

瀬戸内海の窒素・リンの輸送と起源の現地観測

藤原建紀*・小林志保**・高志利宣***

内湾の水質汚濁の原因となる窒素・リンなどの栄養塩は、陸域から流入するだけではなく、外海からもかなりの量が供給されていることが指摘されている。瀬戸内海において密度流と詳細な栄養塩分布調査を行い、外海起源と陸起源の栄養塩の輸送経路を明らかにした。また外海から流入する栄養塩量の 30 年間の経年変化を調べた。大阪湾西部底層には、紀伊水道から外海起源の栄養塩が流入しており、この流入が大阪湾内の水質に影響を与えている。外海から大阪湾への栄養塩の流入量には大きな経年変化があり、1980 年代後半に極大があり、その後減少し、1990 年代後半には極大時の約 2 分の 1 になった。この変動が瀬戸内海の水質の長期変動に影響を及ぼしていることが示唆された。

1. はじめに

閉鎖性の内湾に多量の窒素・リン (以下 N・P) が流入すると植物プランクトンの大増殖 (赤潮)、下層海水の貧酸素化などの水質問題が起きる。このため、瀬戸内海においては、流入有機物量 (COD) の削減とともに、流入 N・P の総量規制が行われてきた。これにより河口や港内などの岸近くの水質は著しく改善された。一方、これより沖合の海域の水質には、陸上負荷の変化に対応しない変動が見られる。

藤原ら (1997) は、紀伊水道南部の横断面において、N・P 輸送量の実測を行い、外海から紀伊水道に N・P が流入していることを示した。このときの N・P 流入量は、大阪湾への陸からの負荷量に匹敵する大きさであった。また豊後水道においても、外海から N・P が流入していることを設置流速計のデータを用いて示した。

瀬戸内海の N・P の起源として、陸上負荷の他に外海起源の N・P があるとすると、両者の大きさを知っておくことは、瀬戸内海の水質管理・負荷量削減計画の立案にあたって必要なことである。また、N・P は生物生産の基礎となる一次生産の源でもあるので、N・P の起源を知ることは、瀬戸内海の水産面においても重要である。このため、大阪湾と紀伊水道の間に位置する紀淡海峡において、多くの N・P 輸送量調査が行われてきた (Hoshikura, 1999; 石塚・中辻, 1999; 中辻ら, 2002)。これらの調査により、紀淡海峡は完全な強混合ではなく、塩分成層があり、紀伊水道の高塩分水が海峡の底層から大阪湾に流入していること、全窒素が紀伊水道から大阪湾に流入していることなどが示された (中辻ら, 2002)。しかしながら、潮流が強く、複雑な地形をした紀淡海峡の実測輸送量には、調査ごとに大きなばらつきがある。

高志ら (2002) は、1 ヶ月ごと、4 年間にわたって測られた、紀伊水道を横断および縦断する断面における流

動と N・P 分布のデータから、外海から紀伊水道に流入する N・P 量が、黒潮の流路 (離岸距離) によって変動することを示した。

本研究では、以下の三つについて述べる。まず、瀬戸内海全体を縦断する断面において、N・P 等栄養塩の鉛直分布を調査すると同時に、海水の密度分布から密度流を推定し、陸起源と外海起源の栄養塩が瀬戸内海全域に運ばれる状況を明らかにする。次に、東部瀬戸内海 (紀伊水道から大阪湾) について、N・P の輸送をさらに詳しく調べる。最後に、外海から大阪湾に流入する窒素量が大きな経年変化をしていることを示し、近年の東部瀬戸内海の水質変動との関連について考察する。

2. 調査および解析

縦断栄養塩分布調査: 瀬戸内海全体を縦断する断面において、水温・塩分・濁度・クロロフィル・光強度の鉛直分布を測定した (図-1)。また各測点において 8~10 層の採水を行い、この試水を化学分析して栄養塩濃度を求めた。分析項目はアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素、粒状態窒素、粒状態炭素、リン酸態リン、溶存珪素、クロロフィル a、フェオフィチンである。この観測は 2002 年 8 月 1 日~6 日に行った。

