

大阪湾圏域の海域環境再生・創造に関する 研究助成制度（平成26年度実施）成果発表会

平成27年7月9日（木） 13:00～16:30

ラッセホール リリー

ご あ い さ つ

大阪湾広域臨海環境整備センター（大阪湾フェニックスセンター）は、大阪湾圏域の広域処理対象区域から発生する廃棄物を適正に処理し、圏域の生活環境の保全を図るとともに、港湾の秩序ある整備により港湾機能の再編・拡充を図り、地域の発展に寄与することを目的として昭和57年に設立されました。以来、大阪湾フェニックスセンターでは、尼崎沖、泉大津沖、神戸沖及び大阪沖の4最終処分場を整備し、近畿2府4県168市町村、約2000万人の圏域から発生する廃棄物の最終処分を行っています。

こうした中、昨年度は、ダイオキシン類基準超過廃棄物の搬入事案が発生したことを受け、排出事業者に対する抜取検査を強化するなど信頼回復に向けた再発防止のための取組を進めるとともに、関係者の理解と協力の下、一般廃棄物焼却施設のばいじん処理物を対象に受入基準の遵守状況を確認するため、新たに年3回の中間検査を義務付けるなど厳格かつ重層的な検査体制を導入しました。

昨今、廃棄物処理を取り巻く社会情勢は大きく変化し、3Rによる循環型社会形成の推進、人と自然との共生の確保、地域社会との連携・協力といった視点も求められています。大阪湾フェニックスセンターは、「環境負荷の少ない健全で持続可能な循環型社会形成の一翼を担うとともに、美しい大阪湾の再生や都市環境の創造に貢献していく。」という方向性のもと、「循環型社会の形成に向けた取組」、「自然との共生をめざした大阪湾フェニックスセンター事業の推進」、「環境コミュニケーションの推進による地域社会との連携」の3つを基本施策とする「環境管理計画」を平成20年3月に策定しました。

この計画では、フェニックス事業の中での環境保全対策にとどまらず、環境問題に関心を持ち活動している市民や研究者と積極的に関わり、情報交換と支援を行っていく必要性についても述べられています。「大阪湾圏域の海域環境再生・創造に関する研究助成事業」は、このような考え方をもとに、先進的な調査研究を行おうとする中堅・若手研究者に対して助成を行い、その成果を通じて、大阪湾圏域の海域（大阪湾フェニックスセンターの広域処理対象区域に面する大阪湾の全部、播磨灘及び紀伊水道の一部）環境再生・創造に寄与することを目的として、平成20年度に創設した制度です。

本日は、平成26年度に採択された研究課題について、その成果を披露いただく機会として成果発表会を企画いたしました。ご講評をお願いしております柳哲雄先生、ご発表いただく研究者の方々にはご多忙な中、貴重なお時間をいただき厚くお礼申し上げます。

本日の成果発表会が、ご参加いただきました皆様にとって良い情報交換の場となり、関係者同士の繋がりを深め、有意義なものとなれば幸いです。

平成27年7月9日

大阪湾広域臨海環境整備センター
理事長 吉本 知之

目 次

1. 大阪湾における底魚不漁と環境要因の解明に向けた研究（その2） 大阪湾の埋め立て地周辺海域における底質環境とマクロベントスの動向に関する研究 （地独）大阪府立環境農林水産総合研究所 佐野 雅基	1
2. 東部瀬戸内海における植物プランクトン群集の基礎生産力とその1960年代からの変化 （その2） 京都大学学際融合教育研究推進センター 安佛 かおり	5
3. 大阪湾岸流域における下水道由来栄養塩負荷の影響評価 -地下水流入および洪水時フラッシングを考慮した時空間変化の解析- 広島大学大学院総合科学研究科 小野寺 真一	9
4. 大阪湾沿岸域の地形変化が港域スケール・湾灘スケールの物質循環に及ぼす影響解析 大阪大学大学院工学研究科 中谷 祐介	13
5. 埋立地・堀込航路等と貧酸素化の関係についての研究 奈良教育大学教育学部 藤井 智康	17
6. 瀬戸内海を里海として機能させるための里山・川の物質循環機構の解明と環境教育プログラムの実施 岡山理科大学理学部 杉山 裕子 （前 兵庫県立大学環境人間学部）	21
7. 大阪湾底質の魚類胚に与える汚染影響リスク評価と今後の底質環境修復のための現状把握 鹿児島大学水産学部 宇野 誠一	25
8. 沿岸海域において透明度を低下させる原因物質の解明 広島大学環境安全センター 奥田 哲士	29

大阪湾における底魚不漁と環境要因の解明に向けた研究（その2） 大阪湾の埋め立て地周辺海域における底質環境とマクロベントスの 動向に関する研究

佐野雅基 （地独）大阪府立環境農林水産総合研究所 主幹研究員

共同研究者 稲垣祐太（現、北海道大学）・大美博昭・秋山 諭・

鍋島靖信（地独）大阪府立環境農林水産総合研究所

横山 壽 京都大学学際融合教育研究推進センター

[研究目的]

近年大阪湾では、底びき網の主要漁獲対象であるシャコやマコガレイなどの底生魚介類の漁獲量が減少し、大きな問題となっているが、その原因は明らかになっていない。本研究は、海底堆積物からマクロベントス・メガベントスを経て底生魚介類に至る食物関係を把握して、底生魚介類不漁要因究明の一助とすることを目的としており、昨年度には、海底堆積物中有機物の起源推定を行うと共に、複数の底質分析値から類型化した海域区分ごとのメガベントスの動向について解析した。今年度は、底層の食物網において海底堆積物とメガベントスの間に位置するマクロベントスの分布・動向について埋立地周辺海域を含む広域で調査を行い、海域区分ごとに分布状況の特性を明らかにする。併せて、海域区分ごとのマクロベントス、メガベントス、魚類の代表種を抽出する。

[研究方法]

1. マクロベントスの分布特性

調査は大阪湾内の 31 地点において、2014 年 6 月 19, 20 日, 9 月 9, 10 日に行った (Fig. 1)。マクロベントスは各地点で 1 回、スミスマッキンタイヤー型採泥器により採集した。海底堆積物は KK 式コアサンプラー、コアパイプ内蔵型エクマンバージ型採泥器、スミスマッキンタイヤー型採泥器により採集し、中央粒径値 ($Md\phi$)、淘汰度 (σ_1)、歪度 (Sk_1)、全有機炭素量 (TOC)、全窒素量 (TN)、C/N 比、炭素安定同位体比 ($\delta^{13}C$)、窒素安定同位体比 ($\delta^{15}N$)、酸揮発性硫化物イオウ量 (AVS) の 9 項目の分析を行った。底層の水温、塩分、溶存酸素濃度は蛍光式溶存酸素センサーを備えた CTD (JFE アドバンテック, ASTD102) により測定した。

9 つの底質分析項目を用いて主成分分析を行い、その第 1～3 成分のスコアを底質の状況を表す総合的指標 (score1, 2, 3) としてマクロベントスの種組成に影響を及ぼす要因とみなした。マクロベントス群集の分布特性を把握するために、クラスター解析を行い、群集を区分した。クラスターごとに平均密度、個体数割合を算出し、上

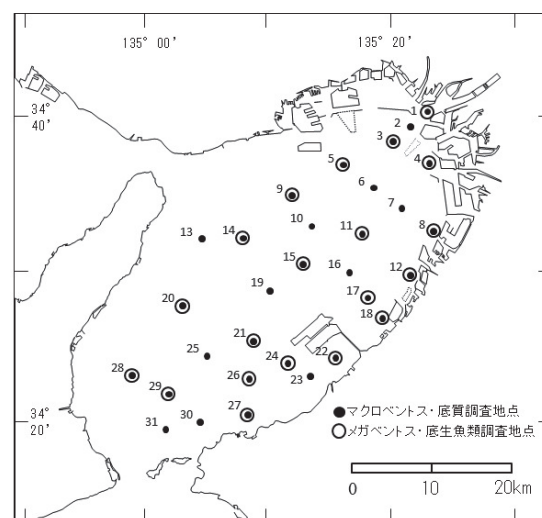


Fig.1 マクロベントス, メガベントス, 底生魚類, 底質の調査地点

位 5 種を優占種とし、各クラスターを特徴付ける種とした。また、マクロベントス群集に影響を及ぼす要因を解析するために、密度について正準対応分析 (CCA) による座標付け解析を行った。外的要因の指標として水温、塩分、DO、score1, 2, 3 を用いた。

マクロベントス群集の経年的な変化を評価するために、城・矢持 (1988) により示された 1986～1987 年におけるマクロベントスの平均密度、種数を 2014 年 6、9 月の平均値と比較した。

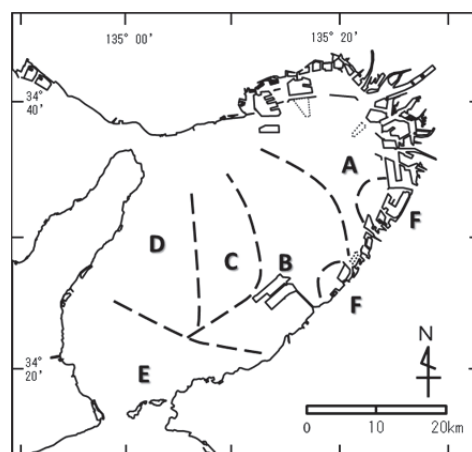


Fig.2 底質9項目により類型化した海域区分

2. マクロベントス、メガベントス、底生魚類の海域区分ごとの特徴

メガベントス、底生魚類は 2014 年 5 月 27、28 日に湾内の 20 地点で、小型底曳き網の一種である石桁網（桁幅 1.8 m）を用いて 10 分間曳網して採集した (Fig. 1)。マクロベントスについては、1. で用いたデータを使用した。昨年度の研究で類型化した海域区分 (Fig.2, A～F) ごとのマクロベントス、メガベントス、底生魚類の出現種の特徴を把握するために、海域区分ごとに優占種を計算した。優占種は密度が上位の 5 種としたが、上位 5 種の累積個体数割合が 60%未満の場合は、60%を超えるまでの種を優占種とした。

[結果と考察]

1. マクロベントスの分布特性

底質 9 項目に対する主成分分析の結果、第 1 主成分の寄与率は 46.7%、第 2 主成分は 21.7%、第 3 主成分は 16.6%となり、第 4 主成分は 6%と大きく低下したため、第 1～3 主成分 (score1, 2, 3) を底質の総合的な指標とみなした。最も寄与率が高かった score1 の水平分布は、湾奥から関西空港付近にかけて低い値を示し、湾南部では高い値を示した (Fig. 3)。また、score1 は $Md\phi$ 、TOC、TN と関係が強く、底質の有機物量を示す指標であると考えられ、この値が低いほど有機物量は多くなる。

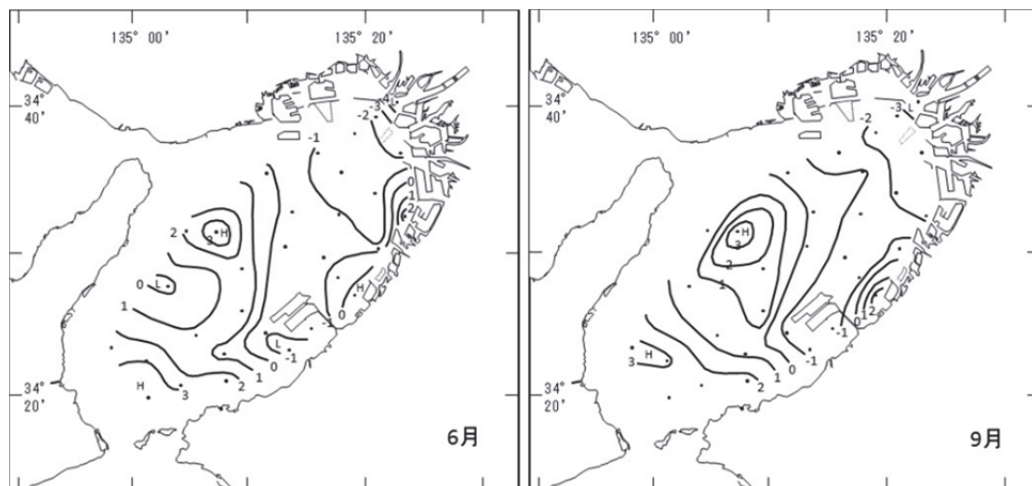


Fig.3 底質の総合的指標 (score1) の水平分布

クラスター分析によりマクロベントス群集をa～eの5つの群集に区分した (Fig.4)。群集 a は主に 6 月に優占しており，淀川河口域や湾奥沖から関西空港南部にかけて，関西空港西部から淡路島東岸沖にかけての地点で出現した。9 月は Stns. 6, 9, 17, 22 で出現した。群集 b は主に 9 月に優占しており，湾奥部の大部分で出現した。6 月は湾奥沿岸の Stns. 2, 3, 4, 12 で出現した。群集 c は 6, 9 月ともに明石海峡寄りの地点に出現する傾向がみられた。群集 d は 6 月には関西空港南部で出現し，9 月は Stns. 13, 16, 25 で出現した。群集 e は 6, 9 月ともに湾東部沿岸域，湾中央部，湾南部で出現した。群集 a, b, d ではシノブハネエラスピオ *Paraprionospio patiens* やシズクガイ *Theora lubrica* などの汚濁に耐性のある種が優占し，群集 e ではドロソコエビ属の一種 *Grandidierella* sp. やソコシラエビ *Leptochela gracilis* などの汚濁に弱い甲殻類が優占した。

各マクロベントス群集に影響を及ぼす要因を解析するために CCA を行った結果，群集 a, b, d は score1 のベクトルに対して負の方向にプロットされ，群集 e は正の方向にプロットされた (Fig. 5)。これはマクロベントス群集が底質の状況に強く影響されることを示しており，富栄養的な海域では群集 a, b, d が，貧栄養的な海域では群集 e が卓越することを示している。また，群集 a, d は DO のベクトルに対して中間的な位置にプロットされ，貧酸素水が発生している海域にはほとんど出現しなかったことから，これらの群集は富栄養的ではあるが，水塊の交換がある程度あり，貧酸素水が発生しにくい海域に出現する群集であると考えられる。一方，群集 b のプロットは DO のベクトルに対して負の方向にプロットされ，貧酸素水が発生している海域で優占したことから，群集 b は富栄養的な環境で貧酸素水の影響を受けた結果として生じたものであると考えられる。

