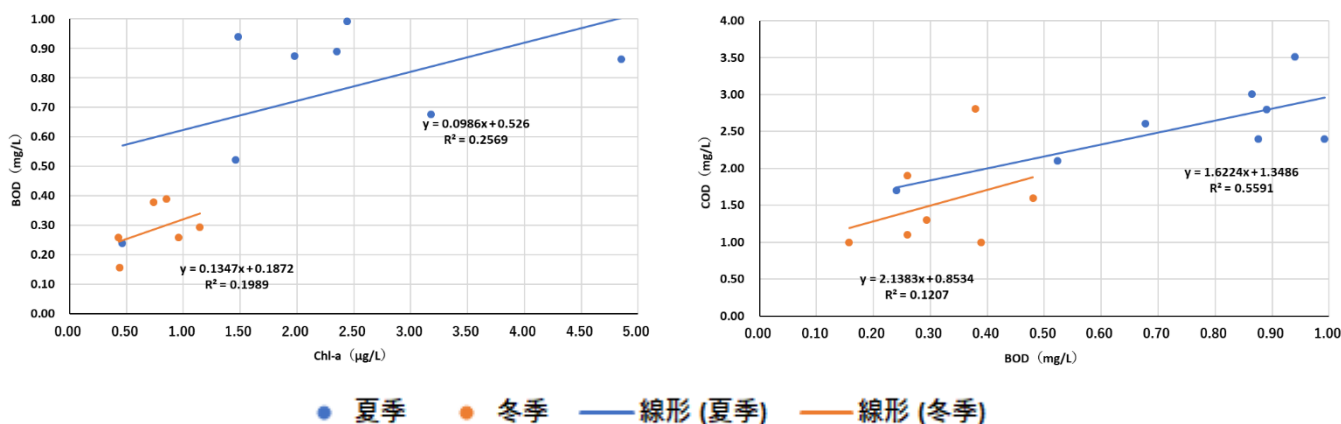


図4-1 基準点1のBODとCOD、Chl-aの関係

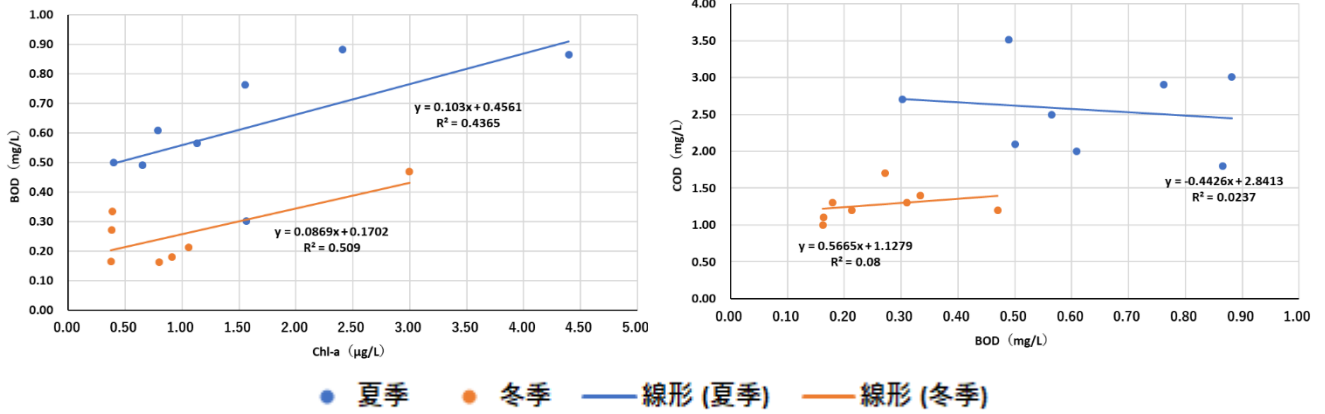


図4-2 基準点2のBODとCOD, Chl-aの関係

4. 1. 2 海域版BODの経時変化

海域版BOD（夏季）について、経過日数による変化を図5-1に示す。表層は年による値のばらつきが大きいものの、経過日数に従い、BODが高くなる傾向がみられた。一方、下層（90m層）はばらつきが小さく、概ね7日程度で約0.5 mg/Lとなった。海域版BODは貧酸素水塊形成に寄与する水柱中の生物化学的に分解されやすい有機物（易分解性有機物）を評価するための有機物指標として考えられる²⁾ことから、表層においては下層と比べて易分解性有機物が多く、7日目以降も酸素消費されていることがわかった。一方、下層では、概ね7日程度で値が一定になることから易分解性有機物が少ないことが示唆された。

