

「豊かな海」の実現にむけた流域圏における残留塩素の実態解明

神戸市立工業高等専門学校都市デザイン工学科 教授 宇野 宏司

1. はじめに

瀬戸内海では富栄養化対策として水質改善が進められてきたが、近年は生態系の多様性や生産性、漁業との関係を踏まえ、栄養塩類をどのように管理するかが重要な政策課題となっている¹⁾。環境省は「栄養塩類管理計画」のガイドラインを示し、栄養塩不足が生じる海域への対応や、計画的な栄養塩供給の考え方を整理している²⁾。兵庫県でも「栄養塩類管理計画」が策定され、対象海域の状況や取組が公表されている³⁾。

栄養塩類管理を考える際には、窒素・リンだけでなく、人間活動に由来する水質要因にも目を向ける必要がある。沿岸域には上水道・下水道・事業排水・冷却水などが流入し得るため、これらに含まれる成分を把握することは、水域の状態を評価するうえで重要である。本研究では、その中でも残留塩素濃度に着目した。残留塩素は上水・処理水・冷却水の影響を反映する可能性があり、沿岸域の水質を読み解く補助的な指標となる。

上水道では消毒状況を確認するため、給水栓水の遊離残留塩素濃度が基準として示されている⁴⁾。また、公共用水域へ放流される処理水についても、漁業集落排水施設の報告書において塩素消毒の運用や残留塩素の記載がある⁵⁾。

さらに、塩素は水中でアンモニアと反応してクロラミンを生成し、結合残留塩素として測定されることがある。沿岸域ではこの反応が水質に影響を与える可能性があり、漁業集落排水施設の報告書では、モノクロラミン (NH_2Cl) がノリに強い阻害を与える物質として整理されている⁶⁾。また、遊離アンモニアとクロラミンが混在する条件で魚類への急性毒性を評価した研究も報告されている⁷⁾。加えて、発電所などの海水冷却設備では付着生物対策として塩素注入が行われる場合がある⁸⁾。

以上を踏まえ、本研究では、兵庫県内のいくつかの流域における残留塩素の実態把握に関する現地調査とその挙動に関する簡易室内実験を行った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、兵庫県南部の沿岸域とその流域を対象に残留塩素を実測し、地域の水環境管理に役立つ基礎情報を得ることである。

現地調査では、使用機器の仕様上、主に遊離残留塩素濃度を測定対象とし、以下について実施する。

- (i) 兵庫県南部沿岸と流域において、遊離残留塩素濃度がどの地点でどの程度観測されるかを実測し、地点差・調査回差として整理可能なデータを取得する。また、沿岸域では塩素注入が行われる場合がある⁹⁾ため、観測時には周辺の水利用や取放水の状況も併せて記録する。
- (ii) 室内実験では、残留塩素の有無や濃度条件を変え、空気部・水中部の CO_2 濃度 (pCO_2 計表示値)の時間変化を整理し、残留塩素の影響を把握する。

