

東京湾における COD の上昇に関する調査研究 (2021～2023 年度)

Research Study on Increased COD in Tokyo Bay (2021-2023)

小林 咲 KOBAYASHI Saki 田邊 智弘 TANABE Tomohiro
 武部 利永子 TAKEBE Rieko 福永 顕規 FUKUNAGA Akinori
 関 昌之 SEKI Masayuki

要 旨

東京湾の本市の海域における化学的酸素要求量 (COD) が近年上昇傾向にあり、B 類型の環境基準を超過している状況が継続している。この要因を解明し、環境基準達成に向けた施策へ活用することを目的に、既存データの解析、新たな環境調査及び解析を実施した。その結果、COD の高濃度化には、温暖期における植物プランクトンの増殖、いわゆる内部生産が強く寄与していること、一部で成層化が影響していることが示唆された。一方で、2 日間の降雨による影響については一定の傾向が見いだせなかった。

キーワード：COD、内部生産、植物プランクトン

Key words：COD, internal production, phytoplankton

1 はじめに

東京湾における水質は改善が進んできたものの、いまだに B 類型の海域の一部において環境基準に適合していない現状がある。本市においても図 1 に示すとおり B 類型である浮島沖、東扇島沖、扇島沖において、COD 年間 75% 値は 2012 年度から上昇傾向にあり、2019 年度以降は低下傾向にあるものの、依然として環境基準である 3mg/L に適合していない状況が継続している¹⁾。なお、海域の生活環境項目の環境基準は水域ごとで評価することとされており、本市の測定地点が含まれる水域は他自治体にまたがっている。この報文では、測定地点ごとに環境基準値と比較し、環境基準値以下の場合には「適合」という表現を用いている。

COD の上昇要因としては、工場・事業場や家庭等からの COD 汚濁負荷による一次汚濁、窒素やリンを栄養源として植物プランクトンが増殖するいわゆる内部生産による二次汚濁がある。これらに影響を与える要因として、水温や塩分の鉛直分布に躍層が発生することによる成層化、豪雨時における河川からの土砂の流入、下水処理場からの越流水の流入による汚濁負荷量の増加、汚濁負荷中の難分解性有機物の増加等が挙げられる。

一次汚濁については、下水道業、産業系からの COD の汚濁負荷量 (図 2) 及び流入河川における COD (図 3) は近年横ばいである。一方、二次汚濁である内部生産による COD への影響については従来から研究事例があるが^{2), 3), 4)}、本市海域における事例はなく、実態が明らかではない。そこで本市海域において内部生産が COD 上昇に及ぼす影響について、観測調査・解析を行うとともに、過去の観測データを用いて解析し、解明を試みた。

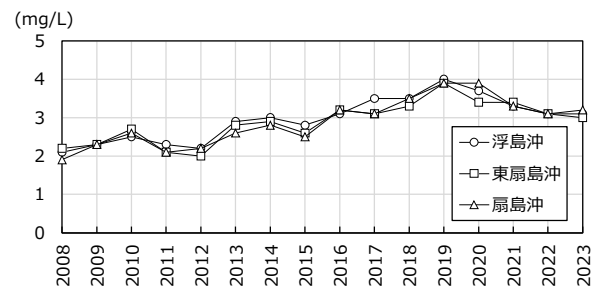


図 1 川崎市の B 類型における COD75% 値の推移

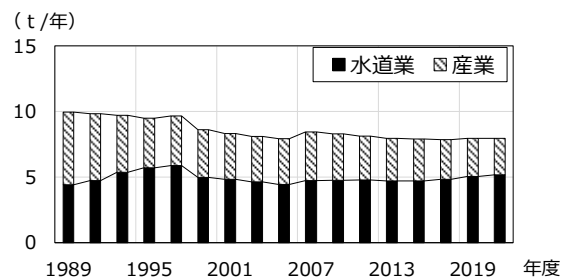


図 2 川崎市における COD の汚濁負荷量

(川崎市水質年報のデータを使用して作成)