海域版BOD（冬季）について、図5-2に示す。地点や水深にかかわらず、BODは概ね0.5 mg/L付近で推移していた。

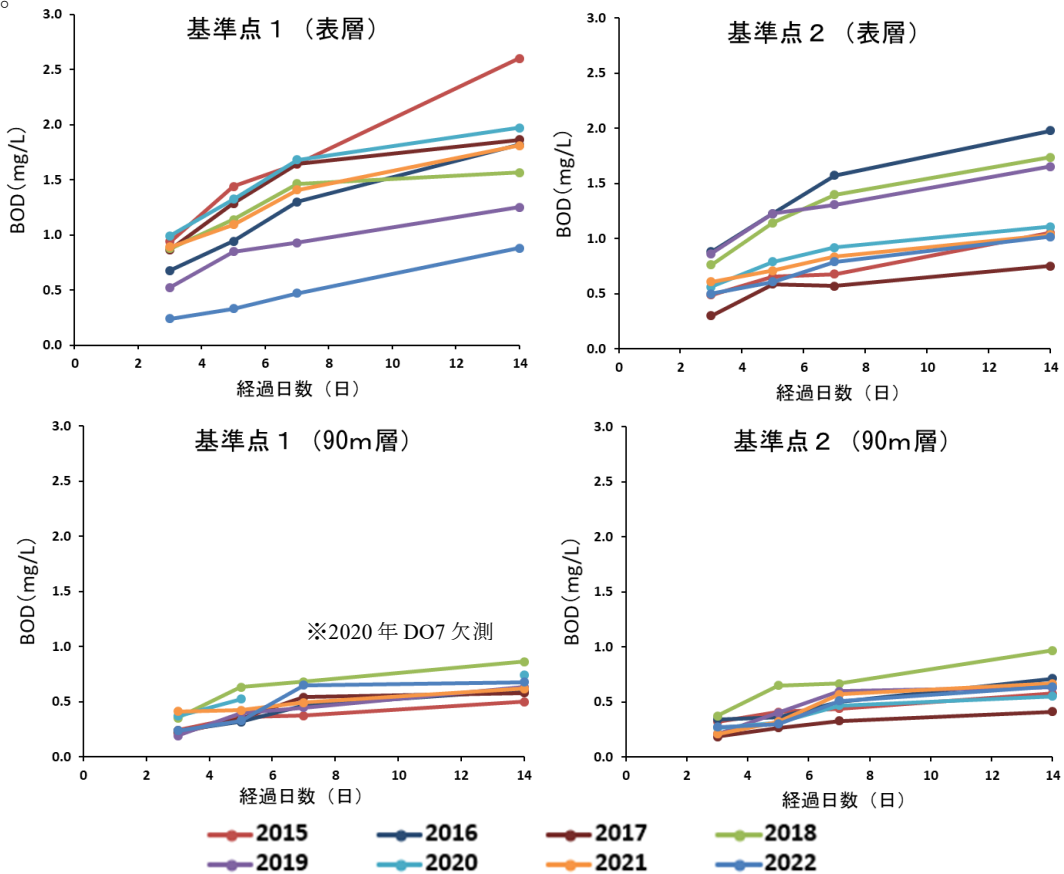


図5-1 海域版BODの経時変化（夏季）

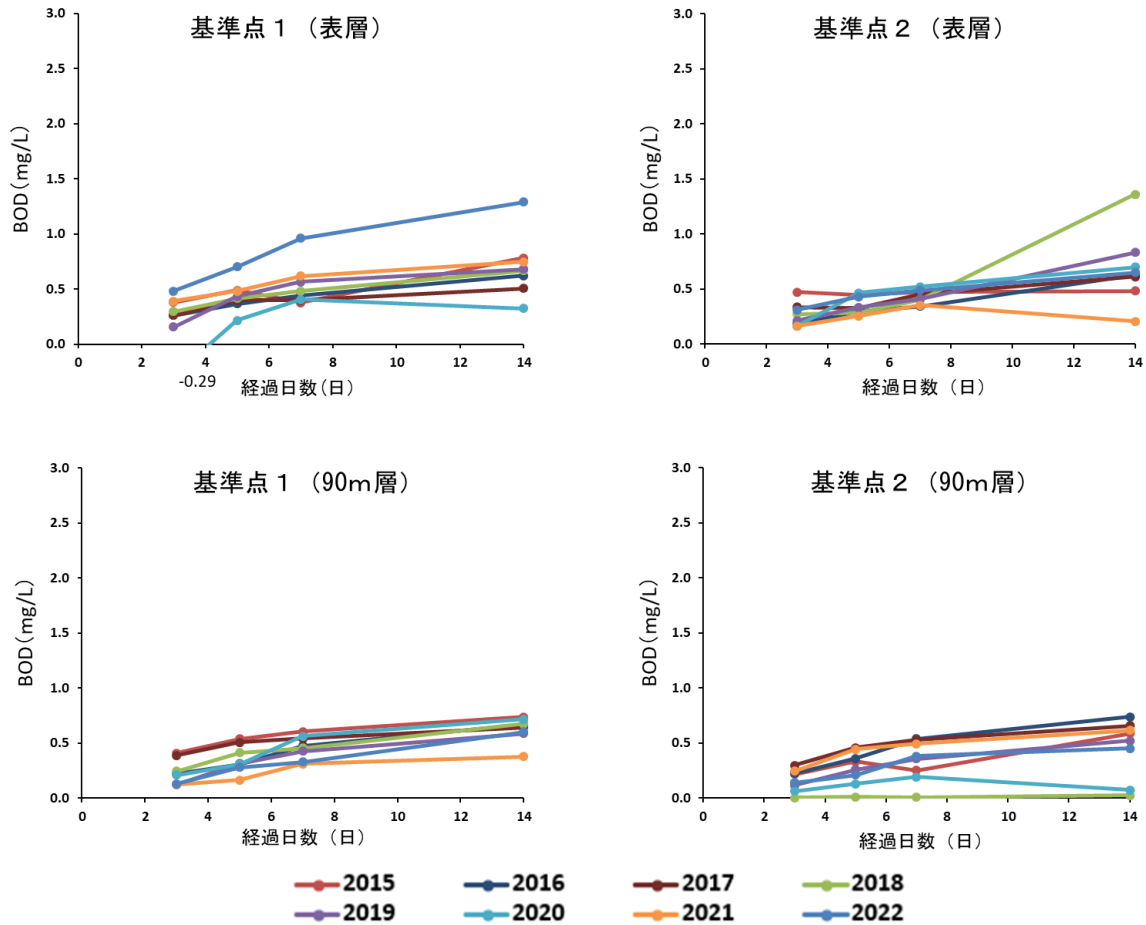


図 5-2 海域版 BOD の経時変化 (冬季)

4. 2. 栄養塩類

4. 2. 1 栄養塩類の夏季と冬季の比較

基準点 1, 2 の表層 (0.5 m) の栄養塩類の測定結果の平均値を表2-1に示す。夏季, 冬季を比較すると, いずれの項目においても夏季の方が低かった。夏季は植物プランクトンの増殖・内部生産が活発になり, 植物プランクトンに栄養塩類が多く取り込まれたことにより冬季と比べて低くなったと考えられた。また, 地点間を比較すると, 天降川からの流入負荷により基準点 2 が高い値になったと考えられた。

夏季DTNに対するDINの割合は, 基準点 1 は3.2%, 基準点 2 は64%であり, 冬季はそれぞれ41%, 57%となった。夏季DTPに対するDIPの割合は, 基準点 1 が8.3%, 基準点 2 が60%であり, 冬季はそれぞれ70%, 66%となった。夏季の基準点 1 は, DTNからDINを差し引いたものであるDONとDTPからDIPを差し引いたものである溶存有機態りん (DOP) がほとんどであり, DINやDIPなどの栄養塩類は低い値であった。

栄養塩類について, 下層 (90 m, 100 m) の測定結果の平均を表2-2に示す。下層では地点間の差異はなく, 栄養塩類は表層と比較し高い値となっており, 年間を通して下層には豊富な栄養塩が存在していることがわかる。

夏季DTNに対するDINの割合は, 基準点 1, 2 とともに50%であり, 冬季は基準点 1 が46%, 基準点 2 が47%となった。夏季DTPに対するDIPの割合は, 基準点 1 が82%, 基準点 2 が84%であり, 冬季はそれぞれ84%, 81%となった。窒素については, DINが約半分程度, りんについては, DIPが大部分を占めていた。

表2-1 栄養塩類の測定結果（表層 2011～2022年度の平均値）

下段はn数，括弧内は標準偏差
単位：mg/L

地点名	時季	DIN	DTN	DIP	DTP	SiO ₂
基準点 1	夏季	0.007	0.221	0.002	0.012	0.861
		11,(0.008)	12,(0.111)	11,(0.001)	12,(0.008)	12,(0.057)
	冬季	0.116	0.285	0.023	0.033	1.701
		11,(0.024)	11,(0.129)	12,(0.006)	11,(0.015)	12,(0.515)
基準点 2	夏季	0.357	0.557	0.015	0.025	21.947
		12,(0.323)	12,(0.263)	12,(0.014)	12,(0.012)	12,(18.814)
	冬季	0.457	0.797	0.032	0.049	23.330
		11,(0.239)	12,(0.556)	12,(0.006)	11,(0.025)	12,(14.530)

