

海洋酸性化と水質環境基準 pH、表層および底層 DO

京都大学 名誉教授
藤 原 建 紀

1. はじめに

1. 1. 海洋酸性化

大気中の二酸化炭素(CO_2)濃度は、図 1 に示すように、どんどん上昇しています¹⁾。この図は、気象庁によって、岩手県大船渡市綾里(りょうり)において測られている大気 CO_2 濃度です。気象庁では、ほかに南鳥島、与那国島、昭和基地(南極)においても温室効果ガス等の測定を行っています。

海洋酸性化とは、大気中の CO_2 が海洋に溶け込み、海水の水素イオン濃度(pH)を低下させることです。中性が $\text{pH} = 7$ で、これより pH が高ければアルカリ性、低ければ酸性です。海洋の pH は 8 程度ですから、海水はもともと弱アルカリ性なのですが、海洋酸性化では、「pH が低下すること」を酸性化と呼んでいます。

1990 年代末から 2000 年代はじめにかけて、海洋酸性化が海洋生物に影響を及ぼすことが指摘されはじめたことで、研究者の間で海洋酸性化への問題意識が急速に高まりました²⁾。海洋酸性化は、特に、炭酸カルシウムの殻や骨格を持つ生物(プランクトンの円石藻・翼足類・有孔虫、貝類、サンゴ、甲殻類など)の生育を阻害することが懸念されています。

海洋酸性化が実際に進んでいることは、現在までに、いくつかの長期的な時系列観測データから明らかになっています。西部北太平洋においては、Midorikawa *et al.* (2010)が、気象庁の東経 137 度線の観測定線において、1983 年から 2007 年の表面海水中の pH の平均低下速度が、冬季に 10 年あたり -0.018 ± 0.002 、夏季に 10 年あたり -0.013 ± 0.005 であったと報告しています^{2,3)}。

1. 2. 沿岸酸性化

一方、東京湾や大阪湾などの内湾の河口域には、pH が低い水域があり、沿岸酸性化と呼ばれます。この pH が低いのは、大気 CO_2 濃度の上昇によるものではなく、主に水の有機物汚濁(富栄養)に関するものです。水中の有機物が分解するときに、酸素(O_2)が消費され、 CO_2 が生成されます。このため、有機物分解で溶存酸素濃度(DO)が低下した貧酸素水塊中には、大量の CO_2 が蓄えられております。このため、貧酸素水塊中の pH は著しく低くなっています^{4,5)}。

pH と DO の関係性は、日周期変動にも明瞭にみられます。図 2 は、これを、森林植物を例に説明したものです。昼間は、太陽の光で光合成(有機物生産)が起こり、 CO_2 を消費し、 O_2 が生成されます。一方、夜間は、植物の呼吸で、 O_2 と有機物が消費され、 CO_2 が放出されます。

この日周期変動を、海(神戸市東部深江港沖海域)で測ったものが図3です⁵⁾。1 時間に 1 回の自動測定です。図の灰色の縞は夜間(日没～日出)を表し、白色は昼間です。昼間には、 O_2 が増え CO_2 が減るので、DO が上昇し、pH、COD

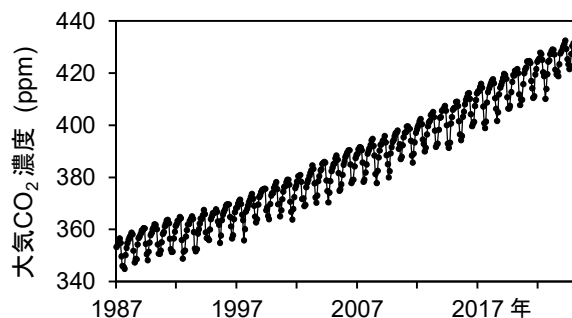


図 1 大気二酸化炭素濃度(綾里)、月別
1987 年～2025 年 6 月

(有機物量を表す)も上昇します。一方、夜間はこれの逆になります。DO、COD、pH の変動は、日周期変動だけでなく、数日の時間スケールでもよく連動して変動しています。