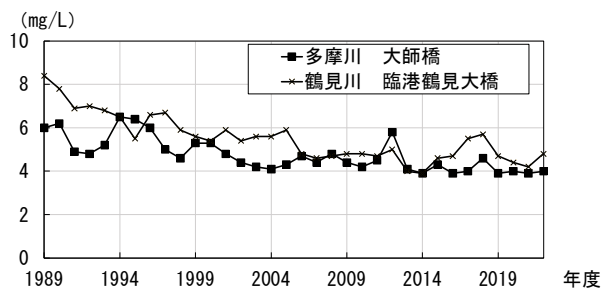


図 3 流入河川の COD の年平均値

(神奈川県水質調査年表のデータを使用して作成)

2 調査・解析方法

2.1 既存の調査項目との関連性

COD の上昇と関係がある水質調査項目を調べるために、COD と日射量、水温、クロロフィル a、溶存酸素、全窒素、全リンの上層について 2000～2022 年度の経年推移を調べた。図 1 に 2008～2023 年度の川崎市の B 類型における COD75% 値の推移を示しているが、本市の B 類型 3 地点の COD75% 値の推移は非常に類似していることから、以降は流入河川である多摩川に最も近い浮島沖(S1)のデータを用いて解析した。

2.2 有機物等の調査及び解析

内部生産が COD の高濃度化へ与える影響について調べるために、溶存態 COD (D-COD) を測定して COD から減じて懸濁態 COD (P-COD) を算出し、COD との相関を調べた。内部生産によって増殖した植物プランクトンは粒子態で存在しているため⁵⁾、植物プランクトンの増殖による COD の高濃度化は、P-COD に反映されると仮定した。D-COD は、採水した試料水をガラス繊維ろ紙（孔径 $1.2\mu\text{m}$ で直径 47mm）でろ過後、ろ液を JISK0102 に準拠して分析した結果を用いた。また、植物プランクトンの栄養源となる溶存態全窒素 (D-TN)、溶存態全リンも測定し、COD 高濃度化のメカニズムを考察する基礎資料とした。調査期間は 2022 年 5 月～2023 年 12 月である。調査地点は図 4 の S1～S6 であり、調査項目と地点は表 1 のとおりである。

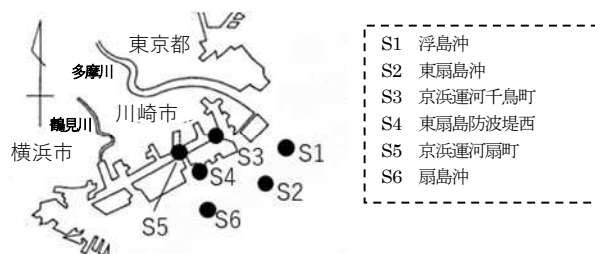


図 4 調査地点

表 1 溶存態 COD 等の調査地点

調査項目	調査地点	採取水深
溶存態 COD	S1～S6	上層・下層
溶存態全窒素	S2,S3	上層のみ
溶存態全リン	S2,S3	上層のみ

2.3 近隣地点の調査結果との比較

2.3.1 COD の経年推移の類似性

本市の海域の外部からの影響を調べるために、図 5 に示す地点における観測データ^{6)・7)・8)・9)}を用いて 2008～2022 年度の COD75% 水質値の経年推移を比較した。