表2-2 栄養塩類の測定結果（下層 2011～2022年度の平均値）

下段はn数，括弧内は標準偏差
単位：mg/L

地点名	時季	DIN	DTN	DIP	DTP	SiO ₂
基準点 1	夏季	0.189	0.376	0.042	0.051	2.969
		12,(0.011)	12,(0.124)	12,(0.003)	12,(0.016)	12,(0.330)
	冬季	0.175	0.377	0.042	0.050	2.820
		11,(0.031)	11,(0.182)	12,(0.011)	11,(0.016)	12,(0.521)
基準点 2	夏季	0.190	0.377	0.041	0.049	2.868
		12,(0.016)	12,(0.121)	12,(0.004)	12,(0.017)	12,(0.357)
	冬季	0.185	0.392	0.042	0.052	2.856
		11,(0.025)	11,(0.209)	12,(0.007)	11,(0.018)	12,(0.438)

4. 2. 2 栄養塩類の経月変化及び鉛直分布

図6-1, 2に基準点3における栄養塩の経月変化を示す。基準点3は閉鎖性の高い湾奥部の中央部であり，水深も基準点1，2より深く，夏季と冬季だけでなく，年間を通して（年6回）測定を行っているため，基準点3を基準点1，2の栄養塩類の参考地点として採用した。

基準点3の表層（0.5 m）は下層（130 m）と比較すると栄養塩が少なく，DON・PNが多い傾向にあり，下層ではNO₃-Nが安定して存在していた。

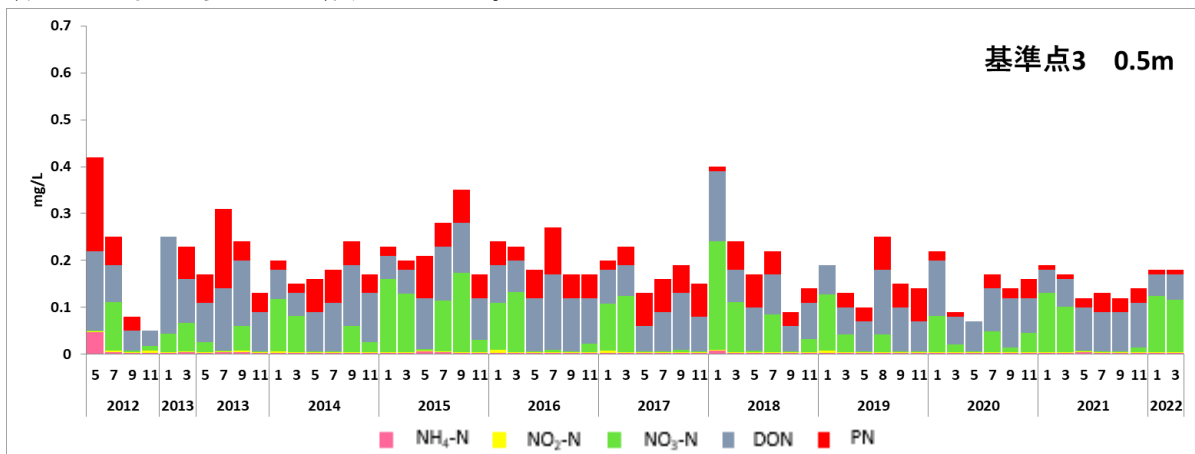


図6-1 基準点3の栄養塩の経月変化（表層）

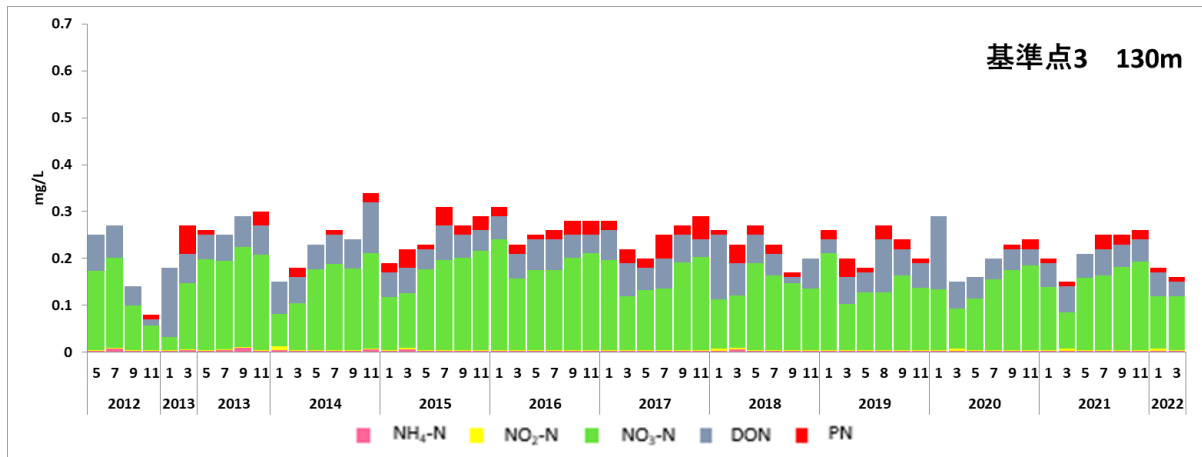


図6-2 基準点3の栄養塩の経月変化（下層）

基準点3における2021年度の栄養塩の鉛直分布を図7に示す。5月は表層の栄養塩が枯渇しており、7月には表層のPNが増加し、9月にかけて底層の栄養塩が徐々に増加していた。11月には65 m層のPNが減少し、1~3月は、表層から底層の栄養塩類の濃度はほぼ一定になっており、鉛直循環により底層から表層に栄養塩の供給があったことが推察された。

