

＜報 文＞

大村湾（長崎県）の水質に関する長期変動解析結果*

藤岡幸歩**・豊村 誠**, ***・毎原将一**, ***・橋本京太郎**, ***・山本達也**・松尾 進**・粕谷智之**

キーワード ①COD ②T-N ③T-P ④温暖化 ⑤重回帰分析

要 旨

長崎県の公共用水域水質調査（1985 年度～2022 年度）のデータを用いて、大村湾の表層水質の長期変動解析を行った。水温と溶存酸素（DO）は上昇し、化学的酸素要求量（COD）、全窒素（T-N）、全リン（T-P）、クロロフィル *a*（Chl-*a*）は 1990 年代頃までは上昇し、その後は、減少傾向にあることが確認できた。水温の上昇には、温暖化や都市活動が影響している可能性がある。COD、T-N、T-P の減少は、下水道等の整備が進み、河川からの流入負荷が低下傾向にあることが一因と考えられる。また、COD は水中の有機物量の指標となることから、海水中の有機物が減少したことで、有機物の分解に必要な酸素消費量が少なくなり、DO が増加した可能性がある。Chl-*a* は植物プランクトン量の指標であることから、増殖にかかわる栄養塩類の量の推移と符合していると考えられる。

1. はじめに

大村湾は、長崎県本土のほぼ中央に位置し、南北約 26 km、東西約 11 km、面積約 320 km² で、佐世保湾を介して、狭い針尾瀬戸と早岐瀬戸の 2 か所でのみ外海と通じている全国でも稀な二重の閉鎖性を有する海域である¹⁾。そのため、海水の出入りが極めて少なく、水質汚濁が進行しやすく、水質の改善や維持が難しいという特性を持っている。

大村湾では、1972 年から県による水質モニタリングが開始され、1974 年には環境基準（海域 A 類型）が設定された²⁾。また、2000 年には富栄養化防止のため、全窒素・全リンに関する環境基準が追加され、化学的酸素要求量（COD）、全窒素（T-N）、全リン（T-P）について、COD：2.0 mg/L、T-N：0.2 mg/L、T-P：0.02 mg/L の現在の環境基準が定められた²⁾。県による具体的な施策としては、1979 年に上乘せ排水基準、1988 年に横出し排水基準が設定され、水質汚濁防止法並びに長崎県公害防止条例による工場・事業場排水対策を行うとともに、1985 年には大村湾水質保全要綱を策定し、生活排水などの排出抑制対策などの取組・推進を図ってきた²⁾。その後、現在までに繋がる施策として、総合的な観点から大村湾の水質改善や自然環境の保全を進めるとともに、大村湾流域の活性化を図るための基本的な指針として、2003 年から大村湾環境保全・活性化行動計画が策定され、現在は 2019 年度

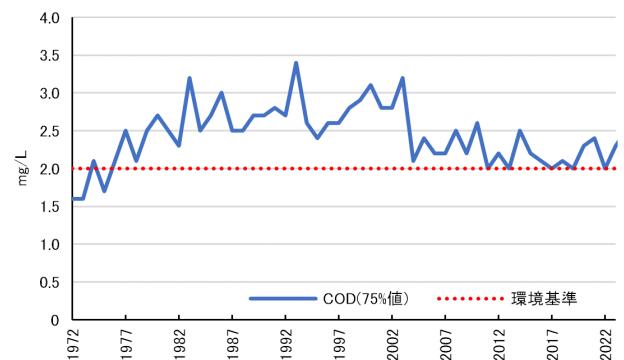


図1 COD75値(17地点平均値)の推移（データは「公共用水域及び地下水の水質測定結果」の公表値を用いた。）

から開始した第 4 期にあたる。

現在の大村湾の水質は、COD75値については、ピークであった 1993 年の 3.4 mg/L から減少傾向にあり²⁾、2023 年の結果は 2.3 mg/L³⁾ と改善傾向がみられる（図 1）。

また、T-N、T-P については年変動はあるものの、概ね環境基準値前後で推移している（図 2、図 3）^{2), 3)}。このように大村湾の水質は改善傾向が見られるものの、水質の変動には様々な要因（例えば、季節的な周期など）が関わっており、これらを分けることができれば、水質改善施策の効果などをより正しく把握することができると考えられる。そこで、本調査では、大村湾の長期的な水

*Long-Term Fluctuations Analysis of Water Quality in Omura Bay (Nagasaki Prefecture)

