

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24年度実施）成果発表会

平成25年7月22日（月） 13:00～17:00
ラッセホール リリー

プログラム

◆開会

13:00～13:20

○ あいさつ

矢野 久志 大阪湾広域臨海環境整備センター常務理事

○ 大阪湾フェニックス事業の概要

角田 康輔 大阪湾広域臨海環境整備センター環境課長

◆個別発表

13:20～16:30

1. 河川下流から河口域にかけての有毒赤潮発生機構の解明と抑制方法の検討（その2）

林 美鶴 神戸大学自然科学系先端融合研究環内海域環境教育センター

（代理発表：古賀 竜太郎 神戸大学大学院海事科学研究科）

2. 淀川河川水からのリン供給が麻痺性貝毒原因渦鞭毛藻*Alexandrium tamarense*および珪藻*Skeletonema* sp.の種間競合に及ぼす影響について

夏池 真史 北海道大学大学院水産科学院

3. アサリをモデルとした大阪湾および周辺海域の干潟生物ネットワークの解明（その2）

浜口 昌巳 （独）水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所

4. 須磨海岸における砂浜生態系の修復を目標とした順応的管理手法の提案（その3：順応的管理計画の提案）

松沢 慶将 神戸市立須磨海浜水族園

5. 大阪湾圏域の底質環境修復に向けた海産ミミズが有する有害化学物質削減能力の解明

伊藤 克敏 （独）水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所

----- 休 憩 14:50～15:00 -----

6. 大阪湾・播磨灘における二酸化炭素の挙動と収支に関する研究（その3）

藤井 智康 奈良教育大学教育学部

7. 大阪湾岸河口域周辺における地表水-地下水交流プロセスを考慮した栄養塩負荷の再評価（その2）

小野寺 真一 広島大学大学院総合科学研究科

（代理発表：丸山 豊 広島大学大学院総合科学研究科）

8. 武庫川流域を対象とした陸域由来による大阪湾海域の難分解性有機物及び窒素、リンに関する研究

吉田 光方子 （公財）ひょうご環境創造協会兵庫県環境研究センター

9. 大阪湾流域圏における陸域負荷の定量化と海域の物質循環に及ぼす影響解析

中谷 祐介 大阪大学大学院工学研究科

（前 東京大学大学院新領域創成科学研究科）

10. 大阪湾における酸素消費有機物（COD）の生成・起源に関する研究～同位体比からのアプローチ

小林 志保 京都大学大学院農学研究科

◆全体質疑

16:30～16:40

◆講評

16:40～16:55

選考委員会委員長 柳 哲雄

◆閉会あいさつ

16:55～17:00

特定非営利活動法人瀬戸内海研究会議理事長 松田 治

目 次

1. 河川下流から河口域にかけての有毒赤潮発生機構の解明と抑制方法の検討(その2)	1
神戸大学自然科学系先端融合研究環内海域環境教育研究センター	林 美鶴
2. 淀川河川水からのリン供給が麻痺性貝毒原因渦鞭毛藻 <i>Alexandrium tamarense</i> および珪藻 <i>Skeletonema</i> sp. の種間競合に及ぼす影響について	5
北海道大学大学院水産科学院	夏池 真史
3. アサリをモデルとした大阪湾および周辺海域の干潟生物ネットワークの解明(その2)	9
(独)水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所	浜口 昌巳
4. 須磨海岸における砂浜生態系の修復を目標とした順応的管理手法の提案 (その3:順応的管理計画の提案)	13
神戸市立須磨海浜水族園	松沢 慶将
5. 大阪湾圏域の底質環境修復に向けた海産ミミズが有する有害化学物質削減能力の解明	17
(独)水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所	伊藤 克敏
6. 大阪湾・播磨灘における二酸化炭素の挙動と収支に関する研究(その3)	21
奈良教育大学教育学部	藤井 智康
7. 大阪湾岸河口域周辺における地表水-地下水交流プロセスを考慮した栄養塩負荷の 再評価(その2)	25
広島大学大学院総合科学研究科	小野寺 真一
8. 武庫川流域を対象とした陸域由来による大阪湾海域の難分解性有機物及び窒素、 リンに関する研究	29
(公財)ひょうご環境創造協会兵庫県環境研究センター	吉田 光方子
9. 大阪湾流域圏における陸域負荷の定量化と海域の物質循環に及ぼす影響解析	33
大阪大学大学院工学研究科	中谷 祐介
(前 東京大学大学院新領域創成科学研究科)	
10. 大阪湾における酸素消費有機物(COD)の生成・起源に関する研究 ～同位体比からのアプローチ	37
京都大学大学院農学研究科	小林 志保

河川下流から河口域にかけての有毒赤潮発生機構の解明と抑制方法の検討(その2)

代表者 林美鶴 神戸大学自然科学系先端融合研究環

内海域環境教育研究センター・准教授

共同研究者 藤井智康 奈良教育大学教育学部・准教授

山本圭吾 大阪府立環境農林水産総合研究所水産技術センター・研究員

1. 目的

本研究は、淀川感潮帯で発生するシジミ麻痺性貝毒の原因種である海洋性植物プランクトン *Alexandrium tamarense* の増殖・赤潮形成原因を明らかにすることを目的としており、本年度は現場観測を実施し、海洋性種の生存を可能にする河川上流への海水遡上条件を解析した。

2. 観測方法

淀川大堰から河口までの感潮帯、約10kmに9測点を設定し、河口に横断測線を設けた。各測点ではCTD観測と表・底層の2層採水、測線ではADCP観測を行った。観測は *A. tamarense* が増殖する2~5月に実施し、そのうち3月8日の大潮及び4月2~3日の小潮時期は、一潮汐間に4又は5サイクル繰り返した。2月16日の中潮時、および大潮時期の4月9日、23日、5月7日、21日には、下げ潮時に1サイクル実施した。上記全観測期間を通じて、淀川大堰で

の毎時の出水量、福島における10分毎の水位及び風向・風速データを、国土交通省近畿地方整備局淀川河川事務所から提供頂いた。

3. 結果

塩分分布で河口の底層から海水が遡上する様子が捉えられ、その範囲は変化していた。海水が分布する下流の下層において、クロロフィル濃度が高い箇所では *A. tamarense* が検出されており、この範囲ではこの種を含む海洋性植物プランクトンが分布してい

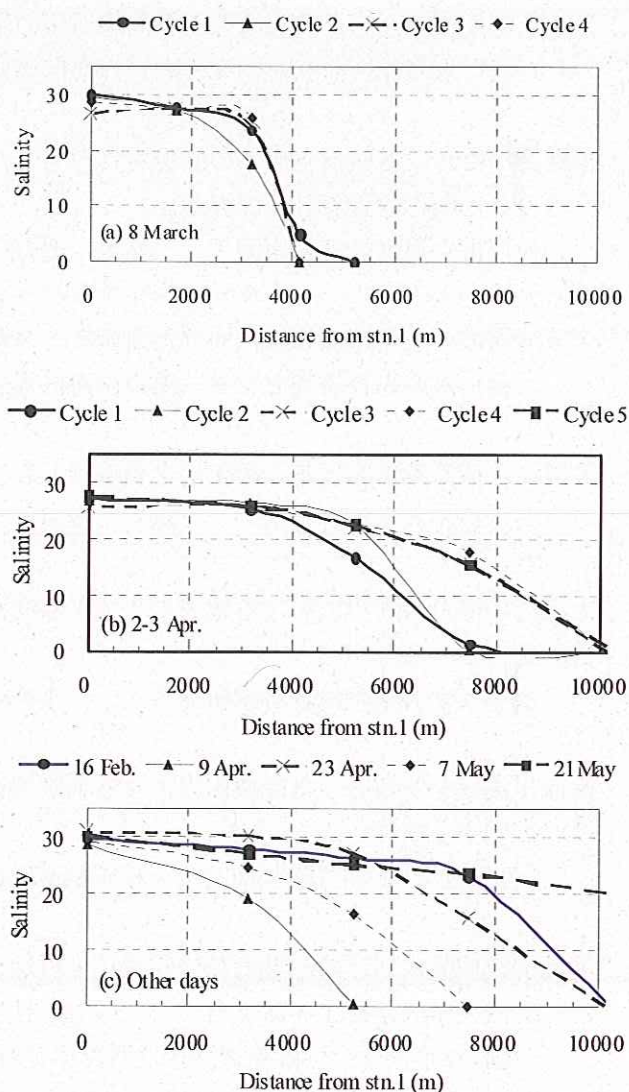


図1 遡上距離の定義

たとえられる。上流でクロロフィル濃度が高い場合があるが、この範囲は淡水であるため、淡水性植物プランクトンが増殖していたと考えられる。クロロフィル濃度分布は塩分分布と類似し、このことから海水の遡上により海洋性植物プランクトンの生息可能領域が変化していることが伺える。

そこで、海水遡上距離を以下によって定義し、定量化した。まず各測点での塩分鉛直プロファイルから最大値を抽出した。図1に示す様に、この値を測点位置（河口からの距離）でプロットし、これを平滑線でつないだ。この平滑線で、塩分10の時の距離を海水遡上距離と定義した。5月21日は、最上流のStn.9においても塩分が10以上だった。この日の最大塩分分布は、距離に対して線形に変化していることから、一次近似直線から塩分10となる距離を算術的に求めた。この日の海水遡上距離は、これ以下と考えられる。大潮時期の3月8日は距離の変化が200m以下と小さく、小潮時期の4月2～3日は距離の変化は2,700m以下だった。大潮時期の下げ潮時の観測で、距離変化は最大4,800mで大きく変化した。海水が潮流により輸送されているなら、大潮である3月8日の方が4月2～3日より、遡上距離が長く且つ大きく変化するはずである。一方、一般に潮流が弱いと河口循環流が発達する。すなわちこの結果は、海水輸送にとって河口循環流の寄与が大きいことを示している。

4. 考察

4-1 大潮下げ潮時における海水遡上距離変動

3月8日の下げ潮時間帯（第2サイクル）及び4月9日以降の大潮時期は、いずれも下げ潮時間帯で観測を実施した。そこで、各日の潮流の状態は類似しており、海水遡上距離の違いは主に河口循環流に依存すると考えて、この場合に河口循環流の強さは河川流量に依存することから、海水遡上距離と河川流量の関係を検討する。河川流量は、いずれの日も数日前から段階的な変化があり、観測期間中は安定していた。各日の河川流量として、観測前から、一潮汐周期である12時間の平均値を用いた。

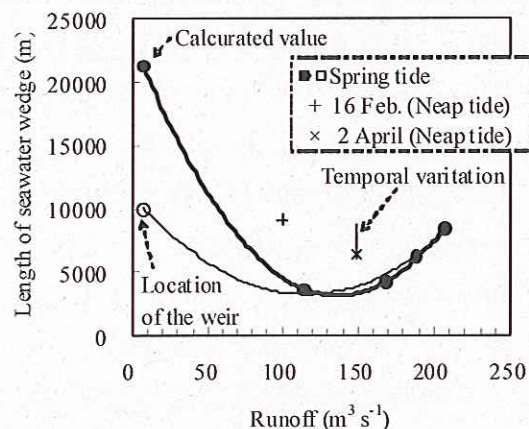


図2 河川流量と遡上距離の相関

平均河川流量と遡上距離の相関を図2に示す。丸印が大潮下げ潮の結果で、これを元に近似曲線を描いた。太線は、淀川大堰まで海水が占めた5月21日について算術的に求めた遡上距離を用いた場合で、淀川大堰の距離を用いた場合が細線である。実際の近似曲線はこの間に存在する。各近似曲線の相関係数は1.0と0.99で、極めて高い相関が見られた。遡上距離と流量との間には、下に凸の二次関数の関係が見られた。これは距離を最小にする河川流量があり、河川流量が多くても少なくとも海水遡上距離が伸びる事を示している。2本の近似曲線から距離を最小にする河川流量を求める

と、3205m で $116\text{m}^3\text{s}^{-1}$ 、及び 3083m で $136\text{m}^3\text{s}^{-1}$ だった。後述する通り、3 月 8 日は河川流量が安定しており、その場合一潮汐内での遡上距離の時間変動は小さい。よってここで得られた関数は、下げ潮以外の潮汐でも利用できる可能性がある。河川流量が多い場合、河口循環流が発達して距離が大きくなると考えられる。4 月 9 日、23 日、5 月 7 日の河口での流速分布では流量がより少なかった 3 月 8 日に比べ、上下層の流速差が大きく、河口循環流がより強かったことが示唆される。河川流量が少ない場合は、潮流による海水輸送で遡上距離が大きくなると考えられる。河川流量が極端に少なかった 5 月 21 日の河口での流速は下げ潮時の観測結果のため潮流の流入が捉えられていないが、他の日に比べ流速が弱く且つ上下層の流速差が小さく、河口循環流が弱い事が伺える。図 2 には小潮時期の 2 月 16 日（高潮）及び 4 月 2 日（下げ潮の第 2 サイクルと当日の変動幅）の結果も示しており、いずれも大潮よりも遡上距離が伸びる。これは弱混合により河口循環流が強化されるためだと考えられる。

4-2 一潮汐間の海水遡上距離変動

一潮汐間の隔時観測において河川流量はほぼ一定で、河川流量の変化による河口循環流の変化はなく、これによる海水遡上距離の変化はないと考えられる。河口での流動には、潮流と河口循環流が含まれている。河口での流速を上層 (0~1.0m) と下層 (1.0m~河床) に分けて平均した。上下層の流速の関係を図 3 に示す。実線示した回帰線から、3 月 8 日の両者には高い線形の相関性があり、(上層流速) = $0.4 \times$ (下層流速) + 13.6 の近似式が得られる。流れが潮流だけであれば、図中に点線で示した $Y=X$ で変化するはずである。つまり得られた式は、線形の変化で潮流成分を、傾きと切片で残差流を表現している。この日の河口の水深は 2.3~2.8m で、平均 2.5m とすれば下層の層厚は上層の 1.5 倍である。これと傾き、つまり上下層の流速比から、下層からの流入量は上層からの流出量の 60% となる。流出量には河川水が含まれるため、流出量の方が大きいことは妥当である。切片については、Y 切片 $13.6\text{cm}\text{s}^{-1}$ は上層からの流出がない場合の下層からの流入を、X 切片の $34.1\text{cm}\text{s}^{-1}$ は下層からの流入がない場合の上層からの流出を表す。これらに層厚をかけると、やはり流入は流出の 60% となる。この様到大潮では、その時に河川流量に応じて安定した河口循環流が形成され、それに潮流が加わる流動構造にあり、河口での流速の変化は潮流によると考えられる。また底層から流入した海水は、強混合により、この日の河川流量下では 3km 強までしか遡上しなかった。

一方 4 月 2~3 日は非線形に変化する。下層の流向が極大の時 $Y=X$ に近く潮流成分が強いが、その間潮流が弱くなると $Y=X$ から離れる。回帰曲線と $Y=X$ との差が残差流、ここでは主として河口循環流であり、その流速は潮流よりも大きく、又下層流速が正となる面積が負となる面積より大きい。この様に 4 月 2~3 日は、弱い潮流に時間変動する大きな河口循環流が加わり、下層では多くの時間で海水が供給され、弱混合により上流まで輸送されたていたと考えられる。この河口循環流は河川水に駆動されるが、流量は一定だったため、時間変動はそれ以外の要素に起因している。

以上を把握した上で、遡上距離と流速及び水位との相関を検討した。海水遡上距離

と流速の相関を図4に示す。3月8日の遡上距離の変動幅は小さく、且つ流速との関係は不明瞭であった。一方4月2～3日は、距離が下層での流速と概ね線形に応答し、流出する時に遡上距離が最も小さくなる。海水遡上距離と水位の相関は、いずれの日も楕円を描く様な変化が見られたため、各点の潮汐を確認したところ類似した潮汐で点が集まっていた。そこで、海水遡上距離の偏差（各日の平均遡上距離からの差）を各日の変動幅（最大－最小）で割ることによりデータを標準化し、図5の通り類似潮汐に分けて図示した。Y軸が大きいほど遡上距離が長いので、高潮で遡上距離が長く、低潮で低く、その間は上げ始めや下げ始めで距離変化が大きい非線形性があり、且つ上げ潮と下げ潮ではヒステリシスがある。

大潮、小潮で一潮汐内での海水遡上距離についてまとめると、3月8日の大潮では、安定した河口循環流に潮流が加わり、河口の流速は潮流で変化した。海水は強混合のためあまり遡上せず、その変化は小さく、河口での潮流とは関係性がない。一方水位とは応答した。これには潮流と潮位の位相差が影響している可能性があるが、いずれにせよ変化は小さい。4月2～3日の潮流は弱く、これに強く且つ時間変動する大きな河口循環流が加わり、これにより海水が上流まで輸送された。遡上距離の変化は大きく、距離の変化は、河口循環流と潮汐の両方に応答した。河口循環流の時間変動が河川流量以外の要素に起因するので、河口循環流の強さが潮汐に応答して変化している可能性を示唆している。一般に河口循環流の強さは一潮汐間の平均値によって捉えられているが、一潮汐内で変化について定量的に検討する必要がある。

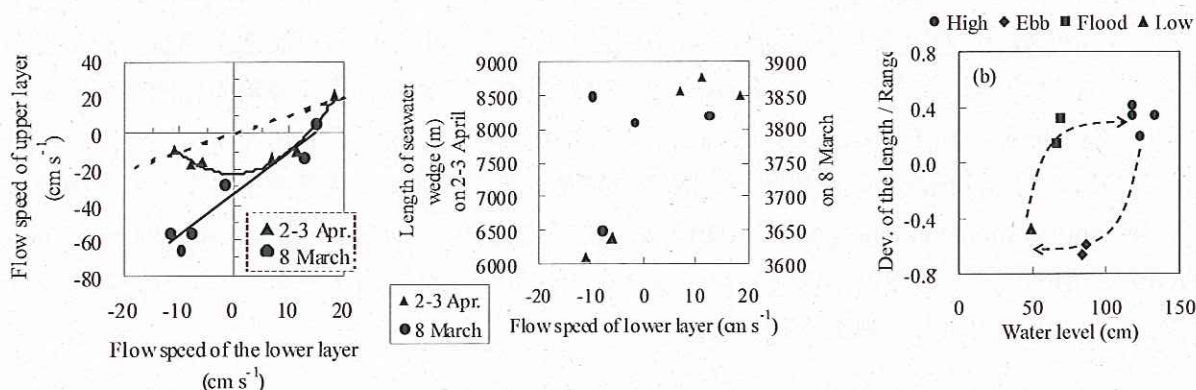


図3 上下流速の関係 図4 遡上距離と流速の相関 図5 遡上距離と水位の関係

5. まとめ

大潮では、2日程度前から概ね安定した河川流量の場合、海水遡上距離を最小にする河川流量があり、 $116 \sim 136 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の範囲で流量を制御すれば、遡上距離を3083～3205mで止めることができる。大潮では潮流が強いため河口循環流が小潮に比して弱く、一潮汐間の遡上距離変化は小さいため、遡上距離は河川流量に依存すると考えてよい。一方、潮流が弱くなると河口循環流が強化されるため、海水遡上距離は伸びる。小潮時に見られたように、その変化は一定河川流量時においても大きく、潮汐に応答している可能性があるため、さらなる検討が必要である。