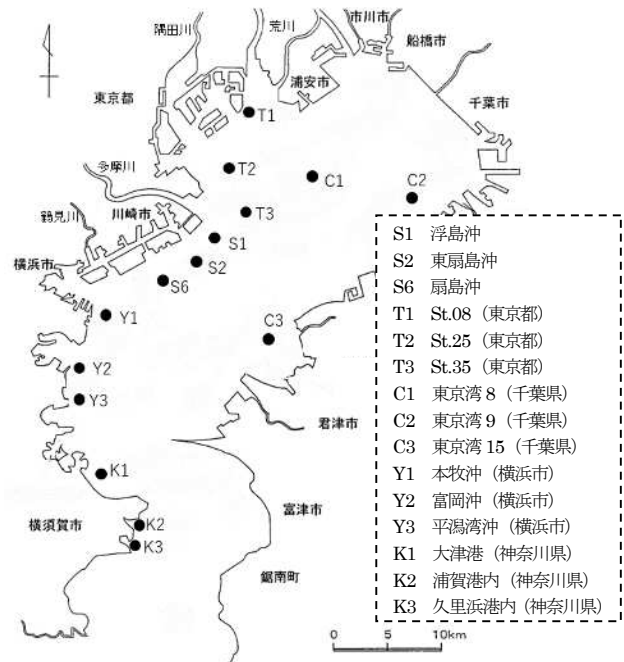


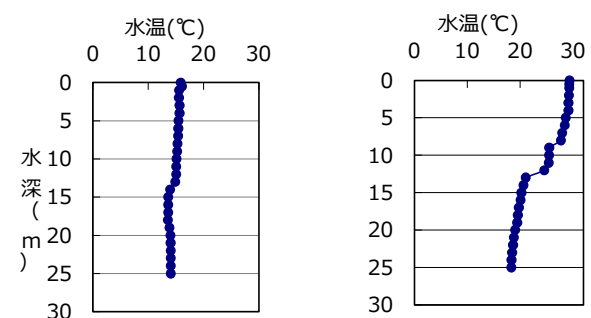
図 5 近隣調査地点

2.3.2 内部生産の影響

本市の 2021 年度以前の内部生産の影響の状況を推定するために、以前から D-COD の観測データがある S1 近傍の東京都の定点観測地点 (図 5 の T3) のデータを用いて 2011～2021 年度における COD、P-COD 及びクロロフィル a の関係を解析した。

2.4 成層化の影響

一般に、夏季には表層の海水は温められ、水温が高く、塩分が低い水が表層に集まる。その結果、上層と下層の海水の密度差が大きくなり、鉛直方向の対流が抑制され成層が形成される。成層化により、上層で増殖した植物プランクトンの下層方向への拡散が抑制されて COD の高濃度化を強めている可能性がある¹⁰⁾。成層が強く壊れにくくと、上層で発生した植物プランクトンが拡散しにくくなり、上層の COD がより高濃度化すると仮定し、成層化と COD との関連性を調べた。図 6 に成層が形成されているときの水温の鉛直分布を示す。成層化の条件として、鉛直方向 1m につき 1°C 以上の水温変化が生じた月を成層化した月とした。



成層なし (2022 年 4 月) 成層が形成 (2022 年 8 月)

図 6 水温の鉛直分布 (S1)

2.5 流入河川からの影響

2.5.1 COD の関係性

東京湾における本市海域近傍の流入河川として多摩川、鶴見川があり、北部には荒川と隅田川がある。2001～2022 年度における各流入河川とその河口付近の海域の COD¹⁾ を比較し、関係性を調べた。

2.5.2 降雨による流入河川からの影響

降雨後に流入河川から土砂や下水越流水の影響を受ける可能性があることから、直近 4 年間（2019～2022 年度）における横浜気象台の降水量¹⁾と流入河川に最も近い S1 の COD の関係を調べた。降水量は、降雨との影響が残っていると推測される調査前日及び前 2 日間の降水量とした。

3 結果及び考察

3.1 既存の調査項目との関連性

COD、全窒素、全燐、水温、クロロフィル a について 2000～2022 年度における S1 の各月測定結果の 3 年平均値推移を図 7 に示す。COD の年間 75% 値が上昇傾向に転じた 2012 年度以降において、COD は 4 月～12 月に、クロロフィル a は 4 月～11 月に上昇傾向が見られたが、全窒素、全燐及び水温は明確な上昇傾向は見られなかった。春季から秋季にかけては植物プランクトンが増殖しやすい時期であり、クロロフィル a が上昇していることから、COD の上昇の一因が植物プランクトンの増殖である可能性がある。逆に冬季には植物プランクトンの増殖が抑制されるため、COD は低い数値で安定していたとの見方とも矛盾しない。以上から、温暖期の COD 上昇に植物プランクトンの増加（内部生産）が影響を与えている可能性が示唆された。