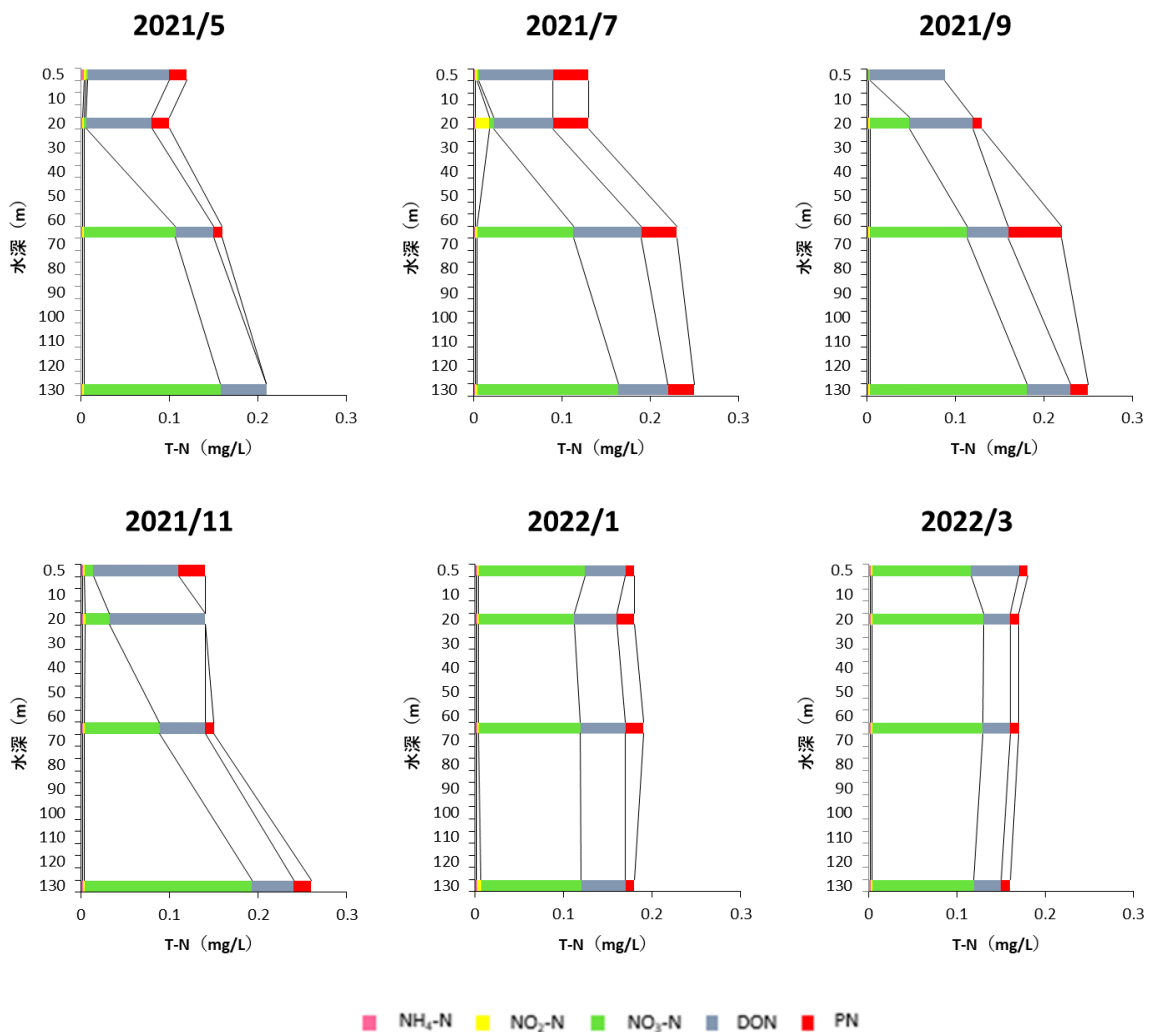


図7 基準点3の栄養塩鉛直分布

4. 3 水温, 塩分, DO, Chl-a (多項目水質計)

2020年度～2022年度の基準点3における水温, 塩分, DO, Chl-aの鉛直測定結果を図8-1～4に示す。

図8-1より5月, 7月, 9月の水温は表層から下層にかけて緩やかに低下し, また, 図8-2より塩分は上昇していた。水温の鉛直分布から, いずれの年においても冬季は夏季の躍層が崩れ, 鉛直循環が下層付近まで進んでいたことがわかった。

図8-3より, 9月, 11月には混合層以深において貧酸素水塊が形成され, 2021年9月は30 m層付近で3.2 mg/Lと比較的浅い層においても4 mg/Lを下回る貧酸素水塊が確認された。なお, 例年冬季の全層循環により夏季～冬季に生じた貧酸素水塊は解消されている。

図8-4よりChl-aは, 2020年5月は10 m層付近, 2021年5月, 2022年5月は30 m層付近などで極大となっており, 図8-3のDOの極大と概ね一致することから, 植物プランクトンの光合成が活発に行われたと考えられた。

図9に基準点3の表層, 20 m層, 65 m層, 130 m層におけるDOの経月変化を示す。図9からも冬季の全層循環により貧酸素水塊が解消されていることがわかる。

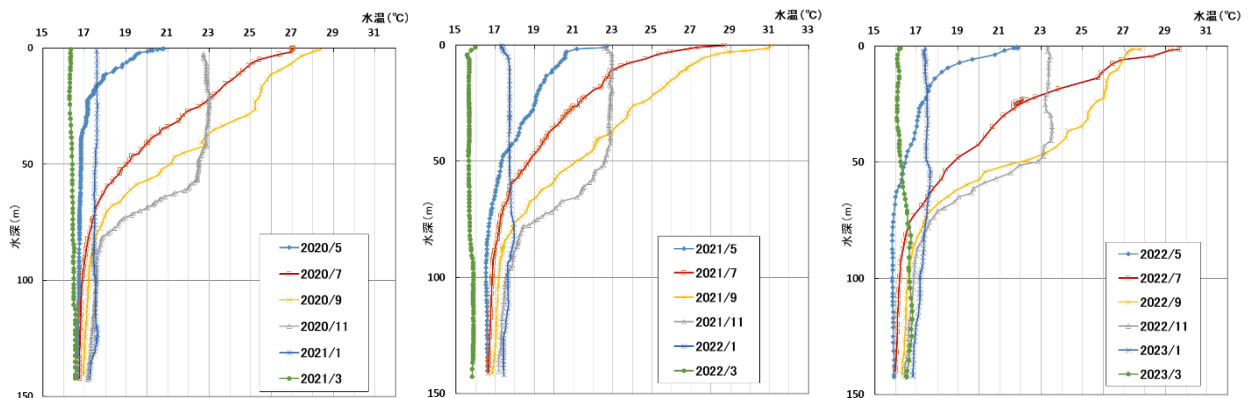


図8-1 水温の鉛直測定結果 (基準点3)

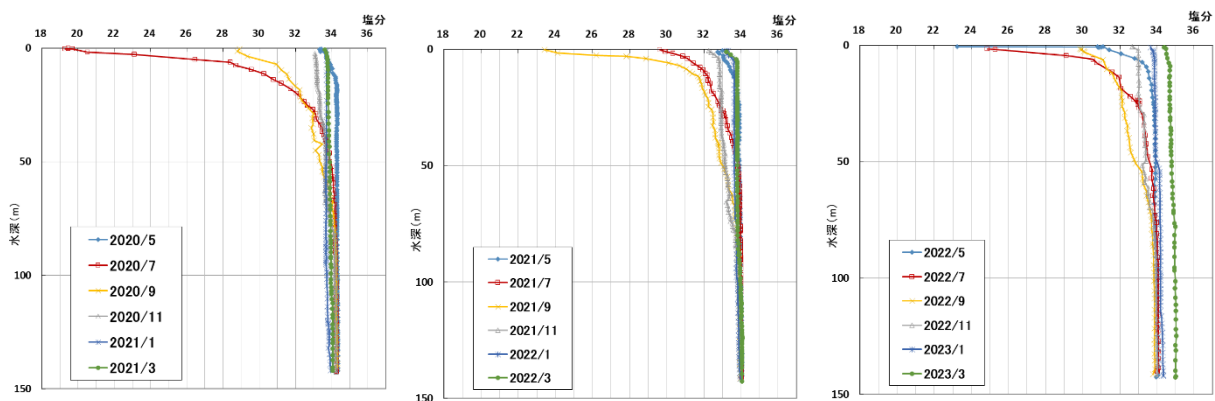


図8-2 塩分の鉛直測定結果 (基準点3)

