

プログラム

◆あいさつ・フェニックスセンターの紹介

13:00～13:15

矢野 久志 (大阪湾広域臨海環境整備センター常務理事)
樋口 進 (大阪湾広域臨海環境整備センター環境課長)

◆個別発表

13:15～16:25

- (1) 大阪湾の植物プランクトンの季節変動とその要因 (13:15～13:30)
多田 邦尚 (香川大学農学部)
- (2) 東部瀬戸内海における栄養塩環境の順応的管理手法に関する研究 (13:30～13:45)
中嶋 昌紀 (大阪府環境農林水産総合研究所水産研究部)
原田 和弘 (兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター)
- (3) 海産バイオマスのメタン発酵および堆肥化技術の開発 (13:45～14:00)
大塚 耕司 (大阪府立大学大学院工学研究科)
- (4) 港湾等の強閉鎖性水域の水環境再生・創造技術の開発 (14:00～14:15)
ー特に貧酸素水塊・青潮対策についてー
藤井 智康 (奈良教育大学教育学部)
- (5) 閉鎖性水域に取り残された自然砂浜の地形変化に及ぼす航走波の影響 (14:15～14:30)
宇野 宏司 (神戸市立工業高等専門学校都市工学科)
- (6) 廃水、廃棄物における有機フッ素化合物 (PFCs) の分析及び
大阪湾圏域への環境負荷低減処理に関する調査研究 (14:30～14:45)
吉田 光方子 ((財)ひょうご環境創造協会兵庫県環境研究センター)

— — — — — 休 憩 14:45～14:55 — — — — —

- (7) 放射性同位元素を用いた地下水湧出量・栄養塩負荷量の定量と大阪湾内の滞留時間の評価 (14:55～15:10)
梅澤 有 (長崎大学水産学部海洋資源動態科学講座)
- (8) 大阪湾御前浜の生物生息環境に海底地下水湧出が及ぼす影響 (15:10～15:25)
安元 純 (琉球大学農学部地域農業工学科)
- (9) 大阪湾への地下水による栄養塩流出とその長期変動に関する評価 (15:25～15:40)
小野寺 真一 (広島大学大学院総合科学研究科)
- (10) 新たに造成される浅場の機能評価モデルの開発に向けた底質劣化に関する研究 (15:40～15:55)
入江 政安 (大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻)
- (11) 大阪湾圏の浅海域成育場が魚類生産に果たす役割の定量評価 : 広域調査による空間変動解析 (15:55～16:10)
小路 淳 (広島大学大学院生物圏科学研究科瀬戸内圏フィールド科学教育研究センター竹原水産実験所)
- (12) 分布型水文流出モデルを用いた播磨灘に流入する淡水流入量の推定に関する研究 (16:10～16:25)
石塚 正秀 (香川大学工学部)

◆質疑 16:25～16:35

◆講評 16:35～16:55

柳 哲雄 (選考委員会委員長)

◆閉会 16:55～17:00

松田 治 (瀬戸内海研究会議会長)

大阪湾の植物プランクトンの季節変動とその要因

多田 邦尚

香川大学農学部・教授

香川大学瀬戸内圏研究センター

【はじめに】

本研究は瀬戸内海の中で最も富栄養化した大阪湾において、生態系の出発点である植物プランクトンとその生育環境に注目し、低次生物生産過程における特徴を明らかにすることを目的としている。具体的には、植物プランクトンの現存量と種組成、および栄養塩濃度等の年変動および季節変動について検討した。また、大阪湾における植物プランクトンの優占種とされている珪藻類の *Skeletonema* 属は、その種が未だ同定されていないので、*Skeletonema* 属の出現種も明らかにする。以上のことは、大阪湾における海域環境の再生・創造を考える上で、最も重要なことであり、逆に、これらのことが明らかにされない以上は、その環境修復・保全策も立てようがない。本研究は、大阪湾の今後の健全な生態系の維持と持続的な生物生産、および水産資源の回復のため、さらには、その再生・創造に寄与するための基礎データを得ることを目標としている。尚、本研究は多田を研究代表者とし、下記のグループで実施した共同研究である。

研究者名：代表者 多田 邦尚（香川大学農学部）

山本 圭吾（大阪府水産技術センター）

西川 哲也（兵庫県水産技術センター）

山田真知子（福岡女子大学人間科学部）

樽谷 賢治（水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所）

一見 和彦（香川大学瀬戸内圏研究センター）

【研究方法】

大阪府水産技術センターが毎月 1 回、月の月上旬に実施している浅海定線調査時に試料を採取した。また、大阪湾における植物プランクトンの長期的な変動を解析するために、大阪湾公共用水域プランクトン調査の調査結果を用いた。同調査は 1972 年 4 月から大阪湾東部海域において毎月 1 回、小潮時に行われ、プランクトン試料はバンドン採水器で水深 1m 層から採水されたものである。環境データは大阪府環境農林水産総合研究所水産技術センター（旧大阪府立水産試験場）が同じく 1972 年から行っている浅海定線調査における表層の水温・塩分・DIN（溶存態無機態窒素）・DIP（溶存態無機態リン）の調査結果を用いた。データ解析の際には、植物プランクトンデータについては 12 ヶ月分、環境データについては 2, 5, 8, 11 月の年 4 回のデータを用いて 1 年間の平均とした。

さらに、大阪湾における植物プランクトンの優占種とされている珪藻類の

Skeletonema 属は、その種が未だ同定されていない。そこで、2009 年 4 月から翌年 2 月までの 11 ヶ月間にわたり毎月 1 回、大阪湾で単離された *Skeletonema* 属細胞の電子顕微鏡観察と遺伝子解析手法により種の同定を行った。

【結果と考察】

○ 大阪湾の植物プランクトン組成と環境

平成 21 年の植物プランクトン出現状況を図 1. に示した。年間を通して珪藻類の細胞密度が最も高く、珪藻類が優占していた（図 1）。珪藻類のなかでは 5 月には *Pseudonitzschia* spp. が優占していたが、その後 8 月まで *Skeletonema* 属が優占した。9 月にいったん減少した後、10 月～11 月および 2 月にも割合は増加した。その他、*Thalassiosira* 属は 9 月に、*Chaetoceros* 属は観測期間の後半に高い割合を占める傾向が見られた（図 1）。

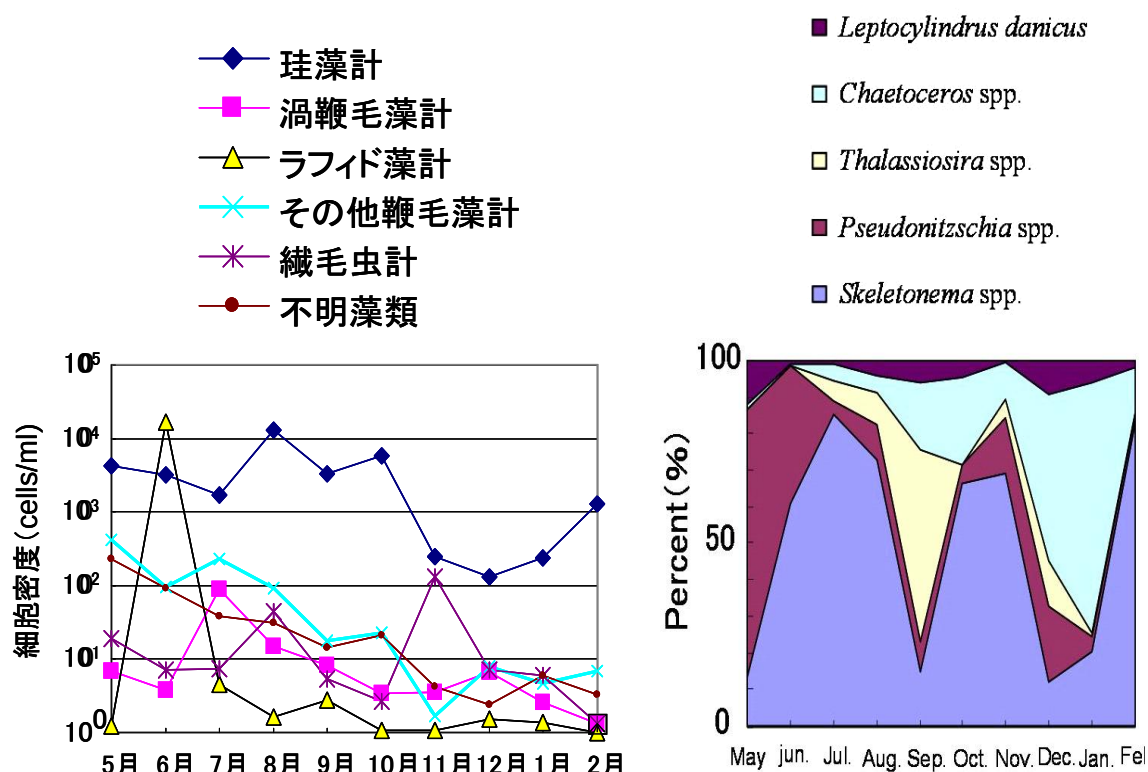


図 1. 平成 21 年の大阪湾における植物プランクトンの分類群別の細胞密度(左図)と珪藻類の出現種の月別変化 (右図)

次に、大阪湾における過去 35 年間の植物プランクトン出現状況では、珪藻類が出現の 9 割を占め、80 年代中頃を除いては珪藻類が優占していた。珪藻類の中で *Skeletonema* 属は 80 年代後半までその大部分を占めていたが、90 年代以降 *Chaetoceros* 属、*Leptocylindrus* 属などの細胞密度が増加し、*Skeletonema* 属の割合は減少していた。鞭毛藻類では *Heterosigma* 属で 90 年代初めに大規模な増殖がみられた(図 2.)。一方、大阪湾の西に位置する播磨灘では 1980 年代に *Skeletonema* 属から *Chaetoceros* 属へ、顕著な出現種の変化が生じており、また 1970 年代後半

および 1980 年代半ばに *Heterosigma akashiwo* の大規模な増殖が頻発していたことが報告されている (Nishikawa *et al.* 2010)。すなわち、珪藻類の変化、*Heterosigma* 属の増殖時期で大阪湾とほぼ 10 年の年差がみられた。これには栄養塩、特に DIN の変化が関係している可能性が推察された。

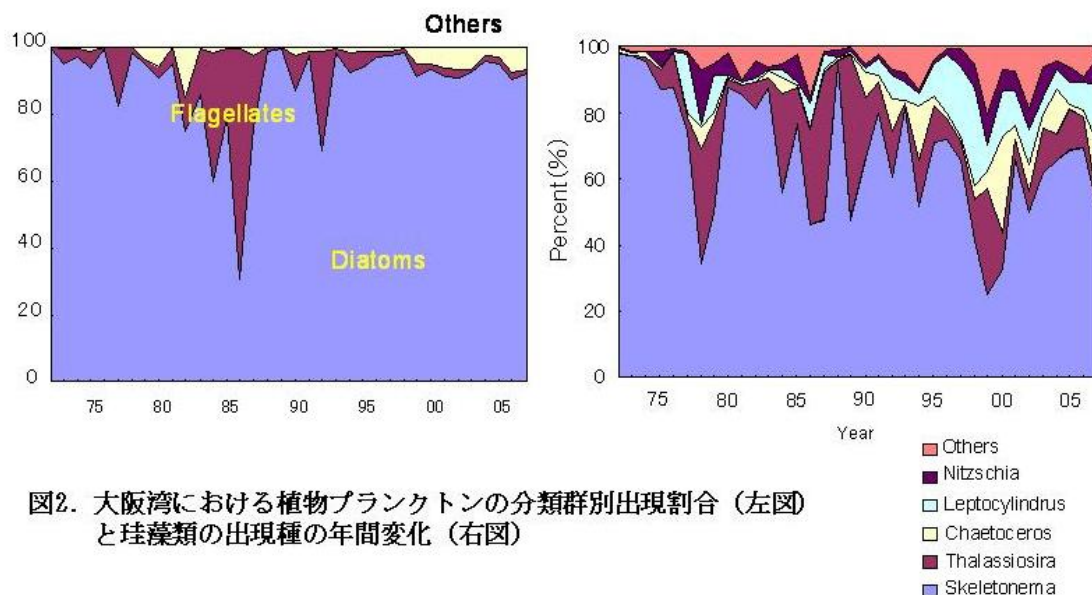


図2. 大阪湾における植物プランクトンの分類群別出現割合 (左図) と珪藻類の出現種の年間変化 (右図)

○ 大阪湾の *Skeletonema* 属各種の季節的消長

大阪湾において、珪藻類の *Skeletonema* 属は、前述のように植物プランクトン群集の中で最も出現量が多く出現頻度も高いことから湾の基礎生産者として極めて重要であると考えられる。しかし近年、Sarno ら (2005, 2007) によって遺伝子解析と電子顕微鏡を用いた *Skeletonema* 属の新しい分類法が提案された結果、これまで *S. costatum* と呼称されていたものには 8 種が含まれることが報告された。そこで、*Skeletonema* 属の出現について再調査が必要となったため、2009 年 4 月から翌年 2 月までの 11 ヶ月間にわたり毎月 1 回、Sarno ら (2005, 2007) の方法に準じて *Skeletonema* 属各種の同定を試み、季節的消長の解明を試みた。

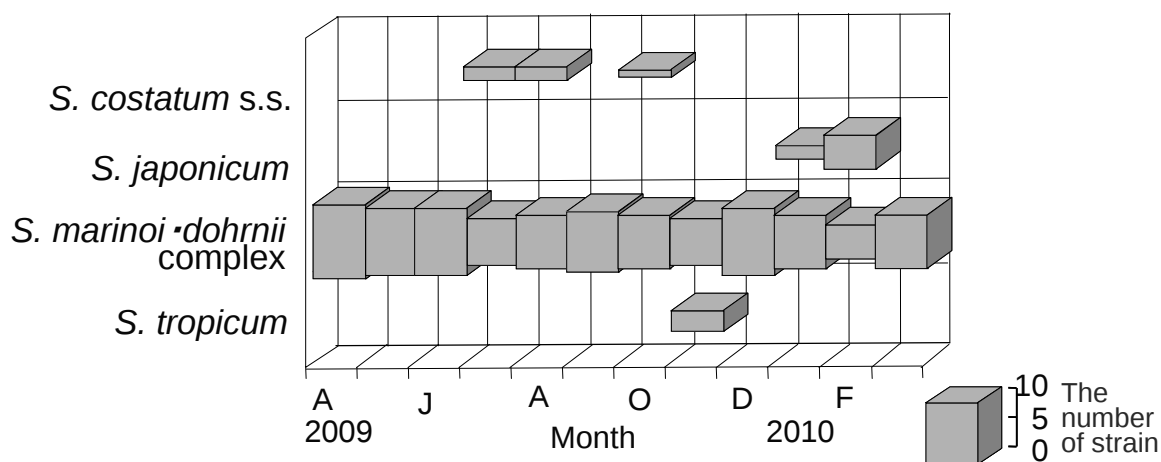


図 3. 大阪湾における *Skeletonema* 属各種の季節的消長

図 3. に示すように、大阪湾では *Skeletonema* 属は 4 種が出現し、周年にわたって優占的に出現したのは *S. marinoi-dohrnii* complex であった。夏季には *S. costatum* s. s.、秋季には *S. tropicum*、冬季には *S. japonicum* が、これに混生していることが確かめられた。

○ 大阪湾に出現した *Skeletonema* 属各種の温度増殖特性

大阪湾に出現した *Skeletonema* 属 4 種について、洞海湾から単離されたそれらの温度増殖特性を培養実験で調べ、図 3 に示した。この図に示されるように、*S. marinoi-dohrnii* complex は 10～30℃の広い温度範囲にわたって比増殖速度が高かった。*S. costatum* s. s. と *S. tropicum* は 10℃では比増殖速度が低いか増殖できなかったのに対し、20～30℃では高い比増殖速度を示した。一方、*S. japonicum* は 10℃では比増殖速度が高かったのに対し、30℃では増殖できなかった。このように、*Skeletonema* 属 4 種の温度増殖特性は大阪湾での季節的消長によく対応していた。

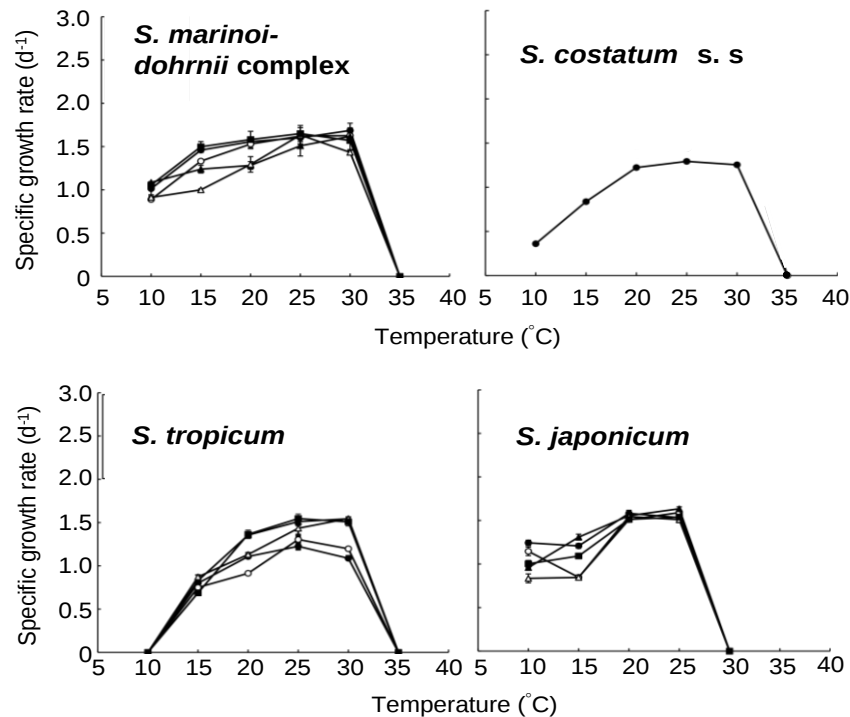


図 4. 大阪湾に出現した *Skeletonema* 属各種の温度増殖特性
(Kaeriyama *et al.*, 投稿中)

【まとめ】

観測を行った平成 21 年度に大阪湾では、年間を通じて珪藻類が優占しており、珪藻類のなかでは *Skeletonema* 属が主要な種であった。この *Skeletonema* 属は電子顕微鏡観察と遺伝子解析の結果、4 種により構成されていることがわかった。過去 35 年間の植物プランクトン出現状況では、90 年代以降、鞭毛藻類の出現割合は減少し、珪藻類の優占率は増加していたが、珪藻類のなかで *Skeletonema* 属の割合は減少していた。

東部瀬戸内海における栄養塩環境の順応的管理手法に関する研究

○中嶋昌紀[†]、原田和弘^{††}、宮原一隆^{††}、仲川直子[#]

[†]大阪府環境農林水産総合研究所 主任研究員

^{††}兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター 主任研究員

[#]兵庫県環境研究センター 主任研究員

1. はじめに

瀬戸内海の水質環境は法的排出規制によって改善してきたが、一方では養殖ノリの色落ち被害や漁獲量の減少が顕著となっている。このような海の生産力の低下は、栄養塩濃度（特に窒素）の低下が原因の1つと推察される。栄養塩の供給源としては陸域や外海水の流入が考えられるが、人為的にコントロール可能なのは前者である。豊かな海の再生を実現するためには、望ましい栄養塩レベルを明らかにしつつ、陸域からの栄養塩供給の制御を通じた、栄養塩環境の順応的管理手法の研究を進める必要がある。これにはまず、現状の栄養塩環境の正確な把握のほか、栄養塩の化学的動態を明らかにしておくことが必要である。特に、環境指標である全窒素（TN）と一次生産に最も重要な溶存態無機窒素（DIN）の関係を明らかにすることは、順応的管理を進める上で基本的な事項である。そこで、本研究では窒素等の存在形態別濃度の時間的、空間的変動を明らかにし、TNとDINの関係およびそれらの変動要因について検討した。

2. 調査研究方法

大阪湾奥部には淀川、神崎川、大和川といった大河川が存在し、東部瀬戸内海に対する陸域からのNP負荷が集中している。そこで、大阪湾奥部から播磨灘にかけての水塊分布と、窒素、リンの存在形態別濃度分布を明らかにし、さらに難分解性等、溶存有機物の特性に関する知見を得るために、以下の調査を行った。

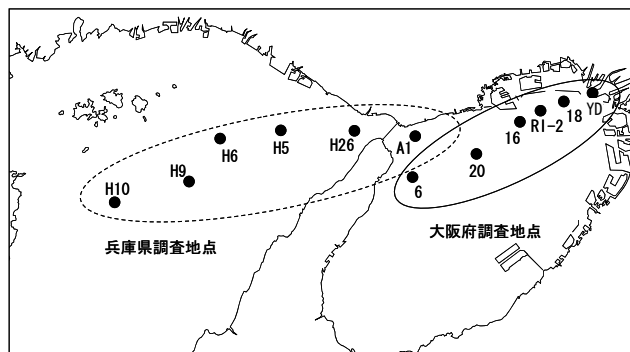


図1 調査地点

2-1. 海洋観測

- ・調査海域：大阪湾奥の淀川河口から播磨灘中央に至る海域（図1）
- ・調査時期：冬季を中心とした年6回（2009年5, 8, 11, 12月、2010年1, 2月）
- ・観測内容：一般海洋観測（水温、塩分、透明度等）、クロロフィルa、プランクトン。

CTD観測は表層から近底層まで行い、採水は表層、中層（5m又は10m）、底層（海底上1～5m）で行った。

2-2. 分析項目

採取した海水は、一部をGF/Cガラスろ紙によりろ過し、ろ過海水と生海水について下記の項目の分析を行った。なお、懸濁態有機窒素・懸濁態リンについては、全窒素・全リンから溶存態全窒素・溶存態全リンの値を差し引くことによって求めた。