フェリーによる連続調査: 瀬戸内海を縦断するフェリー (大阪一別府間) において毎日測定されている水温・塩分・クロロフィルの連続データおよび、15 日間隔で測定される栄養塩データ (測定間隔 30 分) を解析に用いた

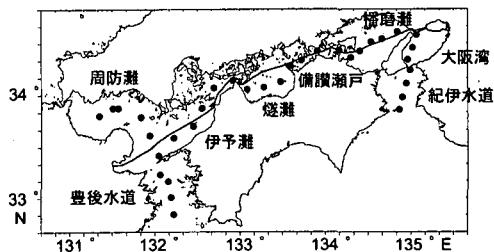


図-1 黒丸: 測点位置。実線はフェリーの航跡

* 正会員 農博 京都大学教授 大学院農学研究科応用生物科学専攻
** 京都大学 大学院農学研究科応用生物科学専攻
*** 生修 京都大学 大学院農学研究科応用生物科学専攻

(国立環境研究所原島らによる調査)。フェリーの航路を図-1の実線で示す。データ期間は、上記の観測を含む2002年7、8月である。

また、大阪府水産試験場・兵庫県水産技術センターが30年間にわたって行ってきた定線調査のデータを用いて、水質の長期変動の解析を行った。

密度流の解析：上記縦断調査で測られた密度場から密度流を求め、これと栄養塩の鉛直分布から、栄養塩の輸送を求めた。

成層の弱い海峡部と強い灘部の間には、密度の水平勾配が生じ、これが密度流を引き起こす。海峡部の混合水が灘部に密度流として進入する深度は、以下のようにして求めた。

1次元水路において密度流を駆動する力 D は水圧 P の水平勾配 $(-\partial P/\partial x)$ であり、これらは

$$P(x, z) = g\rho\zeta(x) + g\int_0^z \rho(x, z') dz' \dots\dots\dots (1)$$

$$D = -g\rho\partial\zeta/\partial x - g\int_0^z \partial\rho(x, z')/\partial x dz' \dots\dots\dots (2)$$

で表される。ここで水路の流軸方向を x 方向、鉛直下向きを z 方向とし、 ρ は海水の密度、 g は重力加速度、 ζ は静止水面から計った水面の高さである。

鉛直粘性係数を N_z とすると、流速 u は

$$D = -\rho \frac{d}{dz} \left(N_z \frac{du}{dz} \right) \dots\dots\dots (3)$$

を海底と海面の境界条件のもとに解くことによって与えられる。粘性の効果があるため、鉛直的にみると駆動力 D が最大となる水深が流速 u の最大となる水深と完全に一致するわけではないが、近似的には両水深は近い値となる(詳しくはFujiwara・Yamada, 2002)。そこで

$$\partial D/\partial z = -g\rho\partial\zeta/\partial x = 0 \dots\dots\dots (4)$$

となる水深、つまり密度の水平勾配が0となる水深を進入深度とした。なお、駆動力が海底で最大となる場合は、海底を進入層とした。

3. 瀬戸内海全域の水理構造と栄養塩分布

瀬戸内海を縦断する測線(図-1に示す)における塩分・水温の分布を図-2に示す。備讃瀬戸から紀淡海峡の間が低塩分域となっており、この領域が河川水の影響を強く受けていることを示している。紀淡海峡には、大きな塩分水平勾配がある。一方、燧灘(来島海峡—備讃瀬戸間)では、備讃瀬戸の低塩分水が上層を西に広がり、来島海峡の高塩分水が下層を東に広がる交互流(exchange flow)の形となっている。

水温分布は、海峡部で上下一様に混合されており、一方、灘部では水温成層している。灘部の上層は暖かく、下層は冷たい。この冷水は、春から夏に向かう加熱から

取り残された停滞性の孤立水塊であり、播磨灘の場合は貧酸素化している(藤原, 2001; Fujiwaraら, 2002)。

このときの栄養塩分布(例として硝酸態窒素を示す)と、密度分布から推定された、海峡部混合水の灘部への進入を図-3に示す。下図の中の点線は補償深度であり、これより上が有光層である。また海峡部の柱状の陰影部は、ここで鉛直混合されていることを表している。一般に、灘部の上層(有光層)では、栄養塩が枯渇し、貧栄養となっている。