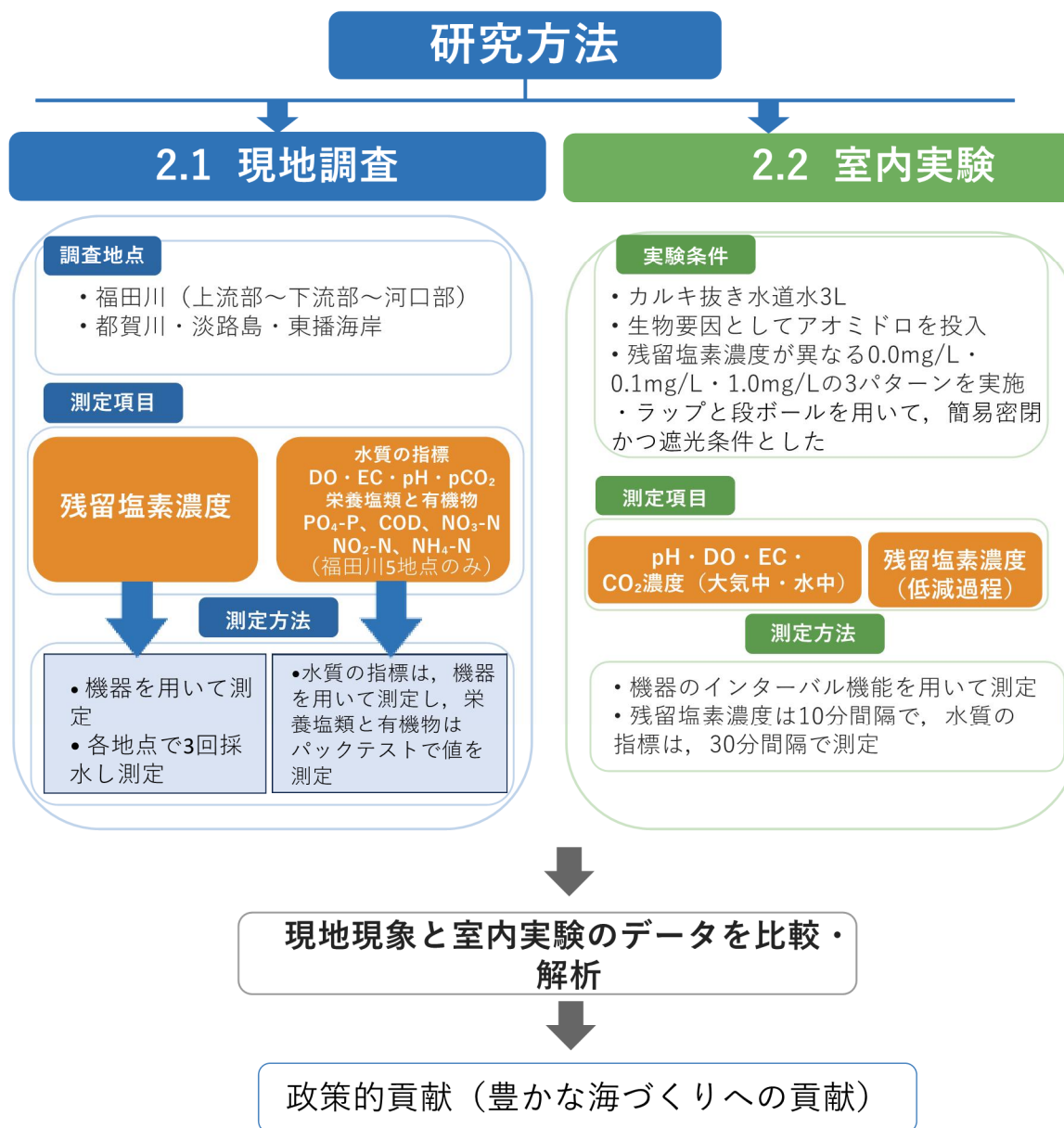


図-1 研究フロー

3. 研究方法

研究フローを図-1 に示す。

3.1 現地調査

3.1.1 調査地点

本研究では「兵庫県南部沿岸とその流域における水中塩素の実態把握」を目的に、土地利用やインフラ整備状況を考慮して、流域の違いを比較できるよう地点を設定した。

(1) 福田川（上流4地点＋河口部）図-2 左

F1（奥畑河川広場）・F2（中山親水広場）・F3（つつじが丘親水広場）・F4（名谷あじさい公園）と、河口のF5（福田橋）で2025年9月～2026年1月にかけて月1回に残留塩素を計測した。

