

紀淡海峡における残差流と物質輸送の現地観測

中 辻 啓 二*・西 田 修 三**・金 漢 九***・山 中 亮 一****

水質汚濁の原因となる窒素やリンなどの栄養塩は、陸域からの流入ばかりではなく外海からかなりの量が供給されていることが指摘されている。大阪湾においても窒素やリンが底層を通じて湾内に大量に流入するという報告がある。著者らは大阪湾と外海の出入り口である紀淡海峡において、海峡断面を通じて行われる水交換と物質輸送の定量的評価のために、1999 年より流動と水質の 1 潮汐連続観測を実施してきた。本論文では観測データを基に、流動と水質の時空間変動特性を明らかにするとともに、残差流構造と水質の断面輸送量の定量的評価を実施し、その特性についても考察を行った。

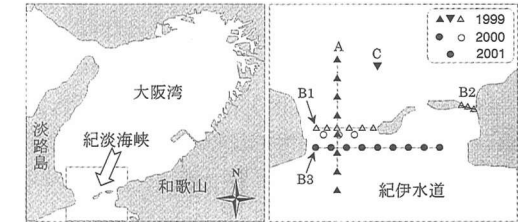
1. はじめに

内湾の水質悪化の原因は、これまで陸域起源の汚濁物質流入によるものとされてきた。そのため、本研究が対象とする大阪湾(図—1 参照)でも、COD や窒素、リンなどに代表される陸域起源の汚濁物質の総量規制が実施され、水質改善において一定の成果をおさめてきた。しかし、赤潮などの水質被害はその後も毎年のように発生している。この原因として、底泥からの栄養塩の溶出の影響(韓, 2001)と外洋からの窒素やリンの流入の影響が近年の研究により指摘されている。とくに、外洋から紀伊水道への流入量は、全窒素で陸域負荷と同程度、リンでは陸域負荷より大きい値であるとの報告(藤原ら, 1997)もあり、外洋からの供給を定量的に把握することは、大阪湾の水環境の改善には不可欠である。しかし、藤原ら(1997)の観測は紀伊水道で実施されており、算定された栄養塩の流入は北方に位置する大阪湾と播磨灘のいずれにも影響を及ぼす可能性がある。すなわち、大阪湾と外洋との物質輸送について未だ不明な点が多く残されていると言える。大阪湾への実質的な栄養塩の輸送を明らかにするためには、大阪湾と紀伊水道の境界に位置する紀淡海峡で現地観測を実施する必要がある。そこで、筆者らは紀淡海峡に設定した複数の観測線において 1999 年から 2001 年までの毎年夏季に現地観測を実施した。とくに 2001 年の観測では、和歌山県水産試験場所属の観測船「きのくに」を使用し、高精度の水質観測を実施することができた。本研究では、観測データを基に紀淡海峡の流動と水質の時空間変動特性と残差流構造を明らかにするとともに、海峡を通じて行われる物質輸送を定量的に明らかにし、それらの特性についても考察を行う。

2. 現地観測の概要

紀淡海峡において流動と水質の断面観測を実施した。

* 正 会 員 工 博 大阪大学教授 工学研究科土木工学専攻
** 正 会 員 工 博 大阪大学助教授 工学研究科土木工学専攻
*** 学 生 会 員 大阪大学工学研究科土木工学専攻
**** 正 会 員 博(工) 大阪大学工学研究科土木工学専攻



図—1 紀淡海峡周辺海域と観測位置

表—1 現地観測の詳細

年	1999 年	2000 年	2001 年
日時	8 月 4 日 5:00~18:00	8 月 7 日 5:00~18:00	8 月 10 日 5:00~18:00
観測線	B 1 (8 往復) B 2 (16 往復) A (3 往復)	B 3 (東側: 5 往復, 西側: 6 往復)	B 6 (6 往復)
観測項目	流速 水温・塩分	水流 水温・塩分 クロロフィル a	流速 水温・塩分 クロロフィル a T-N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, NH ₄ -N, T-P, PO ₄ -P
海象条件	小潮	小潮	中潮
気象条件	晴天・弱風	晴天・弱風	晴天・無風

