

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25年度実施）成果発表会

平成26年7月2日（水） 13：00～17：00

ラッセホール リリー

ご あ い さ つ

大阪湾広域臨海環境整備センター（大阪湾フェニックスセンター）は、大阪湾圏域の広域処理対象区域から発生する廃棄物を適正に処理し、圏域の生活環境の保全を図るとともに、港湾の秩序ある整備により港湾機能の再編・拡充を図り、地域の秩序ある発展に寄与することを目的として昭和５７年に設立されました。以来、大阪湾フェニックスセンターでは、尼崎沖、泉大津沖、神戸沖及び大阪沖の４最終処分場を整備し、近畿２府４県１６８市町村、約２０００万人の圏域から発生する廃棄物の最終処分を行い、平成２３年度には、管理型民間産業廃棄物の受入量を２１年度比３割減とする受入抑制を実施したうえで、一般廃棄物の受入枠の一部を産業廃棄物の受入枠に振り替えることにより埋立期間を平成３３年度から３９年度まで延伸すべく基本計画の変更を行いました。

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

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

本日は、平成２５年度に採択された研究課題について、その成果を披露いただく機会として成果発表会を企画いたしました。ご講評をお願いしております多田邦尚先生、ご発表いただく研究者の方々にはご多忙な中、貴重なお時間をいただき厚くお礼申し上げます。また、特定非営利活動法人瀬戸内海研究会議には助成事業の公募や本発表会の運営を委託しており、その労に感謝いたします。

平成２６年７月２日

大阪湾広域臨海環境整備センター
理事長 吉本 知之

目 次

1. 大阪湾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3)	広島大学大学院総合科学研究科	小野寺 真一	1
2. 大阪湾における海況長期変動の数値的研究～10年規模変動の検証と将来予測～ 九州大学応用力学研究所東アジア海洋大気環境研究センター 磯辺 篤彦 (前 愛媛大学沿岸環境科学研究センター)			5
3. 東部瀬戸内海における植物プランクトン群集の基礎生産力とその1960年代からの変化 京都大学学際融合教育研究推進センター 安佛 かおり			8
4. 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(その2) 京都大学フィールド科学教育研究センター 小林 志保			12
5. 大阪湾流入の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 (公財)地球環境戦略研究機関(IGES)関西研究センター 吉田 光方子 (前(公財)ひょうご環境創造協会兵庫県環境研究センター)			16
6. 陸起源有機物の影響を考慮した大阪湾底質の類型化と底生動物分布との関係に関する研究 (地独)大阪府立環境農林水産総合研究所 佐野 雅基			20
7. 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(その2) (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			24
8. 港湾域におけるリン溶出抑制技術の開発 奈良教育大学教育学部 藤井 智康			28
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(その2) 大阪大学大学院工学研究科 中谷 祐介			32

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３）

小野寺真一・広島大学大学院総合科学研究科・教授

齋藤光代・岡山大学大学院環境生命科学研究科・特任助教

清水裕太・近中四農研センター・学振研究員（PD）

〔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。前年度までに、大和川周辺の地下水情報収集、感潮域での河川水－地下水交流とそれにともなう栄養塩動態観測、準分布型流域流出モデル解析は終了しており（昨年度報告書；Onodera et al.,2013; Shimizu et al.,2013）、今年度は（１）溶存及び懸濁物質の安定同位体比を用いた感潮域での生物地球化学過程の検証を行い、（２）これまでの観測データ及び準分布型流域流出モデルと水域水理生態系モデルの連結モデル解析により、河川感潮域の栄養塩収支及び海洋への負荷に対する感潮域の役割を明らかにすることを目的とした。

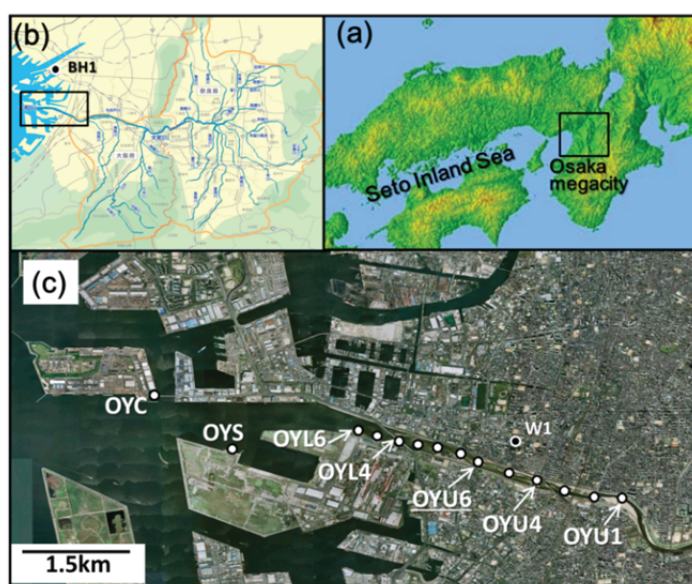


図１ 研究地域概要

（１）現地観測では、大和川感潮域（図１）において昨年（2012年９月、11月）に引き続き集中観測（2013年１月、8月）を実施した。集中観測の際には、河川水の採水及び流速の測定（ADCPによる）を行うとともに、ピエゾメータでは確認できない深度の淡水・塩水分布状況を把握するため、比抵抗電気探査を試みた。採水試料（濾過後の懸濁物質を含む）は、通常の実験ととともに炭素・窒素同位体比分析を行った。

（２）河川感潮域の栄養塩収支及び海洋への負荷に対する感潮域の役割を明らかにするため、西オーストラリア大学(The University of Western Australia)の Centre for Water Research が開発した鉛直次元水理生態系モデル（DYRESM-CAEDYM, ver.4.0）に、昨年度までに得られた上流域からの流入負荷量をインプットとして導入し、感潮河川域の栄養塩動態・収支解析を行った。感潮域上流側の負荷量は、準分布型流域流出モデル(SWAT モデル)による洪水時の変動を含む解析結果で、上流域における流域外からの導水、下水処理排水の流入などのポイントソース、及び季節変化を含めた栄

養塩濃度に関する既存データに基づき再現され、検証されたものである。計算範囲は、大和川下流部の大和川大橋（OYU-4；図 1）から河口部の国土交通省堺水位・流量観測所（OYL-6；図 1）までとした。深度方向は、大きく分けて平水時に流れるボックスと出水時に流れるボックスの 2 層構造とした。解析のタイムステップは 1 日単位の計算とし、2013 年 1 月 1 日から 12 月 31 日までを計算した。DYRESM で扱う項目は温度、密度、塩分濃度の 3 つであり、CAEDYM では pH、DO、SS、植物プランクトン網と窒素・リン画分を扱った。植物プランクトン網は、金山ら（2004）を参考に、藍藻網及び珪藻網の 2 種類を想定した。モデルの再現性の検証は、2013 年 1 月と 8 月の集中観測で測定された NO_3^- 、 NH_4^+ 、DON、 PO_4^{2-} 、DOP、PP 濃度に対してそれぞれ実施された。

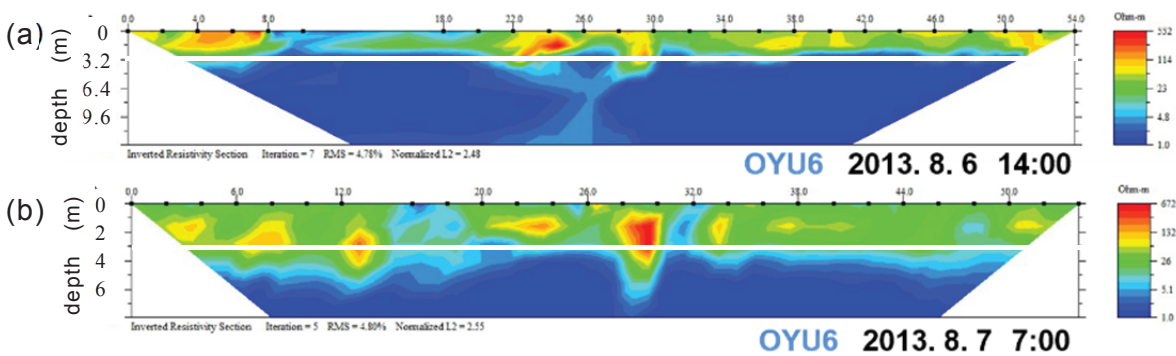


図 2 OYU6 における地下の比抵抗分布（a：満潮時，b：干潮時）
*白線は 3m の深度を示す

[結果と考察]

1. 感潮域における河川水－地下水交流及び栄養塩動態

集中観測時に測定された比抵抗の結果を図 2 に示す。深度 3m に注目すると、潮位変動にともなう表層の淡水領域（高抵抗値）の伸縮すなわち河川-地下水交流が深度 3m 程度の範囲で行われていることが確認でき、前年度までのピエゾメータ及びラドントレーサーによる観測傾向と調和的であった。

表 1 に OYU6 から OYL6 の感潮域における 2013 年 1

表 1 OYU6–OYL6 間の栄養塩収支(2013 年 1 月及び 8 月)

2013年1月(冬季)	DIN	DON	DTN	PON	TN	DIP	DOP	DTP	PP	TP
△Nutrients (kg/d)	978	-1719	-741	-92	-833	97	-38	59	-67	-8
△Nutrients /OYU-6 flux (%)	12	-98	-8	-34	-8	18	-72	10	-54	-1
2013年8月(夏季)	DIN	DON	DTN	PON	TN	DIP	DOP	DTP	PP	TP
△Nutrients (kg/d)	-1727	672	-1055	56	-999	111	56	167	70	237
△Nutrients /OYU-6 flux (%)	-30	406	-18	16	-16	17	200	25	66	30

月及び 8 月の栄養塩収支を示す。両期間ともに TN はマイナス（消失）、TP は夏期のみプラス（生産）であった。また、夏季には DIN が消失、DON が生産の傾向を示し、感潮域での脱窒とその際の有機物分解にともなう DON の生産が示唆された。また、河川流速と NO_3^- -N 濃度との関係（図 3）からも、感潮域での脱窒等の消失の傾向が確認された。対照的に、冬季には DIN が生産傾向を示し、脱窒よりも硝化の影響が顕著であったことが示唆された。一方、DIP は両期間ともに生産傾向で、特に夏季は懸濁態リンも生産傾向であった。これらは、いずれも河川－地下水交流が駆動している現

象と考えられる。また、図 4 に 1 月 (a) 及び 8 月 (b) における NO_3^- -N の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{18}\text{O}$ との関係を示す。双方ともに、全体的に 1 月は 8 月と比べて低い傾向を示した。これは、冬季に硝化が顕著であったという栄養塩収支 (表 1) を支持する結果と考えられるが、このプロセスについては、より詳細な検証が必要である。

図 5 に、OYU6 における 8 月のリン濃度の経時変化を示す。8 月 5 日の夕方以降に計 30~40mm の降雨があり、懸濁態 (PP) の濃度が急激に上昇し、溶存態の濃度は低下している。また、降雨後に C/N 比の上昇がみられたことから、陸上植物由来 (地表に堆積していたリター等) の有機物の流入量が増加したことが示唆された。

2. モデル計算による栄養塩動態評価

モデルによる計算結果は、窒素及びリンともに実測値を概ね良く再現していた。図 6 に、モデルで推定した窒素 (a) 及びリン (b) 濃度の季節変化を示す。 NO_3^- は全体的に冬季に高く、春季に植物プランクトンの増殖により濃度が低下し、秋季に向かって再度高くなる傾向であった。 NH_4^+ 及び DON はいずれも NO_3^- と比べて濃度が低かった。どちらも年間を通じた傾向はみられなかったが、DON は大規模な出水時にピークを示した。また、 PO_4 も NO_3^- と同様に春季に植物プランクトンの増殖により濃度が低下し、その後増加する傾向を示した。

PP は河川流量と鋭敏に応答しているが、ある流量以上でないと流出しない傾向を示した。

現地観測では夏季に感潮域でリンの供給傾向が確認されたのに対し、モデル解析では再現できなかった。これは、本モデルが底質堆積物からの拡散溶脱は考慮しているものの、感潮域において重要な

河川水-地下水交流の影響を含んでいないためであると考えられる。また、現在の堆積物より蓄積栄養塩を倍增及び半減させた仮想条件での解析結果は、明らかな水体の

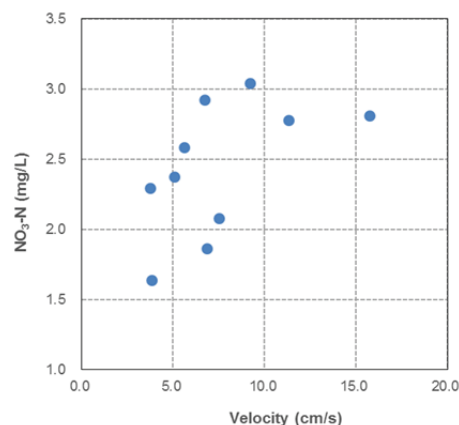


図 3 河川流速と NO_3^- -N 濃度との関係

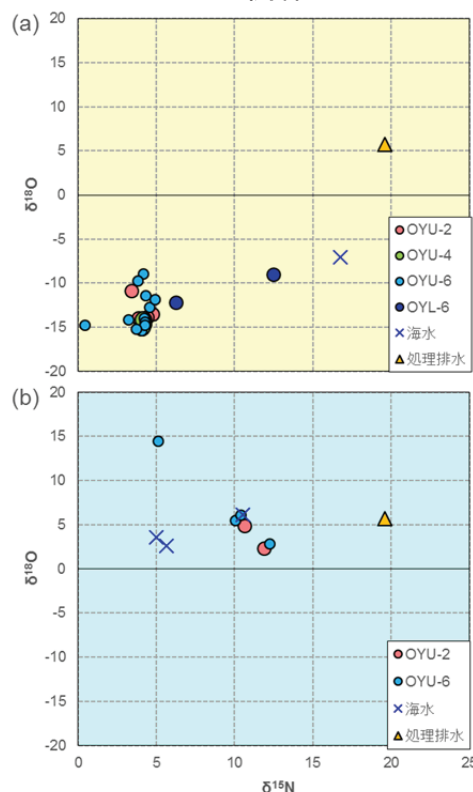


図 4 NO_3^- -N の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{18}\text{O}$ との関係 (a: 1 月、b: 8 月)

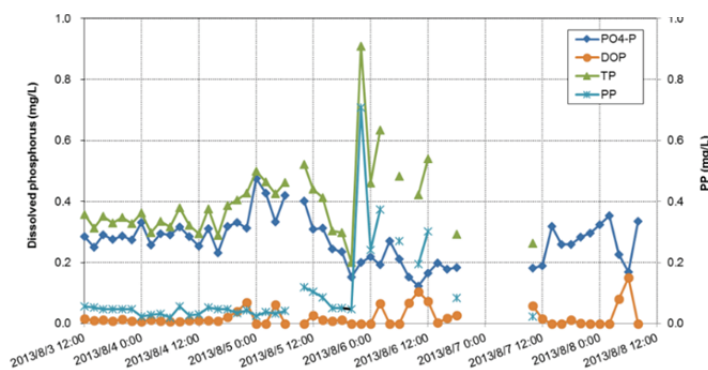


図 5 OYU6 におけるリン濃度の経時変化

栄養塩濃度の変化が確認でき、特に栄養塩含有量の減少により、夏季における河川水中のDIP及びDN濃度が低下することが確認できた。今後さらに河川水質の改善が進んでも底質の改善が進まなければ海洋への負荷量改善には直結しないことが示唆された。

[まとめと今後の課題]

最終年度である今年度は、(1) 溶存及び懸濁物の安定同位体を用いた大和川感潮域での生物地球化学過程の検証を行うとともに、(2) これまでの観測データ及び準分布型流域流出モデルと水域水理生態系モデルの連結モデルによる解析を実施した。その結果は以下のとおりである。

(1) 地下の比抵抗電気探査の結果から、ピエゾメーター法及びラドン (^{222}Rn) トレーサー法による観測結果と調和的な傾向、すなわち河川-地下水交流及び地下での塩淡水境界の変動が確認できた。河川水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は、感潮域で一旦上昇しその後低下する傾向が、それぞれ河川-地下水交流による栄養塩の供給及び脱窒/沈澱による消失が示唆された。これらの傾向は同位体比からも支持された。

(2) 生態系モデルを用いた解析結果は、河川水の栄養塩（窒素、リン）濃度の変動を概ね良く再現した。また、収支計算から、上流域から流下してきた窒素・リンの一部は感潮域内に沈殿し蓄積されることがわかった。一方で、観測結果で確認された夏季におけるリンの感潮域での供給傾向は、モデル解析では再現できなかった。この結果から、感潮域における河川-地下水交流という移流現象を考慮することの重要性が示された。また、底質堆積物の栄養塩含有量を変化させた仮想解析では、栄養塩含有量の減少により、夏季における河川水中のDIP及びDN濃度が低下することが確認できた。このことは、底質改善の重要性を示すものであり、今後河口よりも沖合にかけての堆積物の改善が重要であることが示された。

[引用文献]

- Onodera, S., Saito, M., Yoshikawa, M., Onishi, K., Shimizu, Y. & Ito, H. (2013) Nutrient dynamics with interaction of groundwater and seawater in a beach slope of steep island, western Japan. IAHS Publication, 361, 204-211.
- Shimizu, Y., Onodera, S. & Saito, M. (2013) Nutrient exchange between surface water and subsurface water in ponded shallow reservoir of a suburban river catchment. IAHS Publication, 362, 172-178.

