

外洋から瀬戸内海に流入する窒素・リンの負荷量

藤原建紀* ・宇野奈津子** ・多田光男***
中辻啓二**** ・笠井亮秀***** ・坂本 亘*****

1. はじめに

人間活動で生じる窒素・リン負荷によって閉鎖性海域は富栄養化する。人口の集中する内湾、例えば東京湾・伊勢湾・大阪湾では、陸起源の窒素・リンが流入し、湾奥部では、一年を通じて赤潮が起こる。今まで、内湾に流入した窒素・リンのほとんどは海水交換を通じて外洋に運ばれていると考えられてきた。その根拠となる算定方法としては、内湾の窒素・リン収支を計算し、その残差を外洋との交換量にあてることや、内湾をいくつかのボックスに分けて、各ボックスの平均の窒素・リン濃度と、塩収支から計算されたボックス間の交換係数を掛けて計算する方法が用いられてきた(門谷ら, 1991; 柳ら, 1985)。しかしながら、これらの輸送量を実測により検証することは今まで行われていない。

本報では、瀬戸内海と外洋をむすぶ水路である紀伊水道・豊後水道において窒素・リン輸送量(フラックス)の直接測定を行った結果について報告する。この現地調査により、従来信じられていたのとは逆に、外洋から瀬戸内海に窒素・リンが流入し、その輸送量は陸起源の負荷をしのぐ大きさであることが明らかになった。

2. 豊後水道

2.1 調査

豊後水道南部を横断する測線上の3測点にアンデラー流速計を設置し(測点1, 3: 4層, 測点2: 6層), 15日間の流速・水温・塩分の時系列データを得た(図-1)。観測期間は1982年7月28日から8月12日であり、この間、STDによる断面測定を毎日行った。また大分県および愛媛県水産試験場には沿岸定線観測時、底層までの水温・塩分測定、栄養塩分析用採水をお願いした。試水は採水後ただちに濾過し、無機3態窒素、全溶存窒素(TDN)の分析を行った。

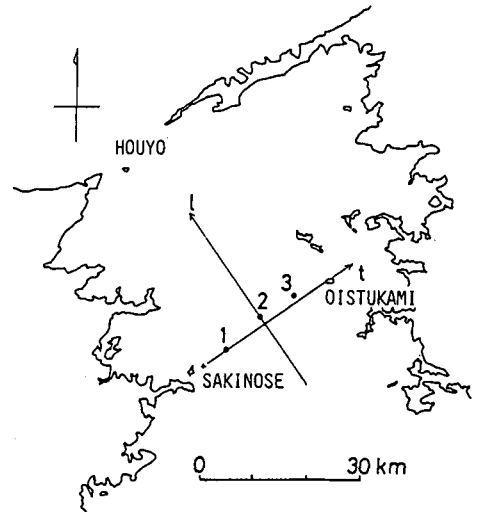


図-1 豊後水道の測点位置

2.2 結果

豊後水道中央の下層には、外洋とつながる低温・高塩分水があり、上層との水温・塩分差はそれぞれ 7°C , 1 psuである。一方、豊予海峡では成層が弱く、10 m層と底層の水温・塩分差はそれぞれ 1.6°C , 0.7 psuである。鉛直平均すると、豊予海峡は外洋側に比べて低塩・高温となっている。

図-2に横断面の密度分布(8月4日)と、15日間平均流(残差流)の断面に垂直な成分を、断面の南側から見た図を示す。陰影部は豊予海峡と同じ水温・塩分の海水が存在する領域である。この領域は西側中層に集中するとともに、ここでは流出(最大流速 12 cm/s)となっている。

これらをまとめ、豊後水道の流れの構造を推定したのが図-3であり、右は地球自転効果がない場合、左はある場合の密度分布と流系である。水道部は成層しており、上層、下層の密度をそれぞれ ρ_1 , ρ_3 とする。1は縦断方向であり、内海側の端は豊予海峡に対応し、激しい混合により上下、水平方向に一様化している。この部分の海水(陰影部)の密度を ρ_2 とする($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$)。この海水

* 正会員 農博 京都大学助教授 農学研究科海洋生物環境学
.. 京都大学 農学研究科海洋生物環境学
... 弓削商船高等専門学校助教授 商船学科
**** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科
***** 農博 京都大学助手 農学研究科海洋生物環境学
***** 水博 京都大学教授 農学研究科海洋生物環境学