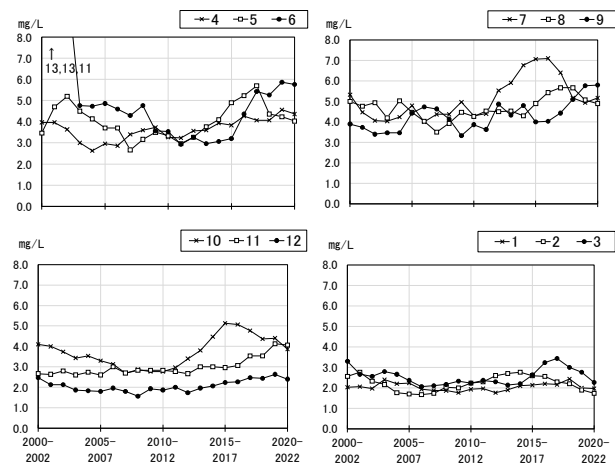


図 7-1 COD（上層）の経年変化

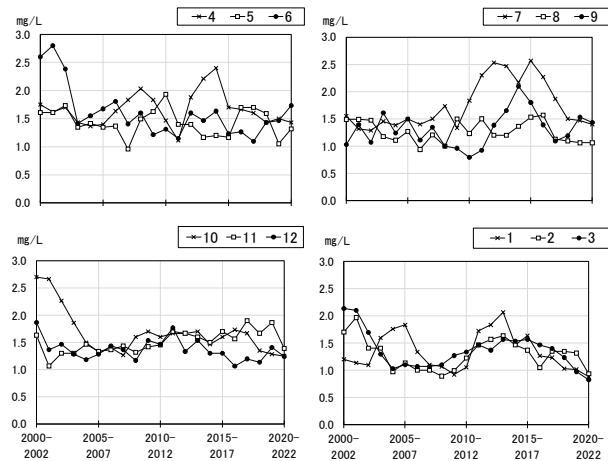


図 7-2 全窒素（上層）の経年変化

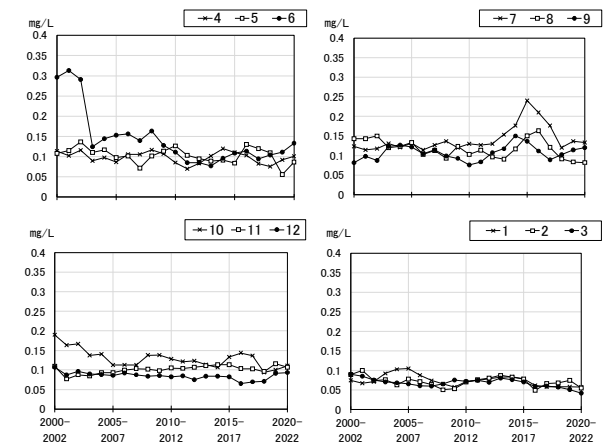


図 7-3 全燐（上層）の経年変化

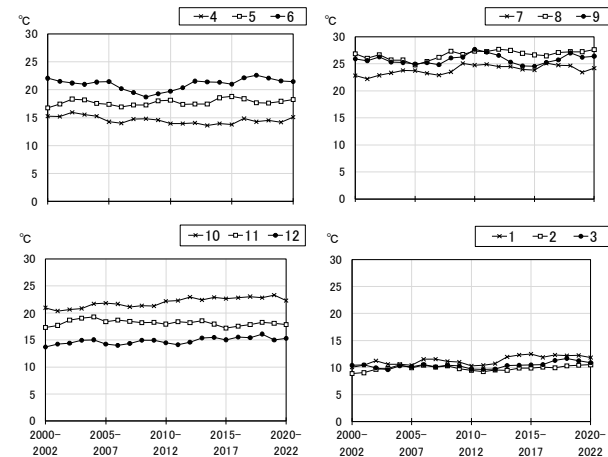


図 7-4 水温（上層）の経年変化

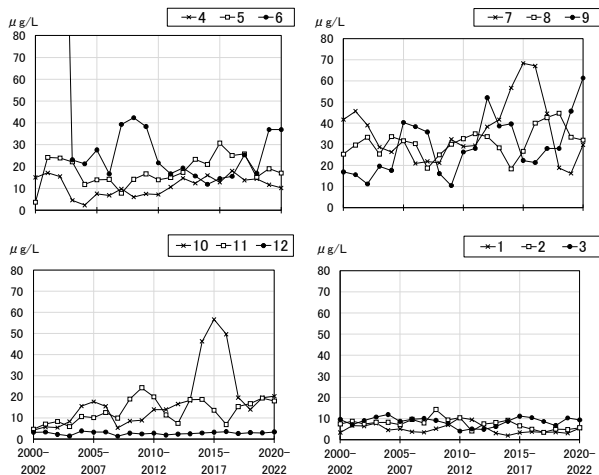


図 7-5 クロロフィル a (上層) の経年変化

※凡例の数字は月を示す。

3.2 有機物等の調査及び解析

S1 における COD と P-COD 及び D-COD の経月変化及び COD と P-COD との相関、P-COD とクロロフィル a (Chl.a) の経月変化及び P-COD と Chl.a との相関を図 8-1 に示す。4 月～9 月において COD が上昇する月には P-COD も上昇しており、両者には強い正の相関がみられた。また、植物プランクトンの指標である Chl.a と P-COD の間にも強い正の相関がみられた。以上から、温暖期の COD の高濃度化には Chl.a の濃度上昇、すなわち、内部生産が強く寄与しているといえる。また、東扇島沖 (S2) における P-COD と D-TN、P-COD と D-TP を図 8-2 に示す。