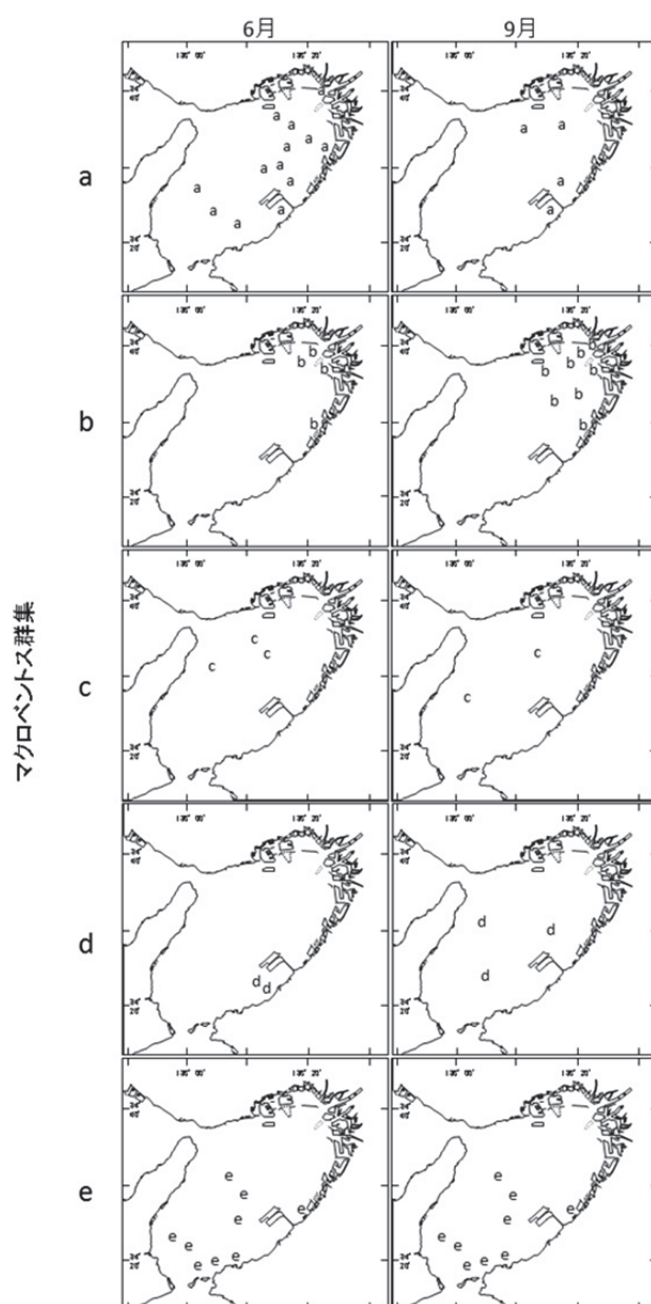


Fig.4 クラスター解析により分類されたマクロベントス群集の水平分布

2014 年の湾奥沿岸，関西空港東側の平均密度，平均種数は 1986–1987 年よりも低下した (Fig. 6)。現在のこの 2 海域は埋め立てにより海水交換が弱まり，海底環境が悪化し，マクロベントスが個体群を維持しにくい環境になっているのかもしれない。一方，湾奥沖と関西空港北側の地点では種数は 1986–1987 年と 2014 年とで大きな差はないが，密度は 2014 年に増加した。2014 年にはこの 2 地点は群集 a, b, d が出現しており，その最優占種は多毛類のスピオ類であったが，1986–1987 年にはスピオ類はあまり出現していなかった (城・矢持，1988)。これらのことから，湾奥沖や関西空港北側も湾奥沿岸と同様の環境になりつつあり，スピオ類のような Opportunistic species が卓越し，密度が増えた可能性がある。湾南部の 2 地点は密度，種数がほとんど変化しておらず，経年的に安定した群集が存在している可能性が高い。

2. 海域区分ごとのマクロベントス，メガベントス，底生魚類群集の特徴

マクロベントスの優占種は，6，9 月の海域区分 A, F，6 月の海域区分 B ではシノブハネエラスピオ 45～94% を占めた。6 月の海域区分 B ではシズクガイが，海域区分 C では 6，9 月ともにドロソコエビ属の一種が第一優占種であった。海域区分 D は 6 月にはスナクモヒトデの一種 *Amphiuridae* sp. が第一優占種となったが，9 月は特徴的な優占種はなかった。海域区分 E は 6，9 月ともにスジホシムシ科の一種が第一優占種となったが，この海域区分では多毛類や甲殻類，ホシムシ類，ヒモムシ類など多種の分類群が出現し，累積個体数割合が 60% を超えるまでに 6 月では 10 種，9 月では 8 種を要した。メガベントスの第一優占種は，海域区分 A はシズクガイ，海域区分 B, C はアカエビ *Metapenaeopsis barbata*，海域区分 D はオカメブンブク *Echinocardium cordatum*，海域区分 E はサルエビ *Trachypenaeus curvirostris* となり，海域区分 F はフタホシイシガニ *Charybdis bimaculata* とヘリトリコブシ *Philyra heterograna* がほぼ同一密度であった。底生魚類の第一優占種は，海域区分 A, B, C, F ではハタタテヌメリ *Repomucenus valenciennei*，海域区分 D ではゲンコ *Cynoglossus interruptus* であった。海域区分 E でもゲンコが最も優占したが，全体として密度が低く，特徴的に優占する種はなかった。

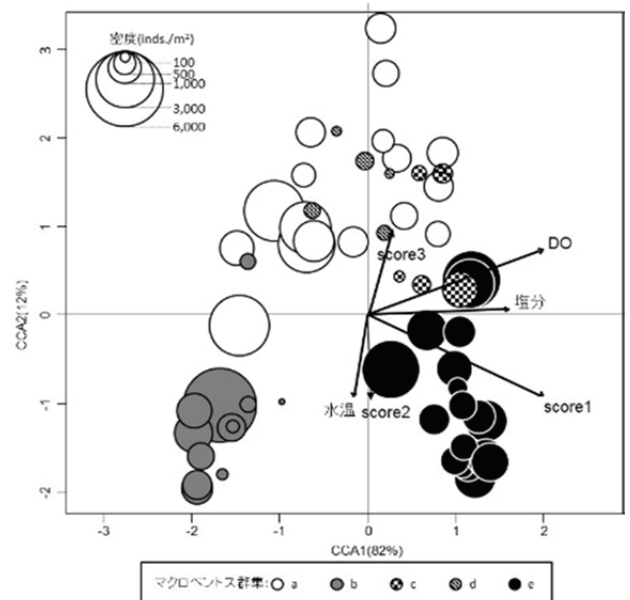


Fig.5 正準対応分析の結果

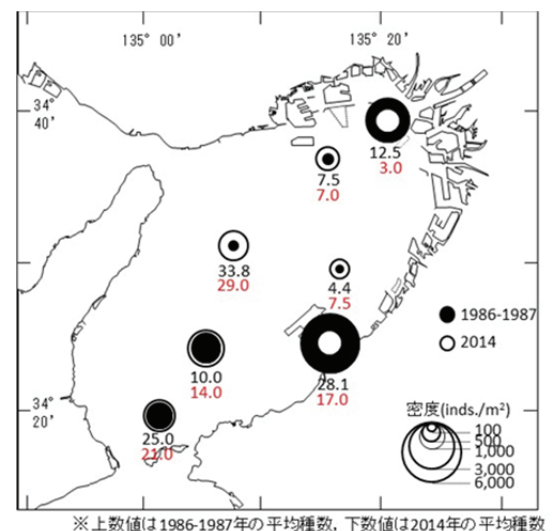


Fig.6 1986-1987年と2014年の平均密度と平均種数

東部瀬戸内海における植物プランクトン群集の基礎生産力と その1960年代からの変化(2)

代表者： 安佛かおり（京都大学学際融合教育研究推進センター・研究員）

共同研究者： 一見和彦（香川大学瀬戸内圏研究センター・准教授），山口一岩（香川大学農学部・准教授），秋山諭（地独 大阪府立環境農林水産総合研究所・研究員），宮原一隆（兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター・主席研究員），山本昌幸（香川県水産試験場・主任研究員），笠井亮秀（北海道大学大学院水産科学研究院・教授）

[研究目的]

瀬戸内海は、かつて富栄養の海として捉えられていた。しかし近年では、栄養塩負荷削減に伴ってその状態が解消しつつある一方で、ノリ養殖に対する栄養塩不足や多くの魚介類の漁獲量減少など新たな問題が生じている。また大阪湾東部では貧酸素水塊が毎夏発生しており、水域ごとに様々な様相を呈している。これらの諸問題は、高度成長期以降現在における生態系構造の変化を示唆している。瀬戸内海においては、1960～90年代に広域で基礎生産量が測定されているが、近年のデータは限られており、生態系の基盤である基礎生産量の変化については不明である。

そこで本研究では、東部瀬戸内海において基礎生産速度を測定することにより、生態系構造の変化を基盤となる基礎生産性から議論する。またその変化傾向を瀬戸内海東部の各水域で比較し、各水域の物理・化学・生物的性状がどのように基礎生産性の変化に影響を与えているかを明らかにする。

[研究方法]

大阪湾、播磨灘、および備讃瀬戸を対象として、Tada et al. (1998) の基礎生産速度の測定点近傍に調査地点を7点設定した（図1）。各定点では、透明度の2.8倍を補償深度と仮定し、入射光の100, 48, 33, 14, 83%となる深さから採水を行った。採水後、すみやかに、300 μm メッシュのネットで試水を濾して動物プランクトンを除去し、5 Lのポリ容器に保存した。ただし、試料採取時に細胞径300 μm 以上となる大型珪藻種の出現がみられるときはネットを介さずに直接容器に採取した。試料をいれた5 L容器は、表面水を掛け流したタンク内にいれ、強光を受けないようにして実験室に持ち帰った。実験室で持ち帰った試水を1 Lのポリカーボネイト容器2本に分取し、 ^{13}C で標識した重炭酸ナトリウムを全炭酸量の10%になるように添加した後、温度と光強度を調

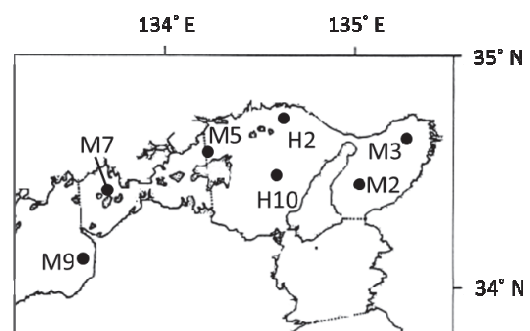


図1. 調査地点

節した人工気象器で約 2 時間培養した。培養温度は各定点近辺の自動観測点の前日午前 9 時の温度に設定した。培養時の光強度は、最大光量を $460\text{--}480 \mu\text{mol m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ に設定し、表層（100% 光強度）以外の容器には遮光フィルターを被せ、各深度の光の減衰率に合わせた。培養時間経過後、試料をガラス繊維ろ紙（GF/F）を用いてろ過し、懸濁物を捕集した。この試料に含まれる懸濁態炭素量と ^{13}C atom% を UC Davis Stable Isotope Facility において測定した。また、培養前に採取した試水の一部を全無機炭酸（TIC）濃度の分析に供した。試水の TIC 濃度は TOC5000-V（島津製作所）で測定した。培養時間内における基礎生産量は、培養前後の濾物に含まれる ^{13}C 量と現場水の全炭酸量から求めた（Hama et al. 1983）。本調査は、2013 年 8 月 11 月、2014 年 2 月、5 月、8 月、11 月に行った。

培養試料の採取時には、各地点で、CTD（水温・塩分・クロロフィル蛍光値）と光量子計での観測も行った。また、各層から採取した試水のクロロフィル *a* 濃度（蛍光法）と栄養塩濃度を分析した。栄養塩類は、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、リン酸態リン、ケイ酸態ケイ素、アンモニア態窒素の分析を行った。

[結果と考察]

水温は、各定点の全層平均値で、 $24.0\text{--}26.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ （2013 年 9 月）、 $21.1\text{--}22.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ （2013 年 11 月）、 $8.8\text{--}10.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ （2014 年 2 月）、 $13.5\text{--}15.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ （2014 年 5 月）、 $24.1\text{--}26.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ （2014 年 8 月）、 $17.8\text{--}22.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ （2014 年 11 月）の範囲で変動した。

塩分は、各定点の全層平均値で、 $30.6\text{--}32.7$ （2013 年 9 月）、 $30.5\text{--}31.7$ （2013 年 11 月）、 $31.2\text{--}32.8$ （2014 年 2 月）、 $31.4\text{--}32.8$ （2014 年 5 月）、 $31.8\text{--}33.0$ （2014 年 8 月）、 $30.2\text{--}32.2$ （2014 年 11 月）の範囲で変動した。鉛直的に大きな塩分変動がみられるときは最小値が低く、表層への淡水の混入が変動を大きくしたと考えられる。とくに、2013 年 9 月の大阪湾湾奥（M3）、2013 年 11 月備讃瀬戸の M5、2014 年 2 月の播磨灘の H2 では、最低塩分が 25 以下であり、淡水混入の影響を大きく受けていた。一方、備讃瀬戸の M7、燧灘の M9 では比較的塩分変動が小さかった。

各調査で観測された透明度は、調査日間と地点間のばらつきがともに大きく、これらの間には有意な差はなかった（two-way ANOVA, $p > 0.05$ ）。大阪湾湾奥（M3）では、透明度が 5 m 以下のことが多かったが、2014 年 11 月の調査時には 11.5 m という高い透明度が観測された。備讃瀬戸の M7 の透明度は、平均値としては大阪湾に次いで低く、10 m を超えることはなかった。一方、H10 の透明度は、2014 年 11 月以外 9.3 m 以上を示し平均値も高かった。

本研究で得られた光強度 8.3% 水深までの積算クロロフィル量を図 2 に示した。積算クロロフィル量は、調査地点間と調査日間で有意な差はなかった（two-way ANOVA, $p > 0.05$ ）。各調査日における最大値は、2014 年 2・5・8 月には大阪湾湾奥（M3）で、2013 年 9・11 月には備讃瀬戸の（M7）で、2014 年 11 月には燧灘で示された。2014 年 2・5・8 月には、大阪湾湾奥（M3）で最大を示し西側の地点でより低くなるという傾向がみられたが、その他の調査日の分布にはとくに傾向はみられなかつ

た．調査日間で積算クロロフィルを比較した場合，他の月と比べて，2014 年 2・5 月は変動が小さかったが，値としては大きく違わなかった．

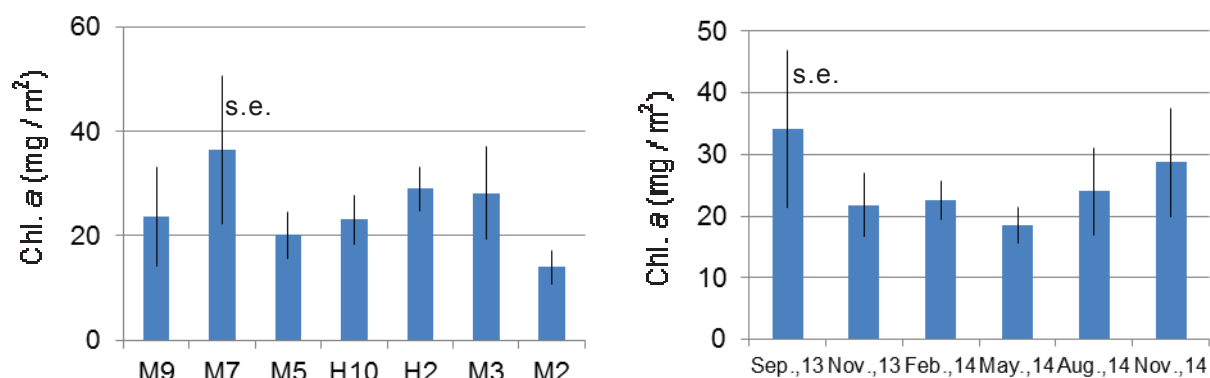


図 2. 各調査地点（左）および各調査日（右）における光強度 8.3% 深度までの水柱の浮遊藻類現存量．水柱あたりの浮遊藻類現存量は各採水深度の浮遊藻類現存量から台形積分して算出した．縦棒は標準誤差を示す．

本研究で得られた基礎生産量は，75 から 1638 $\text{mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ で変動した．この変動範囲は Tada et al. (1998) の報告した 118 から 1700 $\text{mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ とほぼ同じ値であった．各地点と各調査日の平均値を図 3 に示した．基礎生産量に関しては，地点間では差がみられなかった (two-way ANOVA, $p > 0.05$) が，調査日間では差がみられた (two-way ANOVA, $p < 0.01$) ．

基礎生産を地点間で比較すると，Uye et al. (1987) や Tada et al. (1998) の結果とは異なり，必ずしも，大阪湾や播磨灘で高く備讃瀬戸や燧灘で低いわけではなかった．本研究では，2014 年 2・5・8 月には大阪湾の湾奥 (M3) で最大値を示し，西側の定点でより低くなるという類似の分布パターンがみられたが，2013 年 9・11 月と 2014 年 11 月には備讃瀬戸 (M5・M7) あるいは燧灘 (M9) で高い基礎生産量がみられた．今後，この分布パターンの差異が生み出された要因について考察を進めていくには，まず，これらの地点で高い値が生み出されたメカニズムについて，同時期に行ったその他の地点との比較を詳細に行い，解析していく必要がある．