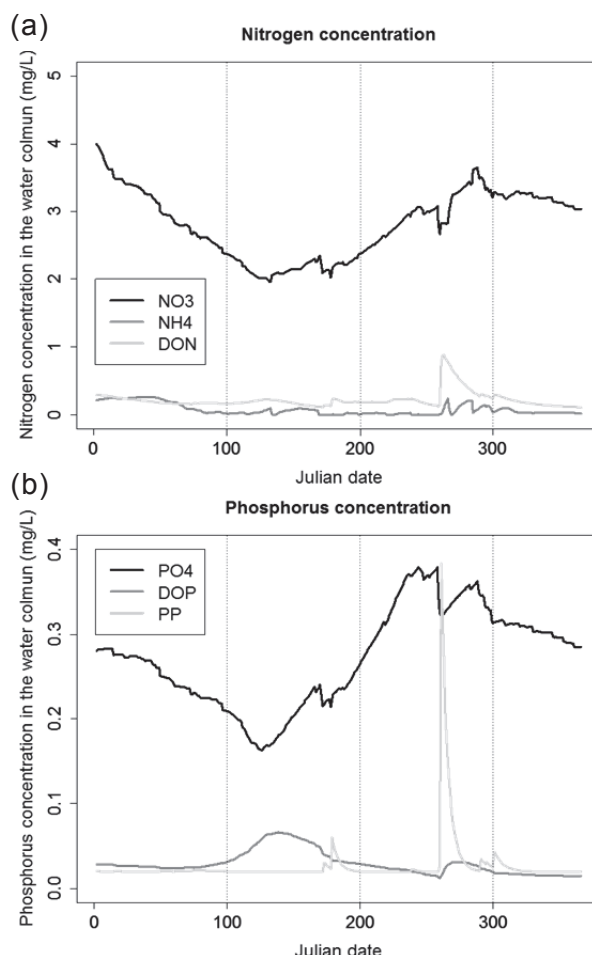


図6 モデル計算による窒素濃度(a)及びリン濃度(b)の時系列変化

大阪湾における海況長期変動の数値的研究 ～10 年規模変動の検証と将来予測～

磯 辺 篤 彦

九州大学 応用力学研究所 教授

〔研究目的〕

全球の長期気候変動から、局所的な変動を推し量ることは難しい。海洋においても、外洋の水温変動が、そのまま沿岸水温に反映されるとは限らない。瀬戸内海を例にとりて考えよう。北太平洋における水温変動の瀬戸内海への波及は、黒潮前線を横断する海水輸送(＝たとえば前線波動(急潮や底入潮))の消長に、大きく左右されるだろう。そして、前線波動の消長と、全球・海盆規模の気候変動との関連は未だ明らかではない。まず本研究では、既存データセットを利用して、過去数十年における瀬戸内海の水温・塩分変動を抽出し、北太平洋における海況変動との関連について調べた。本報告では、特に大阪湾の海況に注目する。

また、外洋変動に対する応答を精査できる高解像度の数値モデルの開発を進めた。海洋観測技術に見られる近年の飛躍的な進歩(特に衛星観測やアルゴフロート)により、外洋域では、観測データを同化した高精度の数値モデルを用いて海況を再現する海洋再解析データが提供されるようになった。一方で、海運や漁業に利用の多い瀬戸内海のような浅海域においては、総じて海洋観測が難しく、沿岸海洋に特有の物理過程を十分に捉えることができない。ここでは、外洋の同化プロダクトを境界条件にした入れ子モデルの利用が望ましい。そこで本研究では、外洋側の境界条件に高解像度($1/12^\circ \times 1/12^\circ$)の海洋再解析データ(JCOPE2, Miyazawa et al., 2009)を与えた瀬戸内海における海洋循環モデリングを行なった。

〔研究方法〕

瀬戸内海全域における水温と塩分データは、MIRC Ocean Dataset 2005(<http://www.mirc.jha.or.jp/products/MODS2005/>)にアーカイブされている 1963～1993 年のものを用いた。また、同期間における北西太平洋/日本南岸における水温データを、JODC の J-DOSS(<http://www.jodc.go.jp>)を通して取得した。さらに、北太平洋の海況変動を瀬戸内海のそれと比較するべく、風応力データには、船舶大型化による疑似トレンドが補正されている WASwind(Tokinaga & Xie, 2011)を、さらに水塊配置を反映する海面高度データには、沿岸潮位データを利用して過去 60 年間の全球海面高度分布を推算した Reconstructing Sea Level (Hamlington et al, 2011)を用いた。

数値モデリングに当たって使用した海洋循環モデルは、Finite Volume Coastal Ocean Model (FVCOM, Chen et al., 2003)である。FVCOM は、水平方向に大きさ・形ともに不均一な三角形格子で構成されるので、複雑な海岸地形をもつ瀬戸内海に適している。格子サイズは開境界部ではほぼ JCOPE2 と同じ 10 km とし、瀬戸内海内部に向かって徐々に細かくし、狭隘な島嶼間では 500 m まで細分化した。鉛直方向は 20 σ 層を設定した。モデルの初期条件および境界条件には JCOPE2 再解析データを使用し、海面風応力には GPV データを用いた。また、海洋潮汐モデル NAO.99Jb (Matsumoto et al., 2000)で計算された潮汐のうち、四大分潮(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)を開境界に与えることによって、瀬戸内海の潮汐を計算した。現在までの計算期間は、2012 年 2 月 1 日から 2012 年 9 月 30 日の 243 日間である。

[結果と考察]

水温や塩分における 31 年間の変化を、steric height のトレンドをみることで評価した。すなわち、海底から海面までの比容積分値の回帰直線の傾きである(図 1)。冬季(12-2 月)には目立ったトレンドをみることはできないが、夏季(6-8 月)には大阪湾を含む瀬戸内海全域で負のトレンドが顕著であって、すなわち夏季の大阪湾の海水は当該期間において重くなり、水位が低下していたことがわかる。過去 100 年間で北西太平洋における高温化(水位上昇; http://www.data.kishou.go.jp/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html)を考えれば、瀬戸内海の局所的な負のトレンドは興味深い。夏季表層と底層の水温と塩分のトレンド(図は未掲載)をみると、この海況変動は、海底の低温化・高塩化によることが示唆される。このことは、瀬戸内海の家況変化が、海面を通しての浮力フラックスの変動によるものではなく、外洋中層起源の海水流入によることを意味する。講演では、解析期間中における黒潮流量の増加と、これに伴う黒潮内側域の低温・高塩化(黒潮前線の鮮鋭化)が、瀬戸内海の家況変動の原因になったこと、黒潮流量の増加は風成循環の結果ではなく、北太平洋における水塊配置の揺らぎによることを示す。

沿岸海洋の平均流や長期変動を議論する場合、モデリングの結果を潮汐シグナルが卓越する生の水位データや、季節変動が卓越する生の水温データで比較することは誤りである。ここでは、モデル結果と実際の海との整合性を確かめるため、潮位だけではなく、海面流速についても検証を行なった。験潮所の観測から得られた潮汐調和定数(海上保安庁, 1992)を用いて潮汐の再現性を検証したところ、全ての分潮において 0.8~0.9 程度の高い相関が得られた。また、瀬戸内海の水温構造が詳細に表現されており、さらに、黒潮前線波動による沿岸域での水温上昇をよく捉えている。

海面流速(図 2 に計算領域と、例としてスナップショット)の検証については、沿岸域に適合するように開発した小型 ARGOS 衛星追尾型漂流ブイの観測データを使用した。我々は、モデルの流速データ検証のため、2012 年 7 月から 2014 年 1 月現在まで、現有 21 基(うち 6 基は既に紛失)のブイを順次投入して海面流速データの収集を続けている。例えば、2012 年 7 月 27 日に四国西岸沖から放流したブイは、8 月 19 日に西に位置する野島に漂着した。ブイ放流後の初期には四国と興居島の間を南北に往復していた。一方のモデル流速も四国・興居島間での南北に振動する流向を示し、その後全体的に西へ向かう流速を示唆した。ただ、流速の大きさに関しては、期間中の平均流速が、観測では 23.1 cm/s であったのに対し、モデル流速は 16.8 cm/s とやや過小評価という結果になった。

[結論]

講演では、北太平洋の水塊配置の揺らぎは、特に東西方向の縞状平均流構造の揺らぎに起因することを述べる。このような揺らぎは、地衡流乱流の Rhines 効果によるものであって、カオス的な振る舞いをすると考えられる。すなわち、大阪湾を含む瀬戸内海全域に流入する黒潮系水の消長は、10 年規模変動においてはカオス的な振る舞いをするものであり、予測することは困難との結論に至った。そして、この 10 年規模変動は、気候変動に起因する水位上昇や水温上昇に匹敵するシグナルである。今後求められることは、本研究で開発を進めたような数値モデリングをさらに高度化し、外洋循環に対する大阪湾の応答を精度よく監視する技術の開発である。

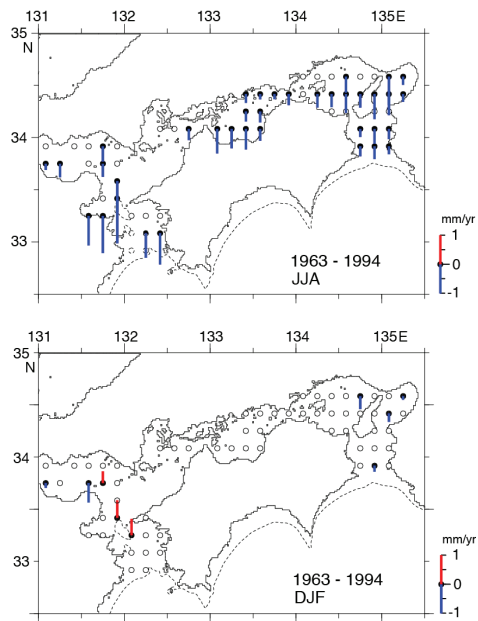


図1 30年間の steric height のトレンド(上: 夏季, 下: 冬季). 有意なトレンドを示す位置に黒丸を置き, 正(負)のトレンドの大きさを, 黒丸より上(下)向きに延ばしたバーの長さで表現した.

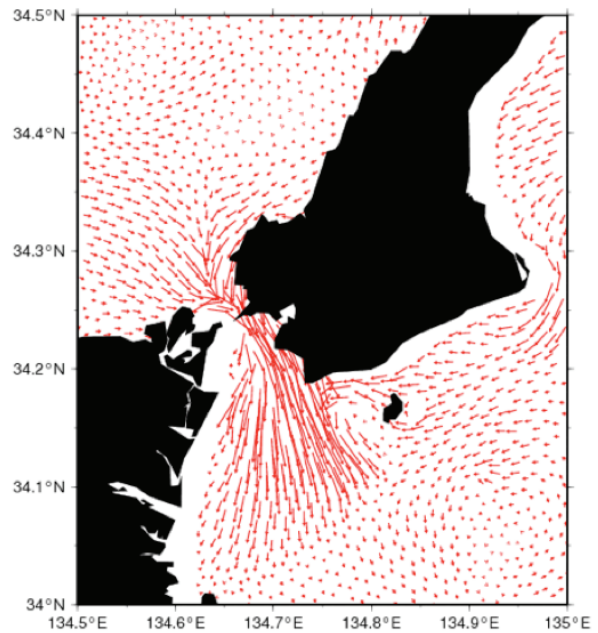
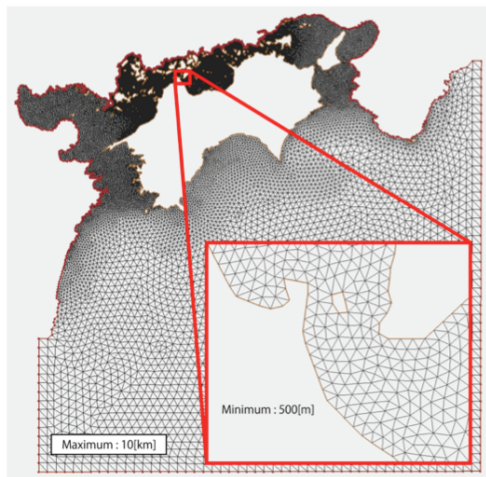


図2 FVCOM の計算範囲(左)と大阪湾周辺の海面流速のスナップショット

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

代表者： 安佛かおり（京都大学学際融合教育研究推進センター・研究員）

共同研究者： 一見和彦（香川大学瀬戸内圏研究センター・准教授），山口一岩（香川大学農学部・准教授），大美博昭（地独 大阪府立環境農林水産総合研究所・主任研究員），宮原一隆（兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター・主席研究員），山本昌幸（香川県水産試験場・主任研究員），笠井亮秀（京都大学フィールド科学教育研究センター・准教授）

〔研究目的〕

瀬戸内海は，かつて富栄養の海として捉えられていた．しかし近年では，栄養塩負荷削減に伴ってその状態が解消しつつあり，ノリ養殖に対する栄養塩不足や多くの魚介類の漁獲量減少など新たな問題が生じている．一方大阪湾東部では近年でも貧酸素水塊が発生することがあり，水域ごとに様々な様相を呈している．これらの諸問題は高度成長期以降現在まで生態系構造が変化してきていることを示唆している．

本研究で課題としている植物プランクトンによる基礎生産は，海域の食物連鎖の基盤になる過程であり，系全体の生産性に大きく寄与している．瀬戸内海においては，1960～90年代に広域で基礎生産速度が測定されている（遠藤，1970；Uye et al., 1986；Tada et al., 1998）が，近年のデータは限られており，基礎生産量がどのように変化したかは不明である．そこで本研究では，東部瀬戸内海において基礎生産速度を測定することにより生態系構造の変化を調べることを目的とした．また，東部瀬戸内海の各水域における基礎生産と物理・化学・生物的性状の関係性を比較することにより基礎生産性を決定づける要因についても考察を行った．

〔研究方法〕

大阪湾（M2，M3），播磨灘（H2，H10），備讃瀬戸（M5，M7），燧灘（M9）において，Tada et al. (1998) の基礎生産速度の測定点近傍に調査定点を7点設定した（図1）．各定点では，透明度の2.8倍を海面への入射光が1%となる深度（補償深度）と仮定し，入射光の100・48・33・14・8.3%となる各深度から採水を行った．試水は300 μ m メッシュのネットで濾して動物プランクトンを除去した．ただし，直径300 μ m 以上となる大型珪藻種が観察されたときはネットを介さずに直接容器に採取した．試水をいれた容器は，表面水を掛け流したタンク内に浮かべ，直射日光を受けないようにして実験室に持ち帰った．実験室で持ち帰った試水を1Lのポリカー

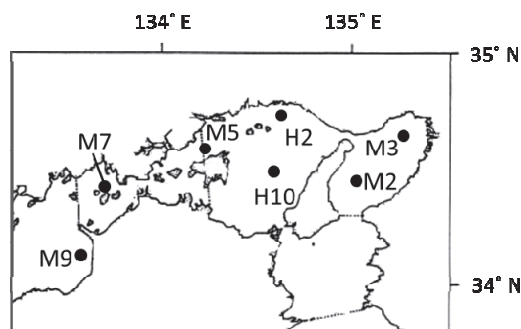


図1. 調査地点

ボネイト容器 2 本に分取し、 ^{13}C で標識した重炭酸ナトリウムを全炭酸量の 10% になるように添加した後、培養器内で約 2 時間培養した。培養温度は現場表層水温に合わせ、光強度は、最大光度を 460 から $480\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{ sec}^{-1}$ とし、遮光フィルターにより各採水深度での減衰率に合わせた。培養時間経過後、ガラス繊維ろ紙 (GF/F) を用いて懸濁物を捕集し、培養前後の濾物に含まれる ^{13}C 量と現場水の全炭酸量から基礎生産量を求めた (Hama et al., 1983)。