観測は 1999 年から 2001 年までの毎年夏季に図—1 に示す観測線で実施した。観測の詳細は表—1 にまとめて示した。なお、流速の測定には ADCP (300 kHz, 600 kHz)、水温・塩分とクロロフィル a の測定にはクロロフィルセンサー付き STD を用いた。2001 年に実施した水質測定には、観測船「きのくに」の多項目水質測定システム(オクトパスミニシステム)(写真—1 参照)を使用した。この測定システムには多筒式採水器が取り付けられ、任意水深での採水が可能であるため、これまで強い潮流により観測が困難であった海峡部において、精度の高い断面観測が可能となった。

3. 流動構造とその変動特性

3.1 流動特性

B3 観測断面における流速の観測結果を図—2 に示す。縦軸は水深、横軸は淡路島からの距離、図中の塗りつぶした領域は海底地形を表している。水平流速はベクトル

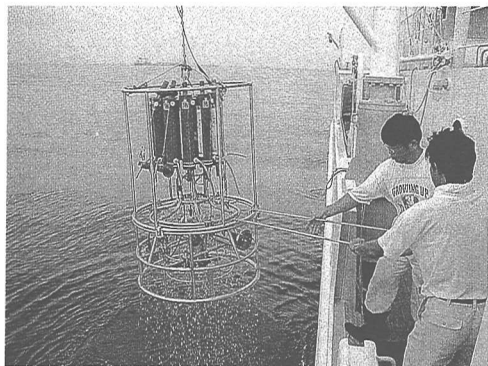


写真-1 多項目水質測定システム

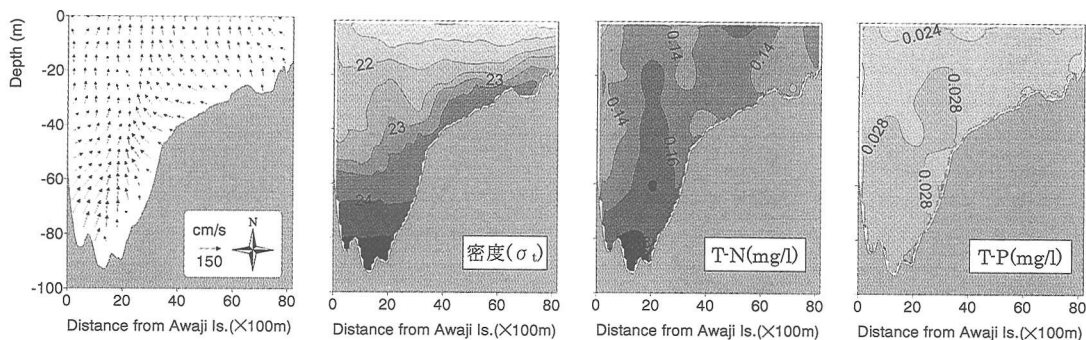
で示し、流向は図中の方位に対応している。なお、図-2には水質の断面分布もあわせて示しているが、これらの解析結果については次節で述べる。

図-2 (a) に示す北流最盛時は、全領域で北流が生起しているのがわかる。最大流速は淡路島から約2 kmの下層、水深60 mで約1 m/sを有するものの、上下層間における流速の顕著な差は認められない。東方の浅水域では、島の影響により僅かながら西向き成分の存在もみてとれる。