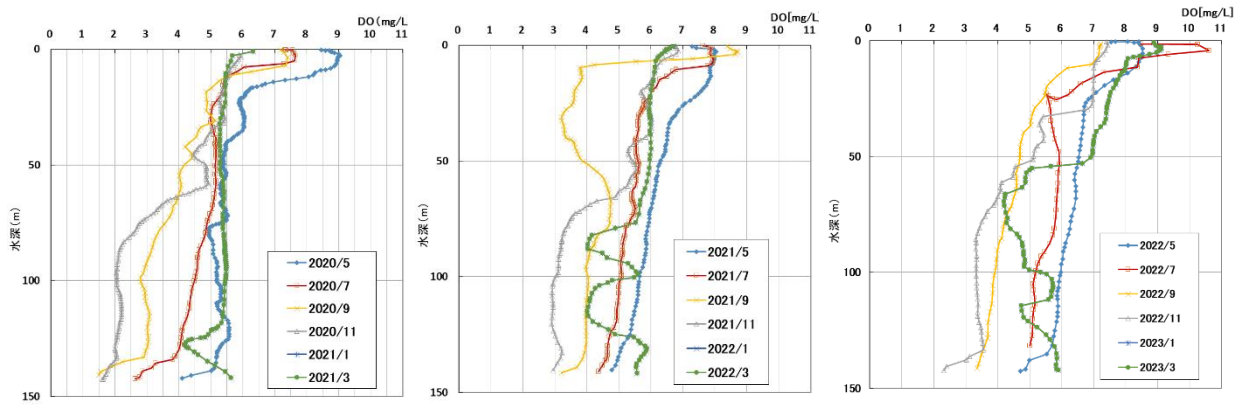


図8-3 DOの鉛直測定結果（基準点3）

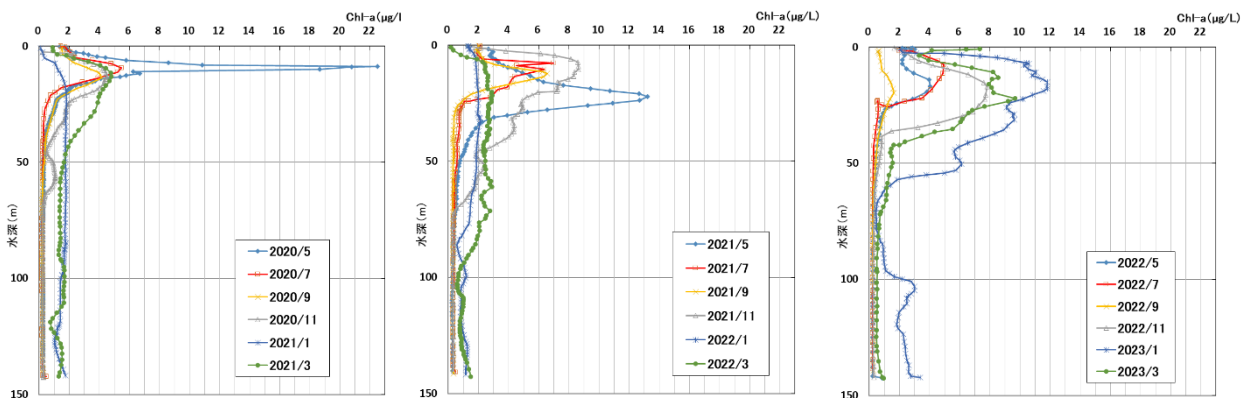


図8-4 Chl-aの鉛直測定結果（基準点3）

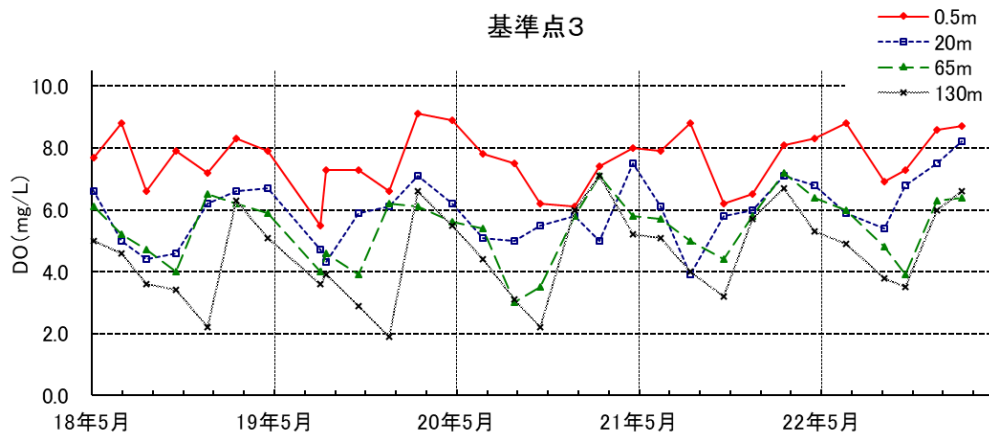


図9 DOの経月変化

4. 4 基準点3の表層（0.5 m層）と下層（130 m層）の長期変動傾向の解析

図10-1～5に水温，DO，COD，T-N，T-Pの1994～2022年度の経月変化を示す。

表層の水温及びCODは季節による変動が大きく，下層では季節による変動は小さい傾向にあった。一方，DOでは，水温やCODと反対に下層において季節による変動が大きい傾向を示した。T-NやT-Pでは，表層と下層において季節間の変動に大きな差は見られなかった。