採水時には、CTD・クロロフィル蛍光センサー・光量子計・透明度板での観測も行った。また、各層から採取した試水は、クロロフィル *a* 濃度・栄養塩類 (硝酸態・亜硝酸態・アンモニア態窒素、リン酸態リン、ケイ酸態ケイ素)・植物プランクトンの種組成の分析にも供した。

基礎生産量は季節ごとに変化することが予想されるため、上記の測定は各季節で行った。

[結果と考察]

本要旨では 2013 年の 9 月と 11 月の調査の結果について述べる。

1. 物理化学的性状

各定点の塩分は、全層平均値で、9 月に 31.1 から 32.7, 11 月に 30.3 から 31.7 の範囲で変動した。塩分の鉛直変動は大阪湾奥部 (M3) や備讃瀬戸の M5 の 11 月で比較的大きかった。鉛直変動が大きいときは塩分の最小値が低く、表層への淡水の混入が推測された。

各定点の透明度は、9 月に 4.0 から 11.2 m, 11 月に 3.9 から 10.6 m の間で変動した。いずれの月も大阪湾の湾奥で最も低く播磨灘で高かった。

各定点の表面水と有光層における栄養塩 (無機態窒素・リン) 濃度と N/P 比を図 2 に示した。有光層の値は、採水深度 (光強度 8.3% 水深) までの加重平均として示した。各月の窒素・リン濃度はよく似た分布を示し、最西部の燧灘 (M9) や備讃瀬戸 (M5, M7) で低く、より東部の播磨灘 (H2, H10) にかけて増加し、大阪湾 (M2, M3) で最も高かった。9 月と 11 月を比べると前者でより低い濃度がみられた。N/P 比はほとんどの定点で 16 以下となり、全体的に窒素制限下にあることが示された。

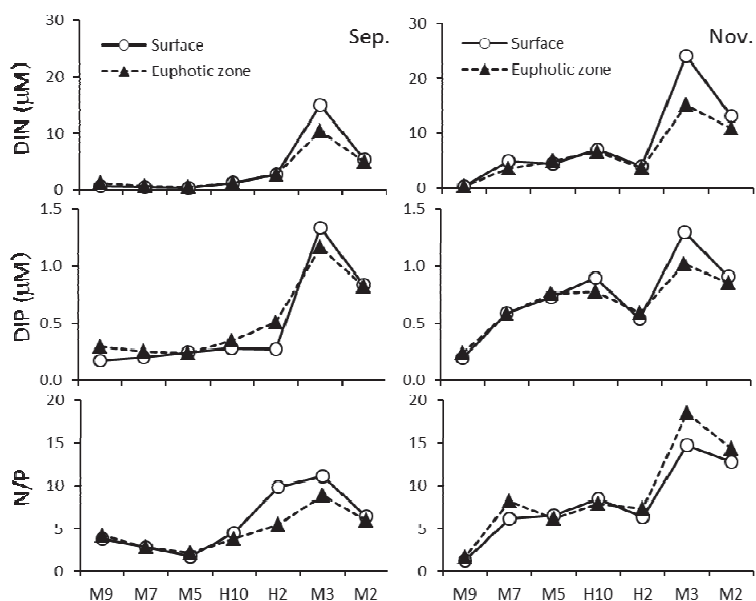


図 2. 各定点の表面水 (surface) と光強度 8.3% 深度までの有光層 (Euphotic zone) における溶存無機窒素 (DIN) と溶存無機リン (DIP) の濃度および両者の比 (N/P)。有光層の平均値は各採水層の値と各層の厚みから加重平均して求めた。

2. 植物プランクトンの現存量

各定点の表面水の植物プランクトン現存量を比べると、9月、備讃瀬戸の M7 で大きく、大阪湾の中央部 (M2)・燧灘 (M9) で小さく、その他の定点では同程度であった (図 3A)。11月、播磨灘の H2 と備讃瀬戸 (M5, M7) で大きく、その他の定点では小さかった (図 3A)。

採水深度 (光強度 8.3% 深) までの水柱における植物プランクトン現存量を、各層から採水した試料のクロロフィル *a* 濃度を用いて台形積分して算出したところ、9月と11月ともに、大阪湾 (M2, M3) と燧灘 (M9) で小さく、播磨灘 (H2, H10) と備讃瀬戸 (M5, M7) で大きかった (図 3B)。定点間の差異は9月に顕著で、播磨灘の M7 では特に大きな値がみられた (図 3B)。

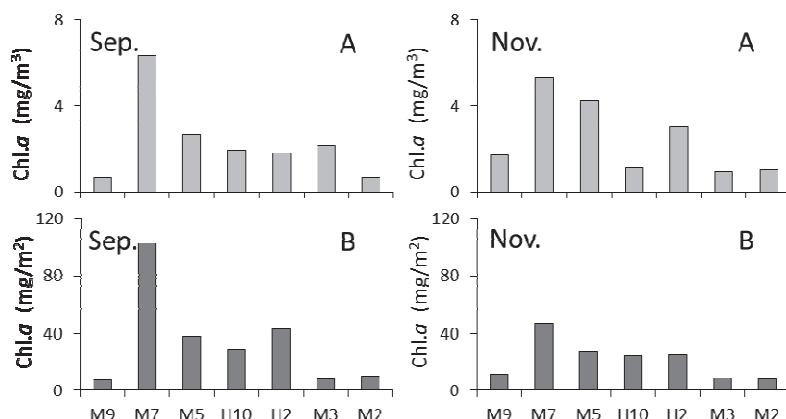


図 3. 各定点の表面水 (A) および光強度 8.3% 深度までの水柱における植物プランクトン現存量 (B)。水柱あたりの植物プランクトン現存量は各採水深度の現存量から台形積分して算出した。

3. 基礎生産量

今回の調査における各定点・各深度における光合成速度は 0.10 から 28.9 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{h}^{-1}$ (平均 6.15 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{h}^{-1}$) で変動し、光合成活性は 0.07 から 17.8 $\mu\text{gC } \mu\text{gChl.}^{-1} \text{h}^{-1}$ (平均 3.39 $\mu\text{gC } \mu\text{gChl.}^{-1} \text{h}^{-1}$) で変動した。Tada et al. (1998) は、それぞれ、0.41 から 32.1 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{h}^{-1}$ (平均 4.67 $\mu\text{gC L}^{-1} \text{h}^{-1}$)、0.03 から 9.75 $\mu\text{gC } \mu\text{gChl.}^{-1} \text{h}^{-1}$ (平均 2.32 $\mu\text{gC } \mu\text{gChl.}^{-1} \text{h}^{-1}$) という値を報告している。

各定点の表面水の光合成速度を図 4 に示した。9月、大阪湾奥部 (M3) で最大値を示し、播磨灘 (H2, H10) や備讃瀬戸 (M5, M7) で高く、大阪湾中央部 (M2) と燧灘 (M9) で低かった (図 4)。11月、播磨灘中央部 (H10) と燧灘で低い値を示し、その他の定点はよく似た値を示した (図 4)。表面水の光合成活性は、9月と11月ともに、大阪湾の湾奥 (M3) で最も高く、全体的に調査区間内の西側に位置する定点ほど低くなる傾向がみられた (図 4)。この分布は栄養塩濃度の分布 (図 2) と類似して

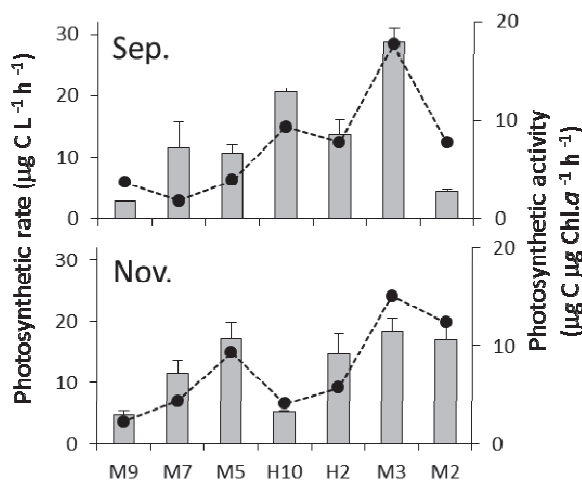


図 4. 各定点の表面水における光合成速度 (棒グラフ) と光合成活性 (折れ線グラフ)。エラーバーは標準偏差を示す。

おり、植物プランクトンの活性と栄養塩濃度との関係性が示唆された。

各定点の各層から得られた光合成速度を光強度 8.3% 深度まで台形積算し、日長を 12 時間として水柱あたりの基礎生産を求めた (図 5)。各定点の基礎生産は、217 から 1638 $\text{mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$ (平均 728 $\text{mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$) で変動した。この変動範囲は Tada et al. (1998) の示した 118 から 1550 $\text{mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$ とほぼ同じであった。基礎生産を定点間で比較すると、9 月は播磨灘中央部 (H10) でとくに値が高く、燧灘で低い値となった (図 5)。11 月は 9 月と比べると定点間の差が小さかった。これらの結果は大阪湾での高い値を指摘した 1980 年代

(Uye et al., 1986) や 1990 年代 (Tada et al., 1998) の報告とは異なっていた。また、9 月の結果は大阪湾奥部 (M3) で高かった表面水の光合成速度 (図 4) と異なるものであった。このときの M3 では、有光層全体での植物プランクトン現存量が小さいにも関わらず (図 3)、透明度は最も低かった (4.0 m)。このことは、淀川由来の泥分などの微細粒子による透明度の低下を示唆している。この植物プランクトンに起因しない光の減衰が、結果的に水柱全体での基礎生産を制限したと推測される。

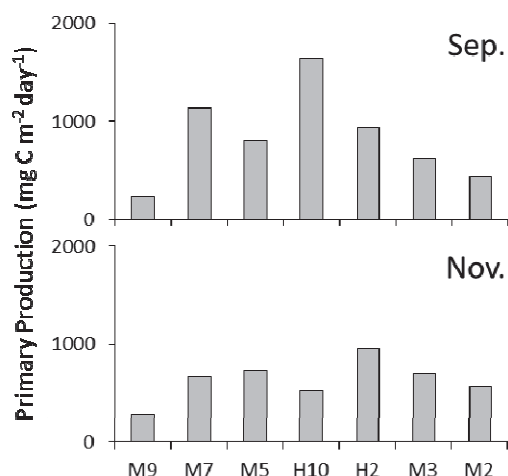


図 5. 各定点の光強度 8.3% 深度までの水柱における基礎生産量。

[結論]

今回測定された基礎生産量はこれまでの報告と大きく異なるものではなかったが、各定点の値を比べると大阪湾や播磨灘で基礎生産が高かった先行研究の結果とは異なる傾向が得られた。また、各定点における植物プランクトンの活性や基礎生産の差異には栄養塩や光などの環境因子が影響を与えていることが示唆された。今後、年間を通しての調査を行うとともに環境因子と基礎生産の関係を引き続き観測していくことにより、生態系の基盤である基礎生産とその変化についてより多くの知見が得られると考えられる。

[引用文献]

- 遠藤拓郎 (1970) : 瀬戸内海の一次生産に関する研究. 広島大学水畜産部紀要, 9, 177–140.
- Hama, T., T. Miyazaki, Y. Ogawa, T. Iwakuma, M. Takahashi, A. Otsuki and S. Ichimura (1983): Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using a stable ^{13}C isotope. Mar. Biol., 73, 31–36.
- Tada K., K. Monaka, M. Morishita and T. Hashimoto (1998): Standing Stocks and Production Rates of Phytoplankton and Abundance of Bacteria in the Seto Inland Sea, Japan. J. Oceanogr., 54, 285–295.
- Uye, S., H. Kuwata and T. Endo (1987): Standing stocks and production rates of phytoplankton and planktonic copepods in the Inland Sea of Japan. J. Oceanogr. Soc. Japan, 42, 421–434.

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（その2）

小林志保

京都大学フィールド科学教育研究センター 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,PON）は、酸素を消費して分解され、無機態炭素（DIC）と無機態窒素（DIN）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と窒素同位体比には特徴的な値があり、炭素・窒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」とともに、「有機物分解生成物（DIC,DIN）」の窒素・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

大阪湾東部および沿岸の港湾域等の、貧酸素化が問題となっている海域において調査を行う。淀川・大和川の影響を強く受ける湾奥の港湾域には、ほぼ年間を通じて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・DIN が高濃度に蓄積されている。貧酸素水塊中の DIC の同位体比を用いて酸素を消費して分解された有機物の起源を推定する方法を港湾域に適用するとともに、やや閉鎖度の低い貧酸素水塊における推定方法についても検討する。

調査は大阪湾の下記において行った。観測点図を図1に示した。

(1) 深掘り跡（堺2区北泊地）2013年6,7,8,9,11月および2014年2月

(2) 淀川淡水領域から大阪湾中央部に至る断面 2013年7月

各観測点において 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 0.1 m 間隔で測定した。(1)においては水深 5 m 間隔、(2)においては水深 2 m 間隔で採水を行なった。

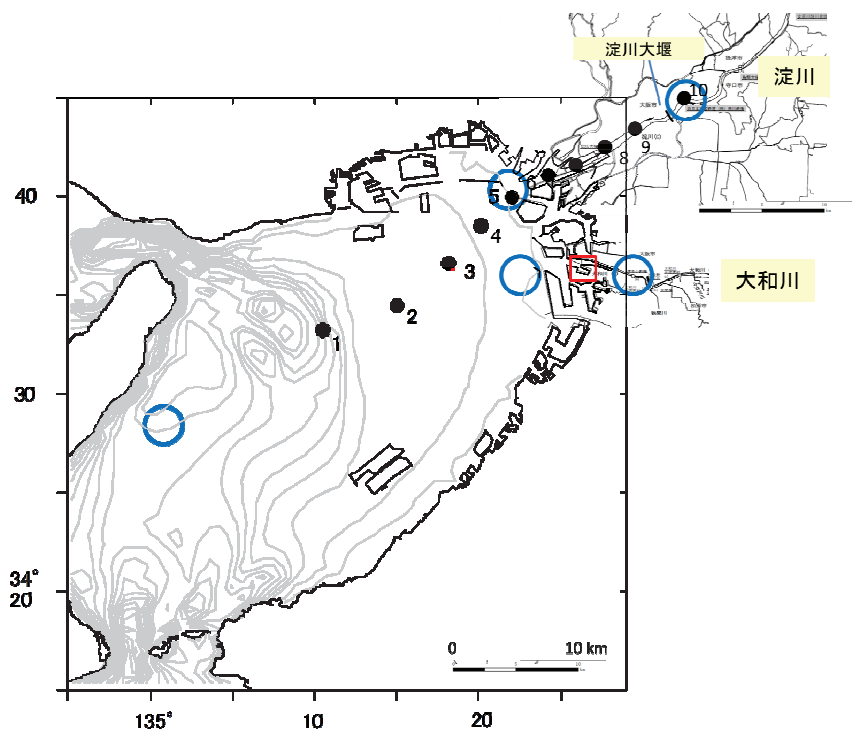


図1 大阪湾断面観測点（黒丸）および深掘り跡（堺2区北泊地・赤四角）および有機物分解実験のための採水地点（青丸）

(3) 2013 年 7 月および 8 月に採取した河川水（淀川・大和川）および海域（淀川河口・大和川河口・大阪湾西部）の水を用いて 100 日間の有機物分解実験を行なった。

採取した水は GF/F フィルターを用いて濾過し、DIC, POC, PON, NO_3^- の安定同位体比測定に供した。また濾液を用いて、溶存各態の炭素（DOC, DIC）・窒素（DON, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- ）・リン（DOP, DIP）の濃度を測定した。