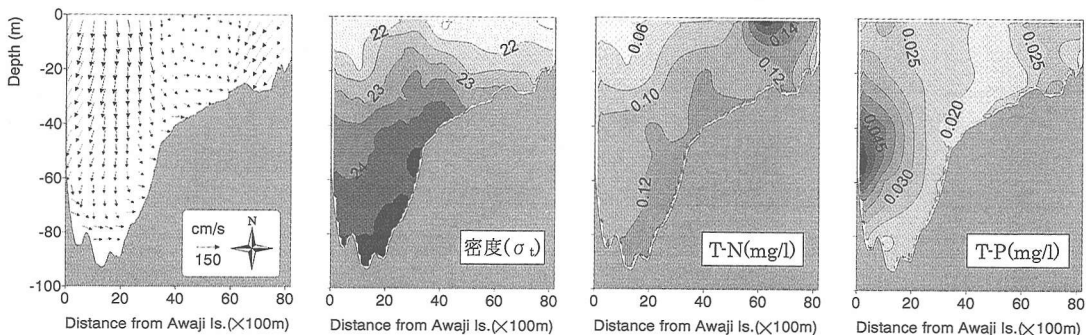
一方、図-2 (b) に示す南流最盛時の流動構造は北流時と異なり、横断面内で変化が認められる。淡路島から約4 kmまでの海域では底層を除いて南流が生起しており、最大流速も表層近傍で1 m/s以上と北流時より大きな流速を示している。淡路島から4 kmから6 kmまでの海域では強い流れは存在しないものの水深20 m以浅で弱い時計回りの循環が認められる。淡路島から7 km以東の和歌山寄りの海域では、南西流が全層にわたり認められる。このように、南流時には東西方向に流動構造が大きく変化していた。この原因としては図-1に示したとおり、B3観測線の北方には2つの島が存在しており、この地形の影響を受けたためと考えられる。とくに、B2観測線がある加太の瀬戸からは、大阪湾の東岸を南下する水塊の大きな流出が認められる。このように、紀淡海峡周辺の流動構造は1潮汐間の時空間変動が大きく、非対称構造を有している。

3.2 残差流

1潮汐の観測結果を基に算出されたB3観測断面における残差流を図-3に示す。残差流は、淡路島から約3 kmまでの海域では水深60 m以浅で南流、それ以深で北東流の2層構造を有している。淡路島から3 kmから6 kmまでの海域では、全層で北西流、それ以東では西流が卓



(a) 北流最盛時 (12:00)



(b) 南流最盛時 (17:00)

図-2 B3観測断面における流動構造と水質分布 (2001年)

越しており、残差流構造は横断および水深方向に複雑な多重構造を有している。このような残差流構造は石塚ら(1999)や石塚(2000)やHoshikaら(1999)の現地観測結果にも現れており、普遍的な構造と考えられる。残差流の最大流速は淡路島から1 km の水深 20 m 付近で 0.7 m/s 前後を示し、南流時の断面西側上層での強い南流が海峡部の水交換に重要な役割を担っていると推測できる。

4. 水質分布とその変動特性

4.1 水質特性

断面の密度構造は北流時と南流時でその分布特性は異なる。図-2 に示した北流時の密度分布は、水深 20 m 以下と 60 m 以深では、等密度線の水深方向の傾きは小さいものの、それ以外では海底地形に沿う分布となっている。一方、南流時には淡路島から約 3 km の全層で等密度線が隆起し、表層で $\sigma_t < 22$ の水塊を東西に分断するような構造を示している。高密度水塊が上昇している海域では東西で流向が異なっており、大きなシアーにより生じたものと考えられる。

全窒素(T-P)の濃度分布から、北流時に底層部で高濃度水塊が出現していることがわかる。濃度の最高値は最深部で 0.18 mg/l の値を示している。南流時は、北流時に比して全体的に低濃度を示し、とくに西側上層では 0.06 mg/l 以下の低濃度水塊が現れている。しかし、東側の上層では南西流の生起にともない濃度 0.14 mg/l の高密度水塊が現れている。各時刻の観測結果をみると、濃度の違いはあるものの、東岸寄りでは常に相対的に高い濃度を示していた。この傾向はクロロフィル a および $\text{NH}_4\text{-N}$ にもみられた。これは、北流時に紀ノ川の河川水、南流時には大阪湾湾奥から東岸を南下してきた水塊により生起させられていると考えられる。