淀川河川水からのリン供給が麻痺性貝毒原因渦鞭毛藻 *Alexandrium tamarense* および珪藻 *Skeletonema* sp. の種間競合に及ぼす影響について

夏池真史

北海道大学大学院水産科学院博士課程

【背景と目的】

大阪湾東部海域において、近年、麻痺性貝毒原因渦鞭毛藻の一種 *Alexandrium tamarense* の大規模発生と二枚貝類の高毒化がほぼ毎年春季に発生し、大きな環境問題となっている（山本ら 2009）。しかしながら、大阪湾における本種の増殖機構に関する知見は乏しい。我々は、大阪湾における3カ年に亘って継続した *A. tamarense* のモニタリングの結果、本種ブルーム形成時に①本種ブルームと同時に珪藻 *Skeletonema* spp. のブルームが出現すること②河川水の出水によると考えられる塩分躍層が存在すること、③塩分躍層上層において無機栄養塩類の枯渇、とりわけリンの枯渇が著しいことを明らかにした（白石ら 2009）。

瀬戸内海域では富栄養化の著しかった 1970～80 年代に比べて、近年、法規制や浄化努力による陸域起源のリンの流入負荷量の減少によって、栄養塩濃度と赤潮件数の減少が報告されている（Imai et al., 2006）。他方、1990 年代以降になって *A. tamarense* を原因とする二枚貝類の高毒化が広島湾や大阪湾において認められるようになった。元来、大阪湾は淀川を通じて供給される豊富な栄養塩類によって富栄養化が著しく、周年に亘って *Skeletonema* 属を中心とする珪藻類が卓越することが知られていた（城, 1980）。しかし、近年の陸域からの栄養塩類供給の変質、特にリン供給の減少による「貧栄養化」が、植物プランクトン組成や出現量を変化させ、*A. tamarense* の出現という新しい環境問題を引き起こしている可能性がある。そこで本研究では、大阪湾における *A. tamarense* とその競合種と考えられる珪藻類の種間競合に及ぼすリンの役割を評価することを目的とし、リンの増殖応答に関する培養実験を行った。本研究では特に、① *A. tamarense* 出現時の大阪湾の環境条件を考慮した低濃度条件下での無機態リン（Dissolved Inorganic phosphorous; DIP）および有機態リン（Dissolved Organic Phosphorous; DOP）の増殖応答、②淀川出水時の河川水に含まれるリンが植物プランクトンの増殖に及ぼす影響の2点に着目して研究を行った。

【材料と方法】

大阪湾および噴火湾から単離した *Alexandrium tamarense*、および大阪湾から単離された珪藻 *Skeletonema toropicum* および播磨灘から単離された *Ditylum brightwellii* それぞれ1株ずつの計3種4株の無菌クローン藻類株を実験に用いた。

各藻類株は人工合成培地の IHN 培地で独立に維持され、実験前にリン濃度を通常の 100 分の 1 (1 μ M)、その他の栄養物質濃度を通常の 20 分の 1 に調製した IHN 培地で前培養され、リン欠乏状態の藻類前培養を得た。リン以外の栄養物質濃度を通常の 20 分の 1 添加した IHN 培地 3.5 ml および 0.4 ml の DIP 溶液、DOP 溶液もしくは淀川水系から採水した河川水サンプルを 8 ml 容量のポリプロピレン製滅菌プラスチック試験管にそれぞれ添加したものを培地とし、各藻類の前培養 0.1 ml を接種した。DIP 溶液の濃度段階を 0, 0.8, 1, 1.6, 2, 3, 4, 5, 10 μ M の

9種類（培地中の終濃度はこれより、10分の1小さい値）、 β -グロセロリン酸をDOP源としたDOP溶液は、1, 2, 3, 5, 10 μM の5種類用意した。淀川水系の河川水サンプルは、2009年4月13日（非出水時）と4月26（出水時）に淀川に合流直前の桂川・宇治川・木津川および、大阪府枚方大橋直下の淀川の計4地点から採水され、GF/Fフィルターでろ過した後実験まで凍結保存した。これら培地およびリン溶液と河川水は、使用前に0.1 μm のフィルターによって濾過滅菌されたのちに実験に用い、各添加区は3本立てで行われた。また、河川水サンプルは、オートアナライザーを用いて溶存無機態および有機態リン濃度を測定した。

培養は、15°C、光条件 110 - 130 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、12:12 時間明暗周期の条件で行われ、培養開始から隔日で蛍光光度計を用いて In vivo クロロフィル a 蛍光値を測定し、蛍光値から最大増殖量および増殖速度を得た。また無機態リン溶液および有機体リン溶液添加区から得られた増殖速度から、Monod (1949) の式に基づき、最大増殖速度および半飽和定数を推定した。

【結果および考察】

図1に藻類株ごと各リン濃度段階におけるDIP, DOPおよび河川水添加区における最大増殖量を、表1に各藻類のDOP利用能、最大増殖速度および半飽和定数を示した。河川水添加区のリン濃度はオートアナライザーによって測定したDIP, DOP濃度から決定した。また、表1に最大増殖速度から計算された最大増殖速度 μ_{max} (day^{-1})およびDIPとDOPの半飽和定数 K_{DIP} , K_{DOP} (μM)を示す。使用藻類のうち *S. tropicum* のみDOP利用能が認められなかった。山口・松山(1993)は同属の *Skeletonema costatum* がDOPを利用できないことを報告しており、大阪湾で最も優占する珪藻類である *Skeletonema* 属の多くの種はDOPを利用できないことが示唆された。また *A. tamarense* 噴火湾株および *D. brightwellii* 株ではDIPとDOPの利用能に顕著な差は認められなかったが、*A. tamarense* 大阪湾株は、低濃度のDOP添加区において同濃度のDIP添加区より顕著に最大増殖量が高くなった。*A. tamarense* 大阪湾株は、同種の噴火湾株と比較してDOP利用能が高いと言え、大阪湾のリン制限が頻繁に発生する環境に適応している可能性が示唆された。一方で、最大増殖速度について他の藻類がDIP, DOPともに0.5前後で

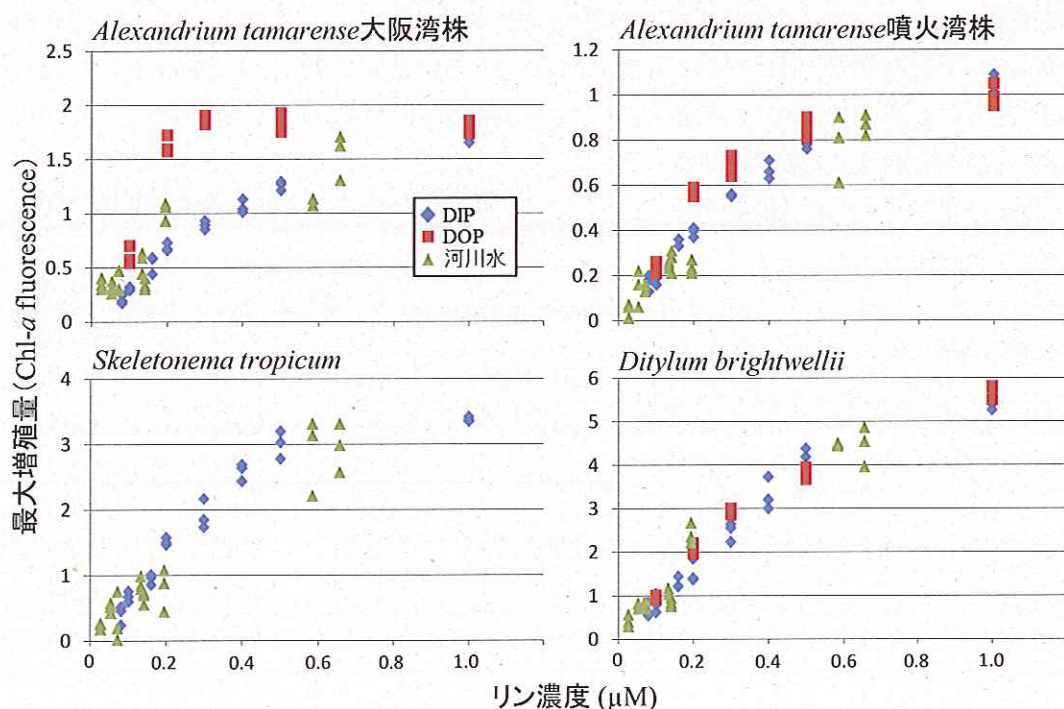


図1. 各藻類株におけるDIP, DOP, 河川水サンプル添加区のリン濃度と最大増殖量の関係性。

表1 各藻類株におけるDOP利用能, 最大増殖速度および半飽和定数.

	DOP 利用能	最大増殖速度 $\mu_{\max}$ (day ⁻¹)	半飽和定数 K_{DIP} (μ M)	半飽和定数 K_{DOP} (μ M)
渦鞭毛藻				
<i>A. tamarense</i> 大阪湾株	○	0.5	0.15	0.1
<i>A. tamarense</i> 噴火湾株	○	0.4	0.15	0.15
珪藻				
<i>Skeletonema tropicum</i>	×	0.75	0.12	×
<i>Ditylum brightwellii</i>	○	0.5	0.23	0.23

あるのに対し, *S. toropicum* では DIP で 0.75 と顕著に高く K_{DIP} も他の藻類より低い濃度となった。このように DOP の利用能こそ認められなかったが, 増殖速度および半飽和定数の値は *S. toropicum* が最も優れていると言え, DIP が低濃度でも存在するときは本種が卓越すると考えられる。一方で, DIP が枯渇するとわずかに存在する DOP を有効に利用できる *A. tamarense* が優占する可能性が示唆された。

表 2 にオートアナライザーによって測定された河川水サンプルの DIP および DIP と DOP の合計濃度を示す。河川水サンプル中のリンはほとんど DIP で占められており, DOP はほとんど認められなかったため, 河川水から供給される DOP は, *A. tamarense* および珪藻類の増殖に寄与しないと言える。一方で, 淀川を構成する主な支流である宇治川, 木津川, 桂川のリン濃度には大きな差が見られた。特に宇治川のリン濃度は非常に低く, 大阪湾への河川からのリン供給の低下を引き起こす主要因と言える。大阪湾においては, *A. tamarense* ブルームがリンの枯渇による「貧栄養化」によって引き起こされる可能性が高いことから, 「河川からの異常なリンの供給不足」という新たな環境問題が提起される。

図 2 は, 本研究において終濃度 1.0 μ M の DIP を添加したときの *A. tamarense* 大阪湾株, *S. toropicum* および *D. brightwellii* の増殖曲線である。本研究のリン利用に関するパラメーターには反映できなかったが, 各藻類を培地へ接種した後, 対数増殖期を迎えるまでの誘導期の長さには, 珪藻類と *A. tamarense* 大阪湾株で顕著な差が認められた。すなわち, *S. toropicum* および *D. brightwellii* では接種 2 日目には対数増殖期を迎えているのに対し, *A. tamarense* は対数増殖に至るまで実に 2 週間以上の誘導期を要した。同様の傾向は他のリン源添加区においても認められた。この結果は, 大阪湾において淀川の出水によってリンが供給される際, 珪藻類が速やかにブルームを形成することを示唆している。その後, 河川スカラの栄養塩類の供給が一定期間, 滞ることに伴うリンの枯渇によって珪藻類のブルームが維持できなくなると, 本種ブルームが遅れて形成されると考えられる。このような, 河川水に含まれるリンの濃度だけでなく, 「河川からのリンの供給頻度不足」という問題が大阪湾

表2 培養実験に用いた河川水試料中のDIP およびDOP濃度.

河川水サンプル	DIP (μ M)	DOP(μ M)
淀川	1.33	0.00
2009/4/13 宇治川	0.27	0.00
(非出水) 木津川	0.67	0.04
桂川	6.57	0.00
淀川	1.95	0.00
2009/4/26 宇治川	0.42	0.09
(出水) 木津川	1.36	0.05
桂川	5.77	0.08

において顕在化している可能性がある。

【結論】

本研究によって、大阪湾における麻痺性貝毒原因種の *Alexandrium tamarense* と珪藻類のリン制限下での競合関係および、この競合に及ぼす淀川河川水出水の影響の一端が明らかにされた。

すなわち、淀川からリンが十分に供給される場合、リンの取り込みに優れ、増殖速度の速い *Skeletonema* 属のような珪藻類が卓越す

ると考えられる。しかし、河川水から大阪湾へのリン供給量および供給頻度が低下することによって珪藻類の増殖が制限されると、DOP 利用能を持ち、リンを取り込んでからの誘導期の長い *A. tamarense* が珪藻類よりも増殖できる可能性がある。このような、大阪湾における淀川河川水供給の変質による「一時的な貧栄養化」が、新たな環境問題となっている可能性が示唆された。

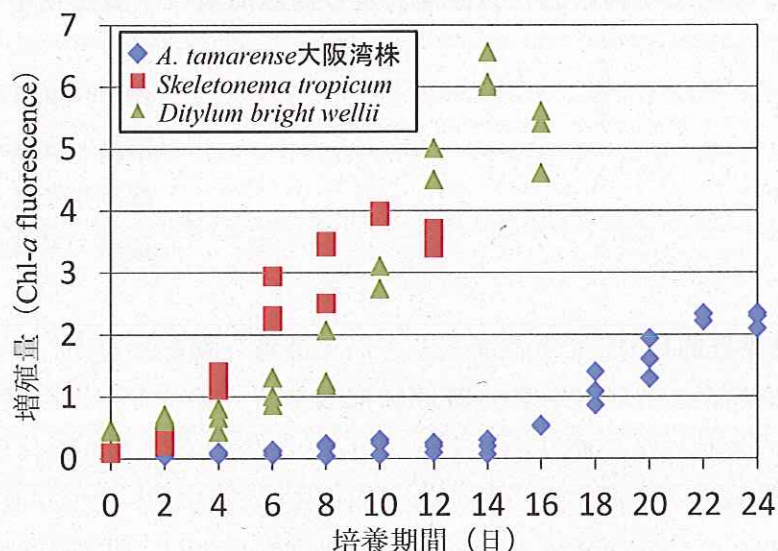


図2 *A. tamarense*大阪湾株, *Skeletonema tropicum*, *Ditylum brightwellii*のDIP1.0 μ M添加区における増殖曲線。培養実験を通じて、*A. tamarense*培養は、誘導期が長くなる傾向が見られた。

【参考文献】

- Imai, I., M. Yamaguchi & Y. Hori (2006) Eutrophication and occurrences of harmful algal blooms in the Seto Inland Sea, Japan. Plankton Benthos Res. 1: 71-84.
- 城 久 (1980) 大阪湾における植物プランクトン群集. 月刊海洋科学 12: 778-790.
- 白石智孝・今井一郎・左子芳彦・石井健一郎・神川龍馬・山本圭吾・中嶋昌紀・長井 敏 (2009) 大阪湾における有毒渦鞭毛藻 *Alexandrium* 属シストの動態に関する研究. 瀬戸内海 58: 48-50.
- 山口峰生・松山幸彦 (1993) 珪藻類と赤潮鞭毛藻類における栄養塩競合. 有害赤潮の生態学的制御による被害防除技術の開発に関する研究, 平成 4 年度研究報告書, 南西海区水産研究所, pp19-28.
- 山本圭吾・中嶋昌紀・田淵敬一・濱野米一 (2009) 2007 年春期に大阪湾で発生した *Alexandrium tamarense* 新奇赤潮と二枚貝の高毒化. 日本プランクトン学会報 56: 13-24.

アサリをモデルとした大阪湾および周辺海域の干潟生物ネットワークの解明（その2）

（氏名） 浜口昌巳

（所属・役職）（独）水産総合研究センター

瀬戸内海区水産研究所・生産環境部

藻場・干潟グループ 主幹研究員

〔研究目的〕干潟生物のほとんどが浮遊幼生期を持つが、その期間は長いものでは1カ月を超えるため比較的広範囲に拡散する。従って、大阪湾、東京湾、伊勢湾、三河湾等のスケールの海域内の干潟では、干潟生態系はそれぞれ単独で存在するのではなく、隣接あるいは湾内に点在する干潟間では浮遊幼生のやり取りがあり、相互に繋がって存在していると考えられる。このような構造は、生態学的にはメタ個体群と呼ぶが、風呂田はその概念と生息場所の連結性（connectivity）の概念を判り易く説明するために生物ネットワークという言葉の提唱している。大阪湾の干潟生態系を保全・再生するためには、まず、干潟生態系間のネットワークの状態を調べる必要がある。

浮遊幼生期を持つ海洋生物のネットワークを調べるためには、実海域において調査対象となる種の浮遊幼生の分布調査と海水流動シミュレーションモデルを組み合わせる方法と、マイクロサテライト（以下MSと略する）マーカー等の高精度遺伝子マーカーにより個体群間の遺伝子交流の程度を調べることによって推定する方法がある（浜口他 2005）。このうち前者は、浮遊幼生がパッチ状分布をすることにより時空間的に高密度な調査が必要であるため莫大な費用が必要であるが、後者は比較的少ない費用で干潟生物のネットワークによる交流の程度を調べることができる。

我が国の干潟の代表種であるアサリは2～3週間程度の浮遊幼生期を持ち、その間に干潟間のネットワークを生じると考えられるが、全国的には減少しており、大阪湾及びその周辺海域でも、資源再生や保全が切望されている。

そこで、本研究申請では、アサリを干潟生態系のモデル生物として、MSマーカーを用いた方法で大阪湾およびその周辺海域の個体群を調べ、ネットワークによる遺伝子交流の程度を推定する。これによって、まず、大阪湾の干潟生態系の現状を診断し、次いで、その診断結果に基づいて大阪湾の干潟生態系の保全・再生策を提唱する。

〔研究方法〕大阪湾及びその周辺海域9ヶ所で殻長10～15mm程度のアサリ試料60検体以上を採取した。これらのアサリから閉殻筋を摘出してQiagen社のDNeasy Blood & Tissue KitによってDNAを抽出し、申請者らが開発したアサリの遺伝子変異検出方法（特開2010-233452）のうち、7つのMSマーカーにより、各個体群60検体以上を分析した。これによって得られたフラグメントサイズ情報から、分化係数（Fst）やアサイメントテストによって個体群間の遺伝子交流の程度を調べる他、ミトコンドリアDNA（以下、MtDNAとする）を加えた統合的解析を行い、ネットワークの詳細な解析を行った。なお、当初計画には無かったが、東京湾の試料を入手することができた。東京湾は大阪湾と海域面積がほぼ同じであるために、両者を比較することによ

り、大阪湾の個体群の連結性や保全策を検討できるため、その解析結果も加えて報告する。最後に、これらの結果をもとに、大阪湾の干潟生物の保全再生策を和歌浦干潟での和歌山県、和歌山市、地元漁業協同組合の具体的な取り組みを交えて検討する。

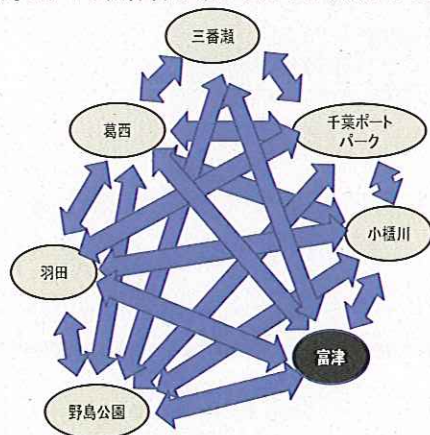
[結果と考察] 1. 東京湾と大阪湾のアサリネットワークの現状

東京湾と大阪湾（図1）で採取したアサリを用いて、昨年度実施したMSマーカーによって求めた分化係数 F_{st} 値や今年度の実施したMtDNAのハプロタイプ解析の結果を加えて解析した遺伝的な繋がりを図2に矢印で概念的に表した。これをもとに、大阪湾および周辺海域の干潟生物ネットワークの現状について考えてみる。



図1. 東京湾と大阪湾のアサリ試料採集場所

東京湾のアサリ個体群の繋がりが(しっかり繋がっている！)



大阪湾のアサリ個体群の繋がりが(孤立している?)