基礎生産を調査日間で比較すると，2014 年 2・5 月は他と比べて平均値として小さな値を示し，ばらつきも小さかった．Uye et al. (1987)，Tada et al. (1998) はいずれも，冬季 (1 月) の基礎生産量は他の季節と比べて低いという本研究と同様の結果を示している．しかし，Uye et al. (1987)，Tada et al. (1998) は，4 月の結果については，夏・秋季との差がなかったと記述しており，これは本研究の 5 月の結果とは異なるものであった．本研究における 5 月の光合成活性は 2 月と同程度の低い値であった．このときの現場水温および培養水温は 14.4-15.1 $^{\circ}\text{C}$ であり 20 $^{\circ}\text{C}$ 以上となる夏・秋季と比べると低く，また，栄養塩濃度も他の月と比べると全体的に低濃度であった．これらの要因が活性を低下させたと考えられる．2014 年 5 月における光強度 8.3% 深

度までの有光層の全クロロフィル *a* 量を地点内で他の調査日と詳細に比べると、播磨灘（H2・H10）では最低値、備讃瀬戸（M5・M7）でも比較的低い値であった。つまり、活性が低く、藻類現存量も他の調査日と比べて高くない地点が多いことから、2014 年 5 月の基礎生産が低くなったと推測される。本調査においてみられた 5 月の特徴を既存研究と比較していくには、この季節性が 2014 年に特異的なものか通常なのか、4 月と 5 月の違いを含めて慎重に検討していく必要がある。

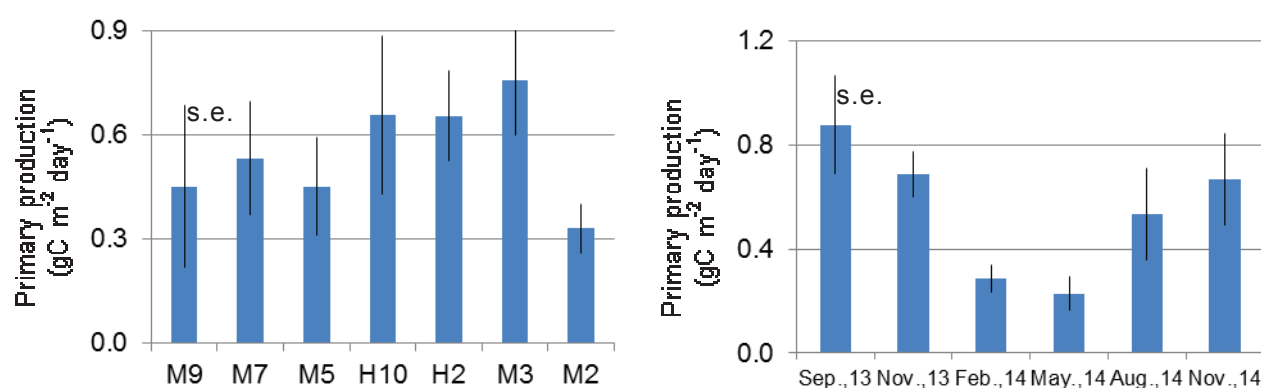


図 3. 各調査地点（左）および各調査日（右）における基礎生産量。縦棒は標準誤差を示す。

[結論]

今回測定された基礎生産量は、これまでの報告と大きく異なるものではなかった。しかし一方で、地点間差や季節変化に関しては、これまでの報告とは異なる傾向もみられた。今後、本研究で見られた特徴を生み出したメカニズムについて解析を進めることで、生態系の基盤である基礎生産とその変化を解明する上で重要な知見を与えることができると期待される。

[引用文献]

- Hama, T., T. Miyazaki, Y. Ogawa, T. Iwakuma, M. Takahashi, A. Otsuki and S. Ichimura (1983): Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using a stable ¹³C isotope. *Mar. Biol.*, 73, 31–36.
- Tada K., K. Monaka, M. Morishita and T. Hashimoto (1998): Standing Stocks and Production Rates of Phytoplankton and Abundance of Bacteria in the Seto Inland Sea, Japan. *J. Oceanogr.*, 54, 285–295.
- Uye, S., H. Kuwata and T. Endo (1987): Standing stocks and production rates of phytoplankton and planktonic copepods in the Inland Sea of Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 42, 421–434.

研究課題名：大阪湾岸流域における下水道由来栄養塩負荷の影響評価－地下水流入および洪水時フラッシングを考慮した時空間変化の解析－

代表者 小野寺真一

広島大学大学院総合科学研究科・教授

代理発表者（共同研究者）：齋藤光代

岡山大学大学院環境生命科学研究科・特任助教

共同研究者：谷口正伸（和歌山大学）・清水裕太（近

中四農研）・金 広哲（広島大学）

〔研究目的〕

本研究では、大阪湾に対する下水道由来の栄養塩負荷の影響を評価することを目的とする。そのため、申請者らが最近数年間で集中的に調査を実施してきた大和川^{①,③,④}を主な対象とし、さらに淀川流域、および寝屋川流域を含めた数か所の下水処理排水放流点とその沿岸部において (1)洪水流出時を含めた現地観測を実施し、栄養塩濃度、クロロフィル、安定同位体およびラドン濃度等の時空間変化を明らかにし、(2)マルチトレーサー法により、下水道由来の栄養塩負荷を他の供給源（河川、地下水）と分離して評価し、以上の結果を基に(3) 流域流出モデル及び水理生態系モデルによる解析を行い、下水道由来の栄養塩負荷による沿岸域への影響を評価する。本研究の最終的な目標として、下水道由来栄養塩負荷の影響範囲は夏季及び平水時には河口近傍に留まり、一方で洪水時および冬季にはより沖合まで顕著に拡大するという仮説（図 1）を検証する。

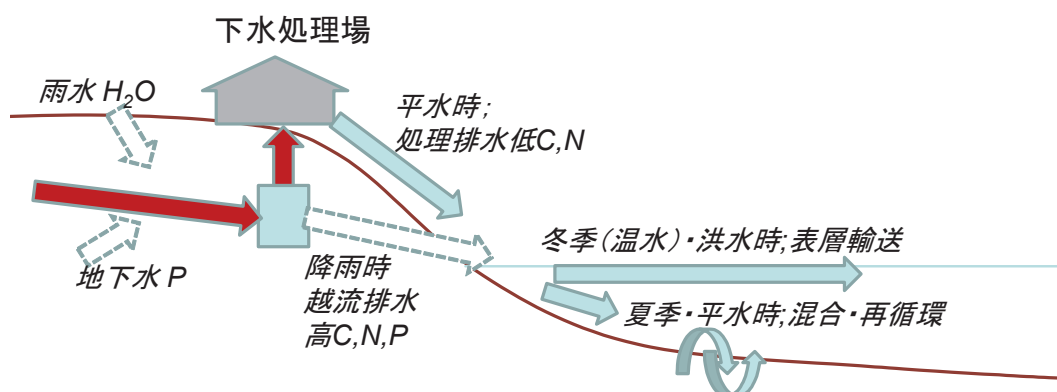


図 1 大都市沿岸における下水道由来栄養塩負荷とその輸送に関する模式図

〔研究方法〕

(1) 現地調査

- ①陸域調査：大阪湾岸に立地する大阪市此花下水処理場、住之江下水処理場、堺市三宝下水処理場を対象に、それぞれの処理場を訪問・見学し、放流量や水質の情報を収集した。
- ②沿岸調査：各処理場の処理排水放流口を起点として沖側に向かう約 4～8km の側線（此花

処理場ライン：KH、住之江
 処理場ライン：SU および
 三宝処理場ライン：SA) を
 設定し（図 2）、2014 年 8
 月 31 日～9 月 1 日（SU お
 よび SA）、10 月 18 日（SA
 および KH) および 2015 年
 2 月 7 日（KH) の期間に実
 施した。各側線において、
 海水の水温、電気伝導度、
 溶存酸素濃度（DO) および
 クロロフィル a（Chl.-a) の
 鉛直分布を約 300m 間隔で測

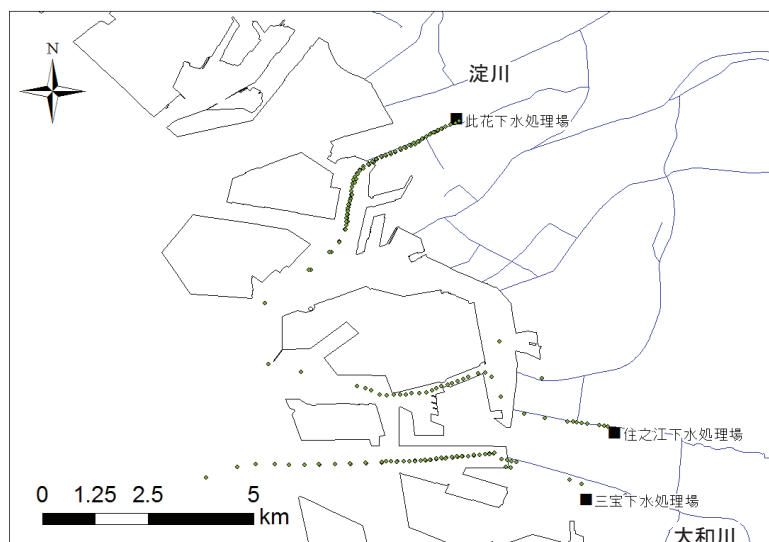


図 2 大阪湾沿岸（大阪市・堺市）の調査範囲

定した。試料の採取は、表層海水試料を栄養塩（窒素、リン、珪素）分析用に約 100m 間隔で、懸濁態有機炭素（POC) および窒素（PON) 懸濁態リン（PP) 分析用に約 300m 間隔で採取した。底層の海水および底質試料の採取は 300m～600m 間隔で行った。

(2) 分析および観測結果解析

試料水および底質試料は実験室に持ち帰り、栄養塩（窒素、リン、珪素）濃度、溶存有機体炭素濃度、酸素・水素安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O} \cdot \delta\text{D}$)、懸濁態成分の窒素・炭素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N} \cdot \delta^{13}\text{C}$) について定量分析を行った。観測された結果及び分析結果に基づき、マルチトレーサー法により河川および沿岸域における下水道由来の栄養塩負荷を他の供給源（河川、地下水）と分離し、平水時および洪水時における寄与率の推定を行った。また、その空間分布および時間変化についても明らかにした。

(3) モデル解析

①流域流出モデルおよび下水道モデル：合流式下水道による雨天時の未処理排水を考慮した流域からの栄養塩負荷量の評価を目的とし、大和川流域河口部に位置する三宝下水処理場を対象として Soil and Water Assessment Tool (SWAT) モデルを用いて推定を行った。具体的には旧 1 系、新 1 系の 2 統系の処理工程を考慮したサブモデルを構築

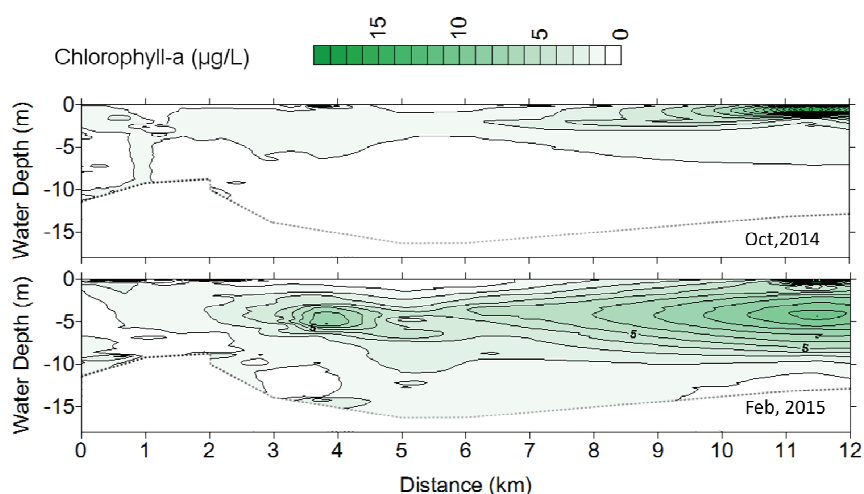


図 3 KH ラインにおける Chl-a の分布

し、SWAT モデルと連結させ雨天時の負荷量を推定した。

②沿岸モデル解析：ELCOM、CAEDYM を用いた三次元水理・生態系モデル解析によって下水処理場放流水の大阪湾への流入過程を再現した。今回の解析対象は、もっとも簡単な構造であることから、此花下水処理場周辺とした。

[結果と考察]

本研究では、大阪湾に対する下水道由来の栄養塩負荷の影響を評価することを目的とし、数か所の下水処理排水放流点とその沿岸部を対象に既存データの整理および現地観測を行うとともに、得られた現地観測結果を基にマルチトレーサー法による下水道由来栄養塩負荷の評価およびモデル解析を行った。その結果以下のことが明らかになった。

- 1) 大阪市内の 13 の下水処理区を対象に、下水道で処理される生活排水と産業排水の割合を推定した結果、産業排水の割合がかなり高いことが明らかになった。また、下水処理場への流入負荷および放流負荷を比較した結果、有機態の窒素・リンは殆ど除去されているが、無機態として大阪湾に流出していることが確認できた。
- 2) 大阪湾への下水処理排水放流点とその沿岸部を対象とした現地観測の結果から、此花処理場ライン (KH) においては、冬季においてより海水の電気伝導度が低い傾向が確認された。また、この時期には Chl.-a (図 3) と DO も比較的高く、植物プランクトンの生産も活発であることが示唆された。酸素同位体分布も冬季の方が低いエリアが広く分布し (図 4)、処理排水が沖合まで輸送されていることが示唆された。

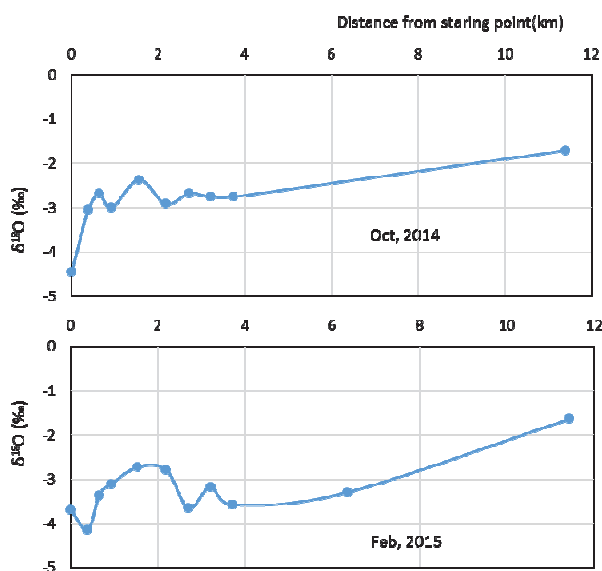


図4 KHラインにおける $\delta^{18}\text{O}$ の分布

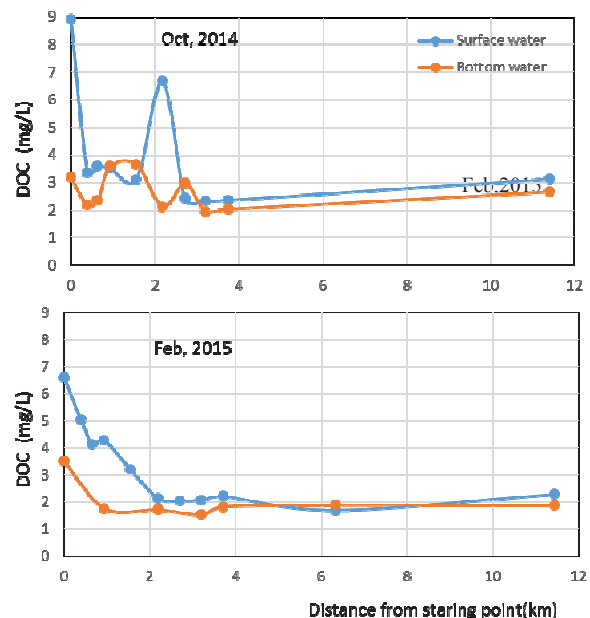


図5 KHラインにおけるDOC分布

- 3) 観測領域の表層海水においては、下水処理水の放流口付近で栄養塩濃度が最も高く、その後沖側に向かって低下していく傾向を示した。DOCの分布 (図5) においては、10月に比べて2月の方がより沖まで輸送されている様子が確認できた。これは、2月により排水自体