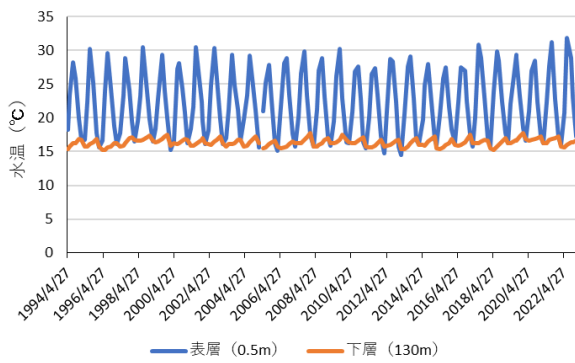


図10-1 水温の経月変化

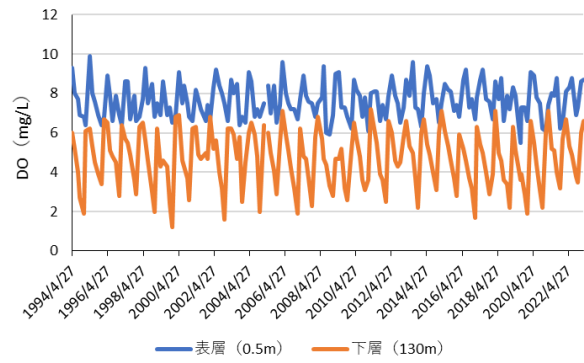


図10-2 DOの経月変化

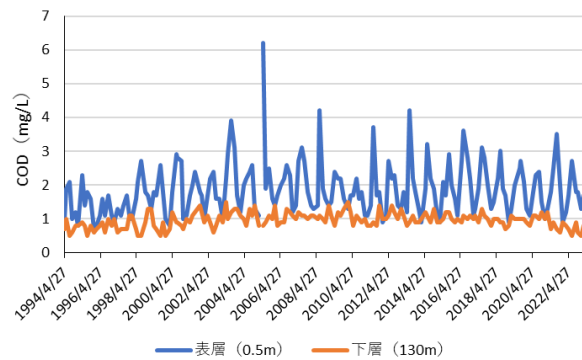


図10-3 CODの経月変化

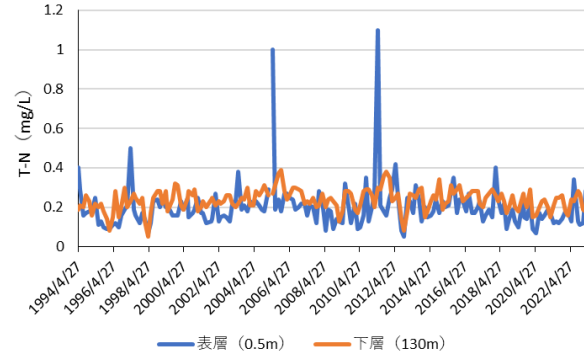


図10-4 T-Nの経月変化

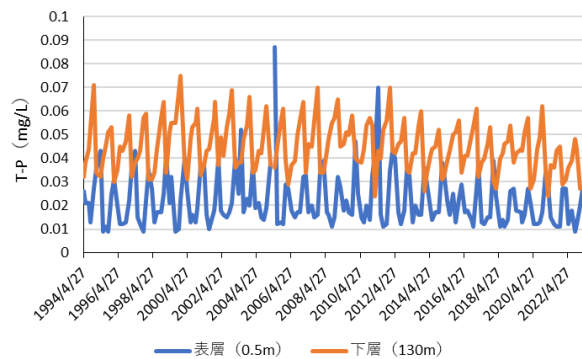


図10-5 T-Pの経月変化

各項目について季節成分を取り除き、時系列的に数値の変動に一定の傾向がないか確認を行った。季節成分を取り除くためにR Timsac decompを用いた水温・水質データの季節調整法によるトレンド解析を行った結果を図12-1~5に示す。

表層の水温は上昇傾向がみられた。一方、T-Pについては、表層、下層ともに減少傾向がみられた。また、表層のCODは2005年まで上昇傾向にあるが、その後下降に転じており、近年は2 mg/L付近で推移していた。DO、T-Nについては、顕著な変動傾向はみられなかった。

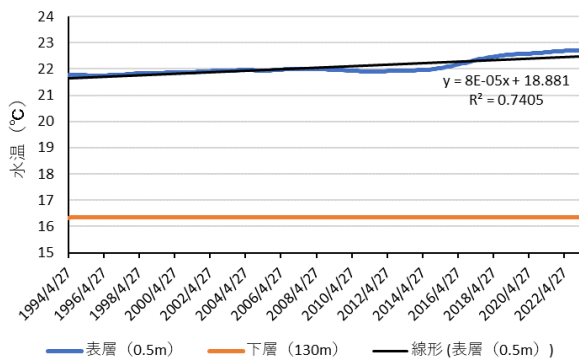


図11-1 水温トレンド

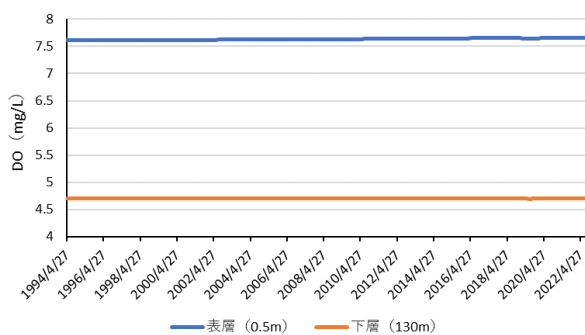


図11-2 DOトレンド

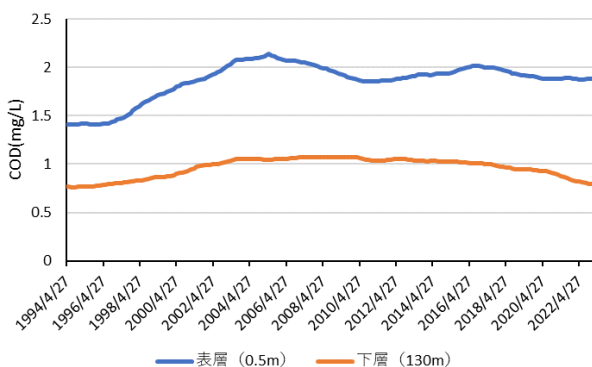


図11-3 CODトレンド

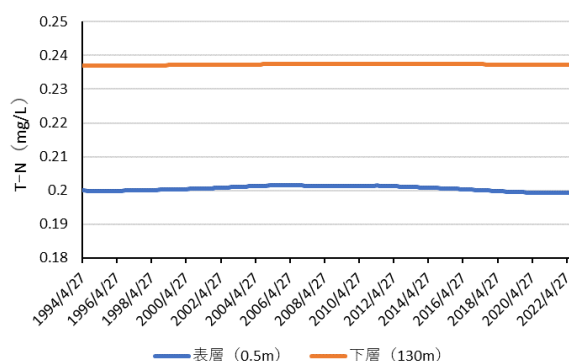


図11-4 T-Nトレンド

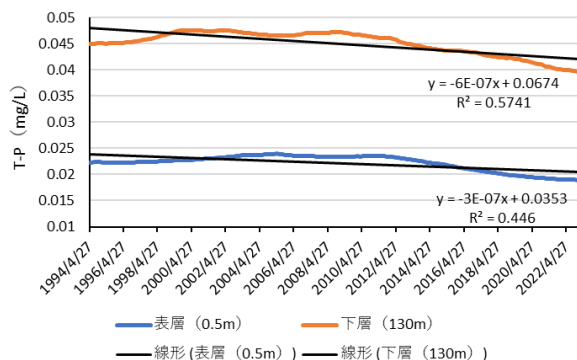


図11-5 T-Pトレンド

5 まとめ

COD関連項目について、夏季及び冬季に調査を行った結果、夏季、表層において高くなっていたことから、植物プランクトンによる内部生産の影響が考えられた。

海域版BOD（夏季）について、基準点1及び2で測定を行った結果、表層は下層に比べてBODが高く、7日目で降も酸素消費がみられた。下層においては概ね7日程度で値が一定となったことから、下層は表層に比べて易分解性有機物が少ないことがわかった。