(2) 福田川下流域（橋梁直下5地点）図-2 中

市街地・インフラが集中する下流～河口部の特徴を把握するため、東垂水橋(F4-1)・瑞穂橋(F4-2)・

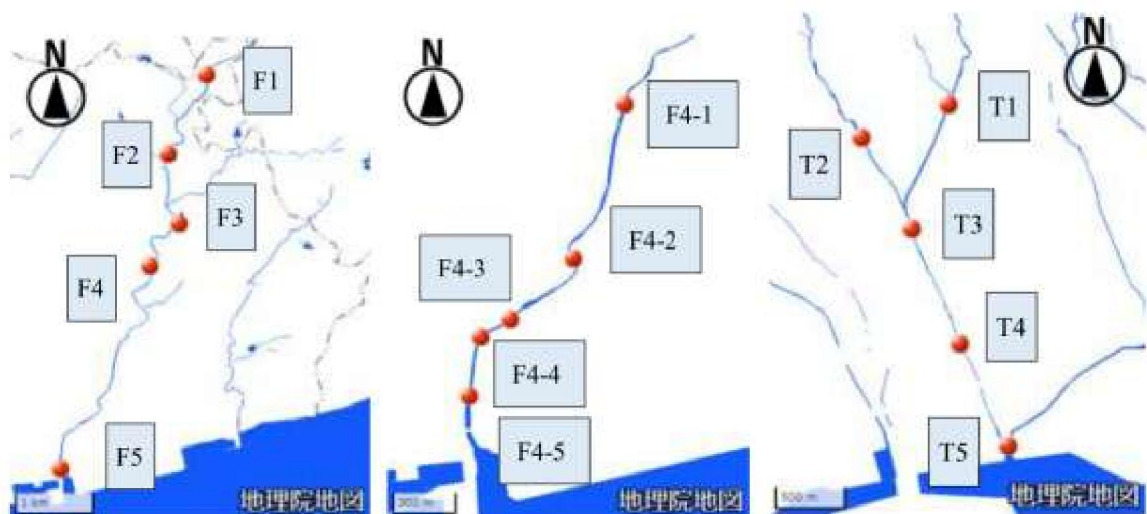


図-2 調査地点（左：福田川流域・中：福田川下流域・右：都賀川）

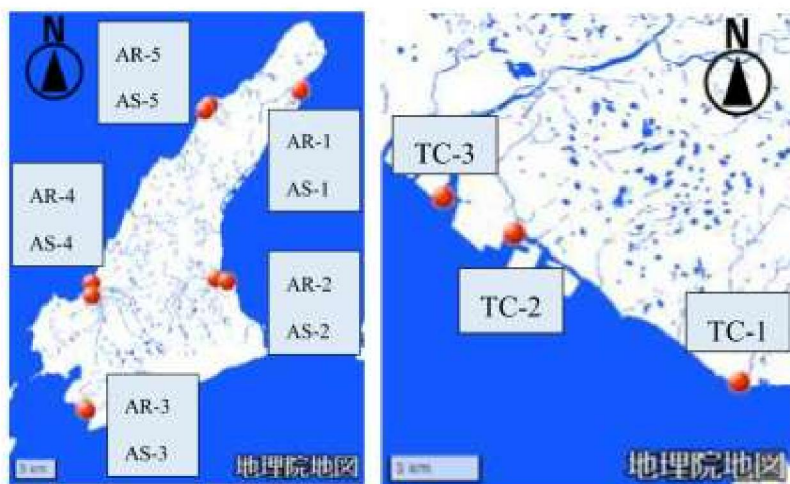


図-3 調査地点（左：淡路島沿岸・右：東播海岸）



写真-1 現地調査の様子

水道橋(F4-3)・川原橋(F4-4)・上福田橋(F4-5)において、2025 年 12 月～2026 年 1 月の間に 3 回残留塩素を計測した。

(3) 都賀川（支川～合流～河口の 5 地点）図-2 右

福田川と同じ都市河川として比較し、福田川の結果と比較するため、都賀川支流の六甲川・柚谷川から本川・河口へ至る連続区間で年 1 回測定した。

(4) 淡路島（海岸 5 地点＋河川 5 地点）図-3 左

下水道普及率が低く、浄化槽処理が多い淡路島において、年 1 回、残留塩素を計測した。

(5) 東播海岸（工場・処理場周辺 3 地点）図-4 左

産業集積地域として位置づけられる東播海岸 3 地点において、年 1 回、残留塩素を計測した。

3.1.2 測定・分析方法

残留塩素は全地点でポータブル残留塩素計（RC-31P）を用い、各地点で独立した 3 試料を採水して測定し、平均値とばらつき（最大値-最小値）を整理した。

3.2 室内実験

残留塩素が大気部・水中部の CO_2 吸収／放出に与える影響を把握するための室内実験をおこなった（写真-2）。

実験は、10 L 水槽にカルキ抜き水道水 3 L を入れ、暗条件で外気交換を抑えた閉鎖条件下で行った。