が輸送されていることと 10 月により分解が進んでいることが関係していると考えられる。処理場から放流される排水と沖合の海水とを端成分（エンドメンバー）とし、観測領域における栄養塩の消失・生産過程について考察を行った結果、特に KH ラインにおいては、冬季に植物プランクトンの取り込みによる栄養塩の消失が顕著になる傾向が確認された。一方で、晩夏においては栄養塩の生産傾向が示唆された。

- 4) モデル解析の結果は、洪水時に下水処理場（合流式の場合）から溶存窒素およびリンで約 10%、懸濁物質で 40%流出負荷量が増大していることが確認できた。また、夏季よりも冬季により下水が沖合に輸送される傾向を、洪水時により輸送される傾向（図 6）が確認できた。

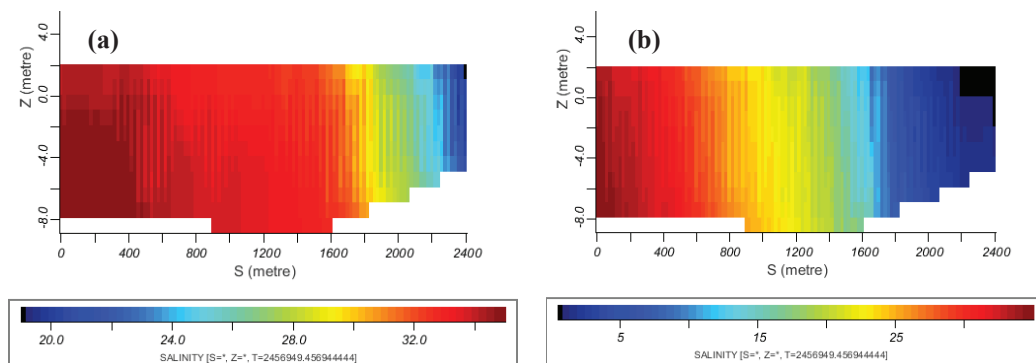


図 6 2014 年 10 月 18 日 23:50 時の塩分の鉛直断面図（左端が大阪湾，右端が此花下水処理場）

(a) 通常放流（晴天時を想定）

(b) 放流量 10 倍（雨天時を想定）

[まとめ]

本研究の結果、仮説（図 1）のような下水処理場からの排水の沿岸への拡散影響が季節および洪水時に依存して拡大することを確認できた。

今後は、より定量的にかつ多様な条件で評価していく必要がある。また、堆積物の影響②などを含めた解析も必要である。さらに、下水道については、地下水との相互作用についても確認していく必要もある。

参考文献

- ①Onodera, S. et al. “Nutrient transport and surface water-groundwater interactions in the tidal zone of the Yamato River, Japan.” IAHS Publication, 361, 204-211, 2013.
- ②Jin, G., Onodera, S., Saito, M., Shimizu, Y. et al. “Effects of dam construction on sediment phosphorus variation in a semi-enclosed bay of the Seto Inland Sea, Japan.” Estuarine, Coastal and Shelf Science, 135, 191-200, 2013.
- ③Shimizu, Y. et al. “The effect of small impoundments on nutrient transport in a suburban watershed.” IAHS Publication, 362, 172-177, 2013.
- ④大西晃輝・小野寺真一ほか“巨大都市ジャカルタのチリウン川における水質汚濁特性.” 日本水文学会誌, 43, 39-46, 2013.

大阪湾沿岸域の地形改変が港域スケール・湾灘スケールの物質循環に及ぼす影響解析

中谷祐介¹⁾，西田修三²⁾

1) 大阪大学大学院工学研究科 助教

2) 大阪大学大学院工学研究科 教授

1. はじめに

大阪湾奥部では，古くは江戸時代より干拓による埋め立てが行われていたが，戦後の高度経済成長期の港湾整備と沿岸開発により自然海浜はほぼ消失した．沿岸域には人工島を含む複雑な閉鎖性水域が出現し，現在，富栄養化や貧酸素化など水環境の劣化を引き起こしている．しかし，沿岸地形の変化と水環境劣化の関係は，未だ明らかになっていない．これまで研究代表者らは，大阪湾を対象に陸域から流入する汚濁負荷を量的・質的に明らかにするとともに，三次元流動水質モデルを用いて陸域，大気，底泥，外洋からの栄養塩負荷を考慮したリン，窒素の収支と循環の定量的把握について取り組んできた．しかしながら，地下水の海底湧出による栄養塩供給機構を考慮できていないことが課題として残されていた．

本研究では，大阪湾における栄養塩供給機構のうち未だ不明な点が多く残されている海底地下水湧出に着目し，その湧出域と湧出量の推定を行った．また，過去（1930年代）と現在における大阪湾の地形データを基に三次元流動シミュレーションを行い，湾奥部の地形改変が流動構造と物質輸送に及ぼす影響について解析を行った．

2. 方法

1. 大阪湾における海底湧出地下水の実態に関する調査解析

湧出地下水のトレーサーとして有用な ^{222}Rn を含めた水質データを得るために，大阪湾の港湾域および全域において現地調査を実施した．港湾域調査は2014年12月15日，全域調査は2014年12月23日に実施した．各地点では表層水と底層水を採取するとともに，多項目水質計（DataSonde5X，HYDROLAB 製）を用いて塩分，水温，DO，濁度，Chl. α の鉛直プロファイルの計測を行った．また，一部の地点では5m間隔で中層水の採取も行った．さらに，2015年2月3日に，淀川（毛馬橋）において河川表層水を，岸和田沿岸の事業場で揚水されている地下水（揚水深度：33～40m）をそれぞれ採取した．採取した試料は冷暗条件下で実験室に持ち帰り，形態別の窒素，リン，ケイ素，炭素および ^{222}Rn の水質分析に供した．分析には，オートアナライザーAACS-V（BLTEC 製），有機炭素計 TOC-V（島津製作所製），静電捕集型ラドン測定器 RAD7・RADH20（DurrIDGE 製）を使用した．

調査結果を基に，大阪湾底層水の塩分，水温， ^{222}Rn 濃度，溶存無機態窒素・リン・ケイ素を入力変数として主成分分析を行った．また，鉛直一次元拡散モデルを用いて，現地調査で得られた ^{222}Rn 濃度の鉛直プロファイルを説明するような境界条件を逆推定することにより，海底からの地下水湧出フラックスの推定を試みた．

2. 地形改変が港域・湾灘スケールの流動構造と物質輸送に及ぼす影響解析

大阪湾沿岸域の地形改変が流動構造と物質輸送に及ぼす影響を明らかにするため

に、三次元流動シミュレーションによる解析を行った。2012 年冬季を対象に、数値モデルの再現性の検証を行った後、現況地形における計算結果と、地形条件のみをまだ埋め立てがそれほど進行していない 1930 年代の条件に変更した場合の計算結果を比較することで、地形改変の影響を調べた。また、浮力を無視した中立粒子を湾奥部沿岸の最深層に配置し、その挙動をシミュレートすることで、地形改変が海域の物質輸送に及ぼす影響を調べた。

3. 結果と考察

1. 全試料水について塩分と ^{222}Rn 濃度の関係を図-1 に示す。低塩分域にいくつかプロットがみられるが、いずれも淀川河口域で採取された試料である。調査前の数日間は淀川大堰からの流出がほとんどなかったことを考えると、この低塩分水は神崎川に由来しているものと考えられる。図中には大阪湾の表層水と底層水について、最小二乗法により求めた相関曲線（破線）もあわせて示している。ただし、湾スケールの水質特性に着目するために、流入河川水の影響を強く受ける淀川河口域のデータは除いて相関式を構築した。決定係数は 0.26 と高くはないが、塩分と ^{222}Rn 濃度には弱い相関が認められた。今回の調査で得られた陸域地下水と淀川表流水の ^{222}Rn 濃度がそれぞれ 1,496～6,736Bq/m³ と 185Bq/m³ であったのに対し、相関式の切片は 5,370Bq/m³ を示し、陸域地下水の範囲にあった。このことは、外挿による粗い見積もりではあるものの、大阪湾水中の ^{222}Rn の主たる起源が淡水性地下水であることを示唆していると考えられた。

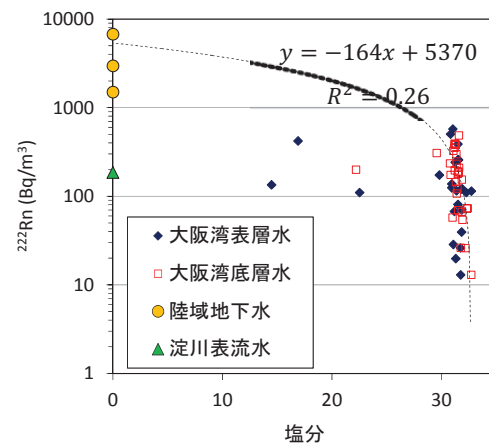


図-1 塩分と ^{222}Rn 濃度の関係

主成分分析の結果、第一主成分では栄養塩濃度と ^{222}Rn 濃度が大きな正の負荷量を、塩分が負の負荷量を示した。一般に、淡水性地下水は沿岸海水に比べて栄養塩濃度や ^{222}Rn 濃度が高いことから、主成分 1 は淡水性地下水の影響度を表す指標であると解釈可能であった。主成分得点の空間分布を図-2 に示す。陸域に近い地点の底層水ほど淡水性地下水湧出の影響が強く現れており、大阪湾北部港湾域の底層水の水質は、湧出地下水の影響を受けている可能性が示唆された。

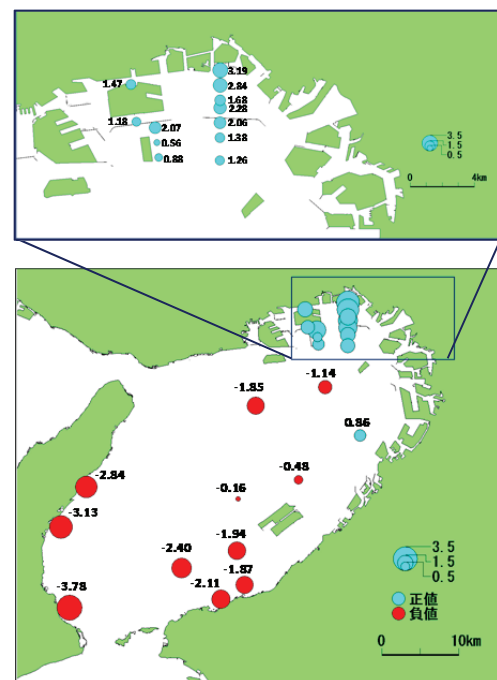


図-2 主成分得点の空間分布

^{222}Rn 濃度の鉛直分布について、観測結果とモデルによる再現結果の比較を図-3 に示す。 ^{222}Rn 濃度の鉛直分布は、水 - 大気間の拡散、地下水湧出に伴う供給、親核種である ^{226}Ra

の崩壊による生成, 河川水の影響を考慮した横流入および鉛直拡散といった素過程の組み合わせによって概ね説明可能であった. 逆推定の結果, 海底からの地下水湧出量は $0 \sim 2.2 \text{ cm/day}$ と見積もられ, 湾口部に比して湾奥部で高い値を示した.

2. 大阪湾奥部における残差流系と期間平均密度 σ_t (2月13日~28日の15日間平均) の分布について, 地形条件の違いによる比較を図-4に示す. 陸域から流入する低密度水の挙動や, エスチュアリー循環に起因する高気圧性循環流や潮汐フロントの規模・位置について差異がみられた. これより, 大阪湾では地形改変によって湾奥部の流動構造が大きく歪められたと考えられた.

M2 潮流振幅の分布について, 地形条件の違いによ

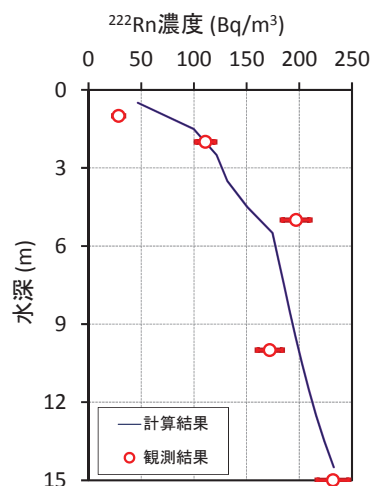


図-3 ^{222}Rn 鉛直濃度分布の観測・モデル再現結果

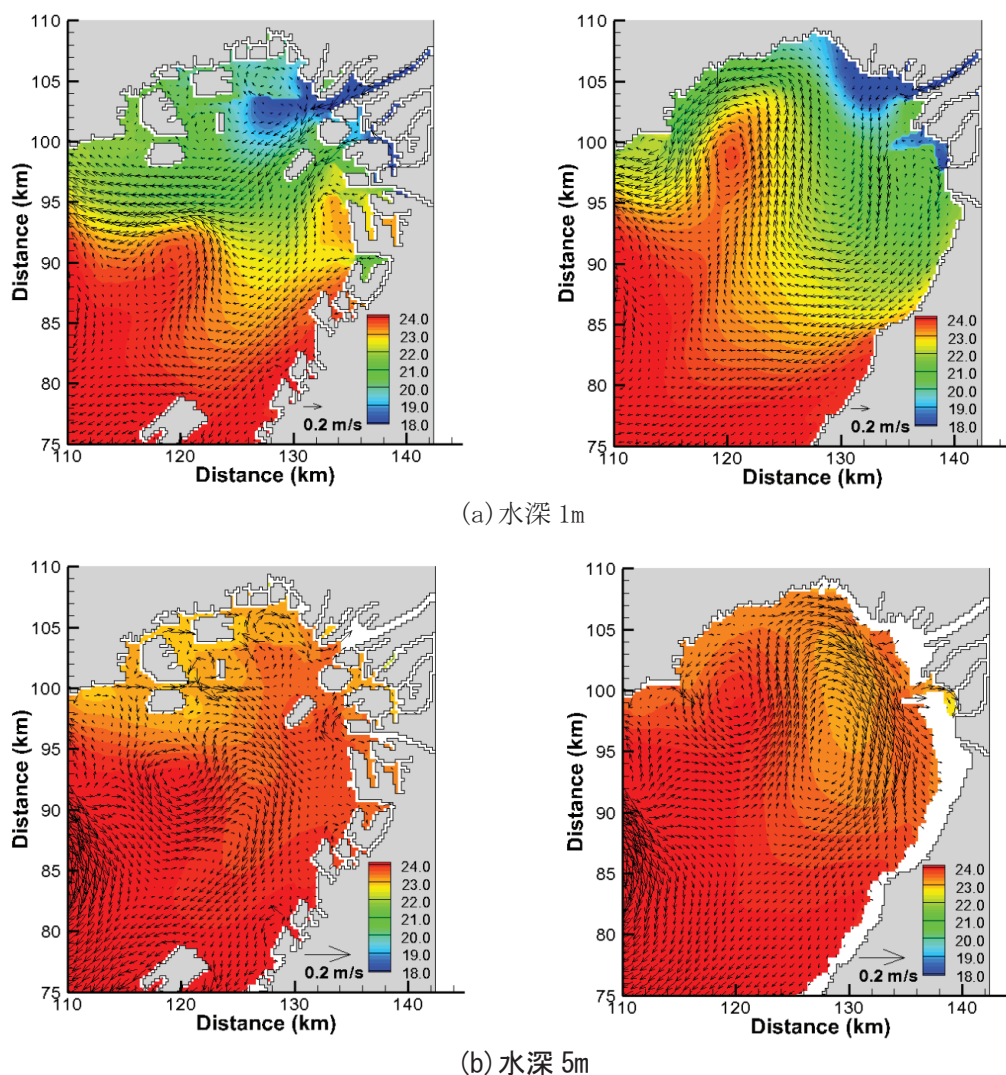


図-4 地形改変による残差流系と期間平均密度の分布の変化
(左: 現況地形, 右: 1930年代地形)