S1 で D-TN、D-TP の測定は実施していないため、ここでは S2 のデータを用いた。P-COD と D-TN について強い負の相関はみられず、また P-COD と D-TP は相関が低かった。今回の結果からは、それぞれの関係について結論づけることはできなかった。

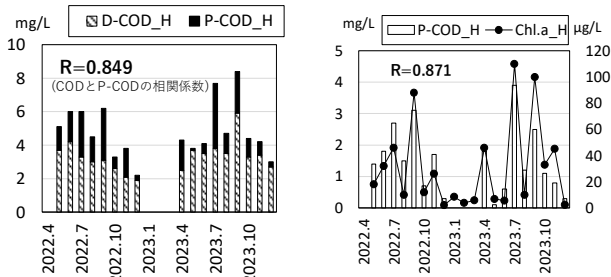


図 8-1 P-COD と COD、クロロフィル a との関係 (S1)

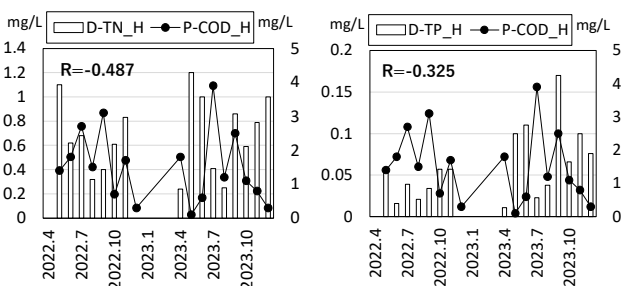


図 8-2 P-COD と D-TN、D-TP の関係 (S2)

3.3 近隣地点の調査結果との比較

3.3.1 COD の経年推移の類似性

結果を図 9 及び表 2 に示す。S1 との相関については、K1～K3、T1～T3 との間に正の相関があり、T1 は 2008 年度以降に、T2 は 2012 年度以降に、T3 は 2015 年度以降に強い相関がみられた。T1、T2 は荒川及び隅田川の河口付近に、T3 は多摩川の河口付近に位置しているため、河川からの流入の影響を受けやすいという点で本市の調査地点と類似している。T2、T3 は本市の上昇傾向が始まった 2012 年度以降の相関が特に強かったことも合わせると、上昇要因が類似している可能性がある」と推察されるため、今後も COD 及びその関連項目の挙動に注目していく必要がある。なお、K1～K3 は全期間で相関係数は高かったが、濃度が比較的低く、流入河川も近傍にいたため S1～S3 との周辺環境の類似性が低く、上昇要因の関係性は低いと推察される。