- ・窒素濃度：全窒素（以下 TN）、懸濁態有機窒素（以下 PON）、溶存態有機窒素（以下 DON）、溶存態無機窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の合計、以下 DIN）
- ・リン濃度：全リン（以下 TP）、懸濁態リン（以下 PP）、溶存態有機リン（以下 DOP）、溶存態無機リン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ 、以下 DIP）
- ・ケイ素濃度：ケイ酸態ケイ素（ $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 、以下 DSi）

2-3. 難分解性有機物試料の調製と分析

8, 12 月に採取した St. A1, 16, 18, YD における表層海水をそれぞれ 1L 容のねじ口ガラスビンに 9 分目になるように分取した後、シリコ栓でフタをし、通気性を維持した状態で、 20°C に設定したインキュベーターにおいて、100 日間、毎分 50 回転で振とうさせた。なお、100 日間分解されずに残っている有機物を難分解性有機物と定義し、100 日間の生分解試験後に得られた試料を難分解性有機物試料とした。試料番号は各定点番号に (R) をつけて表記した。採取直後の試料と難分解性有機物試料について、それぞれ全有機炭素濃度（以下 TOC）、ろ過試料の溶存有機炭素濃度（以下 DOC）を測定し、懸濁態有機炭素濃度（以下 POC）は TOC から DOC を差し引くことによって求めた。難分解性有機物試料については TN、PON、DON、DIN も測定した。また、各試料の溶存態物質の蛍光特性を把握するために、ろ過試料の 3 次元蛍光スペクトル分析を行った。

3. 結果と考察

3-1. 水塊分布

表層塩分分布の変動を図 2 に示す。表層塩分は大きな河川水流入のある淀川河口 St. YD が最も低く、5, 8 月には 5 以下とかなり低くなっている、河川水の影響域（river plume、概ね塩分 31 以下）は大阪湾中央部 St. 20 まで達していた。river plume の範囲が最も小さかったのは 12 月で、大阪湾奥部の St. 18 までであった。全ての観測時における密度の鉛直構造は、夏季の底層を除いて、主に塩分の鉛直分布によって決まっていた。

3-2. 各態窒素の時間的・空間的変動

一例として、表層 TN 水平分布の季節変動を図 3 に示す。表層については、大阪湾奥部では DIN が高いために TN も高くなっていた。11 月-2 月では DIN と TN は同じような分布をしていたが、5 月、8 月の TN は他の月に比べて St. 16、20 で相対的に高めになっていた。これは 5 月、8 月の PON が高くなっていたためである。12

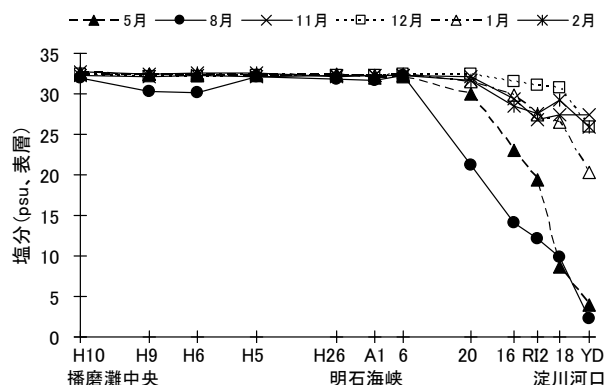


図 2 塩分水平分布の季節変動（表層）

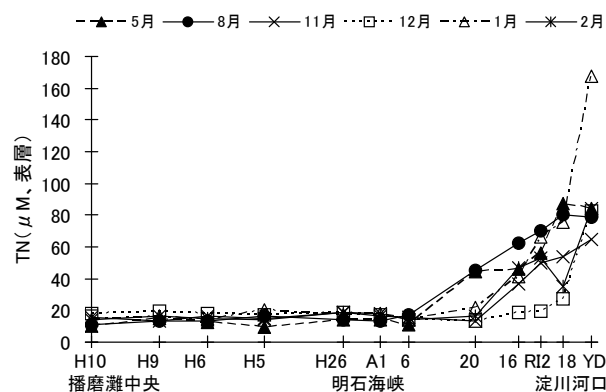


図 3 TN 水平分布の季節変動（表層）

月、1月を除いて、大阪湾のPONは淀川河口 St.YD よりも西側の定点で最も高くなっていた。これは river plume の広がりと共に一致していて、河川水が大阪湾に流入した直後よりも、ある程度沖合に広がったところで PON が最も高くなることを示している。一方、播磨灘では DIN は低く、TN のうちのかかなりの部分を DON が占めていた。これらのことから、淀川河口に流入した大量の DIN は沖合への river plume の広がりとともに急速に植物プランクトンに消費され、大阪湾中央部の St.20 から播磨灘中央部の St.H10 では一様に低濃度になっていると考えられた。また、TN は大阪湾奥部を中心として river plume 内で高濃度になっているが、river plume の外側では播磨灘も大阪湾西部も同程度の濃度分布になっていると考えられた。

3-3. N・P 各項目間の関連性

大阪湾奥部から播磨灘中央部にかけての海域の表層では、季節を問わず TN と DIN に非常に高い正の相関があることが分かった。また、表層よりは相関が低いものの、底層の TN と DIN にも高い正の相関があった。TP と DIP の相関については、表層ではばらつきが大きい、底層では TP と DIP に高い正の相関があった。

3-4. 塩分と TN・TP の関連性

表層の TN については、調査毎に塩分と TN の値は異なるものの、両者には非常に高い負の相関が見られた。一方、底層の TN については、8月には TN と塩分の間に関連性は見られず、その他の月では大きく見れば負の相関が見られるが、1月を除いて相関は高くなかった。

表層の TP については、塩分と TN の関係よりはやや相関が低い月もあるが、塩分と TP には高い負の相関が見られた。一方、底層の TP については、8月には TN 同様、TP と塩分の間に関連性は全く見られず、1月にやや負の相関が見られた。

これらのことから、大阪湾奥の表層に淡水とともに流入した TN、TP は、淡水の拡散と同時に希釈されて運ばれ、見かけ上、保存物質的に振る舞いながら播磨灘中央部まで表層を拡散していくことが示唆された。なお、8月の底層で特に相関が見られない理由としては、大阪湾奥部や播磨灘中央部の底層付近に形成される冷水塊中で N、P が分解・再生、溶出して蓄積されることが影響していると考えられる。

3-5. DIN/DIP 比について

播磨灘中央部から大阪湾中央部にかけての海域では、周年、DIN/DIP 比はレッドフィールド比の 16 よりも低く、DIN が枯渇しやすい環境にあることが分かった。一方、大阪湾奥部で DIN/DIP が 16 より大きい海域は、塩分の分布から river plume 内部と判断した海域と一致する。また、底層の DIN/DIP 比は大阪湾の最奥部で1月と2月に16より大きくなっているのみで、ほとんどの調査時には DIN が相対的に少なかった。これらのことから、大阪湾から播磨灘中央部にかけての海域では、大阪湾奥からの river plume 内部でリンが枯渇しやすく、それ以外の大半の海域では窒素が枯渇しやすい環境となっていた。

3-5. 有機炭素、有機窒素を指標とした有機物の分解特性について

有機物（懸濁態＋溶存態）に関する 100 日生分解試験の結果、有機態炭素、有機態

窒素を指標としたいずれの分析からも、生分解後には溶存態の占める割合が高くなることが明らかになった。また、生分解後に残っている有機物を難分解性有機物として分布を見ると、有機炭素を指標とした 8 月試料と 12 月試料、有機態窒素を指標とした 8 月試料とも、概ね淀川河口から離れるに従って分解されずに残る有機物の割合は高くなっていた。

3-6. 3 次元蛍光スペクトル分析の結果

3 次元蛍光スペクトル分析による蛍光特性から、生分解過程中、タンパク質様ピークの蛍光を発する有機物の一部が分解され、腐植物質様ピークの蛍光を発する有機物が生成されていき、難分解性溶存有機物を構成する有機物の多くを腐植物質タイプの有機物が占めていることが示唆された。また、8 月試料はタンパク質タイプの有機物が生分解を受けやすいが、12 月試料では、タンパク質タイプの有機物が生分解を受けにくく、一部タンパク質タイプの有機物として残存することが示唆された。

4. おわりに

公共用水域測定結果等から大阪湾奥部における窒素濃度の動向を概観すると、TN は 1970 年代末に最高レベルに達したのち 1980 年代になって減少し、1990 年代初頭にかけては横ばいで推移したが、その後は減少を続けている。一方、DIN は、これまでは TN と概ね同じような変動をしていたが、2003 年頃からは TN と異なって低下が著しい。同様に播磨灘北部海域における窒素濃度の動向を概観すると、TN は 2000 年代に入ってから低下の傾向が見られるものの、1970 年代末～1980 年代初めに比べると高いレベルにある。一方、DIN は、増減はあるものの、長期的な減少傾向がみられ、近年はノリ養殖期において色落ち限界濃度の $3\mu\text{M}$ を下回るようになってきている。このように、モニタリングデータによる長期間の経年変動からは、近年の大阪湾奥部や播磨灘北部海域における TN と DIN の変動傾向は一致していないようである。

環境指標である TN と 1 次生産に利用される DIN との間に乖離があるとすれば、栄養塩環境の評価と管理において大きな問題であると考えられたが、今回の調査海域内においては、TN と DIN には表層、底層、季節を問わず、非常に高い正の相関があることが明らかになった。しかしながら、経年的な TN と DIN の乖離の問題と、今回の調査において TN と DIN に高い相関があったことは別の問題である。生物に利用されにくいとされる難分解性有機窒素が TN に占める割合が増えると、TN と DIN の乖離が進むことが考えられるが、難分解性有機物に関する経年的なデータは無い。今後とも、負荷量の推移や海域生態系の変化などに関連させて、TN と DIN の関係の経年的な変動について調査研究を続けていく必要があると考えられた。

海産バイオマスのメタン発酵および堆肥化技術の開発

大塚耕司

大阪府立大学大学院・教授

1. はじめに

大阪湾奥部のように、陸域からの流入負荷が大きい停滞水域では、赤潮と同様、海藻、二枚貝、ヒトデ、クラゲなどが異常繁殖し、海浜や海底への堆積による底質悪化など、大きな環境被害を招いている。一方地球温暖化を背景として、化石燃料から再生可能エネルギーへの転換が強く求められており、中でも比較的低コストで実用化が可能なバイオマス利用が大きな注目を集めている。

本研究では、現在、回収後埋立てあるいは焼却処分されている異常繁殖した海産バイオマスを、エネルギーや堆肥として再利用することに着目している。ただし、異常繁殖する海産バイオマスは、見方を変えれば、平均的に得られる資源ではないため、システムの効率化には大きなデメリットとなる。そこで、本研究では年間を通じて安定的に得られる食品系廃棄物との混合処理を前提とした海陸一体型のバイオマス有効利用システムを考えた。ここでは、システムのコンセプトについて概要を述べるとともに、システムの中核的技術となる海産バイオマスと食品系廃棄物の混合ガス化に関する基礎実験結果、ならびに残渣を堆肥化した後に農地還元し、農産物を地産地消した際の低炭素効果評価結果について紹介する。

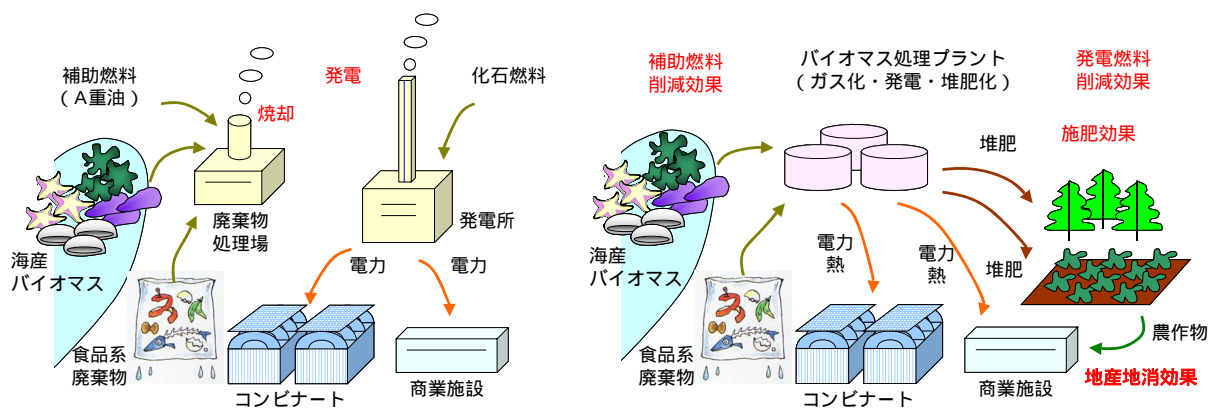


図1 海産バイオマスおよび食品系廃棄物の処理システムのイメージ（左：従来のシステム，右：今回提案する海陸一体型バイオマス有効利用システム）

2. 海陸一体型バイオマス処理システム

現在、異常繁殖した海産バイオマスは、回収された後、埋立てあるいは廃棄物処理場で補助燃料を加えて焼却されている場合が多い。これは海産バイオマスが水分を多く含んでおり、燃えにくいいためである（図1左）。今回提案する処理方法は海産バイ

オマスを食品系廃棄物とともにメタン発酵させてガス発電を行うことにより電力と熱としてエネルギー利用し，発酵残渣を堆肥として利用するというものである．この処理方法により，廃棄物の処理と発電，熱回収，さらには堆肥生産を同時に行うことができる（図1右）．このことにより海産バイオマスを焼却処理するために使用していた補助燃料を削減することができるとともに，バイオマス発電により得られた電力の分だけ発電燃料消費も削減することができる．さらに，発酵残渣は窒素やリンを多く含むために，堆肥として利用できる．これにより緑地での炭素固定や地産地消による低炭素効果なども期待できる．

3. 海産バイオマスと食品系バイオマスの混合発酵実験

本研究で想定しているメタン発酵プラントでは，食品系廃棄物とアオサやマガキなどの海産バイオマスをすべて混合して処理する必要がある．ここでは，食品系廃棄物として，比較的安定して入手可能な中央卸売市場から出される魚加工残渣と野菜くずを想定し，タイ，マグロ，サバの内臓および骨（中落ちを含む）とダイコン葉を，また海産バイオマスとしてアオサおよびマガキをそれぞれ試料として混合発酵させた．表1に各試験区の投入試料とその割合を示す．実験は100ml バイアル瓶を用いて恒温培養庫で中温発酵（35℃）させ，ガスが溜まり次第順次シリンジで発生ガスを抜き取り，TCD-ガスクロマトグラフで成分分析を行った．なお，種汚泥には神戸市東灘下水処理場の活性汚泥を用いた．

図2に各試験区におけるガスの成分分析結果を示す．いずれの試験区においてもバイオガス中のメタン濃度は60~70%程度を示しており，混合処理をした試験区においても特にメタン濃度の低下は見られない．このことから，海産バイオマスと食品系廃棄物を混合して発酵させてもガスの組成にはあまり影響がないことがわかった．

表1 メタン発酵実験における各試験区の投入試料

試験区 No	投入種A	A割合(g)	投入種B	B割合(g)
1	タイ(内臓)	2.56		
2	タイ(骨・中落ち)	2.56		
3	マグロ(骨・中落ち)	2.56		
4	サバ(内臓)	2.56		
5	サバ(骨・中落ち)	2.56		
6	大根葉	2.56		
7	アオサ	2.56		
8	マガキ	2.56		
9	タイ(内臓)	1.92	大根葉	0.64
10	タイ(内臓)	1.28	大根葉	1.28
11	タイ(内臓)	0.64	大根葉	1.92
12	タイ(内臓)	1.92	アオサ	0.64
13	タイ(内臓)	1.28	アオサ	1.28
14	タイ(内臓)	0.64	アオサ	1.92
15	タイ(内臓)	1.92	マガキ	0.64
16	タイ(内臓)	1.28	マガキ	1.28
17	タイ(内臓)	0.64	マガキ	1.92

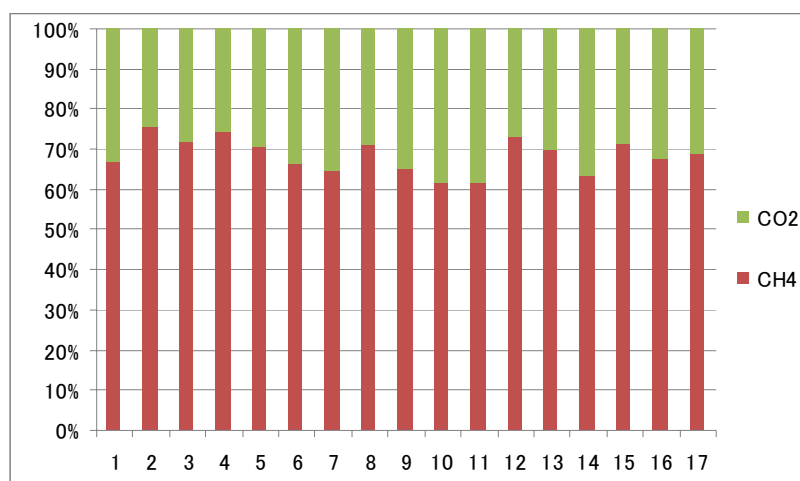


図3 各試験区におけるガスの成分分析結果

4. 地産地消効果

本研究では、前述の海陸一体型バイオマス有効利用システムのモデルケースとして、堺市の堺第2区（通称堺浜）にバイオマス処理プラントを設置することを考えた。堺浜では、シャープ（株）を中心とする液晶および太陽光パネルコンビナートやサッカーのナショナルトレーニングセンター（NTC）が相次いで建設されているほか、映画館やスーパー銭湯が入る複合商業施設も設置されており、バイオマス処理プラントで得られる電力や熱の利用先が豊富に存在する。また、残渣から生産される堆肥の利用法としては、近接する埋立地の緑化や、耕作地へ施肥し、農産物を地産地消することなどが考えられる。ここでは、山北¹⁾が行ったバイオマス回収量の推定結果およびバイオマス処理プラントによるマテリアルフロー推定結果を基に、堆肥を全て農地還元し、地産地消を行った場合の低炭素効果評価を試みる。

山北¹⁾は、堺浜の沖合に建設中の人工干潟に発生するアオサは2,600t/y、大阪湾内の掃海事業で回収される海産ゴミ（海藻、ヒトデ、クラゲなど）は2,400t/yと見積もっている。これらの海産バイオマスと、大阪市中心卸売市場から出される食品系廃棄物2,000t/yを混合処理すると、315,000Nm³/yのメタンガスと2,000t/yの堆肥が得られるとしている。これらの結果を基に、以下に示すフードマイレージ手法を用いて地産地消効果を推定した。

堆肥を全て農地還元し、窒素成分がほぼ全て有効利用されるだけの農作物を生産することを前提に、堺市内で生産可能であるものの現在は比較的遠距離の生産地から運ばれており、しかも堺市内で全て消費可能であるものを選定した結果、キャベツ、トマト、キュウリの3種が候補として上がった。現在これらの野菜はほとんどが大阪市中心卸売市場を介して堺市に流通しているので、中央卸売市場のデータベースから種ごとの産地別流通割合を求め、堺市内で消費されている総量（総務省統計局のデータを用いて推定）に産地別割合を乗じることにより、堺市内で消費されている産地別の流通量を推定した。入手できたデータの産地は原則として都道府県単位であるため、輸送距離は当該品目の産地である都道府県庁所在地から大阪市中心卸売市場までの距

離に中央卸売市場から堺市役所までの距離を加えることとした．なおこれらはすべてトラック輸送されているものと仮定し，距離計算にはすべて道路距離を用いた．

表 2 に品目ごとの地産地消による低炭素効果計算結果を示す．キャベツ，トマト，キュウリの堺市内での総消費量は，それぞれ 5,000t/y，2,630t/y，1,950t/y と推定された．これらに産地別流通割合を乗じ，各ルートの輸送距離を掛けて積算することによって得られるフードマイレージは，それぞれ 1.66×10^6 t km， 1.38×10^6 t km， 1.17×10^6 t km，となった．国土交通省が提供している CO₂ 排出原単位によると，営業トラック輸送は 180g-CO₂/t/km であるので，これを上記フードマイレージに乘じると，それぞれ 298t-CO₂/y，248 t-CO₂/y，210 t-CO₂/y となり，合計 756 t-CO₂/y となった．すなわち，これらの作物を全て堺市内で地産地消すれば，756 t-CO₂/y の低炭素効果が得られるということになる．この値は，山北¹⁾がライフサイクルアセスメント（LCA）手法を用いて推定したバイオマス処理プラントの CO₂ 排出量（稼動年数を 15 年として年間排出量を算出）467 t-CO₂/y の 1.6 倍であり，地産地消による低炭素効果はかなり大きいことがわかる．

なお，これらの作物を育てるためには，表 2 に示すように合計 206ha の農地が必要となる．しかし，現在堺市の休耕地面積は 417ha であることから，これらの休耕地を利用すれば新たに農地を作る必要はない．

表 2 地産地消による低炭素効果計算結果

	キャベツ	トマト	キュウリ	Total
産地上位5都道府県 (大阪市中央卸売市場)	愛知 群馬 兵庫 長野 茨城	熊本 福岡 石川 岐阜 北海道	佐賀 福島 宮崎 愛媛 鹿児島	
堺市内消費量(t/y)	5,000	2,630	1,950	9,580
必用耕作地面積(ha)	132	39	35	206
フードマイレージ(t km)	1.66×10^6	1.38×10^6	1.17×10^6	4.21×10^6
CO ₂ 排出量(t-CO ₂ /y)	298	248	210	756

5. まとめ

本報告では，海陸一体型のバイオマス有効利用システムのコンセプトについて概要を述べた．また，海産バイオマスと食品系廃棄物の混合ガス化に関する基礎実験を行い，混合処理しても発酵に大きな支障はないこと示した．さらに，残渣を堆肥化した後に農地還元し，農産物を地産地消した際の低炭素効果をフードマイレージ手法を用いて評価し，バイオマス処理プラントのライフサイクル CO₂ 排出量に比べても地産地消による低炭素効果がかかなり大きいことを示した．