3. 結果と考察

(1) 深堀り跡（堺 2 区北泊地）調査

堺 2 区北泊地中央（水深約 17 m）において 6 月から 2 月まで測定した塩分、DO、pH、DIC 濃度の鉛直分布を図 2(a)~(d)に示した。表層の塩分は河川水の影響を強く受けているが、水深 14 m 以深の塩分は年間を通じてほとんど変化していない。6 月から 11 月までの期間、無光層となる水深 8 m 以深は無酸素であり、水深 14 m 以深には有機物分解によって生じたと考えられる DIC が蓄積していた。水深 12 m 付近には pH の第二躍層があり、それより下層の pH は DIC の蓄積が進むにしたがい低下していた。

ほぼ閉鎖的な環境になっていると考えられる水深 14m 以深における酸素消費有機物の由来を推定した。pH 第二躍層下においては DIC 濃度の上昇にともなって DIC の安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ -DIC）が低下していた（図 3）。図中の実線は、分解によって負荷される DIC の安定同位体比が添え字で表したような値であった場合に、予想される DIC 濃度と $\delta^{13}\text{C}$ -DIC の関係を示している。観測された値は -25 ‰ のラインよりも上方にあり、分解によって生じた DIC の安定同位体比はこの範囲にあることが示された。海水中（北泊地）の $\delta^{13}\text{C}$ -POC の平均値 -23 ‰、河川水中（大和川）の $\delta^{13}\text{C}$ -POC の平均値 -27 ‰を用いると、底層付近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少なくとも 5 割以上が植物プランクトン由来の内部生産有機物

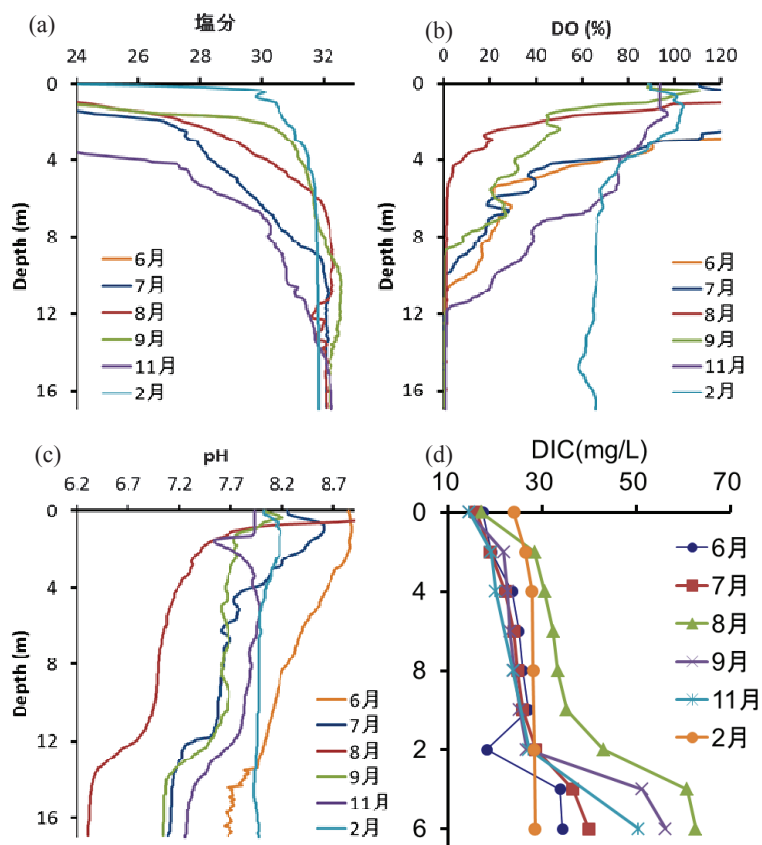


図 2(a)~(d) 塩分、DO、pH、DIC 濃度の鉛直分布

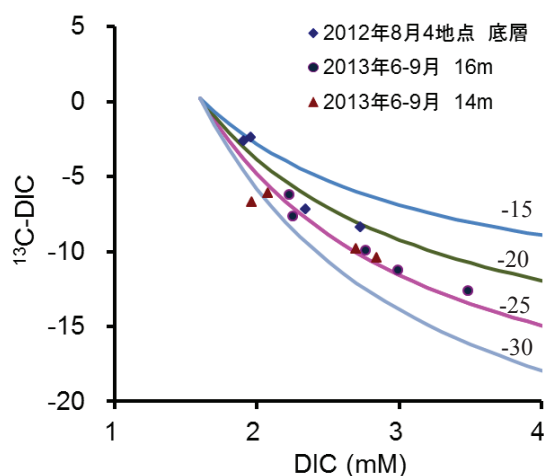


図 3 DIC 濃度と DIC 安定同位体比の関係

と推定された。2013 年の結果から見積もられた内部生産有機物の寄与割合は、2012 年 8 月の底層の複数地点の結果を用いた見積もりと矛盾せず、DIC のバックグラウンド濃度の高い海洋においても、港湾下層のような閉鎖的な環境においては、 $\delta^{13}\text{C}$ -DIC の値を用いて酸素消費有機物の起源を推定することが可能であることが示された。

(2) 大阪湾断面調査

淀川河口から大阪湾中央部に至る断面において 2013 年 7 月に観測された塩分, DO, DIC 濃度 $\delta^{13}\text{C}$ -DIC および $\delta^{13}\text{C}$ -POC の分布を図 4(a)~(e)に示した。河口および湾奥部の底層のあわせて 2 か所が貧酸素化しており、貧酸素化した部分では、DIC 濃度が高く DIC 安定同位体比が低かった。DIC の濃度および安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$ -DIC) を、それぞれ塩分に対してプロットしたものを図 5 (a),(b)に示した。それぞれの図中の実線は、DIC が河川水と海水との混合において保存的に輸送された場合の両者の関係を示している。底層の DIC 濃度は保存的混合モデルの予測値より高く、予測値と実測値の差は AOU と比例関係にあったことから、両者の差の部分は有機物分解によって負荷された DIC と考えられた。また、底層の $\delta^{13}\text{C}$ -DIC は予測値よりも大幅に下方に偏移していた。この偏移と、負荷された DIC の濃度とを用い、マスバランスから有機物分解によって底層で負荷された DIC の安定同位体比を推定すると、河口では-28 ‰、それ以外の観測点の平均値は-18 ‰であった。酸素消費物質の $\delta^{13}\text{C}$ は河口では河川内の $\delta^{13}\text{C}$ -POC とほぼ等しく、河口以外ではその場所の表層の $\delta^{13}\text{C}$ -POC とほぼ等しかった。湾奥における酸素消費にはその場所の表層で生成した有機物の分解が強く関わっていることが示唆された。

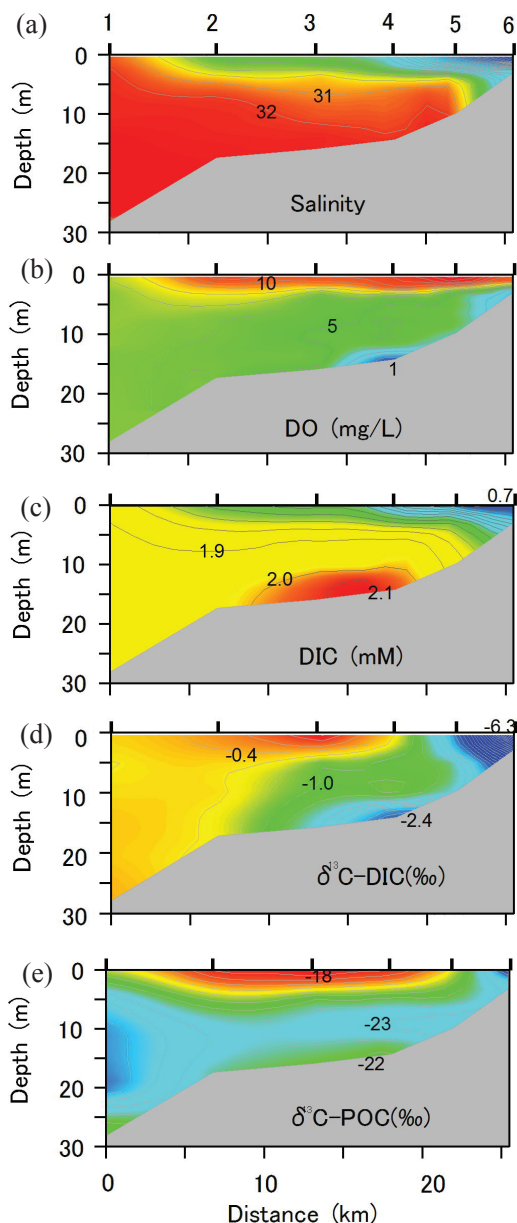


図 4 塩分, DO, DIC 濃度, $\delta^{13}\text{C}$ -DIC および $\delta^{13}\text{C}$ -POC の分布

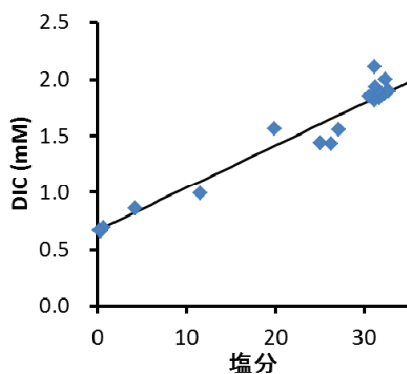


図 5(a) 塩分と DIC 濃度の関係

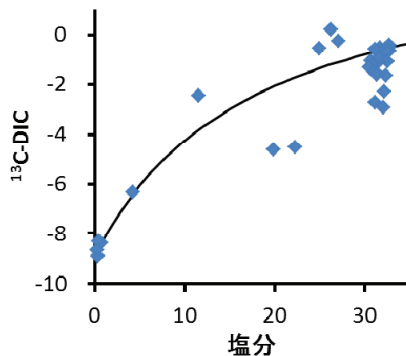


図 5(b) 塩分と DIC の安定同位体比の関係

(3) 有機物分解実験

断面調査を行なった地点のうち、淀川淡水域、淀川河口および大阪湾西部の海水を用いた有機物分解実験の結果を表 1 に示した。いずれの地点においても 30 日後の POC 濃度は 0 日目に比べて大きく低下し、30 日間のあいだに POC のそれぞれ 65 %, 85 %, 84 % が分解された。海域の POC の 8 割以上、河川水中の POC の 6 割以上が易分解性有機物であったことが明らかになった。また POC の安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$ -POC) も全地点において低下したことから、 $\delta^{13}\text{C}$ -POC の値が比較的高い有機物すなわち植物プランクトン由来の有機物が、陸域由来の有機物に比べて分解されやすいことが示された。

表 1 有機物分解実験の結果

測点	日数	POC	^{13}C -POC
		mg/L	‰
淀川	0	0.42	-27.06
淀川	30	0.15	-29.44
淀川河口 (St5)	0	1.92	-20.74
淀川河口 (St5)	30	0.28	-22.93
大阪湾西部	0	0.65	-20.35
大阪湾西部	30	0.10	-25.61

[結論]

本研究では、港湾下層のような閉鎖的な環境においては、「有機物」とともに「有機物の分解生成物」を同位体比分析することによって、酸素消費有機物の起源を推定することが可能であることを示した。また、貧酸素化開始時期の大阪湾底層において酸素を消費しているのは主に内部生産有機物（植物プランクトン由来の有機物）であることが示唆された。

人為由来窒素・リンのほとんどが無機態（＝栄養塩）として河川水とともに海域に供給されるかぎり、河川水の広がりに応じて内部生産有機物（＝植物プランクトン由来）が生じ、その有機物が酸素を消費して貧酸素域が広がると考えられる。大阪湾の貧酸素化を抑制するためには、有機物が広範囲の貧酸素を起こさず高次生産に結びつくための要件を明らかにすることが必要である。

大阪湾流入の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) 地球環境戦略研究機関 関西研究センター 主任研究員
(前(公財) ひょうご環境創造協会 兵庫県環境研究センター)

[研究目的]

瀬戸内海では、種々の規制や対策により、産業、生活排水からの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進んできた。しかしながら、依然として大阪湾での化学的酸素要求量(COD)に係る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と、生物生産に影響を及ぼす窒素、リンの実態を解明することが必要不可欠であると考えられる。

本研究では、3 ヶ年にわたり播磨灘、大阪湾において、海域中の COD が改善されない一因として、長期間生物に利用されず海域に存在していると考えられる難分解性有機物、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、播磨灘、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てきた。

また今年度は、調査の最終年度であるため、従来の長期性分解試験などの結果とともに、近年の有機物が過去と比較してどのように変化してきたか解明することを目的とし、兵庫県の過去の河川常時監視や広域総合水質調査の測定データを用いた有機物質濃度の経年変化などの解析もあわせて実施した。

[研究方法]

本調査は、過去 2 年間に実施した兵庫県内での播磨灘・加古川流域及び大阪湾・武庫川流域の夏季調査を拡大し、大阪湾・淀川、大和川流域(夏)及び大阪湾・武庫川流域(冬)について実施した。本要旨では前者について報告する。

1. 試料採取

試料は、淀川、大和川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、淀川 2 地点(YD-1, YD-2)、大和川 2 地点(YM-1, YM-2)の計 4 地点、海域は 4 地点(OS-18, 17, 8, 3)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、ガラス繊維ろ紙 Whatman GF/C でろ過し調製した。(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)

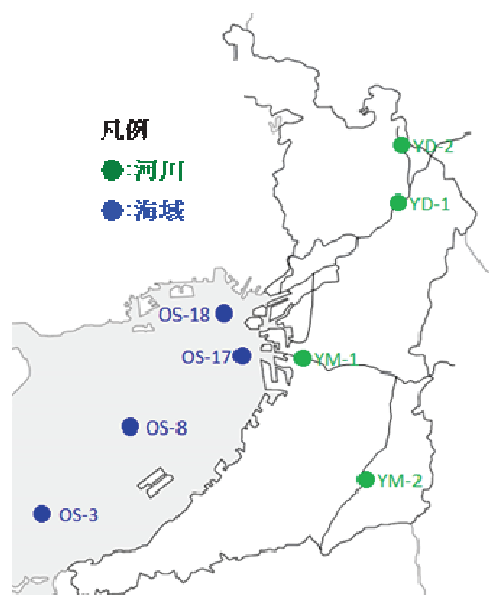


Fig.1 大阪府内採水地点

また、長期生分解試験の試料は以下のとおり調製した。

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 OS-3 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)、溶存有機炭素 (DOC)、溶存態窒素 (DTN)、溶存無機態窒素 ($\text{DIN:NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 合計値)、溶存態リン (DTP)、溶存無機態リン ($\text{DIP:PO}_4\text{-P}$) 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 (SHIMADZU 社製 UV-2450 使用) の測定、3 次元蛍光スペクトル分析 (日立 F-4500 使用) を行った。

[結果と考察]

1. 淀川、大和川流域及び海域における窒素及びリンにおける態別変化

陸域および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 および無機態窒素) 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 は溶存態に変化し、とりわけ海域の PON は 0day の 1~4 割にまで減少した。

また、図には示していないが、懸濁態リン (PP) と溶存態リン (DTP) 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. 淀川、大和川流域及び海域における 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

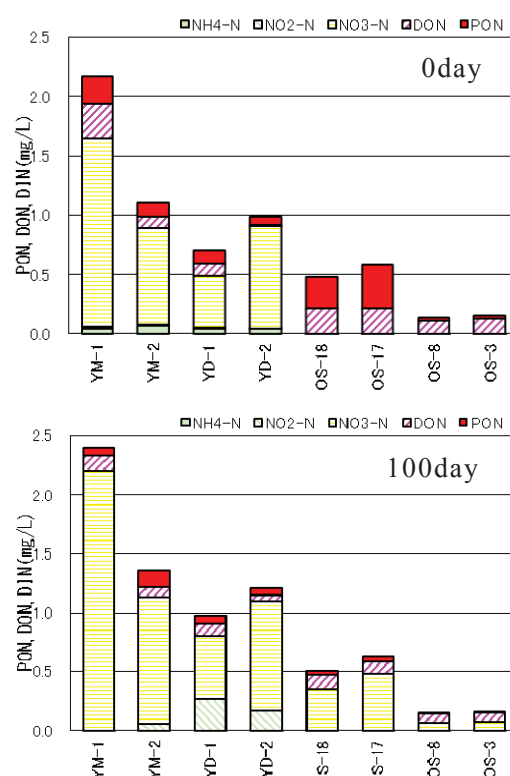


Fig.2 生分解試験前後の窒素態別濃度

て、Fig. 3 に示す。なお、COD の単位は TOC にあわせるため 換算式： $\text{COD}(\text{mgC/L}) = (12/32) \times \text{COD}(\text{mgO}_2/\text{L})$ により、酸素濃度を炭素濃度に換算した。