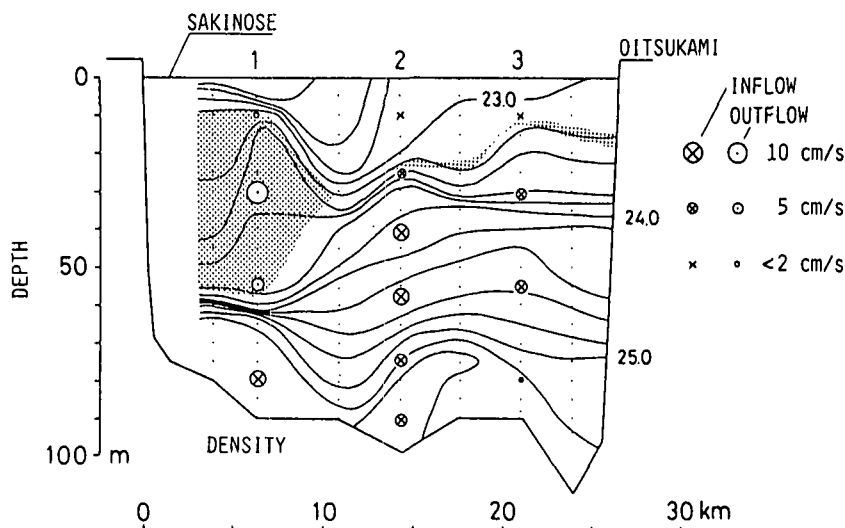


図-2 断面密度分布と平均流分布

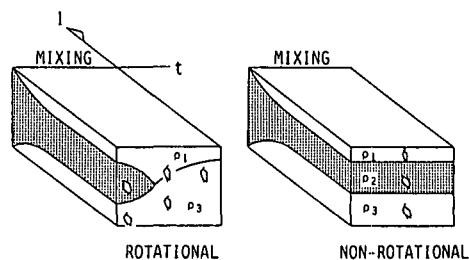


図-3 豊後水道の密度分布と平均流の模式図

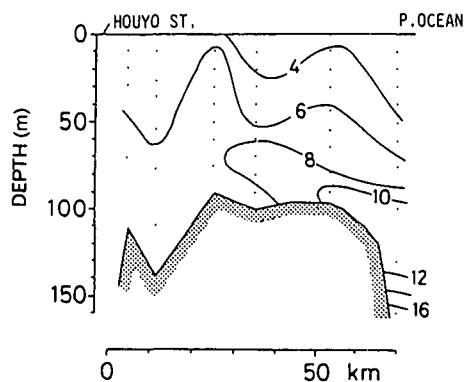


図-4 縦断面の溶存態窒素分布 (μM)

が水道部の中層を流出し3層流となる。自転効果がなければ右図のようになるのに対し、自転効果があると西側中層を流出する。このモデルに現地の代表的な値を入れて摩擦なしとして求めた密度流の速度は14 cm/sとなり現地と同程度となる。

縦断面のTDNの分布を図-4に示す。溶存有機態窒

素の場所的な違いは少なく(ほぼ一様に $2\mu\text{M}$)、TDNの分布形はほぼ $\text{NO}_3\text{-N}$ によっている。太平洋側の100 m以深には、低温で高TDNの海水があり、これが豊後水道中央部まで続いている。また、水温とTDNの分布形は相似であり、両者の相関係数の絶対値は0.84と高い値になっている。このため、水温からTDNの値を算定することができる。なお、このような両者間の高い相関は、神戸海洋気象台や水産試験場による豊後水道・紀伊水道の多くの調査結果でみられる。

3. 紀伊水道

3.1 調査

紀伊水道における窒素・リン輸送量調査は1995年8月23, 24日に、紀伊水道南部断面において弓削商船高等専門学校の練習船“弓削丸”(240トン)を用いて行った(図-5)。紀伊水道は大阪湾と太平洋を結ぶ水道である。紀伊水道の縦断線(測点1~10)と、伊島と日ノ御崎を結ぶ横断線(測点A~B; 距離18.5 km)においてSTD(アレック電子製)を用いた水温・塩分鉛直分布調査および採水を行った。採水試料は船上で直ちに濾過し(GF/Fフィルター)、分析時まで凍結保存した。

海水の分析項目は、懸濁物量(SS)、粒状態窒素(Partic. N)、全溶存窒素(TDN)、硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、リン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)である。SSおよびPartic. Nについては中国工業技術研究所で、またTDNについては兵庫県立公害研究所で分析して頂いた。

流速は、船に機装したADCP(RD Instruments社製、ブロードバンド、300 kHz)により水深2 mごとの値を測定した。弓削丸は伊島と日ノ御崎を結ぶ測線を25時間に

