

# 紀淡海峡における流動構造と物質輸送に及ぼす黒潮蛇行の影響

金 漢九\*・西田修三\*\*・中辻啓二\*\*\*

これまで、内湾・内海への栄養塩の流入負荷は陸域起源のものが大きいとされてきた。そのため、陸域からの汚濁物質の総量規制を実施することによって水質改善を期待してきた。しかし、紀淡海峡の南部に位置する紀伊水道では、外洋から栄養塩が供給されており、その量は陸域から大阪湾に流入する栄養塩に匹敵するほどであることが指摘されている。本研究では大阪湾と紀伊水道で行なわれる物質輸送を明らかにするために、紀淡海峡において現地観測を実施してきた。その結果、紀淡海峡における流動と水質構造は紀伊水道沖合いを流れる黒潮の蛇行の影響を受けて大きく変動し、物質輸送にもこの影響が顕著に現れることが明らかになった。

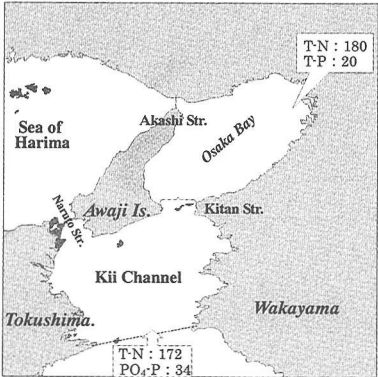
## 1. はじめに

内湾や内海における水質汚濁は、陸域からの産業廃水や生活排水などによる栄養塩の流入がその主なる原因と考えられてきた。そのため、本研究が対象としている紀淡海峡周辺海域を湾口とする大阪湾においても、水質を改善するために、陸域から流入する COD やリンの総量規制を実施することによって水質は改善されると期待されていた。

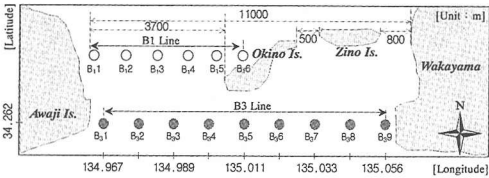
しかし、藤原ら (1997) によると、夏季の紀伊水道では外洋起源の栄養塩の供給(窒素: 172 t/日, リン: 34 t/日)があり、この量は門谷ら (1991) によって報告された陸域から大阪湾に流入する負荷量(窒素: 180 t/日, リン: 20 t/日)に匹敵する量であることがわかった。しかし、観測データが少なく実態については未だ不明点が多く残されている。大阪湾の水質を議論するためには、大阪湾と紀伊水道の両海域における海水交換機構と物質輸送過程を明らかにする必要がある。そこで、本研究では紀淡海峡において流動と水質構造、さらに物質輸送機構の実態を明らかにするために、1999 年から毎年夏季に現地観測を実施してきた。本論文では観測によって得られた残差流と物質輸送構造について報告するとともに、それらに及ぼす黒潮蛇行の影響について解析を行なう。

## 2. 現地観測の概要

紀淡海峡における流動と水質構造を明らかにするために、現地観測を 1999 年 8 月 4 日、2000 年 8 月 7 日、2001 年 8 月 10 日、2002 年 9 月 10 日の 4 回、一潮汐間にわたって実施した。観測項目は年によって異なるが、流動と水温、塩分の観測は毎年実施し、2000 年からは Chl.a、2001 年からは海峡断面内約 30 点において採水を行い栄養塩 (T-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, T-P, PO<sub>4</sub>-P) の分析も行なった。流速の測定には ADCP (300 kHz,