参考文献

1) 山北雅史：海陸一体型バイオマス有効利用システムの総合評価，平成 20 年度大阪府立大学修士論文，2009

港湾等の強閉鎖性水域の水環境再生・創造技術の開発 特に貧酸素水塊・青潮対策について

○藤井智康^{*1}, 駒井幸雄^{*2}, 藤原建紀^{*3}

奈良教育大学・准教授^{*1}, 大阪工業大学・教授^{*2}, 京都大学大学院・教授^{*3}

1. はじめに

湾奥部の港湾水域は、市民の最も身近な親水空間“里海”となっている。このような水域では、しばしば赤潮が起き、またときには無酸素水が湧昇し、青潮が発生し、悪臭を放つこともある。このような港湾域の貧酸素・無酸素水塊について、現状では有効な発生防止対策がないのが現状である。そこで、本研究では、港湾規模の強閉鎖性海域で発生する貧酸素水塊対策に関連し、現地観測を実施し、強閉鎖性海域の貧酸素化機構やその動態について検討した。

2. 研究方法

2-1 水質調査

調査は、2009年の5～12月まで、図1に示すSt. 2で月2回行った。また、2009年11月12日～13日には、同地点で24時間調査を実施した。クロロテック(JFEアレック社製AAQ1183)により、水温、塩分、DO、pH、濁度、クロロフィルの鉛直分布を0.1m間隔で測定した。また、バンドーン採水器により表層から海底直上まで1m間隔で多層採水を行い、採水試料は、公定法にしたがってDIN($\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$), TP, $\text{PO}_4\text{-P}$ を分析し、三菱アナリテック社製TN-100でTN

を、島津製作所製TOC-VでTOCを測定した。この採水により、貧酸素水塊中に蓄えられる栄養塩および二酸化炭素濃度を求めた。また、二酸化炭素については、pHと全アルカリ度からCDIAC(Carbon Dioxide Information Analysis Center)の提供するCO₂SYSを用いて算出した。全アルカリ度については、田口ら(2009)による全アルカリ度と塩分との関係を用いて算出した。

2-2 水温連続調査

水質調査では、風と対応した躍層深度の変化、湧昇が貧酸素水塊の挙動に影響を与えていた。このため、YH内(St. A)の海底より水深1mごとにメモリー水温計(Onset社製ホボウウォーターテンププロH20-001)を設置し、10分間隔で水温連続観測を行った。観測期間は、2009年10月8日～15日である。

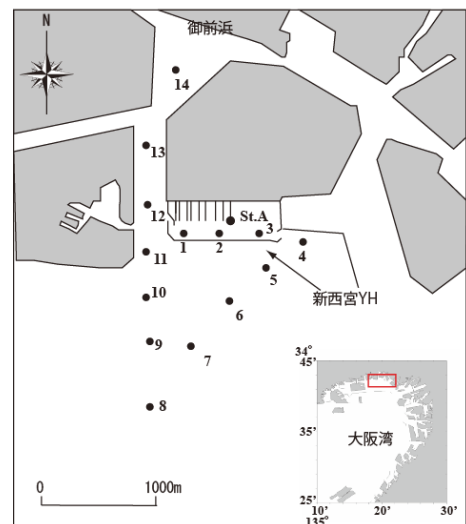


図1 調査地点図

2-3 風向・風速データ

上記調査期間中の風向・風速データは、調査対象地域に近い国土交通省近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所管理の神戸港波浪観測塔(六甲アイランド沖:34° 38' 50" N, 135° 16' 36" E)の2時間間隔のデータを提供して頂き、解析に用いた。

3. 結果

3-1 水質の季節変化

図2に示すように、塩分躍層は6月中旬から発達し、7月中旬に最も強くなった後、8月後半から9月上旬にかけて弱くなっていく。9月21日には塩分躍層が消え、表層まで高塩分となっており、下層の高塩分水が上層まで湧昇したことを示唆している。DOが3 mg/l以下の貧酸素層は5月後半の時点で海底から4 m層で観測され、6月初めには海底から2 m層でDOが1 mg/l以下となった。成層の発達に伴い、貧酸素層は上方に拡大し、8月には水深3 m以深でDOが3 mg/l以下となっていた。貧酸素層の深度に季節変化はあっても11月まで継続された。塩分躍層が消えた9月21日には、一時的に底層から表層までDOが1 mg/l以下となり、逆にNH₄-NやPO₄-P濃度が高くなった。大雨に伴う流入河川水の影響によって、NO₃-N濃度が増加すること除くと、無機態窒素の大部分はNH₄-Nであった。いずれも底層で濃度が高く、上方に向かって減少し、貧酸素水塊の消長とよく対応していた。

3-2 水温変動

図3に示すように、YH内では、大阪湾上の風の吹送に伴う躍層深度の変動が見られた。防波堤に囲まれたYH内のSt. Aでは、10月14日にかけての北風の連吹(北方風速が-6 m/s)により、水温躍層付近の水深2~3 m(海底上7 m付近)の水塊が、水面付近まで湧昇している。

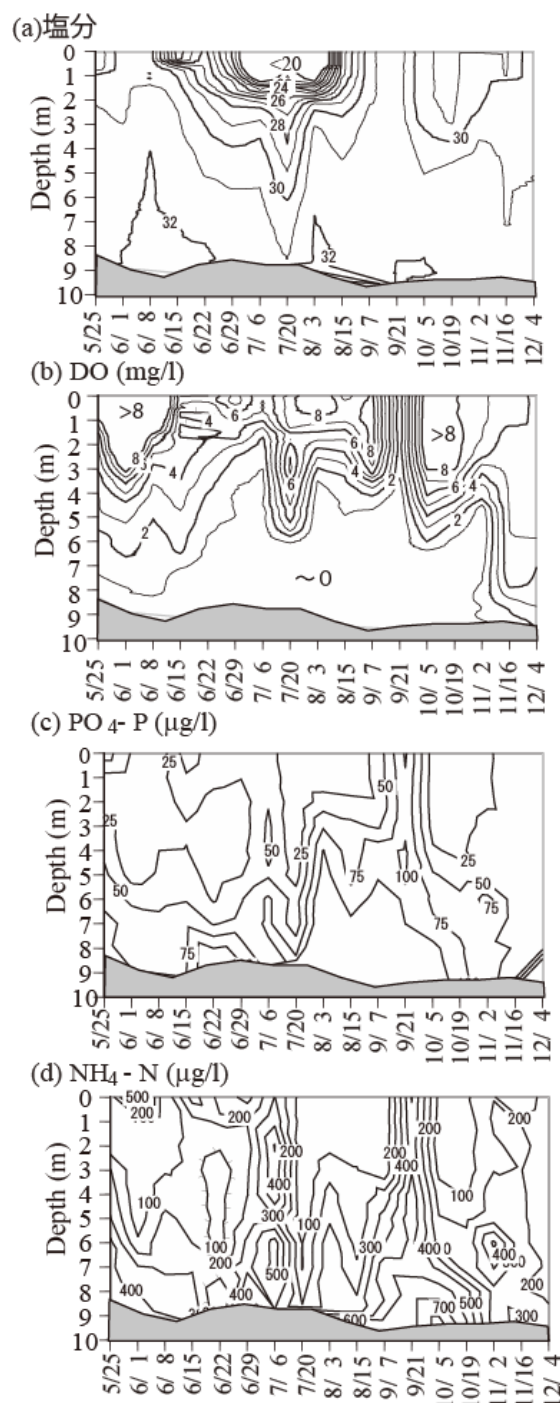


図2 St. 2における水質の季節変化(2009年)

3-3 貧酸素水塊の消長

図 4 に示すように、11 月 2 日に水深 4~5 m 付近に見られた塩分躍層が、日が経つにつれて徐々に上方に移動し、11 月 16 日には顕著な塩分躍層は見られなかった。一方、DO については、11 月 2 日に水深 6 m 以深に見られた無酸素水塊（DO が 0 mg/l）が、塩分躍層の上方への移動に伴い、11 月 12 日には水深 5~6 m、11 月 13 日には水深 4 m まで上昇し、中層に無酸素水塊が見られ、逆に底層付近の DO が徐々に回復している。その後、塩分躍層の消滅とともに無酸素水塊が消滅した。

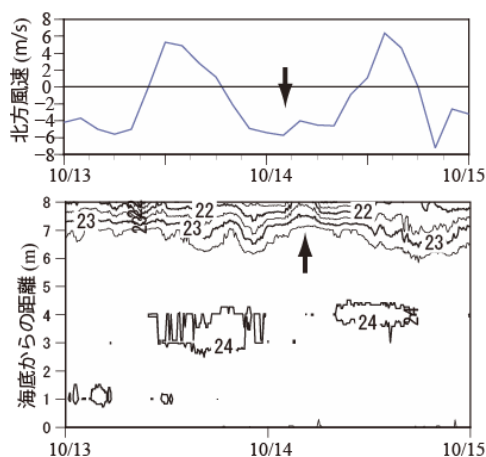


図 3 St. A の北方風速と水温変動(2009)

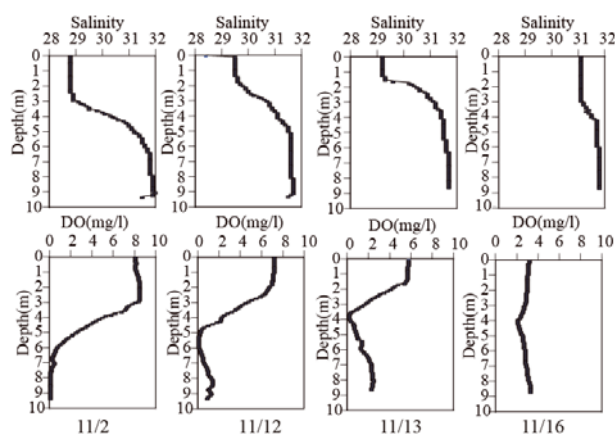


図 4 St. A の塩分・DO 鉛直分布 (2009 年)

3-4 YH 内の DO と pCO₂ の変動

図 5 に示すように、DO は底層に向かって低下していき、このとき pH も DO にほぼ比例して小さくなる。また pCO₂ は、海面では大気平衡分圧 380 μ atm に近いが、貧酸素水塊中（水深 8 m 付近）では、表層 pCO₂ の約 5 倍以上（1,900 μ atm 以上）に達している。図 6 に示すように、pCO₂ は底層の貧酸素・無酸素水塊の形成に伴い、pCO₂ は高くなっていった。この高い pCO₂ 水が、9 月 21 日には上層にまで拡大して、その後、11 月中旬以降に全層ほぼ同じ pCO₂ となっていた。

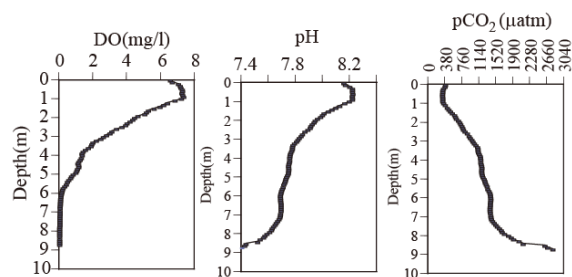


図 5 St. 2 の DO, pH, pCO₂ の鉛直分布 (2009 年 8 月 15 日)

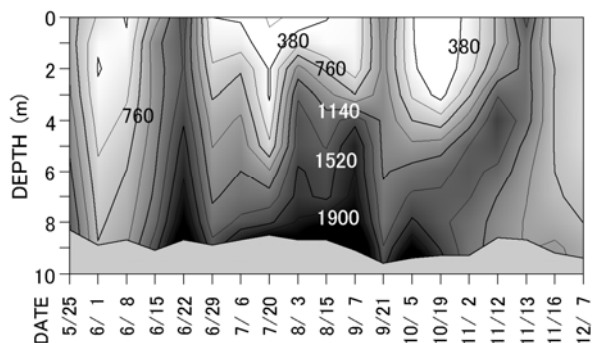


図 6 St. 2 における pCO₂ の季節変化 (2009 年)

4. 考察

4-1 成層の発達と DO・栄養塩濃度の季節変化

貧酸素水塊が形成されている底層では、NH₄-N や PO₄-P 濃度が高く、一方、DO が過飽和となっている表層では濃度が低くなっていた（図 2）。防波堤で囲まれた海域では、直接の汚濁源がなくとも、底層では、貧酸素化の進行に伴い、底質からの溶出

と有機物分解で $\text{NH}_4\text{-N}$ が生じ、上層に拡大し、増殖する植物プランクトンに利用され、次の再生産に利用されていることが推察される。

4-2 風の吹送と貧酸素水塊の動態

10月14日の北風の連吹に伴う底層水の水面への湧昇（図3）は、大阪湾上を北風が連吹することにより、水面は、湾奥部より沖方向に吹き寄せられ、逆に湾奥部の躍層面が上昇する（図7）。そのため、YH内には、大阪湾の下層水が防波堤を通じて密度流として流入し、YH内の底層水が持ち上げられたことを示している。

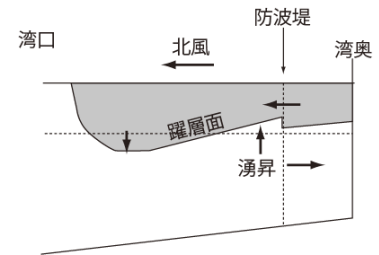


図7 大阪湾上の北風の連吹と躍層面の変動

4-3 貧酸素水塊の発生と消滅

貧酸素水塊の発生過程には、有機物分解に伴う酸素消費が大きい。酸素消費は主にバクテリアによる有機物分解（呼吸）によって酸素が消費される。この呼吸は、有機物と酸素から、無機態窒素・リン（栄養塩）と CO_2 が生じる（藤原，2010）。貧酸素化に伴い CO_2 が高濃度で蓄えられており、これが、風の吹送に伴い、水面まで湧昇する。一方、消滅過程には、図4に示されるように、強閉鎖性海域内の底層の貧酸素水塊の下に、密度の大きい港外からの海水が防波堤を通じて密度流として進入し、港内の貧酸素水塊を上を持ち上げることで形成される。その後、さらに上方へ持ち上げられ、貧酸素水塊が消滅する。

4-4 貧酸素水塊と二酸化炭素 CO_2 の放出・吸収

9～11月の大阪湾では、北風が卓越することにより、大阪湾北部では、湧昇域となる（図7）。したがって、成層期の8月下旬までに底層に蓄えられた CO_2 （図6）が、水面に湧昇し、大気への CO_2 の放出となると推察される。

5. 結論

底層貧酸素化に伴い、底質からの栄養塩溶出と有機物分解による栄養塩生成が生じ、鉛直循環や湧昇により、次の再生産に利用される。また、底層の酸素消費と CO_2 生成は連動しており、 CO_2 が高濃度の貧酸素水塊が、風の吹送によって水面まで湧昇することが明らかとなった。したがって、貧酸素水塊対策については、底質の改善が重要であること、および下層への直接的なエアレーションは、有機物分解・酸素消費を活性化させ、貧酸素化を逆に促進する危険性があることが指摘された。

参考文献

- 藤原建紀（2010）：内湾の貧酸素化と青潮．沿岸海洋研究，48（1） 印刷中。
田口二三生・藤原建紀・山田佳昭・藤田弘一・杉山雅人（2009）：沿岸海域のアルカリ度， 沿岸海洋研究，Vol.47，No. 8，pp.71-75.

閉鎖性水域に取り残された自然砂浜の地形変化に及ぼす航走波の影響

神戸市立工業高等専門学校都市工学科 准教授
宇野宏司

1. 研究目的

大阪湾圏域の海岸では小型プレジャーボートを初めとする船舶の往来が盛んで、不規則に航走波が押し寄せているが、これによる短期的な海岸地形の変動メカニズム解明についての研究例は少ない。押し寄せる航走波によって汀線付近の底質は絶えず移動しており、この移動特性を把握することは個々の海岸の保全につながるばかりでなく、大阪湾圏域全体でのなぎさ回廊の連続性を確保する観点からも重要である。また、航走波の海岸地形変化への影響を定量評価することができれば、船舶の航行制限や適切な海岸保全施設を設置する等の措置をとることによって、砂浜の消失を未然に防ぐことが可能となる。

本研究では、都市部に取り残された砂浜海岸において潮流や航走波が海岸地形の変化の底質移動に係る現地調査を実施し、当該閉鎖性水域における流れの時空間変動や地形変動要因を明らかにする。また、数値解析により1潮汐間の底質移動量や現地の潮流の空間分布を把握する。

2. 研究方法

現地調査

(1) 航走波の現況把握に関する現地調査

兵庫県西宮市の御前浜（写真-1）の前面に広がる水域では、休日ともなるとプレジャーボートや水上バイクを楽しむ人で賑わいを見せる（写真-2）。この前面水域において、自記録式流速計・波高計，風速計，水温塩分計を設置し，流速，波高，風向風速，水温・塩分の連続データを取得した。



写真-1 調査地点（御前浜）



写真-2 航走波

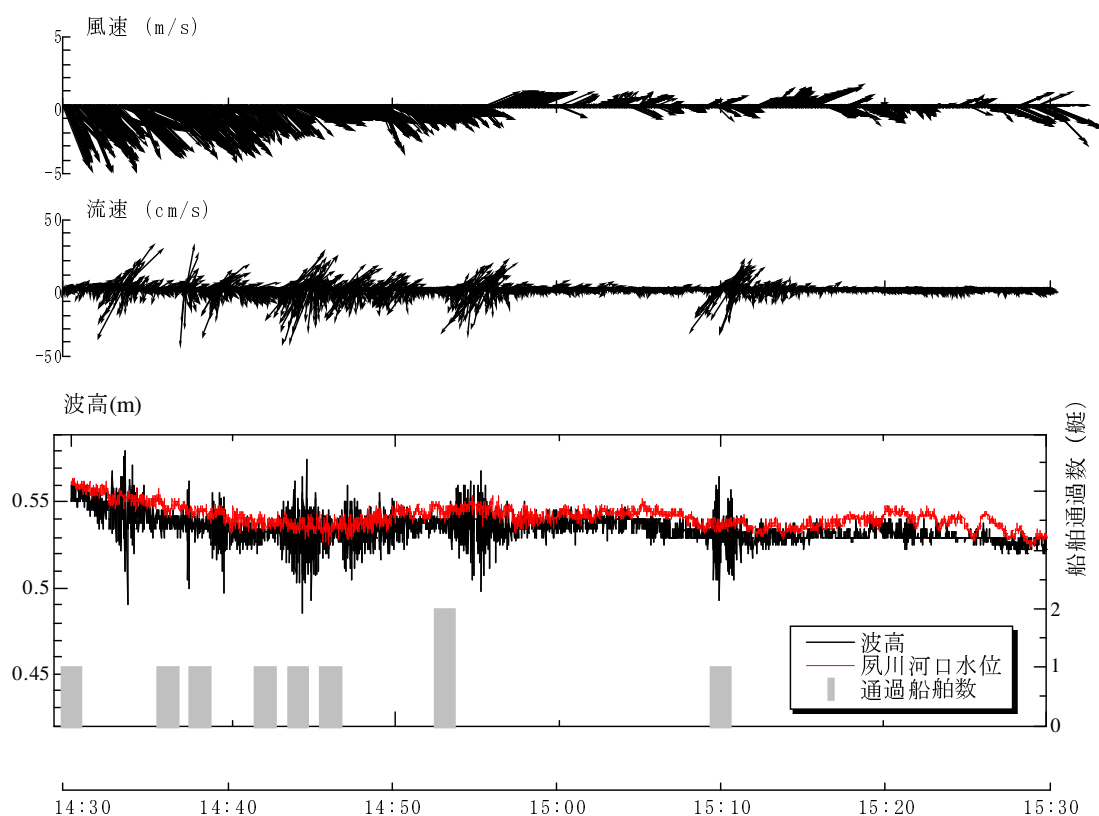


図-1 調査結果 1 (風向風速・流れ・波高)

船舶通過時刻は目視により確認し、野帳に記録した。また、汀線付近には 10 分間隔でセジメントトラップを設置・回収し、トラップ内に堆積した土砂の重量、粒度分布を調べた。得られたデータをもとに、当該水域の波高・周期、航走波による波エネルギーと汀線付近の底質移動量との関係を明らかにした。

(2) 岸沖方向の底質移動量分布に関する現地調査

大潮・小潮時のそれぞれで、当該水域において岸沖方向に 50cm 間隔でセジメントトラップを埋設し、1 潮汐間の底質移動量を計測し、セジメントトラップ内の堆積土砂量と地盤高さの関係を調べた。

数値解析的検討

(3) 波高データを用いた 1 潮汐間の底質移動量の算定

御前浜の底質は非粘着性であることから、本研究では掃流砂式を適用し、現地観測で得られた波高データから摩擦速度を評価し、粒径別無次元掃流力を求め、芦田・道上式を用いて 1 潮汐間の粒径別掃流砂量を算定した。

(4) 平面 2 次元潮流シミュレーションモデルによる流況解析

御前浜前面水域を対象とした平面 2 次元 FEM 潮流解析を実施し、航走波によらない平水時や洪水時の底質移動特性の空間分布について検討した。

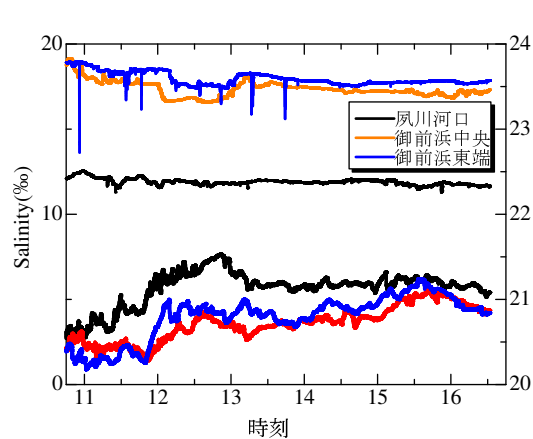


図-2 調査結果 2 (水温塩分)