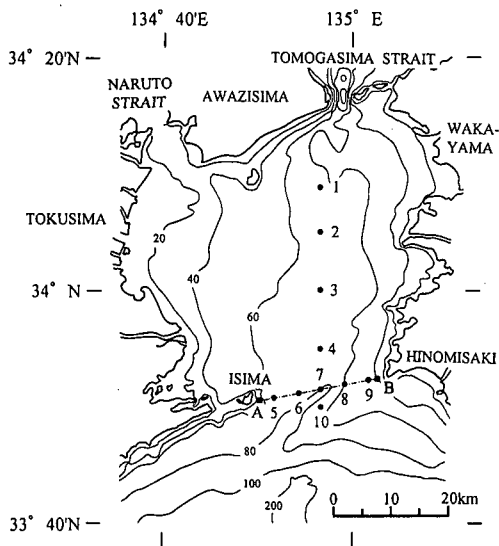


図-5 紀伊水道の測点位置

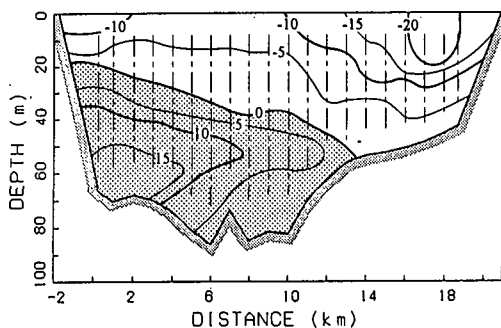


図-6 残差流の断面に垂直な成分

わたって往復し、測線上の各測点では18回の流速データを得た。これらの流速データを調和解析し、残差流・日周潮流・半日周潮流成分に分解した。

3.2 結 果

伊島一日ノ御崎断面における残差流を図-6に示す。この図は南側から見た図であり、流速は断面に垂直な成分を示し、流入が正である(流入部に陰影がかけてある)。また図-7, 8, 9は、それぞれ密度、硝酸態窒素およびリン酸態リンの濃度分布である。

上層は低塩分・高温、下層は高塩分・低温となっており、上層と下層の密度差は大きく成層が強い。栄養塩の濃度(図-8, 9)は、上層で低く、下層で高くなっている。上層の低塩分・低栄養塩水は流出しており、一方、下層からは外洋系の高塩分・高栄養塩水(塩分34.5 psu以上)が流入している。このため、栄養塩の断面フラックスは外洋から紀伊水道への流入となる。また、この上層の流出と下層の流入は、シアード散により塩分を内湾

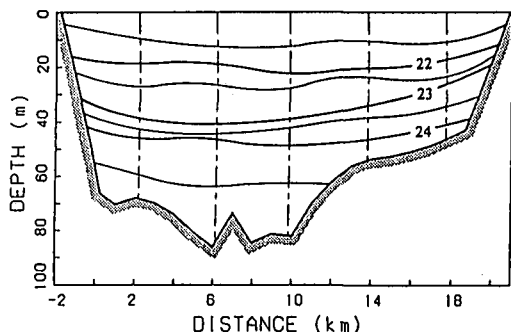


図-7 横断面の密度分布 (σ_t ; kg/m³)

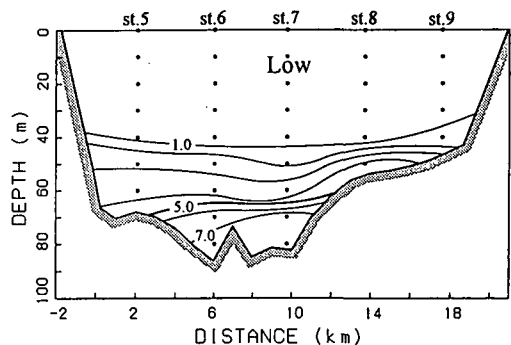


図-8 硝酸態窒素 (μM)

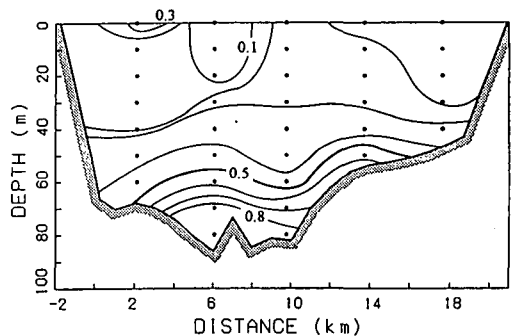


図-9 リン酸態リン (μM)

