

紀伊水道の海洋構造と栄養塩輸送

笠井亮秀*・藤原建紀**・多田光男***

1. はじめに

紀伊水道には、紀淡海峡を通じて大阪湾から低塩分水が流入する一方、南側は太平洋に面して外洋の影響を受けるため、大きなエスチュアリー的一种と見なすことができる。そのため上層からは低密度水が太平洋へ流出し、底層からは高密度水が流入すると予想される。しかし、紀伊水道は幅が約 50 km でロスビーの内部変形半径の 10 倍程度と広く、水深も最深部では 70 m を越えるほど深いため、水道内の流れは地球自転の影響を受け、複雑な構造となっていると思われる (Kasai ら, 2000)。夏季の紀伊水道の上層では、四国側が低塩分、紀伊半島側が高塩分水となっていて、表層の等塩分線が S 字型を示すことから、吉岡 (1992) は低密度水が四国側を南下し外洋水が紀伊半島側を北上して反時計回りの循環となっていると予想した。また藤原ら (1997a) は CTD 観測を行い、低温で高塩の外洋水が紀伊水道の海底近くを沖合から北に向けて舌状にのびるように分布していることを示すと同時に、ADCP によって流れを実測し、底層では外洋水が流入していることを明らかにした。この時観測された水温、塩分の観測結果を基に、藤原ら (1997b) は診断モデルを用いて紀伊水道内の流れを計算し、上層での反時計回りの循環と底層での北上流を再現している。

一方、紀伊水道内の水温・塩分の構造は変動が大きいこともよく知られている。例えば竹内ら (1997) は、紀伊水道中央部の測点において 10 年分の水温の鉛直プロファイルを示し、同じ 8 月でもその構造が年毎に大きく変わっていることを示した。彼らの観測結果によると、'86 年や'94 年のように上層から底層まで暖水が分布してほとんど成層が見られない年もあれば、'88 年のように水温逆転や極大が中層に見られる年もある。また、'94 年と'95 年では全水深において水温が 5°C 以上異なるなど、分布様式だけでなく絶対値も年によって大きく変動している。このように水温や塩分の構造が大きく異なる海域で

は、その流動構造も年によって異なる可能性が高い。紀伊水道の沖合には黒潮が流れており、黒潮主流やそれから波及する暖水舌などの変動が、紀伊水道内の流動にも大きく影響を及ぼしていると考えられる。そこで本研究では、黒潮の流路変動に対応した紀伊水道内の流動特性を明らかにすることを目的とし、紀伊水道沖での黒潮の離接岸状況の異なる 3 年間にわたり、CTD と ADCP を用いて紀伊水道内の物理構造を実測すると共に、診断モデルによって流れを推定した。

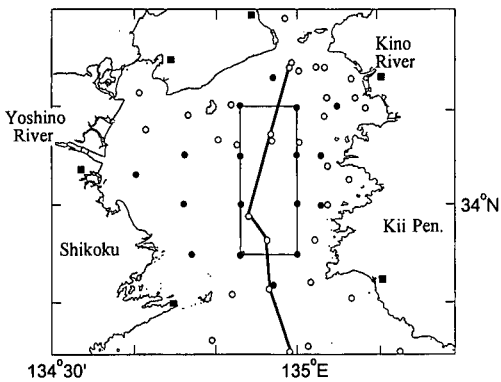
また紀伊水道は大阪湾や瀬戸内海と太平洋を結ぶ水路となっているため、それらの内湾域の水質環境を決める上で紀伊水道の果たす役割は大きい。藤原ら (1997a) の見積もりによると、河川を通じて大阪湾へ流入する栄養塩負荷量に匹敵する量の栄養塩が、外洋から下層を通じて紀伊水道内へ流入している。しかしその見積りは夏季の 1 日のみの状況に基づいており、その負荷量が一般的なもののか、それとも変動が大きいのか、等については不明である。そこで本研究では、診断モデルで計算した流れに基づいて、3 年間にわたる夏季の紀伊水道内での栄養塩フラックスを算定すると共に、黒潮流路との関連性について考察した。

2. 方 法

2.1 観測概要

観測は 1996 年 8 月 6-8 日、1997 年 8 月 20-21 日、1999 年 8 月 9-11 日に弓削商船高等専門学校所属の練習船弓削丸を用いて行った。観測内容は 3 か年ともほぼ同様なので、ここでは 1997 年の例を示す。まず図-1 に示す黒丸の測点において STD (アレック電子社製) による水温・塩分の鉛直測定を行った。また、図中の四角線上を時計回りに繰り返し航行しながら ADCP (RD Instruments 社製、周波数 300 kHz、Broadband、ビーム角 30°) によって水深 2 m 毎に流速を測定した。一周するのに約 4 時間要し、25 時間で 6 回の流速測定を行った。そして調和分解により、観測値から M_1 潮成分と M_2 潮成分を取り除き、残差流を求めた。一方、兵庫県水産試験場、大阪府水産試験場、徳島県水産試験場、和歌山県水産試験場ならびに神戸海洋気象台が、1997 年 8 月 19 日-21 日に