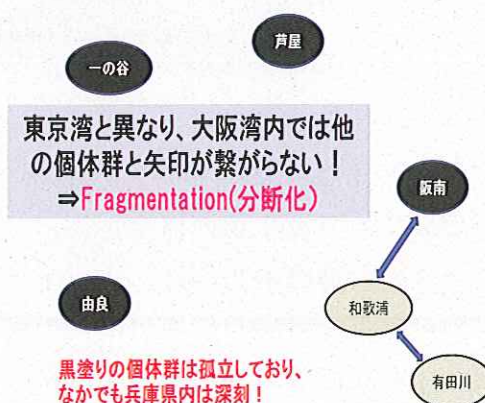


図2. 解析結果から推測される東京湾、大阪湾のアサリ個体群の連結性

東京湾は1970年代の海岸開発による埋め立て等により、干潟の面積は減少しているが、港湾域等で航跡波などによって河川等からの新たな土砂等の堆積が見られる場所がアサリの生息場所になるなど、生息場所の補償効果が見られている。加えて、東京湾は閉じた内湾であるため、東京、千葉、神奈川県内のアサリ個体群間の浮遊幼生を介した交流があり、東京湾全体で一つのメタ個体群を形成していると考えられる(図2)。一方、大阪湾は紀淡海峡と明石海峡の二つの出入り口があり、その海流構造から

淡路島側と大阪側の個体群が分断されやすい状況がある。加えて、大阪側は海岸開発により大きく改変されており、東京湾のように消失した干潟の補償効果も見られない。

そのため、各干潟や漁場間のアサリ個体群が分断化されているのではないかと考えられる（図2）。アサリのように浮遊幼生期を持つ生物を保全し、生産性を高めるためにはメタ個体群の健全化を図る必要があるが、今回の研究結果から大阪湾の現状は各干潟が分断化されているので、今後は早急に干潟間の繋がりを高めるような何らかの施策が必要と考えられた。

2. 大阪湾及びその周辺海域の干潟生物の保全再生策

1) 提案-1：海岸開発が進んだ地域での保全・再生策

本研究結果をもとに、大阪湾のアサリをモデル生物とした干潟生物の保全再生策を検討する。大阪湾の北部海域については、これまでに埋め立てによりほとんど自然海岸が残されていない。また、この海域では、海岸開発により沿岸の流れも改変されており、浮遊幼生の分散過程も大きく影響を受けている。

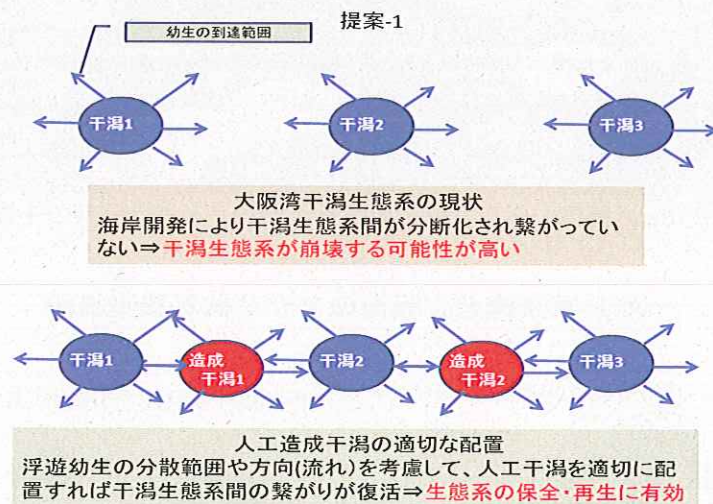


図5. 海岸開発が進んだ場所での干潟生態系のネットワーク再生策

図3. 海岸開発が進んだ場所での干潟生態系のネットワーク再生策

この海域での干潟生物の保全再生には、まず、失われた生息場所（干潟）や幼生ネットワークの再構築のために、人工干潟造成が必要である。しかし、その際には、浮遊幼生の分散等を考慮して人工干潟の配置などを、各自治体が単独で行うのではなく、大阪湾全体を見渡した巨視的な視点から考える必要がある。浜口（2011）はアサリでは浮遊幼生の分散範囲が広いので、自治体間の連携により資源保護に取り組むべきであると提唱している。図3に示すように、人工造成干潟を適切に配置すれば、干潟生態系間の繋がりが復活し、ネットワークが再生できる。従って、今後、大阪湾の干潟生物の保全・再生のための人工干潟の造成では、府県や国レベルでの大きな視点からの検討が必要と考える。

2) 提案-2：自然干潟の残る地域での再生・保全策

一方、大阪湾南部では、北部より自然海岸が残されており、弱いながらもアサリの浮遊幼生を介した生息場所間の繋がりが存在している。しかし、現在の瀬戸内海では

海岸開発や埋め立てなどのほかに、栄養塩類の低下や食害生物の増加など様々な原因によってアサリ資源が減少しており、そのことがネットワークの繋がりを減衰させ、資源減少につながっているのではないかと考えられている。そのため、これらの個々の要因に対する改善策を積極的に実施し、親个体群を増やすことによって、ネットワークを再生することが出来ると推測される（図4）。和歌浦干潟は関西随一の潮干狩り場として、多い年には7万人もの潮干狩り客が訪れ、主に、天然に発生したアサリを採捕していた。しかし、平成15年頃からアサリが減少し、平成21年には潮干狩りが中止となった。そのため、アサリ資源の再生が急務となっているが、ここでは主にナルトビエイやクロダイによる食害対策並びに栄養塩類の低下による餌不足に対応するため、網掛け保護を水産庁や県、市の予算を活用して積極的に実施している。この試みには著者らも参画し、地元関係者とともにアサリ再生策を検討している。このような試みを、今回の成果によって遺伝的繋がりが認められる阪南二区から有田川にかけての海域で実施すれば、アサリの親个体群が増加し、ネットワークが強化され、それにより resilience が高まり、アサリ資源が増加に転じるのではないかと考えられる（図4）。現在、同様の試みは尾道市内や松永湾周辺でも実施しており、各地で幼生ネットワークを考慮した自治体連携によるアサリ資源の再生策が実施されている（浜口2011）。

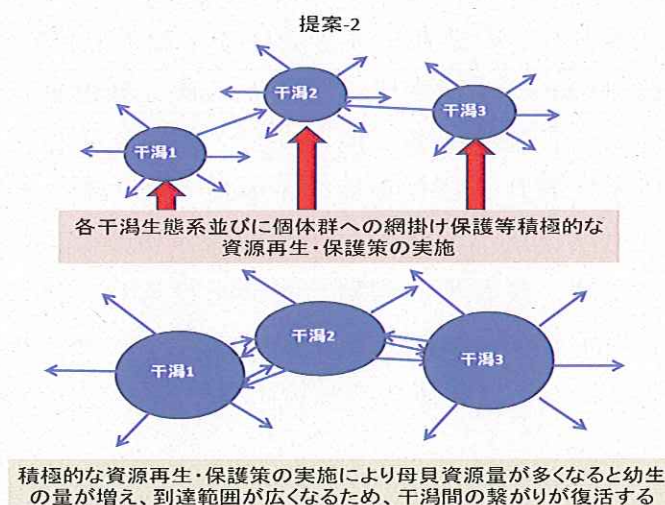


図4. 積極的な資源保護策による干潟生態系のネットワーク再生策

以上のように、東京湾と比較すると干潟間の分断化が進んでいる大阪湾においても、干潟生物の保全再生は可能であると考えるので、今後はこのような方法をどのような場所や予算体系で実施するのか、について行政、市民、研究機関等が連携して話し合い、早急に大阪湾の干潟生態系の保全・再生策を実施すべきであろう。

須磨海岸における砂浜生態系の修復を目標とした順応的管理手法の提案 (その3：順応的管理計画の提案)

松沢慶将

神戸市立須磨海浜水族園 研究企画課長

1. 目的

本研究では、現在の須磨海岸の多様な利用形態を確保しつつ、健全な砂浜生態系を回復させ、応分の生物生産機能を向上させることを目標に、順応的管理計画の提案に向けた課題として、1) 海岸の物理的な特性の整理、2) アサリの減少要因の解明、3) アサリの減少要因への対策の検討、4) 産卵母貝の保護区を兼ねた潮干狩り体験場の造成の検討、を行ってきた。最終年度は、過年度の成果とその不足分を補いつつ総合して、須磨海岸の順応的管理計画を提案した。

2. 方法

これまでの成果を踏まえ、漁業者からアサリの漁場に関する情報を得た上で、アサリの減少要因のうち、浮遊幼生の着底量の観点からは、ホトトギスガイによる着底阻害の実態を明らかにする室内実験を行い、ホトトギスガイのマットがアサリ稚貝の分布に影響するとの調査結果を受けて、野外で着底後1ヶ月以上経過した稚貝の分布状況を調べた。捕食圧の観点からは、底曳網と刺網を用いた定量調査を行った。競合・食害種の影響に関しては、測線を主体に、耕耘と時化によるマットの維持に係る影響および食害種の生態について潜水観察をするとともに、時化後の海岸への打ち上げ状況を調査した。産卵母貝の保護区を兼ねた潮干狩り体験場の造成については、後背地に堆積した砂を投入して傾斜を緩和させた区域を含め、深浅測量で断面形状を把握するとともに、1.5m四方の区画に礫を敷き詰めた試験区とネットを張った試験区とで放流アサリの生存比較試験を行った。

3. 結果と考察

海岸の物理的な特性

須磨海岸は、突堤、離岸堤および港湾施設で囲まれた閉鎖性の高い水域のため、離岸堤間の開放部とその周辺を除き海底砂は比較的安定していた。ただし、まれに台風などで強い南風が吹いたときには海底擾乱が起これ、海底の砂が潮間帯上部から陸上部に打ちあげられ、汀線付近に急勾配が形成された。その沖側に続く平坦地の海底を掘ると、表層の約0.05mより下層は砂泥が固くしまり還元的である上に、アサリやウチムラサキなどの二枚貝が大量に埋没しており、かつて、二枚貝の成長に適した場所であったことがうかがえた。平坦地の海底砂は、離岸堤外には流亡しにくい一方で、南風による時化の影響で浜へ打ちあげられやすいため、全体的にアサリの生息に適した軟らかい砂層が薄くなっていると考えられる。

透明度は夏から秋にかけて比較的高く、二枚貝類等の生存を支えるだけの餌料環境が一定程度存在すると思われた。このような状況は10年以上続いており、アサリ資源量の劇的な変化が、餌料環境の劣化に起因するとは考えにくい。

アサリの減少要因の解明

アサリ着底稚貝の生残室内実験では、2ヶ月後に、殻長0.37~9.97mmに成長した稚貝が確認された。稚貝の数は、ホトトギスガイのマット部分で有意に少なく、浮遊幼生の着底・生残にホトトギスガイが影響することが明らかになった。一方で、実際の砂浜での冬季の着底稚貝の分布調査では、殻長1.9~9.5mmのアサリが、主にホトトギスガイのマットがモザイク状に残る突堤周辺の地点で生育が確認され、逆に開放的な砂地ではほとんど確認されなかった。したがって、平成23年のように堅牢化したマットではアサリは着底成長を阻害されるものの、平成24年のようなモザイク状のマットの場合は、アサリが生息可能と推察された。

底曳網調査ではヒトデ類が圧倒的に優占し、採捕率を100%と仮定すると海岸の総個体数は9月に約2万個体・300kg、11月に約1.4万個体・200kgと推定された。このうち、75~90%を占め、浅場の広範囲に分布していたトゲモミジガイは、平成23年の時化後には、浅場に集積したアサリを選択的に捕食していたものの、平成24年の平常の海況下ではホトトギスガイを中心に多様なベントスを捕食していた。トゲモミジガイが年間に現存量の少なくとも数倍の量を捕食すること、繁殖力が大きいこと、加えて後述するタマガイ科の捕食圧の高さを考えると、ホトトギスガイの生産力がトゲモミジガイやタマガイ科の増殖を支え、それがアサリなど他の二枚貝の捕食圧を異常に高くしている可能性が考えられた。

アサリの競合・食害種の削減方法の開発

ホトトギスガイは、7月には小さい個体が一部で確認されたに留まった。これは、局所的に越冬した春産卵群によるものと推察される。9月初旬に形成されていたマットは、10月には衰退し、11月末にはほぼ全域で消失した。空間的には、離岸堤と突堤とで形成された静穏域に発達し、今年の越冬場所は、千森川の導流堤の東側だけであった。マットの堅牢度合いは年により異なり、平成24年のような軟弱なマットの場合、二枚貝が共存できるため、強い耕耘は必要ない。耕耘の判断には、今後4月の時点でのマットの形成状況を指標とするのが有効と考えられる。

アサリ等二枚貝の食害種のうち、当該海域では食痕などの状況証拠からヒトデ類（主にトゲモミジガイ）とタマガイ科（ツメタガイなど3種）が優占することがうかがえた。須磨海岸の海底泥表面から0.05~0.15m下には還元的な砂泥層（固化層）がある。固化層深くまで潜れない二枚貝は、トゲモミジガイやタマガイ科に捕食されやすいと予想される。一方、二枚貝で現存量が最大のホトトギスガイもアサリと同様に食害を受けており、その生物量の多さからトゲモミジガイやタマガイ科の異常繁殖を支えていると考えられる。これらの捕食者を減少させるに

は、平常時には底曳網やかご漁などが効果的である。時化によりトゲモミジガイが岸に打ち寄せられた際には、より効率的な駆除が可能だが、天候の急変に対して臨機応変に駆除活動を行い得るような組織体制の構築が今後の課題である。

食害防止策により産卵母貝の生残率を高める方法

食害防止策の効果把握のため、野外で生残比較試験を行った結果、2ヶ月間の生残率は1.4%以下であった。これらのタマガイ科による食害率は、31~61%と高く、捕食圧抑制のために、枠をより深く埋め込むなどの改善策が考えられた。礫の敷設もネットも効果なく、各区ともほとんどのアサリが捕食され、その食害種にはマダコが含まれた。マダコによる食害を防ぐためには、網目のサイズを小さくするなど考えられるが、検討課題である。

産卵母貝の保護区を兼ねた潮干狩り体験場の造成

野外試験区（JR 須磨駅前）以外は水深が深いため適さない。野外試験区はL字の突堤形状から砂が堤外に逃げやすいため、砂を留める工夫が必要である。

アサリの消長仮説

以上を総合すると、近年の須磨海岸は以下のような状況にあったと推察される。

2004年までアサリが少なかったが、2005年5月に行われた客土が稚貝の着底生残を高めたため、2006年に豊漁となり、その後数年間はアサリの漁獲量は維持できた。しかし、定常的な稚貝供給の不安定さに加えて、捕食者の増大と高い漁獲圧で数を減らし、2009年に漁獲が自粛された。鋤簾での漁がなくなったために、もともと時化の少ない海岸の底質は固くなった。2010年から取り組んだ耕耘も手法が適切でなく、効果は薄かった。その後、静穏域を好むホトトギスガイが繁殖してマットを形成し、世代交代を続けてマットが堅牢化し、食害種にも崩されることなく、2011年の秋に崩壊するまで砂泥底を広く被覆した。その間、下層の底質を還元的な環境に悪化させるとともに、アサリの着底成長を阻害した。2011年からアサリ稚貝の放流が試みられたが、多量のホトトギスガイを捕食して異常繁殖したトゲモミジガイやツメタガイなどに捕食され、資源回復には至らなかった。2011年秋に、効果的な耕耘と時化によってホトトギスガイが一旦消失すると、2012年には、マットの形成は突堤周辺に限られ、底質環境も改善された。

以上の推論が妥当ならば、マットの形成と堅牢化、捕食圧の増大による砂浜生態系のバランス崩壊、アサリの脆弱な再生産機構を監視しながら、適切な漁業管理、適度な海底かく乱によるホトトギスガイの異常繁殖の抑制、捕食者の低密度管理、および産卵群の確保に努めることで、アサリの資源の復活が可能と考える。

4. 結論 これまでの理解に基づき、管理計画案を以下の通り作成した。

1. 順応的管理の目的

比較的閉鎖的な養浜海岸でも、応分の生産力と多様な生物相が維持され、市民、漁業者等多様な主体がより多くの恵みを受けられる豊かな海にする。

2. 目標の設定 春になれば天然アサリの恵みでにぎわう海岸。

3. 順応的管理の方針

3-1) 須磨海岸における健全な砂浜生態系の指標をアサリとする。

3-2) アサリは最終的に種苗放流に頼らず、実際の砂底での再生を目指す。

3-3) アサリは須磨海岸産として継代飼育されたものを種苗としブランド化を目指す。遺伝的ネットワークが存在すると考えられる他所の増殖も支える。

3-4) アサリは漁獲制限を設け、乱獲を防止する

3-5) 市民に海の恵みと養浜海岸の理解を促すため、潮干狩りなど体験教育の場を創出する。

3-6) 須磨海岸の管理運営を担う協議会を設置し、里海としての利用を図る。

3-7) 協議会の運営に際しては、アサリとその生息環境をモニタリングし、結果を協議会にはかり、フィードバックさせて、柔軟に新たな手法を立案、実行する。

4. 順応的管理の内容

4-1) 管理型漁業と密漁防止：漁業者の意向を尊重しつつ、アサリ資源の状態を調査した上で、漁獲量と操業区域の制限に係る計画書を作成し、漁業者自身や漁業協同組合との調整を図る。神戸市漁業協同組合や市の海岸管理者等関係機関と連携し、漁船の明示と市民の監視による連絡システムを構築し、密漁を防止する。