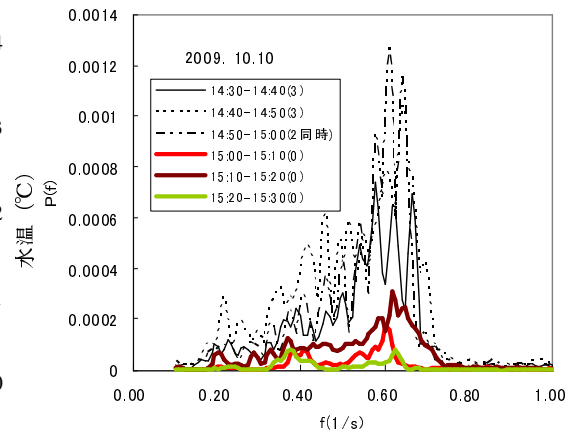


図-3 スペクトル解析結果

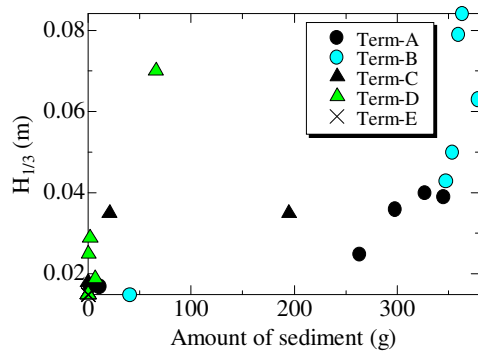


図-4 堆積量と有義波高

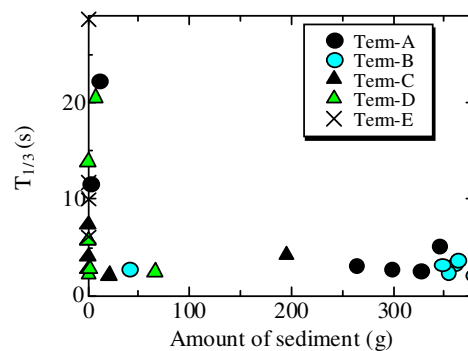


図-5 堆積量と有義波周期

3. 結果と考察

(1) 航走波の現況把握に関する現地調査

図-1 に調査日（平成 20 年 10 月 10 日 14:30-15:30 の時間帯を抜粋）の風向風速・流れ・波高と船舶航行数の時間変化を示す。船舶航行のあった時間帯は波高、流速に顕著な変化が見られ、航走波が汀線付近まで到達していることがわかる。しかし、その影響は夙川の河口域には及んでいなかった。この日の水温・塩分の時間変化を図-2 に示す。夙川河口は、御前浜前面水域と比較して、塩分が低く水温が高くなる傾向にある。また、御前浜中央は夙川河口からの淡水流入の影響を受けて、御前浜東端よりも若干塩分が低くなっている。御前浜東端では航走波の影響を受け、塩分計が干出することがあった。東端部は狭水路となっているため、振幅が増幅している可能性が考えられる。図-3 に図-1 の時間帯での 10 分ごとのスペクトルの分布の変化を示す。船舶通過時間帯はスペクトルも増大しており、その周期は 1.6 秒程度であることがわかった。

図-4、図-5 に各期間の底質移動量と有義波高・有義周期の関係を示す。有義波高と汀線付近の底質移動量には正の相関が認められた。一方、10 秒以下の有義波周期については、底質移動量が多い場合とそうでない場合があるが、前者は航走波によるもの、後者は風波によるものと判断された。

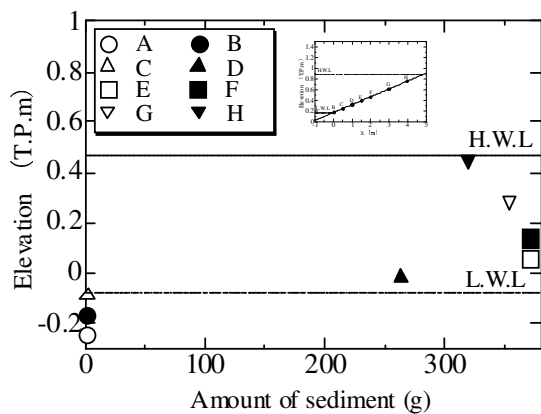


図-6 セジメントラップ堆積量と地盤高さの関係

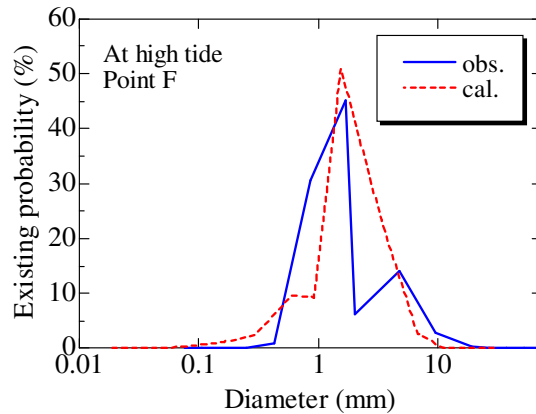


図-7 粒径別底質移動量の算定（大潮時）

(2) 岸沖方向の底質移動量分布に関する現地調査

図-6 にセジメントラップ堆積量と地盤高さの関係を示す。本図より平均水面付近で堆積量が最大となっていることがわかる。この傾向は小潮時の調査結果でも同様であった。これについて、一様な勾配をもつ干潟底面に働く摩擦速度の時系列変化について調べたところ、現地観測の結果を裏付ける結果が得られた。

(3) 波高データを用いた1潮汐間の底質移動量の算定

図-7 に大潮時の粒径別底質移動量の算定（大潮時）を示す。粒径数 mm の堆積分布の再現には改善の余地を残すものの、現地の波高データを用いて、航走波による1潮汐間の底質移動量を評価することができた。

(4) 平面2次元潮流シミュレーションモデルによる流況解析

図-8 に大潮・平水時の御前浜周辺の流況を示す。夙川からの淡水流入はその地形上、西宮浜西岸を通じて外海に抜けるため、御前浜前面水域の流速は、周辺よりも小さく、当該水域が極めて静穏であることがわかる。言い換えれば、航走波の影響をより強く受けやすい砂浜であるが、現在の利用頻度であれば、汀線の後退等には至らず、特に問題はないものと思われる。

4. 結論

都市部の閉鎖性水域に位置する御前浜における汀線付近の底質移動は、航走波の影響を強く受けていた。船舶の航行が無い時間帯は、風波による底質の打ち上げも生じるが、その移動量は航走波による移動量と比較してはるかに小さいことがわかった。また、底質移動量の岸沖方向分布は平均水面付近で最大となることが明らかにされた。

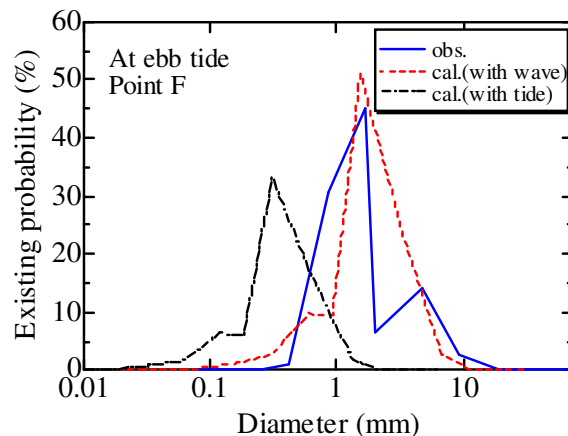


図-8 御前浜周辺の流況解析（大潮・平水時）

廃水、廃棄物における有機フッ素化合物（PFCs）の分析及び大阪湾圏域への環境負荷低減処理に関する調査研究

吉田光方子

（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

【はじめに】

我々が生活する現代社会において、化学物質は利便、快適性を追求するうえで必要不可欠な存在であり、現在 10 万種類を超える物質が使用されている。これらの化学物質のなかには、微量ながらも吸引、吸入等による摂取や、食品や飲料水への混入から、人体に悪影響を及ぼすものも少なくない。しかしながら、このような化学物質のばく露量は微々たるものであるため、環境及び人体への負荷は未解明なものが多い。本研究で対象とした PFCs は、その一部（PFOS 及びその塩）が 2009 年 5 月にストックホルム条約（POPs 条約）の附属書 B に、2010 年 4 月には化審法の第一種特定化学物質に指定され有害性・難分解性・高蓄積性の観点から無視できない高リスク物質である。今後は、国際的に製造・使用の禁止や制限など規制に向けた取組がなされ、日本国内でも必要な措置が求められることとなった。

また、PFOS のスルホン酸基がカルボン酸に置換された PF0A についても、米国環境保護庁（EPA）が有害性を指摘しており、2006 年 1 月に「PF0A 自主削減プログラム（PF0A2010/2015 スチュワードシップ・プログラム）」を提唱し、2015 年までに全廃することに取り組んでいる。このことから、PFOS、PF0A をはじめとして、前駆物質や鎖長の異なる分解物、代替物質などの類縁物質（PFCs）の使用、環境での検出状況は、大きく変わってくることが予想される。

そこで本研究において PFCs を対象とし、製品の使用及び拡散、廃水処理工程、廃棄などを通じ海域へ排出する過程から広範囲にわたる存在状況を詳細に押さえることで PFCs の環境への拡散経路、社会ストックを解明し、また物質のプロファイルを把握することにより、大阪湾圏域への流入原因を推定することを目的とし、一連の実験を行った。その結果を報告する。

【方 法】

本研究では、海域への流入負荷に焦点をあて、(1)海域に立地する廃棄物最終処分場に搬入される廃棄物中の PFCs 分析手法の開発及びその特性把握の検討、(2)海域へ流入する下水廃水の PFCs 挙動解明、(3)同様に大阪湾圏域河川の高濃度地域の原因究明の 3 点について一連の研究を実施した。

分析対象とした PFCs（PFCA s：10、PFAS s：4 化合物）を Table1 に示す。サロゲートとして使用した同位体化合物は MPFCs（MPFCA s：6、MPFAS s：2 化合物）であり、PFCs は PFAC-MXB を、MPFCs は MPFAC-MXA の混合品（いずれも WELLINGTON

社製)を使用した。

(1)廃棄物中の PFCs 分析手法の開発及びその特性把握の検討については、異なる排出源、形態の廃棄物試料の性状に即した PFCs 分析法を検討し、確立した分析法を用いて、廃棄物の特性把握のため炭素数の異なる PFCs のプロファイルを解析した。そのための試料調製の前処理は、高速溶媒抽出法 (ASE)

Table1 Target compounds(PFCs)

compound	abbreviation	carbon number	structural formula	MW
Perfluoropentanoic acid	PFPeA	5	CF ₃ (CF ₂) ₃ COOH	264.0
Perfluorohexanoic acid	PFHxA	6	CF ₃ (CF ₂) ₄ COOH	314.1
Perfluoroheptanoic acid	PFHpA	7	CF ₃ (CF ₂) ₅ COOH	364.1
Perfluorooctanoic acid	PFOA	8	CF ₃ (CF ₂) ₆ COOH	414.1
Perfluorononanoic acid	PFNA	9	CF ₃ (CF ₂) ₇ COOH	464.1
Perfluorodecanoic acid	PFDA	10	CF ₃ (CF ₂) ₈ COOH	514.1
Perfluoroundecanoic acid	PFUnDA	11	CF ₃ (CF ₂) ₉ COOH	564.1
Perfluorododecanoic acid	PFDoDA	12	CF ₃ (CF ₂) ₁₀ COOH	614.1
Perfluorotridecanoic acid	PFTriDA	13	CF ₃ (CF ₂) ₁₁ COOH	664.1
Perfluorotetradecanoic acid	PFTeDA	14	CF ₃ (CF ₂) ₁₂ COOH	714.1
Perfluorobutane sulfonate	PFBS	4	CF ₃ (CF ₂) ₃ SO ₃ H	300.1
Perfluorohexane sulfonate	PFHxS	6	CF ₃ (CF ₂) ₅ SO ₃ H	400.1
Perfluorooctane sulfonate	PFOS	8	CF ₃ (CF ₂) ₇ SO ₃ H	500.1
Perfluorodecane sulfonate	PFDS	10	CF ₃ (CF ₂) ₉ SO ₃ H	600.1

溶媒抽出法等を比較検討し、PFCs の抽出方法を確立した。試料調製時には、定量に内標物質を用いて補正を行うようサロゲートを添加した。含有 PFCs 分析とともに溶出試験も実施し、環境への流出についても検討を行った。(2)下水廃水の PFCs 挙動解明では、下水処理場工程内での各工程で PFCs 汚染状況を把握し、その結果から PFCs 高濃度下水の除去手法を検討し適用可能性を探った。

また、(3)大阪湾圏域河川の高濃度地域の原因究明では、河川、海域の環境調査結果に基づき高濃度地点における原因を究明した。

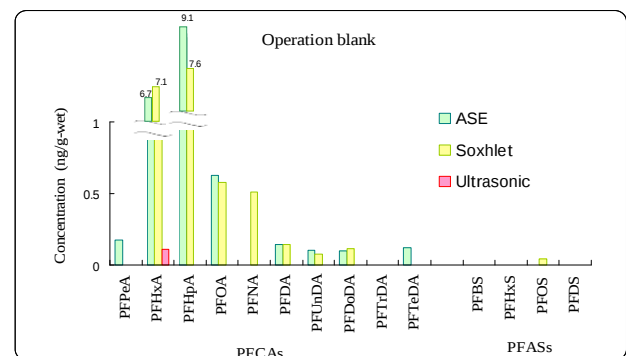
いずれも分析には、液体クロマトグラフィー/質量分析計(LC/MS/MS)を用いた。液体クロマトグラフィーの溶離液や温度など分析条件及び質量分析計のサロゲート物質及び対象 PFCs のプレカーサーイオン、プロダクトイオンを確定し、対象物質ごとに廃棄物中の含有濃度を測定した。

【結果と考察】

(1)廃棄物中の PFCs 分析手法の開発及びその特性把握の検討

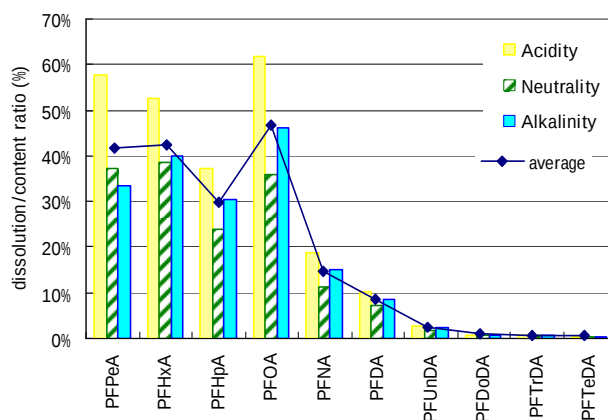
試料調製の前処理は、抽出に高速溶媒抽出法 (ASE)、ソックスレー抽出 (Soxhlet)、超音波振とう抽出(Ultrasonic)

の三手法を比較検討した。操作ブランク Fig.1 PFCs concentration of operational blank における PFCs 濃度結果を Fig.1 に示す。操作ブランク試験において、ASE 及びソックスレー抽出の二法で PFHxA 及び PFHpA が 7ng/g-wet を超える高濃度で検出され、操作過程からの混入がみられた。その他の PFCs 化合物及び超音波抽出法での PFCs 濃度は 1ng/g-wet 未満であり、分析結果に著しく影響を与えるレベルでの PFCs の混入はなかった。このことから、PFCs 含有試験の前処理には超音波抽出法を用いることとした。本手法を用いて、排出元の異なる廃棄物試料中 PFCs を測定したところ、試料により炭素鎖長の異なる PFCs が検出され、PFCs 製造・使用時に用いられる PFCs の差が廃棄物にも反映されることが確認された。



また、PFCAs が満遍なく高濃度で含有されていた廃棄物からの溶出試験を同時に実施し、含有量あたりの溶出割合を Fig.2 に示す。

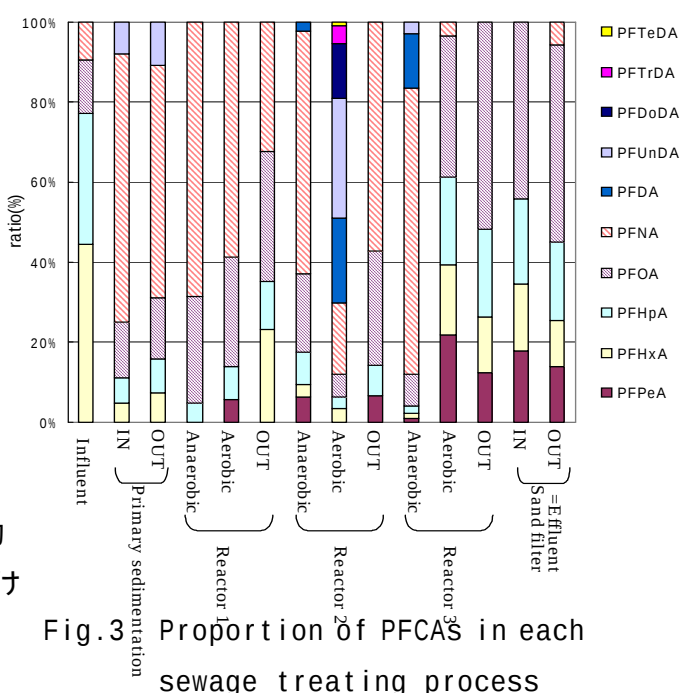
C8 までの炭素数の短い化合物の溶出量が、含有量に対して 40%程度溶出される一方、C9 以上の長鎖 PFCAs が溶出されにくい傾向が示された。



長鎖 PFCAs は、含有されているにもかかわらず、溶出されにくく、廃棄物埋め立て地で残留し続ける可能性が示唆され、既存研究で検出される PFCAs が、C9 以下が中心であることの一因とも考えられる。

(2)下水廃水の PFCs 挙動解明

兵庫県内下水処理場において工程ごとに採水した処理水の PFCs 濃度を測定した。採水は、流入下水→最初沈殿池入口→最初沈殿池出口→処理槽（：嫌気槽出口→好気槽出口→最終沈殿池出口）→砂ろ過入口→砂ろ過出口（放流水）を約 2 時間かけて行った。この処理場の流入及び放流平均水量は約 7 万 m³/日であり、流入水は水量調整後、最初沈殿池で約 2.5hr、処理槽(3 系統に分けて処理)で約 13hr、最終沈殿池で約 5hr 処理した後、消毒、砂ろ過を経て、受け入れから約 1 日経過後、放流されていると考えられる。



PFCs ごとの濃度は、C4 のスルホン酸(PFBS)が検出下限値未満であった以外は、他炭素数の PFCAs、PFASs とともに、いずれかの処理工程で検出された。

PFASs については、3 系統ある処理槽のうち、異なる系統の好気槽出口から C10 の PFDS が、嫌気槽出口から C6 の PFHxS がそれぞれ検出された他は、C8 の PFOS のみが<1 ~ 26ng/L の範囲で検出された。各処理工程ごとの C5 - 14 の PFCAs 存在比率を Fig. 3 に示す。流入水では、C6 - 9 の 4 種が検出され、長炭素鎖になるほど濃度が低減する傾向がみられた。最初沈殿池入口、出口の存在比率は大差なく、濃度的にも同レベルであり、最初沈殿池内での C5 - 14 の PFCAs に大きな変動はないことが確認された。また、流入水では検出されていなかった C11 の PFUnA が検出されるなどいくつかの知見が得られた。

(3)大阪湾圏域河川の高濃度地域の原因究明

2009 年夏期に Fig. 4 の河川、海域において PFCs 濃度を測定した。河川における検出例を Fig. 5 に示す。地点により PFCs 組成から、異なる排出源の影響を受けている

ことが示唆された。地点 44 に示した河川では、上流部に位置する工場から排出されると考えられる PFHxA が高濃度で検出された。河川から海域への PFHxA 拡散影響を考察するために、地点 44 の河口を基点として距離と海域での PFHxA 濃度の関係を Fig. 6 に示した。その結果、PFHxA 濃度と地点 44 からの距離とは相関があることが示された。

【結論】

本調査において、大阪湾への PFCs の流入影響を確認した。

大阪湾に立地する廃棄物最終処分場へ搬入される廃棄物や、河川を經由して流入する下水廃水、工場廃水など様々な媒体から大阪湾へ流出していることが確認された。

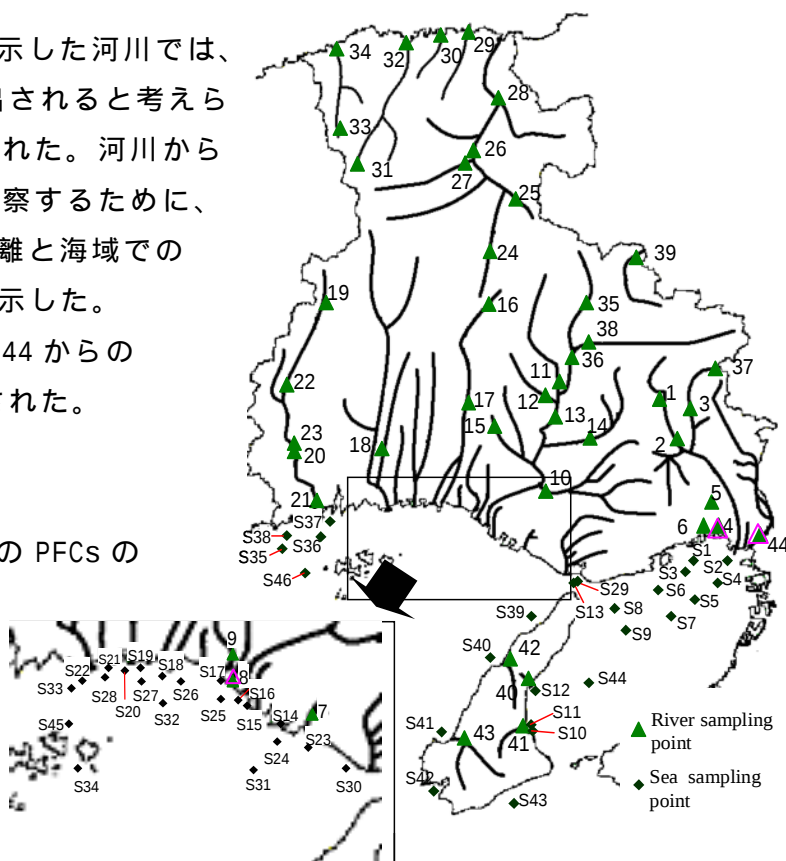


Fig.4 Sampling site in river and sea

PFCs の組成は、廃棄物の排出源や工場、下水処理過程において様々であり、プロファイルを把握することで排出源を特定することが可能であろうことが推察された。

また、一例として PFHxA 濃度を高濃度流出する河口から海域への距離とを調べた結果、有意な相関が得られ、河川から海域へ PFHxA 汚染が拡散している状況が示された。今後は、さらに廃棄物の種類を増やし PFCs 含有量を調査することに加え、実際の埋め立て地を想定し、そこから溶出する可能性も含め廃棄物からの海域汚染の影響にまで広げた調査を実施する予定である。