(a) 紀淡海峡周辺海域と負荷量



(b) 紀淡海峡における観測点

図-1 紀淡海峡周辺海域の負荷量と観測点

600 kHz), 水温, 塩分, Chl.a の測定にはクロロフィルセンサー付 STD を用いた。また、2001 年に実施した水質測定には、和歌山県水産試験場の観測船「きのくに」の多項目測定システム (オクトパスミニシステム) を使用し、精度の高い断面観測が可能となった。観測日はいずれも晴天で、風も弱く、また、日潮不等も小さかった。図-1 に紀淡海峡周辺海域の地形と観測位置を、表-1 には観測内容をまとめて示した。また、参考までに図-1 に既往の研究で得られた流入負荷量の算定値の一例 (門谷ら, 1991; 藤原ら, 1997) も示した。

## 3. 流動、密度及び水質の断面構造

### (1) 流動構造と密度構造

図-2 に各年の紀淡海峡横断面における残差流と一潮

\* 学生会員 修(工) 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻  
\*\* 正 会 員 工 博 大阪大学大学院教授工学研究科土木工学専攻  
\*\*\* 正 会 員 工 博 大阪大学大学院教授工学研究科土木工学専攻

表一 現地観測の内容

| 年    | 1999 年                  | 2000 年                           | 2001 年                                                                                                 | 2002 年                                                                                                              |
|------|-------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 日 時  | 8 月 4 日<br>(5:00~18:00) | 8 月 7 日<br>(5:00~18:30)          | 8 月 10 日<br>(5:00~18:00)                                                                               | 9 月 10 日<br>(5:00~18:30)                                                                                            |
| 観測断面 | B1 測線(8 往復)             | B3 測線<br>(東側: 5 往復,<br>西側: 6 往復) | B3 測線(6 往復)                                                                                            | B3 測線(8 往復)                                                                                                         |
| 観測項目 | 流速・水温・塩分                | 流速・水温・塩分<br>Chl.a                | 流速・水温・塩分<br>T-N, NO <sub>3</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N<br>NH <sub>4</sub> -N, T-P, PO <sub>4</sub> -P | 流速・水温・塩分<br>Chl.a, DO<br>T-N, NO <sub>3</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N<br>NH <sub>4</sub> -N, T-P, PO <sub>4</sub> -P |
| 海象条件 | 小潮                      | 小潮                               | 中潮                                                                                                     | 中潮                                                                                                                  |
| 気象条件 | 晴天・弱風                   | 晴天・弱風                            | 晴天・無風                                                                                                  | 晴天・無風                                                                                                               |

汐平均した密度構造を示す。各図とも縦軸は水深、横軸は西岸の観測点からの距離を示す。塗りつぶした領域は海底地形を表し、水平流速をベクトルの長さで示している。ベクトルの上下方向は流速の南北成分を、左右方向は東西成分を表している。毎年同じ時期に実測しているにもかかわらず、断面構造は予想以上に大きく異なっている。

まず、残差流構造をみると、1999 年の B1 測線においては、沖ノ島の影響を受け、東岸の浅水域では南西流（約 0.6 m/s）が全水深にわたり現れている。西岸（淡路島側）では全層で北流が生起しており、中央断面の表層から 50 m 以浅で西流、中層以深においては卓越した構造はみられず、複雑な流れを呈している。

2000 年、2001 年、2002 年の B3 測線における残差流構造は東岸（和歌山側）では、北西向きと西向きの流れが

現れているものの、水深が深く潮流が速い西岸（淡路島側）では構造が毎年異なっている。2000 年と 2001 年の残差流は上層では南向き、下層では北向きの流れを有するのに対し、2002 年には全水深で南向きを、また、1999 年には北向きの流動傾向を示している。このように B3 測線の残差流構造は、水深が深く、潮流が速い西岸海域で年ごとに異なった流況を示していたことがわかった。