り生じた計算結果の差を図-5に示す。赤い部分が地形改変により潮流振幅が大きくなった部分、青い部分が小さくなった部分を示している。湾西部では広範囲で潮流振幅が小さくなっており、埋め立て等により海域面積が減少した結果、湾全体で潮流が弱化したものと考えられた。一方、湾東部では埋め立て地や人工島の付近で複雑に変化しており、局所的にみると狭窄部では $\pm 10\text{cm/sec}$ 以上の大きな差異が生じる結果となった。また、湾灘スケールでみると、播磨灘と紀伊水道ではともに潮流振幅が小さくなっており、大阪湾奥部の地形改変の影響は海峡部を通じて隣接海域にも及ぶことがわかった。特に、小豆島東部や沼島付近といった海峡部から離れた地点で比較的大きな変化が生じる結果となった。

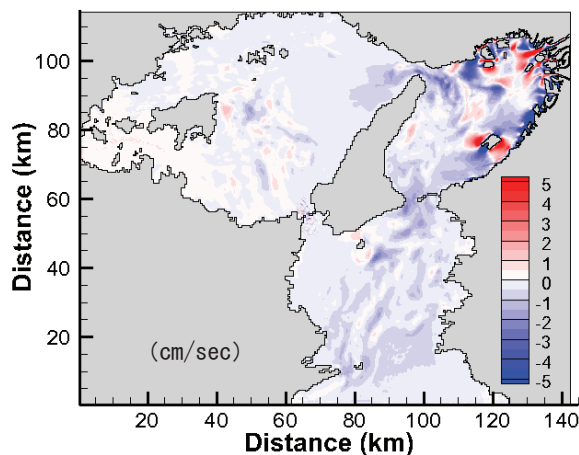


図-5 地形改変による M2 潮流振幅の変化

粒子追跡シミュレーションの結果の一例として、粒子放出後 72 時間経過後の分布を図-6に示す。図-4に示した西宮沖環流や潮汐フロントの規模や位置にみられる流動構造の変化に伴い、湾内の物質輸送場が大きく変化することがわかった。

4. 結論

本研究で得られた主たる結論は以下の通りである。

1. 主成分分析の結果より、大阪湾北部港湾域の底層水は海底湧出地下水の影響を受けていることが示唆された。また、鉛直一次元拡散モデルを用いて境界条件を逆推定した結果、海底地下水の湧出量は $0\sim 2.2\text{cm/day}$ と見積られ、湾口から湾奥部にかけて増大する傾向にあった。
2. 数値シミュレーションの結果、大阪湾の地形改変は、湾奥部における低密度水の挙動や西宮沖環流および潮汐フロントの規模や位置を大きく歪め、湾内の物質輸送を変化させることがわかった。また、地形改変は湾奥部の潮流場を局所的に大きく変化させ、その影響は隣接海域である播磨灘や紀伊水道にまで及ぶことがわかった。

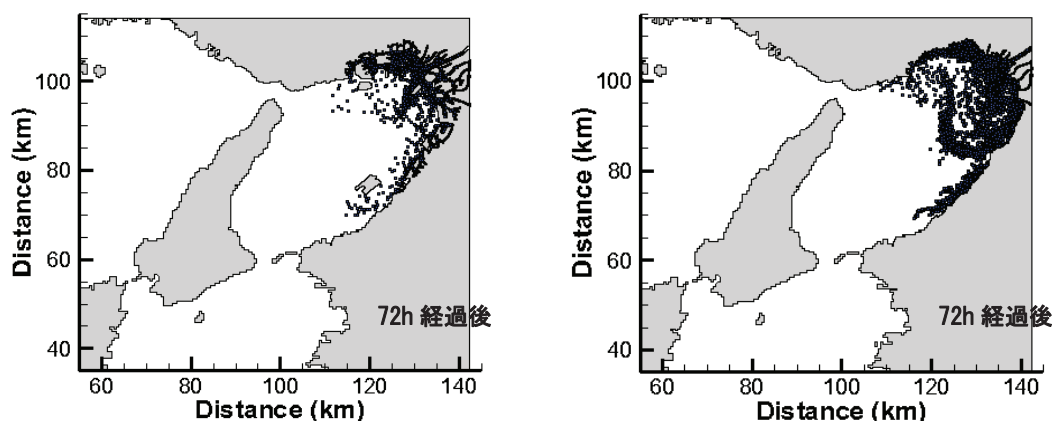


図-6 地形改変による粒子挙動の変化（左：現況地形，右：1930 年代地形）

埋立地・掘込航路等と貧酸素化の関係についての研究

藤井智康

奈良教育大学 教育学部 准教授

1. はじめに

大阪湾や東京湾は、閉鎖性の強い内湾であり、高度経済成長期以後の埋立により大きな地形変化が生じている。この地形変化は、埋立地の周辺海域や港内海域の流況に大きな変化を生じさせている。港湾規模では、埋立によって作られた複雑な水路状地形によって多くの停滞性の水域（よどみ地形）が作られるために海水交換や物質循環に大きな変化が生じ、栄養塩や DO（溶存酸素）等が変化し、貧酸素水塊の形成を複雑にしていると考えられる。また、下水処理場の多くは埋立地に立地し、水路状海域に処理水が排水されている。

これまでの発表者らの調査結果により、大阪湾奥部における貧酸素・無酸素水塊の多くは、港湾域内の「窪地」にできていることが明らかになった。ただ、下水処理排水が流入する海域では「窪地」以外でも底層の貧酸素化がみられた。これまでの国、県あるいは各試験場の調査では、湾奥部の水路内の調査地点が少ないために、水路内の貧酸素水塊の分布や形成過程はよくわかっていない。

本研究では埋立地周辺の水路内や停滞性の強い港湾域において、短い測定地点間隔で調査を行い、港湾域内の貧酸素水塊の分布と形成過程の場所的な違いを明らかにした。

2. 研究方法

埋立地周辺及び水路内の貧酸素水塊の分布と形成過程を明らかにするために、水路あるいは港内において、地形規模にあった多数の地点（数 100 m 間隔の短い測点間隔）を設定した調査を行った。大阪湾内の港湾海域の堺浜 14 か所、尼崎港 19 か所、神戸港 25 か所の計 58 か所で現地調査を行った。本報告では、堺浜における調査結果について報告する。調査地点を図 1 に示す。

各調査地点では、直読式総合水質計 AAQ-177（JFE アドバンテック社製）を用い、水温、塩分、DO（溶存酸素）、クロロフィル蛍光、pH の鉛直分布を水深 0.1 m 間隔で測定した。調査は、2014 年 8 月 4 日、9 月 26 日、11 月 17 日、12 月 8 日の計 4 回実施した。

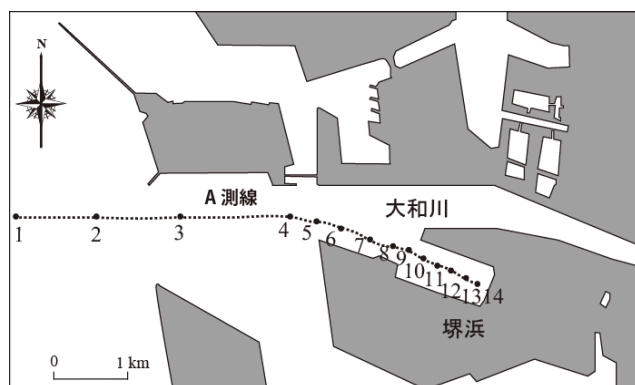


図 1 堺浜における貧酸素水塊分布調査地点。

S1→S14（図中は S を省略した。）

3. 調査結果及び考察

堺浜における DO、水温、塩分の分布を図 2～図 4 にそれぞれ示す。堺浜には深掘り跡（窪地）があり、窪地の平均水深は 12.7 m、最深部水深は約 17 m である。夏季から秋季には、この窪地に密度の大きい、冷水塊が滞留している（図 3(a), (b)）。また、この海域は大和川河口に位置し、河川水流入により、水深 4～5m 付近に塩分躍層がみられる（図 4）。

(a) 貧酸素水塊の分布

8 月 4 日および 9 月 26 日には、水深 2 m 以深に DO が 3 mg/L 以下の貧酸素水塊がみられ、窪地内の水深 10 m 以深に無酸素水塊がみられた（図 2(a), (b)）。11 月 17 日では、貧酸素水塊が上下 2 つに分かれ、上方の中心は水深 10m に上昇し、中層貧酸素水塊となっていた。一方、下方の DO は依然として 3 mg/L を下回っていた（図 2(c)）。12 月 8 日では、窪地内の停滞水塊が消滅し、DO が 3 mg/L を下回る水塊は確認されなかったが、窪地内は沖側よりも DO が低かった（図 2(d)）。

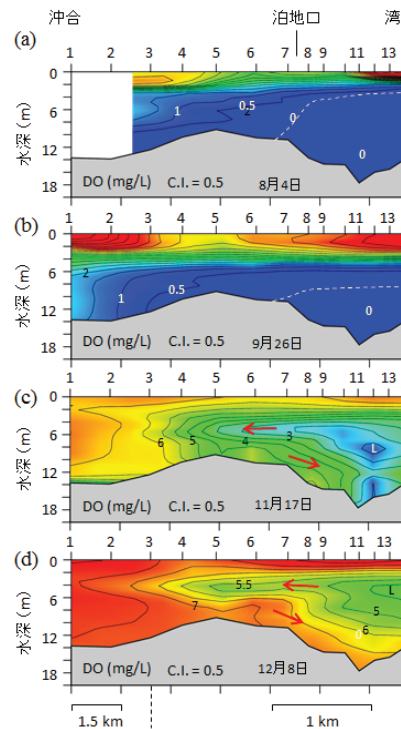


図 2 DO の分布.

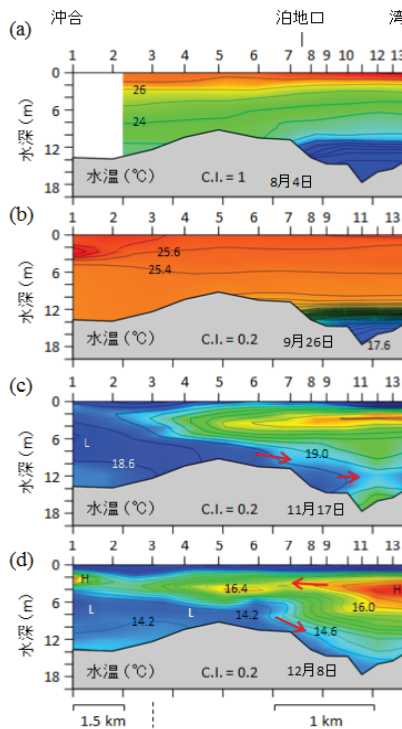


図 3 水温の分布.

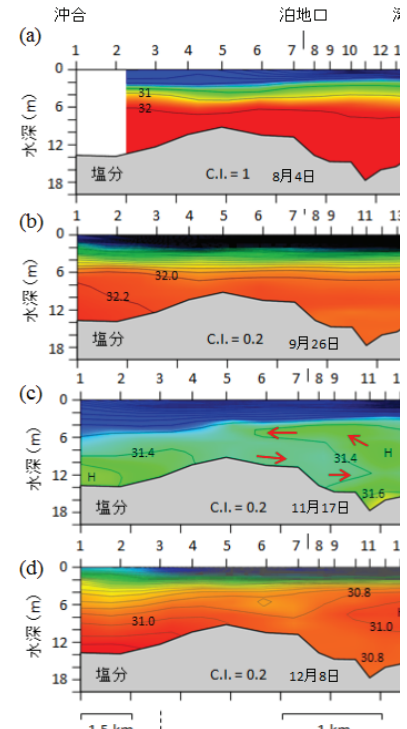


図 4 塩分の分布.

(b) 堺浜における沖合水の進入と中層貧酸素水塊

中層貧酸素水塊がみられた 11 月 17 日の塩分、水温、DO、密度 σ_t の縦断分布を図 5 に、St.S6 及び S11（窪地の最深点）における鉛直分布を図 6 にそれぞれ示す。11 月 17 日では、塩分については、沖合水と窪地内水で大きな差異は見られなかったが、水温については、窪地内よりも沖合水の水温が低かった。そのため、低水温の重い沖合海水が窪地内の水深 12 m 層に流入している（図 5(b)）。このとき、窪地内の St.S11 では、中層（水深約 8 m）の塩分が水深 12 m 層よりも高く、沖合水の進入により窪地内水が持ち上げられたことを示している（図 5(a)）。つまり、沖合水の進入によって、窪地内の貧酸素水塊は持ち上げられ、中層上部を通り、沖合に向かって拡がって

いる．ただし，流出の途中で希釈され，DO は上昇している（図 5(c)）．窪地外の St.S6 と，窪地内の St.S11 での鉛直分布も，上記の沖合水の進入と中層貧酸素水塊を示している（図 6）．

11 月 17 日にみられたような沖合水の海底面に沿った進入は，沖合中層水の密度が増加するとき（降温期）にはしばしば起きており，中層貧酸素水塊が何回も作られていた（図 7）．つまり，降温期には沖合水の進入進度が深く，窪地内に流入し，窪地内にあった無酸素水は持ち上げられ，中層貧酸素水塊になって沖合に出ていく．これが数回繰り返されて，貧酸素水塊がなくなっていた．