栄養塩を高濃度で含んでいる水塊(栄養塩プール)は、紀伊水道・豊後水道の底層と、播磨灘の下層にある。これらの栄養塩プールは、いずれも硝酸態窒素・リン酸態リンを高濃度で含んでいる。一方、溶存態ケイ素は、播磨灘下層の栄養塩プールでは高濃度であるのに対し、紀伊・豊後水道の栄養塩プールでは低濃度である(図省略)。このことは、播磨灘下層の栄養塩が主に陸起源であるのに対し、紀伊・豊後水道底層の栄養塩は外海起源であることを示している。

播磨灘下層の栄養塩は、備讃瀬戸で鉛直混合されて、上層へと広がっている。このことはフェリーによる栄養塩データ(水深5mの濃度に対応)に明瞭に表れており、栄養塩濃度は備讃瀬戸で周りに比べて高濃度のピークとなっている(図-3(a))。

紀伊水道底層の栄養塩は、紀淡海峡で鉛直混合され、一部分は有光層に運ばれ、残りは大阪湾西部底層を通過して明石海峡に達し、ここで有光層に入る。一方、豊後水道底層の栄養塩は、豊予海峡において有光層に運ばれ、伊予灘の約10m層を通り、来島海峡からはふたたび下層を通る。この輸送ルートでは、伊予灘で有光層を通るため、栄養塩は枯渇し、来島海峡から燧灘の下層に入るときには極めて貧栄養となっている。このため、燧灘は上層も下層も貧栄養となっている。

4. 紀伊水道から大阪湾への輸送

紀伊水道から大阪湾西部を通り、播磨灘に至る縦断面の塩分・水温(1999年8月)を図-4に示す。大阪湾は低塩分、紀伊水道は高塩分であり、この高塩分水が大阪湾の底層に進入している。大阪湾と紀伊水道の間の塩分差と密度差は、どの年・季節にも安定して存在している。紀伊水道の底層には高塩分低温の海水(①)があり、この海水が外海系の高栄養塩水である。一方、②の海水は高塩・高温であり、外海上層の黒潮系貧栄養水である。③は低塩分の大阪湾水である。

T-Sダイアグラム(図-5)では、この海域の水温・塩分値は、上記の①、②、③の水塊で囲まれる三角形の中にあり、この海域の海水がこの三つの水塊の混合によって表されることを示している。図-4(c)は、T-Sダイア