生物影響を確認するため、福田川で採集したアオミドロ（*Spirogyra*）を投入し、 pCO_2 の変化を観測した。アオミドロは条件ごとに入れ替え、湿重量約 250 g で統一した。実験開始後、10 分間隔で残留塩素と pCO_2 を 24 時間計測した。

初期の残留塩素濃度は 0.0 mg/L（カルキ抜き水道水）、0.1 mg/L、1.0 mg/L の 3 段階を設定した。

濃度調整には市販の次亜塩素酸ナトリウム 6% 水溶液を用い、添加・攪拌・測定を繰り返して目標値に合わせた。アオミドロ投入後も濃度を再調整した。許容幅は 0.1 mg/L 条件で +0.05 mg/L、1.0 mg/L 条件で +0.5 mg/L とし、開始時点で目標値を下回らないようにした。



写真-2 室内実験の様子

4. 結果と考察

4.1 現地調査結果

図-4 に残留塩素の時間変化（福田川流域）を示す。福田川の定点 5 地点（F1～F5）の時系列では、地点によって残留塩素の検出・非検出の頻度が異なることが確認された。特に、2026/01/21 の F1（奥畑河川広場）と F4（名谷あじさい公園）では 3 回すべて検出されなかった。一方、同日の F2（中山親水広場）と F3（つつじが丘親水広場）では検出される場合もあった。これに対して F5（福田橋）では、2025/11/19（平均 0.030mg/L）、2025/11/27（平均 0.017mg/L）、2025/12/08（平均 0.033mg/L）、2025/12/24（平均 0.010mg/L）、2025/12/27（平均 0.027mg/L）、2026/01/21（平均 0.017mg/L）と、計 6 回の測定でいずれも 3 回とも残留塩素が検出され、非検出の機会はなかった。

図-5 に残留塩素の時間変化（福田川下流域）を示す。福田川下流域 5 地点（F4-1～F4-5）でも、下流域の中で地点ごとに非検出の頻度が違うことが確認された。たとえば、2026/01/05 の東垂水橋（F4-