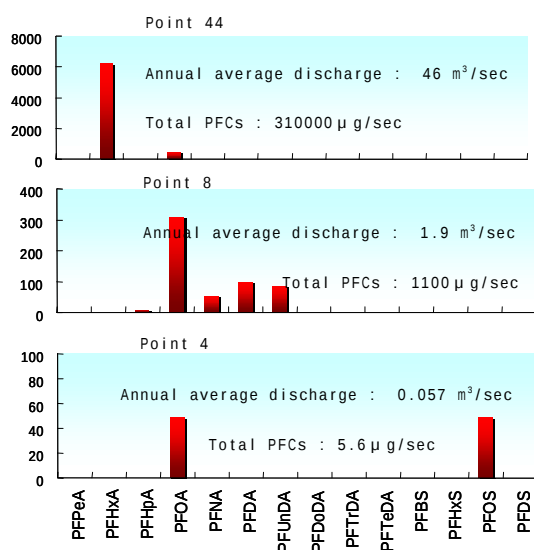


Fig.5 PFCs concentration in river water

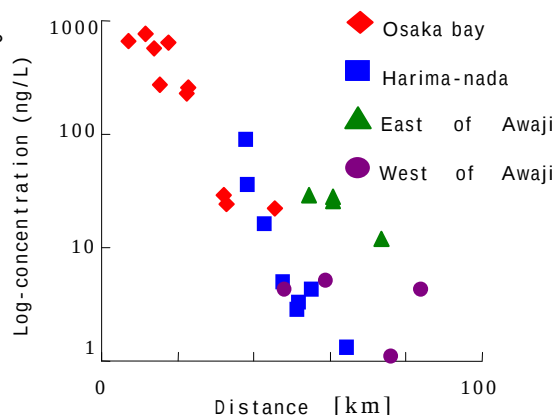


Fig.6 Relationship between concentration of PFHxA in sea water and distance from the mouth of the river water (point 44)

^{222}Rn を用いた大阪湾への地下水湧出量・栄養塩負荷量の定量評価

梅澤 有

長崎大学水産学部・助教

【 研究の背景と目的 】

大阪湾は、友ヶ島水道及び明石海峡のみを湾口部とする閉鎖性の強い海域であり、富栄養化に伴って、赤潮や貧酸素水塊の形成による被害が多く報告されている。そのため、淀川、神崎川、大和川などの河川を通じて 5 府県の大都市域を含む広大な集水域から流入する淡水と陸起源物質の海域への影響に大きな関心が寄せられている。

大阪湾に隣接する地域では、この 100 年間で都市化がすすみ、アスファルトで覆われた赤色でしめされる都市域が急速に拡大してきている。そのため、これらの地域での地下水涵養量は大きく減少していると考えられる。一方で、大阪府では、地盤沈下被害防止対策として、工業用水としての地下水採水の規制が進み、1960 年代以降、地下水位も急速に上昇に転じている。そのため、陸起源物質を海域に運搬する媒体として、河川水だけでなく、地下水の寄与が高まってくると考えられ、その寄与率の把握が求められている。

地下水の沿岸海域への流出も地下水流出量計や電気探査法などの様々な手法によって指摘されているが、その時空間変動の現状やメカニズムについては明らかになっていない。特に大阪湾では、湾奥に流入する淀川、神崎川、大和川の流入量が膨大であるため、塩分変化を利用して地下水の流入量を把握するには困難がつかまとう。

そこで本研究では、1) ^{222}Rn が河川水と比べて地下水中に多く含まれていて地下水指標として利用できるかどうか確認し、2) 湾内に流入する淡水に占める地下水の寄与を河川水から分離して見積もること、また、3) 地下水流出の時空間変動を明らかにして、人工護岸で覆われる都市化に伴う流出特性の変化について明らかにすることを目的とした。さらに、4) 地下水経由の栄養塩類の供給量について、河川水によるものとの比較を試みた。

【 研究方法 】

大阪湾集水域の複数地点において、河川水と地下水の採水を行い、栄養塩濃度と ^{222}Rn 濃度の測定を行った。一方で、兵庫県神戸市深江から、大阪府岬町に至る海岸線に沿って、海水中に含まれる ^{222}Rn 濃度を ^{222}Rn 測定システム (RAD7: DurrIDGE Co Inc.) によって計測・算出し、同時測定した水温・塩分と比較を行った。特徴的な ^{222}Rn 濃度が観測された 2 地点 (神戸市深江、岬市淡輪) では、1-2 潮汐間の定点連続観測を行い、潮汐変動に伴う地下水流出特性について調べた。

【 結果と考察 】 (結果は箇条書きにて 1~6 の番号で示す)

1. 集水域全体でのばらつきがみられたものの、地下水中の ^{222}Rn 濃度は、500 ~ 3000 dpm/L (dpm: disintegration per minutes) であり、河川水中濃度の 2.2 ~ 226 dpm/L と比較し

ても、100 倍のオーダーで有意に高い値を持っていた。そこで、大阪湾沿岸域において、塩分に加えて、 ^{222}Rn を用いると、地下水の指標として有効であることが確認された（図 1）。

- 沿岸海水中の ^{222}Rn 濃度は、湾奥の淀川河口域付近（人口護岸・埋立地）で 0.5 ~ 2.5 dpm/L の低い値が観測された一方で、南部の岸和田から阪南地域では、最大で 4.0 dpm/L の値が観測され、地下水流出の寄与を示唆していた（図 1）。塩分と ^{222}Rn 濃度を対比させて、もう少し詳細にみると、淀川や大和川などの一級河川が流入するエリアでは、塩分が一気に低下するものの Rn 濃度の上昇はあまり見られず、一方で、六甲山地近くの神戸地区や、大阪南部の岸和田、泉南周辺エリアではあ、塩分の低下があまり見られないにも関わらず、 Rn 濃度が上昇する様子が見て取れており、 Rn 濃度の高い水塊の流入が示唆された（これは、淡水とは限らず、再循環水の可能性も含む）。

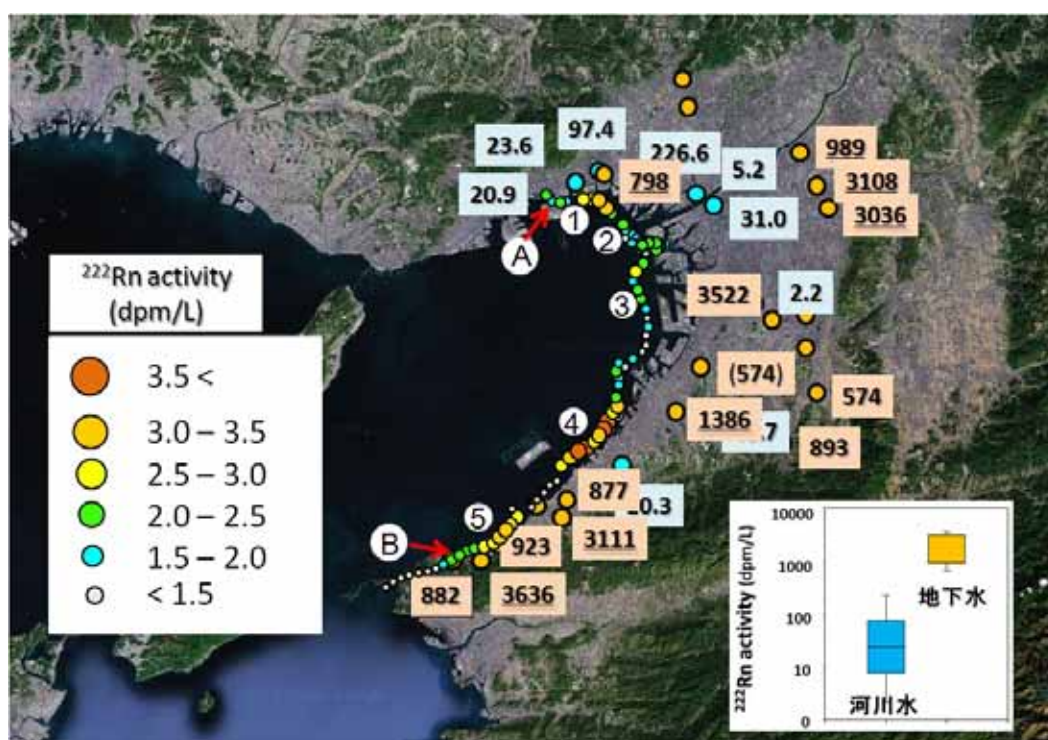


図 1：地下水(オレンジ・下線)・河川水(青・下線なし)・沿岸水(円)中の ^{222}Rn 濃度

- 沿岸海水塩分と ^{222}Rn 濃度の平均値をプロットしたダイアグラム（図 2）を作成し、調査海域の海水が外洋海水との単純混合であることを仮定した関係式を考えると、海域に応じて 4.6 ~ 140.1 dpm/L の異なる ^{222}Rn 濃度を持つ淡水と混合していることが示唆された。この 100 倍のオーダーでの差は、結果（1）で示したように、地下水中の ^{222}Rn 濃度は河川水中濃度の 100 倍のオーダーで含まれていることと対応しており、塩分だけからでは判断できなかった地下水影響地域を、河川水影響地域から分離することができると考えられる。

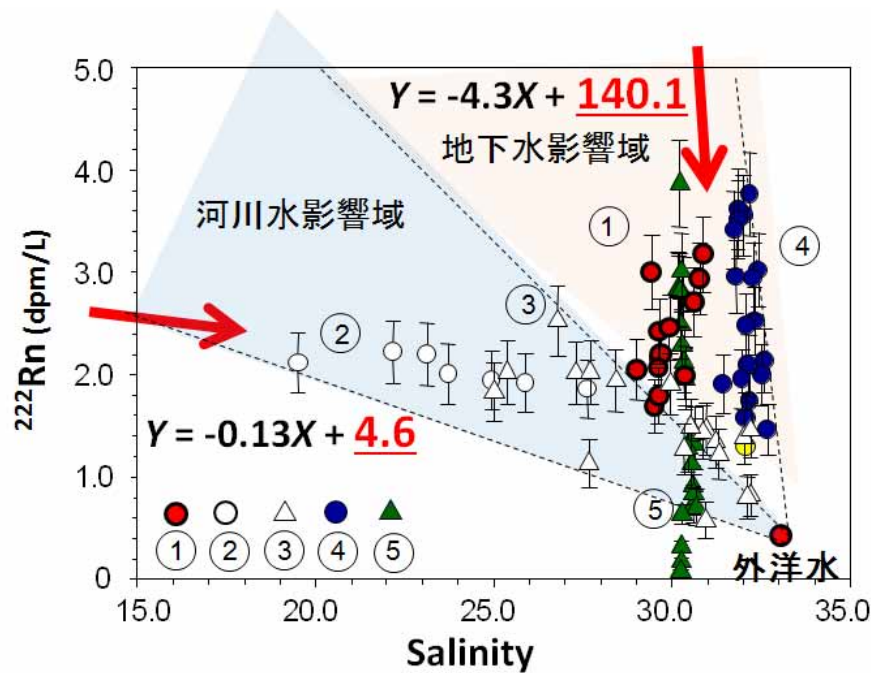


図2 沿岸海水の塩分と ^{222}Rn ダイアグラム (番号は図1における沿岸エリア)

インドネシアの首都のジャカルタでは、コンクリートで覆われた沿岸域では地下水湧出が少なく、マングロープなどの自然植生の沿岸では地下水湧出量が大きいというように、都市化が地下水湧出分布に影響を与えていた (Umezawa et al. 2009)。大阪でもそのような傾向がみられたが、一方で、岸和田のあたりなど、護岸で覆われた場所でも高い Rn 濃度が確認されており、汀線付近ではなく、海底の堆積物からの湧出や、地下水涵養された小河川の影響と考えられた。

これまでの結果は、潮汐の変動などを考慮しない単純な濃度分布であったため、フラックスの定量データを得るために、2 か所の定点 (図1の A と B) において、定点での時系列観測を行った結果を下記に示し、解析する。

4. 2 か所の定点、「深江 (神戸市)」, 「淡輪 (大阪南部)」での 12 時間の ^{222}Rn 連続観測の結果、大気交換量、低濃度の ^{222}Rn を持つ外洋水との交換量、堆積物からの拡散量等によって説明できない ^{222}Rn 量を、地下水湧出によるものと仮定すると、深江と淡輪での地下水フラックスはそれぞれ $2.0 \pm 0.7 \text{ cm/day}$ と $0.6 \pm 0.7 \text{ cm/day}$ と見積もられた。
5. 広域観測で得られた沿岸線沿いの ^{222}Rn 濃度と水深から、各地点での単位面積当たりの ^{222}Rn 量を求め、定点観測で得られたフラックス値との関係式を作成した。その後、地下水由来の淡水の寄与が見られた兵庫県東部 (図1の) と大阪南部沿岸域 (図1の と) のみに着目して、全地下水湧出量の概算を行った。沿岸部での地下水湧出帯の幅を 100 - 200m であると仮定すると (採水のための航路が沿岸から 50m ~ 300m 程度離れていたことを考慮すると、実測値の ^{222}Rn 値を説明する湧出帯として適切である) $0.8 - 2.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ の流入量が地下水を通じてのものであると見積もられた。この量は、淀川の出水量 : $1.2 - 2.4 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{day}$ の 60 ~ 300 分の 1、大和川の出水量 : $0.7 - 1.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ の 3 ~ 15 分の 1 に相当する量であった。

6. 河川水の影響を受ける地域、地下水の影響を受ける地域、それぞれにおいて、沿岸で採水した海水の塩分に応じて、溶存無機態窒素と溶存無機態リンの濃度をプロットした（図 3-A, B）。実際には、異なる栄養塩濃度を持つ淡水と様々な湾内形成水の混合によって水塊が形成されているので、このような解析は適さないかもしれないが、単純混合を仮定しての近似式を採用した場合に、塩分ゼロの y 切片の値が、地下水影響域の方が、河川水影響域の数倍の濃度を持っている。このことは、陸域の地下水中の栄養塩の値（河川水 [n=9] : DIN 94.0 μ M, DIP 4.0 μ M、地下水 [n=38] : DIN 311.3 μ M, DIP 9.7 μ M : 広島大 小野寺・清水未発表データ）が、実際に、河川水の数倍の濃度を持っていることと対応しており、栄養塩濃度の高い地下水の湧出があるという Rn から示唆されたデータを支持している。また、深層地下水や海底堆積物中の還元的な環境においてリンの濃度が高いことと同じく、地下水影響域では、再循環水の影響のためか、リンの寄与が大きく、NP 比が小さいことから、海域の植物プランクトン組成にも影響を与える可能性がある。

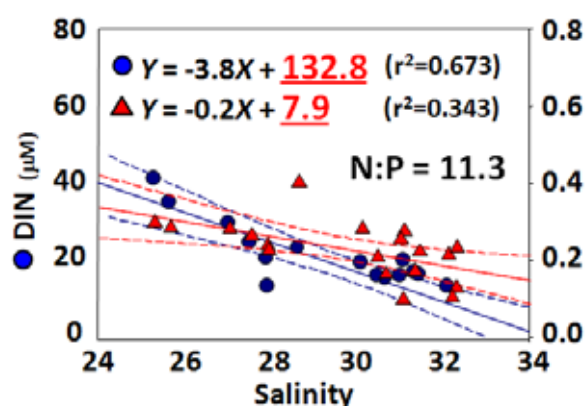


図 3-A 河川水影響域の栄養塩濃度

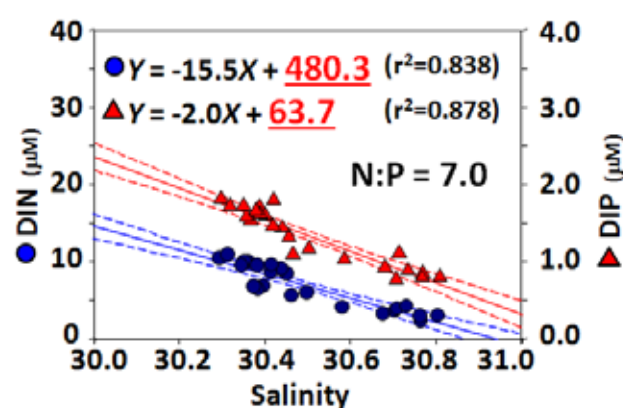


図 3-B 地下水影響域の栄養塩濃度

淡路島からの地下水流入量の効果を考慮していない状況ではあるが、前項で示したように、地下水湧出のフラックスとしての寄与は、大きく見積もっても河川水フラックスの 1% ほどであった。しかしながら、本項で示したように地下水に含まれる栄養塩濃度が高いことから、溶存無機態窒素の寄与は 2-4%、溶存無機態リンの寄与は 5-8% と見積もられる。河川水は、大雨などの直後の出水量が大きい、その後の流量は減少する。一方で、地下水は帯水層が緩衝作用として働くため、降水量が少ない時期にも淡水を供給する性質を持つ。さらに、大きな河川の流入が見られない、大阪湾南部海域では、地下水の寄与率はさらに大きくなると考えられる。そのため、沿岸海域の植物プランクトンや、それに伴って二枚貝などの底生生物の成長に対して地下水としての淡水流入と、地下水が運び込む栄養塩の与える影響も大きいと考えられる。

【 謝辞 】

本研究の遂行にあたり、小野寺真一・清水裕太（広島大） 林美鶴・牛原康博（神戸大） 安元純（琉球大） 山口聖・塩川麻保（長崎大）ら、各氏のご協力をいただきました。

大阪湾御前浜の生物生息環境に海底地下水湧出が及ぼす影響

安 元 純

琉球大学農学部助教

1. 研究の背景及び目的

最近の研究成果により、海域への地下水経路による栄養塩類等の供給が、河川経路の供給と並び、沿岸海域や閉鎖性水域における栄養塩類の循環や一次生産者に重要な役割を果たしているとの認識が一般的になっている。大阪湾沿岸域においても海底地下水湧出に伴う栄養塩類等が生物生息環境に及ぼす影響は未解明であり、十分な実態解明が急務である。

本研究では、大阪湾御前浜における海底地下水湧出が生物生息環境に及ぼす影響を、現地調査と地下水流動解析及び物質輸送解析等の数値解析を合わせ検証する。加えて、得られた結果を、大阪湾全域にスケールアップ可能な地下水流動及び物質輸送モデルを構築し、大阪湾全域における海底地下水湧出量および物質負荷量を算出する。以上の成果を用いて、御前浜沿岸や大阪湾全域における海底地下水湧出が生物生息環境に及ぼす影響について考察する。

2. 研究概要

2.1 大阪湾御前浜沿岸における断面 2 次元淡水－塩水密度流解析

(a) 解析方法

本研究で調査対象とする神戸市西宮市御前浜は、大阪湾北部では唯一自然海岸が残る海岸で、牡蠣やアサリなどの二枚貝も多く生息している。また、野鳥が多く訪れることでも知られており、生物の生息場所としてのみならず、周辺住民の親水空間としての役割も大きい。しかし、近年、陸域からの物質負荷量の増加や埋め立て等の海岸工事の影響から海底の底質悪化が著しく、生物が生息可能な水環境の復元が求められている。その水環境の復元のための一つの可能性として、海底地下水湧出が注目されている。

そこで、2006 年から昨年度（2008 年度）にかけて、本研究代表者や本研究協力者により、御前浜沿岸域において海底地下水湧出に関する詳細な現地観測が行われており（Ishitobi, 2007）、昨年度、本研究代表者が実施した比抵抗法を用いた電気探査と合わせて、御前浜沿岸の海底地下水湧出機構が明らかになりつつある。その結果を概略すると、シーページメーターを用いた直接観測により、御前浜沿岸における海底地下水湧出は汀線から 200m の範囲で観測された。汀線から 110m 付近で最大値を示し、同地点の 1 潮汐間

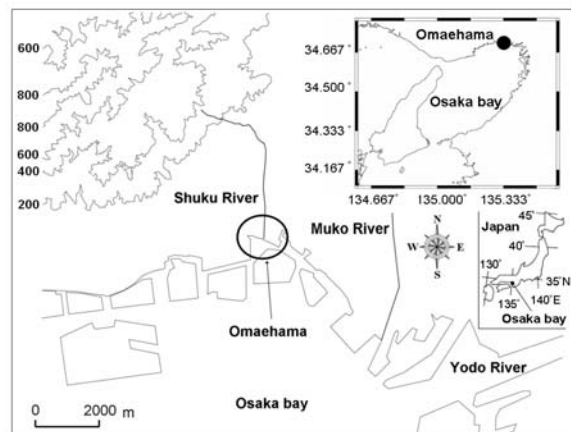


図 1 観測地点（兵庫県西宮市御前浜）

の平均的な湧出速度は 22cm/day であった。同時に、採水された海底湧水は、陸域地下水由来の淡水成分と再循環水と呼ばれる海水成分とで構成されており、両成分の湧出域は、Robinson et al.