4-2) 再生産機構の構築：アサリ浮遊幼生の供給ネットワークを考慮し、他の海域を含め自然繁殖のための保護区をつくり、それが機能するまでは、種苗放流など人の手を加える。具体的には須磨海岸西側の突堤周辺に保護区を設け、食害から守りかつ繁殖や着底をうながすために、4.3で検討する必要な措置を講じる。また、地理的に離れた幼生供給の場を見出し、関係者と連携の上で同様な場をつくる。

4-3) モニタリングと生息環境の管理：4・6・9月にホトトギスガイのマットの形成状況と食害種の密度を潜水調査や底曳網調査で把握し、耕耘によりマットの堅牢化を未然に防ぎ、トゲモミジガイは底曳網や時化後の潜水採集で低密度化を図る。ツメタガイやマダコは仕掛けにより除去し、ナルトビエイには底に杭を立てるなどの方策による被害の低減をはかる。これらの効果を実証しながら進める。

4-4) 里海づくり：地域組織「須磨海岸里海協議会」をつくり、常に新しい情報を収集し、資源と環境の維持や、レクリエーション、スポーツなど多様な利用者との共存を図りながら、必要な管理にとりくむ。

(発表題名) 大阪湾圏域の底質環境修復に向けた海産ミミズが有する有害化学物質削減能力の解明

(氏名) 伊藤克敏

(所属・役職) 水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所・任期付研究員

[研究目的]

大阪湾内沿岸域の底質からは、現在でも高濃度の有害化学物質が検出されており、早急な底質環境修復技術の構築が求められている。これまでに我々は、汚染底質に高い耐性を持つ海産ミミズ（未同定種）が、汚染が進行した底質中に含まれる複数の有害化学物質を削減する能力を合わせ持つことを見出した。

本研究課題では、大阪湾圏域の底質環境修復に向け、海産ミミズが有する汚染底質浄化能力の解明に取り組む。具体的には、大阪湾内から採取した重度の汚染底質を用いて曝露試験を行い、海産ミミズの有害化学物質代謝に関与する遺伝子を次世代シーケンサを用いて網羅的に検索すると共に、ガスクロマトグラフィー質量分析計(GC-MS)等の機器分析を用いたメタボローム解析により代謝産物を同定し、代謝経路を包括的に解析する。これらを統合的にまとめ「海産ミミズが有する汚染底質浄化メカニズム」を解明し、底生生物を用いた大阪湾の底質浄化技術の構築を目的とした。

[研究方法]

【汚染底質曝露試験】

「試験対象底質」

試験底質は、2012年9月に大阪湾内大正内港（図1）にてエグマンバージ採泥器を用い採取した。底質試料は、1 mmメッシュの篩で濾した後、試験に供するまで-20℃で保存した。なお、底質試料は曝露試験に供する前に、含水率、強熱減量、酸揮発性硫化物量（AVS）及び多環芳香族炭化水素類（PAHs）を既報に従い測定した。

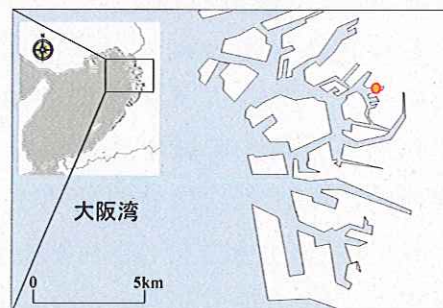


図1 ●：底質採取地点

「試験対象種」

海産ミミズ（未同定種）（図2）：小型の貧毛類で、長期飼育が可能な種であり、予備試験の結果から非常に高い1-ニトロナフタレン（石油由来の汚染物質）代謝能を有していることが明らかとなっている。本種は愛媛県南部海域の養殖場底泥中より採取し、研究所で継代飼育中の個体を実験に供した。



図2 高い汚染耐性を持つ海産ミミズ

「曝露試験」

曝露試験には密閉式のガラス円柱容器(420ml)を用い、上記対象底質 86g(乾燥重量)に海産ミミズ 200 個体、及び底質乾燥重量当たり 4 倍量の海水を加え試験区とした。曝露期間中は無給餌とし、20℃、暗条件下で 10 日間曝露試験を実施した。海産ミミズのサンプリングは実験開始前、3 日後、及び曝露試験終了後に実施した。各ミミズサンプルを底質より取り出し、ケイ砂を敷設した海水中で 5-10 分程度水浴した。その後、胃内容物がないことを顕微鏡下で 1 尾ずつ確認した上で液体窒素で急速凍結し、前処理まで-85℃で保存した。

【次世代シーケンサーを用いたトランスクリプトーム解析】

試験開始前及び 10 日間の曝露試験終了後の海産ミミズサンプルより totalRNA を抽出した。抽出した totalRNA は、イルミナ社 TruSeq RNA Sample Prep Kit を用いてシーケンス用ライブラリ調製を行った後、次世代シーケンサーHiSeq を使用し解析を行った。得られたデータは、情報処理を実施し、検体間比較を行った。

【GC/MS を用いたメタボローム解析】

前処理は Bando et al(2010)に準じて図 3 に示す方法で行った。すなわち、ミミズを入れたチューブに粉碎用ビーズ、抽出用混合溶液 (MeOH/H₂O/CHCl₃) を入れて粉碎し、内部標準 (リビトール) を添加した後、インキュベーション、遠心、濃縮の工程を経て親水性代謝物 (糖、有機酸、アミノ酸等) を乾燥物として抽出した。

乾燥抽出物は、2 段階の誘導体化 (メトキシ化、トリメチルシリル化) を行い (図 4)、ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC/MS) に図 5 に示す条件で供した。

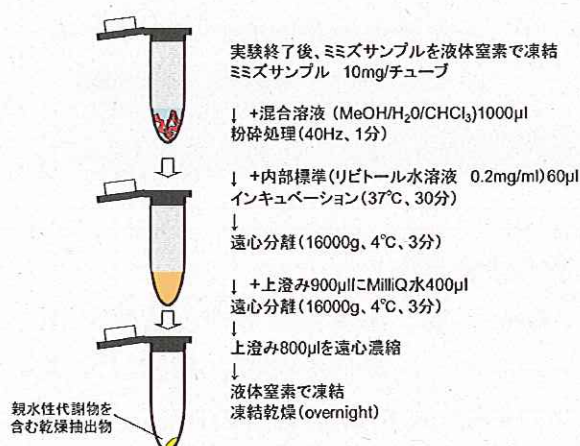


図 3 試料前処理方法

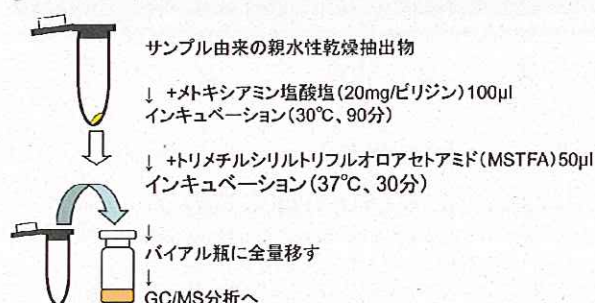


図 4 試料誘導体化方法

メタボロミクス:GC/MS分析

機器: 5975(GC) +6890N(MS) (Agilent社)
カラム: CPSII 8CB(Agilent社)
注入口: 温度230℃、注入量1μl
注入モード: スプリット(1:25)
カラム: 80℃(2分)→15℃/分→330℃(6分)
MS条件: イオン源200℃、四重極150℃

図 5 GC/MS 分析条件

GC/MSにより得られたクロマトグラムは、Met align

(<http://www.wageningenur.nl/en/show/MetAlign-1.htm>)によりデコンボリューションを行ったのち、Aloutput2（大阪大学大学院工学研究科福崎研究室にて開発：<http://prime.psc.riken.jp>にて公開）及びNational Institute of Standards and Technology（NIST）ライブラリを用い保持時間、クロマトグラムを照合し代謝物の同定を行った。同定された代謝物は、差次的な変化を統計解析し、各代謝物が関与する代謝経路をKyoto Encyclopedia of Genes and Genomes（KEGG）を用いて包括的に解析した。

【結果と考察】

【底質分析結果】

大阪湾内大正内港より採取した底質試料の分析結果を表1に示した。分析の結果、底質中AVS量は11.6mg/g-dryであり、水産用水基準値0.2mg/gを遙かに超える値であった。さらに、4種のPAHs分析の結果、フェナントレン及びピレンの濃度がアメリカ合衆国環境保護庁（U.S.EPA）が定める基準値を超えていた。

表 1 大阪湾内大正内港底質分析結果

	含水率 (%)	強熱減量 (%)	硫化物濃度 (mg/g-dry)	底質中PAHs濃度 (ng/g-dry)			
				ナフタレン	フェナントレン	ピレン	クリセン
大阪湾大正内港 底質サンプル	69.7	13.5	11.6	98	3,414	5,107	2,138

【曝露試験結果】

試験終了後、海産ミミズの生物数を計測した結果、生物数の減少は認められなかった。さらに、試験区を詳細に観察した結果、海産ミミズが構築した坑道（図6-b）や攪拌の形跡（図6-c）が底質の側面及び表面に認められた。

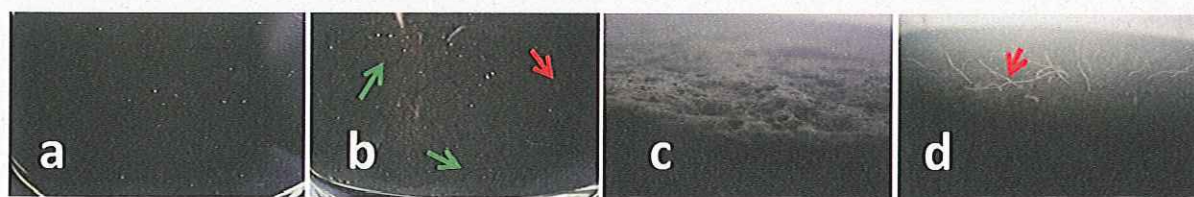


図6 a: ミミズ非接触区 b,c,d: 曝露試験区 緑: 坑道 赤: 海産ミミズ

【次世代シーケンサーを用いたトランスクリプトーム解析結果】

次世代シーケンサーを用いた解析の結果、曝露開始前及び10日間曝露後のサンプルから、それぞれ1.2億リード及び1.7億リードの塩基配列情報を得た。このうち26万種類の遺伝子断片を用いて発現量の比較解析を行った。その結果、10日間の底質曝露により、10倍以上に発現量が上昇した遺伝子が181種類、10分の1以下に減少した遺伝子が1,785種類それぞれ同定された。最も発現量が増加した遺伝子は、第一相薬物代謝酵素であるチトクロムP450であり、65倍に発現量が増加していた。

【GC/MS を用いたメタボローム解析結果】

代謝物同定を行った結果、計 43 種類の代謝物が同定された。そのうち、10 日間の大阪湾底質曝露により有意に変動した代謝物は 29 種類であった。主成分分析の結果、大阪湾底質曝露の有無、曝露日数により明瞭なグループに分かれ、総体的に代謝物の大きな変動が見られた (図 7)。

大阪湾底質曝露により代表的な代謝物が関与する代謝経路を同定した結果、薬物代謝に関わる代謝経路 (グルタチオン代謝) に関与するアミノ酸の変動が見られた。また、クエン酸回路において、大阪湾底質に曝露されたことによる顕著な変動が見られた (図 8)。さらに、顕著な嫌気的特性を持つ大阪湾底質に曝露されると嫌気呼吸にシフトして乳酸が増加することが予想されたが、曝露前後で乳酸の増加は見られなかった。大阪湾の底質は海産ミミズにとっては嫌気的なストレスを与えるほどではないのかもしれない。

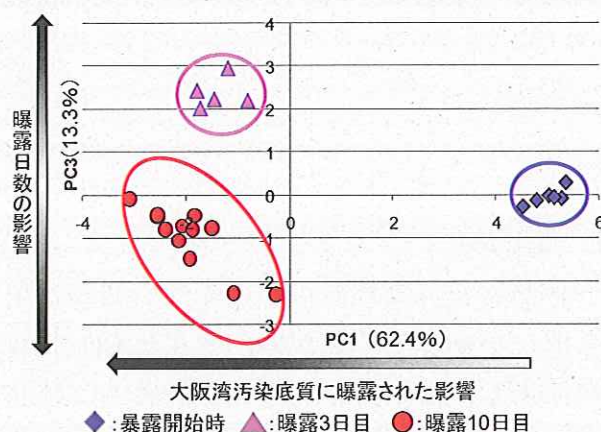


図-7 大阪湾汚染底質に曝露した海産ミミズ代謝物の主成分分析

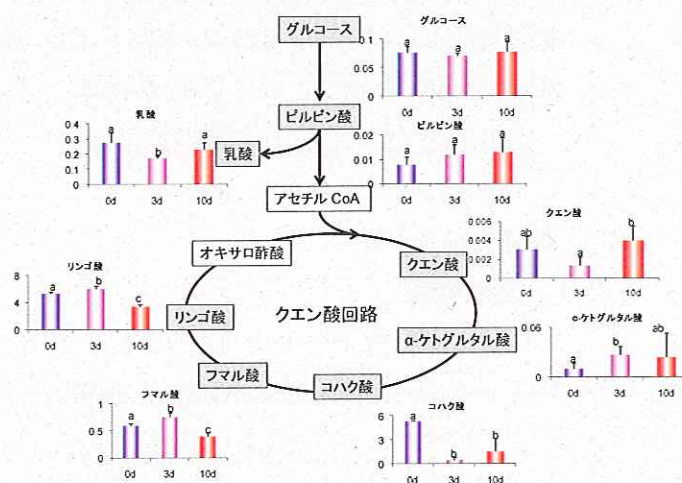


図-8 大阪湾汚染底質に曝露した海産ミミズ代謝物の変動(解糖系～TCA回路)
各棒グラフ上の異なる英数字は統計的に有意な差があることを示す。

【結論】 以上の結果から、海産ミミズは体内代謝物を調節しながらも極限汚染海域に順応していると予想された。さらに、薬物代謝酵素系を活性化することで、体外に化学物質を排出する過程において、有害化学物質の代謝が促進されたのではないかと考えられた。今後、他のベントスとの比較・汚染状況の異なる底質との比較ができればその調節能の解明により近づくものと期待される。

【参考文献】 Bando et al (2010) GC-MS-based metabolomics reveals mechanism of action for hydrazine induced hepatotoxicity in rats *J. Appl. Toxicol.* 31:524-535

大阪湾・播磨灘における二酸化炭素の挙動と収支に関する研究（その3）

藤井智康

奈良教育大学 教育学部 准教授

1. はじめに

陸域から人為起源の栄養塩や有機物が豊富に流入する沿岸海域は、一次生産（光合成）が盛んであるため、大きな CO_2 吸収量が見込める。また、沿岸海域は、河川が流入し、富栄養で一次生産が大きい岸近くの海域、比較的低栄養な沖合の海域など、様々な環境を有しており、 CO_2 の放出・吸収量（フラックス）は場所的あるいは時間的に異なっている。昨年までの研究では、時間的・空間的な変動が大きい沿岸海域の CO_2 測定手法について開発を進めてきた。

本研究では、我々が開発してきた CO_2 測定手法を用いて、大阪湾東部の CO_2 フラックスを現地調査によって明らかにし、当海域が大気 CO_2 の吸収源となっているのか、放出源となっているのかを明らかにする。

2. 研究方法

2.1 連続観測

2012年6月29日～9月19日、および11月1日～21日まで、新西宮ヨットハーバー（以下 YH；図1の St. A）の、海面下 1.0 m に多項目水質計 WQC-24（東亜 DKK 社製）、およびメモリ水温・塩分計 ACT-HR（JFE アドバンテック社製）を設置し、10 分間隔で水温、塩分、pH および DO の連続観測を行った。

2.2 大阪湾東部観測

大阪湾における面的な CO_2 フラックスを明らかにするために、第五管区海上保安本部海洋情報部が毎月実施している大阪湾環境保全調査における 19 地点（図1の●印）の水温、塩分、pH および DO のデータを解析した。解析期間は、2011年7月～2013年3月である。

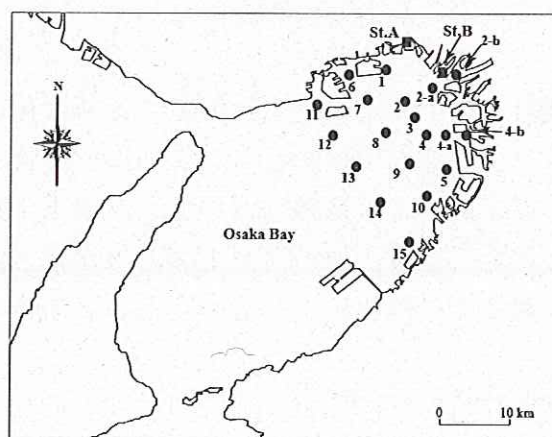


図1 調査地点図。 St. A：新西宮 YH，
St. B：尼崎，大阪湾環境保全調査地点（●）。

2.3 海水中の CO_2 系の測定

海水中の CO_2 系の連続観測は、pH と全アルカリ度から計算で求める方法を用いた（藤井・藤原，2012）。計測機器による連続観測が可能な項目は、pH と塩分であり、全アルカリ度は、塩分から十分な精度で求められることが示されている（海域ごとの計算式による）（田口ら，2009）。

計算式は CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) が提供する CO₂SYS (Lewis & Wallace, 1998) を用いた。

現地観測では、現場海水をエアレーションすることにより、水中の CO₂ 濃度が、大気中の CO₂ 濃度と平衡状態になった海水を作り、この海水の $\Delta p\text{CO}_2$ ($= p\text{CO}_2 \text{ sea} - p\text{CO}_2 \text{ air}$) を 0 とし、pH と塩分から求められる $p\text{CO}_2$ を補正した (藤井・藤原, 2012)。

2.4 CO₂放出・吸収量の算定

海面の CO₂ 吸収量 (以下、CO₂ フラックス) は、大気と表面海水の CO₂ 分圧差とガス交換速度によって求められる。(1)式に CO₂ フラックス算出式を示す。フラックス F が正のときが吸収、負のときが放出である。

$$F = -k \cdot S \cdot (p\text{CO}_2 \text{ sea} - p\text{CO}_2 \text{ air}) = -k \cdot S \cdot \Delta p\text{CO}_2 \quad (1)$$