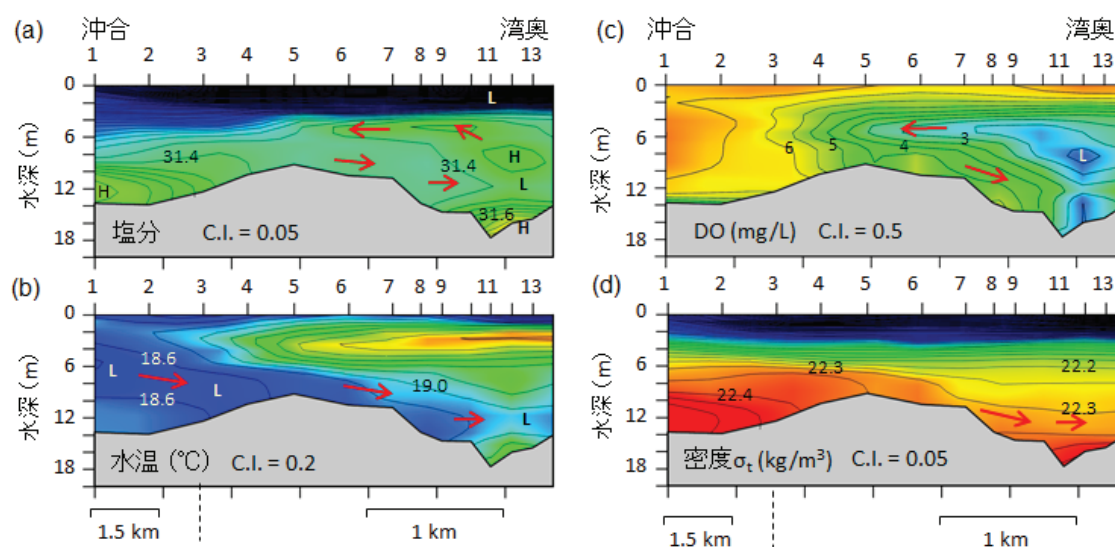


図 5 塩分，水温，DO，密度 σ_t の分布．
2014 年 11 月 17 日．

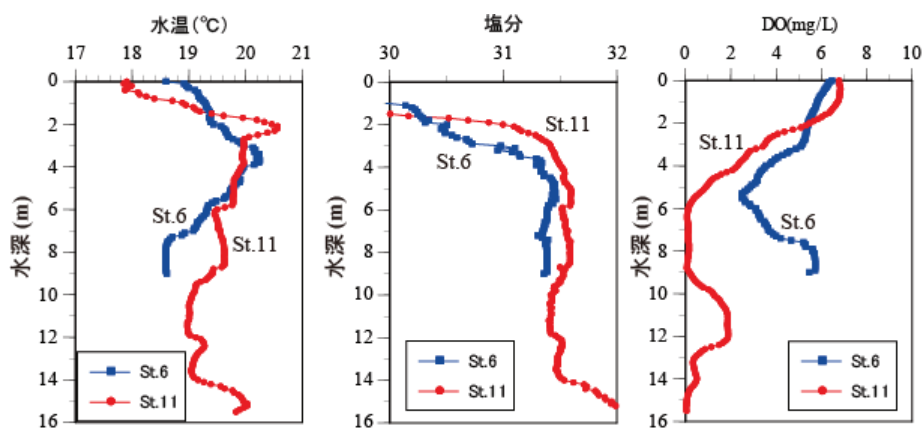


図 6 St.6 及び St.11 における水温・塩分・DO
の鉛直分布（2014 年 11 月 17 日）．

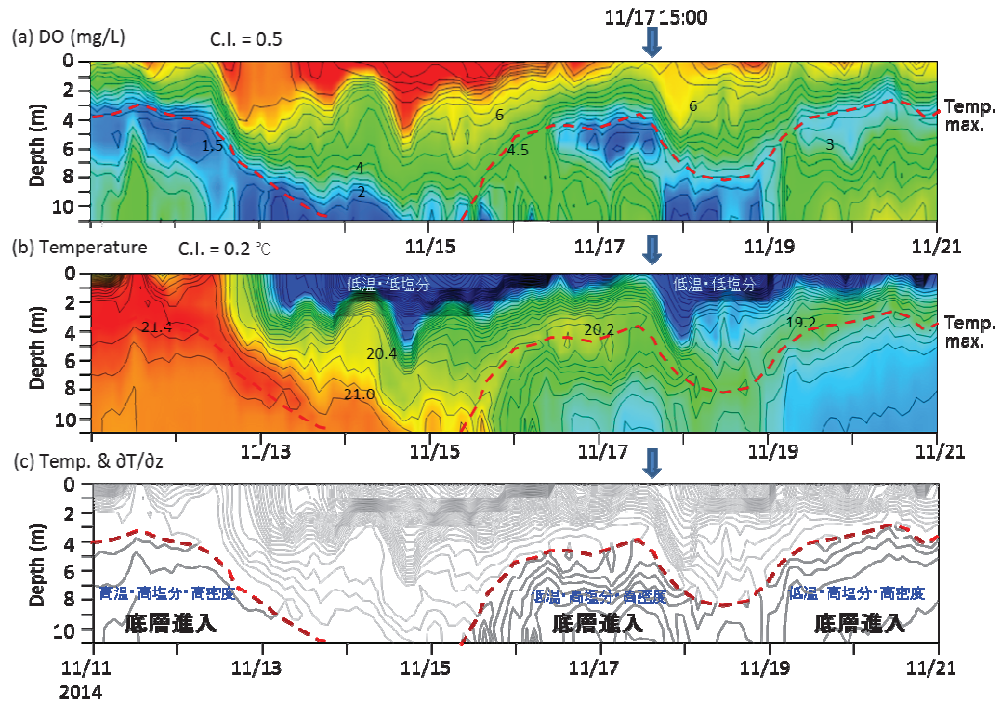


図 7 堺浜における DO，水温の鉛直分布の時間変化．

(a)DO, (b) 水温, (c)赤点線は水温最大線，陰影部は水温の鉛直勾配 ($\partial T/\partial z$) が正の領域，つまり上方ほど暖かい領域．水深 11 m までのデータであり，窪地内（水深 12 m 以深）の水質は測定されていない．

4. まとめ

海底地形に対応した詳細な貧酸素水塊分布調査により，貧酸素水塊は窪地や水路末端にできていることが明らかになった．堺浜のような河口域に位置し，河川の淡水流入の影響を強く受け，一年にわたって塩分成層した海域の貧酸素水塊の発生・消滅機構を模式化し図 8 に示す．岸近くの海域の中底層には，水平的な流れ（エスチュアリー循環流）によって沖合海域から熱・酸素等が運ばれている．沖合中層水の密度が減少するとき（昇温期）には，浅いエスチュアリー循環流となり，岸近くの底層の貧酸素化が進む（図 8(a))．一方，沖合中層水の密度が増加するとき（降温期）には，深いエスチュアリー循環流となり，岸近くの底層の貧酸素水塊は解消に向かう．この貧酸素水塊解消時には，中層貧酸素水塊が何回も作られている（図 8(b))．

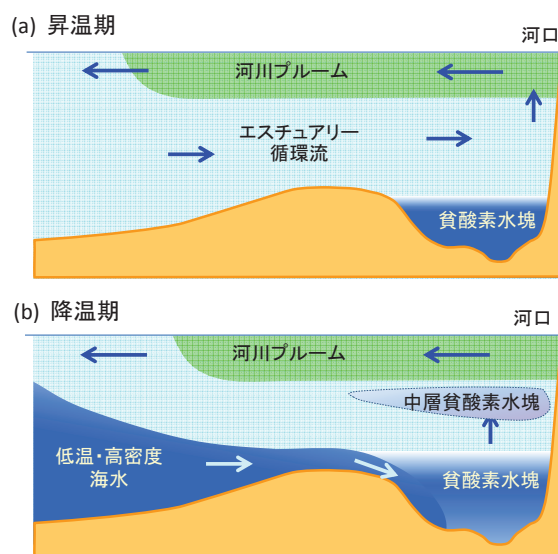


図 8 窪地の貧酸素水塊の発生・消滅機構

瀬戸内海を里海として機能させるための里山・川の物質循環機構の 解明と環境教育プログラムの実施

杉山 裕子

岡山理科大学理学部准教授

1. はじめに

美しい瀬戸内海を取り戻す取り組みの歴史は数十年と長い、美しくすることが豊かさに直接繋がるわけではないことが明らかになりつつある。瀬戸内海では富栄養化と赤潮による貧酸素化の改善のため、周辺都市で水質調査や排水規制を行ってきた。規制により、瀬戸内海の水質は改善され赤潮の発生は減少したが、1990年代後半から栄養塩不足によるノリの色落ち、漁獲量の減少といった問題が発生するようになった（反田・原田 2012）。このことから、水質を改善するだけでなく、生態系サービスをはじめとしたさまざまな機能を取り戻すことが重要であると考えられる。「美しさ」と「豊かさ」を両立するためには物質循環に関する知識が不可欠である。本研究は、里山から里海への物質循環の繋がりを取り入れた水環境・水系生態系の保全の基礎となる考え方を観測データと陸水学的考察に基づいて提案することを目的として行った。本研究の試験地である播磨灘は、流入河川周辺に里山や都市部・工業地帯が存在するなど陸域からの負荷が大きい海域であり、瀬戸内海のなかでも栄養塩濃度が比較的高いとされている。本研究では、播磨灘と、その主な流入河川である揖保川・市川・加古川に着目し、栄養塩類の形態別分析、クロロフィル a 濃度分析・溶存有機物の濃度分析と蛍光分析を行った。また、物質循環を意識した環境教育プログラムの実施を試みた。

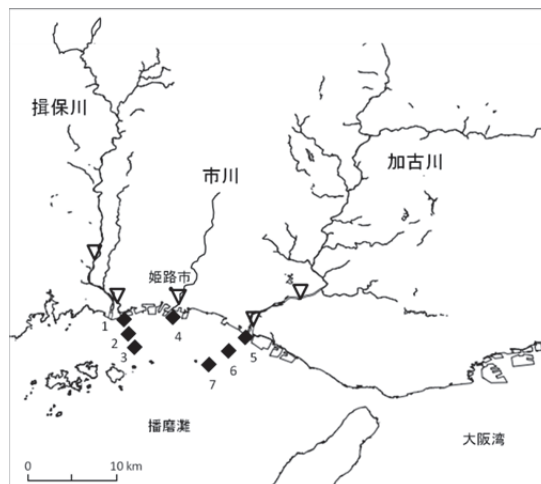


図 1: 播磨灘と流入河川における試料採取地点。それぞれの試料採取地点は、河川水を▽、海水を◆で示す。

2. 方法

2014 年 9 月、12 月に揖保川・市川・加古川の中流・下流および播磨灘において調査及び試料の採取を行った（図 1）。海水は 9 月には表層で、12 月に表層と中間層で採取した。河川水と海水表層水はプラスチック製バケツを用いて、また表層水以外の水深の海水はバンドーン型採水器にて採取した。採取したサンプルは実験室に持ち帰り、その日のうちに GF/F フィルターおよびメンブレンフィルターでろ過し分析まで冷暗所にて保存した。溶存有機炭素濃度(DOC)、アンモニア態窒素濃度(NH₄-N)、亜硝酸態窒素濃度(NO₂-N)、硝酸態窒素濃度(NO₃-N)、リン酸態リン濃度(PO₄-P)測定用の試料は GF/F フィルターで濾過し、ケイ酸態ケイ素濃度(SiO₂-Si)測定用にはメンブレンフィルターで濾過した試料を用いた。各栄養塩濃度は Bran+Lubbe 社製オートアナライザ(QuAAtro)で測定した。DOC 濃度は島津製作所製 全有機体炭素計(TOC-5000A)、クロロフィル a 濃度は島津製作所製 紫外可視

分光光度計(UVmini-1240)で測定した。また、溶存有機物の濃度・蛍光特性を明らかにするため、三次元励起蛍光スペクトルを堀場製作所製の蛍光分光光度計Aqualogを用いて測定した。

3. 結果と考察

3-1. 栄養塩類の動態

2014年9月・12月の表層海水の栄養塩濃度測定の結果、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は0.018-0.446 mg/L、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度は0.004-0.058 mg/L、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は0.005-0.204 mg/L、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は0.005-0.092 mg/L、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 濃度は0.015-4.332 mg/Lの値を示した。

$\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は9月の揖保川河口で0.446 mg/Lと高い値を示した以外は、9月・12月の河川間、沖合間の値に大きな違いは見られなかった。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度は河口において揖保川河口が0.058 mg/L、加古川河口が0.050 mg/Lと、市川河口の0.004 mg/Lと比べて高い値を示した。また、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度も河口で9月の揖保川河口が0.204 mg/L、加古川河口が0.173 mg/Lと、市川河口の0.005 mg/Lと比べて高い値を示した。12月は $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度ともに9月と比べて河川間、沖合間に大きな違いは見られなかった。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は河口で9月に揖保川河口0.079 mg/L、市川河口0.055 mg/L、加古川河口0.033 mg/Lの順で高い値を示したが、12月は加古川河口0.092 mg/L、市川河口0.055 mg/L、揖保川河口0.046 mg/Lの順で高い値を示した。 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 濃度は9月の揖保川河口で4.332 mg/Lと、市川河口0.034 mg/L、加古川河口0.273 mg/Lと比べて高い値を示した。12月は揖保川河口1.062 mg/L、市川河口0.491 mg/L、加古川河口1.693 mg/Lと9月ほど河川間に大きな違いは見られなかった。

このように9月・12月の各沖合表層海水の栄養塩濃度の変動から、河川から沿岸域に供給される栄養塩濃度やその形態に、河川ごと、季節ごとの違いが見られた。また9月の揖保川河口において、(1) いずれの栄養塩濃度も高い値を示したこと、(2) 塩分が0.9%と加古川河口(3.0%)と市川河口(3.0%)より低いことから、揖保川河口は2河川河口より陸域の寄与が大きいと考えられる。

9月と12月の結果を比較すると、12月は河口から沖合にかけての栄養塩濃度の値の変動が9月ほど顕著でなかった。これは12月の表層海水では植物プランクトンによる栄養塩類の取り込みが9月ほど大きくなかったためだと推測される。

3-2. DOC濃度の変動とクロロフィルaの分布

2014年9月・12月のDOC濃度測定の結果、河川水のDOC濃度は0.5-2.7 mgC/L、海水は1.1-2.7 mgC/Lを示した。河川のDOC濃度は、9月は揖保川<市川<加古川の順で高い値を示し、下流で増加する傾向が見られた(図2(a))。12月は揖保川<加古川<市川の順で高く、加古川を除き下流で高い値を示した(図2(c))。季節による違いがあるものの、中—下流域の間で溶存有機物の流入があると考えられる。

沿岸のDOC濃度は、9月の揖保川沖合地点1で急激な増加が見られた以外は、

河口から沖合まで値の変動はなく、3 河川沖合間にも、大きな違いは見られなかった（図 2(b)）。12 月は 3 河川沖合ともに河口から沖合まで大きな変動はなく、3 河川沖合間でもほぼ同様な値を示した（図 2(d)）。

クロロフィル a 濃度は 1.4-10.1 $\mu\text{g/L}$ の値を示した。播磨灘における 9 月のクロロフィル a 濃度は、市川河口(10.2 $\mu\text{g/L}$)、加古川河口(6.6 $\mu\text{g/L}$)、揖保川河口(1.4 $\mu\text{g/L}$)の順で高い値を示した。加古川沖合では沖合に行くにつれて減少したのに対し、揖保川沖合では増加する傾向が見られた。揖保川沖合において、クロロフィル a 濃度は栄養塩濃度に対して逆の相関を示し、9 月の揖保川沖合では、揖保川から負荷された豊富な栄養塩を植物プランクトンが取り込み、一次生産を行っていることが分かった。12 月のクロロフィル a 濃度は 2.0-6.9 $\mu\text{g/L}$ を示し、9 月同様に市川河口(6.9 $\mu\text{g/L}$)、加古川河口(6.0 $\mu\text{g/L}$)、揖保川河口(4.2 $\mu\text{g/L}$)の順で高い値を示した。

3-3. 溶存有機物の蛍光特性

2014 年 9 月の三次元蛍光スペクトル測定の結果、腐植様物質ピーク（励起波長 Ex. / 蛍光波長 Em. : 294-318 / 406-439nm）とタンパク質様ピーク（Ex./Em. : 270-288 / 330-350 nm）が得られた（図 3）。

蛍光強度は、腐植様物質ピーク、タンパク質様ピークともに揖保川より市川、加古川で高く、特に加古川の腐植様物質ピークは、2 河川より蛍光波長が低波長側にピークが得られるなど、河川によって溶存有機物の蛍光特性が異なると考えられる。加えて、DOC 濃度が下流で増加しているにもかかわらず、河川の蛍光強度は 3 河川ともに下流で低くなる傾向が見られた（図 3(a)、(b)）。DOC 濃度の変動を考慮すると、流量増加による見かけの濃度の減少は考えにくい。したがって、生物活動もしくは支流や排水の流入により、非蛍光性有機物の割合が高い溶存有機物が負荷されていると考えられる。

沿岸では、揖保川河口表層で腐植様物質ピークの蛍光強度が高く、河口から沖合にかけてこの蛍光強度が減少する傾向が見られた（図 3(c)-(e)）。蛍光強度の高さは揖保川より低い、加古川沖合でも沖合に行くに従い減少する傾向が見られた。また揖保川沖合のスペクトルでは、河川や河口のスペクトルに比べて励起波長が低波長側にピークが得られたことから、沖合の溶存有機物は河川や河口の溶存有機物と蛍光特性が異なると考えられる。

3-4. 環境教育プログラムの実施

3-4-1. 兵庫県立柏原高等学校における環境教育の実施

2014 年 8 月 11 日、兵庫県立柏原高等学校実施の「知の探究コース」夏季校外学習において、兵庫県姫路市香寺町須加院「はりま里山研究所」の里山と河川（市川上流部）にて高校生向け環境教育を行った。里山では、兵庫県立大学環境人間

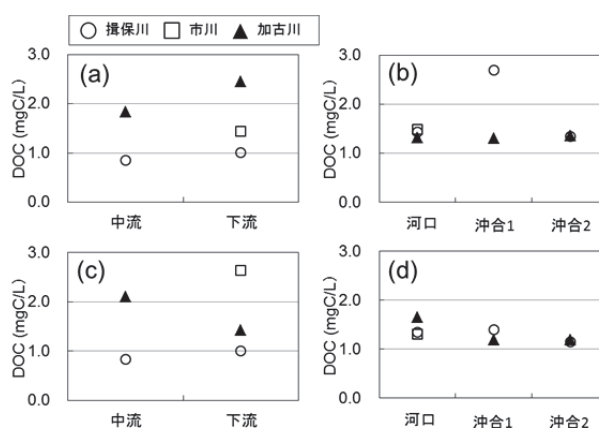


図 2 : DOC 濃度の水平分布。それぞれ(a)9 月の各河川水、(b)9 月の各河川沖合の海水、(c)12 月の各河川水、(d)12 月の各河川沖合の海水の結果を示す。