* 農博 京都大学大学院助手 農学研究科
** 正会員 農博 京都大学大学院助教授 農学研究科
*** 弓削商船高等専門学校助教授 商船学科



図一 観測海域。丸印はCTD観測点、四角はアメダス観測点、細線はADCP観測線、太線は縦断分布図に用いた観測ラインを示す。

紀伊水道内外の測点で水温、塩分、溶存酸素などを測定している。これらの機関による観測点を図一の白丸で示す。本研究ではそれらの調査結果のうち、水温と塩分のデータを解析に用いた。

2.2 診断モデル

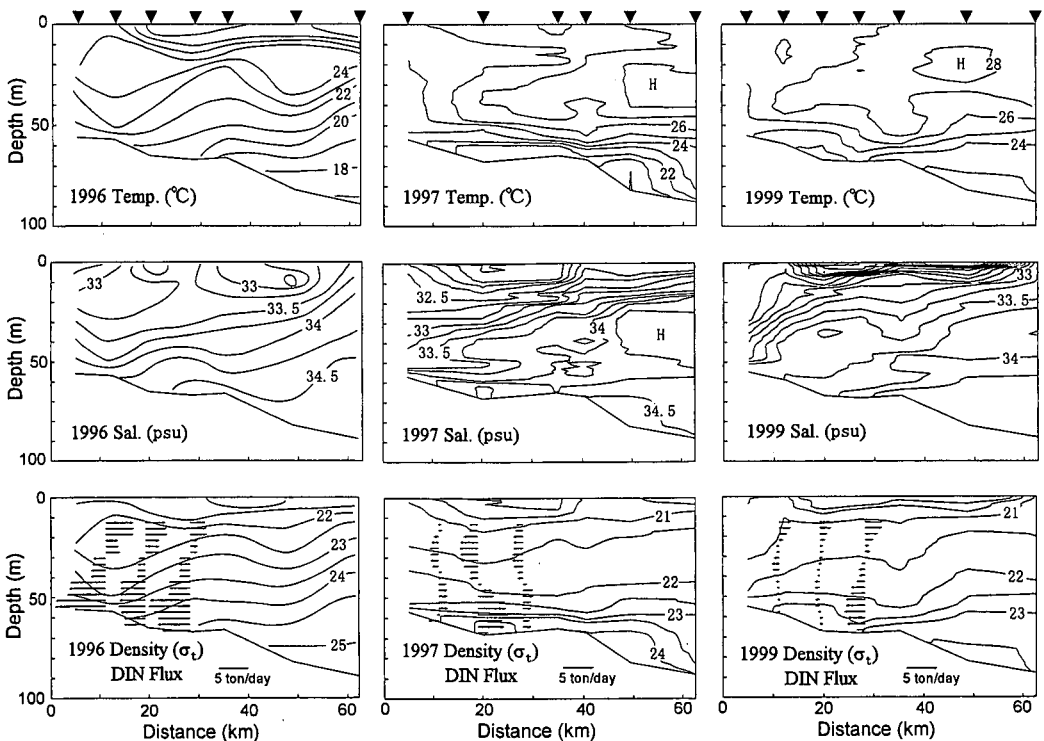
水道内の物理構造を把握するためには、水道全域で流速を知る必要があるが、一般に全領域で流れを測定することは困難である。そこで本研究では、紀伊水道内外で

観測した水温・塩分の値から求めた密度場と、沿岸のアメダスで測定された風速から推定した洋上の風場を基に、診断モデルによって流動場を計算した。モデルの詳細については、藤原ら（1997b）に記載されているので、ここでは省略する。

3. 結果と考察

3.1 水温・塩分構造

紀伊水道を縦断する測線における水温、塩分、密度の断面分布を図二に示す。水温、塩分、密度いずれについても、'97年と'99年の分布パターンは似かよっているが、'96年の分布はそれらと大きく異なっている。すなわち、'96年は水深約10mに温度躍層が見られる。しかし顕著な塩分躍層は存在せず、全体的に高塩分で、32 psuを下回る海域は少ない。そして水温22°C以下、塩分34 psu以上の海水が中層以深を占めている。その結果、下層は高密度となっていて、これは外洋から陸棚水が水道内に進入したものと考えられる。一方'97、'99年には水道北部から中央部にかけて上層20m以浅に塩分32 psu以下の沿岸水が広く分布している。中層以浅の密度構造には塩分の寄与が大きく、'97、'99年は水深10-20mの表層に $\sigma_t < 21$ の低密度水が存在している。しかしこれらの年は、夏季にもかかわらず水深約40mまで、水温差が2°C