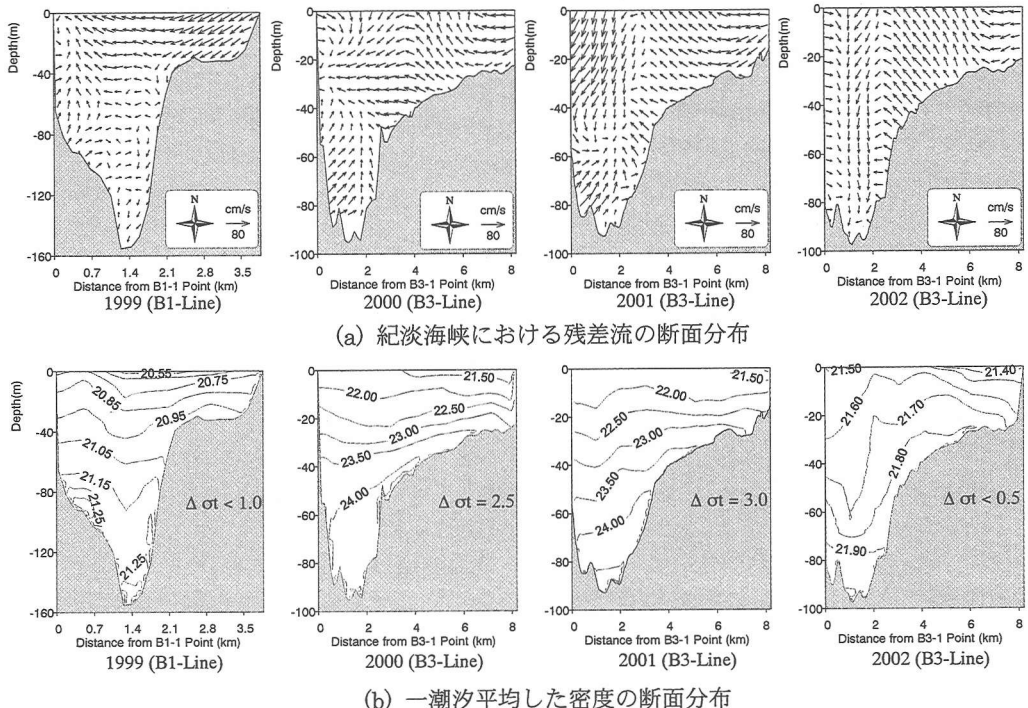
つぎに、図一2(b)の一潮汐平均した密度の断面分布をみると、表層と底層の密度差が小さい 1999 年と 2002 年および、密度差が大きい 2000 年と 2001 年の二つのパターンに明確に分けることができる。

1999 年の観測では、密度( $\sigma_t$ )が表層で 20.55、底層で 21.50 を示し、その差は  $\Delta\sigma_t < 1.0$  であった。2002 年の観測では、密度が表層で 21.50、底層で 21.90 その差は  $\Delta\sigma_t < 0.5$  と小さく、成層強度が弱かったことがわかる。一方、2000 年と 2001 年はほぼ同様の密度構造を有し、表層で約 21.50、底層では約 24.50 の密度を示し、表層と底層で約  $\Delta\sigma_t = 3.0$  の大きな密度差を有し、強く成層化していたことがわかる。