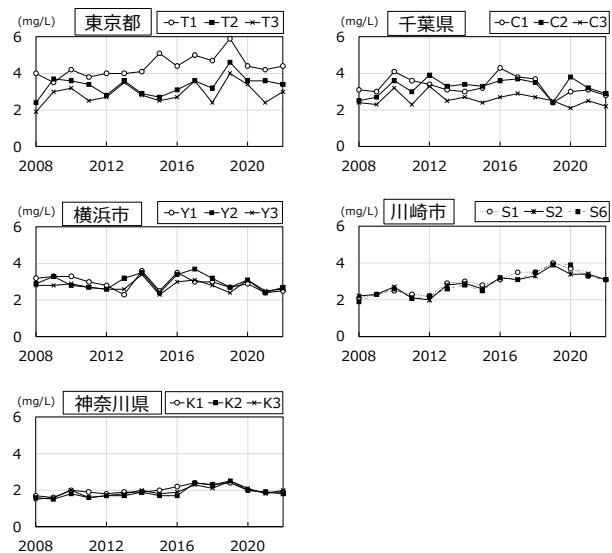


図 9 COD75%値の経年推移

表 2 COD75%値の S1 との相関係数

期間	Y1	Y2	Y3	K1	K2	K3	C1	C2	C3	T1	T2	T3
2008-2022	-0.25	0.19	0.06	0.78	0.84	0.87	-0.22	0.10	-0.19	0.74	0.58	0.56
2012-2022	0.06	0.22	0.13	0.71	0.80	0.85	-0.24	-0.43	-0.50	0.62	0.78	0.51
2015-2022	0.12	0.25	0.23	0.56	0.84	0.85	-0.38	-0.23	0.04	0.45	0.87	0.72

3.3.2 内部生産の影響

結果を図 10 に示す。2022 年度における COD に対する D-COD の比率は非常に近い傾向にあることから、T3 の傾向から過去の S1 の状況を推測できる可能性がある。2011～2022 年度の T3 における COD と P-COD、P-COD とクロロフィル a の間にはいずれも強い正の相関があることから、S1 も 2021 年度以前についても同様に COD の高濃度化には植物プランクトンの増殖が強く寄与している可能性がある。

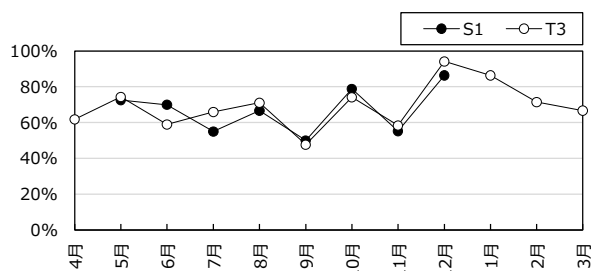


図 10-1 COD に占める D-COD の比率 (2022 年度)

※S1 は測定月の 5 月～12 月のデータを表示

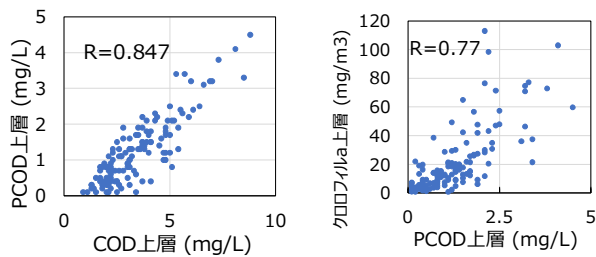


図 10-2 P-COD と COD 及びクロロフィル a との相関 (2011～2022 年度) (T3)

3.4 成層化の影響

S1 における成層化と COD の関係を図 11 に示す。上層の COD が 4.2mg/L を超える月数が、成層化が生じていた月の 81% (13/16) を占め、成層化が生じていると高濃度の COD が出現しやすい傾向にあった。ここで、COD 4.2 mg/L とは、2019～2023 年度の S1 下層の COD の平均値が 1.8 mg/L であったため、上下層平均をとった際に B 類型の環境基準 (3mg/L) を超過する値である。一方、成層化が生じていない月でも上層の COD が 4.2mg/L を超える月数は、48% (12/25) を占めていた。