図二 紀伊水道における水温、塩分、密度の分布。矢印は溶存無機態窒素の輸送量。

以下のほぼ一様な 27°C 以上の高温水に占められており、温度躍層は底層の水深 $50\sim 60\text{ m}$ に位置している。水道南部の中層水は水温 27°C 以上、塩分 33.5 psu 以上の高温高塩水であることから、黒潮系の海水と思われる。これに対し低温高塩の陸棚水は、底上 5 m ほどの薄い層に限られている。

これら3年間の流動場の変化とそれに伴う水温、塩分構造の変化は、沖合を流れる黒潮の流路の差によるところが大きいと思われる。海上保安庁発行の海洋速報によれば、水深 100 m において黒潮流路の指標となる 20°C の等温線は、'96年は室戸岬および潮岬から約 30 km 沖合に位置し、黒潮は離岸傾向にあったが、'97年および'99年には両岬に接岸して流れていた。黒潮が離岸していた'96年は下層から湧昇してきた陸棚水が水道内に進入できたが、接岸していた'97年や'99年は水道の中層以深を黒潮系水が厚く覆う形となり、陸棚水の流入が抑えられたものと考えられる。

次に表層の密度分布を図-3に示す。'96年、'97年は紀伊水道の中央部が相対的に低密度となっている。一方'99年は吉野川と紀ノ川の河口に $\sigma_t < 19$ の低密度水塊が見られ、これらは低塩分であることから河川からの出水によるものと思われる。'99年は他の2年に比べて、水平的な密度差が大きく、表層の密度分布は降水に伴う河川水の出水状況により、大きく変動することがうかがえる。

黒潮流路と紀伊水道内底層の低温水との関連性は、和歌山県水産試験場による定線観測を基に行った解析結果においても指摘されている(竹内ら, 1997)。さらに、神戸海洋気象台がC線として長年測定を続けていたデータにも、同様の傾向が表れている。例えば、黒潮が接岸していた'81年9月には陸棚水は紀伊水道内にほとんど流入していないが、 30 km ほど沖合を流れていた'85年9月には水温 22°C 以下、塩分 34 psu 以上の低温高塩水が友ヶ島水道近くまで進入している(神戸海洋気象台海洋課, 1982, 1986)。

3.2 流動構造

ADCPによる流れの観測値と診断モデルによる計算値はよく一致したので、ここでは診断モデルによる計算結果のみを示す(図-4、図-5)。

上層の流れ(図-4)は基本的には流出傾向にあるものの、年により大きく異なっていて、必ずしも過去に吉岡(1992)によって推定された様には流れていない。湾中央部に'96年は低気圧性循環、'97年は高気圧性循環が見られ、'99年は西岸に強い南下流が見られる。これらのうち、'97年と'99年の流れは表層の密度分布とよく対応しており、低密度水を右手にみる流れとなっている。一方'96年はその他の2年の流動パターンとはむしろ逆で、表層の低密度水を左手に見るような循環となっている。こ

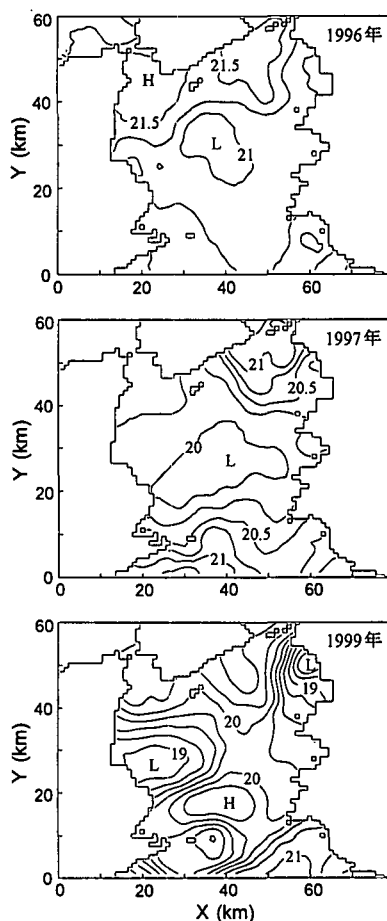


図-3 表層(水深 3 m)における密度 (σ_t)