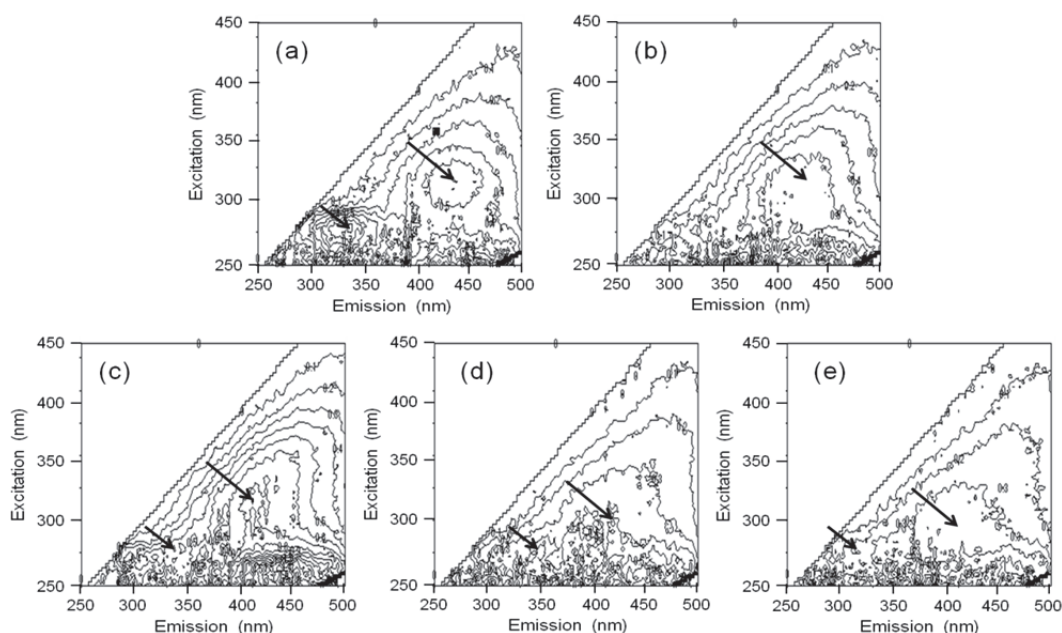


図 3：三次元蛍光スペクトル。例として 2014 年 9 月の揖保川河川水と揖保川沖海水のスペクトルを示す。それぞれ(a)揖保川中流、(b)揖保川下流、(c)揖保川河口、(d)揖保川沖合 1、(e)揖保川沖合 2、のスペクトルである。また、

学部 熊谷哲教授による里山の利用とこれからの活用法の体験講義を、河川では簡易水質検査キット「パックテスト」を用いての体験調査を行い、里山・河川・海までの物質動態、生態系や人間活動との関係性を理解してもらえるよう努めた。

3－4－2．兵庫県立加古川南高等学校における環境教育の実施

2014 年 6 月～12 月、兵庫県立加古川南高等学校において、兵庫県立大学環境人間学部 熊谷哲教授の指導のもと、簡易水質検査キット「パックテスト」や紫外線吸光光度計を用いて水質分析の体験を実施した。また分析結果は、2015 年 2 月 1 日に神戸国際展示場で行われた「サイエンスフェア in 兵庫」にて、高校生ら自ら発表を行い、身近な河川の水質と周辺環境とのつながりについて理解・考察を深めた。

参考文献

原田・反田 (2011) 河川からの窒素負荷量変化が播磨灘の溶存態無機窒素(DIN)濃度変動に与える影響、兵庫農水技総セ研報（水産）、42、87-91

大阪湾底質の魚類胚に与える汚染影響リスク評価と今後の底質環境修復のための現状把握

宇野 誠一

鹿児島大学水産学部

准教授

1. はじめに

大阪湾は紀伊半島から神戸市、淡路島に囲まれ、明石海峡と友ヶ島水道に2つの狭い湾口を持つ以外には水の出口がない。そのため日本の中でも水交換率が特に悪い水域の1つとなっている。この海域は日本でも有数の大都市である大阪市、神戸市に接しており、また神戸市から泉大津市にかけての海岸域一帯は大規模な工業地帯が連なっている。加えて海岸域に沿って阪神高速など交通量の多い幹線道があるため、自動車や工場排ガス、排水を介して人間活動由来の化学物質が常時流入している。さらに湾内には淀川を初めとする幾つかの河川水が流れ込んでいるが、この多くが人口密集域を流れ陸上域における人間活動由来の化学物質を大量に含み、この流入負荷も無視できない。これら様々な要因により、大阪湾はかなり化学物質汚染が進んでいる状態にある。湾内に入り込んだ化学物質は最終的に海底質に到達し、特に分解性の小さい物質は少しずつ底質中に残留、蓄積することになる。このような化学物質は無数にあると予想される。底質では海底質付近を住处とする底生生物が化学物質から何らかの影響を複合的に受けている可能性があるが、その状況はほとんど分かっていないのが現状である。

これまで我々は大阪湾において、底質や水生生物などの化学物質分布や動態を調査してきた。その結果、特に底質中からは数多くの化学物質をこれまで検出し、物質によってはかなり高い濃度で残留していることを明らかにした。他にも大阪湾では我々以外の研究グループによっても数多くの化学物質モニタリングが行われている。こういった調査から明らかになる化学物質濃度や動態パターンから、湾内底質に生息している生物に対する影響を予測するのは、実はかなり困難である。それは、現在、化学物質審査法などの化学物質管理においても、生物影響評価は単一の物質に対して行われており、実環境を考慮した複合暴露影響などを含む影響評価が現実的には行われていないこと、あるいは湾内には通常の実験技術では検出不可な物質や未知の化学物質も多数ありその生物影響は未知であること、などが要因となっている。加えてこれまで確固たる底質影響試験法は確立されていない。しかし、大阪湾のような汚染の進んだ海域の環境修復・再生を効率良く行うためには、まず汚染や生物影響リスクの現状を知り、そのデータをもとに計画的に進めていくことが必要である。

魚の卵(胚)は未成熟であり、魚類の発生段階の中で最も化学物質暴露影響を受けやすい。これまで魚卵を用いた毒性試験は数多く行われてきた。日本ではヒメダカ(*Olyzias latipes*)は多くの化学物質を対象としてその影響試験が行われており、多くの影響の知見が蓄積されて

いる。また、飼育が容易なため、常時、卵から成魚まで入手可能でいつでも容易に試験が行える。最近、我々は飼育水を必要とせず、間隙水の役割をする僅かな量の水を添加した底質上にヒメダカ胚を置き、孵化直前まで発生させる手法を確立した。本法は野外で採取した底質でも適用可能である。また、ヒメダカ胚発生のためにこれまで底質影響の直接的評価を難解にしていた直上水を加える必要がなく、底質に含まれる化学物質の胚の直接の影響を観察することが可能となった。我々は上記底質試験法を用いて、日本の幾つかの現場から底質を採取して、胚に対する影響を調べ、実際の試験に適用可能であることを確認した。本法ではそのエンドポイントとして致死、孵化率、そして孵化後の奇形発生率などを指標として、それを総合して底質の影響を判断する。

メタボロミクスは糖類やアミノ酸、有機酸など生体内代謝物の変動情報(メタボローム)を網羅的に収集し、生体内で今何が起きているかを調べる手法である。言い換えれば今の生物の健康状態を知ることができる手法である。近年、環境汚染物質影響評価法としても注目されているが、実環境の汚染影響評価に適用した例は極めて少ない。代謝物情報は遺伝子などと比べるとはるかに情報量が少ないが、反面、ゲノム情報を必要とせず、代謝物質や代謝経路の多くが生物種を通して共通しているため、多くの生物に対してその手法や情報が共有できる利点を持つ。我々はこのメタボロミクス研究を精力的に行い、化学物質影響評価への適用、さらには実環境影響評価への適用などの検討を行ってきた。これまで我々は魚体内のメタボローム情報を定性可能不可能にかかわらず、これを網羅的に収集して統計処理し、個体が化学物質暴露により受けた影響、特に化学物質暴露により生物の健康がどの程度影響を受けたかを1つの数値で示す方法開発を行って来た。そしてこのメタボローム情報を収集した解析法により、個体が受けた総合的な影響の大きさを数値で示すことを可能とした。

我々は上記のヒメダカ胚を用いた底質試験法とメタボロミクスの数値化法を組み合わせることで軽度な健康影響から致死までの過程を盛り込んだ、新しい底質の魚類胚に対する影響評価が行えるのではないかと考えた。そこで、本研究では実際に大阪湾で底質を採取して実験室に持ち帰り、底質の影響試験を行う。さらにメタボロミクスにより胚の健康状態をとらえ、死亡から微細な健康上影響まで全影響を総合して、底質のヒメダカ胚に対する影響の大きさを数値として表すことにより、大阪湾底質の生物に対するリスクの現状を明らかにすることを目的とした。リスクを示す数値を地点間で比較して、大阪湾底質の生物リスクの地点間差等を調べ、淡路島から和歌山側までの大阪湾底質汚染の現状を明らかにすることを最終目標とする。平成26年度は大阪市を中心とした海岸域の底質の影響評価を行った。

2. 方法

平成26年度は大阪市近郊の海岸域の6ヶ所から底質を採取した(図1)。この底質を僅かな水分を含んだ各地点の底質をガラスシャーレに敷き詰めた。底質上にヒメダカ胚を設置し、23℃で7日間飼育し、発生させた。その後、滅菌水を入れたマイクロプレートに胚を移し、胚の生存確認、孵化までの日数の計測、発生の遅延などを顕微鏡観察し、さらに孵化仔魚の奇形の有無なども調べた。

また、別途、メタボロミクス解析を行うために底質入りシャーレを各地点で5つずつ用意した。

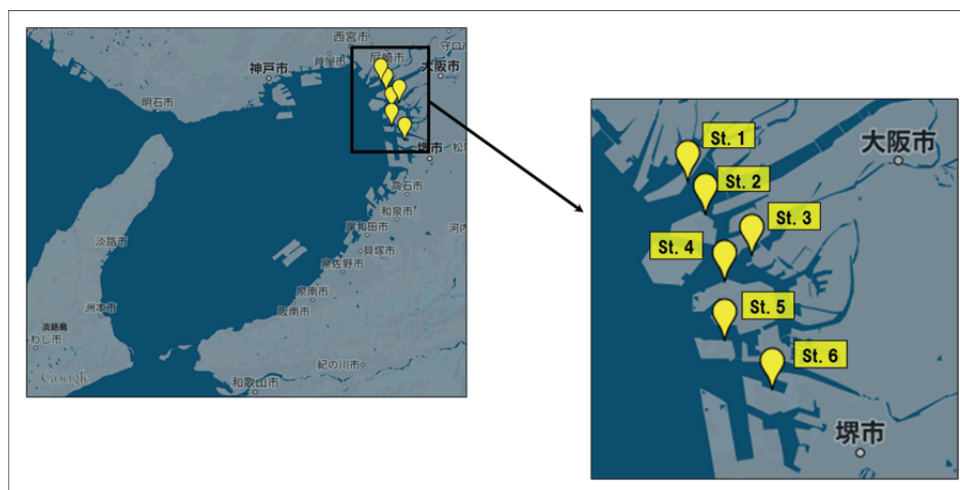


図1 サンプルング地点

そこに1つのシャーレに胚を25個ずつ設置した。6日目までインキュベータ内で飼育を行った後、胚をサンプルングして代謝物分析に供した。

影響の数値は死亡率のファクターの比率が最も大きくなるように設定しており、次に孵化率、孵化日数のファクターの順にその比率を小さく設定した。メタボロミクスから得られる数値は主成分分析の結果から算出した。

3. 結果と考察

表1に底質毒性試験から得られた死亡率、孵化率、平均孵化日数を示した。孵化率はSt. 1で胚は30個体中12匹が未孵化であり、その孵化率は60%とコントロールと比べると明らかに孵化率が低かった。また、St. 2とSt. 4では若干の孵化率の低下が観察された。この結果から、St. 1の底質はヒメダカ胚に与える毒性影響は他の地域よりも強く、また、St. 2と4についてもある程度の毒性影響は与えるリスクがあると考えられた。孵化日数については、コントロールと比較すると全ての区で有意な差が観察された。特にSt. 2ではコントロールよりも約6日の孵化遅延が見られ、また、St. 1、5及び6も3~4日程度の孵化遅延が見られた。孵化日数の遅

表1 魚類胚の底質毒性試験における各地点の死亡率、孵化率、孵化日数

	死亡率(%)	孵化率 (%)	孵化日数(日)
コントロール	3.33	96.7	10.4 ± 0.946^1
St. 1	3.33	60.0	$13.8 \pm 0.832^*$
St. 2	0	80.0	$16.2 \pm 2.32^*$
St. 3	0	100	$11.8 \pm 0.830^*$
St. 4	3.33	80.0	$12.6 \pm 1.50^*$
St. 5	3.33	90.0	$13.4 \pm 2.42^*$
St. 6	0	100	$13.9 \pm 2.60^*$

1: 平均 $\pm$ 標準偏差、*: $p < 0.05$ で有意だったもの

れは卵が他の生物から捕食されるなどのリスクが高くなると判断された。

メタボロミクス解析より得られた PCA スコアプロットを図 2 に示す。PCA の結果、コントロールにごく近い部分に St. 3 と 6 がクラスターを形成し、その他の地点は PC1 方向にコントロールから離れた位置にクラスターを形成した。

上記の底質毒性試験とメタボロミクス解析の結果から算出されたリスクファクターを総合し、それを総リスクファクターとして図 3 に示した。総リスクファクターが最も大きかった地点は St. 1 であり、その数値は他の地点と比べると遙かに高いものとなった。St. 1 は中島川と淀川が両河口で合流している地点である。中島川は幾つかの河川が最終的に合流して中島川を形成しているが、特に尼崎市を中心とした中島川周辺には広く工業地帯が広がっており、これが生物に影響を与えるような物質の排出源になっている可能性が考えられた。リスクファクターが 2 番目に高かった地点は St. 2 であった。St. 2 はやはり淀川河口付近に位置する。3 番目にリスクファクターが高かった St. 4 も地形的にある程度淀川の水の流入がある地域であろうと予測されたが、ここは他にもいくつかの要因が胚への影響に関わっていたかもしれない。

このように今回調査対象とした大阪市近郊では、特に淀川河口域一帯の底質が生物に与える影響リスクが強い、ということが本研究の結果から示唆された。

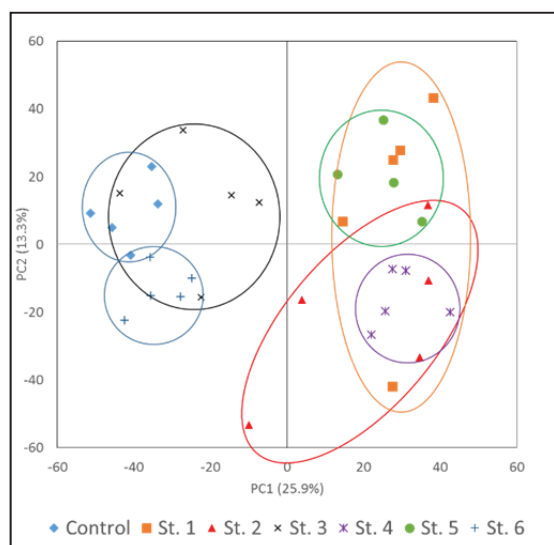


図 2 メタボロミクス解析から得られた主成分分析の結果

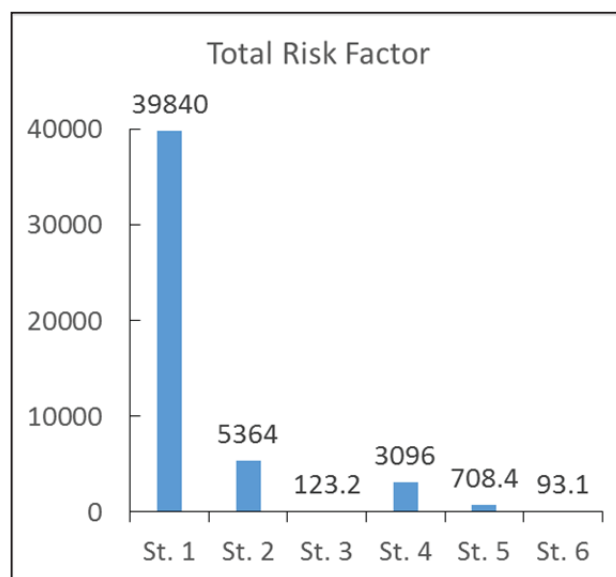


図 3 各調査地点における総リスクファクター

沿岸海域において透明度を低下させる原因物質の解明

奥田 哲士

広島大学 環境安全センター・助教

平成27年7月

【研究目的】

大阪湾圏域の環境保全、生産能の増加に寄与するため、一次生産に直接関係する透明度に影響する粒子の影響調査を行う事を目的とした。

過去の研究で、人的由来の大きい沿岸から離れた海域においては透明度がクロロフィル *a* (Chl. *a*) 量と逆相関を持つことがわかっているが、植物プランクトンだけでは説明できない。都市部の沿岸域では無機粒子の寄与も以前大きいと考え、本研究では、溶存成分と懸濁物質の寄与率を定量化、さらに透明度の低下に影響の大きい粒子サイズなどを明らかにする事を目的とした。溶存有機物質の寄与が大きい場合は、溶存有機物質の蛍光分析 (EEM) から特定の有機物質の影響についても検討する事とした。これにより沿岸域の透明度を制限する因子を定量化、最終的には流入源と原因物質の特定に寄与する情報の蓄積を目指した。