なお、前々課題³⁾において一部の海域ではBODとChl-aの相関が報告されていたが、鹿児島湾においても同様に正の相関が見られた。

栄養塩類は、表層において夏季は内部生産によって枯渇し、冬季に下層から豊富な栄養塩類の供給があると考えられた。基準点2においては、河川水（天降川）の影響により、夏季でも栄養塩類が高い値を示した。

多項目水質計による現地測定の結果から、比較的浅い層（30 m）及び混合層以深において貧酸素水塊が形成されていたことがわかった。また、例年冬季の全層循環により夏季～冬季に生じた貧酸素水塊は解消されており、夏季と冬季の水塊構造を確認することができた。

季節調整法によるトレンド解析の結果、表層の水温は上昇傾向がみられた。

参考文献

- 1) 鹿児島県水産技術開発センター；赤潮情報，<http://suigi.jp/akashio/newHP/info.html>
- 2) II型共同研究報告書「海域における水質管理に係わる栄養塩・底層溶存酸素状況把握に関する研究」（2017～2019）
- 3) II型共同研究報告書「沿岸海域環境の物質循環現状把握と変遷解析に関する研究」（2017）

地方環境研究機関と国立環境研究所とのII型共同研究
「沿岸海域における新水質環境基準としての底層溶存酸素
(貧酸素水塊)と気候変動の及ぼす影響把握に関する研究」

資料

1. 研究実施組織

課題代表者

広島県立総合技術研究所 保健環境センター	小田新一郎 (※令和2年度まで)
千葉県環境研究センター	横山 智子 (※令和3年度から)
国立研究開発法人 国立環境研究所	牧 秀明

参加機関および参加者

宮城県保健環境センター	加藤景輔、下道翔平
山形県環境科学研究センター	後藤優奈、西塚一茂、小林幹彦
新潟県保健環境科学研究所	諸橋峻秀、松崎彩実、武直子、茨木剛、安達収吾 高橋修平、小林智裕、棚橋成一、大野峻史、吉崎大理
新潟市衛生環境研究所	齋藤真、藤田裕美、松田哲明
茨城県霞ヶ浦環境科学センター	北村立実 (※令和3年度まで)
千葉県環境研究センター	横山智子、星野武司、三ヶ島治子、横山新紀 品川知則
財団法人 東京都環境整備公社 東京都環境科学研究所	安藤晴夫、増田龍彦、石井裕一、馬榕
静岡県環境衛生科学研究所	中桐健志、田村隆志
富山県環境科学センター	中易佑平、岩倉功貴、井上貴史
石川県保健環境センター	金曾将弘、原田由美子、重吉祐生、前田空人、堅田勉
地方独立行政法人 大阪府環境農林水産総合研究所	森育子、田中咲絵、上田真由美、田和佑脩、栢原博幸
公益財団法人 ひょうご環境創造協会 兵庫県環境研究センター	宮崎一、鈴木元治、古賀佑太郎
広島県立総合技術研究所 保健環境センター	濱脇亮次、小田新一郎、後田俊直
徳島県立保健製薬環境センター	辻真拓、井上大輔、浅川愛、工内輝実
高知県衛生環境研究所	笹岡尚矢、榎尾紗菜、富田比菜、石本美咲、内田圭亮、 古田和美
福岡県保健環境研究所	富澤慧、石橋融子 (※令和4年度から)
福岡市保健環境研究所	有本圭佑、八兒裕樹、小林斎哉、大平良一、中山恵利 山崎亜弓
長崎県環境保健研究センター	豊村誠、神崎正太、橋本京太郎、松尾進
鹿児島県環境保健センター	有西聡美、前畑健太

2. 成果発表

2.1 誌上発表

1. 笹岡尚矢、細井健太郎、刈谷玲菜、田嶋誠、古田和美、大森真貴子 (2020) 浦ノ内湾における形態別有機物及び栄養塩類等の特徴について 高知県衛生環境研究所報 (第 2 号) p73-81
2. 山形県海岸地域における鉛直水質及び COD 関連項目測定 (II 型共同研究) (2020) 山形県環境科学研究センター年報 (令和元年度版) p54-58
3. 山崎亜弓、益尾実希、小林斎哉 (2020) 博多湾沿岸部における降雨に伴う栄養塩流入及び貧酸素水塊発生に関する実態調査 令和元年度 福岡市保健環境研究所報、45 号、p97-107
4. 東京湾再生のための行動計画 (第二期) 第 2 回中間評価報告書 (2020) 執筆分担
5. 浅岡大輝、増永英治、小室俊輔、北村立実 (2020) 地形と成層の変化に関連する風応力による混合応答時間の評価、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、76 巻 2 号 p.I_145-I_150
6. 鈴木元治、栢原博幸、大島詔、中村玄、向井健悟、藤田和男、小田新一郎、宇都宮涼、浅川愛、管生伸矢、安藤真由美、秋吉貴太、柳明洋、松尾剛、藤原建紀 (2021) 瀬戸内海における海水中有機物の C:N:P 比と窒素・りん濃度の関係性について、全国環境研究会誌 46 p42-49
7. 小田新一郎、濱脇亮次、後田俊直 (2020) 広島湾における栄養塩類及び COD 関連項目の季節変動について 広島県立総合技術研究所保健環境センター研究報告 28 p37-44
8. 小田新一郎、濱脇亮次、後田俊直 (2020) 広島湾の底層環境及び底生生物相の現況について 広島県立総合技術研究所保健環境センター研究報告 28 p45-70
9. 博多湾における表層水温の長期変動解析 (2021) 福岡市保健環境研究所報 第 46 p91-93.
10. Ando H, Maki H, Kashiwagi N, Ishii Y (2021) Long-term change in the status of water pollution in Tokyo Bay: recent trend of increasing bottom-water dissolved oxygen concentrations. *Journal of Oceanography*, 77: 843–858.
11. 井上大輔、酒池遼、管生伸矢、小川恭右 (2021) 徳島県沿岸海域における COD 関連項目の現状と傾向 (第 2 報) 徳島県立保健製薬環境センター年報 11 p41-45
12. 三ヶ島治子、横山智子 (2020) 東京湾の青潮発生状況—2020 年度—千葉県環境研究センター年報 20 p119-120
13. 牧秀明、金谷弦、佐々木久雄、二宮勝幸、柏木宣久、飯村晃、小田新一郎、横山智子 (2022) 沿岸海域の水温変動評価と底層溶存酸素量 (DO)、有機物指標に係る地方環境研究機関との共同研究、地球環境 27、p205-212
14. 横山智子、飯村晃 (2022) 水質鉛直分布調査による東京湾内湾の底層溶存酸素量の中長期変動、水環境学会誌 45 巻、5 号、p239-244
15. 濱脇亮次 (2022) 広島湾沿岸域における水柱 C:N:P 比の季節変化について、広島県立総

合技術研究所保健環境センター研究報告 第 30 号、p41-48

16. 横山智子、三ヶ島治子 (2023) 東京湾の青潮発生状況 2021 年度一、千葉県環境研究センター年報 第 21 号 (調査研究)、p62-63
17. 横山智子、藤井稔彦 (2023) 東京湾における底層 DO の測定について、千葉県環境研究センター年報 第 21 号 (調査研究)、p64-65