ここで、 F : CO₂ フラックス ($\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)、 k : ガス交換速度 (m h^{-1})、 S : 海水中的 CO₂ 溶解度 ($\text{mol m}^{-3} \mu\text{atm}^{-1}$)、 $\Delta p\text{CO}_2$: 表面海水と大気の CO₂ 分圧差 (μatm) である。なお、(1)式より求めた CO₂ フラックスを炭素量 ($\text{g-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) に換算して解析した。

ガス交換速度については、Waninnkhof (1992) により風速の 2 乗に比例する次式を用いて算出した。大阪湾東部観測では、長期間の平均風速データを用いる (2)式を、連続観測では、短期的 (瞬間値) な風速データを用いる (3)式により算出した。なお、風向・風速データは、大阪湾東部海域の海上風の代表として、気象庁の神戸空港出張所のデータを用いた。

$$k = 0.39 u_{av}^2 (S_c / 660)^{-0.5} \quad (2)$$

$$k = 0.31 u^2 (S_c / 660)^{-0.5} \quad (3)$$

$$S_c = 2073.1 - 125.62 t + 3.6276 t^2 - 0.043219 t^3 \quad (4)$$

ここで、 k : ガス交換速度 (cm h^{-1})、 u_{av} : 平均風速 (m s^{-1})、 u : 風速 (m s^{-1})、 S_c : 海水中的 CO₂ のシュミット数、 t : 摂氏水温 ($^{\circ}\text{C}$) である。

3. 結果と考察

3.1 大阪湾奥部の CO₂ 吸収フラックスの時間変動

連続観測期間中の神戸空港の北向風速、水温、DO および CO₂ 吸収フラックスの時間変動を図 2 および図 3 に示す。

2012 年 6 月 29 日～9 月 19 日の YH での海面の CO₂ フラックスの全期間平均値は、 $0.11 \text{ g-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の吸収であった。この期間の吸収フラックスの最大値は $2.14 \text{ g-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、放出フラックスの最大値は $0.45 \text{ g-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であった。吸収時間が放出時間を大きく上回り、成層期～成層消滅期までは平均すると CO₂ 吸収となっていた (図 2)。

一方、成層消滅期にあたる 2012 年 11 月 1 日～21 日の CO₂ フラックスの全期間平均値は、 $0.04 \text{ g-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の放出であった (図 3)。この期間の吸収フラックスの最大値は $0.24 \text{ g-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、放出フラックスの最大値は $0.47 \text{ g-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であった。CO₂ 放出時間が長く、吸収フラックスも成層期と比較して小さい。

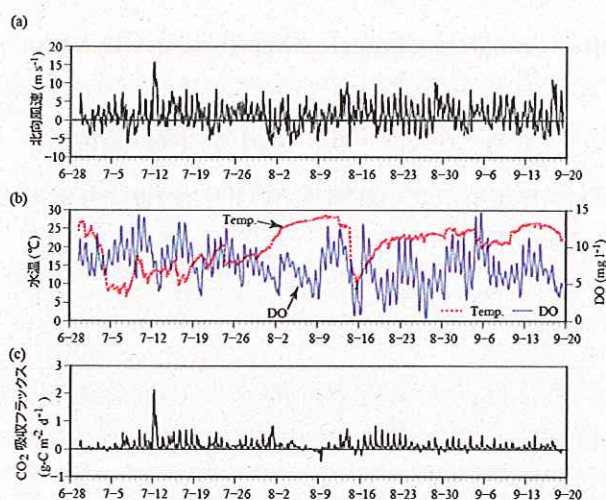


図2 St. A (YH) における(a) 北向風速,
(b) 水温, DO, (c) CO_2 吸収フラックス
(2012年6月28日～9月19日).

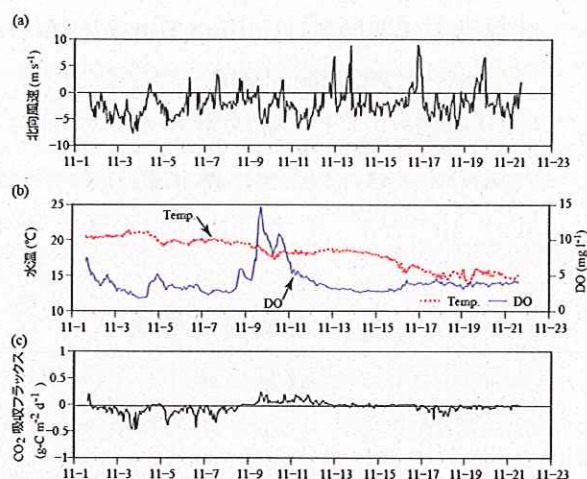


図3 St. A (YH) における(a) 北向風速,
(b) 水温, DO, (c) CO_2 吸収フラックス
(2012年11月1日～21日).

3.2 大阪湾東部の CO_2 吸収フラックスの月別・地点別の変化

2011年7月～2013年3月の, 月ごとの全測点平均値を図4に示す.

大阪湾東部海域の CO_2 フラックスの全測点, 全期間の平均値は, $0.10 \text{ g-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の CO_2 吸収であった.

水温が上昇する2012年4月～7月にかけて DO は上昇し, 7月に最大となっていた. DO 上昇期には, CO_2 吸収フラックスは $0.1 \text{ g-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 程度のほぼ一定の吸収であった. 年間を通して1月が他の月と比較して CO_2 吸収フラックスが大きかった. 水温が低い時期に, CO_2 吸収フラックスが大きくなっており, 水温低下による CO_2 溶解度の増大が関係していると推察される. また, 2011年および2012年ともに9月が最も CO_2 吸収フラックスが小さく, ほぼ $0 \text{ g-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であった. 秋季の9月は, 成層期に形成された底層の貧酸素・高 CO_2 水が北東風の卓越にともない海面に湧昇し, 湾奥部の港内海域に放出域があるため, 他の月と比べて CO_2 吸収フラックスが小さいことを示している.

次に, 測点ごとの全期間平均値を図5に示す. 場所的な違いについて河口域 (St. 2-a, 2-b, 4-a, 4-b) と沖合海域を比較すると, 淀川河口 (St. 2-a, 2-b) では, DO 飽和度が小さいにもかかわらず, CO_2 吸収は大きい. 一方, 大和川河口 (St. 4-a, 4-b) では, DO 飽和度は沖合海域と同程度に大

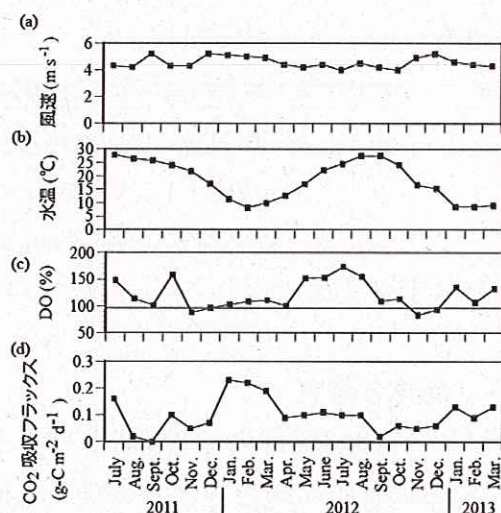


図4 大阪湾東部観測の月ごとの値
(2011年7月～2013年3月).
(a) 神戸空港月平均風速および
(b) 表層水温, (c) 表層 DO, (d) CO_2
吸収フラックスの全測点平均値.

きく、CO₂吸収も大きい。沖合海域の中でも河口域から遠い、西の測線 (St. 11~15) では、高塩分 (塩分 30 程度) で、DO 飽和度は小さいにもかかわらず、CO₂吸収は特に小さくはない。

次に、2012 年 8 月と 10 月の地点別 CO₂ 吸収フラックスを図 6 に示す。河口域では夏と秋で CO₂ 吸収フラックスの値の符号が逆転しており、夏は CO₂ 吸収、秋は CO₂ 放出となっている。一方、沖合海域では、大きさに違いはあるものの、夏も秋も CO₂ 吸収となっていた。最も西の測線 (St. 11~15) の沖合海域では、秋季の CO₂ 吸収フラックスの方が、夏の CO₂ 吸収フラックスよりも大きくなっている。

2012 年 1 月と 2013 年 1 月の地点別 CO₂ 吸収フラックスを図 7 に示す。両年の冬季を比較すると、湾奥部の港内海域ではほぼ同程度の CO₂ 吸収であったが、沖合海域では大きく異なっていた。

4. 結論

大阪湾東部海域の湾奥部での連続観測や第五管区海上保安本部海洋情報部の大阪湾環境保全調査データより、CO₂ フラックスの解析を行った。

YH での全期間平均値は、6~9 月では $0.11 \text{ g-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の CO₂ 吸収、11 月では、 $0.04 \text{ g-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の CO₂ 放出であった。大阪湾東部では、淀川河口部や港内で一時的な放出がみられるものの、ほぼ全域で CO₂ 吸収となっていた。また、神戸港側の CO₂ 吸収フラックスが、大阪港側と比較して大きく、明瞭な場所的な違いが見られた。全測点、全期間の平均値は、 $0.10 \text{ g-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の CO₂ 吸収であった。

この値は、太平洋全体の年平均 CO₂ 吸収フラックス $0.013 \text{ g-C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の約 10 分の 1 であった。また、大阪湾東部の年間の CO₂ 吸収量は、 $51 \text{ kt-CO}_2 \text{ y}^{-1}$ (面積: 387 km^2) となり、神戸市域の大気への CO₂ 総排出量 $10,681 \text{ kt-CO}_2 \text{ y}^{-1}$ (2008 年度) の 0.4% に相当する値となった。

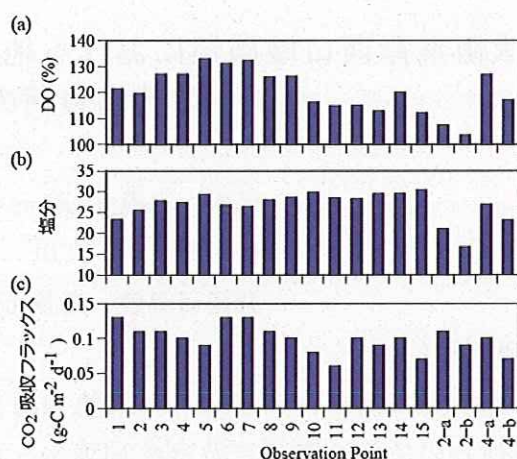


図 5 大阪湾東部の地点別の全期間平均値 (2011 年 7 月~2013 年 3 月)。

(a) DO, (b) 塩分, (c) CO₂ 吸収フラックス。

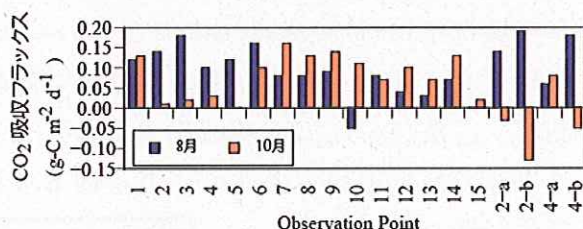


図 6 大阪湾東部の地点別の 2012 年 8 月および 10 月の CO₂ 吸収フラックス。

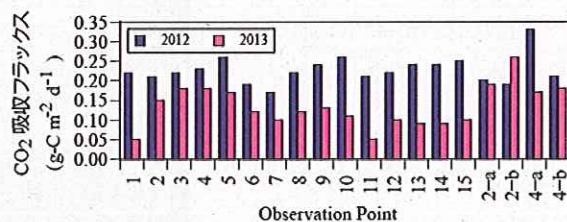


図 7 大阪湾東部の地点別の 2012 年 1 月および 2013 年 1 月の CO₂ 吸収フラックス。

大阪湾岸河口域周辺における地表水－地下水交流プロセスを考慮した 栄養塩負荷の再評価（その2）

代表：小野寺 真一（広島大学大学院総合科学研究科・准教授）

代理発表者：丸山 豊（同上・修士課程1年）

共同研究者：齋藤光代（岡山大学）・清水裕太（学振PD・近中四農研）

〔研究目的〕

本研究では、河川経由の栄養塩負荷量推定の高精度化を念頭に置き、大阪湾岸河口域周辺の栄養塩動態に及ぼす地表水－地下水交流の影響を明らかにすることを目的とした。ここでは、特に水質汚濁が深刻な大和川河口域を含む都市河川を対象とし、前年度までに確認してきた大和川周辺の地下水情報（地質及び水位変動）、感潮域での河川水－地下水交流およびそれにもなう栄養塩動態観測結果とその課題を踏まえて、今年度は主に(1)安定同位体などのいくつかのトレーサーを用いた感潮域での河川水－地下水交流にともなう栄養塩動態を詳細に解明し、(2)河川感潮域の栄養塩収支を観測データ及び分布型流域流出モデルにより推定し、(3)さらに、分布型モデルにより、沿岸部での土地利用の違いによる地下水涵養量の空間変化が地表水－地下水交流に及ぼす影響を見積もる。

〔研究方法〕

前年度までに確認してきた大和川周辺の地下水情報（地質及び水位変動）、感潮域での河川水－地下水交流およびそれにもなう栄養塩動態観測結果を踏まえて、2年目である今年度は下記の内容を行った。(1)感潮域での地表水－地下水交流にともなう栄養塩動態を明らかにするため、ラド

ントレーサー及びピエゾメーター法による調査をより詳細に実施し（図1白丸印の全13地点でラドン測定、OYU1～OYL6の計5地点でピエゾメーター観測）、処理排水などの流入の確認、安定同位体比測定を行った。今回は、2012年9月、11月、2013年1月と3回の集中観測（阪堺大橋 OYU6 でクロロフィル、流量、電気伝導度のモニター及び採水）を実施し、流量及び気温の影響についても調査を行った。採取した水試料は電気伝導度（EC）、溶存酸素濃度（DO）、pH の測定を行い、現地において濾過を行った

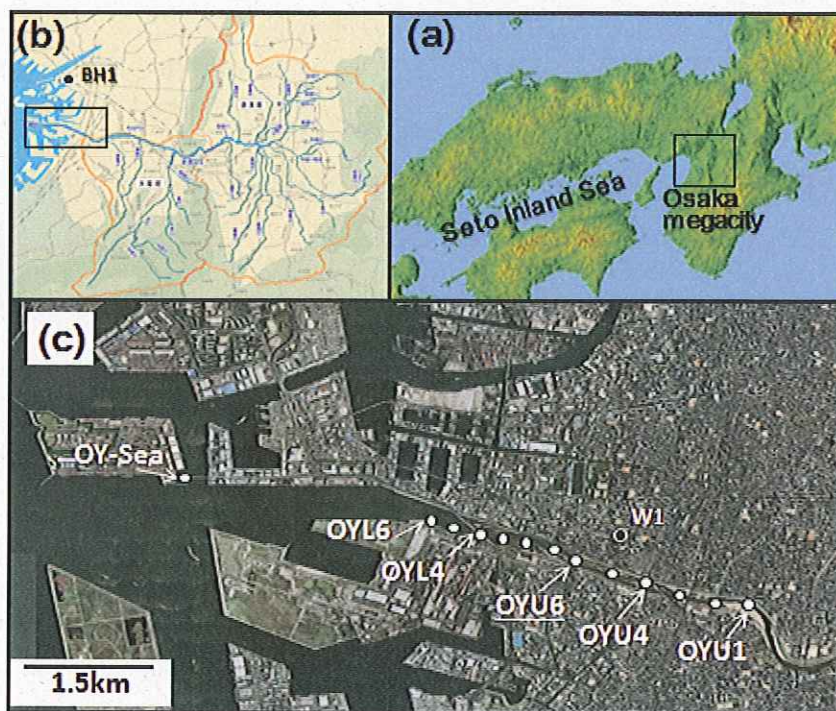


図1 研究地域概要

のちに、実験室において溶存物質については栄養塩（DIN、DIP、DSi）濃度および無機イオン濃度の定量分析を、またフィルターに残された懸濁物質についても各成分濃度（PP、PON、POC）の定量分析を行った。

また、(2)(3)感潮域の上流側を含めた流域からの栄養塩輸送量を高精度に推定（洪水時を含む）するため、準分布型流域流出モデル（SWAT モデル）による解析を行った。

〔結果と考察〕

1. 感潮域における河川水－地下水交流・栄養塩動態

OYU1～OYL6 における河川水位と地下間隙水圧の差（■、+：失水、－：流出）およびラドン（Rn）濃度（折れ線）の分布（図2）は、OYU1を除いて、河川水は失水傾向を示し、地下水を涵養する傾向にあることが確認された。ただし、その量は観測区間における平水時の河川流量（ $25\text{m}^3/\text{s}$ ）に対して $0.1\sim 0.5\%$ 程度と無視できる程度であるが、

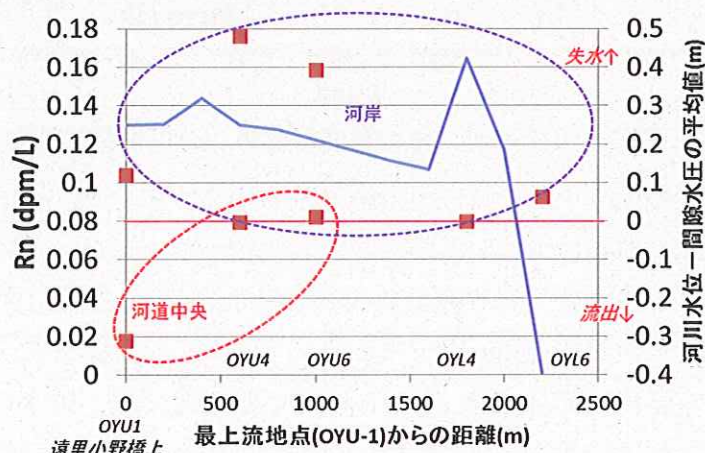


図2 OYU1～OYL6 における河川水－地下水交流の分布

昨年も確認したように、干満に伴う地下水－河川水の出入り（交換量）は河川流量の 1% 程度であると見積もられた。地下水流出のトレーサーである Rn 濃度（Burnett and Dulaiova, 2003）も失水傾向を支持した。ただし、OYL4 で一旦急上昇するのは排水の流入によるものである（都市下水には地下水も多く流出するため）。

また、上流から河口にかけての栄養塩および DOC の濃度分布結果は、干潮時に OYU6 或いは OYL6 に向かって概ね上昇傾向を示し、海域（OYSea）で最も低濃度を示した。排水等の流入は OYU1 の直上及び OYL4 のみであるため、OYU6 周辺での栄養塩濃度の上昇には、上述の河川－地下水交流にともなう栄養塩の供給、或いは Eyre (2000) や Cook et al. (2004) で指摘されているような塩水－淡水混合域でみられる堆積物からの巻き上げ－溶出に加えて堆積物中への水の出入りが関与している可能性が考えられる。