全リン(T-P)は、北流時には上層で低濃度、底層で高濃度となる分布特性を示している。しかし、南流時には、とくに淡路島側の水深 50 m 前後で濃度 0.045 mg/l 以上の高濃度水塊が現れ、横断方向にも大きな濃度変化が生じている。この水塊の起源は明らかではないが、南流が卓越している水深 50 m 付近の西側で存在が認められることから、西岸底層起源の水塊であることが予想されるが、その特定はなされていない。

4.2 塩分の経時変化

図-4 に淡路島から 1 km の地点における、塩分分布の経時変化と、そのときの予測潮流を示す。塩分の鉛直分布は時間とともに変化している。5 時から 8 時までの予測潮流の値が負となる南流時には、緩やかに全水深の塩分が低下している。北流に転流後、高塩分の水塊が底層より進入し、時間とともに塩分が上昇している。その後、

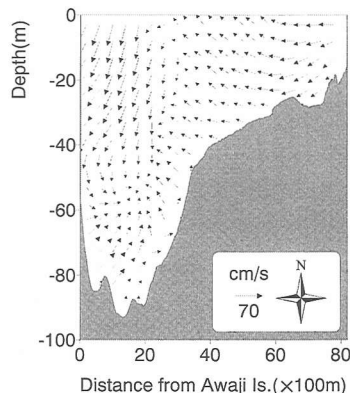


図-3 B3 観測断面図の残差流 (2001 年)

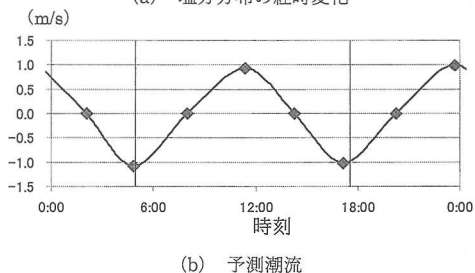
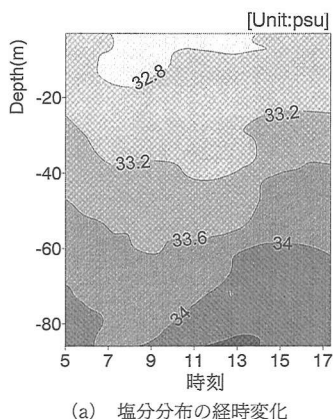


図-4 塩分分布の変化と予測潮流 (2001 年 8 月 10 日)

再び南流に転じると、高塩分水塊は流出している。この変動周期は、潮流の周期と対応しており、底層では大きな位相差をもたず、北流の発生とほぼ同時刻に高塩分水塊が流入を始めている。

4.3 断面水質構造

1 潮汐平均した各水質項目の断面分布を図-5 に示す。図-5 (a) の南北流速において正の値を示す網掛部は、北方流速つまり大阪湾への流入領域を表している。塩分と $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は、底層で高濃度を示し、中層部で等値線が傾斜するなど、同様の構造を有している。この水域では、水温も塩分と同様の構造を有することを考えあ