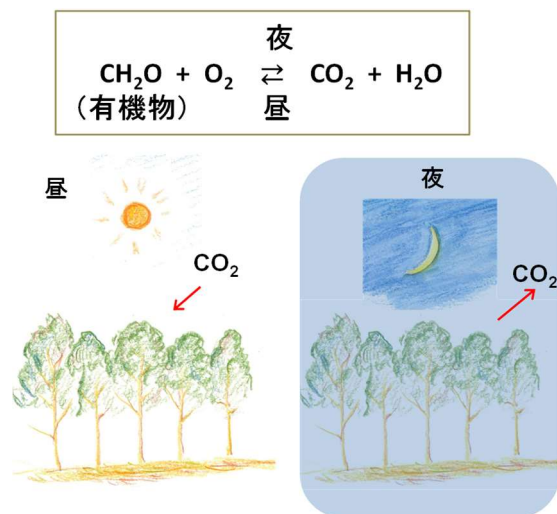


図2 有機物の生成・分解と、CO₂およびO₂の関係

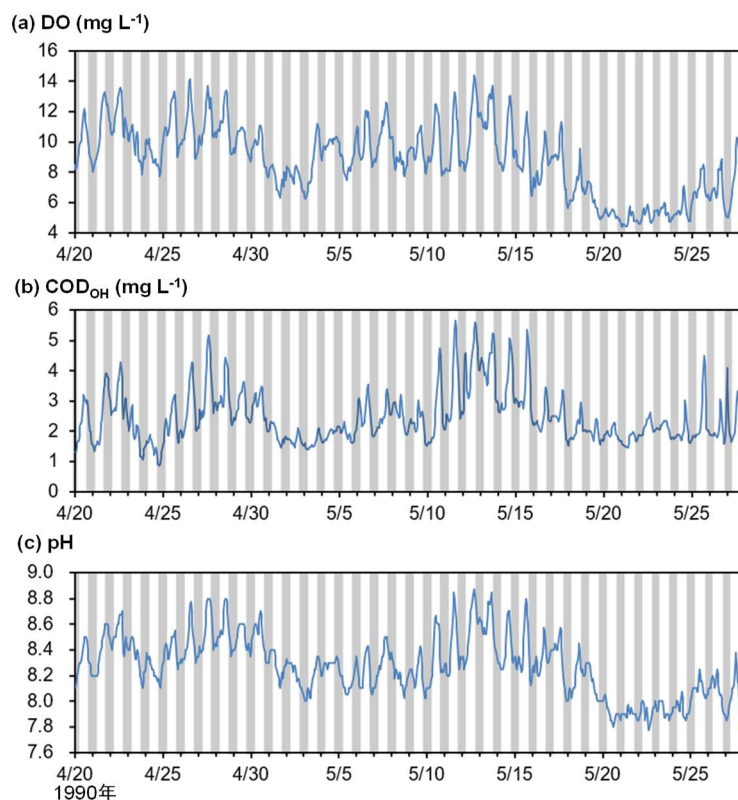


図3 神戸市東部深江港沖海域で測られた(a) DO、(b) COD_{OH}、(c) pH。
灰色および白色の縞は、それぞれ夜間、昼間を表す。

図4は、東京湾北部における表層の pH および DO 飽和度です⁵⁾。この測点では、2010 年から毎時の水深 1 m ごとの水質が自動測定され、配信されています。溶存酸素(DO)を飽和度で表示しているのは、DO 飽和度が 100%より大きいと、海水から大気へ O₂を放出しており、海水中で有機物が作られていると

考えられるからです。つまり DO 飽和度が 100%以上と以下は、それぞれ有機物生成と分解に対応しています。

図4では、年変動においても、pH と DO の間に対応関係がみられます。2023 年 6 月には pH と DO 飽和度が急に大きくなっていますが、これは本年(2025 年)と同じ様に、6 月にもかかわらず晴天の日が多く、光合成による有機物生成が盛んであったためです。

1. 3. pH の変動幅

pH の変動幅は、沿岸海域と外海では大きく異なります。図4の pH の標準偏差は 0.30 です。一方、外海の pH の標準偏差は 0.032 であり、1桁小さくなっています⁵⁾。また、海洋酸性化(大気 CO₂ 濃度の増加に起因するもの)による pH 低下量は、10 年あたり約 0.02 低下です^{2,3)}。つまり、沿岸海域では、大気 CO₂ 濃度の増加に起因する pH 低下よりも、遙かに大きな pH 変動があります。

沿岸海域での pH および DO の変動は複雑で、ときには enigmatic (謎めいた)と言われることもあるのですが、基本的には有機物の生成・分解にともなう CO₂ と O₂ の変動が根底にあります。ですから、pH だけをみるのではなく、他の水質(DO、COD 等)とか気象とかと比較したり、近くのモニタリングポストのデータと比べたり、幅広く観察し、変動原因を探索することが重要です。