の両者の違いは中層以深の密度構造と関連している。図-2に示すように、'97年と'99年は表層の低密度水による水平方向の密度差が、中層以深の密度差よりも大きい。そのため、'97年は紀淡海峡の南側、'99年では吉野川や紀ノ川の河口域など表層の塩分差が大きい場所で強い流れがみられる。一方'96年は陸棚水の流入に伴う中層以深での密度差が大きく(図-2)、水道中央部を中心とする中層のドーム状の密度構造によって表層に低気圧性循環流が形成されている。図示はしないが、いずれのケースにおいても表層の流れは等圧線に沿っており、ほぼ地衡流である。しかしその圧力場は、中層以深に陸棚水が進入するか、黒潮系水が進入するかに依存している。

底層では、どの年も太平洋から流入する流れが、主として東岸沿いに見られる。太平洋から流入した流れは、'96年は紀淡海峡にまで到達するが、'97年、'99年は紀伊水道中央部までにとどまっており、流量は小さい。'97年、'99年に比べ、'96年はより多くの外洋由来の高密度水が底層から流入していると考えられる。これは図-2に示す水温、塩分の構造とよく対応している。

3.3 栄養塩フラックス

夏季の紀伊水道では、水温が低いほど栄養塩濃度が高い傾向にある(竹内ら, 1997)。そこで栄養塩濃度を推定するために、神戸海洋気象台が紀伊水道内において測定した水温と栄養塩濃度との関係を調べた。1981-1990年の7月と9月の水深10 m以深における水温と硝酸・亜硝酸態窒素の散布図を図6に示す。両者は非常によく対応していて、その関係は以下の式で回帰できる。

$$C_{DIN}=0.0805 T^2-4.2533 T+57.865 \quad \cdots \cdots (1)$$

$$C_{DIP}=0.0061 T^2-0.3122 T+4.269 \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで C_{DIN} は硝酸・亜硝酸濃度 ($\mu\text{mol/l}$)、 T は水温 ($^{\circ}\text{C}$)、 C_{DIP} はリン酸態リン濃度 ($\mu\text{mol/l}$) である。これらの中には $r^2=0.69$ (硝酸・亜硝酸)、 $r^2=0.57$ (リン酸態リン) と高い相関があり、水温から栄養塩濃度が推定できることが分かる。そこで観測によって得られた水温から(1)、(2)式を用いて栄養塩濃度を算出し、診断モデルで得ら

れた流動場と掛け合わせることで栄養塩のフラックスを計算した。ただし紀伊水道においては水深10 m以浅の栄養塩はほぼ枯渇している(竹内ら, 1997)、10 m以浅の表層域については栄養塩量を一定値ゼロとして与えた。

求められた溶存態無機窒素の輸送量を図-2に示す。底層からの流入が紀淡海峡まで到達していた'96年は、全断面において底層からの流入が見られる。湾口部における'96年の流入量は硝酸・亜硝酸態窒素で134 ton/dayと非常に多く、大阪湾への陸上からの負荷量に匹敵する。また、藤原ら(1997)による'95年の実測結果(204 ton/day)に近い値となっている。これは、'95年'96年共に黒潮は離岸して流れており、栄養塩を豊富に含んだ陸棚水が紀伊水道に流入したことによると考えられる。一方底層の流入が紀伊水道中央付近までしか到達しなかった'97年、'99年は、底層での栄養塩の流入は少ない。むしろ水道北部、中部の断面では下層でも一部流出傾向にある。