**Yukiho FUJIOKA, Makoto TOYOMURA, Shoichi MAIBARA, Kyotaro HASHIMOTO, Tatsuya YAMAMOTO, Susumu MATSUO, Tomoyuki KASUYA（長崎県環境保健研究センター）Nagasaki Prefectural Institute of Environment and Public Health

***現所属（長崎県県民生活環境部）Nagasaki Prefecture Department of Residents' Living Environment

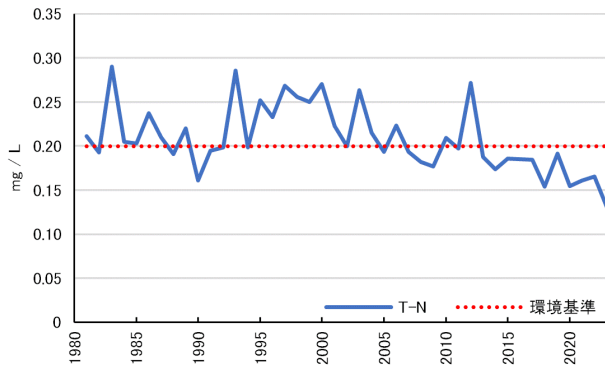


図2 T-N(17地点平均値)の推移（データは「公共用水域及び地下水の水質測定結果」の公表値を用いた。）

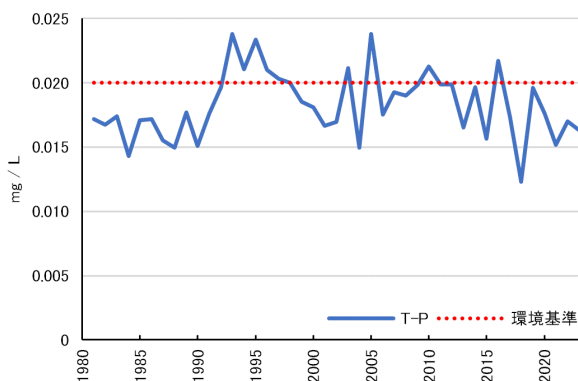


図3 T-P(17地点平均値)の推移（データは「公共用水域及び地下水の水質測定結果」の公表値を用いた。）

質変化の特性を客観的に明らかにし、水質改善につなげる知見を収集するために、統計的手法を用いて、これまでに公共用水域水質調査で得られたデータを基に水質の長期変動解析を行った。

2. 解析概要

2.1 使用データ

データは、湾内の環境基準点（17 地点）（図 4）⁴⁾で実施された長崎県の公共用水域水質測定のデータのうち、表層水質のデータ（水温、DO、COD、T-N、T-P、Chl-a）を用いた。また、各項目における大村湾全体の値としては、

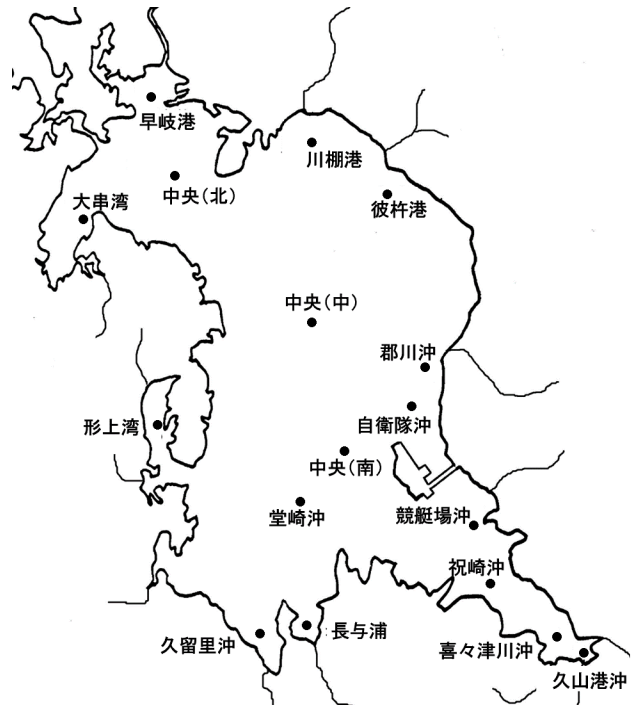


図4 大村湾の環境基準点

環境基準点 17 地点の平均値を用いた。解析期間は、水温、DO、COD が 1985 年 4 月から 2023 年 3 月まで、T-N、T-P、Chl-a が 1987 年 4 月から 2023 年 3 月までである。なお、郡川沖の 2001 年 3 月の全項目、大串湾の 1990 年 2 月の T-N、全地点の 2006 年 5 月から 7 月の COD は欠測であった。