1. 4. 沿岸海域の pH のモニタリング

図4では、日本のモニタリングポストのデータを使って図化しました。米国の大気海洋局(NOAA)、沿岸管理局、国立河口域研究保護区(National Estuarine Research Reserves)では、米国の海岸 30 地点において、10 分間隔で水温、pH、濁度、塩分、DO を測定し、リアルタイムで web 公開しています⁶⁾。これのホームページのタイトルは(Resilient estuaries and coastal watersheds — Where human and natural communities thrive. 回復力のある河口と沿岸流域 — 人間と自然のコミュニティが繁栄する場所)です。これは、日本の環境省の進める「多面的モニタリング」に共通しています⁷⁾。

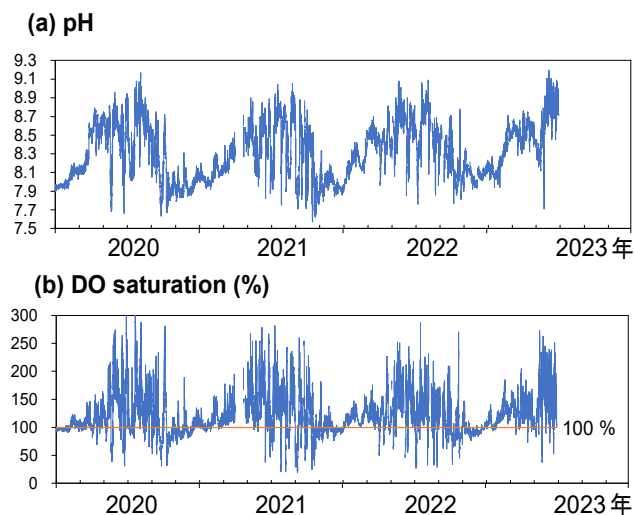


図4 東京湾、千葉市検見川沖モニタリングポストにおける (a) pH、(b) DO 飽和度 (%) 水深 1 m における毎時値。

2. pH の低い水域

東京湾の集水域において、pH の低い水域がどのように分布しているのか調べてみましょう。pH の低い水域は有機物分解の水域であり、DO 飽和度が 100%以下となっています⁸⁾。図5は、DO 飽和度から 100%を引いた値(Δ DO saturation)をバブルチャートで示したものです。青丸は DO 飽和度が 100%以上で有機物生成の場、白丸は 100%以下で有機物分解の場です。

DO 飽和度が低い(白丸が大きい)水域は、隅田川や荒川河口域(ただし河川内)のように、川と海が出会うところに集中しています。一方、DO 飽和度が高い(青丸が大きい)水域は、東京港口から東京湾全体です。

この図を塩分との散布図で示したものが図6です。
 Δ DO 飽和度とともに pH についても示しています。
 図6a の上部と横軸に、塩分の数値を書いています。
 塩分 1~12 の範囲に書いてある「河口域」は、河口から上流側を示しており、エスチュアリー (estuary) といわれる水域です。

図6でも DO 飽和度と pH はよく似た分布をしています。両者が最も高いのは、塩分 28 で、東京港口付近です。ここが有機物生成の中心水域です。一方、最も低いのは、塩分が 12 に近い河口付近です。つまり沿岸酸性化の中心となるのは河口付近です。

3. pH、表層 DO の長期変化

現在、環境省では生活環境の保全に関する水質環境基準の見直しが進められています⁷⁾。この水質基準の中核になる部分は 1971 年に定められ、水域の有機物汚濁をモニターする項目をいくつも含んでいます。

例えば、pH、「表層 DO」です。この2つの項目の経年変化が図化されることは極めてまれですので、東京湾北部に流入する荒川の河口域と、大阪湾の集水域でみましょう。

3. 1. 荒川河口域(東京湾)

図7は、荒川河口域の表層 DO 飽和度と pH です。1960 年代、DO 飽和度が 20%以下であり、「表層水」が貧酸素化していました。1970 年頃から 2000 年にかけて、DO 飽和度と pH が上昇しています。

3. 2. 大阪湾集水域

大阪湾の集水域の、水域ごとに平均した水質の長期変化を図8に示します。生物化学的酸素要求量(BOD)は、どの水域も、指数関数的に大きく減少しています。BOD の激減と連動し、pH および DO は、1970 年頃以後、継続して上昇しています。