(2007) が示すようには 図 2 断面 2 次元海底地下水湧出モデルの計算条件及び境界条はつきりと区分されず、両成分は混合して海底から湧出していた。また、電気探査比抵抗法より、御前浜沿岸の海底下の地下水と再循環水との分布位置が確認され、潮汐に応答した挙動もとらえることができた。

そこで、本年度は、現地観測結果を検証する目的で、昨年度構築した断面 2 次元淡水－塩水密度流モデルを御前浜の地形勾配と潮汐条件を組み込んだモデルに高度化し、潮汐に伴う海底地下水湧出の変動特性を検証した。数値解析には塩水侵入や多成分化学種の輸送解析が可能な SEAWAT (Langevin et al., 2003) を用いた。本モデルは、地下水の流動解析が可能な MODFLOW と物質輸送解析が可能な MT3DMS とのカップリングモデルであり、塩水侵入や海底地下水湧出などの密度流解析に有効である。本解析場の設定条件を図 2 に示す。解析場は現場が砂質土であることから均質・等方性を仮定し、海側境界には振幅 A に 1m の潮位変動を与えた。

(b) 結果及び考察

図 3 に御前浜沿岸における各潮時（上げ潮；Flood Tide, 満潮；High Tide, 下げ潮；Ebb Tide, 干潮；Low Tide）の密度流解析の結果を示す。図中の青色は地下水を、赤色は海水を示しており、黒で示した矢印は地下水の流線を併示した。

まず、陸域由来の淡水成分に着目すると、満潮時には、①淡水・塩水の混合境界

（淡塩境界）に沿って海底から湧出する流れがみられるが、上げ潮時や干潮時には、②淡塩境界を通過し、沖側の海底から湧出する流れがみられる。つづいて、海水成分に着目すると、海側境界から海底下の帯水層部分へ侵入した海水（再循環水）は、①淡塩境界に沿って海底下から湧出する再循環流と、②淡塩境界を通過した淡水成分の流れに乗って海側へ流動し沖側の海底下から湧出する再循環流の 2 パターンの流動が確認された。この結果は、各潮時で淡水成分が湧出する領域が変化しうることを示している。以上の数値解析結果は、上述した現地観測結果とよく対応し、陸域由来の地下水と海水由来の再循環水とが混合して海底から湧出するメカニズムを明らかにするものとなった。

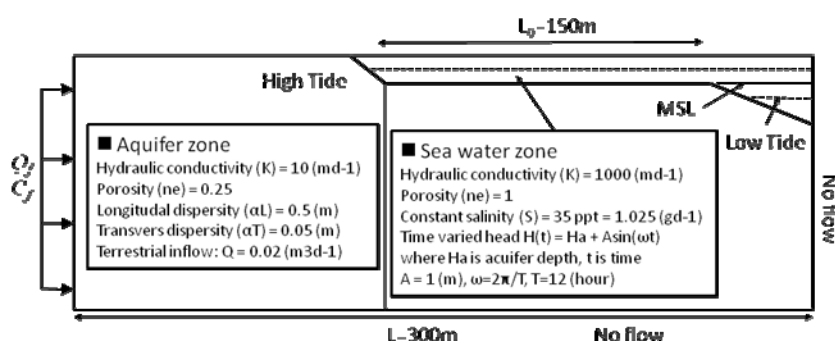


図 2 断面 2 次元海底地下水湧出モデルの計算条件及び境界条

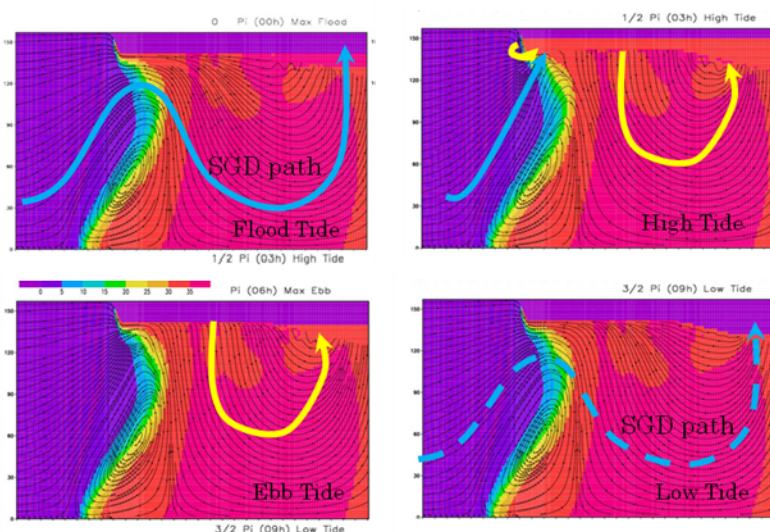


図 3 各潮汐時における海底地下水湧出の挙動

2.3. 広域 3 次元地下水流動モデルを用いた大阪湾全域へのスケールアップ

(a) 解析方法

大阪湾沿岸域は戦後の社会経済活動の発展に伴い大きく改変され、昭和初期までに広く存在した生物多様性を確保する上で重要な干潟や藻場を有した浅海域や自然海岸は大幅に減少し、特に湾奥部は港湾施設として利用されておりそのほとんどがコンクリート製の直立護岸となっている。このような人工護岸をもつ沿岸域では、西宮市御前浜で実施したようなシーページメーターや電気探査比抵抗法を用いた直接的な現地観測は不可能であるため、大阪湾全体への陸域からの地下水流出量を推定するためには、数値解析を用いた広域地下水流動モデルの構築が有効である。

そこで、本研究では、

図 4 に示す解析範囲において、大阪平野の 3 次元水理地質構造を、1 グリッド約 250m 毎に整理し、帯水層を 11 層に区分した。また、表 1 に示すように、数値解析に必要な各帯水層の透水係数と比貯留係数を地下水涵養委員会（2001）を参考に設定した。数値解析には、MODFLOW を使用した。解析期間は、大阪平野の地下水開発が進む前の 1925 年から 2005 年までとした。また、揚水量データは 1976 年以降は大阪府の各市町村により収集されたデータを利用し、それ以前から 1925 年までは揚水量と相関の高い GDP から推定した。

(b) 結果及び考察

図 5 に第 10 層の地下水位の計算値と観測値との比較を示す。左側に示した G4 層の観測地下水位と第 10 層の地下水位は比較的良好に対応している。

図 6 では大阪湾への全地下水流出量と淀川の河川流量（牧方観測所）とを比較した。3 次元地下水流動解析により算定した大阪湾への全地下水流出量は、解析期間 80 年（1925 年～2005 年）で、平均 $9.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ と推定された。この値は、淀川牧方流量観測所の 50 年間（1955 年～2005 年）の観測河川流量と比較すると、約 1% に相当した。

つづいて、図 7 に第 2 帯水層から第 1 帯水層への鉛直流 Q_z の分布図を示した。上向き

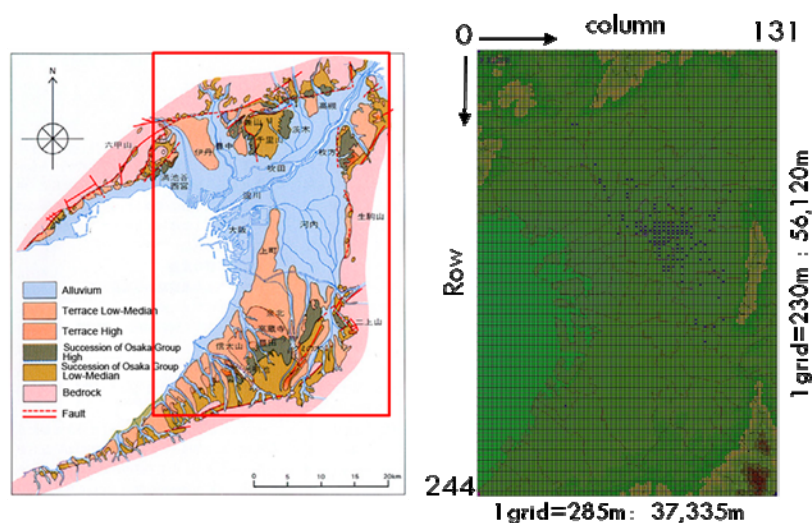


図 4 解析対象範囲と解析グリッド

表 1 大阪平野の地質構造と透水係数の関係

Stratigraphical division	Layer	No.	Hydraulic Conductivity (cm/s)		Specific storage	Thickness	Group
			Kx, Ky	Kz	Ss (1/cm)		
Alluvium	Upper	No.1:	1.E-06	1.E-06	1.E-04	30-50m	G1
	Clay (Ma13)	No.2:	2.E-07	2.E-07	1.E-03		
	Bottom	No.3:	1.E-06	1.E-06	1.E-04		
Upper Diluvium	Tenman	No.4:	5.E-04	5.E-05	4.E-05	30-100m	G2
	Clay (Ma12)	No.5	2.E-07	2.E-07	5.E-04		
	gravel	No.6	6.E-04	6.E-05	4.E-05		
Succession of Osaka Group	Clay (Ma9)	No.7	1.E-07	1.E-07	5.E-04	50-100m	G4
	Ma8-Ma6	No.8	3.E-04	3.E-05	3.E-05		
	Ma5-Ma3	No.9	2.E-04	2.E-05	3.E-05		
	Ma2-Ma-1	No.10	2.E-04	2.E-05	2.E-05		
		No.11	5.E-04	5.E-05	2.E-06		
Bedrock						500-1000m	

の鉛直流の分布は、大阪湾北部と南部の沿岸域でみられ、これら地域では、海水の静水圧に比べ地下水ポテンシャルが高く、海底から地下水が湧出している可能性が高い。特に、北部沿岸域は山地と沿岸域との距離が近く、御前浜付近の沿岸でも海底から地下水が湧出するポテンシャルがあることを示している。

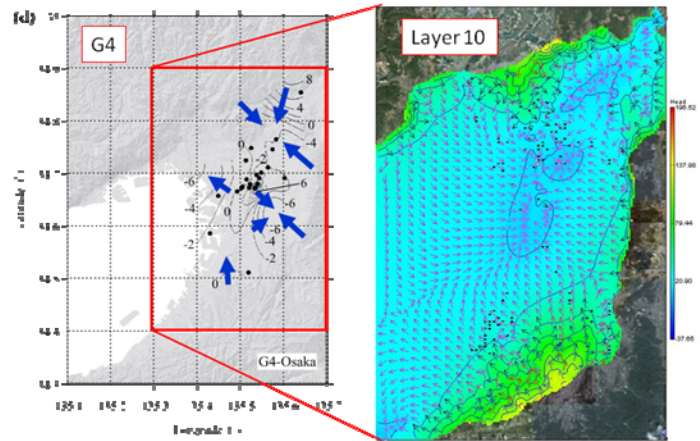


図 5 地下水位の計算値と観測値との比較

3. 結論

本研究では、大阪湾御前浜の生物生息環境に海底地下水湧出が及ぼす影響を検証する目的で、本年度は現地観測の結果を検証する目的で断面 2 次元淡水・塩水密度流解析を実施し、御前浜沿岸域における海底地下水湧出の潮汐に伴う変動特性について検討した。数値解析結果は、上述した現地観測結果とよく対応し、陸域由来の地下水と海水由来の再循環水とが混合して海底から湧出するメカニズムを明らかにするものとなった。

さらに、御前浜における結果を大阪湾全域にスケールアップする目的で、3 次元広域地下水流動モデルを構築し、大阪湾への全地下水流出量と海底地下水湧出の分布

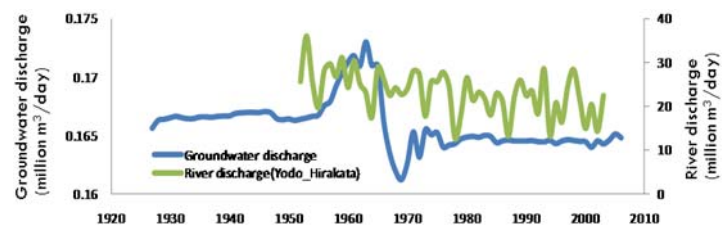


図 6 大阪湾への全地下水流出量と河川流量（淀川）との比較

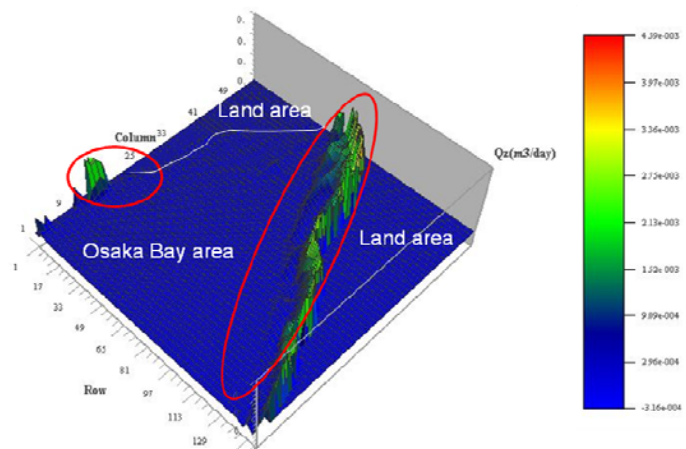


図 7 大阪湾における海底地下水湧出分布

域を推定した。その結果、大阪湾への全地下水流出量は、淀川牧方流量観測所の 50 年間（1955 年～2005 年）の観測河川流量と比較すると約 1%に相当した。大阪湾全域でみると陸域からの地下水流出量は、河川流出に比べて僅かではあるが、大阪湾北部と南部の沿岸域では、地下水ポテンシャルが海水の静水圧よりも高く、海底から地下水が湧出していると考えられる。また、今回得られた計算結果には、御前浜で観測され、断面 2 次元の密度流解析でも再現された海側境界から海底下の帯水層部分へ侵入した海水（再循環水）成分を考慮していないという問題点がある。再循環水は有機物を豊富に含んでいることが現地観測より明らかとなっており、御前浜に生息する牡蠣やアサリなどの二枚貝の生物生息環境に影響を及ぼしている可能性が考えられる。今後、再循環水を考慮することで、大阪湾への海底地下水湧出量の河川流量に対する割合がさらに大きくなる可能性も考えられる。

大阪湾への地下水による栄養塩流出とその長期変動に関する評価

○小野寺真一^{*1}，清水裕太^{*2}，有本弘孝^{*3}

広島大学大学院総合科学研究科准教授^{*1}，大学院生^{*2}

地域地盤環境研究所次長^{*3}

1. はじめに

瀬戸内海流域における地下水は、河川水に比べて海洋生物にとって重要な成分であるケイ素やリンを大量に含んでいる（Onodera et al., 2007）。流出量という点では、地下水は河川のわずか数パーセント程度であると報告されているが（Zektser and Loaiciga, 1993），川の水に比べて高濃度の栄養塩（窒素，リン，ケイ素など）を含むため，海への栄養塩供給という点では，地下水が大きく寄与することが明らかにされている（Slomp and Cappellen, 2004）。その一方で、大阪平野においては、1960年代に最大 30m も水位が低下し、地盤沈下も生じ、海水も一部で地下水に浸入した。すなわち、この間は、地下水が海洋に流出していなかったということになる。

本研究において、昨年度は現在の情報をもとに解析を実施し、大阪湾の栄養塩供給に対する地下水流出の重要性を確認した。特に、リンにおいてその重要性が示された。地下水自体の流出量は、河川流出の数%に過ぎないのに対して、地下水によるリンの寄与は、河川の 4 割程度にも及ぶことが確認できた。海水中の濃度分布から

も、河川の流入のない海域でリン濃度が高いことが確認できた。

本年度は、長期間の地下水流出量と栄養塩流出量の変動を明らかにし、将来の海洋環境の保全に向けて地下水の保全の重要性を評価することを目的とした。特に、1）現在の地下水の涵養年代を明らかにし、栄養塩の供給年代を評価し、2）最近 50 年間の土地利用によって変化する地下水への栄養塩負荷の変遷と、地下水中の塩分分布により推定される地下水-海洋間のフラックス情報を評価した。また、3）河川の洪水時を含む流出量の評価についてもモデル計算を実施したが、まだ課題を残している。

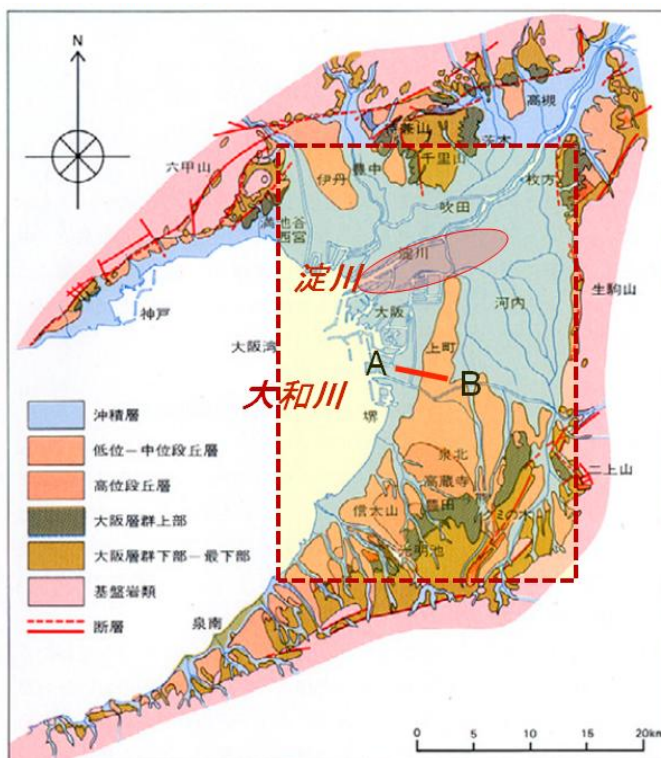


図1 大阪平野の地質図(市原 1966 より)及び集中採水地域(赤丸地域) *赤点線の範囲は、昨年度の採水範囲

2. 研究地域及び方法

本年は、1) 大阪平野の中央部付近(図1丸囲み部分)を代表として、15地点の観測井で地下水調査(採水及び測水)を実施した。採水した地下水は、表層数m(G1)、深度30m(G2)、深度60m(G3)の3種類の帯水層である。ここでは、特に空気に触れないように採取したのち、溶存フロンガス(クロロフルオカーボン;CFC11、CFC12)およびSF6濃度を測定し涵養年代を推定した。また、2)最近50年間の地下水への栄養塩フラックス及び地下水から海洋へのフラックスを推定するため、それぞれ土地利用をもとにマテリアルフローを考慮した負荷モデルによる計算を実施するとともに、地下水中の塩分分布から塩水化の進んでいる地域では地下水流出はなく塩水の侵入した領域、塩分のほとんどない地域は地下水が流出した地域として昨年実施した地下水流出モデルで、50年間の平均フラックスを推定した。さらに、3)50年間にわたる洪水時を含む河川から海洋への栄養塩流出量の変動を明らかにするため、SWATモデルを淀川流域等に適用した。

3. 結果と考察

1) 地下水の涵養年代

図2に、CFC12を使用した大阪平野の地下水の涵養年代の分布を示す。測定を行った地下水の深度は10m~60mの範囲と、比較的浅層の地下水である。地下水の涵養年代は、図のようにおおよそ40年~60年程度前ということが明らかになった。場所によっては、沿岸から3km付近のように40年前のやや若い水も確認できた。一般に、地下水流出域に当たる本地域のような場所では、地下水年代は100年~1000年に至ると言われている。しかし、本結果は、明らかに若い水が混入していることを示した。具体的には、塩分も高いことから、海水の侵入が示唆された。

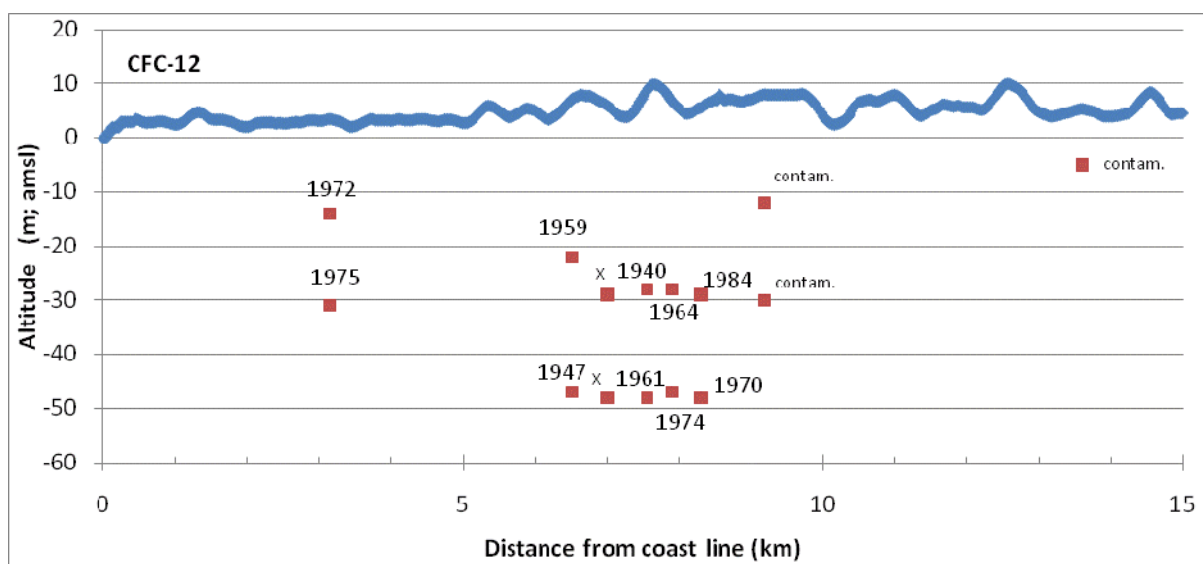


図2 大阪平野中央部における地下水年代の分布(海岸から15kmの沿岸域)