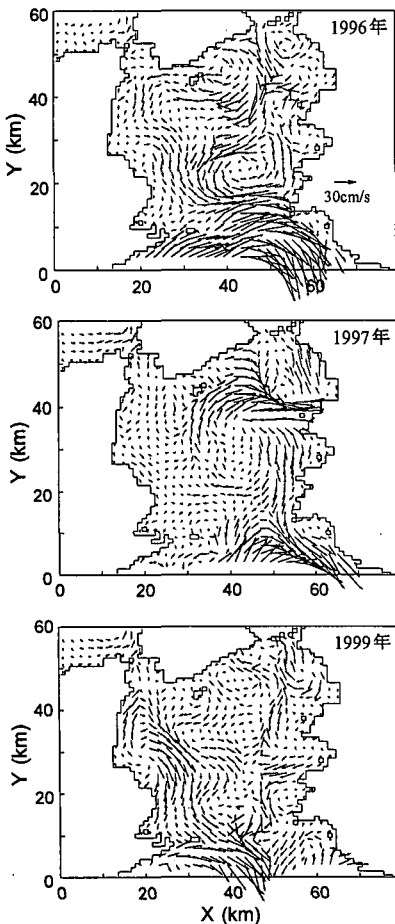


図-4 診断モデルによって推定された表層(水深2-5 m)の流れ

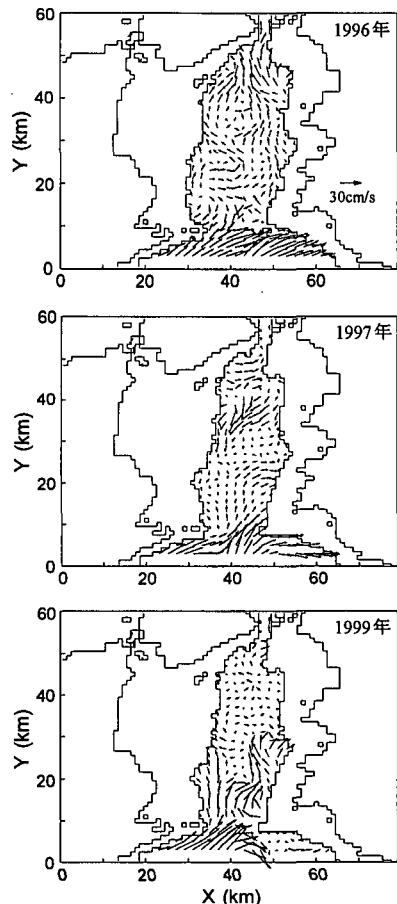


図-5 診断モデルによって推定された下層(水深50-75 m)の流れ

表-1 各断面における北向きの栄養塩フラックス (単位: ton/day)

Year	Northern Section		Middle Section		South Section	
	DIN	DIP	DIN	DIP	DIN	DIP
1996	128.2	22.0	72.1	12.0	134.0	22.3
1997	6.3	1.8	-27.8	-3.6	7.9	2.0
1999	-1.5	-0.6	-7.1	-2.3	45.0	13.0

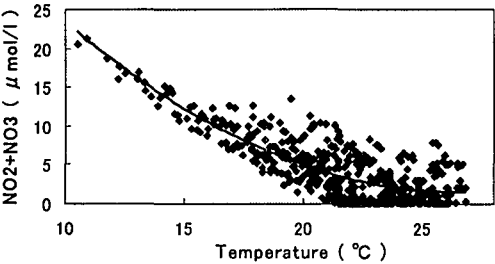


図-6 水温と硝酸・亜硝酸態窒素の関係

各断面における栄養塩輸送量を表-1 に示す。リン酸態リンも窒素と同様の傾向にあり、いずれの断面においても'97 年, '99 年は'96 年より流入量が少なかったものと推定される。

4. ま と め

本研究により、夏季の紀伊水道の流動構造は、黒潮の離接岸に大きく影響されていることが分かった。黒潮が

離岸している場合、陸棚水が紀伊水道下層に流入し、栄養塩の流入フラックスも増加するが、接岸する場合は水道内は黒潮系水に覆われ、栄養塩輸送も抑えられる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、兵庫県水産試験場、大阪府水産試験場、徳島県水産試験場、和歌山県水産試験場および神戸海洋気象台が観測した水温、塩分、栄養塩のデータを使用させていただいた。記して感謝の意を示す。

参 考 文 献

神戸海洋気象台海洋課 (1982): 1981 年 9 ～10 月大阪湾・紀伊水道・南日本海区海洋観測報告 (81-09 次航海), 海洋通報, 90 巻, pp. 16-42.

神戸海洋気象台海洋課 (1986): 1985 年 9 ～10 月大阪湾・紀伊水道・南日本海区海洋観測報告 (8509 次航海), 海洋通報, 102 巻, pp. 19-43.

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 巻, pp. 81-92.

藤原建紀・宇野奈津子・多田光男・中辻啓二・笠井亮秀・坂本 亘 (1997a): 紀伊水道の流れと栄養塩輸送, 海と空, 73 巻, pp. 63-72.

藤原正幸・大橋行三・藤原建紀 (1997b): 診断モデルによる 8 月の紀伊水道における残差流シミュレーション, 海岸工学論文集, 44 巻, pp. 411-415.

吉岡 洋 (1992): 瀬戸内海 I (B 紀伊水道), 日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会, pp. 630-641.

Kasai A., A. E. Hill, T. Fujiwara and J. H. Simpson (2000): Effect of the Earth's rotation on the circulation in regions of freshwater influence, Journal of Geophysical Research, Vol. 105, C7, pp. 16961-16969.