2.2 解析方法

解析は、ダミー変数を用いた重回帰分析（以降、重回帰分析）⁵⁾⁶⁾と R TIMSAC decomp⁷⁾を用いた水質データの季節調整法によるトレンド解析（以降、RTd）の 2 つの方法で実施した。

ダミー変数を用いた重回帰分析は、カテゴリー変数を数値データに変換し、結果となる数値と要因となる数値の関係を明らかにするための統計手法である。今回の解析では、表層水質データの月当たりの変化率を求め、水質がどのように変化したかを計算するために、表 1 に示

表1 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		説明変数											
		実測値	傾き効果	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	0	1
1978	3	Y_{12}	12	-1	-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	0
.
.
2022	3	Y_{340}	540	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

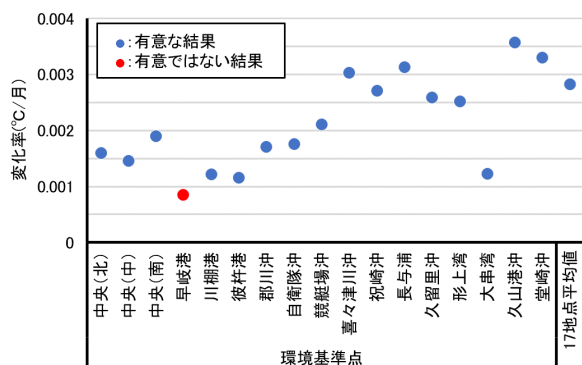


図5 水温におけるダミー変数を用いた重回帰分析結果

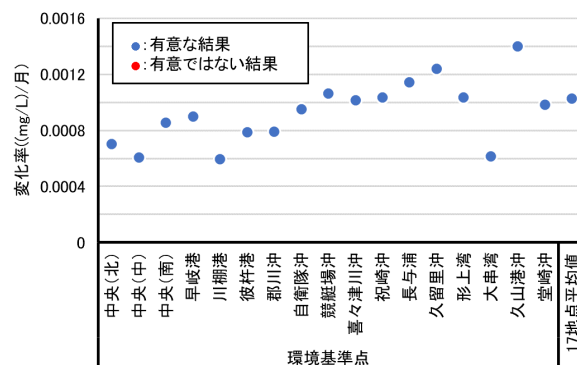


図7 DOにおけるダミー変数を用いた重回帰分析結果

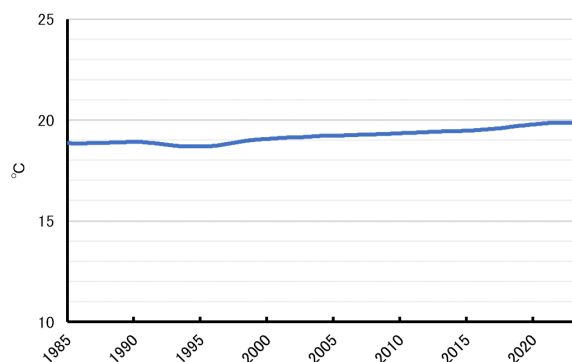


図6 水温におけるR TMSAC decompを用いた
トレンド解析結果

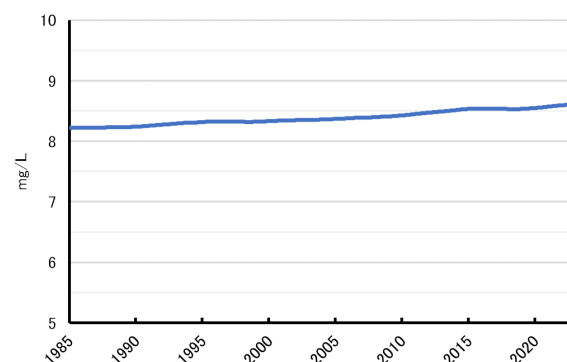


図8 DOにおけるR TMSAC decompを用いた
トレンド解析結果

すとおりに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。長期的なトレンドは調査年月に対応し、その偏回帰係数が「傾き」、すなわち、変化率である。なお、欠測のあった月は欠番とした。また、解析は地点ごとに行うとともに、17 地点平均値を用いた解析も行った。