Fig. 3 より、YM-2 以外の試料において生分解前に比べ、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。100 日生分解後に残存する有機物の割合は、Table1 のとおり陸

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。難分解性有機物の占める割合を、COD で求めると陸域で 5～9 割、海域で 2～3 割であり、TOC の陸域で 8～9 割、海域で 7～9 割に比べて低くなっており、難分解性有機物を評価する場合は COD では全有機物量を評価できない可能性があるため、TOC を用いることが望ましいと考えられた。

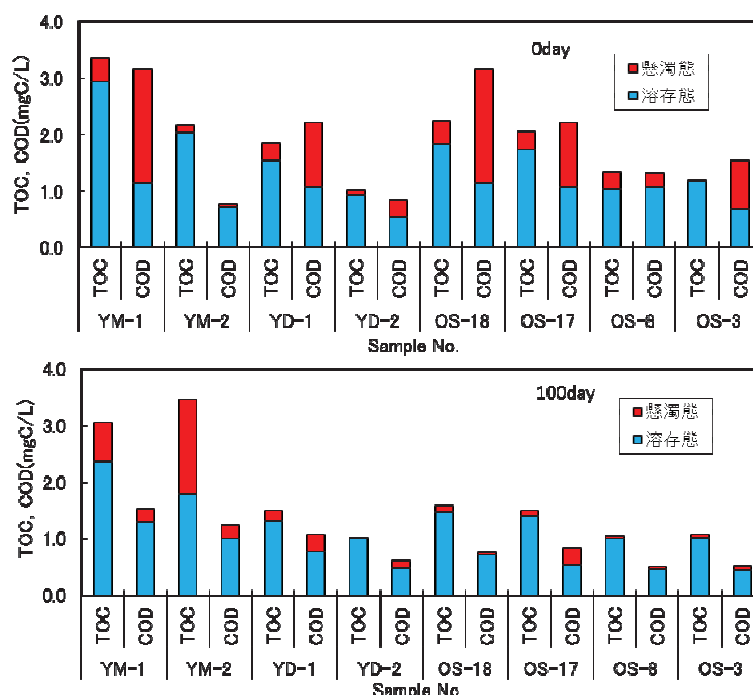


Fig.3 生分解前後の TOC,COD の結果

Table1 100 日生分解前後に残存する有機物の割合 (難分解性有機物の割合)

100day / 0day	YM-1	YM-2	YD-1	YD-2	OS-3	OS-8	OS-17	OS-18
TOC	0.92	1.28	0.84	0.98	0.91	0.79	0.73	0.71
COD	0.54	0.56	0.80	0.93	0.33	0.38	0.38	0.24

3. 淀川、大和川流域及び海域における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、海域試料の方が低い値となった。この結果は、過去に兵庫県内で実施した夏季調査と同様であり、外来性由来の有機物に比べて内部生産由来の有機物の方が DOC に対する UV260 の比が低いという報告があることから、大阪府内の夏季調査においても、海域の有機物は、陸域由来の有機物は少なく、内部生産である植物プランクトン由来の有機物割合が多いと考えられた。

4. 大阪府内の海域における 3 次元蛍光スペクトル分析による蛍光特性

大阪湾海域の生分解前及び生分解後の 3 次元蛍光スペクトル図から読み取れるピーク位置を Fig. 4 に示す。ピーク位置についてその由来物質を特定する研究が多くなさ

れており¹⁾、タンパク質様ピーク(クロシン及びトリプトファンに現れるピークと類似したピーク位置)である Group A、B と、腐植物質様ピーク(腐植物質に現れるピークと類似したピーク位置)である

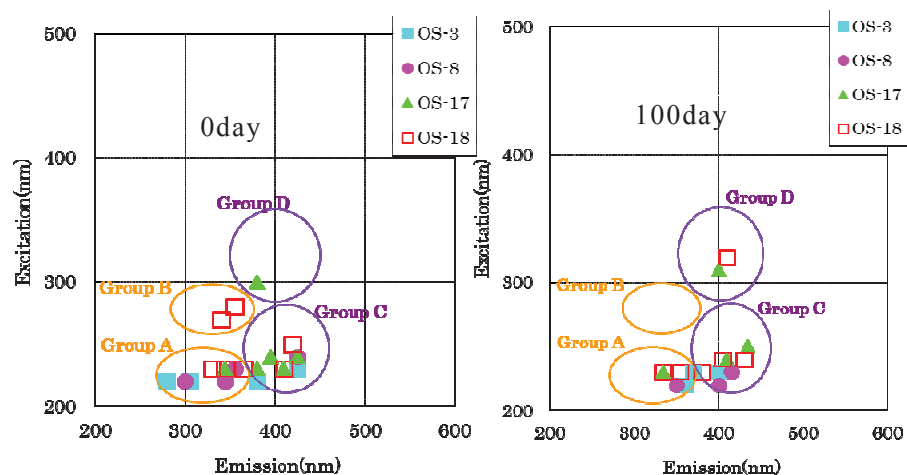


Fig.4 生分解前後の海域における3次元蛍光スペクトルのピーク位置

Group C、Dに分類した。生分解前の海域では、沿岸の OS-18 だけが Group B に、沿岸の OS-17 だけが Group D に現れ、ほかの地点とは異なる形状であった。また、全地点で Group A、C にピークがみられたが、沿岸の OS-18 は他 3 地点と比べると高波長域にピークが現れ異なる形状を示した。

また、100 日生分解後の形状の変化を見ると、若干ではあるが、全地点において、ピーク位置が蛍光波長、励起波長ともに高くなる方向に変化しており、生分解前に比べて、100 日生分解後試料の方が地点による形状の差がなくなることが認められた。

[結論]

本研究では、大阪府内の大阪湾・淀川流域(夏)及び兵庫県内の大阪湾・武庫川流域(冬)について実施し、陸域起源との比較において、海域の大阪湾沿岸～沖合にかけて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、溶存有機物の蛍光特性などについて解析を行い、本要旨では、夏季の大阪府内の大阪湾・淀川流域調査を中心に結果を報告した。

その結果、陸域起源の有機物、窒素、リンの懸濁態が減少し、溶存態へと変化して残存すること、それらの 3 次元蛍光スペクトルのピーク位置は蛍光波長、励起波長ともに高くなる方向に変化することなど、難分解性有機物、窒素、リンに関する基礎的知見を得ることができた。今回の調査結果は、過去 2 年間に実施した兵庫県内における播磨灘・加古川流域及び大阪湾・武庫川流域の夏季調査の内容と、類似点、相違点などを詳細に解析することで、さらに内容を充実させることができた。

今後は、得られた調査結果から難分解性有機物の特性や、その生成メカニズムをあきらかにし、陸域・海域を含めた流域全体の有機物及び栄養塩管理、循環システムの新たな視点を加えることが必要だと考える。

参考文献

1) 福島武彦, 中島俊之, 今井章雄, 松重一夫, 尾崎則篤: EEMS による水中溶存有機物の特性解析; 水環境学会誌, vol.24(10), 686-692, 2001

陸起源有機物の影響を考慮した大阪湾底質の類型化と 底生動物分布との関係に関する研究

佐野 雅基

(地独)大阪府立環境農林水産総合研究所 主幹研究員

共同研究者 横山 壽

京都大学学際融合教育研究推進センター 特定教授

〔研究目的〕

近年大阪湾では、基幹漁業である底びき網の主要漁獲対象であるシャコやマコガレイなど、底生魚介類の漁獲量が減少し、大きな問題となっているが、その原因は明らかになっていない。本研究では、複数の環境指標を総合して大阪湾の海域区分を行うとともに、海底堆積有機物に占める陸域由来有機物を炭素安定同位体比により明らかにする。併せて底生動物の分布調査を行い、海域区分と底生動物の分布との関連性を明らかにして、底生魚介類不漁要因解明の一助とすることを目的とする。

〔研究方法〕

1. 底質の主成分分析による海域区分と海底堆積物の有機物起源推定

大阪湾内の 31 点 (図 1) で、2013 年 8 月 27、28 日に採集した海底堆積物 (表層 1cm) の粒度組成 (含泥率、中央粒径値 (Md ϕ)、淘汰度、歪度) 全有機態炭素量 (TOC)、全窒素量 (TN)、炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$)、窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) および酸揮発性硫化物態イオウ量 (AVS) を分析した。この採集には、KK 式コアサンプラー、アクリルパイプ (内径 4.3cm $\times$ 2 本) 内蔵式エ

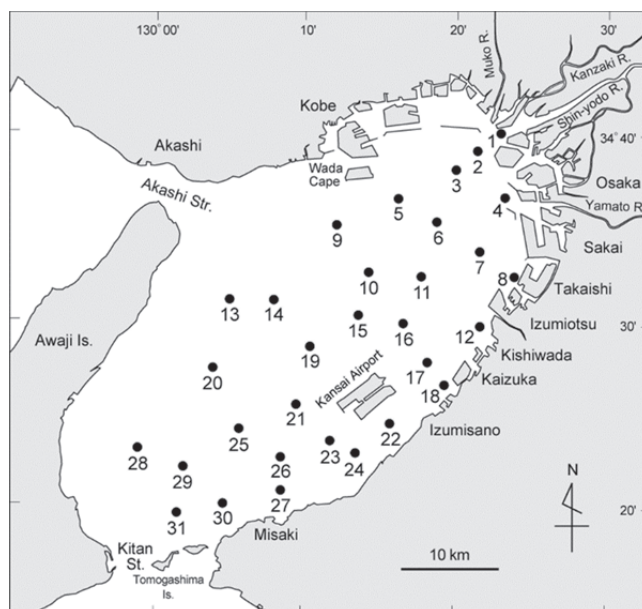


図 1 大阪湾における底質調査の地点

クマンバージ型採泥器またはスミスマッキンタイヤー型採泥器を用いた。併せて海底直上の溶存酸素 (DO) を蛍光式溶存酸素センサー付 CTD (JFE アドバンテック、ASTD102) により測定した。これらの分析・測定値 (Md ϕ 、淘汰度、歪度、TOC、TN、C:N 比、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、AVS 及び底層水の DO) について相関行列に基づく主成分分析を行った。成分 1 と成分 2 の主成分得点をもとに、標準化ユークリッド平方距離を測度とした Ward 法によるクラスター分析を行い、海域の類型区分を行った。また、2013 年 6 月 4 日、8 月 6 日および 10 月 7 日に大阪湾中央部 (135° 10.73' E, 34° 29.95' N) の水深 5 m 層より採集した海水中的懸濁態有機物 (POM) の $\delta^{13}\text{C}$ 値を測定し、その平均値 $\bar{X}$ を求めた。陸起源有機物の $\delta^{13}\text{C}$ 値として温帯における C_3 植物の一般値 -27‰ を採用し、堆積物中有機物 (SOM) に占める陸起源有機物 (TOM) の割合を次式により推定した。

$$\text{TOM (\%)} = 100 (\bar{X} - \delta^{13}\text{C}_{\text{SOM}}) / (\bar{X} + 27)$$

2. 底生動物の分布調査

メガベントスの採集は2013年5月、11月に大阪湾内の25調査点（図1のStns 2、6、7、10、16、19を除く点）で行った。採集には大阪湾で操業している小型底びき網の一種である石桁網（桁幅1.8m）に袋網の目合いが5mmのカバーネットを被せたものを2丁用い、これを各調査点で10分間曳網した。曳網開始点と終了点の位置をGPSで測定して曳網距離を算定した。採集物は研究所に持ち帰り、種査定、個体数の計数、湿重量測定を実施した。1991年11月、1992年5月に同様の漁具・調査点で実施した調査結果と単位面積あたりの個体数、質重量の比較を行った。

〔結果と考察〕

1. 底質の主成分分析による海域区分と海底堆積物の有機物起源推定

採集した海底堆積物の含泥率は23点で90%以上を示し、湾奥部と紀淡海峡北部では99%以上となった。MdφはStns 1、4を除く湾奥部と紀淡海峡北部の海域では7以上を示し、細かい粒径であった。淘汰度は関西空港北側水域と紀淡海峡北部では2.0未満でよく淘汰された堆積物であった。歪度は湾奥部および紀淡海峡北部の水域では、ほぼ0.1から-0.1の範囲にあり、粒度分布が左右対称に近かった。このように紀淡海峡北部海域において、細かな粒径で、淘汰度もよく、粒度分布が整った、湾奥部と類似性が高い粒度組成がみられたことが特徴的であった。TOCとTNは湾奥部でTOCは20 mg/ gDM以上、TNは2.5 mg/ gDM以上を示し高くなったが、紀淡海峡に向け減少する傾向がみられた。また、湾東部のごく沿岸域にTOC、TNとも低くなった点（Stns 8、18）があった。C:N比は淀川河口部の湾最奥部のStn 1と岸和田地先のStn12で9以上を示したが、概ね湾奥部から紀淡海峡に向け低下する傾向がみられた。 $\delta^{13}\text{C}$ はStn 1で-24.8‰ともっとも低く、淀川河口部から離れると急激に増加した。Stn 1および-22‰未満となった湾奥部沿岸域4点（Stns 2、4、8、12）を除く26点の $\delta^{13}\text{C}$ は-21.9‰から-20.9‰の範囲にあり、差異は小さかった。 $\delta^{15}\text{N}$ は6.0～8.7‰の範囲にあり、淡路島東岸沖の湾央部の地点で8.0‰以上と高く、湾奥部から東部沿岸域および紀淡海峡北部の海域で7.0‰未満と低かった。

大阪湾中央部の5m層から採集した懸濁態有機物（POM）の $\delta^{13}\text{C}$ の平均値は-20.7‰であった。この値を基に求めた堆積物中有機物（SOM）に占める陸起源有機物（TOM）の割合は、淀川河口のStn 1では65%と高かったが、20%以上を示す範囲は大阪市地先から高石市地先にかけての距岸2km以内の5点（Stns 1、2、4、8、12）に限られており、本調査域のほとんどで海起源有機物がSOMの80%以上を占める結果となった（図2）。

AVSは淀川河口部のStn 1で最高値の

3.4 mg/gDMを示し、湾奥部の4点（Stns 2～4、7）では1.0 mg/gDM以上となった。和岬と岬町を結ぶ線より東側では水産用水基準の0.2mg/gDMを上回る点が多くみられ、特に関西空港島南部のStn 24では1.3 mg/gDMと

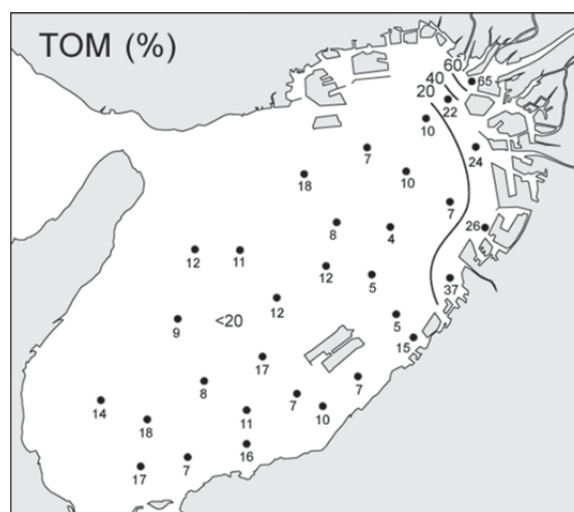


図2 堆積物中有機物に占める
陸起源有機物の割合

高くなった。しかし、湾奥部沿岸の Stn 8 では 0.06 mg/gDM の低い値もみられた。DO は和田岬と泉佐野を結ぶ線より南西方向の海域では 5 mg/L 以上であったが、これより北東方向では急減し、神戸市から貝塚市沖の沿岸水域ではほぼ 1 mg/L 未満となり、貧酸素水塊が形成されていた。