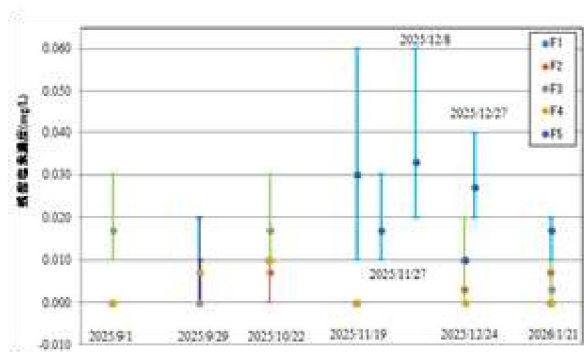


図-4 残留塩素の検出状況（福田川 5 地点）

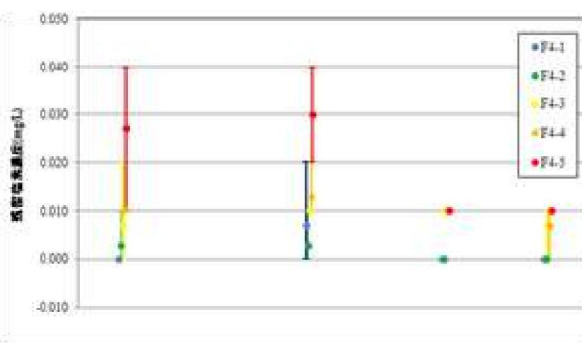


図-5 残留塩素の検出状況（福田川下流域）

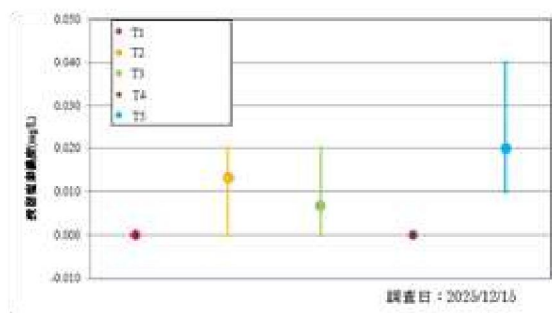


図-6 残留塩素の検出状況（都賀川流域）

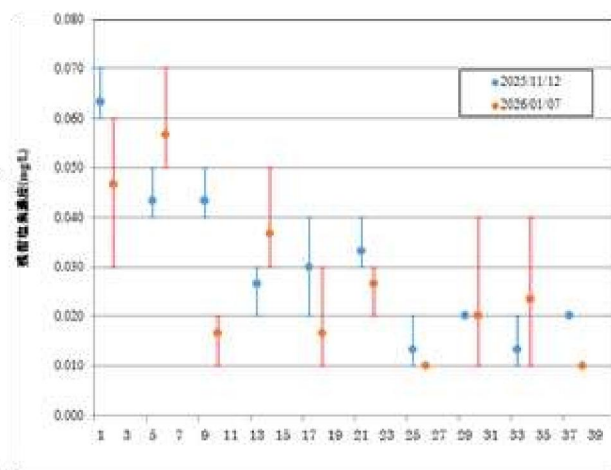


図-7 残留塩素の検出状況（淡路島沿岸）

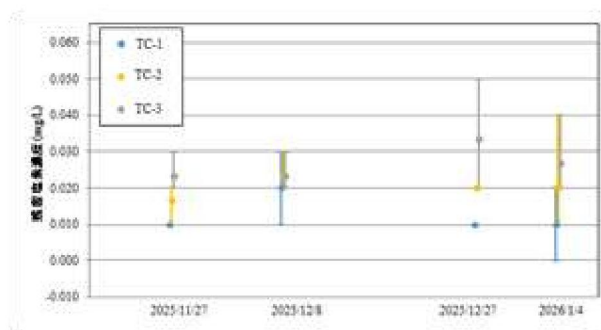


図-8 残留塩素の検出状況（東播海岸）

1)と瑞穂橋(F4-2)は 3 回とも非検出であった。一方、水道橋(F4-3)と川原橋(F4-4)では 0.01mg/L を含む測定値が得られ、平均 0.007mg/L となった。上福田橋(F4-5)は 3 回とも 0.01mg/L であり、平均 0.010mg/L であった。