RTd は、R 言語と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る TMSAC (TIME Series Analysis and Control program) に含まれる decomp 関数を用いて季節調整を行い、月次データから季節要因、短期的な変動成分を取り除き、長期的な変動成分を抽出することで、傾向（トレンド）を知ることができる解析方法である。今回の解析では、長期的な水質のトレンドを知るために、トレンド成分を対象とした。

3. 結果

3.1 水温

水温における重回帰分析結果を図 5 に示す。17 地点中 16 地点で有意な結果が得られ、17 地点平均値では、有意なプラスの傾き効果（+0.0028°C/月）が得られた。この値から、水温は解析期間の 1985 年から 2023 年までの 38

年間で 1.3°C 上昇していると推定された。

RTd によって得られたトレンド成分のグラフを図 6 に示す。水温は 1980 年代は 19°C 前後で推移していたが、2020 年頃には 20°C ほどになっており、重回帰分析の結果と同様に水温の上昇が確認できた。

3.2 DO

DO における重回帰分析結果を図 7 に示す。全地点で有意な結果が得られ、17 地点平均値では、有意なプラスの傾き効果（+0.0010 (mg/L)/月）が得られた。この傾き値から、DO は解析期間の 1985 年から 2023 年までの 38 年間で、DO は 0.47 mg/L 増加していると推定された。

RTd によって得られたトレンド成分のグラフを図 8 に示す。DO は 1985 年以降、重回帰分析結果と同様に増加傾向にあることが確認できた。

3.3 COD

COD における重回帰分析結果を図 9 に示す。17 地点中 16 地点で有意な結果が得られ、17 地点平均値では、有意なマイナスの傾き効果（-0.0014 (mg/L)/月）が得られた。この値から、COD は解析期間の 1985 年から 2023 年までの 38 年間で 0.66 mg/L 減少と推定された。