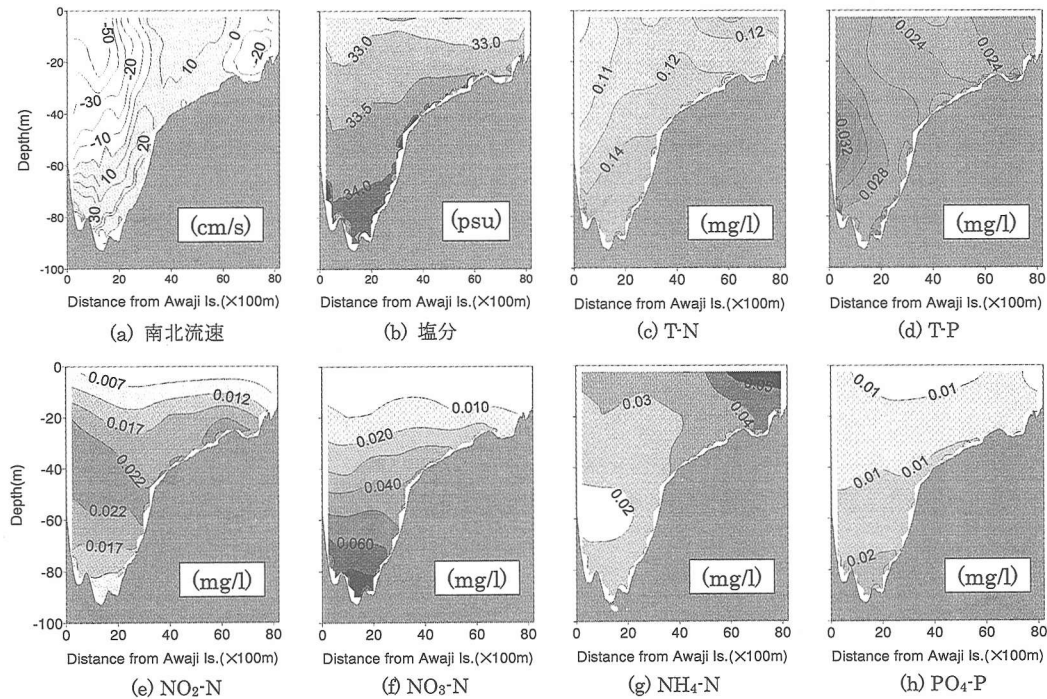


図-5 平均断面分布

表-2 海峡断面における物質収支 (2001 年)

	流量	塩分	Chl.a	T-N	T-P	NO ₂ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P
単位	m ³ /day	ton/day	ton/day	ton/day	ton/day	ton/day	ton/day	ton/day	ton/day
Total	-2.10 E+09	-6.80 E+07	-3.3	34.1	-57.2	-26.2	-14.7	-34.9	-26.1

わせると、紀伊水道に浸入または停留する低温高塩分の底層水は、高い NO₃-N、PO₄-P 濃度を有すると言える。NH₄-N は前述のように東岸で沿岸水の影響を受け高い値を、また、T-P は西岸の底層で高い値を示している。T-N、T-P の断面構造は溶存態の断面構造と異なった性状を有しており、粒子態の挙動が断面輸送に大きく作用する可能性が示唆される。

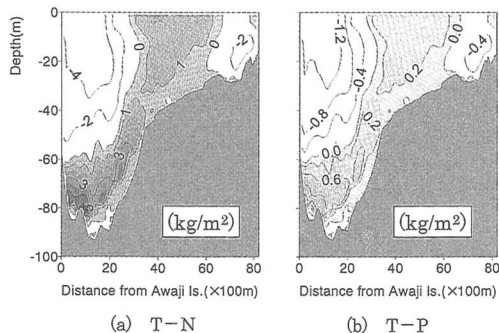
5. 物質収支とフラックス構造

流動と水質の断面構造の経時データより、1 潮汐間の物質輸送量を算定した後、1 日あたりの輸送量に換算した結果を表-2 に示す。流量は南向き成分、つまり大阪湾から紀伊水道へと流出する傾向を示し、既往の研究結果と一致した傾向を示している。水質の断面内の濃度偏差がそれほど大きくないために、各水質の断面フラックス構造は流動構造とほぼ同じ構造を呈し、T-N を除き 1 日あたりの収支も流量と同様に湾外への流出が卓越していた。藤原ら (1997) が紀伊水道で実施した同様の観測によると、1995 年と 1996 年には、T-N、T-P ともに北向

き (湾内流入) が卓越していた。しかし、1997 年には年 4 回の観測結果の平均として、T-N は北向きが卓越していたが、T-P は南向きが卓越し、今回の観測結果はこの 1997 年の結果と定性的に一致していた。