に運ぶエスチュアリー循環流である(藤原, 1997)。

4. 窒素・リン輸送

4.1 輸送量の計算方法

断面を通過する物質の流量(フラックス)の算定について以下に説明する。物質の濃度を $C(x, t)$ 、断面に垂直な流速成分を $V(x, t)$ とし、フラックスを $F(x, t)$ 、断面平均を $\langle \rangle$ 、時間平均をバーで表す。ここで引数 x は場所

の変数, t は時間の変数であることを示す。濃度 C と流速 V , フラックス F は以下のように分解される。

$$C(x, t) = \langle \bar{C} \rangle + \bar{C}_d(x) + C'(x, t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V(x, t) = \langle \bar{V} \rangle + \bar{V}_d(x) + V'(x, t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\langle \bar{F} \rangle = \langle \bar{C} \bar{V} \rangle = \langle \bar{C} \rangle \langle \bar{V} \rangle + \langle \bar{C}_d \bar{V}_d \rangle + \langle \bar{C}' \bar{V}' \rangle \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、添字 d は空間偏差であることを示す。式(1), (2)の右辺第1項は時間平均の断面平均であり、第2項は時間平均値の空間偏差である。(3)式の右辺第1項は移流であり、第2項は残差流のシアーによるフラックスである。第3項は時間変動成分によるフラックスであり、この中には潮流によるフラックスと高周波の乱れによるフラックスが含まれている。第2項と3項をあわせたものが分散フラックスである。

成層が強く、エスチュアリー循環流が発達したエスチュアリーでは、第2項による輸送が第3項よりもずっと大きくなり、第3項は無視できるようになる(Hansen and Rattray, 1966)。豊後水道における(3)式を用いた塩輸送の計算においても分散フラックスは第2項のみで表現できる大きさであった。豊後水道よりも成層が強く淡水流入量も大きな紀伊水道では、さらに第2項が支配的であると考えられる。また紀伊水道における塩分・栄養塩などの縦断面分布においても、水平的な濃度勾配は小さく、潮流流程距離での濃度の違いはほとんどない。このため濃度の時間変動自体が小さく、第3項が小さいことが、ここからも評価される。

移流項と残差流のシアー分散項の比較においては、物質が塩であるか、図-8, 9にみられるような分布をする栄養塩であるかによって違いがある。塩分分布が定常であるエスチュアリーにおいては(3)式=0であり、移流項と分散項は同じ大きさ、逆符号となる。

以下に移流項とシアー分散項の大きさを見積もる。塩の輸送の場合は、断面平均濃度/濃度偏差は30のオーダーであり、断面平均流速/流速偏差がこれの逆数(1/30)のオーダーとなることにより、移流項とシアー分散項がバランスしている。

栄養塩などの場合、上記より断面平均流速/流速偏差は1/30のオーダーであり、断面平均濃度/濃度偏差は1のオーダーである。このため栄養塩フラックスにおける移流項とシアー分散項の比は1/30のオーダーとなる。つまり、栄養塩輸送はシアー分散項によって行われる。

また、シアー分散による輸送において、水平シアーと鉛直シアーの寄与の割合についても濃度の分布形が影響をおよぼす。後に述べるように、栄養塩の濃度が上層(有光層)で低く、下層(無光層)で高いのは第一義的には光の影響であり、栄養塩濃度はおもに深さによって変わる。フラックスは濃度と流速の積を断面積分したもので

表-1 外洋から紀伊水道に流入するフラックス (トン/日)。TN は全窒素, TDN は全溶存窒素, Partic. N は粒状態窒素。

	TN	TDN	NO ₃ -N	NO ₂ -N	Partic. N	PO ₄ -P
Flux	172	206	183	21	-34	34

あるので、物質の濃度が水深のみで決まっている場合、フラックスに寄与するのは流速の鉛直シアーであり、水平シアーは寄与しない。

エスチュアリーにおける塩輸送の研究を歴史的にみると、Hansen and Rattray (1966) などによる鉛直シアー(エスチュアリー循環)による輸送から研究が始まり、次にFischer (1976) などにより水平シアーの重要性が指摘されるようになり、その後は実地形数値モデルによる計算となってきた。しかしながら上記で示したように、栄養塩の輸送においては、エスチュアリー循環の役割を再評価する必要がある。