また、図3に上流から河口までにおける懸濁態有機物（POM）の安定同位体比の分布を示す。 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の関係から、海水系（OYSea）と淡水系（OYU2、4、6、OYL6）のプランクトンでは $\delta^{13}\text{C}$ が大きく異なる点、また、感潮域である OYU4～OYL6 においても淡水性のプランクトンが優先している点が明確に確認できる（図4a）。また、OYU6 における $\delta^{15}\text{N}$ は上流の OYU2 と河口域の OYL6 との間の中間的な値を示すものの、PON は上昇していることから（図4b）、堆積物からの再生産によって供給された低い同位体比の無機態窒素が影響している可能性がある。また、OYU6 における栄養塩濃度は、干満に伴う変動が主要成分の DIP 及び NO_3^- で確認でき、概ね干潮に向かって濃度が上昇し満潮に向かって低下する傾向を示す。以上の傾向は、ともに河川－地下水交流に

ともなう栄養塩供給を示唆するものである。

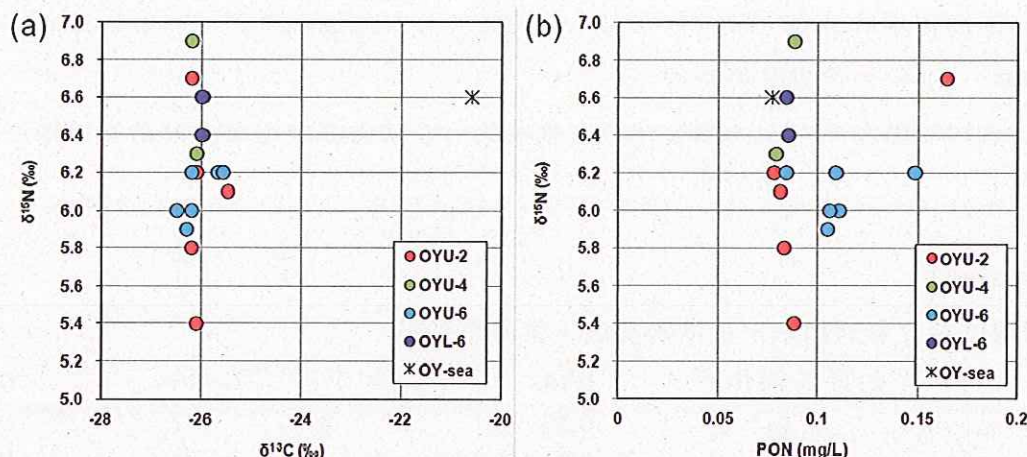


図3 上流～河口での懸濁物質の (a)C-N 安定同位体比および(b)PON-N 同位体比との関係

表 1a, b, c に OYU6 と OYU2 及び OYL6 と OYU6 との間での栄養塩収支を示す。冬季のこの期間は OYU6 まではいずれもプラスであり（堆積物からの供給）、DTN で 9%、DTP で 4%、PP では 70%の負荷があったことが確認できた。溶存成分については、前年の夏季の傾向（Onodera et al., 2013）と同様であるが、懸濁成分については季節変化の評価が必要である。OYL6 までの区間では、排水の流入による栄養塩の負荷も考慮に入れているが、干潮時はトータルの溶存態および懸濁態ともにマイナスとなり、栄養塩の除去（脱窒、リンの吸着・沈殿等）プロセスが卓越していることが明らかになった。一方で満潮時は、DIP の生産が顕著になった。塩水環境においてリンの脱着が起こり、DIP 濃度が上昇したためであると考えられる。また、DON については干潮、満潮ともに感潮域における生産が顕著であることが明らかになった。この原因については定かではなく、今後更なる検討が必要であるが、DON 濃度の高い排水の流入や植物プランクトンからの DON 放出等が影響していると考えられる。

表 1 (a)OYU6 と OYU2 との間での栄養塩収支、(b)干潮時および(c)満潮時の OYL6 と OYU との間での栄養塩収支

OYU-2 → OYU-6	DIN	DON	DTN	PON	DIP	DOP	DTP	PP
ΔNutrients (kg/d)	513	372	885	26	21	1	22	39
ΔNutrients /OYU-2 flux (%)	6	22	9	22	4	10	4	70

OYU-6 → OYL-6 Low tide	DIN	DON	DTN	PON	DIP	DOP	DTP	PP
ΔNutrients (kg/d)	-7202	+6082	-1120	-139	+20	-51	-31	-103
ΔNutrients /OYU-6 flux (%)	-87	+440	-12	-43	+3	-87	-5	-63

OYU-6 → OYL-6 High tide	DIN	DON	DTN	PON	DIP	DOP	DTP	PP
ΔNutrients (kg/d)	-6710	+6348	-362	-45	+175	-27	+148	-31
ΔNutrients /OYU-6 flux (%)	-85	+300	-4	-20	+36	-54	+28	-37

2. 大和川における流域水文モデル（SWAT）による栄養塩流出解析

準分布型水文流出モデル（SWAT モデル；米国農務省開発）による流出解析を行った。

前年の計算条件に対して、新たに他流域（淀川流域、紀ノ川流域）からの導水情報、農地施肥情報、下水処理整備情報を考慮して栄養塩濃度の再現性向上を試みた。計算期間は2000年1月から2013年1月までとした。流量および水質（SS、NO₃、PO₄）のパラメータのキャリブレーションは、2003年から2004年の2年間で、ヴァリデーションは2008年から2009年の2年間でいった。モデルで使用したデータは、標高データ（50mメッシュ）、土壌（20万分の1土地分類調査の土壌分類図；国土交通省土地・水資源局国土調査課）、土地利用（国土数値情報土地利用細分メッシュデータ平成18年度情報）と、流域内外の6つの気象観測所（五條、奈良、堺、生駒山、針、大宇陀）で測定された降水量、気温、風速、相対湿度、日射量（推定値）である。最終的な計算領域とサブ流域構成およびデータ（気象、水文）入力地点を図4(a)に示す。

本解析では、特に、流量、SS、TP、DIPは洪水時の変動を含めて十分高い再現性が確認できた。また、水収支パラメータのキャリブレーションは完了したことから、地下水涵養量の分布を図4b,cのように推定できた。

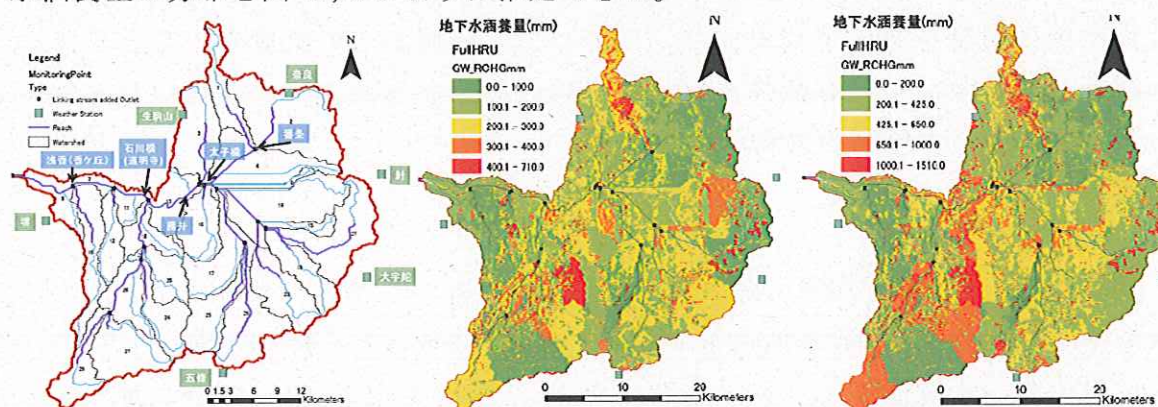


図4 (a)SWATモデル構成、地下水涵養分布解析結果（渇水1994年、豊水1998年）

[今後の課題]

なお、課題は下記の通りである（3年計画の3年目実施分に相当）。（1）SWATモデルのキャリブレーションデータとして、洪水時の情報を個別に採取する必要性。（2）河川モデル及び河川—地下水交流影響も含めて連成した感潮域区間モデル解析による、堆積物との栄養塩交換の評価の必要性。（3）自記記録式センサーで測定された濁度とPP濃度、PON濃度、PON濃度との関係を明確にし、SWATモデルのSS計算結果からPP濃度を再現していく新規の試み。

引用文献

- Burnett, W. C. and Dulaiova, H. (2003) Estimating the dynamics of groundwater input into the coastal zone via continuous radon-222 measurements. *Journal of Environmental Radioactivity*, 69: 21-35.
- Cook, P.L.M., Eyre, B.D., Leeming, R. and Butler, E.C.V. (2004) Benthic fluxes of nitrogen in the tidal reaches of a turbid, high-nitrate sub-tropical river. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 59: 675-685.
- Eyre, B. D. (2000) Regional evaluation of nutrient transformation and phytoplankton growth in nine river-dominated sub-tropical east Australian estuaries, *Marine Ecology Progress Series*, 205: 61-83.
- Onodera, S., Saito, M., Yoshikawa, M., Onishi, K., Shimizu, Y. and Ito, H. (in press) Nutrient transport and surface water-groundwater interactions in the tidal zone of the Yamato River, Japan, *IAHS Publication* (accepted).

武庫川流域を対象とした陸域由来による大阪湾海域の難分解性有機物及び窒素、リンに関する研究

吉田 光方子

(公財) ひょうご環境創造協会

兵庫県環境研究センター 主任研究員

[研究目的]

瀬戸内海では、産業排水や生活排水など陸域からの有機物流入対策により、大幅に有機汚濁負荷量が削減され、赤潮発生件数の減少など水質の改善がみられるようになった。しかしながら、大阪湾における COD の環境基準達成率は十分ではなく、陸域からの汚濁負荷量を削減するだけでなく、陸域から海域に至るまでの有機物や栄養塩類の挙動実態を解明することが必要である。

そこで、海域中の COD が改善されない要因として考えられる難分解性有機物と、生物生産に影響を及ぼす窒素、リンについて、陸域からの負荷を中心とした挙動を解析し、大阪湾での有機物及び栄養塩類の適正な管理方策につながる知見を得ることを目的に本研究を実施した。

[研究方法]

1. 試料採取

試料は、武庫川流域の陸水及び河口近くの沿岸部から沖合にかけて大阪湾の表層水を夏季に採取した。採水地点を Fig.1 に示す。陸域は、下水処理場 2 地点 (P1, 2)、水田用水路、水源池、ダム各 1 地点 (Q1~3)、河川 4 地点 (R1~4) の 9 地点とし、海域は 5 地点 (S1~5) である。

2. 試料調製及び長期生分解試験

溶存態の項目を分析するための試料は、Whatman GF/C でろ過を行い調製した。(以下、前述の試料を「ろ過試料」、未ろ過試料を「生試料」と表記する)

また、長期生分解試験の試料は以下の通り調製した。陸域試料は、生試料に、塩分濃度が 3% となるよう人工海水を添加し、大阪湾海域中の微生物による生分解が行われるように S4 地点の海水を 10% となるよう植種したものを、海域試料については、生試料そのものを 0 日目の試料とした。これらの試料を 100 日間、暗所、 $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ の条件下で通気性を保ち振とうし、100 日後に残存する有機物及び窒素、リンを「難分解性有機物、窒素、リン」と定義した。

3. 分析項目及び測定方法

生分解試験前後の試料について、生試料については、COD、全有機炭素 (TOC)、全窒素 (TN)、全リン (TP) を、ろ過試料については、溶存態 COD (d-COD)、溶存有機

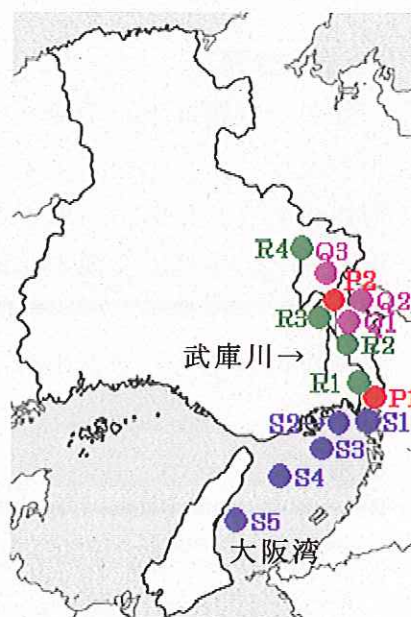


Fig.1 採水地点

炭素 (DOC)、溶存態窒素 (DTN)、溶存無機態窒素 (DIN: $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 合計値)、溶存態リン (DTP)、溶存無機態リン (DIP: $\text{PO}_4\text{-P}$) の分析を実施した。

また、生試料の COD 及び TOC から、ろ過試料の溶存態 d-COD 及び DOC を差し引いた値を、それぞれ懸濁態 COD、懸濁態 TOC とした。同様に、生試料の TN、TP から、溶存態の DTN、DTP を差し引いた値を、それぞれ懸濁態有機態窒素 (PON)、懸濁態リン (PP) とし、溶存態の DTN、DTP から、DIN、DIP を差し引いた値を、それぞれ溶存態有機態窒素 (DON)、溶存態有機態リン (DOP) とした。

また、ろ過試料を用いて、波長 260nm における吸光度 UV260 (日立 U-2001 使用) の測定、3 次元蛍光スペクトル分析 (日立 F-4500 使用) を行うとともに、ゲルろ過を実施し、各分画について溶存有機炭素 (DOC) を測定し、ゲルクロマトグラムを作成した。

[結果と考察]

1. 窒素及びリンにおける態別変化

陸域、海域試料の生分解前試料 (0day) 及び 100 日生分解後試料 (100day) の窒素態別濃度を Fig. 2 に示す。懸濁態有機態窒素 (PON) と溶存態の DTN (DON、DIN) について、生分解前試料と 100 日生分解後試料とを比較すると、100day において、PON は減少し溶存態に変化していた。下水処理場 P1, 2 の 0day 試料では、他試料と比べて DIN 濃度が高いために TN も高くなっており、100day の試料についても、その傾向に変化はなかった。

陸域、海域試料の生分解前試料 (0day) 及び 100 日生分解後試料 (100day) の懸濁態リン (PP) と溶存態の DTP (DOP、DIP) について、生分解前試料と 100 日生分解後試料を比較すると、窒素同様にリンでも 100day において、PP は減少し溶存態に変化していた。

2. COD 及び TOC を指標とした態別有機物量

各地点の生分解前及び生分解後の TOC 及び COD の結果を溶存態と懸濁態に区分して、Fig. 3 に示す。なお、COD の単位は TOC にあわせ、酸素濃度を炭素濃度に換算した。Fig. 3 より、いずれの試料においても生分解前に比べ、生分解後には溶存態の占める割合が高くなり、100 日間の生分解を受け、懸濁態は溶存化または分解し、難分解性有機物の大部分が溶存態となることが示された。また、TOC に対する

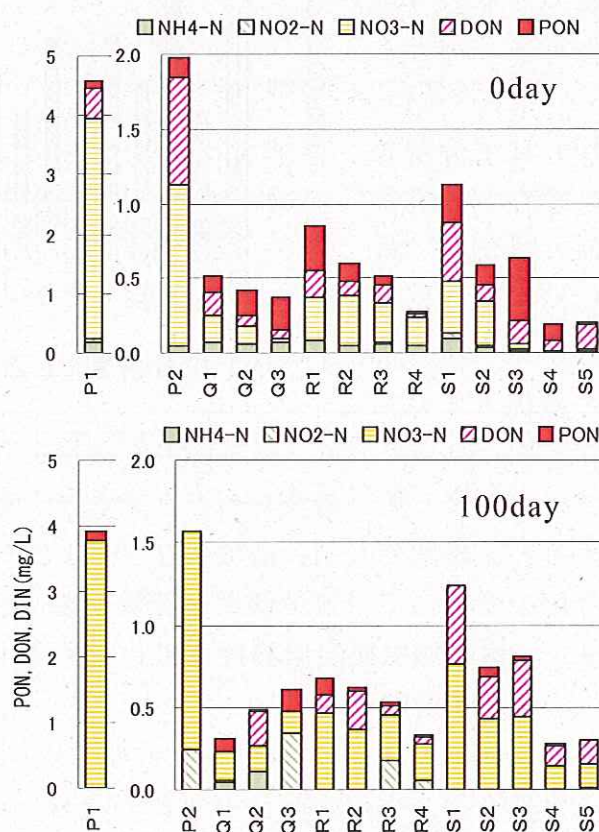


Fig. 2 生分解試験前後の窒素態別濃度

COD の割合は、最も高い生分解前の R4 で 8 割程度、最も低い生分解後の S5 で 4 割程度となり、試料により差はあるものの化学的酸化を受けにくく、COD では評価できない有機物が多く存存していた。さらに、100 日生分解後に残存する有機物の割合は、TOC を指標とした場合に比べて COD を指標とした場

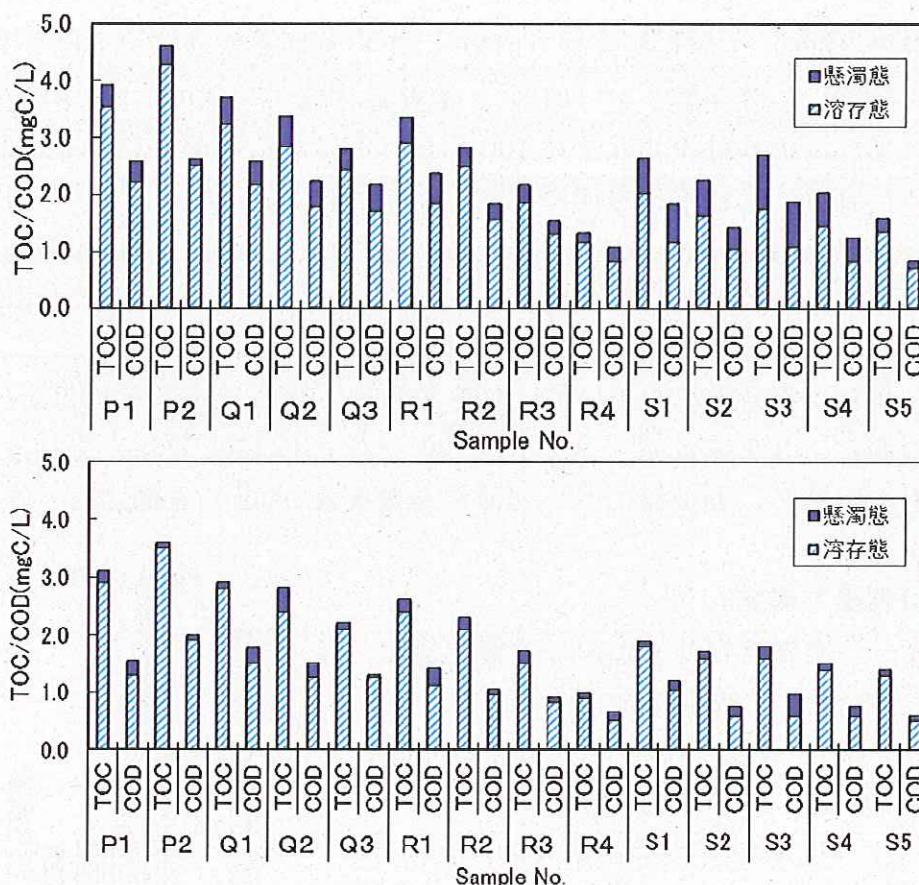


Fig.3 生分解前(上図)及び生分解後(下図)の TOC,COD の結果

合に低くなっており、難分解性有機物を評価する場合は COD でなく、TOC を用いることが望ましいと考えられた。そこで、難分解性有機物の占める割合を TOC で求めると、陸域で 8 割、海域で 7~9 割であり、陸域、海域ともに有機物の中に生物分解を受けにくい難分解性有機物が多く含まれていることが示された。