この T-N、T-P の輸送方向の差違について、その要因を明らかにするために、断面内のフラックス構造を示したのが図-6 である。前述 (図-5) のように、T-P は底層部で高い濃度を有し、また、底層部では北方流速が卓越している。そのために、底層部で大きな流入フラックスが生じ、1 潮汐の積算値は流入が卓越することになる。一方、リンに関しては、底層で高い値を示すものの、断面内偏差は流速に比して小さく、算出された断面フラックス構造は流速構造に依存し、その積算値も流量と同じく流出が卓越したものとなっている。

また、経時変化の詳細を調べてみると、全リンは南流時に高濃度を、全窒素は北流時に高濃度を示しており、全リンは大阪湾側で高濃度、全窒素は紀伊水道側で高濃度になっていることがわかった。図-7 に、窒素とリンに関する今回の観測結果と門谷ら (1991) や藤原ら (1997)



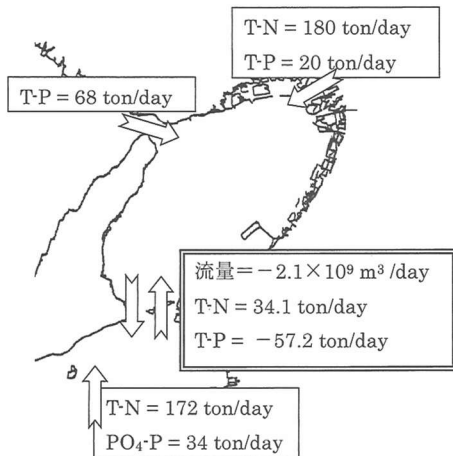
図—6 断面フラックス分布

による既往の観測結果をまとめて図示する。

6. おわりに

大阪湾への実質的な栄養塩の輸送量を明らかにするために、海峡部において流動と水質の観測を行った。海峡部では、物質交換に潮流が支配的となるため、精度の高い結果を得るためには時空間的に密な観測が必要となる。今回の観測では、かなり精度の高い流速・水質観測を実施したが、得られた結果の普遍性については今後さらなるデータの蓄積が必要と考える。また、残差流の算定に向けて、小潮期に観測を実施したが、大潮期においても流動の断面構造は今回の観測結果と大きな差はないものと考えられる。大潮期には、流速の増大に伴い、物質輸送量が大きくなることが予想されるが、オーダーが変わるほどの影響は生じない。むしろ、水質変化（濃度変化）が物質輸送量に与える影響の方が格段に大きいと考えられる。紀伊水道の塩分・水温分布は、竹内ら (1997) や笠井ら (2001) が示すように大きく変動し、黒潮小蛇行によって紀伊水道内の栄養塩構造も大きく変化する。2001 年の観測時期には紀伊水道に外洋系の高栄養塩の水塊が進入していたことが藤原らによって確認されており、今後、紀伊水道も含めた広域なバックグラウンドデータの収集もあわせて、物質収支の解析を行うつもりである。

謝辞：本研究は、わかやま海域環境研究機構の研究活



図—7 窒素・リンの収支（大阪湾へ流入：正）

動の一環として実施したものである。現地観測に際しては、和歌山県水産試験場の多大な協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 石塚正秀 (2000): 半閉鎖性海域の海峡・海盆系における流動構造に関する研究, 大阪大学学位論文, 127 p.
- 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.
- 笠井亮秀・藤原建紀・多田光男 (2001): 紀伊水道の海洋構造と栄養塩輸送, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.436-440.
- 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.
- 竹内淳一・中地良樹・小久保友義 (1997): 紀伊水道に進入する表層暖水と底層冷水, 海と空, 73, pp.81-92.
- 韓 銅珍 (2001): 底泥からの栄養塩の溶出機構を考慮した閉鎖性内湾の水質・底質予測モデルに関する研究, 大阪大学学位論文, 131 p.
- 藤原建紀・肥後竹彦・高杉由夫 (1989): 大阪湾の恒流と潮流・渦, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp.209-213.
- 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): 海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.
- Hoshihata, A., T. Tanimoto and Y. Mishima (1999): Current and Material Transport at Tomogashima Strait, Japan, Journal of Oceanography, Vol. 55, pp. 427-437.