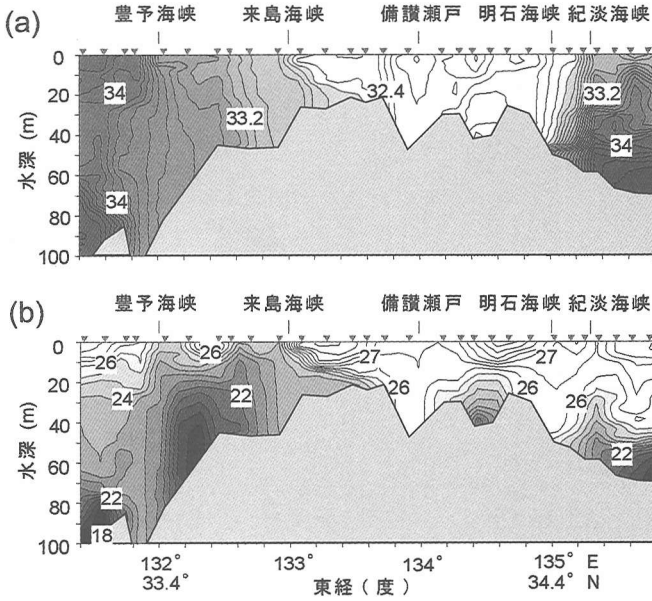


図-2 瀬戸内海縦断線上の (a) 塩分分布と (b) 水温分布, 2002年8月1~6日

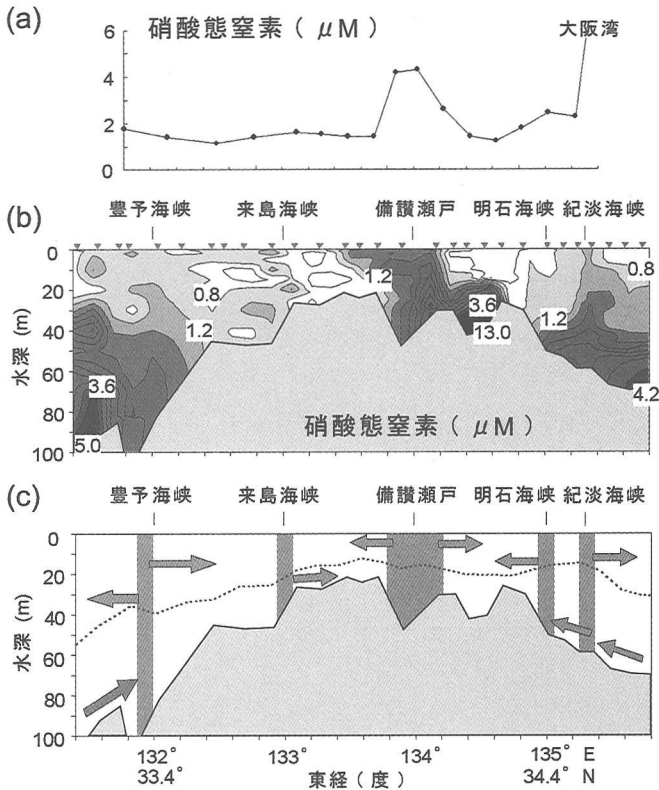


図-3 瀬戸内海縦断線上の (a) フェリーによる硝酸態窒素; 2002年7月30, 31日, (b) 硝酸態窒素, (c) 密度流, 点線は補償深度

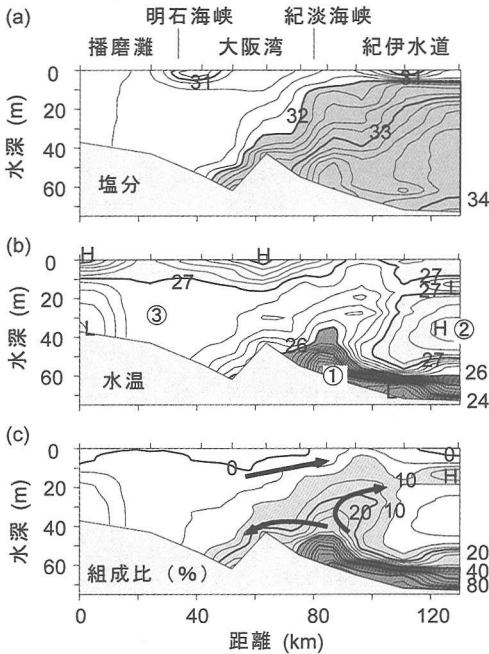


図-4 紀伊水道から播磨灘に至る (a) 塩分分布, (b) 水温分布, (c) 紀伊水道底層水の含まれる割合, 1999年8月

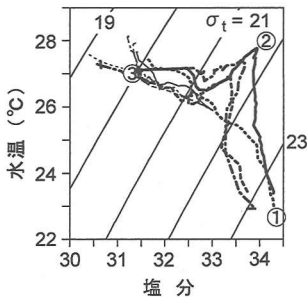


図-5 T-Sダイアグラム, 図-4の水温, 塩分に対応

グラムから求めた, 水塊①の含まれる割合である。①の海水は, 紀淡海峡で混合を受けて, 一部は紀伊水道上層に入り, 一部は大坂湾底層に入っている。

大坂湾底層の水温と硝酸態窒素 (以下 NO_3) の濃度 (2001年8月) を図-6に示す。低温・高栄養塩の海水が, 紀淡海峡から大坂湾西部に入り, 明石海峡へと続いている。大坂湾北西部には時計回りの沖ノ瀬環流 (図-7) があるため, 淡路島東岸沿いの流れは常に北流が卓越し, 潮時にかかわらず, ほとんどの時間北流となっている (Fujiwaraら, 1994)。