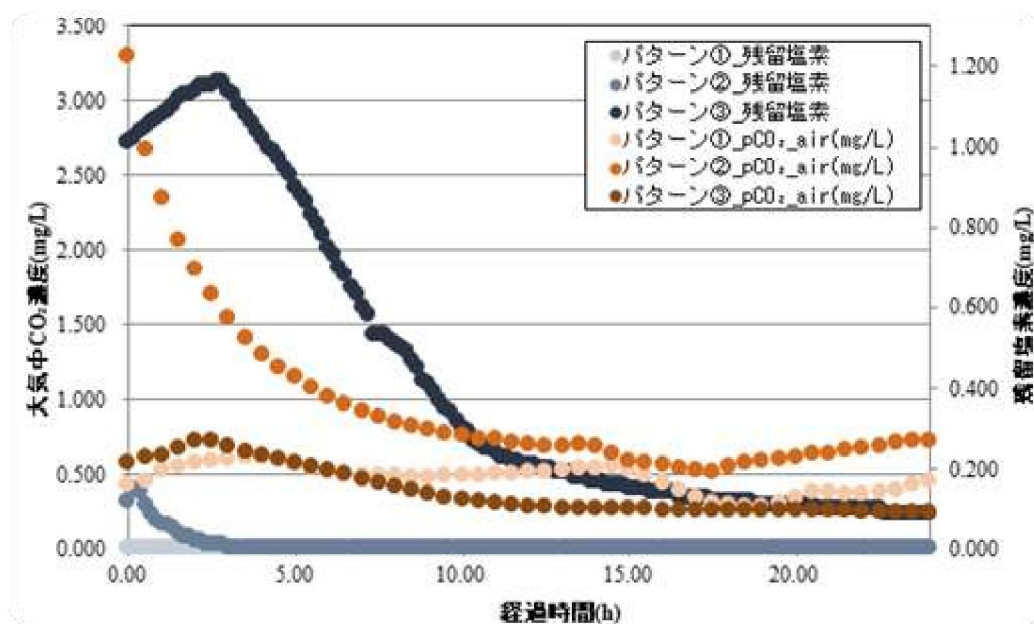
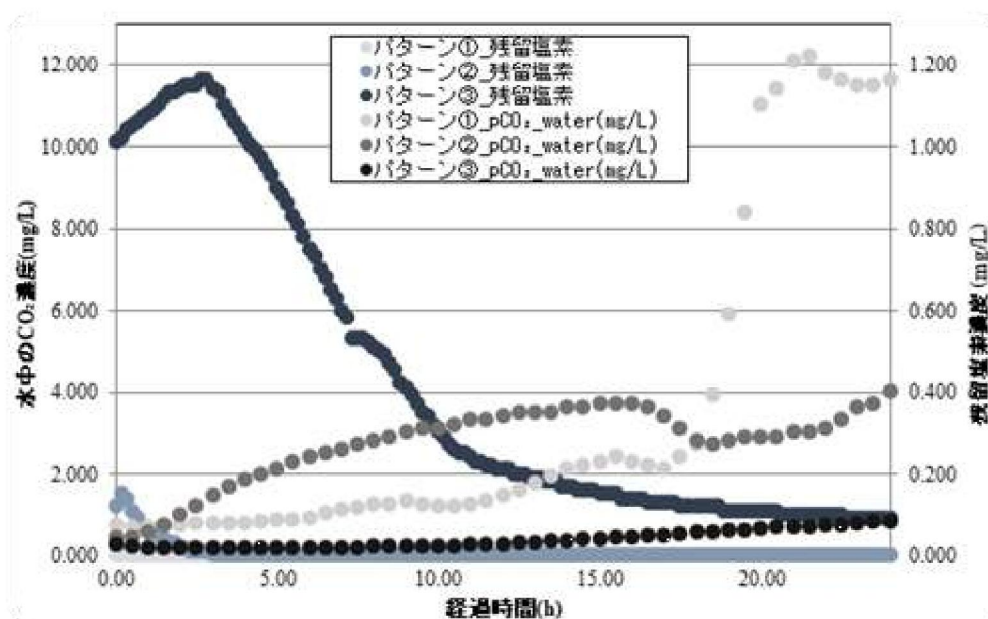
図-6 に残留塩素の時間変化（都賀川流域）を示す。都賀川では、2025/12/15 に T1 と T4 で 3 回とも非検出であった。一方、T5 では平均 0.020mg/L であり、3 回とも残留塩素が検出された。T2 と T3 では平均 0.007- 0.013mg/L であり、一部で非検出であった。

図-7 に残留塩素の時間変化（淡路島沿岸）を示す。淡路島では、隣接する河川と海岸をペアで計測した結果、地点によって平均値の幅が大きいことが示された。2025/11/12 の例では、AR-5 は平均 0.013mg/L である一方、AR-1 は平均 0.063mg/L であり、淡路島内でも河川によって異なる水準が測定された。また、同日の海岸側でも、AS-4 では、平均 0.020mg/L を測定する一方、AS-1 および AS-2 では、平均 0.043mg/L を測定するなど、ばらつきがみられた。

図-8 に残留塩素の時間変化（東播海岸）を示す。東播海岸では、2026/01/04 の測定で、平均 0.010 - 0.027mg/L (TC-1 : 0.010mg/L, TC-2 : 0.020mg/L, TC-3 : 0.027mg/L) が得られた。このうち TC-1 では平均 0.010mg/L であったが、範囲は 0.00- 0.02mg/L であり、非検出が 1/3 出現した。このことから、同じ河川でも調査日によって非検出の頻度にばらつきがあることが確認された。