3. 溶存態有機炭素濃度 DOC に対する UV260 の比 (UV260/DOC) による溶存有機物の構造特性

採取試料の UV260/DOC を比較すると、陸域試料に比べ、海域試料の方が低く、また沖合の方が沿岸域より低い値となった。一般に、土壤腐食物質を多く含む陸域由来の有機物は UV260/DOC 値が高く、内部生産由来の有機物は UV260/DOC 値が低いことから、沖合では内部生産された植物プランクトン由来の有機物を多く含み、沿岸域では陸域から流入する有機物を多く含むことが示唆された。また、生分解前後を比較すると、概ね、生分解後には UV260/DOC の値は低くなっており、芳香族や不飽和二重結合を有する化合物が 260nm 付近に大きな吸収を示すことから、これらの官能基部分は、比較的生分解を受けやすいことが推察された。

4. 3 次元蛍光スペクトル分析による蛍光特性

海域の生分解前試料の蛍光特性をみると、S4、S5 において、陸域試料ではあまり認められなかったタンパク質と類似した蛍光特性が多く認められたのに対して、S1~S3 においては、陸域試料に認められた腐植物質と類似した蛍光特性が多

く認められた。このことは、採取日前の大雨の影響で、沿岸側の海域採水地点には、河川から流れ出した有機物が多く存在していたと考えられた。また、生分解前に認められたタンパク質と類似した蛍光特性は、生分解後にはあまり認められず、かわりに腐植物質と類似した蛍光特性が増えたため、タンパク質タイプの有機物は腐植物質タイプへと変化することが推察された。

5. ゲルクロマトグラフィーによる溶存有機物の分子量分布特性

海域試料の生分解前後におけるゲルクロマトグラムを Fig. 4 に示す。なお、ゲルは、Sephadex G-15（分画可能分子量 1,500 以下）を用いたため、Blue Dextran の溶出位置（No. 34）を分子量 1500 以上、Vitamin B12 の溶出位置（No. 54）を分子量 1,355 とした。Fig. 4

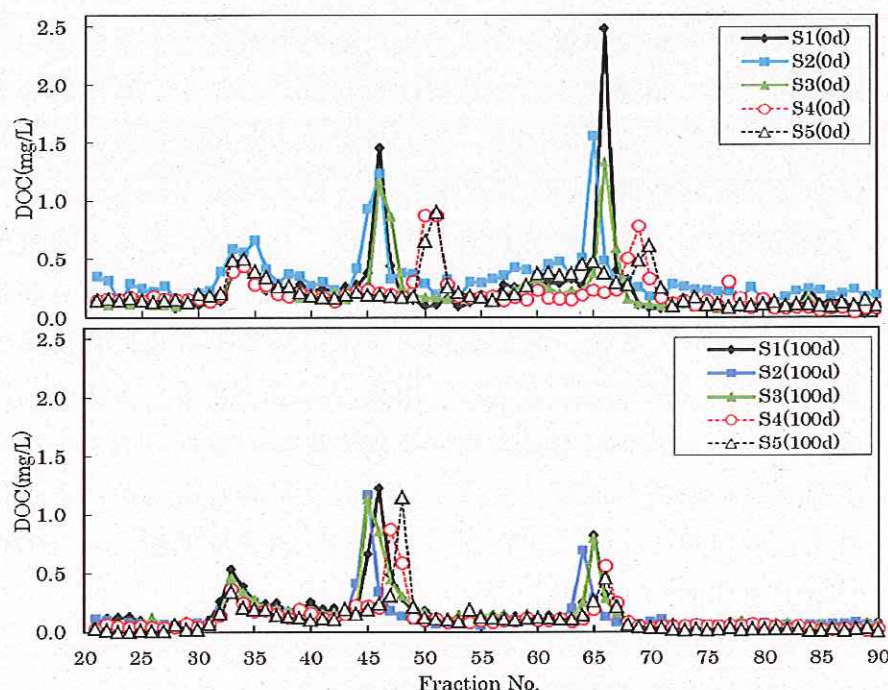


Fig.4 生分解前(上図)と生分解後(下図)のゲルクロマトグラム

No. 65 付近に認められた高いピークは、陸域試料には認められなかったため、この低分子側の有機物は内部生産由来であると推察された。また、このピークは、生分解後に概ね減少したため、内部生産由来の有機物で生分解を受けやすい有機物が存在することが示された。さらに、生分解後のピーク位置より、難分解性有機物は、分子量 1355～1500 の間の有機物を最も多く含むことが示された。

【結論】

本研究では、武庫川流域の陸域起源との比較において、大阪湾海域の海面表層中有機物や窒素、リンについて、生分解特性を把握するとともに、溶存有機物の構造特性、蛍光特性及び分子サイズ特性について解析を行った。

その結果、陸域起源有機物、窒素、リンが海域中に残存する難分解性有機物、窒素、リンに与える影響を解明するための基礎的知見を得ることができた。

今後は、昨年度実施した加古川流域、播磨灘海域との比較及び冬季調査の結果を踏まえた解析を加え、難分解性溶存有機物の特性やそのメカニズムを明らかにし、陸域・海域を含めた流域全体の有機物及び栄養塩管理の新たな視点を加えていくことが必要と考える。

大阪湾流域圏における陸域負荷の定量化と海域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

大阪湾の栄養塩循環を管理するための方策の一つとして，陸域から流入する汚濁負荷を人為的に制御することが挙げられる．しかし，具体的な方策を提案しその実効性を正しく評価するためには，雨天時を含めた陸域負荷の実態と海域の物質循環系に及ぼす影響を定量的に明らかにすることが不可欠である．

本研究では，大阪湾流域圏を対象に，長年にわたる下水処理場からの放流負荷と公共用水域の水質に関する実測データを基に，その季節的・経年的な変動特性を明らかにした(①)．また，大阪府内の下水道施設を対象に合流式下水道越流水 CSO による汚濁負荷の実態調査を実施し，雨天時負荷を含めた大阪湾へ流入する陸域負荷の定量化(②)と大阪湾の水質環境に及ぼす影響の解析(③)を行った．さらに，CSO が放流先水域の水質・底質に及ぼす局所的な影響を明らかにするために，寝屋川流域を流れる感潮河川である古川において雨天時調査を実施した(④)．紙面の都合上，本稿では②と③について述べる．

2. CSO による汚濁負荷の実態調査

CSO 調査は寝屋川流域下水道鴻池処理区(終末下水処理場 1 ヶ所，ポンプ場 6 ヶ所：図-1)において実施した．現地では下水道事務所の方々にご協力をいただき，CSO 試料を 30 分間隔で採水するとともに，水温，pH，電気伝導度，越流量，降雨量について 10 分間隔でモニタリングを行った．採取した試料は冷暗条件下で実験室に持ち帰り，形態別の栄養塩や有機炭素，COD，SS などの水質項目の分析を行った．調査実施期間は 2011 年 10 月～11 月および 2012 年 7 月～2013 年 1 月までとし，降雨時に随時実施した結果，対象処理区全域における全域調査を計 5 回，1 ヶ所のポンプ場(図-1 中の d 地点)の重点調査を計 12 回行うことができた．

その結果，CSO 排水量が多い場合には， $\text{NH}_4\text{-N}$ や SS については晴天日の数十日～数百日分に匹敵する負荷が CSO により発生していることが明

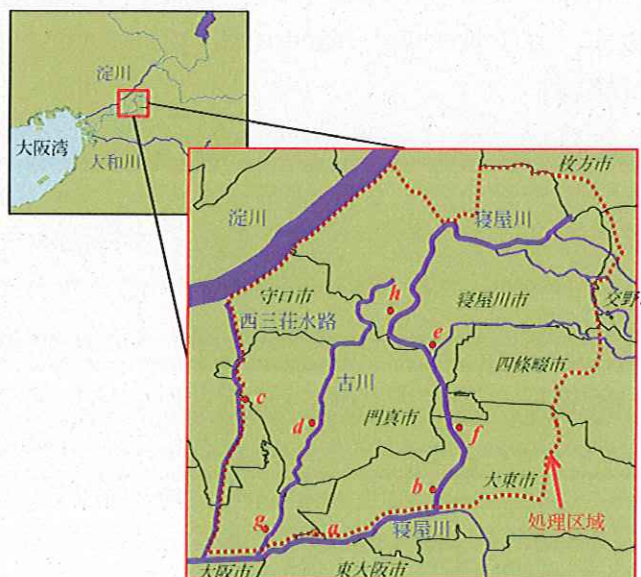


図-1 調査対象とした下水処理場(■)とポンプ場(●)

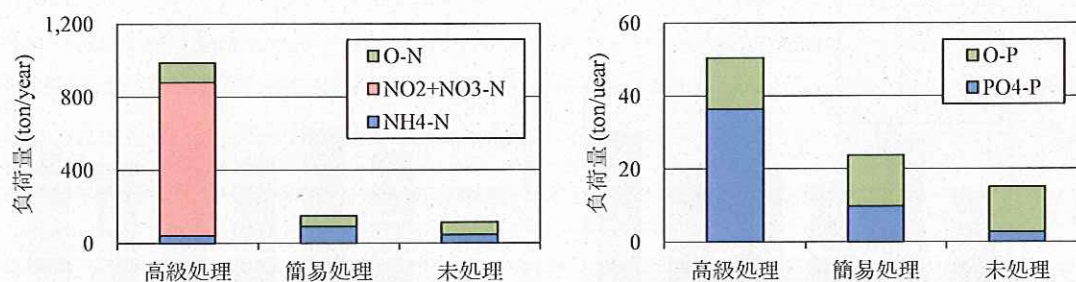


図-2 鴻池処理区における年間高級処理負荷量と CSO 負荷量の算定結果
(2008～2010 年度における 3 年平均値)

らかになり、放流先の水域環境へ短期的に大きなインパクトを及ぼしていることが推察された。また、CSO の水質濃度と降水量、電気伝導度との関係を調べたところ、特定の水質項目については高い相関が認められた。これらの相関関係を用いて、鴻池処理区を対象に 2008～2010 年度における年間 CSO 負荷量（3 ヶ年平均値）を算定したところ、T-N で約 260ton/year、T-P で約 40ton/year との結果が得られた（図-2）。これは、鴻池水みらいセンターの年間高級処理負荷量に対してそれぞれ 0.3 年分、0.8 年分に匹敵しており、長期的な視点からも、CSO が流域内における栄養塩や有機物の大きな発生源となっていることが明らかになった。

3. 雨天時を含めた大阪湾へ流入する陸域負荷の定量化

流入負荷の算定において広く用いられている原単位法では、しばしば流達率の設定が難しく、最終的な算定結果に大きな誤差が生じてしまう。この種の問題を避けるため、本研究では流入負荷を、①河川負荷、②下水処理場負荷、③事業場負荷、④浄化槽等負荷の 4 つに区分して積算することにより、原単位法等の従来法よりも精確な陸域流入負荷の算定を図った。算定方法の詳細は中谷ら(2011)に記述しているが、本研究では雨天時負荷として主要河川の出水負荷だけでなく、上述の調査を基に算定した CSO による負荷量も考慮している。

まず、1980～2010 年度までの 30 年間について、陸域から大阪湾へ流入する晴天時負荷量を算定したところ、COD、T-N、T-P のそれぞれについて、2010 年度には 114ton/day、83ton/day、4.8ton/day が大

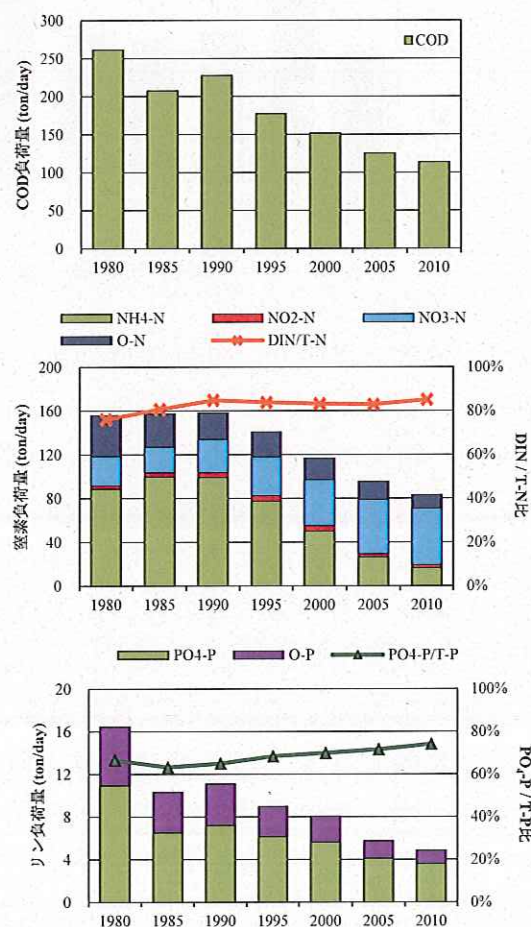


図-3 大阪湾へ流入する晴天時負荷の変遷

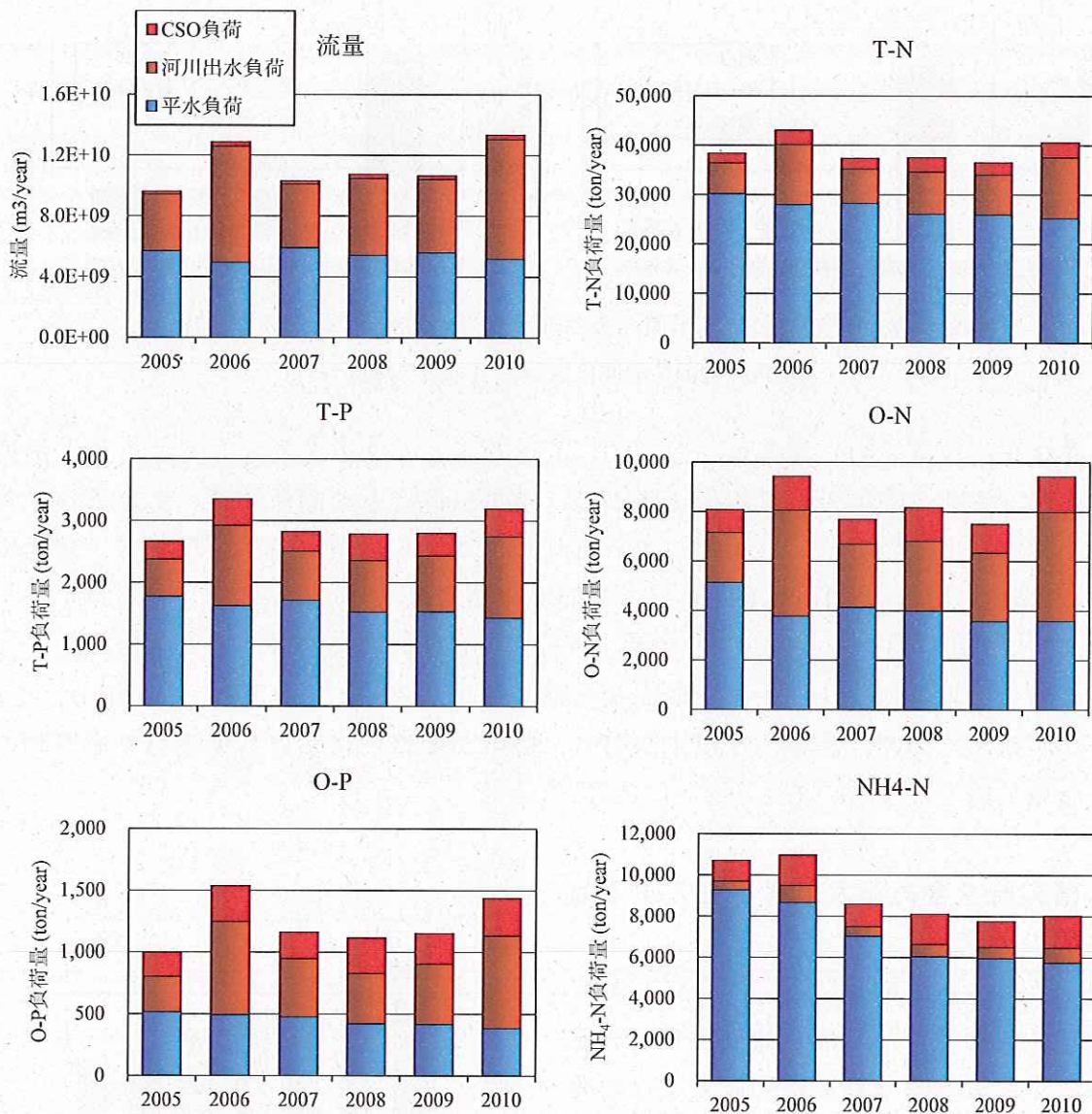


図-4 大阪湾へ流入する陸域負荷の年変動

阪湾へ流入しており、1980年度に比べて約55%、約45%、約70%が削減されたことがわかった（図-3）。

また、晴天時・雨天時をあわせた大阪湾への流入負荷の総量は、2010年度においてT-N、T-Pでそれぞれ40,600ton/year、3,200ton/yearであり、このうち雨天時負荷が占める割合はそれぞれ38%、55%と極めて大きいことがわかった。また、晴天時負荷は近年も減少しつつあるものの、雨天時負荷の変動が相対的に大きいため、総流入負荷量に有意な減少傾向は認められなかった（図-4）。

本研究において算定された負荷量を、環境省が実施する発生負荷量調査における負荷量と比較すると、2010年度では本研究結果の方がT-N、T-Pとも約2倍も大きい結果となった。この差は算定手法の差異、特に雨天時負荷の取り扱いによるところが大きいと考えられ、雨天時負荷を精確に考慮しない場合には陸域負荷の算定結果に大きな誤差が生じてしまい、その結果、負荷削減施策の実効性の評価にも無視できない影響を及ぼすものと考えられた。

4. 大阪湾の水質に及ぼす CSO 抑制施策の効果の評価

三次元流動モデル ECOMSED と水質・底質モデル RCA (図-5) を用いて, CSO 改善施策が大阪湾の水質に及ぼす影響について解析を行った. 大阪湾全域を対象とし, 水平方向には 1km 四方のデカルト座標系を, 鉛直方向には 20 層等分割の σ 座標系を採用した. 開境界条件には実測潮位および水温・塩分(浅海定線水質調査)の変動を与

えた. 気象条件は気象庁メソ数値予報モデル GPV 再解析データと AMeDAS データを基に与え, 風場については空間分布を考慮した. 陸域流入条件は上述の調査・解析結果を基に, 平水負荷, 河川出水負荷, CSO 負荷を与えた. 1ヶ月間の助走計算を行った後, 淀川の流量が最大約 2,500m³/sec に達した出水期間を含む, 2012/9/1~12/1 を解析対象期間とした.