*数字は推定涵養年代を示す、xは低濃度のため推定不可、contamiは大気濃度以上の濃度で推定不可

2) 50年間の地下水への栄養塩負荷

図3に、1970年及び2000年における窒素収支モデルで見積もった窒素負荷量の分布を

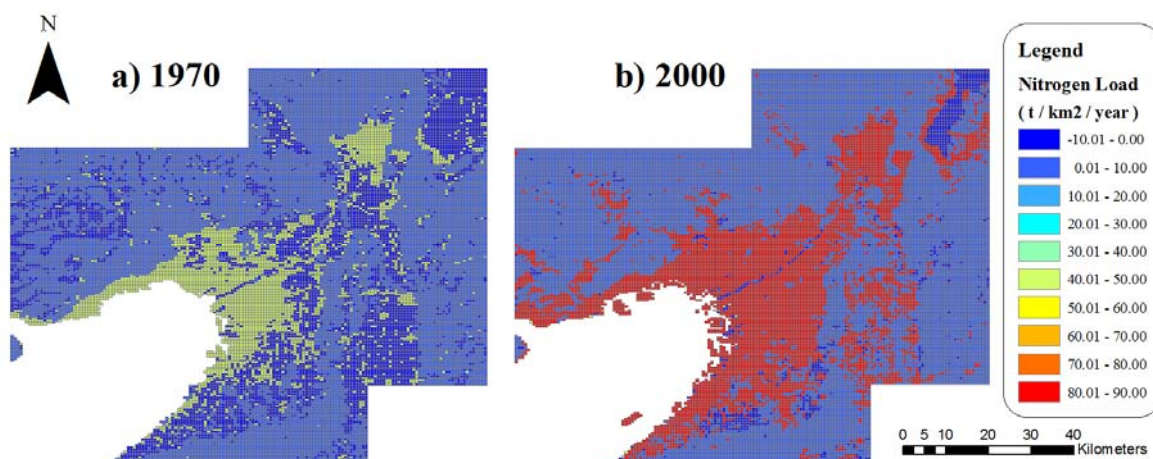


図 3 1970 年及び 2000 年における窒素収支モデルで見積もられた窒素負荷量の分布

示す。2000 年では、平野中央部付近で 1970 年に比べて負荷量は倍に、さらにその範囲も拡大している。河川の COD や BOD 濃度は、下水道の普及にともない最近 30 年間で改善されたものの、流域圏での負荷量は減少したとはいえない現状が確認できた。すなわち、河川への汚濁は改善されたとしても、下水に流入しない部分の負荷量、すなわち地下への負荷は存在していたことを考慮する必要がある。これは、昨年度の地下水中の硝酸性窒素濃度の測定結果において、地下水涵養域では環境基準 (10mg l^{-1}) に近い値を示す地点がみられたことと整合する。

3) 50 年間の栄養塩フラックスの推定

図 4 は、50 年平均での北部、南部、中央部における地下水流出域の平均栄養塩濃度及び等塩素イオン濃度線の分布を示す。この地下水中の塩分分布（塩素イオン濃度）から 50 年平均での地下水流出のパターンを 3 区分した。北部は、一部塩水の流入が確認され（平均 2000ppm；海水の 1 割）、1960 年の揚水最盛期に地下水流出がストップしていたことが、中央部は、最も塩分が高く（平均 6000ppm；海水の 3 割）、地下水流出はほとんどなかったことが、南部は塩分が淡水レベル（平均 100ppm；海水の 0.5%）で、常に地下水が流出していたと推定できた。昨年の成果によれば、現在の河川流出に対する地下水流出の割合は、4%であ

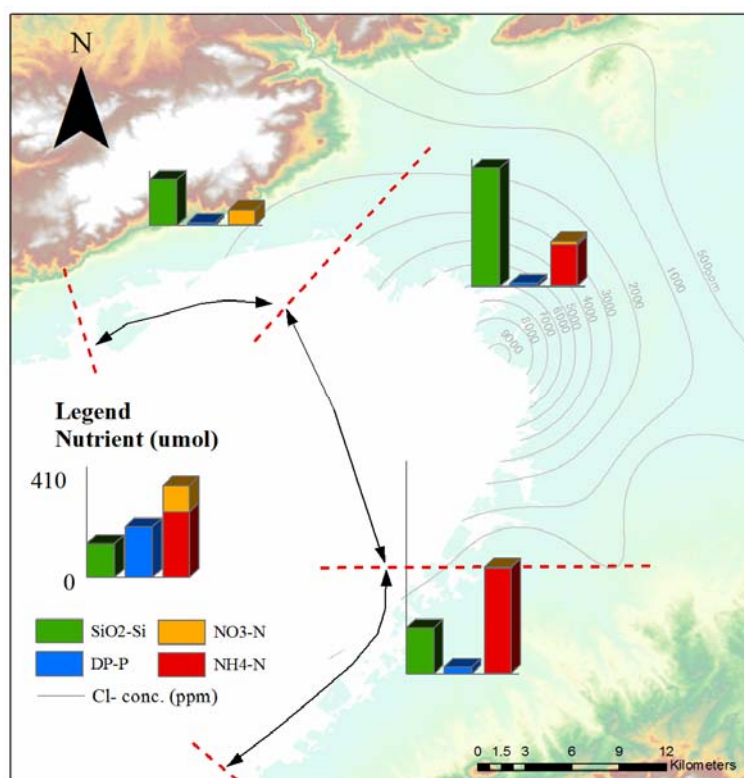


図 4 地下水流出域（北部、南部）及び非流出域（中央部）の栄養塩平均濃度分布、及び塩素イオン濃度分布（等値線は ppm 単位）

ると見積もられたが、今から 50 年前から数 10 年間は 2%程度まで減少していたことが、また、それ以前の自然状態（およそ 80 年前）のころには、8%程度であったと推定される。

また、それぞれの地域における沿岸地下水中の平均的な栄養塩パターン（図 4）は、リンが地形地質を反映して中央部及び南部で高いことが、シリカが滞留時間を反映して中央部で高いことが、溶存窒素については、北部のみ硝酸性窒素がわずかに検出されているが、ほとんどの形態はアンモニア性窒素であることが示された。昨年度の結果から、リンの供給という点では、現在においても地下水の役割は大きい。80 年前の自然状態にあった時代には、よりリンの供給が多く、河川流出とほぼ同等であったことが推定される。一方、地下水低下最盛期（50 年前）には、現在の半分であったと推定され、よりリンの供給が少なかったものと考えられる。その一方で、河川による汚濁物質の供給は現在より多く、それによる供給が地下水の減少分を補っていたものと推定される。

また、中央部の涵養年代（図 2）をみると、海岸線からの距離に比例していないこと、深度 30m と深度 60m の地下水における差も明瞭ではないことがわかる。すなわち、平均して地表付近から地下水涵養が鉛直下方に向けて生じ、内部でよく混合していると考えられる。地表付近には河川網が存在し、そこに塩水遡上によって侵入した塩水が、揚水にともなう地下水位の低下に合わせて、地表付近から一様に吸い込まれたと考えるのが適当であろう。ここで、60m の地下水層がおおよそ 40 年間で置き換わったと仮定すれば、その侵入速度は 1 年で 1.5m、地下水フラックスは間隙率を 10% とすれば 1 年で 150mm と見積もられる。この値は、通常の山地涵養域での涵養量（300mm～600mm）に比べると小さいが、深部地下水への涵養という点では非常に大きい。

以上の値に従って栄養塩も流入したと考えると、特に、水質汚濁期（1970 年前後）に河川中に含まれていたと考えられる硝酸性窒素に関しては、現在の地下水中では検出されていないことから、地下水中で微生物分解（脱窒）によって消失したと考えられる。河川流量が降水量の 50%（600mm）、地下水を吸い込んでいたとするエリアを河川流域の 10% とすると、地下水への吸い込みにともなう浄化量は、地表の河川を流下する窒素量の数%に及ぶと見積もられた。

4) 河川からの栄養塩流出量の見積もりに向けて

本研究の枠組みでは、大阪平野の流域において、観測地点における水流出量が再現できただけである。ただし、広島県の流域では、20 年間の栄養塩流出の再現に成功しているので、今後、大阪でも長期の評価を行っていく予定である。

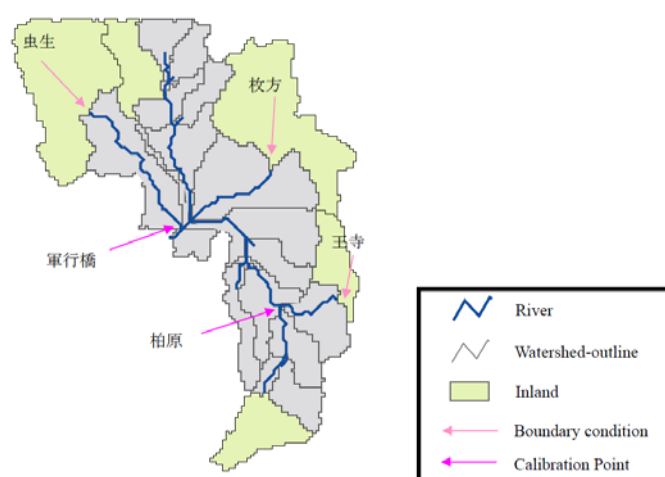


図 5 大阪平野における SWAT モデルの適用範囲

新たに造成される浅場の機能評価モデルの開発に向けた底質劣化に関する研究

入江政安

大阪大学大学院工学研究科・講師

1. 研究目的

水環境改善施策として新たに造成される人工干潟や人工海浜は、水環境改善のためであるが故に、水質の面では恵まれない水域に設置されることが多い。水質が良くない水域に設置されるこれらの浅場は、活発な内部生産により、新生堆積物が底面状に蓄積する。この堆積物が新たな水質汚濁源となることにより、造成当初の機能が失われることがある。本研究は、底質劣化とその水域への影響を明らかにするため、底質モデルを構築し、同時に実施する現地調査結果と比較することにより、再現性を確保する。そのうえで、底質の汚濁要因及び水質への影響解析を行うことを目的とする。

2. 研究方法

2.1 底質調査および室内分析

底質調査は大阪湾奥部の尼崎西宮芦屋港の、さらに港最奥部に位置する甲子園浜で実施した。甲子園浜の前面海域は、夏季において貧酸素水塊の形成が確認される海域であり、青潮の発生も確認されており、気象条件や地形にもよるが、底層の貧酸素化、および青潮の発生要因である硫化水素の生成・蓄積が生じやすい水域である。

調査は2009年8月31日（夏季）および2010年2月9日（冬季）に実施した。夏季調査では浅海域における底質がどのように水質に影響を及ぼし、貧酸素水塊を形成しているのかを把握するため、調査地点を東経135°21'の経度線上で水深2m, 3m, 4mとなる地点を観測点とした。冬季は調査では、夏季の調査地点のうち水深3mのみを対象とし、室内実験により、水温の影響を明らかにしようとした。

底質調査では直径11cmの亚克力パイプ又は直径10.6cmの塩化ビニルパイプを用いて泥深25~30cmの不攪乱柱状泥として採泥を行い、底質分析および酸素消費速度、栄養塩溶出速度の実験を行った。底質分析に用いた試料は現地で0~2cm, 2~5cm, 5~10cm, 10~15cm, 15~20cm, 20~25cmの6層（一部5層）に分取し、泥温・ORPを測定するとともに、底質分析用として持ち帰ったものである。表-1に調査内容および調査項目についてまとめたものを示す。

表-1 調査内容および調査項目

調査内容の区分		調査項目
底質分析	土粒子	含水比, 強熱減量, ORP, T-S, T-N, NH ₄ -N, T-P, I-P, Al-P, Fe-P, Ca-P
	間隙水	T-N, NH ₄ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, T-P, PO ₄ -P, SiO ₂ , ΣH ₂ S, SO ₄ ²⁻
溶出速度実験		T-N, NH ₄ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, T-P, PO ₄ -P, SiO ₂ , ΣH ₂ S
酸素消費速度実験		DO

2.2 底質モデルの概要

本研究で用いた底質モデルは，Wijsman ら(2002)，Fossing ら(2004)の研究を基に，構築した底泥中の土粒子および間隙水中における各物質間の生物化学的相互作用を考慮した鉛直 1 次元モデルである．このモデルは底質内の炭素・窒素および硫黄を要素としてモデル化したものであり，有機物の堆積から無機化する過程を含む底泥内における物質の酸化還元過程を表現している．

モデルの概念図を図-1 に示す．水中から堆積する有機物は底泥内で分解されるが，その過程（図中太線矢印）は有酸素下の有機物分解，脱窒，マンガン還元，鉄還元，硫酸還元で進行する．これらの化学反応を表-2 に示す．本研究で考慮している物質は太字で示している．通常，今回の調査水域では，ほとんど表層から底泥は還元状態である．この場合，脱窒作用にともなう硝酸イオンの供給により，また，硝酸イオンが欠乏した場合にはマンガン・鉄酸化物により，これらも欠乏すると，硫酸イオンを用いる硫酸還元菌の作用により，有機物が分解される．これらは一方的に進むのではなく，上位の酸化剤が供給され，酸化されやすい下位の物質が残っている場合には再酸化される． HS^- （ $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ の一部）は Fe^{2+} の供給により FeS となり，沈殿をおこし，いずれパイライトとなりより安定的な土構成物となる．

モデルにおける底泥内の構造は鉛直方向に層厚 1cm×25 層で分割し，全 25 層泥深 25cm までとした．底質の初期条件については底泥内の各物質の濃度を 0 とし，境界条件において堆積フラックスおよび直上水水質の値をそれぞれの地点において決定することで良好な再現性を得られるようにした．ここでは，易分解性の有機物が主にプランクトン由来の有機物であるとして有機物のフラックスに季節変化を与えた．モデルの適用においては有機物フラックスを季節変動による堆積量の違いを与えるため，1 年を 1 周期とした非定常状態で再現計算を行った．

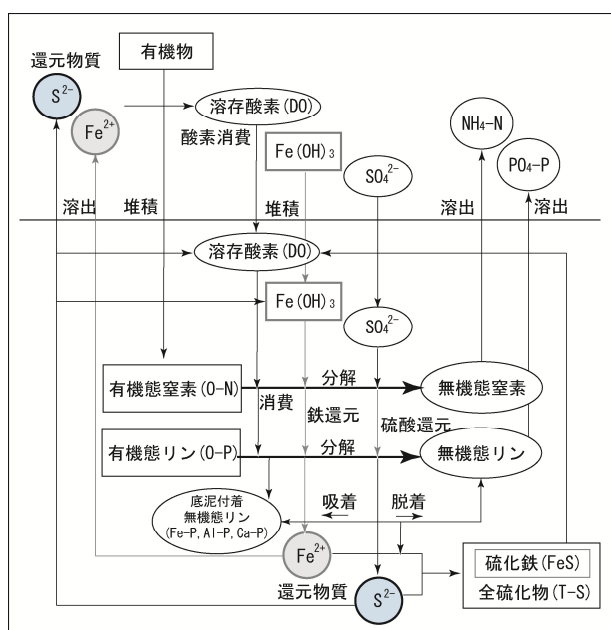


図-1 底質モデルの概念図

表-2 底泥内の無機化過程（太字はモデルに組み込まれた項目， x, y は有機物内のそれぞれ，N/P モル比，C/P モル比を示す．）
（Wijsman et al.をもとに作成）

一次反応系	反応式
有酸素下分解	$(\text{CH}_2\text{O})_x(\text{NH}_3)_y(\text{H}_3\text{PO}_4)+x\text{O}_2+y\text{H}^+ \rightarrow x\text{CO}_2+y\text{NH}_4^++\text{HPO}_4^{2-}+2\text{H}^++x\text{H}_2\text{O}$
脱窒	$(\text{CH}_2\text{O})_x(\text{NH}_3)_y(\text{H}_3\text{PO}_4)+4/5x\text{NO}_3^++(4/5x+y)\text{H}^+ \rightarrow x\text{CO}_2+y\text{NH}_4^++2/5x\text{N}_2+\text{HPO}_4^{2-}+7/5x\text{H}_2\text{O}$
マンガンによる異化的還元	$(\text{CH}_2\text{O})_x(\text{NH}_3)_y(\text{H}_3\text{PO}_4)+2x\text{MnO}_2+(4x+y)\text{H}^+ \rightarrow x\text{CO}_2+2x\text{Mn}^{2+}+y\text{NH}_4^++\text{HPO}_4^{2-}+2\text{H}^++3x\text{H}_2\text{O}$
鉄による異化的還元	$(\text{CH}_2\text{O})_x(\text{NH}_3)_y(\text{H}_3\text{PO}_4)+4x\text{Fe}(\text{OH})_3+(8x+y)\text{H}^+ \rightarrow x\text{CO}_2+4x\text{Fe}^{2+}+y\text{NH}_4^++\text{HPO}_4^{2-}+2\text{H}^++11x\text{H}_2\text{O}$
硫酸還元	$(\text{CH}_2\text{O})_x(\text{NH}_3)_y(\text{H}_3\text{PO}_4)+1/2x\text{SO}_4^{2-}+(1/2x+y)\text{H}^+ \rightarrow x\text{CO}_2+1/2x\text{H}_2\text{S}+y\text{NH}_4^++\text{HPO}_4^{2-}+\text{H}^++x\text{H}_2\text{O}$
メタン生成	$(\text{CH}_2\text{O})_x(\text{NH}_3)_y(\text{H}_3\text{PO}_4)+y\text{H}^+ \rightarrow 1/2x\text{CO}_2+1/2x\text{CH}_4+y\text{NH}_4^++\text{HPO}_4^{2-}+2\text{H}^+$

3. 主要な結果と考察

3.1 現地観測結果および再現計算結果による底質特性の解析

底泥内における間隙水中のアンモニア態窒素 $\text{NH}_4\text{-N}$ と硫化水素濃度 $\Sigma \text{H}_2\text{S}$ の鉛直分布について、観測値と計算値を図-2 に示す。甲子園浜の底質についてはそれぞれ $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\Sigma \text{H}_2\text{S}$ とともに濃度の鉛直分布において良好な再現性が得られている。有機物フラックスを変化されることにより、これらの分布特性を再現しているが、易分解性の有機物割合を 0.7~0.99 の範囲で与えている。甲子園浜の堆積物の特性としては河川が流入しない水域であることと、水深が浅いために易分解性の有機物が供給されやすいことが挙げられる。これらの性質から、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\Sigma \text{H}_2\text{S}$ とともに表層付近で濃度が高く、また、特に水深 4m の調査点では有機物の分解量が多く $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\Sigma \text{H}_2\text{S}$ とともに最大となっている。

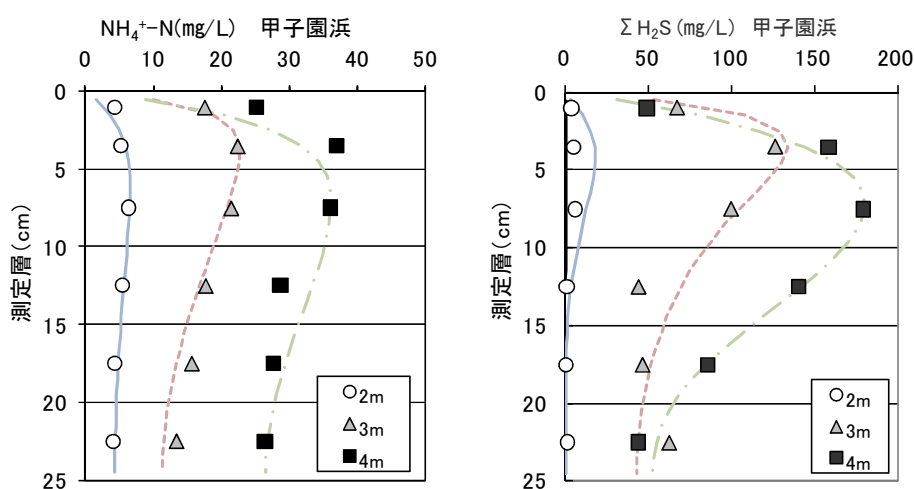


図-2 観測値と再現計算結果(点:観測値, 線:計算値)(左: $\text{NH}_4\text{-N}$, 右: $\Sigma \text{H}_2\text{S}$)

3.2 酸素消費速度の季節変化からみた新生堆積物の影響

表-3 に夏季及び冬季の底質による酸素消費速度を示す。酸素消費速度は採取した不攪乱柱状泥の直上水の溶存酸素濃度を飽和状態にし、実験開始から 6 時間経過後までの直上水の DO 消費量を用いて算出したものである。夏季の底質による酸素消費速度は、水深 3 m の底質で最大の $5.31 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 、次に水深 4 m の地点で $3.35 \text{ g/m}^2/\text{day}$ と底質に有機物・硫化物が多く含まれる地点で酸素消費速度が大きかった。これは大阪湾奥部の北部港湾域の酸素消費速度が $2.09 \text{ g/m}^2/\text{day}$ であることに比べても底質による酸素消費が著しい環境であるといえる。一方、冬季の酸素消費速度は現地水温 (13°C) で室内実験を行った場合 $1.38 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 、実験室に持ち帰り速やかに泥温および水温を 25°C にして実施した場合 $3.23 \text{ g/m}^2/\text{day}$ であった。サンプリング数が不十分であるため、サンプルの個体差の可能性を排除できないが、夏季と冬季の酸素消費速度には明らかな差が認められ、夏季水温条件下で冬季の底質の酸素消費速度を計測しても、夏季ほどには酸素が消費されないことから、新生堆積物の分解が底質による酸素消費に応分に寄与していることが推察される。

表-3 底質による酸素消費速度

季節	地点	設定温度 (°C)	酸素消費速度 (g/m ² /day)
夏季	水深 2m 地点	25	1.73
	水深 3m 地点	25	5.31
	水深 4m 地点	25	3.35
冬季	水深 3m 地点	13	1.38
	水深 3m 地点	25	3.23