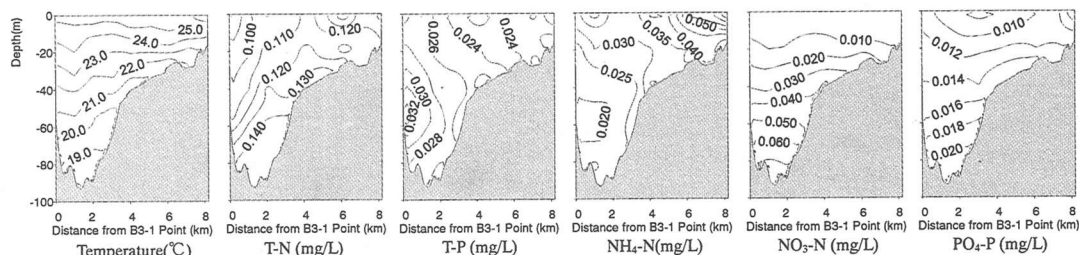
## (2) 水質構造

図一3 に栄養塩の分析を行なった 2001 年と 2002 年の紀淡海峡横断面（B3 測線）における一潮汐平均した水質構造を示す。

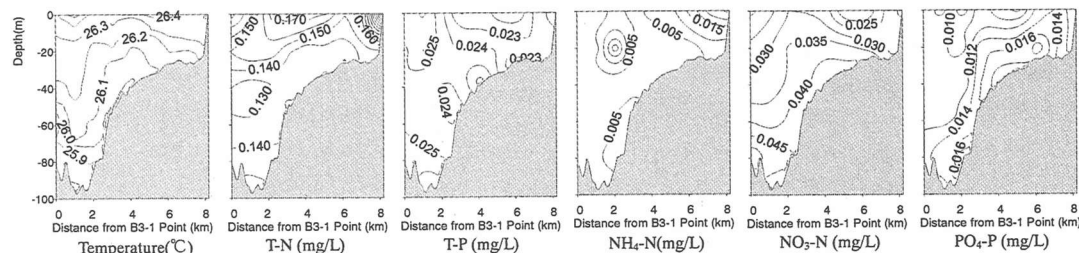
まず、水温分布をみると、2001 年では表層で 25.0°C、



図一2 紀淡海峡における残差流と一潮汐平均した密度の断面分布



(a) B3 測線の水質の断面分布 (2001 年 8 月 10 日)



(b) B3 測線の水質の断面分布 (2002 年 9 月 10 日)

図-3 紀淡海峡における一潮汐平均した水質の断面分布 (B3 測線)

底層で  $19.0^{\circ}\text{C}$ 、表層と底層の水温差は  $6.0^{\circ}\text{C}$  で成層化がみられるが、2002 年では表層で  $26.4^{\circ}\text{C}$ 、底層で  $25.9^{\circ}\text{C}$ 、表層と底層の水温差は  $0.5^{\circ}\text{C}$  で鉛直方向に一様化していることがわかる。図は省略したが、1999 年の表層と底層の水温差は  $0.6^{\circ}\text{C}$ 、2000 年の表層と底層の水温差は  $6.5^{\circ}\text{C}$  を有し、それぞれ 2002 年と 2001 年の成層構造と同様の傾向を示していた。T-N と T-P については 2001 年と 2002 年とも断面内の濃度差は小さいが、2002 年の東岸表層で沿岸水の影響と思われる高濃度を示している。NH<sub>4</sub>-N は両年とも表層で高濃度を有する傾向は一致しているが、2001 年の方が相対的にかなり高い値を示している。

一方、NO<sub>3</sub>-N と PO<sub>4</sub>-P は 2001 年と 2002 年ともに、底層で高濃度を示している。両年の濃度分布を比較してみると、2001 年の方が表層では低濃度を示しているが、底層ではそれぞれ  $0.07\text{ mg/L}$ 、 $0.02\text{ mg/L}$  の高濃度を示し、濃度に関しても成層化していることがわかる。

#### 4. 物質輸送とフラックス構造

採取水の分析によって得られた断面濃度分布を時空間補間し、海峡断面を通じての一潮汐間の物質輸送量を算出した。得られた物質輸送量を表-2 にまとめて示す。‘正’が紀伊水道から大阪湾への流入、‘負’が大阪湾から紀伊水道への流出を現わしている。大部分の水質項目が流量と同様の輸送方向を示しているが、2001 年には T-N フラックスが、2002 年には Chl.a と NO<sub>3</sub>-N フラックスが流量の輸送方向と異なっていた。流動構造と水質の断

表-2 紀淡海峡における断面フラックス量

| 1999-B1-Line |                      |          |          |          | 2000-B3-Line |                      |          |          |          |
|--------------|----------------------|----------|----------|----------|--------------|----------------------|----------|----------|----------|
| Discharge    |                      | Salinity |          |          | Discharge    |                      | Salinity |          | Chl.a    |
| Unit         | m <sup>3</sup> /tide | ton/tide | ton/tide | ton/tide | Unit         | m <sup>3</sup> /tide | ton/tide | ton/tide | ton/tide |
| Total        | 3.82E+07             | 1.29E+06 |          |          | Total        | 9.81E+08             | 3.10E+07 | 1.110    |          |