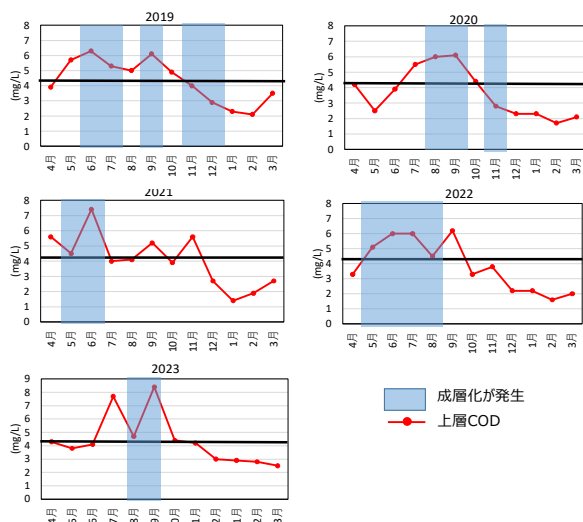


図 11 成層化と COD の関係

3.5 流入河川からの影響

3.5.1 COD の関係性

COD の年平均値の推移を図 12 に示す。図 12-1 (上層) では、S1 は T3 と挙動が類似しており、2012 から上昇傾

向を示し、2017 年度以降は多摩川と同程度の濃度レベルで推移している。流入河川の多摩川及び荒川は、2012 年度までは同程度の濃度で、S1、T3 より 1mg/L 程度高い濃度レベルで推移していたが、2012 年以降は多摩川が横ばいであるのに対し、荒川は多摩川より 1～2mg/L 程度高い状態で推移している。T3 に対する荒川からの影響については、荒川に比較的近い T1 と T2 は荒川と同様にこの 20 年間で濃度は大きく変化していないため、荒川に近い挙動を示しているといえるが、T3 は T1 及び T2 よりも S1 に近い挙動を示しているため、荒川よりも多摩川の影響を受けやすいと推察される。図 11-2 (下層) では、S1 は、T3 とほぼ同じ濃度で推移しており、増減の傾向は T2 と類似していた。採取水深が S1 は 26m、T3 は 26m とほぼ同じであるためである。一方 T1 の採取水深は 6 m、T2 は 15m であり、T3 よりも上層の影響を受けてやや高いものと考えられる。また、S1 の 2016 年度以降の上昇及び下降の傾向は、多摩川よりむしろ荒川に類似していたが、荒川に一番近い T1 の挙動が荒川と類似していないことから、荒川の影響が T3 まで及んでいることは、このデータからでは言い難い。

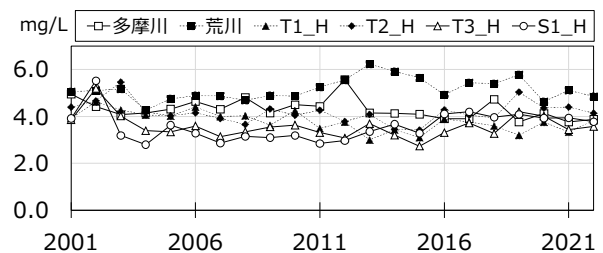


図 12-1 流入河川及び海域の COD の年平均値の推移 (上層)

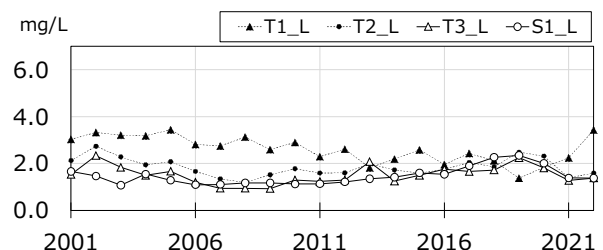


図 12-2 流入河川及び海域の COD の年平均値の推移 (下層)

3.5.2 降雨による流入河川からの影響

直近 4 年間 (2019～2022 年度) における S1 の COD (上下層平均) と横浜気象台における降水量を図 13 に示す。COD 測定のための試料採取は降雨の影響のない日に実施しているため、前日降水量はほぼ 0 であり、降雨の翌日に試料採取を実施した日はほぼなかった。また、前 2 日間降水量の大半は 0～20mm に分布している一方で、COD (上下層平均) は 1～5mg/L に一様に分布していた。このデータからは前 2 日までの降雨が COD の高濃度化へ及ぼす影響はみられなかった。