4. 主要な結論

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 適用した底質モデルは、多くの生物化学反応を組み込んだ複雑なモデルであるが、汚濁が進んだ底質環境、および異なる水域の底質に対しても適用可能であることが示唆された。また、未測定物質についても再現計算を行うことによりある程度特性を把握することが可能である。
- 栄養塩、還元物質の溶出に関しては間隙水中と直上水中の物質の濃度差により拡散・溶出することが既に知られているが、本モデルにおいても同様の結果が得られた。また、栄養塩溶出速度および酸素消費速度に関しては間隙水中の物質濃度だけでなく、有機物の分解特性についても考慮することで実測値に近い再現性になる。
- 夏季および冬季における底質の酸素消費速度を計測した結果、夏季の底質による酸素消費には、その年の新生堆積物の影響が無視できない。
- 本研究で用いたモデルは底質の将来予測に適用可能であることが分かった。しかし、新生堆積物による短期的な酸素消費と底泥中に蓄積した還元物質による中長期的な酸素消費の分画には至らなかった。中長期的な酸素消費については、底質内の物質の挙動について、安定同位体比分析等を用いたさらなる調査が必要である。特に硫化水素イオンの挙動が重要であると考えられるので、硫化水素イオンの固定法・採取法を検討する必要がある。その上で、現在各物質の物性と単純な式で与えられている鉛直方向拡散係数について精査し、モデルの向上を図ることが重要である。この中長期の酸素消費機構の再現性向上により、新生堆積物の水質に与える影響の定量化が可能になると考えられる。
- 底質モデルの解析によると、還元物質の生成とその水域への回帰には鉄イオンおよびマンガンイオンの供給が重要となる。これらの陸域からの水域への供給と水域内の分布について精査する必要がある。夏季の出水時のこれらの金属イオンの供給により、底質による酸素消費が抑制されていることも考えられる。この方向での検討をさらに進めることで、夏季出水時の強風による鉛直混合等、これまで考えられていた貧酸素水塊縮小の要因とは異なる新しい知見が得られる可能性が指摘される。

大阪湾圏の浅海域成育場が魚類生産に果たす役割の定量評価： 広域調査による空間変動解析

○小路淳^{*1}，岩本有司^{*2}，森田拓真^{*2}

広島大学生物圏科学研究科 瀬戸内圏フィールド科学教育研究センター

竹原ステーション准教授^{*1}，大学院生^{*2}

背景と目的

生態系に備わった機能のうち人類が享受できる価値の部分を示す「生態系サービス」は、各生態系の重要性を定量的に評価するために必須の尺度である。地球上の生態系ごとの経済価値を算出した研究によると、熱帯雨林（0.2 万ドル/ha/年）をはじめとする陸域や淡水域（湖・川：0.8 万ドル/ha/年）に比べて浅海域（藻場・干潟・河口域など）の生態系サービスははるかに高く、全生態系でトップクラス（約 2 万ドル/ha/年）である。しかしながら、その推定値には生産の主要構成要素である魚類生産がほとんど含まれていない。これは、一次生産者や動物プランクトン・ベントス類に比べ移動能力が高い魚類の生産過程の定量評価がこれまで困難であったことに起因する。本研究では、魚類の「ゆりかご＝産卵・成育の場」として重要と認識されながらその根拠となる科学的・定量的データが乏しい浅海域において成育場機能の定量評価と広域解析を実施することを目的とした。

後背地に大都市圏を有し河川から豊富な有機物が供給される大阪湾は、瀬戸内海はもとより世界の内湾のなかでも水産資源の生産力が高い海域の一つである。年変動が大きい水産資源の動向を正確に予測し、持続的かつ有効に利用するためには、加入変動を左右する生活史初期（幼稚魚）の生産（成長・生残）過程の解明が不可欠である。本研究では、大阪湾の水産資源にとって重要な成育場と考えられる浅海域における環境・生物調査により、大阪湾とその周辺の浅海域成育場における魚類生産過程の解明と広域比較を以下の 3 つの Step に分けて実施する計画である。

Step 1. 大阪湾の 3 区域を比較・・・（初年度に実施：阪神圏，淡路圏，泉州圏）

Step 2. 大阪湾と周辺域の比較・・・（大阪湾，播磨灘，紀伊水道）

Step 3. 瀬戸内海全域での比較・・・（上記と備讃瀬戸，燧灘，芸予瀬戸，広島湾など）
（助成年度数に応じて Step 2・3 へと拡大実施）

ここでは、H21 年度に実施した Step 1（大阪湾内の 3 区域の比較）の結果について報告する。

材料と方法

H21 年度には、実施計画にしたがって大阪湾沿岸一帯の浅海域 16 箇所において広域的調査を実施した。設けた定点は、阪神，淡路，泉州エリアにそれぞれ 5 定点，4 定点，7 定点である。各定点において物理環境項目の測定と、魚類相および魚類の餌料環境調査を実施した。物理環境の測定項目としては、水温，塩分，濁度，溶存酸素濃度を対象とした。各定点にお

いて海水を採取し、多項目水質計により各物理環境項目を測定した。魚類の採集には小型曳き網（幅 2.3m, 高さ 1m, 目合い 2mm）を用い、海岸線と平行に約 50m の距離を 2 人の調査者により曳網した。得られた採集物を 10%海水ホルマリンで固定して実験室へ持ち帰り、選別したのち魚類の種同定、体長・体重測定を行った。各定点において採集された魚類の個体数と重量を魚種ごとに集計し、曳網距離 50m あたりの数量に換算してエリア間での比較を行った。餌料環境調査にはプランクトンネット（口径 0.3m, 目合い 0.1mm）を用いて主に浮遊性無脊椎動物プランクトンを採集した。採集物を 5%海水ホルマリンで固定して実験室へ持ち帰り、分類群ごとの個体数を計数した。網口に取り付けた濾水計により各定点における分布密度を算出した。

結果と考察

1) 物理環境 各定点における水温は 23.7-28.2℃ の間で変動し、泉南エリアの定点 A で最も低く、阪神エリアの定点 B で最も高かった。塩分は 15-33 の間で変動し、阪神エリアの定点 C で最も低く、泉南エリアの定点 D で最も高かった。溶存酸素濃度は 4.3-5.5mg/L の間で変動し、泉南エリアの定点 E で最低、阪神エリアの定点 B で最高であった。濁度は 32-130NTU の間で変動し、泉南エリアの定点 E で最低、淡路エリアの定点 F で最高であった。

2) 魚類の出現 16 箇所の定点において採集を実施した結果、合計 502 個体、12 分類群の魚類が採集された。最も多かった魚種はクロダイ（258 個体）で、クサフグ（212 個体）、クロサギ（13 個体）がこれに続いた。エリア別の採集個体数は泉南（481 個体）で最も多く、淡路（14 個体）、阪神（7 個体）の順でこれに続いた。採集された魚種の分類群数は泉南（8 種）、阪神（5 種）、淡路（4 種）の順に多かった。

3) エリア間の比較 阪神、泉南、淡路の 3 エリア間で採集された魚類の種数、個体密度を比較した。一曳網あたりの分類群数は泉南で 2.0、阪神および淡路でともに 1.0 であった。最も多く魚類が採集された定点は、泉南エリアの定点 E（1 曳網あたり 264 個体）で、同じ泉南エリアの定点 G がこれに次いだ（1 曳網あたり 54 個体）。エリアごとの平均分布密度は泉南で最も多く（1 曳網あたり 54.9 個体）、これに淡路（1 曳網あたり 3.5 個体）、阪神（1 曳網あたり 1.2 個体）の順で続いた。

個体数において多く採集された上位 2 種（1 位：クロダイ、2 位：クサフグ）の分布密度はともに泉南エリアにおいて高かった。泉南エリアにおけるクロダイ、クサフグの平均分布密度はそれぞれ 1 曳網あたり 32.3 個体、28.3 個体であった。種ごとの分布密度が高かった定点は、クロダイでは泉南エリアの定点 E（1 位：105 個体/曳網）と同じく泉南エリアの定点 G（106 個体/曳網）、クサフグでは泉南エリアの定点 E（15 個体/曳網）と同じく泉南エリアの定点 H（535 個体/曳網）であった。これら 2 種は泉南エリアの夏期における浅海域を特徴づける魚種として位置づけられる。

結論

- 1) 大阪湾の浅海域は水産業上重要魚種（クロダイ、シロギス、ハゼ類）などの生息場として重要であることが確認された。
- 2) 本研究では、同一の採集方法による広域調査を実施し、大阪湾の3つのエリア（阪神、泉南、淡路）における魚類群集構造を定量的に比較した。
- 3) 魚類の種構成や個体密度は3つのエリアによって異なった。種数、個体密度のいずれにおいても泉南エリアで最大となり、特にクロダイ、クサフグの占める割合が高かった。

今後の課題

「チヌの海」と呼ばれてきた大阪湾が現在もなおクロダイ等の水産業上重要魚類の生息場として重要であることと、生息環境としての各地域の浅海域の特性を定量的に評価できた。今後は、大阪湾に隣接する海域（紀伊水道、播磨灘）や瀬戸内海の他の灘・湾（燧灘、広島湾）等へも調査フィールドを拡大し、瀬戸内海全域のなかでの大阪湾の特性の評価に向けて広域的視点から同研究を発展・継続したい。

分布型水文流出モデルを用いた 播磨灘に流入する淡水流入量の推定に関する研究

石塚正秀

香川大学工学部 准教授

1. 研究目的

海域の環境変化は河川流入負荷量の変化と深く関係していることが知られている。その関係をより詳細に明らかにするためには、陸域からの物質を輸送する淡水量を正確に推定する必要がある。しかし、二級河川は観測データが十分に整備されておらず、調査が行われていない場合や観測の時間分解能や精度の問題がある。香川県の東讃域の河川はすべて二級河川であり、播磨灘の南側における淡水供給量はこれまでに明らかとなっていない。そのため、本研究では、分布型水文流出モデルを用いて香川県および兵庫県から播磨灘に流入する河川流量を推定することを研究の目的とする。分布型水文流出モデルを用いることで、播磨灘北部海域と南部海域における淡水流入量の差異が定量的に評価することができ、栄養塩負荷量を推定するための基礎的情報となる淡水量データを提供できる。

2. 研究方法

①数値モデルによる河川流量の推定

分布型水文流出モデルを用いて、河川流量の推定を行う。モデルは、石塚・江種（2008）により開発された。モデルの適用にあたっては、標高・斜面勾配・河川流路位置などの地形データや森林・農地・宅地などの土地利用データを収集し、地形モデルの作成を行った。また、入力データとなる降水量データ・気温データを収集する。雨量データには気象庁のアメダスデータを用いた。

対象流域は香川県東讃域と兵庫県播磨灘側であり、播磨灘に流入する二級河川流域である。それぞれ、東讃域 7 河川（鴨部川、津田川、番屋川、与田川、湊川、小海川、馬宿川）、兵庫県 4 河川（千種川、夢前川、市川、明石川）の計 11 河川を対象とした。

②シミュレーション結果の検証

兵庫県を流れる揖保川は一級河川であり、国土交通省による河川流量データが存在するため、シミュレーション結果と現状の河川流量の比較を行い、モデルパラメータの検討を行った。

③河川水質の調査

河川水質の基礎的項目を測定し、各河川における水質の基礎的特徴を調べる。測定項目は、SS、溶存ケイ素、全リン、リン酸態リン、全窒素、硝酸イオン、有機態リン、有機態窒素、pH、EC（電気伝導度）、水温、DO（溶存酸素量）である。対象河川は東讃域 8 河川（鴨部川、津田川、番屋川、与田川、湊川、小海川、馬宿川、折野川）、兵庫県播磨灘側 6 河川（千種川、揖保川、夢前川、市川、加古川、明石川）、兵庫県淡路島 3 河川（郡家川、大日川、三原川）の計 17 河川とした。

なお、窒素項目に関して、東讃域は流域面積の大きい鴨部川、津田川、湊川について測定を行った。調査は、2009年8月（2回）、10月、12月、2010年2月に実施した。このうち、2009年8月10日は台風9号による大雨により、香川県東部の引田アメダス観測所において1時間あたり59.0 mm（10分あたり21.5 mm）の非常に激しい雨が観測された際に、出水時の調査を行った。また、12月の調査も出水時に実施した。なお、調査地点は、海水の影響を受けない河口に近い地点を選定した。

④播磨灘における河川水の影響の検討

兵庫県および香川県の水産試験場が観測を定期的に行っている観測データを整理し、河川流量と播磨灘における栄養塩濃度の空間分布との関係を調べる。

3. 結果と考察

(1) 河川流出解析

i) 数値モデルの精度検証

対象とする二級河川には実測データが存在しないため、実測データ（国土交通省：水文水質データベース）の存在する一級河川である兵庫県の揖保川流域において流出解析を行い、モデルパラメータの検討を行った。精度の検証は2002年（姫路アメダス降水量：808 mm/yr）を対象とし、初期条件の影響を受ける1, 2月を除いた3月以降の総流量を比較した。その結果、河川流量の実測値とシミュレーション結果との差異は約10%であり、本モデルの結果は妥当であると判断した。

ii) 播磨灘に流入する淡水流入量の推定

上記の揖保川を対象としたモデルパラメータを用いて、渇水年である2002年の河川流出解析を行い、播磨灘に流入する淡水流入量（3月以降の総流量）の推定を行った。結果を図1に示す。その結果、播磨灘に流入する淡水流入量は、東讃域と比較して兵庫県播磨灘側が約13倍多い結果が得られた。なお、一級河川の加古川と揖保川については国土交通省の実測データの値を用いた。

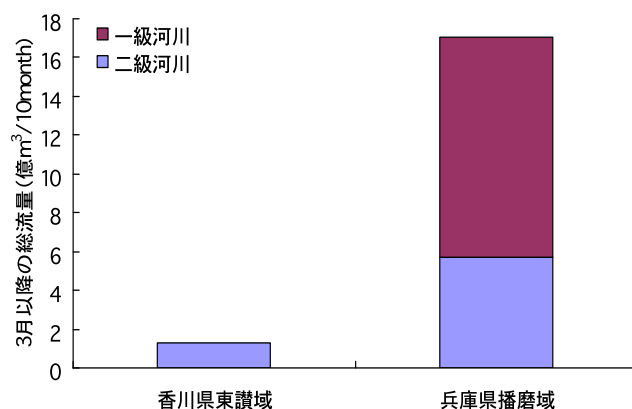


図1 播磨灘に流入する淡水流入量の比較
(2002年3月～12月の総流量)

(2) 河川水質調査

i) 空間分布

河川水質調査結果（平水時）について、ケイ素、リン酸態リン、硝酸イオンの空間分布を図2に示す。ケイ素濃度を比較すると、全体的に東讃域の濃度が兵庫県播磨灘側よりも高くなっていることがわかった。その比率は、東讃域が約1.7倍

大きかった．リン酸イオンと硝酸イオンも東讃域の濃度が若干高くなっており，その比率は約 1.3 倍であった．また，局所的な傾向もみられた．とくに，馬宿川ではリン酸イオン濃度が高く，明石川ではリン酸イオンと硝酸イオンの濃度が高く，大日川ではリン酸イオン濃度が高い結果が得られた．

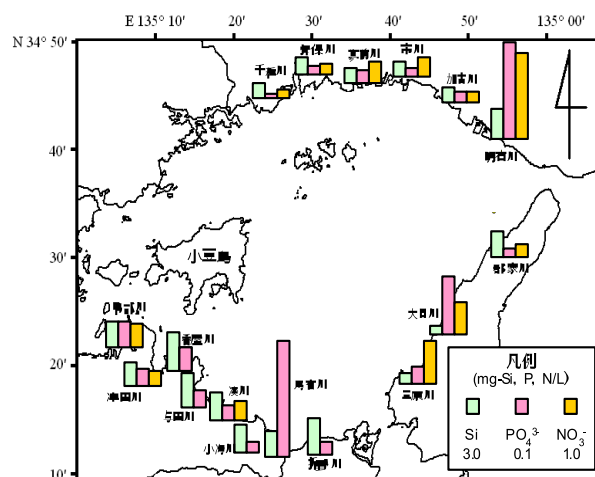


図 2 播磨灘周辺流域における河川水質空間分布（ケイ素・リン酸イオン・硝酸イオン）

ii) 栄養塩のモル比の比較

各地域ごとの河川水の栄養塩のモル比の比較結果を図 3 に示す．レッドフィールド比（C: N: P: Si = 106: 16: 1: (15)）より，N/P をみると，いずれの地域においてもリンに対して窒素が多い結果が得られた．また，Si/N と Si/P をみると，窒素とリンに対してケイ素が多い結果が得られた．つまり，兵庫県側・香川県側ともに播磨灘の一次生産に対して，リンが制限因子であり，ケイ素は十分供給されていることがわかった．

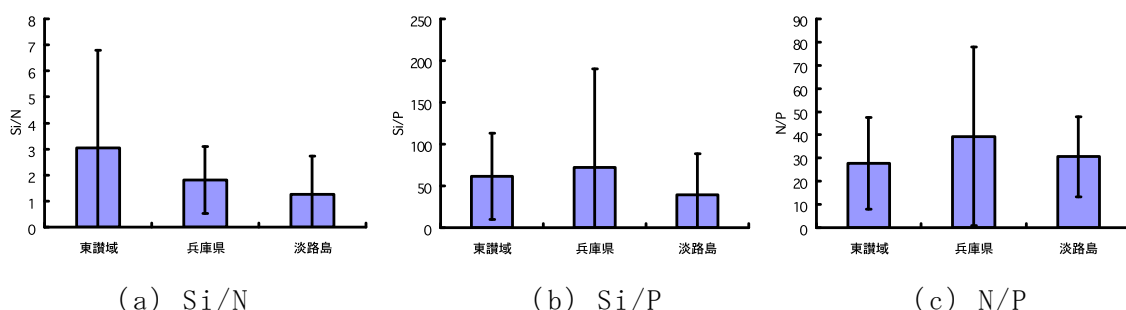


図 3 河川水の栄養塩のモル比の各地域の比較（平水時）

iii) 増水時の河川水質

2009 年 8 月 10 日の増水時における東讃域の河川水質と平水時の水質と比較した結果を図 4 に示す．増水時のデータは，計 6 河川における平均値を示す．電気伝導度（EC）とケイ素，リン酸イオン，硝酸イオンなどの溶存成分は増水時に濃度が低下する結果が得

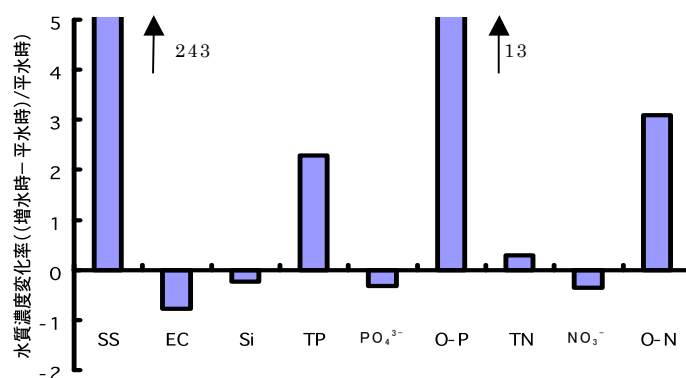


図 4 平水時に対する出水時の水質濃度の変化率（東讃域）

られた．これは，流量増加にともなう希釈による影響であると考えられる．また，このときの濃度の減少率は，順に 0.2 倍，0.8 倍，0.7 倍，0.6 倍であった．一方，SS や全リンや全窒素などの懸濁成分は濃度が高くなる結果が得られた．濃度の増加率は，順に 244 倍，3.3 倍，1.3 倍であり，とくに，SS の急激な増加がみられた．また，有機態リン，有機態窒素もそれぞれ，14 倍，4.1 倍増加しており，全窒素と全リンの増加には，有機態成分の増加が寄与していることがわかった．

(3) 播磨灘水質への影響

兵庫県水産技術センターと香川県水産試験場が実施している浅海定線調査結果を用いて，播磨灘海域の水質濃度（ケイ素，リン酸イオン，硝酸イオン）の空間分布について整理した．ここでは，出水直後の水質変化に着目し，調査日の前日（8 月 31 日）に多量の降雨（47.5 mm（高松アメダス観測所））があった 2004 年 9 月 1・2 日の観測結果を図 5 に示す．なお，棒グラフの大き

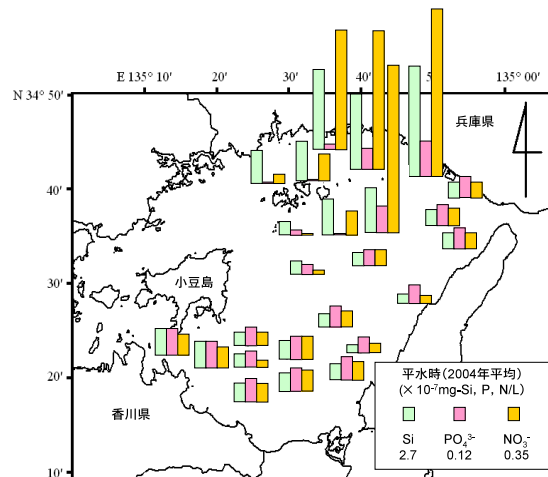


図 5 播磨灘における水質濃度の空間分布図
（ケイ素・リン酸イオン・硝酸イオン；
2004 年の平均値に対する 2004 年 9 月の比率）

さは 2004 年の平均値に対する比率で示している．兵庫県側（播磨側）と東讃域側のいずれの海域においても，陸近くにおいて濃度が高くなっている結果が得られた．図の右下に示した年平均値（ケイ素： $2.7 \times 10^{-7} \text{mg-Si/l}$ ，リン酸イオン： $0.12 \times 10^{-7} \text{mg-P/l}$ ，硝酸イオン： $0.35 \times 10^{-7} \text{mg-N/l}$ ）と比較すると，兵庫県側（播磨側）ではケイ素濃度は約 6.5 倍，リン酸イオンは約 2.5 倍，硝酸イオンは約 11 倍に増加していた．一方，香川県側ではケイ素は約 2.1 倍，リン酸イオンは約 2.0 倍，硝酸イオンは約 1.5 倍に増加しており，河川出水の影響が大きく表れている．とくに，兵庫県側のケイ素と硝酸イオンの変動が大きい．このことから，河川近くの海域水質は洪水流出による短期的な河川流入の影響を強く受けており，この影響は河川流量の多い兵庫県側がより大きい結果が示された．

4. 結論

本研究では，兵庫県播磨灘側と香川県東讃域の二級河川について分布型水文流出モデルを用いて，河川流量を推定した．また，河川水質調査や播磨灘の水質データの解析を行った．その結果，1) 兵庫県側の河川流量は東讃域に対して約 13 倍の淡水供給量があること，2) 河川出水直後の一時的な淡水流入が海域の栄養塩分布に大きく影響を与えていることが明らかとなった．