CSO 抑制の効果を評価するために, 再現計算結果と CSO 負荷を無視した場合の計算結果の比較を行ったところ, 表層水質については湾奥部に位置する大阪港周辺においてのみ, 有意な差異が認められた(図-6). これより, 大阪湾全域という広範なスケールで捉えた場合には, 河川出水に比べて CSO が海域水質へ及ぼす影響は相対的に小さく, CSO 抑制による効果は直接的には大きくないと考えられた. 一方, 汚濁海域である湾奥部に着目すると, CSO を抑制した場合には DIN 濃度に大幅な低下が認められ, 湾奥部の水質改善を目的とする場合には CSO 負荷の削減は有効な施策の一つであると考えられた. ただし, 今回の解析では湾奥部における水平格子解像度が粗い等の課題が残されている. 今後より詳細な検討が必要であり, 合流式下水道が多く存在する大阪市内河川および大阪湾奥部に着目した解析が必要と考える.

謝辞 合流式下水道の現地観測では, 大阪府東部流域下水道事務所に多大なご協力を賜った. また, 本研究で使用した河川, 下水道, 事業場等に関するデータについては, 関係自治体により資料提供のご高配を頂いた. ここに深く感謝の意を表します.

参考文献 中谷ら(2011): 土木学会論文集 B2, Vol.67, No.2, pp. I_886-I_890.

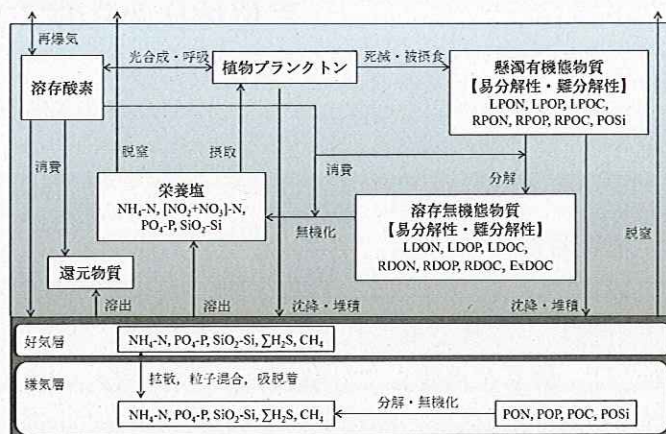


図-5 水質・底質モデル RCA の構成

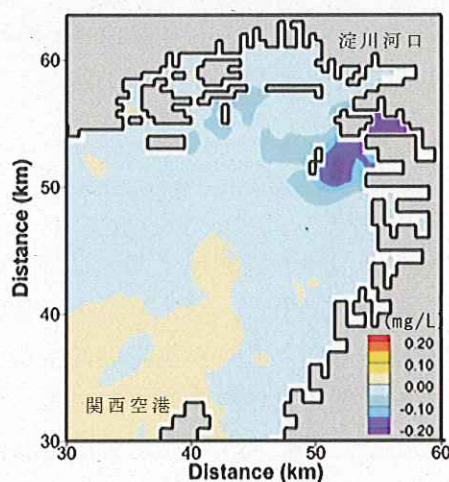


図-6 CSO 抑制による表層 DIN 濃度の変化
(降雨直後の表層分布, 計算結果)

大阪湾における酸素消費有機物(COD)の生成・起源に関する研究： 同位体比からのアプローチ

小林志保

京都大学農学研究科 助教

1. 研究目的

大阪湾の沿岸の港湾域・深掘り跡には強固な貧酸素水塊が発生する。この貧酸素化は、海中の有機物が呼吸分解されるときに溶存酸素(DO)を消費することによって起きる。有機物(POC)は、酸素を消費して分解され、無機態炭素(DIC)になる。

海中の有機物には、陸起源のものと、海域で生産された内部生産起源のものがある。それぞれの炭素同位体比には特徴的な値があり、炭素同位体比分析により有機物を陸起源と内部生産起源に分けることができる。

本研究では、海域の「有機物(POC)」とともに、「有機物分解生成物(DIC)」の炭素同位体比を測定し、実際に酸素を消費している有機物が陸起源であるか内部生産起源であるか明らかにする。

2. 研究方法

大阪湾の沿岸の港湾域・深掘り跡等の、貧酸素化が問題となっている海域において調査を行う。深掘り跡には、春から秋まで貧酸素水塊が形成されており、この水塊中には有機物が分解されてできたDICが高濃度に蓄積されている。貧酸素水塊中のDICの同位体比を、水塊の外の同位体比と比較することによって、有機物が分解してできたDICの同位体比を調べる。これにより、酸素を消費して分解された有機物の起源(陸および海)の割合を求める。

新西宮ヨットハーバーにおいて2012年4月から2013年2月まで毎月1回、2012年8月に深掘り跡(堺2区北泊地、阪南2区沖)および大阪湾全域、淡水領域として千刈水源池において現地調査を行ない、2012年9月以降には採取した水に含まれる有機物の分解実験を行なった。

現地調査においてはCTDを用いて水温・塩分・溶存酸素濃度(DO)・pH・クロロフィル蛍光値および光量子を水深1m間隔で測定し、各層から採水器を用いて海水または淡水を採取し、クロロフィル濃度、DIC・DIN・POC・PON濃度およびそれらの安定同位体比を測定した。観測点を図1に示す。

分解実験は、採取した水をポリ瓶に入れて密栓し、30度の恒温器に入れ、採取から15日間の上記項目の変化を調べる方法により行なった。

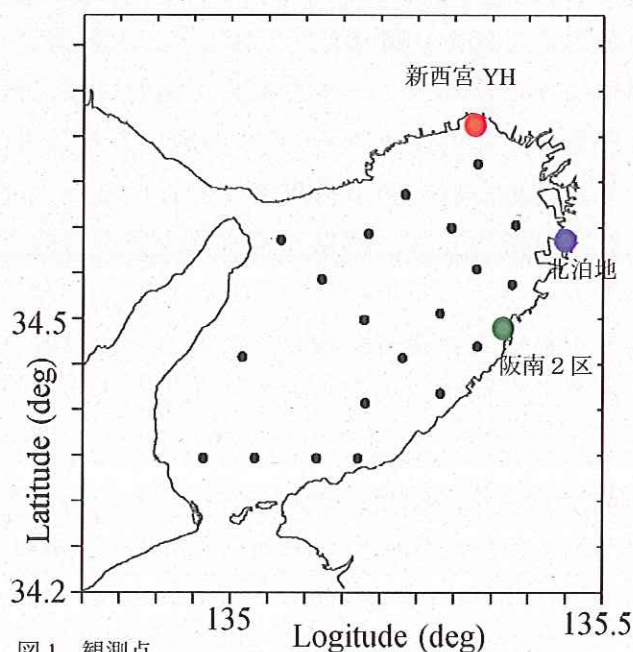


図1 観測点

3. 結果と考察

新西宮ヨットハーバー(YH)において DIC 安定同位体比の鉛直分布を季節ごとに測定したところ、冬季には水柱全体で海水の標準的な値である 0 ‰前後となっており、春季から秋季にかけて下層で -2 ~ -3 ‰の低い値になっていることが明らかになった(図 2)．YH は閉鎖的な港湾域であり、春季から秋季にかけて下層は貧酸素から無酸素状態になっており、有機物の分解が卓越していたことが示唆される．酸素の低下とともに pH も低下していた(図 3)．DIC の安定同位体比は H_2CO_3 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} の各炭酸種のそれぞれの安定同位体比の加重平均である．pH の低下とともに増加する H_2CO_3 の安定同位体比は、YH で観測される pH の範囲でもっとも量の多い HCO_3^- の安定同位体比に比べて低いため、pH が低下すると DIC の安定同位体比も下がる傾向になる．しかしながらその低下幅は観測された pH の低下幅から見積もると最大でも -0.5 ‰程度であり、下層で観測された -2 ~ -3 ‰の低下は説明できない．それゆえ下層における DIC の安定同位体比の低下は、低い炭素安定同位体比をもつ有機物の分解によって起きたものと考えられる．懸濁態有機物である POC の炭素安定同位体比は -20 ‰前後であり、DIC の安定同位体比の低下を起こしうると考えられた．

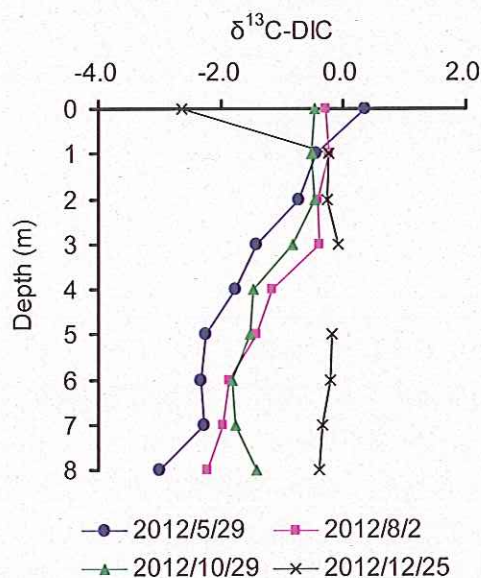


図2 DIC の炭素安定同位体比の鉛直分布

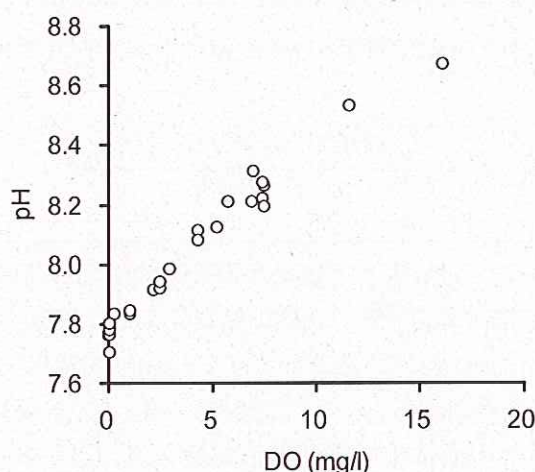


図3 新西宮 YH における DO と pH の関係

一方、表層海水を用いた有機物分解実験の結果から見積もられた分解された有機物の炭素安定同位体比は -30 ‰程度とさらに低く、また溶存有機炭素 (DOC) の分解が大きく寄与していることが示された(表 1)．海水の DOC の安定同位体比を測定することは技術的な問題で困難であったため、淡水域の DOC の安定同位体比を測定したところ、-27 ‰程度の値が得られた．DOC の分解も、DIC の安定同位体比の低下に大きく寄与していると考えられた．

日数	安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$) 濃度(mg C/L)			
	POC	DIC	POC	DIC
0	-20.9	0.5	0.9	23.3
1	-20.3	-0.1	0.8	24.6
2	-20.1	-0.8	0.6	26.3
4	-20.3	-1.0	0.5	26.2
15	-21.1	-2.6	0.2	25.9

表1 表層海水を用いた分解実験結果

大阪湾全域 (20 測点) および堺 2 区北泊地 (4 測点), 阪南 2 区沖 (8 測点) の底層における DO と DIC 濃度の関係を図 4 に, DIC 濃度の逆数と DIC の安定同位体比 (^{13}C) の関係を図 5 に示した. 湾奥および北泊地・阪南 2 区では DO が低く, DIC 濃度が高くなっており, 有機物が酸素を消費しながら分解し, DIC が蓄積していることが示唆された. DIC の安定同位体比は, DIC 濃度が高くなるにしたがって低くなっていた. 深掘り跡の DIC は停滞期開始時点で存在していた DIC と, 停滞期開始以降に呼吸により発生した DIC との混合物とみなすことができる. 停滞期初期における DIC 濃度とその同位体比を $[\text{DIC}]_i$ および $\delta^{13}\text{C}_i$, 停滞期のある時点における DIC のそれらを $[\text{DIC}]$ および $\delta^{13}\text{C}$, 停滞期開始以降に呼吸により負荷されたそれらを $[\text{DIC}]_r$ および $\delta^{13}\text{C}_r$ とおくと,

$$[\text{DIC}] = [\text{DIC}]_i + [\text{DIC}]_r \quad (1)$$

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{[\text{DIC}]_i \cdot \delta^{13}\text{C}_i + [\text{DIC}]_r \cdot \delta^{13}\text{C}_r}{[\text{DIC}]_i + [\text{DIC}]_r} \quad (2)$$

と表すことができる. $\delta^{13}\text{C}_r$ が一定とみなせる場合においては, 式(1), (2)より

$$\delta^{13}\text{C} = \delta^{13}\text{C}_r + \frac{[\text{DIC}]_i \cdot (\delta^{13}\text{C}_i - \delta^{13}\text{C}_r)}{[\text{DIC}]} \quad (3)$$

となり, $\delta^{13}\text{C}$ と DIC 濃度の逆数の関係式 (回帰直線) の切片として, 呼吸により発生した DIC の $\delta^{13}\text{C}$ が求められる. 今回の結果においては DIC の安定同位体比と DIC 濃度との関係は閉鎖性の高い北泊地において顕著であり, その他の領域では両者の関係性はやや弱かった. (3) 式を北泊地の結果に適用すると, $\delta^{13}\text{C}_r$ は -23.6 ‰ ($r^2=0.96$) と見積もられた. また, 同時期に測定した大阪湾奥部の海水中の粒状態有機物の $\delta^{13}\text{C}$ は -20.1 ‰ , 河川水中の粒状態有機物の $\delta^{13}\text{C}$ は -32.4 ‰ であった. これらの比較から, 大阪湾奥部の停滞水塊中で酸素を消費する従属栄養代謝に利用されている有機物のうち 72 % が植物プランクトン由来の内部生産有機物, 28 % が陸域

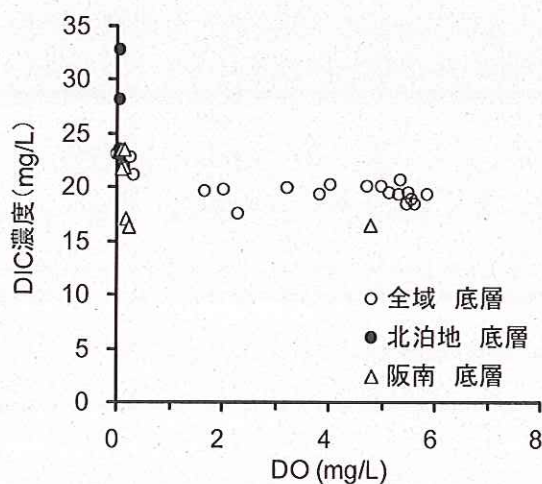


図 4 大阪湾底層における DO と DIC 濃度の関係

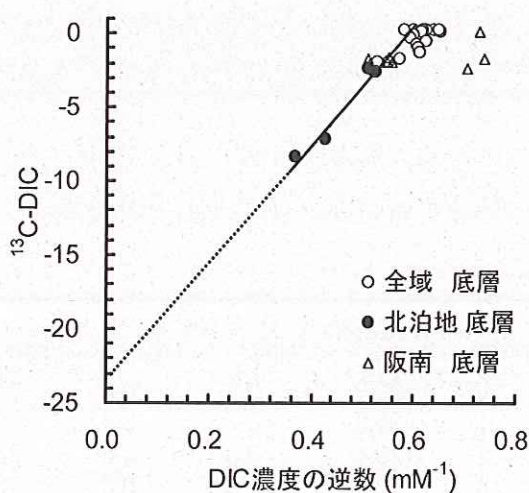


図 5 大阪湾底層における DIC 濃度の逆数と DIC の炭素安定同位体比の関係

由来有機物と推定された。一方、大阪湾全体規模では、有機物量の指標となる COD のうち内部生産の寄与率は 30 ～ 40 %，陸起源の寄与率は 60 ～ 70 % と見積もられており，上記とは割合が逆転している。これは内部生産有機物が陸域由来有機物よりも分解性が高いためと考えられる。大阪湾奥部の停滞水域の海底泥の平均的な $\delta^{13}\text{C}$ は -25.6 ‰ であり，陸域由来有機物の割合は 45 % となる。このことから，内部生産有機物が先に分解され，陸域由来有機物は分解されずに海底に残る割合が高いことがわかる。

以上のことから，閉鎖度の高い深掘り跡においては，DIC の安定同位体比を用いて分解された有機物，すなわち実際に酸素を消費した有機物の起源を推定する方法が適用可能であることが明らかになった。DIC の安定同位体比による起源推定法は，従来用いられてきた POC の安定同位体比を用いた方法に比べて，(1) サンプリングおよび多数サンプルの分析が容易であり，分析結果のばらつきも小さい，(2) 流入・生成する有機物の構成とはやや異なる，「実際に酸素を消費した有機物」の構成がわかる，という点において有用である。一方，閉鎖度がやや低く海水の水平的な移動が大きな場所や，水深が浅く季節によっては下層まで植物プランクトンの増殖 (DIC の取り込み) がある場所への適用など，この方法の沿岸海域への適用については検討すべき課題が残されている。また，DIC が過飽和の状態になっている現場では，pH やアルカリ度を測定し，それらを用いて DIC 濃度を見積もる必要もある。これらをふまえて有機物分解実験による従来の手法を併用し，DIC の安定同位体比を用いた方法から得られた結果との整合性を確認する必要がある。

4. 結論

本研究では，「有機物の分解生成物」を同位体比分析することによって，大阪湾奥の深掘り跡において実際に酸素を消費している有機物の約 7 割が内部生産起源，約 3 割が陸起源であることを明らかにした。沿岸海域の貧酸素化を防止するためには，陸からの有機物の流入を削減するとともに，海水中で分解されやすく酸素消費への寄与率が高い内部生産有機物の時空間変動を予測しその生成を抑制する方策も必要である。

また従来の方法に比べて簡易な測定で正確な見積もりが可能な DIC の安定同位体比を用いた酸素消費有機物の起源推定法の沿岸海域への適用が，閉鎖度の高い領域には可能であることが確かめられた。DIC の安定同位体比は現場の DO や pH の値との関係が強く，生物活動によって鋭敏に変化する指標の一つであることから，沿岸海域における炭素の動態，ひいては酸素の動態を調べるのに有効であるといえる。