紀伊水道から大坂湾に流入する海水①の輸送ルートを図-8に示す。大坂湾西部底層を通過して明石海峡に入り, ここで上下一様に混合される。図中の丸印の地点では, 常に北に向かう流れがあり, 川のように流れているので,

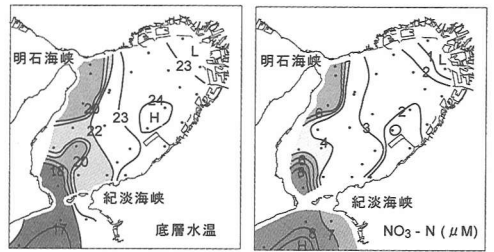


図-6 大坂湾底層の水温 (左) と硝酸態窒素 (右), 2001年8月

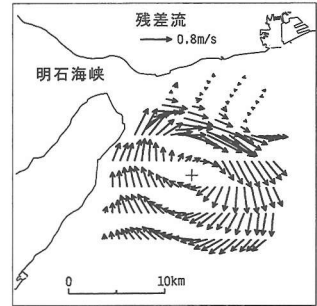


図-7 大坂湾北西部の残差流

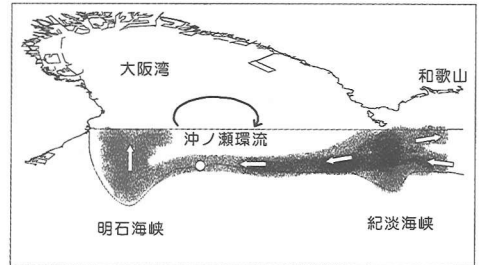
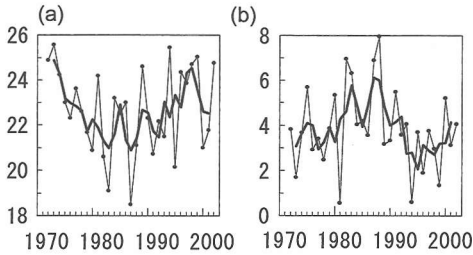


図-8 紀伊水道から流入した栄養塩の流路

この点で栄養塩の濃度を測ると, 外海から大坂湾に入る栄養塩フラックスをモニターすることができる。

5. 大坂湾の長期的水質変動に及ぼす影響

上記の地点 (図-8中の丸印) における, 8月の底層水温・ NO_3 の長期的変遷を図-9に示す (大阪府水産試験場の浅海定線調査データ)。年ごとの変動は, そのときの黒潮離岸距離と対応しており, 離岸期に低温・高 NO_3 となっている。しかし, さらに長期的な変動があり, 1980年代後半に高 NO_3 となり, 1988年にピークとなった後, 急速に低下し, 1995年以降はピーク期の2分の1以下となっている。31年間を通じてみた各年の NO_3 濃度は, 水温と逆位相でよく対応しており (相関係数 $R = -0.81$, $n = 31$), NO_3 の変動が外海の変動に起因していることを示唆している。



図一9 大阪湾北西部の底層(図一8丸印)における(a)水温、(b)硝酸態窒素(μM)の時系列。太線は3年間移動平均

大阪湾東部下層の8月の NO_3 の変動は、大阪湾西部下層の変動と類似している。一方、東部上層の変動パターンは異なっている。このことは、陸上負荷の影響を強く受けた大阪湾東部と、外海起源の負荷の影響を受けやすい西部では、水質変動様式が異なっていることを示している。1980年代後半の窒素濃度のピークは、中東部瀬戸内海のいくつもの海域で見られる。瀬戸内海の水質変動を考えるとときには、陸上負荷変動とともに、大阪湾西部を通ってくる外海起源負荷の変動も考慮する必要があるであろう。