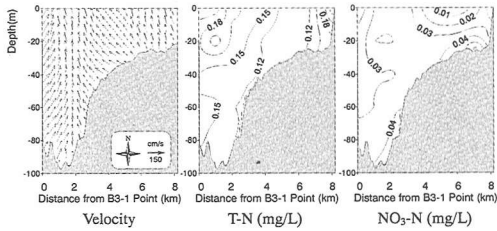
| 2001-B3-Line |                      |           |          |                    |                    |                    |          |                    |          |
|--------------|----------------------|-----------|----------|--------------------|--------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|
| Discharge    | Salinity             | Chl.a     | T-N      | NO <sub>2</sub> -N | NO <sub>3</sub> -N | NH <sub>4</sub> -N | T-P      | PO <sub>4</sub> -P |          |
| Unit         | m <sup>3</sup> /tide | ton/tide  | ton/tide | ton/tide           | ton/tide           | ton/tide           | ton/tide | ton/tide           | ton/tide |
| Total        | -1.09E+09            | -3.53E+07 | -1.73    | 17.41              | -13.60             | -7.63              | -18.09   | -18.55             | -13.49   |

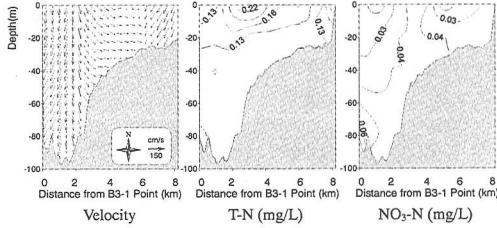
| 2002-B3-Line |                      |          |          |                    |                    |                    |          |                    |          |
|--------------|----------------------|----------|----------|--------------------|--------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|
| Discharge    | Salinity             | Chl.a    | T-N      | NO <sub>2</sub> -N | NO <sub>3</sub> -N | NH <sub>4</sub> -N | T-P      | PO <sub>4</sub> -P |          |
| Unit         | m <sup>3</sup> /tide | ton/tide | ton/tide | ton/tide           | ton/tide           | ton/tide           | ton/tide | ton/tide           | ton/tide |
| Total        | 1.11E+08             | 3.63E+06 | -0.72    | 14.17              | 3.35               | -0.55              | 3.82     | 0.65               | 5.54     |

面濃度分布から流量と水質の各項目別フラックスの輸送方向の差異が生じる要因について検討してみる。

例として、2002 年 B3 測線の観測項目のうち、流量の輸送方向と同様の輸送方向を示した T-N と、逆の輸送方向を示した NO<sub>3</sub>-N について、北流最大時 (9 時) と南流最大時 (15 時) の断面分布を比較・検討してみる。図-4 に流速、T-N、NO<sub>3</sub>-N の断面分布を示す。流量と同様に大阪湾への流入を示した T-N の断面濃度分布は、北流・南流最盛時とも表層で高濃度を示している。しかし、北流最盛時には断面内の濃度差は小さく、底層でも比較的高濃度の  $0.15\text{ mg/L}$  を示しているのに対し、南流最盛時には断面内の濃度差が大きく、南流が生起している西岸の水深 20 m 以深で濃度が  $0.13\text{ mg/L}$  以下の低濃度を示していることがわかる。このように、北流最盛時と南流最盛時の底層における濃度の違いにより、T-N の場合には大阪湾への流入成分が卓越したものと考えられる。



(a) 北流最大時 (9 時)



(b) 南流最大時 (15 時)