4.2 室内実験結果

図-9 に大気 CO₂濃度と残留塩素濃度の時間変化、図-9 に大気 CO₂濃度と残留塩素濃度の時間変化を示す。大気中 CO₂濃度は、0.0mg/L 条件では変化が小さい一方、他条件では低下傾向が見られた。密閉系では外部との交換が小さいため、この変化は水と空気の間での CO₂の分配や初期条件差を反映した可能性が高い。したがって、大気中 CO₂濃度の低下は、CO₂そのものの総量が減少したというよりも、水中に留まる割合の変化として現れた可能性がある。

図-9 大気 CO₂濃度と残留塩素濃度の時間変化図-10 水中 CO₂濃度と残留塩素濃度の時間変化

一方、水中 CO₂濃度はどの条件でも増加したが、0.0mg/L および 0.1mg/L の低残留塩素条件で増加が大きく、1.0mg/L の高残留塩素条件では、他の条件と比べて増加が小さく、抑えられる形となった。このことから、低残留塩素条件では呼吸・分解といった生物過程が進んで CO₂生成が大きくなり、高残留塩素条件では生物過程が抑えられて CO₂生成が相対的に小さくなった可能性が示唆される。

以上のように、室内実験では高残留塩素条件ほど水中 CO₂濃度の増加が小さい傾向がみられたことから、残留塩素濃度の違いが、生物過程（呼吸・分解など）に伴う CO₂生成の大きさに影響した可能性が示唆された。一方、DO は高残留塩素条件で大きく低下する傾向を示したため、DO の変化には、生物過程だけではなく、残留塩素による酸化反応や化学的酸素消費などが関与した可能性があると考えられる。

室内実験では、残留塩素条件を変えることで、より単純な環境で水質の時間変化を比べることができた。

低濃度条件では残留塩素が短時間で非検出になった一方、高濃度条件では 24 時間後も残存し、初期濃度によって残りやすさが大きく変わった。これは、塩素消費反応の進み方が条件によって異なることを示す。

5. まとめ

本研究は、兵庫県南部沿岸とその流域を対象に、現地調査と室内実験を組み合わせを行い、河川および沿岸域における残留塩素濃度の実態を把握することを目的とした。

現地調査では、残留塩素濃度は地点や調査日により大きく変化し、常に一定の濃度で存在する背景値ではなく、時間的・空間的にばらつきながら現れる指標であることがわかった。

福田川の定点観測では、上流域で非検出が多く見られる日がある一方、河口部では調査日を通じて残留塩素が継続して検出され、非検出がない日が確認された。このことから、同じ河川内でも、残留塩素の検出状況は地点によって異なり、河川全体で一様に分布しているわけではないことが示された。また、下流域の縦断分布でも、同じ調査日であっても地点ごとに非検出の頻度が異なり、残留塩素濃度が上流から下流へ単純に連続的に変化するとは言えないことがわかった。

淡路島、東播海岸、都賀川では、河川から沿岸海域に至るまで残留塩素が検出される事例が確認され、地域間だけでなく、同一地域内でも平均値の幅が大きかった。このことは、残留塩素が河川域に限らず沿岸域でも検出されう一方、その状況は地点や調査日により大きく変動することを示している。

室内実験では、残留塩素濃度を条件として設定し、24 時間にわたって水質指標の時間変化を追跡した。その結果、低濃度条件では短時間で非検出となる一方、高濃度条件では 24 時間後も残留塩素が残存し、初期濃度により減衰挙動が大きく異なることが確認された。また、すべての条件で pH は低下し、EC は上昇し、水中 CO₂は増加したが、DO の低下量や CO₂増加量には条件差がみられた。これらの変化が同時に生じたことから、酸素消費を伴う過程と CO₂生成を伴う過程が並行して進行しており、高い残留塩素濃度が残存する条件ではそれらの過程が相対的に抑えられる可能性が示された。