4.2 実測輸送量

紀伊水道断面における流速分布と濃度分布の積から求めたフラックスを表-1に示す。粒状態窒素の流出を除いては、すべて外洋から紀伊水道へ流入する結果となった。陸上から大阪湾への窒素・リンの負荷量はそれぞれ180トン/日、20トン/日と推定されている(門谷ら, 1991)。外洋からの全窒素(TDN+Partic. N)の流入負荷は陸上負荷と同程度であり、リン(PO₄-P)は陸上負荷よりも大きい量である。

豊後水道においては、流速計で得た残差流と、水温から換算したTDNの値からTDNのフラックス(全溶存窒素: 66トン/日の流入)を得た。

5. おわりに

本報で示された外洋からの栄養塩の流入は、エスチュアリー循環流と、上層における栄養塩が低濃度である(枯渇している)という二つの現象が共存することにより引き起こされる。

エスチュアリー循環流は、淡水の流入する海域における密度流の一種であり、上層の低塩分水が流出し、下層から高塩分水が流入する形の鉛直循環流である。この循環は淡水の流入する内湾の塩分分布を決める最も基本的な流動である(藤原, 1997)。

一方、栄養塩濃度については、河川などからの栄養塩供給の大きな領域を除くと、成層海域の上層では低濃度となっている。これは、光の豊富な上層(有光層)の栄養塩は植物プランクトンによって消費されて枯渇しているのに対し、下層(無光層)には有機物の分解などで供給された栄養塩が豊富にあるからである。神戸海洋気象台により、紀伊水道・豊後水道において栄養塩濃度の鉛

直分布が長年にわたって測定されているが、成層期上層の栄養塩の枯渇はどのデータにも現れている(例:神戸海洋気象台, 海洋速報, No. 121, 125, 129, 130)。

この二つの現象は成層した内湾ではごく普通にみられる現象であるので(例:藤原ら, 1997), 外洋性栄養塩の流入は特殊なものではなく, 多くの内湾に共通する一般的な現象であると考えられる。

夏季の瀬戸内海には, 紀伊水道から約 170 トン/日の, 豊後水道から約 70 トン/日の窒素が外洋から流入している。一方, 陸上からは 500 トン/日の窒素が流入している(李ら, 1995)。これらの窒素は瀬戸内海のどこに行っているのだろうか? 多くの可能性が考えられるが, いずれも, 総計約 740 トン/日の窒素の行方を説明するには不十分である。著者らは大阪湾を囲む友ヶ島水道・明石海峡, 大阪湾を横断する神戸一貝塚線において窒素・リン輸送量の調査を季節を変えて繰り返し行い, この謎に答えようとしている。

謝辞: 紀伊水道の観測を行うにあたり, 弓削商船高等専門学校, 京都大学防災研究所, 大阪大学工学部土木工学科ならびに京都大学農学研究科海洋生物環境学分野の方々, また栄養塩等の分析にあたっては兵庫県立公害研究所, 中国工業技術研究所, 京都大学農学研究科海洋環

境微生物学分野の方々のご協力を頂いた。徳島県水産試験場, 和歌山県水産試験場, 神戸海洋気象台海洋課からは観測資料を提供して頂いた。豊後水道観測では, 大分県水産試験場, 愛媛県水産試験場, 中国工業技術研究所の方々のご協力を頂いた。また, 本研究には日本生命財団の研究助成を受けた。ここに記して謝意を示す。なお, 豊後水道観測は, 著者の一人が中国工業技術研究所に在職中に行ったものである。

参 考 文 献

- 藤原建紀 (1997): 淡水影響域におけるエスチュアリー循環流と生物・物質輸送, 海と空, 73, pp. 23-30.
- 藤原建紀・福井真吾・笠井亮秀・坂本 亘・杉山陽一 (1997): 伊勢湾の栄養塩輸送と亜表層クロロフィル極大, 海と空, 73, 33-39.
- 門谷 茂・三島康史・岡市友利 (1991): 大阪湾の富栄養化の現状と生物による N と P の循環, 沿岸海洋研究ノート, 29, pp. 13-27.
- 李 寅鉄・浮田正夫・関根雅彦・中西 弘 (1995): 瀬戸内海への栄養塩類の流入負荷量解析と物質収支に関する研究, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 1106-1110.
- 柳 哲雄・芝木秀之・武岡英隆 (1985): 播磨灘, 大阪湾の塩分, 窒素, リン収支, 沿岸海洋研究ノート, 22, pp. 159-164.
- Fischer, H. B. (1976): Mixing and dispersion in estuaries, Ann. Rev. Fluid Mech., 8, pp. 107-133.
- Hansen, D. V. and M. Rattary (1966): New dimensions in estuary classification, Limnol. Oceanogr., 11, pp. 319-325.