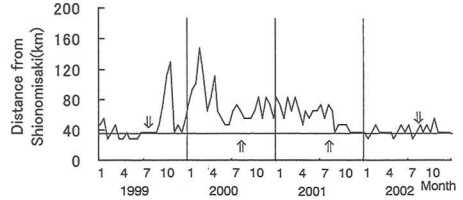
図一四 北流と南流最盛時の流動と栄養塩の断面分布

流量とは逆に大阪湾から流出していた  $\text{NO}_3\text{-N}$  の断面濃度分布は、南流最盛時の方が全断面において高濃度を示し、西岸の底層で最も高い  $0.06 \text{ mg/L}$  の濃度を有している。このように、南流最盛時に西岸底層で現れた高濃度のために、 $\text{NO}_3\text{-N}$  の輸送に関しては南向きが卓越したと推測される。

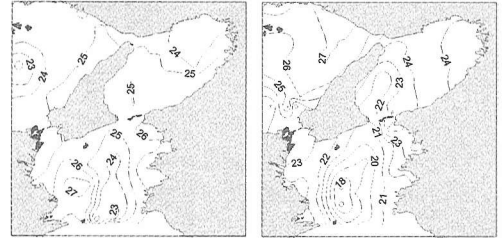
このように、紀伊水道と大阪湾の物質輸送は紀淡海峡の横断面での流動構造と水質の断面濃度変化によって大きく左右されている。このことは、2001 年の観測についてまとめた中辻ら (2002) の報告とも一致している。また、彼らによると、紀淡海峡の T-N、T-P の断面構造は溶存態の断面構造と異なった性状を有しており、粒子態の挙動が断面輸送に大きく作用している可能性がある」と指摘している。

## 5. 物質輸送に及ぼす黒潮の影響

竹内ら (1997) は 33 年間にわたる定線観測データから、黒潮が潮岬から 20 海里 (約 37 km) 以遠に離岸している時には、紀伊水道の下層に低温・高栄養塩の水塊が流入することを指摘している。海上保安庁の黒潮接岸・離岸距離の観測結果をまとめたのが図一五である。同図には、本研究の観測日を矢印で示している。海峡部が成層化していた 2000 年と 2001 年の観測時には黒潮は離岸し、また、混合が進んでいた 1999 年と 2002 年には黒潮は接岸していたことがわかる。ちなみに、藤原ら (1997) の 1995 年の観測データにも海峡部の成層化が見られるが、この時も黒潮の離岸時に対応している。以下に、兵庫県・大阪府・徳島県・和歌山県の各水産試験場より定期的に観測されている浅海定線データ (播磨灘: 20 点, 大阪



図一五 潮岬からの黒潮離岸・接岸距離



(a) 黒潮接岸時(1999 年 8 月) (b) 黒潮離岸時(2000 年 9 月)

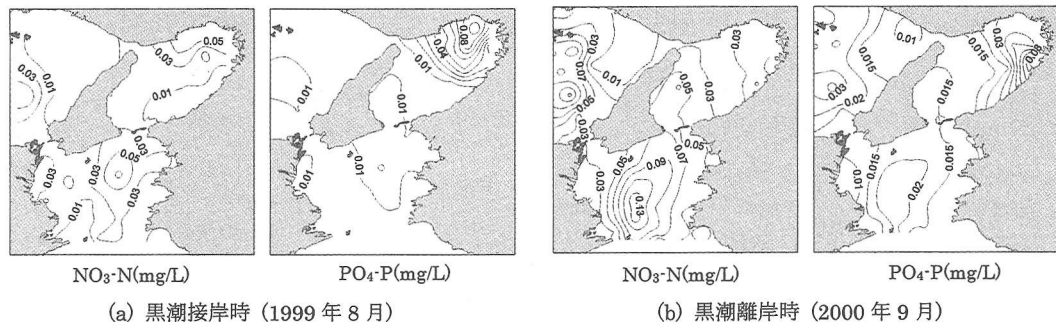
図一六 黒潮蛇行による底層の水温分布

湾: 20 点, 紀伊水道: 31 点) を用いて観測時の周辺海域の水質構造について検討してみる。

黒潮接岸・離岸時の紀淡海峡周辺海域における底層水温の平面分布を図一六に示す。黒潮接岸時である 1999 年夏季の水温構造をみると、外洋と接している紀伊水道の南部海域から高温 (約  $25.5^\circ\text{C}$ ) の水塊が紀淡海峡の底層に進入していることがわかる。また、黒潮離岸時である 2000 年夏季の水温構造をみると、紀伊水道沖合いから低温 (約  $21.0^\circ\text{C}$ ) の水塊が紀淡海峡の底層へ進入している。