【成果概要】

研究期間中に、大阪湾については2回の調査（加えて期間外に1回）、比較海域とした広島湾は4回の調査を行った。透明度、光減衰係数、懸濁物質質量、Chl. *a* 量、マイクロ～ナノ粒子の濃度等の水質測定に加え、一部については底質堆積物の特性調査を行った。

大阪湾の透明度低下の要因として、まず溶存着色有機物質に比べて懸濁物質の影響が大きく、Chl. *a* 量で大まかな説明ができた為、植物プランクトンが寄与している事が確認できた。しかしながら植物プランクトン以外の粒子の影響も確認でき、1 μm の粒子が透明度の減衰に大きな影響を持つ可能性が示された。よって、構成粒子サイズが海域の光環境にとって重要である可能性があることがわかった。

【背景】

河口域では、河川から流入する豊富な栄養塩を利用して植物プランクトンによる活発な一次生産が行われており、河口以外の沿岸域でも魚類等の生息場にもなるアマモや底質表面の微細付着藻類が一次生産を担っている。それらの増殖に必要な光を透過させる指標である透明度は、一次生産の健全性の重要な指標である。

過去の研究において、水中の光減衰における要因としては有色溶存有機物 (CDOM) や植物プランクトンなどの懸濁物質が報告されており、大きな河川が存在する場合、フミン物質を主成分とする CDOM が主となる可能性もある。大阪湾では経年的な透明度の改善がみられているが、さらなる改善の為には藻類繁殖（初夏）時以外の沿岸域の透明度を制限する因子を特定、河川等の影響を把握する必要がある。

加えて近年、ナノ粒子の測定技術が向上しており、ナノ粒子サイズの透明度への影響も検討できる状況になっている。

【研究方法】

大阪湾において 2014 年 9 月 1 日、11 月 7 日（研究期間ではないが関連して 3 月 3 日も）、広島湾でも 5 月 26 日、7 月 28 日、9 月 26 日、11 月 26 日に下図の地点等で調査を行った。

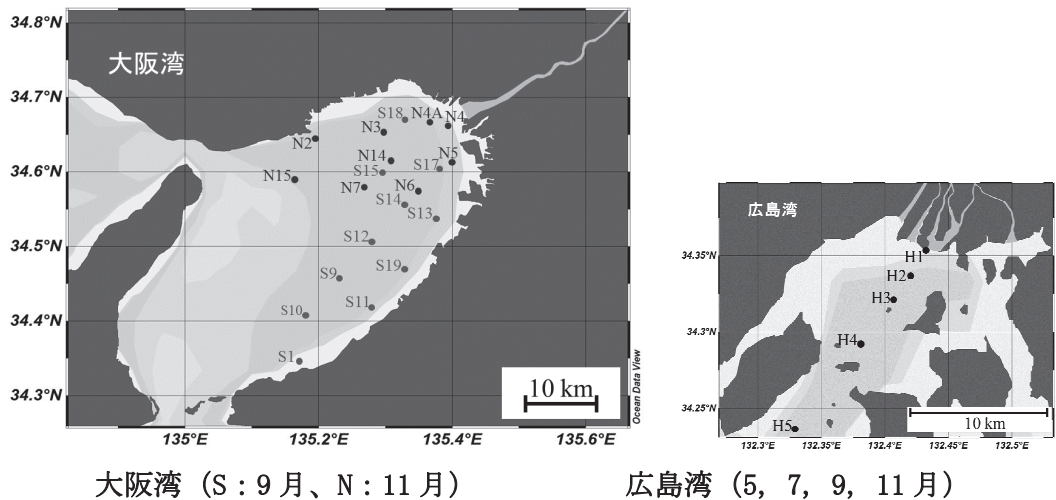


図 1 サンプルング地点

本調査では多項目水質計 CTD (AAQ-RINKO JFE アドバンテック社) を用いて、水深 1 m 間隔の水温、塩分、濁度、光量等の水質項目の測定を行った他、バンドーン採水器を用いた中・深層水の採水を実施し、実験室にて Chl. *a*、TSS 濃度等を測定した。Chl. *a* 濃度はロレンチェン法に従って、懸濁物質質量 (TSS) はガラス繊維ろ紙 GF/F (孔径 $0.7 \mu\text{m}$) を用いて測定した。有色溶存有機物 (CDOM_{440}) は、GF/F を用いて試料をろ過した後、ろ液の吸光度を吸光度計 UV-1800 (SHIMADZU) で測定して求めた。溶存有機物質の励起蛍光マトリックスの測定も行った。他に海水中の粒子の粒度分布を、数 μm 以上の粒子はレーザ回折式の粒度分布測定装置である SALD-300V (SHIMADZU) により、数 μm 以下の粒子はナノ粒子マルチアナライザー qNano (Izon) により測定した。

本研究の対象である透明度は測定者の視力や天候に左右されてしまうため、また溶存物と懸濁物質の寄与率を定量的に分ける必要があるため、光量子を評価に用いた。指標には光量子を表層の光量子で割って (標準化) 光減衰係数 K_d を算出、光減衰の要因である海水、CDOM、TSS による光減衰係数 K_w 、 K_{CDOM} 、 K_{TSS} を以下の式から算出した。

$$\begin{aligned}
 K_d &= K_w + K_{\text{CDOM}} + K_{\text{TSS}} \\
 K_w &= 0.038 \text{ m}^{-1} \\
 K_{\text{CDOM}} &= 0.221 \times \text{CDOM}_{440} \\
 K_{\text{TSS}} &= K_d - K_w - K_{\text{CDOM}}
 \end{aligned}$$

K_w , K_{CDOM} , K_{TSS} : 海水、CDOM、TSS の光減衰係数 [m^{-1}]

サンプルングに際してはまず、国土交通省の瀬戸内海総合水質調査の測定地点のうち数点、同じ場所を選定し、我々の透明度や Chl. *a* の観測結果と過去の測定値を比較して、分析の精度確認を行った。

上に加えて回分試験として、新規の説明要因の調査のための回分試験として、数 μm 以下の粒子の透明度への影響を検討した。ここでは直径が既知の球状シリカ粒子を超純水にて希釈し、TSS 濃度が濁度および吸光度に及ぼす影響を調査した。使用するシリカ粒子の直径は 0.1、1、10 μm とし、TSS 濃度は 0~100 mg/L とした。

【実験結果および考察】

観測結果に基づく透明度の分布について、11月の結果を代表値として図2に示す。湾奥の河口近くで小さく、河口から離れるにつれて改善する傾向がみられた。これは表層中の物質が凝集、塩析、沈殿等で排除されているためと考えられた。光減衰係数 K_d についても図2に結果を示す。透明度と K_d は反比例の関係にあるので、透明度、 K_d 共に、河口では光が減衰しやすく、沖では減衰しにくい傾向が観測できた。また、広島湾と比較すると、大阪湾は河口（沿岸）での数値が高く、水量の大きい河川の影響が強いと考えた。

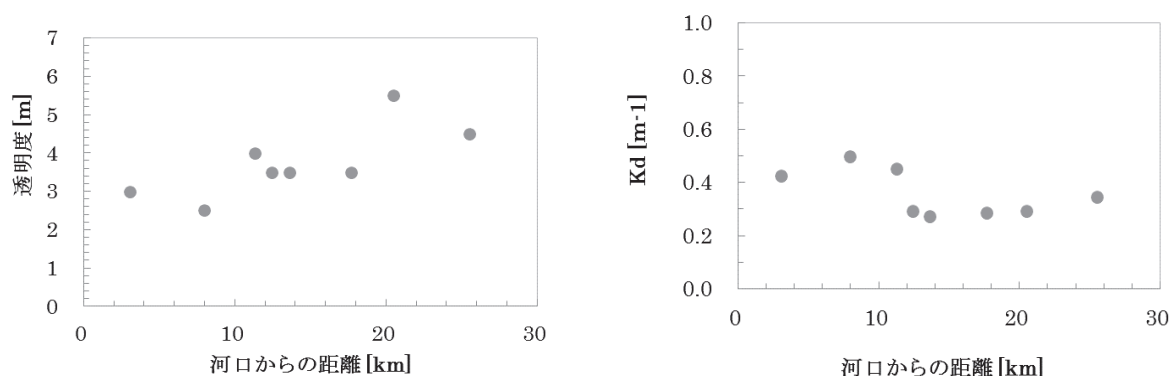


図2 大阪湾での透明度および K_d の分布（11月）

11月における大阪湾の光減衰を、海水自体、CDOM、懸濁物質（ TSS ）の3種に分画した結果を下図に示す。主要因は TSS であることがわかった。ちなみに広島湾でも一部地点を除いて同様の結果であった。

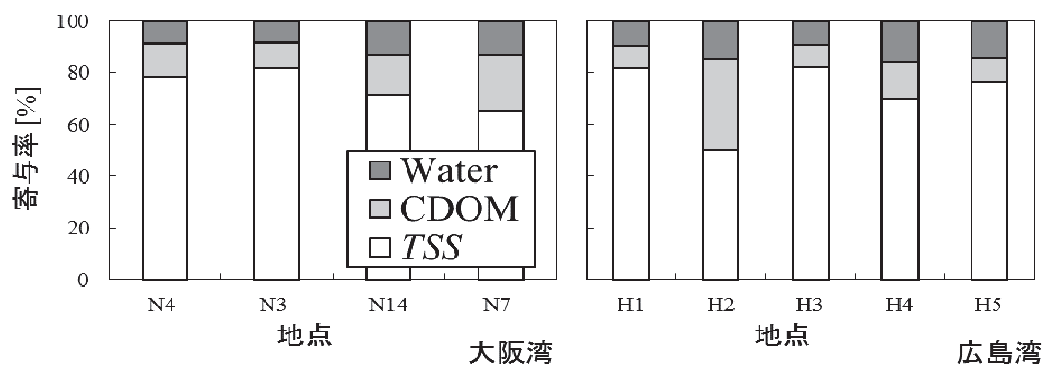


図3 光減衰への各要因の寄与率（左：大阪湾，右：広島湾）

粒子の透明度への高い寄与が確認されたため、透明度に対して TSS と $Chl. a$ との相関を調べた。結果、 R^2 は TSS で 0.3 未満の低い相関（逆相関）しか得られなかった。 $Chl. a$ も 9 月と 11 月の両結果での解析では、 R^2 が 0.05 と低かったが、11 月に限定すると R^2 が 0.65 まで上がり、参考に行った広島湾の 9 月と 11 月の両季節の結果を合わせた解析でも R^2 が 0.63 となっており、植物プランクトンが透明度の決定要因として重要であることが示唆された。しかし、11 月に比べて $Chl. a$ が高い 9 月（大阪湾の平均で 11 と 6 $\mu g/L$ ）で $Chl. a$ と透明度の逆相関が悪くなっていることから植物プランクトン以外の影響も大きいと考えられた。また、広島湾での同様の 9 月と 11 月両方のデータでの相関における切片が約 7 m であることに比べて大阪湾は約 4 m（相関が高い 11 月でも約 6 m）であることから、 $Chl. a$ の影響を排除した場合

の透明度が広島湾より低く、大阪湾では植物プランクトン以外の要因の寄与が大きい可能性が示唆された。

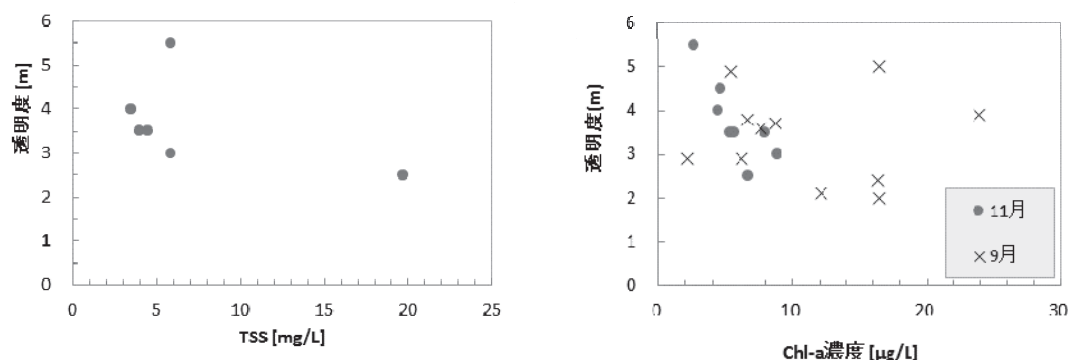


図4 透明度と TSS (11 月のみ) もしくは Chl. a の相関

透明度に及ぼす植物プランクトン以外の影響について、単純に無機粒子の量が影響しているわけではない事は TSS との相関が悪い事から明らかである。そこで我々は特定の大きさの粒子の影響が強いと仮定した、回分試験で粒子サイズが光減衰におよぼす影響として 3 サイズの粒子の濃度が濁度および吸光度に及ぼす影響を調査した。ここでは透明度に関わると考えられる波長 400~700 nm の吸光度の積分値を指標に用いた。3つの粒子径において 400~700 nm での吸光度の積分値は TSS 濃度と相関しており、積分値は $0.1 < 10 < 1.0 \mu\text{m}$ となり、 $1 \mu\text{m}$ で極大値をもっていた。これは粒子の大きさと波長の比が 1 に近い、すなわち波長と粒子直径が近いとその波長の光を吸収しやすい事を示唆している。

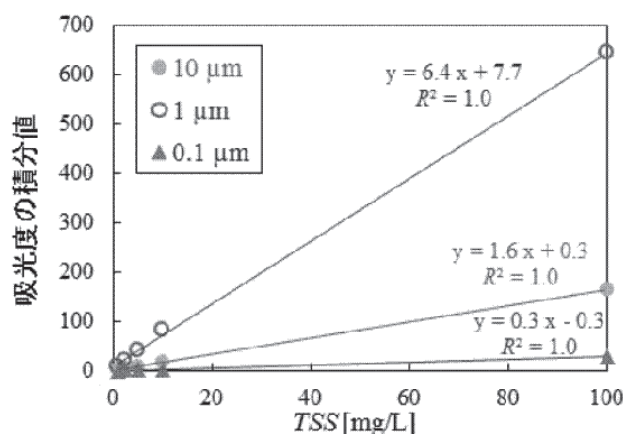


図5 各粒径のシリカ粒子の TSS 濃度と 400~700 nm での吸光度の積分値の関係

【結論】

大阪湾の透明度低下の主要因は植物プランクトンを含む懸濁物質であるが、懸濁物質とクロロフィルのみでの透明度低下の説明は困難であり、 $1 \mu\text{m}$ 付近の粒子量が透明度を決める重要な要因である可能性が示唆された。

研究期間 : 平成26年4月1日~平成27年2月28日

研究代表者: 代表研究者 奥田哲士 (広島大学 環境安全センター)

共同研究者: 西嶋渉 (広島大学環境安全センター)・浅岡聡 (神戸大学内海域環境教育研究センター)