これらの変化をみていると、2000 年以前と現在では、河川の水質は別の世界にあるように思われます。昔は、有機物分解の役割を河川が担っていたのが、現在は下水道が担うように移り変わってきたのでしょう。

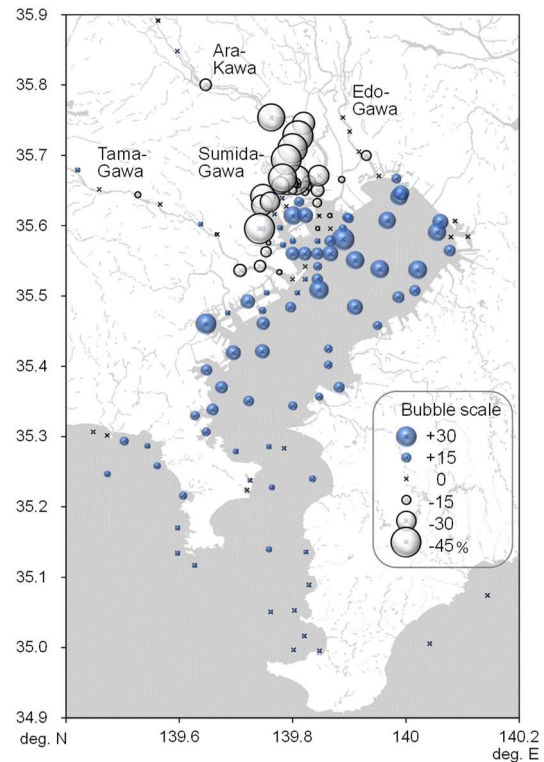


図5 有機物の生成・分解場所の分布
 表層 DO 飽和度 (%) から 100 %を引いた値のバブルチャート。

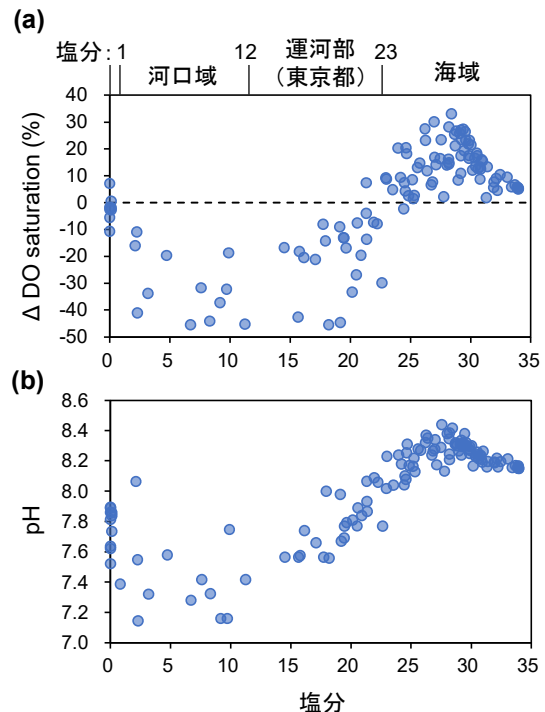


図6 東京湾の河川から海域における塩分と(a) DO 飽和度、(b) pH の散布図
 2017~2021 年度平均、表層。

4. おわりに

過去に例のない早さで梅雨明けした今年の夏の、現在の海の中の様子をみてみましょう(図9)⁹⁾。ここでも、水温、pH、DO 飽和度が連動して変化しています。晴天の日が多く、上層ではDO 飽和度およびpHの日周期変動が大きくなっています。また、下層においては、DO 飽和度およびpHの急変がしばしば起きています。これらの急変は、水温の急変と一致しており、「底層 DO」の急変が、冷水塊の移動によって起きていることを示しています。

生活環境項目と呼ばれる水質環境基準の中でも、pH と表層 DO は地味な存在ですが、基準値としての意味合いが薄れた現在でも、モニタリング項目としては重要な役割を果たしています。

2015 年頃から急激に進む気候変動(ジャンプ)の影響を受けて¹⁰⁾、今後、水質の変動は、より enigmatic になっていくと想定されます。そのとき、pH と DO は、互いに補完しあう水質指標として、より重要性を増していくことでしょう。