底質分析値と底層 DO 測定値の主成分分析の結果を表 1 に示す。第 1 主成分の寄与率は 39.5%，第 2 主成分の寄与率は 32.6% で、両者により全変動の 72.1% が説明される。第 1 主成分の固有ベクトルについては $Md\phi$ が負の、淘汰度、歪度および DO が正の大きな値を示した。第 2 主成分の固有ベクトルについては TOC と TN が正の大きな値となり、C:N 比と AVS も比較的大きな正の値を示した。第 1 主成分と第 2 主成分の主成分得点に基づくクラスター分析の結果、31 地点は A、B、C、D および E の 5 グループに区分された（図 3）。A 区分は和田岬と貝塚を結ぶ線より北東方向の湾奥部（最奥部 Stn 1 を除く）、B 区分は A 区分の南西方向で和田岬沖から関西空港島沖を経て阪南地先にかけての水域、C 区分は B 区分西側の大阪湾中央部、D 区分は C 区分西側の淡路島東岸沖、E 区分は紀淡海峡北方水域と堺北港岸壁東側の Stn 8 及び貝塚沖の Stn 18 を含む水域である。この 2 点は TOC、TN や AVS が比較的低い値だったため、両点が近接する A 区分・B 区分ではなく紀淡海峡北部の調査点との類似性が高くなった。

表 1 第 1 主成分および第 2 主成分の固有値、寄与率および環境項目の固有ベクトル

	PC1	PC2
Proportion (%)	39.5	32.6
Factor loading		
$Md\phi$	-0.73	-0.56
σ_I	0.76	0.44
Sk_I	0.78	0.5
TOC	-0.37	0.86
TN	-0.19	0.83
C:N ratio	-0.57	0.62
$\delta^{13}C$	0.59	-0.10
$\delta^{15}N$	0.62	0.46
AVS	-0.61	0.63
DO	0.79	-0.19

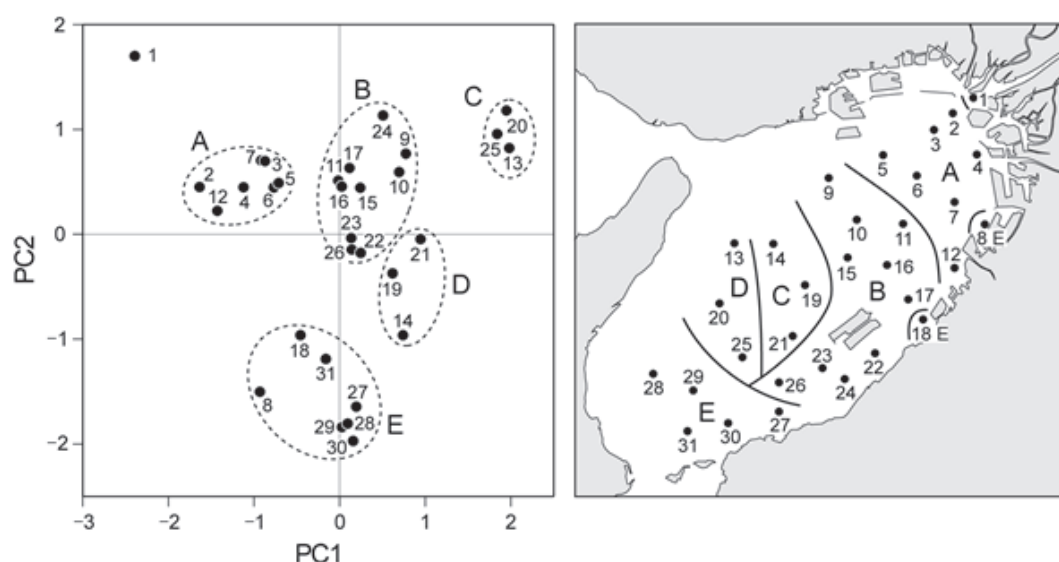


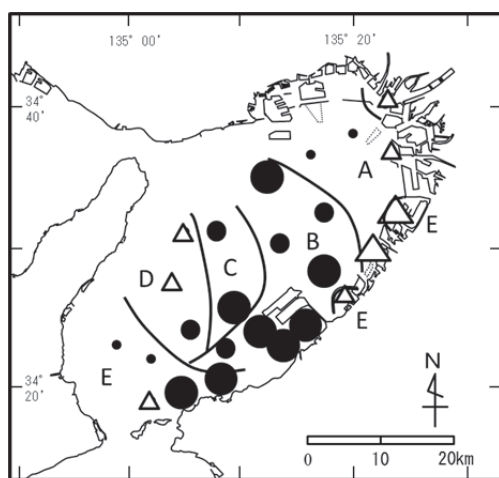
図 3 底質・水質 10 項目の相関行列に基づく主成分分析による海域区分

2. 底生動物の分布調査

2013 年 5 月の採集は 5 月 21、22、23 日（以下、5 月調査とする。）に行い、195 種のメガベントス（魚類を含む）を採集した。2013 年 11 月の採集は 11 月 22、27 日、12 月 2 日（以下、11 月調査とする。）に行い、171 種のメガベントス（魚類を含む）の採捕があった。1ha あたり 10,000 個体以上のメガベントスの採集があったのは 5 月調査時の Stns 9、11、15、17、23、24 であった。これらの点はすべて B 区分であった。単位面積あたりメガベントス個体数は 5 月調査から 11 月調査にかけて Stns 14（C 区分）、26（B 区分）、31（D 区分）以外の点で減少した。1ha あたり 20kg 以上のメガベントスの採集があったのは 5 月調査の Stns 8、9、11、18、22、25、26 と 11 月調査の Stns 9、14、18、26 で、A 区分の点は含まれなかった。単位面積あたりメガベントス湿重量は Stns 12、14、15、20、23、26、29、30 で 5 月調査より 11 月調査の方が多くなった。

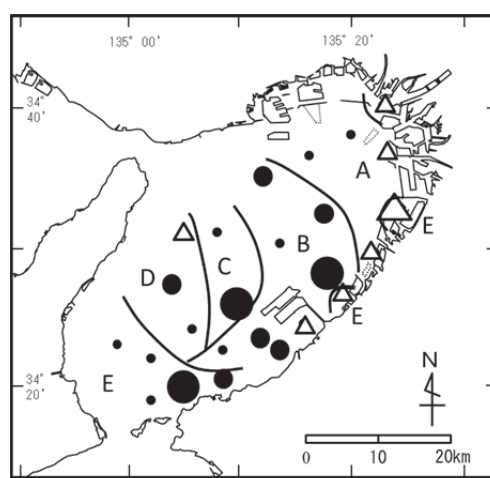
1991 年 11 月、1992 年 5 月に実施した同様の調査と採集されたメガベントスの個体数、湿重量を比較したところ、5 月は最奥部の Stn 1、A 区分の沿岸域及び E 区分の湾東岸の点（Stns 8、18）で個体数、湿重量とも減少傾向を示し、B 区分では個体数、湿重量とも増加を示す点が多くみられた（図 4、5）。11 月の個体数の比較では、A 区分は Stn 4 で増加傾向となったが、他の点で概ね減少傾向を示した。B 区分では 1 点（Stn 11）を除き大きく増加した。紀淡海峽北部の E 区分は全点で減少した。11 月に採集されたメガベントス湿重量は、最奥部の Stn 1 と紀淡海峽北部の E 区分で減少したが、その他の点では増加傾向を示した。

湾奥部の A 区分は、全体的に堆積物の TOC、TN、AVS、C:N 比の値が高くメガベントスの減少傾向がみられた海域区分であった。B 区分は、幾つかの調査点で TOC、TN、AVS の値が A 区分と同レベルであったが、メガベントスについては全体的に増加傾向がみられた海域区分となった。また、湾東部沿岸の E 区分の 2 点（Stns 8、18）では、これらの値が、紀淡海峽北部の調査点と同じ低レベルであったが、5 月のメガベントスは個体数・湿重量とも減少した海域区分となった。このように海域区分により、堆積物の状況とメガベントス増減の関係性は異なる傾向がみられた。



● : 4倍以上 ● : 2倍以上4倍未満
 ● : 1倍以上2倍未満
 △ : 0.1倍以上1倍未満 △ : 0.1倍未満

図 4 1992 年 5 月と 2013 年 5 月のメガベントス個体数比較



● : 10倍以上 ● : 5倍以上10倍未満
 ● : 1倍以上5倍未満
 △ : 0.1倍以上1倍未満 △ : 0.1倍未満

図 5 1992 年 5 月と 2013 年 5 月のメガベントス湿重量比較

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（その２）

伊藤克敏¹・羽野健志²・大久保信幸²・持田和彦³・隠塚俊満¹

水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所

・ 1: 研究員 2: 主任研究員 3: グループ長

〔研究目的〕

大阪湾内港湾域の底質からは、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（*Thalassodrilides* sp.）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。昨年度の本課題の実施により、海産ミミズが汚染に適応する際、体内の代謝物を調節しながら順応していることを明らかにした。さらに、有害化学物質の分解には薬物代謝酵素系を活性化し、化学物質を体外に排出する過程においてを分解していることを示唆する結果を得た。本年度は、昨年度得られた次世代シーケンサーによるトランスクリプトーム解析結果を精査し、有害化学物質分解に関与する因子が、温度などの物理的環境変化によりどのような挙動を示すのかを検討した。さらに、大阪湾圏域での環境浄化実施に向け、室内実験において海産ミミズの底質浄化能力を検証すると共に、大阪湾に生息する海産ミミズの探索を行った。

〔研究方法〕

1. 大阪湾大正内港底質汚染実態調査

1-1 試験底質

2012年9月に大阪湾内大正内港にてエグマンバーズ採泥器を用いて採取した。底質試料は、1mm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。

1-2 多環芳香族炭化水素類（PAHs）の測定

底質試料を QuEChERS（アジレント・テクノロジー株式会社）で前処理したのち、ガスクロマトグラフィー質量分析（GC-MS）を用いて16種類のPAHsを既報に従い測定した。なお、選定した16種類のPAHsは、アメリカ合衆国環境保護庁（U.S.EPA）が定める特定有害物質である。PAHの底質含有量は、国内基準が定められていないため、U.S.EPAが底質評価に用いる値と比較した。

2. 海産ミミズの汚染底質浄化メカニズムの解明

2-1 試験対象種

海産ミミズ（*Thalassodrilides* sp.）：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石油由来の汚染物質の一種である1-ニトロナフタレン（PAHsの1種ナフタレンにニトロ基が結合した物質）について、非常に高い代謝能を有していることが明らかとなっている。実験には愛媛県南部海域の養殖場底泥より採取し、研究

所で継代飼育中の個体を用いた。

2-2 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、大阪湾大正内港より採取した汚染底質 70g (湿重量) に海産ミミズ 200 個体、及び底質湿重量当たり 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、15℃、20℃、及び 25℃の暗条件下で 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、1 日目、3 日目、及び曝露試験終了後に実施した。各海産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、液体窒素で急速凍結し、前処理まで-80℃で保存した。

2-3 リアルタイム PCR 法を用いた海産ミミズの遺伝子発現量解析

昨年度実施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の結果から、化学物質分解に関与が示唆される遺伝子を抽出した(表 1)。抽出した遺伝子は、3' RACE (rapid amplification of cDNA ends) 法を用いて、mRNA の 3' 末端に poly-A tail を確認し、海産ミミズ由来の可能性が高い遺伝子を選択し、リアルタイム PCR 法を用いた遺伝子発現量の定量法を確立した。

表 1 有害化学物質分解に関与が示唆される遺伝子名とその略語、及び機能

遺伝子名	略語	機能
Cytochrome P450 family 4 protein	CYP	薬物代謝酵素
Aromatic ring-cleaving dioxygenase	Dioxy. 1	芳香環開裂酵素
Dioxygenase	Dioxy. 2	二原子酸素添加酵素

3. 大阪湾底質浄化実証試験及び応用に向けた取り組み

3-1 海産ミミズを用いた底質浄化実証試験

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。各試験区ともに 3 試験区実施し、海産ミミズを加えない試験区を対照区とした。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。試験終了後、底質を遠心分離(3,000rpm、20 分)して間隙水を採取し、等量のジクロロメタンを加え化学物質を抽出した。間隙水に含まれる化学物質の分析には、約 1,000 種類の化学物質の一斉分析が可能である GC-MS ソフトウェア (NAGINATA) を用いて網羅的に解析し、海産ミミズの存在下で減少する物質を特定した。

3-2 大阪湾における海産ミミズの探索

大阪湾内大正内港での海産ミミズを用いた底質浄化の実施に向け、2013 年 12 月及び 2014 年 2 月に大正内港にて汚染度合いの異なる 2 地点 (図 1) で海産ミミズの探索を行った。なお、1. における底質採取地点は地点 A である。底質の採集にはエグマンバージ採泥器を用い、現地にて酸化還元電位 (ORP) を測定した。底質は、速やかに

研究所に持ち帰り、海産ミミズを探索すると共に、含水率、強熱減量、及び酸揮発性硫化物量（AVS）を既報に従い測定した。

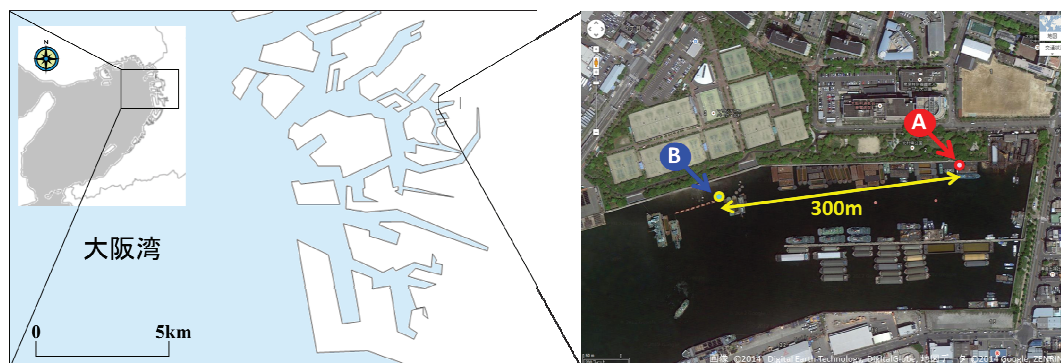


図1 海産ミミズ探索地点 A 及び B

[結果と考察]

1. 大阪湾大正内港底質汚染実態調査

U. S. EPA は、底質中の 13 種類の PAH に関して、底生生物に対して種々の悪影響を及ぼす濃度の Effects range low (ERL) 及び Effects range median (ERM) を基に、Good (ERL 以下)、Intermediate (ERL～ERM) 及び Poor (ERM 以上) に分類して評価している。その 13 種類の PAHs の内、11 種類が今回分析した 16 種類に含まれている。分析の結果、アセナフテン、フェナントレン、アントラセン、フルオレン、ピレン、クリセン、ベンゾ[a]ピレン、及びジベンゾ[a, h]アントラセンの 8 種の濃度が Poor と判定された。残りの 3 物質ナフタレン、アセナフテン、及びフルオレンについても Intermediate と判定された。また、基準値が設けられていない物質についても高値を示した。ERM は、底生生物の 50% が何らかの悪影響を受ける濃度と定義されており、実際に大正内港採取地点 A においては、底生生物はほとんど観察されなかった。これらの結果から、早急に何らかの対策を施す必要性があると考えられる。

2. 海産ミミズの汚染底質浄化メカニズムの解明

確立したリアルタイム PCR 法を用いて、曝露温度の違いによる遺伝子発現量の変化を定量した。その結果、薬物代謝に重要な役割を担う第一相薬物代謝酵素であるチトクロム P450 (CYP) 及び二原子酸素添加酵素である Dioxygenase (Dioxy. 2) は、曝露温度が高いほど、コントロール区に比べ試験区で発現量が上昇する傾向が認められた。この結果から、温度が高いほど有害化学物質の分解が促進されることが示唆された。一方、芳香環開裂酵素である Aromatic ring-cleaving dioxygenase (Dioxy. 1) の発現量は、曝露温度による明確な違いは観察されなかったが、曝露期間が長くなることで、コントロール区よりも発現量が下がる傾向が認められた。このことから、芳香環の開裂に関しては、微生物等の関与も考慮に入れ今後検討する必要がある。

3. 大阪湾底質浄化試験

3-1 海産ミミズを用いた底質浄化実証試験

曝露試験 10 日後の間隙水に含まれる化学物質濃度を測定した結果、海産ミミズの存在により、ピレン、フルオレン、フルオランテン、及びアセナフテンなどの PAH の濃度が半分以下に減衰した。さらに、環境ホルモン様物質として知られているビスフェノール A の減衰も観察された。この結果から、海産ミミズは、大阪湾汚染底質に生息可能であり、底生生物に影響が大きいとされる間隙水中の PAHs 等の化学物質を分解する能力があることが実証された。