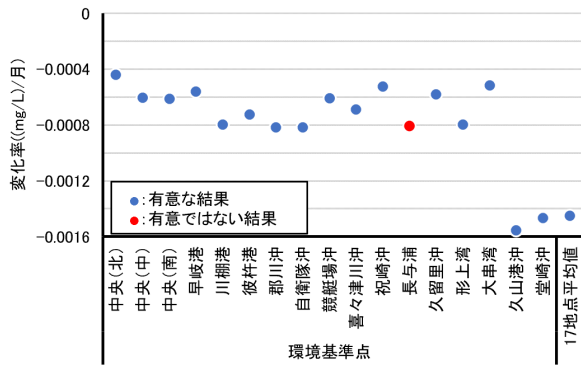


図9 CODにおけるダミー変数を用いた重回帰分析結果

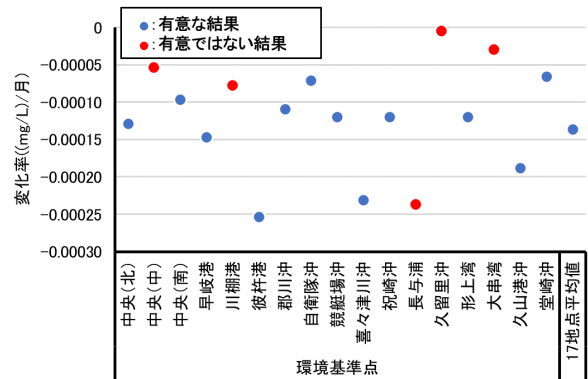


図11 T-Nにおけるダミー変数を用いた重回帰分析結果

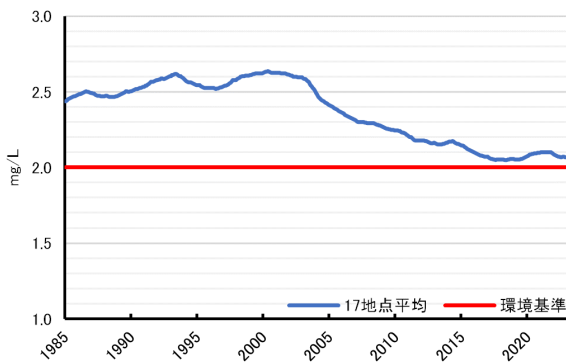


図10 CODにおけるR TMSAC decompを用いた
トレンド解析結果

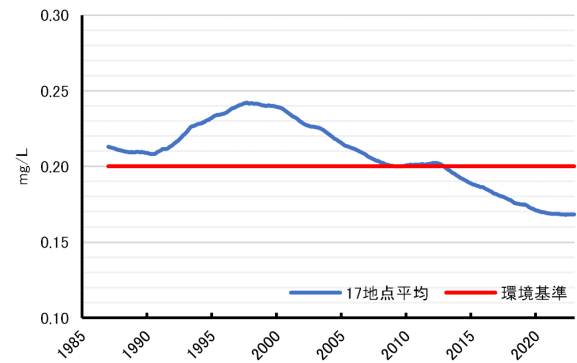


図12 T-NにおけるR TMSAC decompを用いた
トレンド解析結果

RTdによって得られたトレンド成分のグラフを図10に示す。CODは2000年頃までは増加傾向であったが、近年は減少傾向にあることが確認できた。

3.4 T-N

T-Nにおける重回帰分析結果を図11に示す。17地点中12地点で有意な結果が得られ、17地点平均値では、有意なマイナスの傾き効果（ -0.00014 (mg/L)/月）が得られた。この値から、T-Nは解析期間の1987年から2023年までの36年間で 0.059 mg/L減少と推定された。

RTdによって得られたトレンド成分のグラフを図12に示す。T-Nは2000年頃までは増加傾向であったが、近年はピーク時よりも低い値で推移していることが確認できた。

3.5 T-P

T-Pにおける重回帰分析結果を図13に示す。有意な結果が得られたのは、17地点中5地点のみで、17地点平均値でも、有意な結果を得ることができなかった。後述するRTdによる解析では、2010年頃から減少傾向がみられたことから、2010年から2023年までを対象として解析した結果、17地点中8地点で有意な結果となり、17地点