2.2 学会・集会等における口頭・ポスター発表

1. 小林幹彦 (2020) 水質シミュレーションを用いた酒田港 COD の将来予測と行政施策の効果検証、第 23 回水環境学会シンポジウム
2. 宮崎一、古賀佑太郎、鈴木元治、藤森一男 (2021) 干潟における有機物分解と栄養塩の遊離、第 55 回水環境学会年会講演要旨集、p389
3. 北村立実 (2020) 北浦における水循環と貧酸素水塊の発生、令和 2 年度第 1 回霞ヶ浦研究サロン
4. 北村立実 (2020) 自動昇降装置及び YODA Profiler を用いた霞ヶ浦の貧酸素水塊の分布と栄養塩の溶出島根大学・茨城県霞ヶ浦環境科学センター共同研究報告会、第 5 回 貯水池・湖沼の水環境問題と管理に関する現状と課題合同研究会
5. 北村立実 (2020) 北浦の貧酸素化と底泥からの溶出 (西浦との比較) 2020 年北浦合同調査報告会
6. 北村立実、大内孝雄、湯澤美由紀、三野剛司、佐藤礼二、増永英治、浅岡大輝、鮎川和泰、清家泰、福島武彦 (2020) 北浦における貧酸素水塊の形成と分布的な特徴、第 23 回水環境学会シンポジウム
7. 北村立実、大内孝雄、湯澤美由紀、福島武彦、佐藤礼二、浅岡大輝、増永英治、鮎川和泰、清家泰 (2021) 霞ヶ浦における貧酸素水塊の分布と酸素消費速度について、第 55 回水環境学会年会講演要旨集、p228
8. 北村立実 (2021) 霞ヶ浦の貧酸素水塊の状況及び底泥からのリンの溶出速度について、公開シンポジウム霞ヶ浦流域研究 2021
9. 横山智子 (2021) 多項目水質計による東京湾の観測、令和 3 年度全国環境研協議会関東甲信静支部水質専門部会
10. 牧秀明 (2021) 沿岸海域に関する地方環境研究機関との共同研究—公共用水域水質測定における補完的分析の試みについて、第 45 回瀬戸内海水環境研会議総会招待 (依頼) 講演
11. 宮崎一、古賀佑太郎、鈴木元治、藤森一男 (2022) 干潟におけるリター分解と栄養塩の遊離 (ポスター発表) 第 56 回水環境学会年会講演要旨集 p413
12. 濱脇亮次 (2022) 河川水及び海水の水質項目の分析値の取扱いについて、令和 4 年度試験検査課研修 (一般項目)
13. 濱脇亮次 (2022) 強雨時等における河川水等の水質調査結果について、広島県内研究機関等地域気候変動適応センター意見交換会

14. 濱脇亮次 (2022) 広島湾における有機物分解と酸素消費の関係性について、第 25 回日本水環境学会シンポジウム
15. 濱脇亮次 (2022) 強雨時等における河川水及び下水道越流水等の水質調査結果について (広島市下水道局向け)
16. 牧秀明、森育子、古賀佑太郎、鈴木元治、宮崎一、安藤晴夫 (2022) 大阪湾における公用水域水質測定と広域総合水質データによる窒素類の現存量と負荷源寄与の長期変動、瀬戸内海研究フォーラム in 和歌山 要旨集、p21
17. 諸橋峻秀 (2022) 新潟東港及び県北海域における水質の現状について、令和 4 年度新潟県保健環境科学研究所調査研究発表会
18. 中桐健志、白岩誉裕希、平井一行、杉浦秀治 (2022) 浜名湖における水温の長期変動傾向について、第 59 回静岡県公衆衛生研究会抄録集 p4-13.
19. 牧秀明、森育子、古賀佑太郎、鈴木元治、宮崎一、安藤晴夫 (2022) 大阪湾における公用水域水質測定と広域総合水質調査データによる窒素類の現存量と負荷源寄与の長期変動、第 8 回海洋環境研究集会 (神戸)
20. 魚介類に影響を及ぼす大阪湾における栄養塩の適正管理に関する研究 (2022、2023) 令和 4 年度大阪府環境農林水産試験研究推進会議年度中間・年度末報告会
21. 有本圭佑、中山恵利、大平良一 (2023) 季節調整法を用いた博多湾の長期水質変動解析、第 57 回水環境学会年会講演要旨集 (松山) p165
22. 中桐健志、白岩誉裕希、平井一行、杉浦秀治、牧秀明 (2023) 浜名湖における底層溶存酸素量の長期/短期変動について、第 57 回水環境学会年会講演要旨集 (松山) p448
23. 宮崎一、古賀佑太郎、鈴木元治、松村千里 (2023) 干潟底質による腐葉土の無機化、第 57 回日本水環境学会年会要旨集 (松山) p449
24. 金曾将弘、重吉祐生、堅田勉、原田由美子 (2023) 石川県沿岸海域における水質変動の概況、第 37 回 全国環境研協議会東海・近畿・北陸支部研究会講演要旨集、p3-4
25. 濱脇亮次 (2023) 海域における栄養塩分析の取り組みについて、第 57 回水環境学会年会テクニカルランチョンミーティング (松山)
26. 濱脇亮次 (2023) 瀬戸内海における窒素・リン現存量の経年変動について、全国環境研究協議会水環境学会併設研究集会 (松山)

2.3 各自治体や関係機関に対する情報提供や貢献、マスメディア等その他の発表

1. 東京湾水質調査報告書 (令和元年度東京湾岸自治体環境保全会議) 作成のための下層 D O 分布図作成提供 (東京都環境科学研究所)
2. 博多湾環境保全計画推進委員会への資料提供 (2020) (福岡市環境局保健環境研究所) 令和 2 年度水質汚濁防止法新任者研修会 (広島県)Ⅱ型研究 (当研究課題) の取り組み事例を紹介
3. 環境対策課への情報提供 (2020) (新潟市)
4. 令和 3 年度水質汚濁防止法新任者研修会での本Ⅱ型共同研究の成果発表 (広島県)

地方環境研究機関と国立環境研究所とのⅡ型共同研究
「沿岸海域における新水質環境基準としての底層溶存酸素
(貧酸素水塊)と気候変動の及ぼす影響把握に関する研究」

5. 令和3年度保健所新任者研修での本Ⅱ型共同研究の概要説明(広島県)
6. 博多湾環境保全計画推進委員会への資料提供(2021)(福岡市環境局保健環境研究所)
7. 東京都環境科学研究所(2021)報告書作図支援および資料提供(東京湾岸自治体環境保全会議)
8. 東京都環境科学研究所(2022)「東京湾調査報告書」への作図支援および資料提供(東京都環境局)
9. 広島県立総合技術研究所保健環境センター(2022)降雨時調査における水質測定結果提供(広島市下水道局)
10. 広島県立総合技術研究所保健環境センター(2022)広島県沿岸域における公共用水域の解析データ提供(瀬戸内海水環境研究会議)