3-2 大阪湾における海産ミミズの探索

3-2-1 海産ミミズ探索地点の底質分析結果

海産ミミズ調査地点 A 及び B の底質を観察した結果、地点 B は、茶褐色であり、海底表面に二枚貝が観察される等、生物の痕跡が確認できた。一方、地点 A は、炭の様な黒さを呈し、生物の痕跡はほとんど確認されなかった。地点 A 及び B の ORP、含水率、強熱減量、及び AVS の測定の結果、すべての項目において、地点 A よりも地点 B の汚染度合いの指標が低い値を示した。特に AVS に関しては、地点 A では水産用水基準値 0.2mg/g を遙かに超える値であったが、地点 B の 2014 年 2 月 13 日のサンプルは 0.19mg/g と基準値を下回っていた。

3-2-2 海産ミミズ探索結果

本課題では、2013 年 12 月及び 2014 年 2 月に、2 地点において海産ミミズの探索を行ったが、海産ミミズの生息を確認することはできなかった。同じ瀬戸内海である愛媛県内において、海産ミミズの生息を確認していることから、引き続き大阪湾における海産ミミズの探索を実施する予定である。一方、地点 B には、ヨコエビやゴカイなど数多くの底生生物の生息を確認した。地点 B は、大正内港の重汚濁地点（地点 A）から、僅か 300m しか離れていない地点である。今後は、海産ミミズのみならず、汚染域に隣接した地点に生息する底生生物の底質浄化能力についても、本研究課題で明らかになりつつある海産ミミズの有害化学物質分解機構を元に検討する予定である。

[結論]

本研究課題の実施により、大阪湾内大正内港の底質が PAHs により高濃度で汚染されている実態が明らかとなり、早急に何らかの対策を施す必要性があると考えられた。海産ミミズの有害化学物質分解能を検証した結果、大阪湾大正内港で問題となりうる PAHs を分解する能力が高いことが明らかとなった。また、その分解に関与が示唆される薬物代謝系の遺伝子は、温度が高いほど発現量が高いことが明らかとなった。この結果は、海産ミミズを用いた底質浄化を行う際には、冬期の水温が低い時期より夏季の海水温が高い時期に実施することで、効率よく底質浄化が進むことを示唆している。しかしながら、本研究課題で実施した海産ミミズの探索においては、海産ミミズの存在は確認できなかった。故に、大阪湾大正内港において、現時点で底質浄化を実施するには、生物の攪乱を抑えるために閉鎖的環境で実施する必要がある。今後、実環境に応用するため、海産ミミズの探索を進めるとともに、大阪湾に生息している生物種の浄化能を検討し、実験室レベルから規模を拡大して実施する予定である。

港湾域におけるリン溶出抑制技術の開発

藤井智康

奈良教育大学 教育学部 准教授

1. はじめに

港内域の富栄養化や貧酸素化は全国で問題となっている。港湾海域は防波堤に囲まれた強閉鎖性海域であり、水の流動は防波堤の外と比較して小さく、海水交換が弱い。また、港湾海域には多くの埋立地があり、海面は長さ数百から数キロメートルの水路状地形となっている。また、要所には航路が掘り込まれ、浅場の中に深みがある地形となっている。さらに、下水処理場の多くは埋立地に立地し、水路状海域に排水している。複雑な水路状地形によって、多くの停滞性の水域（よどみ地形）ができています。特に深掘り跡にできる貧酸素水塊は、外部とほとんどほとんど交換せず、秋季まで滞留する。貧酸素化と底泥からのリン溶出は大阪湾のみならず、他の内湾でも起きており、貧酸素化・リン溶出対策は内湾の環境再生に共通する主要な課題となっている。

2. 研究方法

港湾海域のリン濃度の分布、および貧酸素水塊の分布を明らかにするために、2013年9月6日に、大阪湾奥部の神戸港東部から西宮港内の水路において、短い測点間隔（おおむね 300～500 m 間隔）で観測を行った（図-1 の St. 1～26）。各調査地点で、直読式総合水質計 AAQ-177（JFE アドバンテック社製）を用いて、水温、塩分、DO、クロロフィル蛍光の鉛直分布を水深 0.1 m 間隔で測定した。St. 1～St. 21 では、表層および底層水を北原式採水器を用いて採水し、全リン（T-P）、溶存態全リン（D・T-P）、リン酸態リン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）の分析を行った。

測線 A を、青潮が頻繁に生じる甲子園浜を縦断する測線として St. 21 → 11 → 12 → 13 → 14 → 15 → 16 → 17 → 18 → 19 → 20 とした。また、測線 B を芦屋下水処理場からの排水が流入する南芦屋水路として、St. 6 → 5 → 4 → 3 → 7 → 8 → 9 → 10 → 21 とした。

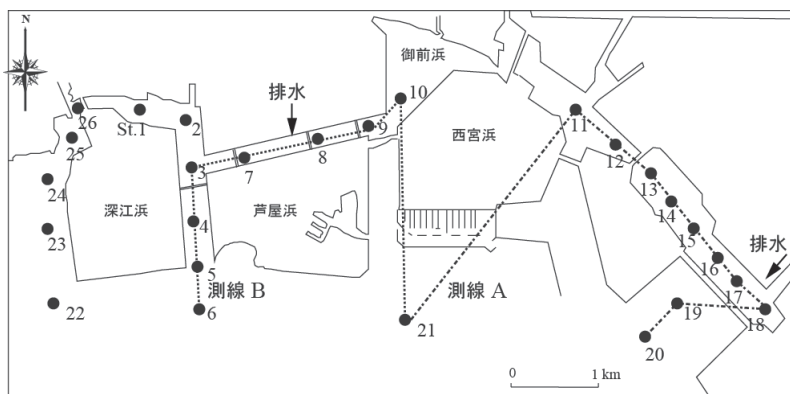


図-1 大阪湾北岸における貧酸素・リン分布調査地点.

3. 結果と考察

3.1 大阪湾における窒素・リンの変化

全窒素濃度が経年的に低下しているのに対し、全リン濃度は低下しないことの原因として、湾奥部にある貧酸素水塊中でリンが溶出していることが考えられる（図-2）。また、海産植物プランクトンの標準的な窒素、リン濃度比はレッドフィールド比（RF比）と言われる。この値は、重量比では7.2：1であり、モル比では16：1である。TN/TP比は陸水ではRF比よりも著しく大きい。陸水と海水のTN/TP比は、海水と混ざり合う河口域で急激に変化している（図-3）。河口域においてリンは濃縮・高濃度化され、ここからRF比にしたがって海域にリンが供給されていると考えられる。

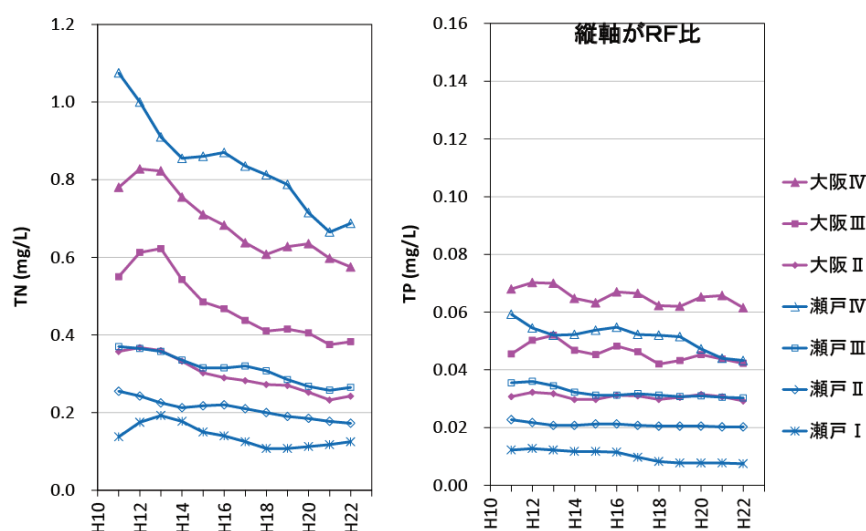


図-2 瀬戸内海・大阪湾における類型別全窒素（TN）、全リン（TP）の経年変化.

縦軸はレッドフィールド比

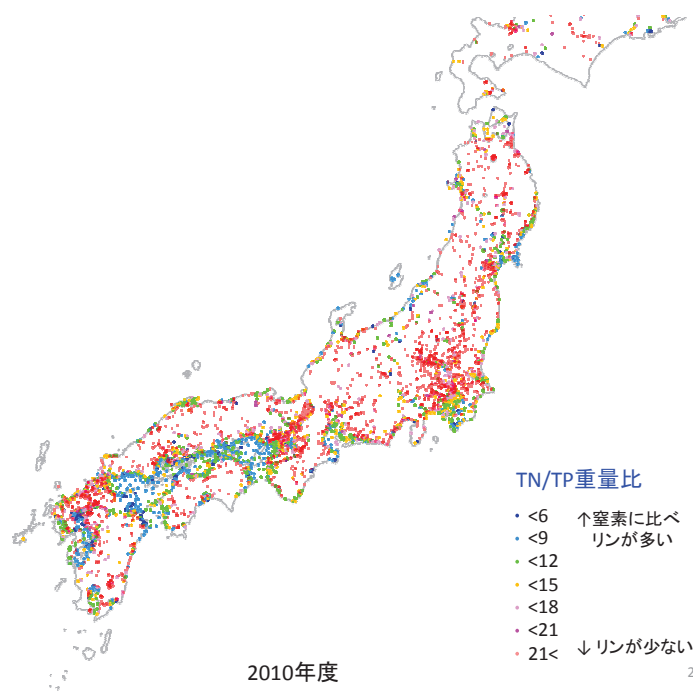


図-3 TN/TP 重量比の分布.

3.2 甲子園浜（測線 A）におけるリン・貧酸素分布

甲子園浜の地形の模式図を図-4に、リン濃度、水温、クロロフィル蛍光、DOの分布を図-5に示す。

甲子園浜は、大阪湾において最も頻繁に青潮の生じる水域である。青潮は、硫化水素を含む無酸素水が海面に上昇したときに生じる。この水域の貧酸素・無酸素水塊は模式的に示すと下記のような構造になっていた（図-4）。

St. 12 と 13 の間には、橋脚撤去後の敷居状地形（シル）があり、小規模な窪地地形を形成していた。この浅い窪地の中に無酸素水塊ができていく。浅い海域であり、比較的開放的な海面であるため、比較的弱い風が吹いても底層の無酸素水塊は海面に表れ、青潮となると考えられる。

御前浜から甲子園浜にかけての St. 11～18 までは、表層 DO が 5 mg/L 程度と低く、青潮の影響が見られた（図-5 (e)）。浅い窪地内の St. 13～14 の底層の無酸素水塊中では、表層に比べて底層の T-P 濃度が高くなっており、底泥からリンが溶出していると考えられる（図-5 (a) (b)）。また、枝川浄化センター（St. 18 付近、図-1 中の矢印）の排水が流入している地点では、周辺海域と比べて表層のリン濃度が高くなっていた（図-5 (d)）。上層のクロロフィル濃度は、甲子園浜外の地点よりも低く、この海域で有機物（酸素消費物質）が周辺海域よりも多く作られているように見えない（図-5 (d) (e)）。

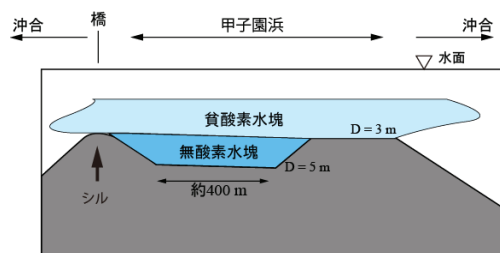


図-4 甲子園浜における地形模式図

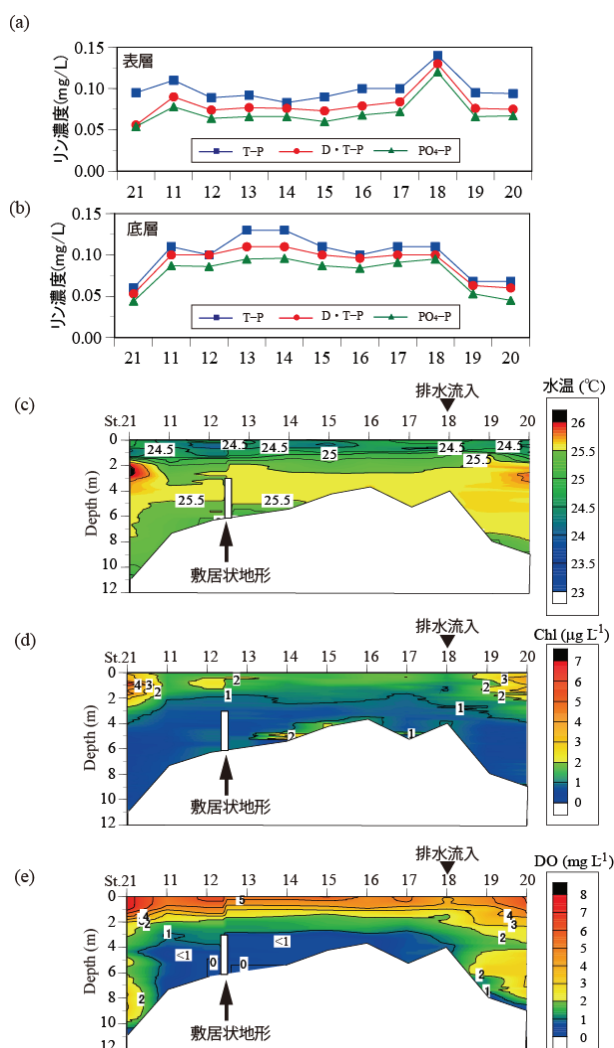


図-5 甲子園浜（測線 A）における(a)表層リン濃度、(b)底層リン濃度、(c) 水温、(d) クロロフィル蛍光、(e) DO の分布. 2013 年 9 月 6 日.

3.3 南芦屋浜水路（測線 B）におけるリン・貧酸素分布

南芦屋浜水路の地形の模式図を図-6に、リン濃度、水温、クロロフィル蛍光、DOの分布を図-7に示す。

この水路の無酸素水域には窪地状地形はみられず、台地状地形となっている（図-6）。このことから、無酸素水塊は、停滞性により無酸素化しているわけではなく、下水処理

排水によって作られた高クロロフィル水塊から沈降してくる有機物によって、局地的に酸素消費速度が大きくなってできた無酸素水塊と考えられる。窪地型とは異なった型の無酸素水塊が作られていることが分かった。

芦屋下水処理場排水が流入（図-1のSt. 7と8の間）するため、St. 8では表層のT-P濃度が周辺海域よりも2倍ほど高くなっていた（図-7(a)）。

St.8 付近には、表層に高濃度のクロロフィル層があり、植物プランクトンが増殖していた。この高クロロフィル海域の底層は、無酸素水塊となっていた（図-7(d)(e)）。

3.4 リンの存在比

D・T-P/T-Pの比は、表層で0.775（77.5%）、底層で0.877（87.7%）であり、表層では粒状のリンの割合が大きい。一方、 $\text{PO}_4\text{-P}/\text{T-P}$ の比は、表層で0.656（65.6%）、底層で0.747（74.7%）であった。底層では、70%程度が無機態の形で存在していた。無酸素水塊中の底泥からの無機態リンの溶出により、表層よりも存在比が大きくなっていた。

4. 結論

本研究では、大阪湾北岸の港湾域内のDOとリン濃度の分布を調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 底層の貧酸素水塊中には、70%程度が無機態の形で存在していた。無酸素水塊中の底泥からの無機態リンの溶出により、表層よりも存在比が大きくなっていた。
- (2) 青潮が頻繁に生じる甲子園浜の浅い窪地の中に無酸素水塊ができていた。このため、比較的弱い風でも無酸素水塊が湧昇し、青潮となっていた。浅い窪地内では周辺海域よりもリン濃度が高い。