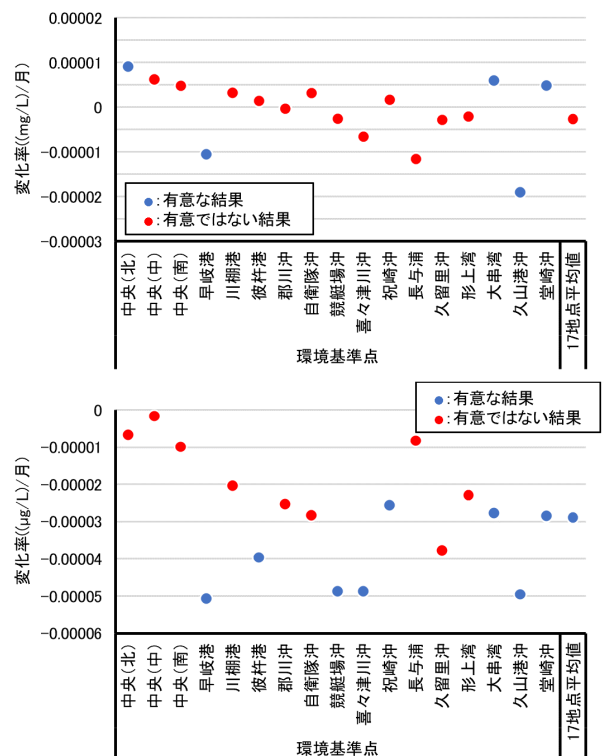


図13 T-Pにおけるダミー変数を用いた重回帰分析結果
(上)全期間 (下)2010年4月～2023年3月

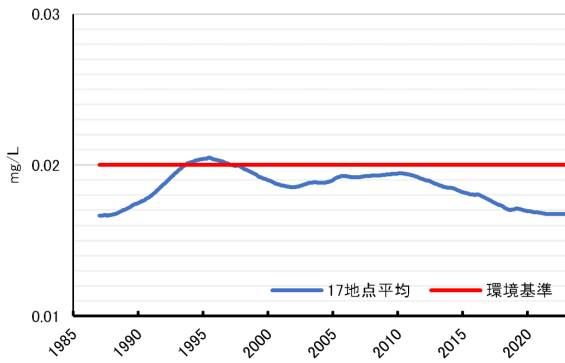


図14 T-PにおけるR TIMSAC decompを用いた
トレンド解析結果

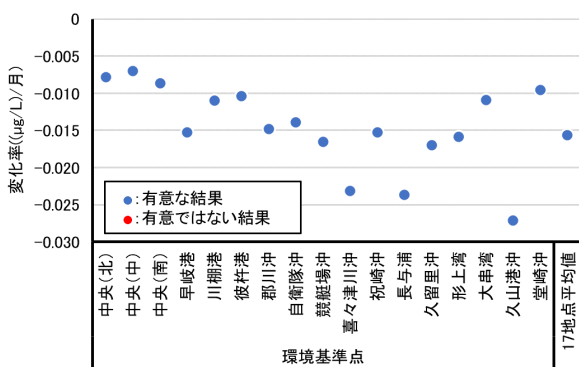


図15 Chl-aにおけるダミー変数を用いた重回帰分析結果

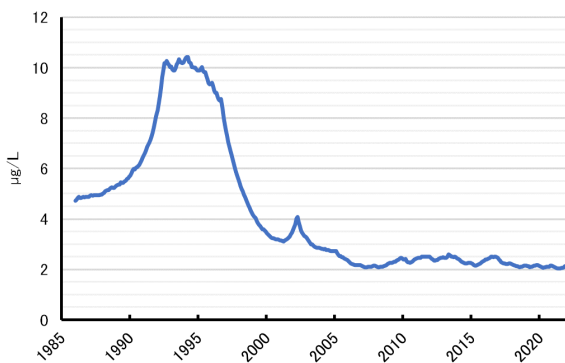


図16 Chl-aにおけるR TIMSAC decompを用いた
トレンド解析結果

平均値からは有意なマイナスの傾き効果（ -0.000029 (mg/L)/月）が得られ、13年間で 0.0045 mg/L 減少と推定された。

RTdによって得られたトレンド成分のグラフを図14に示す。T-Pは1995年頃をピークにほぼ横ばいとなり、2010年頃からは減少傾向にあることが確認できた。

3.6 Chl-a

Chl-aにおける重回帰分析結果を図15に示す。17地点

全てで有意な結果が得られ、17地点平均値では、有意なマイナスの傾き効果（ -0.016 (μg/L)/月）が得られた。この値から、Chl-aは解析期間の1987年から2023年までの36年間で 6.76 μg/L 減少と推定された。

RTdによって得られたトレンド成分のグラフを図16に示す。Chl-aは1994年までは増加していたが、その後減少していき、2007年頃からはほぼ横ばいとなっていることが確認できた。

4. 考察

4.1 解析手法の大村湾への適用性

ダミー変数を用いた重回帰分析では、T-Pを除き、17環境基準点のうち、12～17地点で有意な結果が得られた。一方で、T-Pでは有意な結果が得られたのは、全期間を対象とした場合は5地点、2010年から2023年を対象とした場合は8地点であり、他の調査項目よりも少なかった。大村湾では、表層のT-Pの濃度は、1985年から1995年の記録では、9月より急激に高くなり、ピークに達し、強い季節性を示した⁸⁾。これは、夏季の底層の貧酸素化により、底質からリン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) が溶出したことによる⁸⁾。大村湾における夏季の貧酸素化は、閉鎖性の強い同湾の特性に起因するものであり、汚染と無関係でも進行する特徴を持つ⁹⁾。大村湾のT-Pの挙動は、季節的な事象の影響を強く受けており、季節的な要因を取り除いた長期変動解析では、有意な結果が少なくなったと考えられる。このことから、ダミー変数を用いた重回帰分析は、二重の閉鎖性を有する極めて特徴的な大村湾の水質の解析にも有効と考えられる。

4.2 変動要因の検討

ダミー変数を用いた重回帰分析とRTdを用いた解析によって、水温及びDOは上昇していることが確認できた。水温上昇は他の海域でも報告されており¹⁰⁾、地球温暖化との関連が指摘されている¹¹⁾。また、東京湾の運河部では、下水処理場や火力発電所からの放流水の流入のような、都市活動の影響と思われる水温上昇が観測されている¹⁰⁾。大村湾では、都市活動の影響が少ないと思われる、中央(北)や中央(中)の調査地点でも水温の上昇が確認されたことから、温暖化の影響を受けていると思われる。一方で、水温の変化率は久山港沖や喜々津川沖、長与浦などの湾奥部の調査地点で高い傾向が見られた(図4, 5)。湾奥部には諫早市や時津町、長与町などの人口の多い市町が位置していることから、都市活動の影響も水温上昇に関わっている可能性も考えられる。今後、温暖化の進行により、さらなる海水温の上昇が予想されるが、都市活動の影響も含めて、引き続き注視する必要がある。