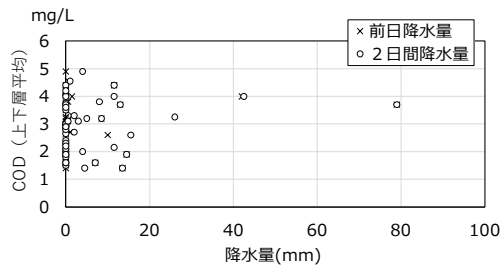


図 13 降水量と COD

4 まとめ

東京湾における本市の水域における COD の上昇要因を解析した。

温暖期における COD の高濃度化は、P-COD の高濃度化が強く影響していることがわかった。これは、近隣地点における 10 年間の傾向と一致しており、内部生産による COD の上昇は本市における特殊な状況ではなく、近隣の水域で共通した事象であるといえる。

成層化が COD 高濃度化へ及ぼす影響について調べた結果、鉛直方向 1m につき 1℃の水温変化が生じた場合に成層化が生じているという条件で絞り込んだところ、成層化が生じているときは、上層の COD が 4.2mg/L を超える高濃度化が生じていた月が比較的多くみられた。

降雨による影響について調べたところ、前日及び 2 日前の降雨による COD の高濃度化への影響は特に見られなかった。

5 今後の解析

今後、以下の調査・解析を段階的に進める予定である。内部生産が COD の高濃度化へ及ぼす影響については、P-COD を継続して調査することにより寄与を把握する。成層化の影響に関わる解析について、今回は鉛直方向 1m につき 1℃以上の水温変化が生じたときを成層化としたが、今後は成層化の条件についての解析を深めていく。具体的には成層の強さを把握するため、水温躍層の深度、密度差を考慮した成層の安定性を調べ、COD の高濃度化との関係性を調べる。また、流域河川からの栄養塩の影響に関わる解析について、近傍の流入河川（多摩川、隅田川、荒川）の流量と海域における栄養塩の量の関係性を調べる。また、難分解性有機物等の影響について新たな知見を得るために、溶存態 COD 中の易分解性溶存態 COD と難分解性溶存態 COD の割合を調べる。また、先行事例^{13),14),15)}を参考にして溶存性有機炭素の起源を調べる。

参考文献

- 1) 川崎市：公共用水域水質測定結果 (2008-2022)
- 2) 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、第 35 巻、p.70-75 (2020)
- 3) 細井ら、香宗川における懸濁態及び溶存態有機物の

起源と富栄養化、高知県環境研究センター、Vol.34、p.67-75 (2017)

4) 野上ら、児島湖流域河川における有機汚濁物質の特性、水環境学会誌、Vol.28、No.3、p.217-220(2005)

5) 滝本ら、海水中の懸濁態有機物質(POM)の藻類およびデトリタスへの分別(II)POCphyto/POC 比と光合成活性との関係、水質汚濁研究、第 6 巻、第 1 号、47-50 (1983)

6) 東京都：公共用水域水質測定結果 (2008-2022)

7) 横浜市：公共用水域水質測定結果 (2008-2022)

8) 神奈川県：公共用水域水質測定結果 (2008-2022)

9) 千葉県：公共用水域水質測定結果 (2008-2022)

10) 田村ら、水温躍層による植物プランクトンの極大層形成に関する研究、土木学会第 63 回年次学術講演会 (2008)

11) 気象庁ウェブサイト 過去の気象データ検索

<https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php>

12) 梅田ほか、富栄養化したダム湖におけるアオコ発生指標としての水温成層安定性、ダム工学 16(4)、269-281(2006)

13) 仲川ほか、陸域溶存有機物との比較における大阪湾域難分解性溶存有機物の構造特性及び分子量分布特性について

兵庫県環境研究センター水質環境科 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紀要 1 号、2009 31-36

14) 琵琶湖・淀川流域の難分解性有機物に関する調査・分析の手引書(案)概要版

琵琶湖・淀川流域の難分解性有機物に関する調査検討会 (公財)琵琶湖・淀川水質保全機構 琵琶湖・淀川水質浄化研究所

15) 後田ほか、広島湾における溶存有機物の分布と季節変化

広島県立総合技術研究所保険環境センター研究報告、No.21.p29-39 2013