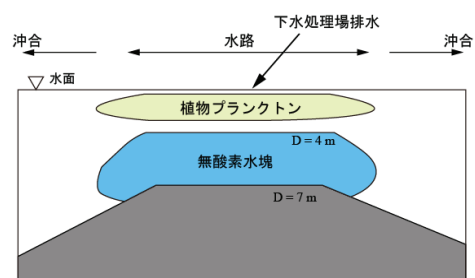


図-6 南芦屋浜水路における地形模式図。

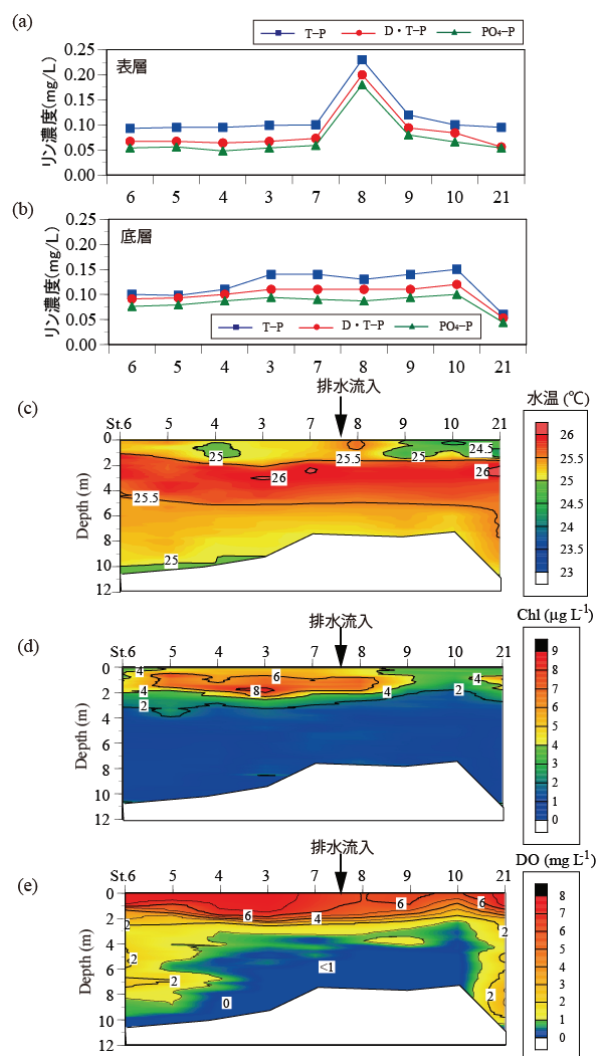


図-7 南芦屋浜水路（測線 B）における(a)表層リン濃度、(b)底層リン濃度、(c)水温、(d)クロロフィル蛍光、(e) DO の分布。
2013 年 9 月 6 日。

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（その2）

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

大阪湾では現在も汚濁海域が存在し、現行の水質総量規制においてもさらなる負荷削減の方針が採られているが、その実効性を正しく評価するための十分な知見が得られているとは言い難い。大阪湾における物質循環機構の把握と水環境健全化方策の提案に向けて、申請者らはこれまで研究を進めてきた。昨年度は、沿岸海域の水質汚濁の元凶とされてきた陸域負荷を精確に把握することを目的に、合流式下水道越流水CSOによる汚濁負荷の実態解明に向けた現地調査を実施し、既往の研究成果とあわせて解析を行うことで、雨天時負荷を含めた陸域負荷の実態を定量的に明らかにした。

しかしながら、大阪湾の水質汚濁機構には、陸域だけでなく大気、外洋、底泥を起源とする栄養塩の動態も無視できない影響を及ぼしている可能性が既往研究により指摘されており、負荷削減施策の実効性を正しく評価するためには、これらの負荷も考慮した統合的な解析が不可欠である。

本研究では、窒素やリンに加えて、海域の一次生産にとって重要なシリカ等の項目も含めた水質調査を実施し、大阪湾とその周辺海域における水質構造について分析を行った。また、昨年度の成果を踏まえ、大阪湾に流入する陸域負荷について雨天時の影響も含めた算定を行うとともに、数値モデルを用いて海域における窒素・リンの収支と循環の定量化を試みた。さらに、陸域負荷削減に対する湾内の物質循環系の応答性について解析を行った。

2. 方法

1) 大阪湾及び周辺海域における水質構造の分析

国土交通省が各季に実施している瀬戸内海総合水質調査で採取された海水試料を一部提供いただき、形態別の窒素、リン、シリカ、炭素等の項目について水質分析を行った。本研究では、2009年5月から2012年10月までに得られた水質データを用いて、各季における大阪湾とその周辺海域の水質構造について分析を行った。

2) 大阪湾へ流入する汚濁負荷の定量化

昨年度に算定対象としたリン、窒素、有機物に加え、珪藻類の一次生産に必要なケイ素も含めて、大阪湾への流入負荷量の算定を行った。算定対象期間は2009年4月から2010年3月の1年間とした。算定方法は昨年度と同様に、大阪湾への流入負荷を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流入負荷の算定を図った。

算定に当たっては、既往研究で構築した水質データベースを利用するとともに、雨天時に発生する負荷として主要河川の出水負荷だけでなく、昨年度実施したCSO実態

調査結果を基に CS0 による負荷量も考慮している。ただし、ケイ素に関しては実測データが不足していたために、大阪湾流入河川において水質調査を本年度に実施するとともに、下水道や事業場からの放流水質に関する資料の分析を行い、負荷量の算定を行った。

3) 数値モデルを用いた大阪湾の物質循環解析

三次元流動モデル ECOMSED と水質・底質モデル RCA を用いて、大阪湾における窒素・リンの収支と循環を定量化するとともに、底質の影響や陸域負荷削減に対する物質循環系の応答性について解析を行った。計算対象領域は、図-1 に示す大阪湾とその周辺海域（紀伊水道、播磨灘、備讃瀬戸東部）とし、水平方向には 1km メッシュ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。

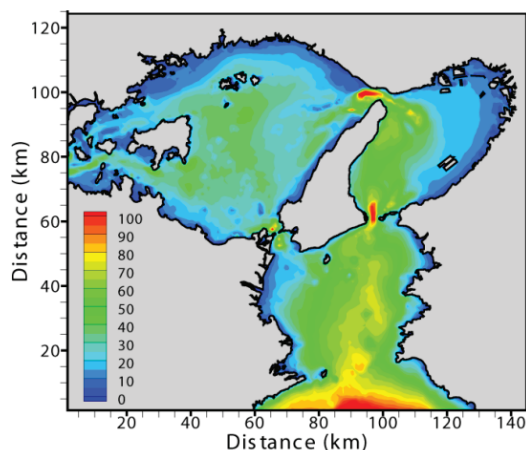


図-1 計算領域と水深分布 (m)

開境界条件には実測潮位の変動を与えると同時に、西端境界には浅海定線水質調査および瀬戸内海総合水質調査において測定された水温と塩分の月変動を、南端境界には FRA-JCOPE2 による水温と塩分の再解析値より日変動を与えた。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 データを基に与えた。陸域流入条件は 2. の算定結果を与えた。降水の海面沈着による栄養塩負荷は既往の調査研究結果を基に与えた。解析期間は 2009 年 4 月 1 日から 2010 年 3 月 31 日までの 1 年間とした。

3. 結果と考察

1) 大阪湾の T-N 分布は年間を通じて大きく変化せず、湾奥部から湾口部にかけて濃度勾配が形成されていることが確認された。また、T-N に占める有機態成分の割合は溶存無機態成分よりも大きく、海域内の窒素プールとなっていると考えられた。一方、T-P については、高温期には底泥から $\text{PO}_4\text{-P}$ が溶出するため季節によって分布が異なること、また T-P に占める有機態の割合は窒素に比して小さいことがわかった。さらに、夏季には大阪湾奥部底層に $\text{SiO}_2\text{-Si}$ の高濃度域がみられ、底泥からの溶出の影響を受けている可能性が示唆された。なお紙面の都合上、本稿では上記結果に関する図面の掲載を省略する。

2) 雨天時の影響を含めた大阪湾への流入淡水量と栄養塩負荷量の算定結果を図-2 に示す。なお、図中の値は各河口からの流出量を示しており、淀川や大和川からの取水・導水に伴う流域間の受け渡し分は、最終的な排出先の負荷量に含まれている。いずれの項目についても、大阪市内河川・寝屋川流域（図中の「寝屋川」に相当）からの負荷量が最も大きく、大阪湾への総負荷量のうち約 30～40%を占めていた。淀川河

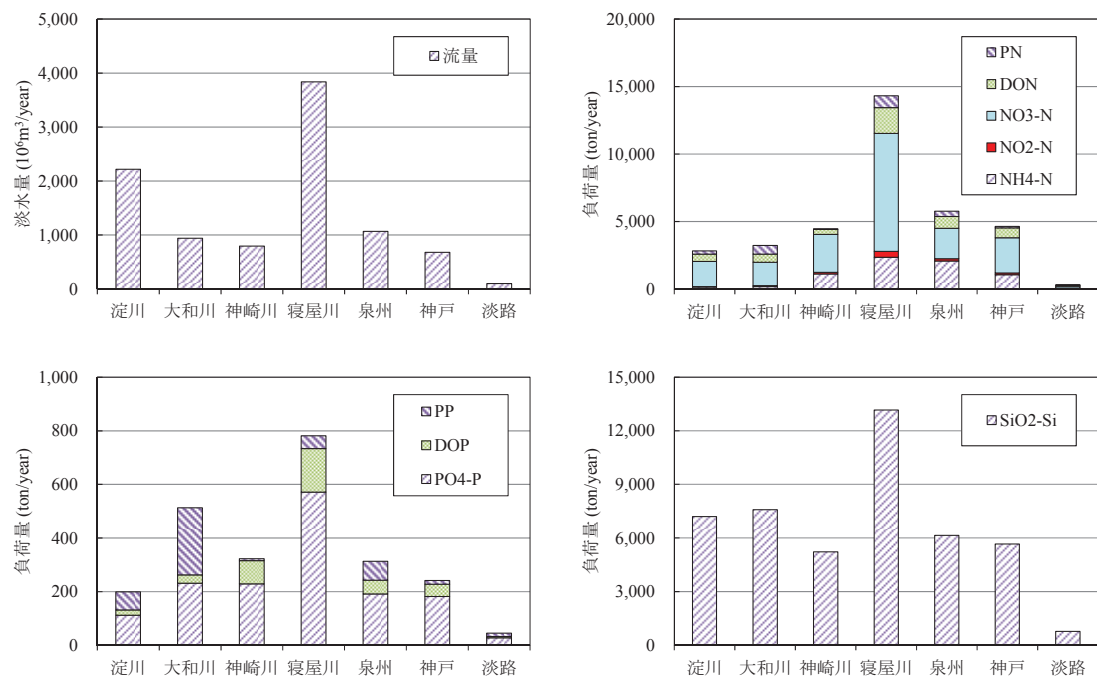


図-2 流域・地域別の大阪湾への流入淡水量と栄養塩負荷量（2009年度の年平均値）

口からの淡水流入量は全体の約 23%を占めていたのに対し、窒素、リン、ケイ素の負荷量ではそれぞれ約 9%、約 9%、約 16%であった。なお、負荷発生源別の内訳としては、T-N や T-P では流域下流部に位置する下水処理場からの放流負荷が全体の 40～50%を占めており、今後さらなる負荷削減を進めるためには下水処理能力の向上が重要であることが示唆された。

3) 大阪湾におけるリン、窒素の年間の収支と循環について、数値シミュレーション結果を図-3 に示す。無機態の窒素、リン (I-P, I-N) とともに、海峡部を通じた隣接海域との交換量や底質から供給される量は、陸域から流入する負荷量と同オーダーを示し、湾の栄養塩収支に大きく影響を及ぼしているとの結果が得られた。一方、降水を介して海面に直接供給される栄養塩量は、陸域からの流入量に比して 1～2 桁小さく、物質収支に及ぼすその影響は軽微であった。また I-N, I-P とともに、大阪湾では系外から供給される量に対して、湾内における一次生産や有機物分解等に伴う循環量が無視できない量であった。

陸域負荷量の変化に対する物質循環系の応答を調べるために、大阪湾に流入する陸域負荷量を半減させた場合のシミュレーションを行った。その結果、図-4 に示すとおり、例えば植物プランクトンによる栄養塩摂取量がリンでは約 75%、窒素では約 50%にまで減少するなど、湾全体の物質循環が非線形にかつ大きく縮小する結果が得られた。また、明石海峡を通じた播磨灘への栄養塩輸送量に着目すると、リンではほとんど変化がない一方で、窒素については 62ton/day から 9ton/day へと大きく減少する結果となり、大阪湾における負荷削減の影響は湾内だけでなく周辺海域にも及ぶ可能性が示唆された。

ただし、本研究で使用した数値モデルの再現性には改善の余地が残されており、特

に底質モデルの改良やモデルパラメータの精査については今後さらなる検討が必要と考える。

4. 結論

- 本研究で得られた主たる結論は以下の通りである。
- 1) 大阪湾へ流入する総負荷量のうち、大阪市内河川・寝屋川流域から供給される負荷量が約 30～40%と最も多くを占めていた。さらなる負荷削減のためには下水処理能力を向上させることが重要であると考えられた。
 - 2) 数値シミュレーションの結果、大阪湾においては隣接海域や底泥から供給される栄養塩量は陸域からの流入負荷量と同オーダーであり、無視できない規模であることが示された。
 - 3) 大阪湾に流入する陸域負荷量が半減した場合、一次生産が大幅に減少するなど、湾内の物質循環系は非線形にかつ大きく縮小し、その影響は隣接海域にまで及ぶ可能性が示唆された。

謝辞 本研究を進めるにあたり、海水試料提供のご高配を頂いた神戸港湾事務所、和歌山港湾事務所、神戸港湾空港技術調査事務所の関係各位に感謝の意を表します。

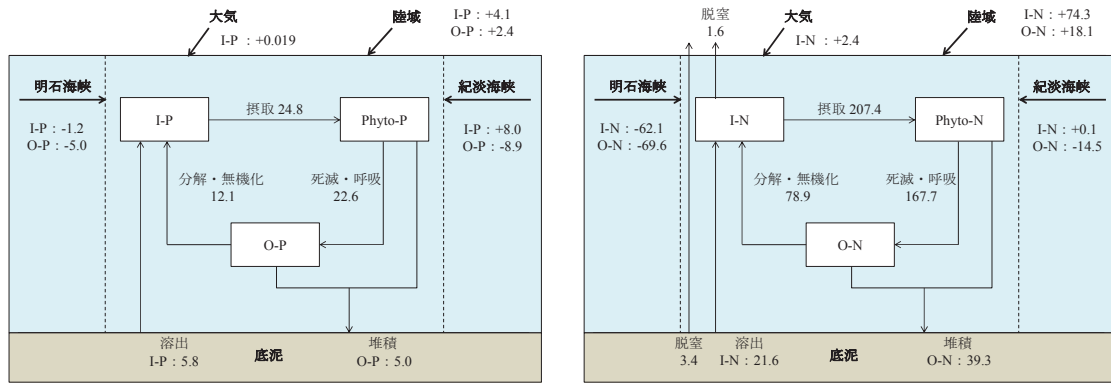


図-3 リン、窒素の収支と循環（2009年度の年平均値，単位：ton/day）
（大阪湾への流入方向を正とする）

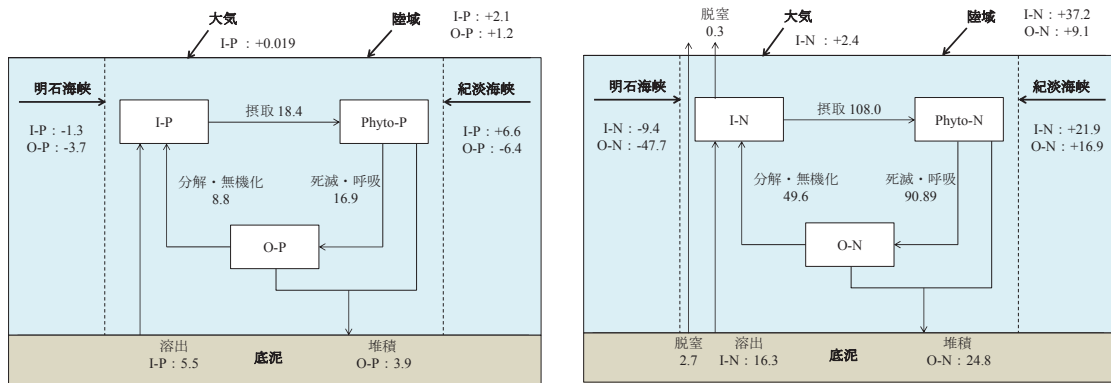


図-4 流入負荷半減に対する物質循環系の応答