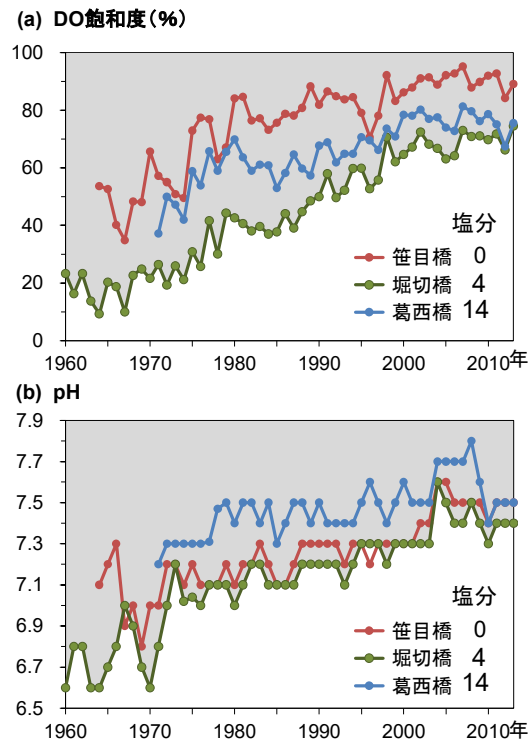


図7 荒川河口域(東京湾)の(a) DO 飽和度、(b) pH の経年変化

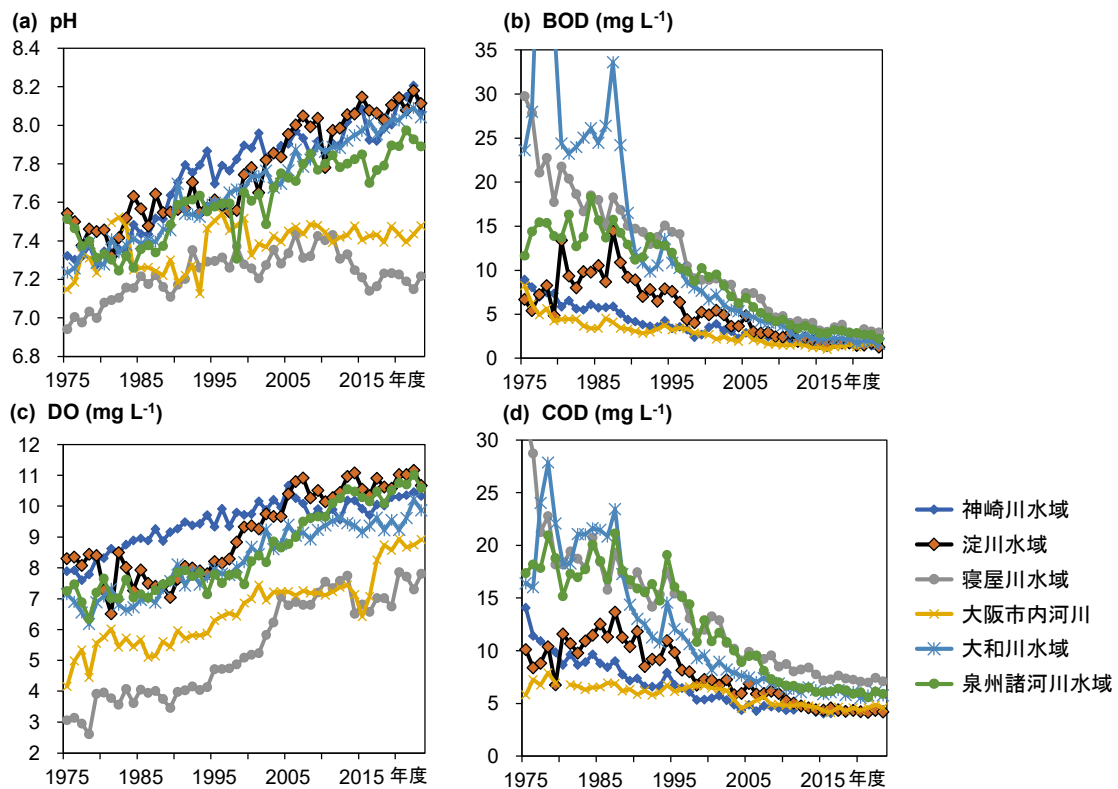


図8 大阪湾の集水域における水質の長期変化
1975～2023 年度まで継続している測点の値を、水域ごとに平均した。

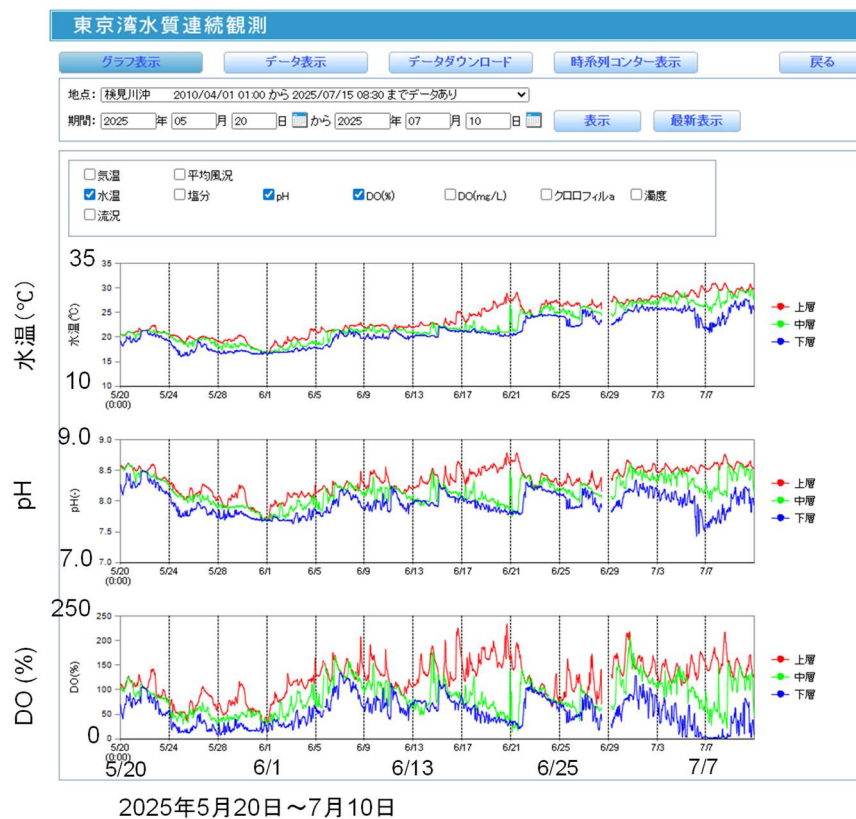


図9 東京湾千葉市検見川沖モニタリングポストにおける水温、pH、DO 飽和度

参考文献

- 1) 気象庁, 大気中二酸化炭素濃度の観測結果.
URL. https://www.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/obs/co2_monthhave_ryo.html (2025 年 7 月時点)
- 2) 気象庁, 海洋酸性化.
URL. https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/mar_env/knowledge/oa/acidification.html
- 3) Midorikawa, T., M. Ishii, S. Saito, D. Sasano, N. Kosugi, T. Motoi, H. Kamiya, A. Nakadate, K. Nemoto, and H. Y. Inoue, 2010. Decreasing pH trend