COD, T-N, T-P, Chl-*a* は 1990 年代頃まで増加していたが、その後は減少傾向にあることが分かった。同様の傾向は博多湾でも報告されており、下水道の普及による流入負荷の減少が関わっていると推察している¹²⁾。大村湾流域では、2003 年に汚水処理人口普及率が 80% を超え²⁾、河川からの流入負荷が低下傾向にある¹³⁾ことから、2000 年以降の COD, T-N, T-P の低下は、下水道整備が進んだことが一因と考えられる。また、COD は水中の有機物の指標となることから、海水中の有機物が減少したことで、有機物の分解による酸素の消費量が少なくなり、結果として、DO が増加した可能性がある。同様の事象は、三河湾でも報告されている¹⁴⁾。さらに、Chl-*a* は植物プランクトン量の指標であることから、その変動は、植物プランクトンの増殖に関わる窒素やリンなどの栄養塩類の量の推移と符合していると思われる。

5. 今後の課題

公共用水域水質調査では、栄養塩類に係る項目としては、T-N 及び T-P のみが調査されている。栄養塩類は、海藻類の成長や魚類や二枚貝の生産を支えるプランクトンの増殖に必要となるものであるが、植物プランクトンが利用する栄養塩類は無機態のものであり、無機態の栄養塩類が水中に適切な濃度で存在することが健全な生態系を維持するうえで重要である。大村湾が貧栄養の状態なのか、あるいは富栄養の状態なのか、水質の状況や生物の生息環境を正しく評価するために、今後、無機態の栄養塩類、すなわち、アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$)、亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の季節変化や水平的・鉛直的な分布などを調べる必要がある。

今回の解析は、表層水質のデータを用いて実施した。大村湾では底層の貧酸素水塊の厚さが増している可能性が指摘される¹⁵⁾など、底層の環境は依然として悪い可能性が考えられる。今後、底層のデータの蓄積も重要と考えられる。

6. 参考文献

- 1) 長崎県環境部自然保護課：大村湾再発見ガイドブック，p. 10，株式会社長崎新聞社，長崎，2007
- 2) 長崎県環境部地域環境課：第 4 期大村湾環境保全・活性化行動計画，2019
- 3) 長崎県県民生活環境部地域環境課：令和 5 年度公共用水域及び地下水の水質測定結果，長崎県，p. 83，2025
- 4) 長崎県県民生活環境部地域環境課：令和 6 年度公共用水域及び地下水の水質測定計画．長崎県，p. 25，2024
- 5) 福地信一，阿部郁子，佐々木久雄，藤原秀一：宮城県沿岸域における表層水温のトレンドードミー変数を用いた重回帰分析による推定．宮城県保健環境センター年報，**29**，73-78，2011
- 6) 二宮勝幸，柏木宣久，岡敬一，岩渕美香，飯島恵：東京湾西部海域における表層水温のトレンドード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**，46-51，2010
- 7) 統計数理研究所：TIMSAC for R package，<https://jasp.ism.ac.jp/ism/timsac/>（2025.9.19 アクセス）
- 8) 香月幸一郎，本多邦隆，松尾征吾：大村湾におけるリン濃度の変動．水環境学会誌，**20**，616-621，1997
- 9) 飯塚昭二，関壽虹：大村湾における無酸素水塊の形成．沿岸海洋研究ノート，**26**，75-86，1989
- 10) 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，pp. 49-54，2011
- 11) 阿保勝之，秋山諭，原田和弘，中地良樹，林浩志，村田憲一，和西昭仁，石川陽子，益井敏光，西川智，山田京平，野田誠，徳光俊二：瀬戸内海における栄養塩濃度等の水質変化とその要因．沿岸海洋研究，**55**，101-111，2018
- 12) 有本圭佑，中山恵利，大平良一：季節調整法を用いた博多湾の長期水質変動解析．福岡市保環研報，**48**，79-88，2023
- 13) 豊村誠，松尾進，橋本京太郎：大村湾奥部における流入河川モニタリング．全国環境研会誌，**48**，171-176，2023
- 14) 神戸浩仲：愛知県内の海域，河川及び湖沼の水温変動傾向と水質データの解析～地球温暖化の影響に関する考察～．愛知県環境調査センター所報，**48**，37-44，2020
- 15) 海洋政策研究財団（財団法人シップ・アンド・オーシャン財団），長崎県：「海の健康診断」を活用した大村湾の環境評価に関する調査研究報告書，pp. 30-31，海洋政策研究財団，東京，2011