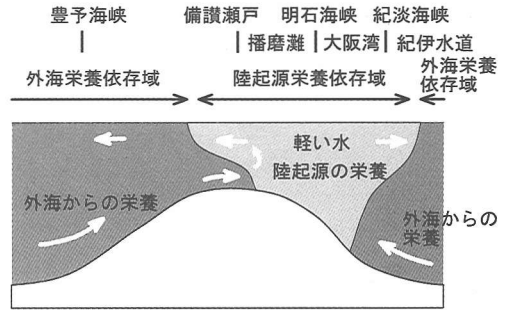
6. まとめ

瀬戸内海は、陸起源の栄養塩の影響をおもに受けている海域と、外海起源の栄養塩に支配されている海域に分かれた(図一10)。紀伊・豊後水道の底層に外海起源の栄養塩源があり、播磨灘下層には主に陸起源の栄養塩のプールがある。

瀬戸内海にはふたつの大きなエスチュアリー循環流形の流れがあり、東部瀬戸内海(播磨灘以東)では上層で流出(東流)、下層で流入(西流)となっている。西部瀬戸内海は上層で西に向かって流出、下層で東に向かって流入となっている。この大きな鉛直循環流の途中に、海峡部に対応して、強混合域がある。備讃瀬戸より東の上層水は東に、西の上層水は西に流れる特徴は、漂流ハガキによる流動調査結果とよく一致している(Nakata・Hirano, 1990)。

外海下層にある栄養塩は、この大きなエスチュアリー循環流に載って瀬戸内海中央部(備讃瀬戸海域)へと運ばれる。途中、明石海峡と豊予海峡で鉛直混合されて上層に栄養塩が供給される。備讃瀬戸はふたつのエスチュアリー循環の最奥部となっており、ここで下層の海水は上層(有光層)に運ばれ一次生産を引き起こす。

紀伊水道底層に入った外海起源の栄養塩は大阪湾西部底層に入り、その流入量には大きな経年変化がある。こ



図一10 瀬戸内海の水質区分と栄養塩の輸送流路

の変化が大阪湾の水質変動にも影響を与えている。

謝辞：縦断栄養塩分布調査は、弓削商船高等専門学校と共同で弓削丸を使って行ったものである。また、これらの栄養塩分析では兵庫県水産技術センターの堀 豊主任研究員の指導を受けた。国立環境研究所の原島 省博士からはフェリーデータを、大阪府水産試験場の中嶋昌紀主任研究員からは長期にわたる浅海定線調査のデータを提供して頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 石塚正秀・中辻啓二(1999): 紀淡海峡における海水交換と物質輸送過程の解明. 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1036-1040.
- 高志利宣・藤原建紀・住友寿明・竹内淳一(2002): 外洋から紀伊水道への窒素・リンの輸送. 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1076-1080.
- 中辻啓二・西田修三・金漢九・山中亮一(2002): 紀淡海峡における残差流と物質輸送の現地観測. 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1071-1075.
- 藤原建紀(2001): 灘・海峡系における海洋構造と流動. 海と空, 77巻, pp. 41-46.
- 藤原建紀・宇野奈津子・多田光男・中辻啓二・笠井亮秀・坂本 亘(1997): 外洋から瀬戸内海に流入する窒素・リンの負荷量. 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1061-1065.
- Fujiwara, T., H. Nakata and K. Nakatsuji (1994): Tidal-jet and a Vortex-pair Driving of the Residual Circulation in Tidal Estuaries, Continental Shelf Research, Vol. 14, pp. 1025-1038.
- Fujiwara, T., T. Takahashi, A. Kasai, Y. Sugiyama, and M. Kuno (2002): The Role of Circulation in the Development of Hypoxia in Ise Bay, Japan, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 54, pp. 19-31.
- Fujiwara, T. and Y. Yamada (2002): Inflow of Oceanic Water into a Coastal Embayment (Tokyo Bay) and Generation of Subsurface Hypoxic Water Mass, J. Geophysical Research, Vol. 107, No. C5, 13, pp. 1-10.
- Hoshika, A., T. Tanimono and Y. Mishima (1999): Current and Material Transport at Tomogashima Strait, Japan, J. Oceanography, Vol. 55, pp. 427-437.
- Nakata, H. and T. Hirano (1990): A Drift-Card Experiment in the Seto Inland Sea, Japan, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 30, pp. 141-152.