本研究で得られた結果を、より確かな理解や実務への活用につなげるためには、いくつかの課題が残されている。

まず、現地調査の時間的な解像度を高める必要がある。本研究では月 1 回程度の調査を基本としたため、降雨や出水、潮汐、気温変化などの短期的な変動が、残留塩素濃度や水質指標に与える影響を十分に把握できていない可能性がある。今後は、降雨直後や流量が大きく変化する時期を含めた臨時観測や、特定期間における高頻度観測を行い、非検出の頻度やばらつきが短期間でどの程度変動するのかを明らかにする必要がある。

次に、現地調査と室内実験の関係をより明確にする必要がある。本研究では、室内実験で得た関係が実際の河川でも成り立つ条件の特定に至っていない。室内実験は単純化した密閉系であるのに対し、現地は再曝気や混合が常に生じる開放系であるため、室内で得られた結果をそのまま現地に当てはめることはできない。今後は、現地において残留塩素と DO、pH、CO₂濃度を同時に観測する事例を増やし、室内実験で示唆された対応関係が現地でも一定程度成立するかを検証することが重要である。特に、残留塩素が検出される地点と非検出が頻出する地点を対比し、同時刻における DO や CO₂濃度の傾向を積み上げて比較することが求められる。

以上の課題に取り組むことで、残留塩素の分布を支配する要因と、水質変動への関与の仕方をより明確に整理できる。その結果、河川から沿岸域に至る水環境において、残留塩素を適切に評価でき、今後の水質保全や生物生産性の議論を進めるための土台を、より良いものにできると考えられる。

参考文献

- 1) 環境省：栄養塩類管理計画（栄養塩類増加措置）策定に関するガイドライン，環境省，2022年3月，URL：<https://www.env.go.jp/content/000127313.pdf>，最終閲覧日：2026年3月28日。
- 2) 兵庫県：兵庫県栄養塩類管理計画の進捗状況（資料3），兵庫県，2022年10月21日，URL：https://www.kankyo.pref.hyogo.lg.jp/download_file/view/29174/21375，最終閲覧日：2026年3月26日。
- 3) 厚生労働省健康局水道課水道水質管理室：水道等における衛生上の措置の徹底について（事務連絡），2006年9月12日，URL：<https://www.mlit.go.jp/common/830002457.pdf>（国土交通省ウェブサイト掲載），最終閲覧日：2026年3月28日。
- 4) 漁港漁場漁村技術研究所：漁業集落排水施設の処理水による海域への影響度調査（平成19年度），水産庁（委託），平成19年度，入手先 URL：https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_thema/houkokusho/attach/pdf/H19houkokusho-26.pdf，最終閲覧日：2026年3月26日。
- 5) 漁港漁場漁村技術研究所 第2調査研究部（担当：山本竜太郎，大賀之総）：漁村の総合的振興方策の実現に向けた課題の解決とその適正な評価に関する手法開発調査（漁業集落排水施設に係る環境配慮型の計画策定手法），水産庁（委託），平成21年度，URL：https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_thema/houkokusho/attach/pdf/H21houkokusho-1.pdf，最終閲覧日：2026年3月26日。
- 6) 恩地啓実：遊離アンモニアとクロラミンがアユの生残と行動に及ぼす影響，海生研研究報告，2021，第26号，pp.29-57，URL：https://www.kaiseiken.or.jp/publish/reports/lib/2021_26_02.pdf，最終閲覧日：2026年3月27日。
- 7) 関西電力株式会社：南港発電所更新計画に係る環境影響評価準備書 説明資料，2025年8月，p.12，URL：https://www.pref.osaka.lg.jp/documents/899/02_shiryo2_20250819_1.pdf，最終閲覧日：2026年3月27日。
- 8) 田代喬，小川隆文，辻本哲郎：河川における残留塩素の低減過程に関する現地観測，河川技術論文集，2013，第19巻，pp.561-566，URL：https://www.jstage.jst.go.jp/article/river/19/0/19_561/_article/-char/ja/，最終閲覧日：2026年3月27日。