estimated from 25-yr time series of carbonate parameters in the western North Pacific, Tellus Ser. B, 62, 649-659.
- 4) 藤原建紀, 2010. 内湾の貧酸素化と青潮. 沿岸海洋研究 48(1), 3-15.
- 5) 藤原建紀, 加地智彦, 鈴木元治, 2024. 東京湾における CO₂ および O₂ 海面フラックスの長期リアルタイム・モニタリング: 気候変動に対応できる沿岸環境・生態系モデルの基礎として. 水環境学会誌 47(4), 113-128.
- 6) 米国 NOAA HP. URL. <https://coast.noaa.gov/nerrs/> (2025 年 7 月時点)
- 7) 亀井 雄, 2024. 水質汚濁に係る生活環境の保全に関する環境基準の見直し ～地域のニーズに応じた水環境政策～. 化学物質と環境 (191), 1-4.
- 8) 藤原建紀, 鈴木元治, 2024. 貧栄養化にともなう有機物の難分解化, COD 上昇. 水環境学会誌 47(A)(10), 365-369.
- 9) 東京湾水質連続観測. URL. <https://www.tbeic.go.jp/MonitoringPost/Top> (2025 年 7 月時点).
- 10) 川崎太輝, 小野 健, 有田 駿, 畑中 拓, 藤原建紀, 2025. 急激な気温上昇と大阪湾の海水温の変動: モニタリングポストデータの解析. 水環境学会誌 48, 19-25.