同様の浅海定線データを基に得られた周辺海域における底層栄養塩 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ ) の平面分布を図一七に示す。紀淡海峡周辺の  $\text{NO}_3\text{-N}$  と  $\text{PO}_4\text{-P}$  の濃度は黒潮離岸時の方が高濃度を有していることがわかる。夏季底層の  $\text{NO}_3\text{-N}$  と  $\text{PO}_4\text{-P}$  の濃度は黒潮接岸時である 1999 年にはそれぞれ約  $0.03 \text{ mg/L}$ 、約  $0.01 \text{ mg/L}$  であり、黒潮離岸時である 2000 年にはそれぞれ約  $0.07 \text{ mg/L}$ 、約  $0.015 \text{ mg/L}$  の濃度を示している。また、図一七(b)に示す黒潮離岸時である 2000 年の大阪湾底層の  $\text{NO}_3\text{-N}$  の濃度分布をみると、陸域負荷の流入が最も多い大阪湾湾奥 ( $0.03 \text{ mg/L}$ ) より紀伊水道の影響を受ける南部海域 ( $0.07 \text{ mg/L}$ ) の方が約 2 倍の濃度を示していることがわかる。 $\text{PO}_4\text{-P}$  に関しても僅かであるが黒潮離岸時に大阪湾の南部海域で高い濃度を示していることがわかる。

これらの結果から、紀淡海峡周辺海域においても黒潮蛇行の影響を受け、黒潮離岸時 (2000 年, 2001 年) には、低温・高密度・高栄養塩を示し、黒潮接岸時 (1999 年, 2002 年) には、高温・低密度・低栄養塩を示したものと考えられる。このような観測結果は紀伊水道を研究対象とした藤原ら (1997) や笠井ら (2001) の結果とも一致

図-7 黒潮蛇行による底層の  $\text{NO}_3\text{-N}$  と  $\text{PO}_4\text{-P}$  の濃度分布

しており、黒潮蛇行によって紀淡海峡はもちろん、大阪湾の南部海域の栄養塩濃度までもが影響を受けていると言える。

## 6. おわりに

本研究では、大阪湾と紀伊水道を結ぶ紀淡海峡において、流動構造と物質輸送構造の実態を明らかにするため、現地観測を行なった。

その結果、残差流構造と栄養塩を含む水質構造は紀伊水道沖合いを流れる黒潮の蛇行の影響を受け、黒潮接岸時には高温・低密度・低栄養塩の構造を、黒潮離岸時には低温・高密度・高栄養塩の構造を有していることがわかった。また、物質輸送に関しても黒潮蛇行によって変動する流動や水質の断面構造によって大きく左右されることがわかった。

今後、紀淡海峡周辺の長期間的な水質変動を捉えるために、年間を通じた観測を実施する予定である。

謝辞：本研究は、わかやま海域環境研究機構の研究活動の一環として実施したもので、その一部は科学研究費補助金・基盤研究(A)(2)(課題番号14205073、代表者中辻啓二)の補助を受けている。また、兵庫県・大阪府・

徳島県・和歌山県の各水産試験場には周辺海域の浅海定線データのご提供をいただいた。記して謝意を表する。

## 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.
- 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.
- 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.
- 高志利宣・藤原建紀・住友寿明・竹内淳一 (2002): 海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.
- 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.
- 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・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.
- 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.
- Hoshika, A., T. Tanimoto and Y. Mishima (1999): Current and Material Transport at Tomogashima Strait, Japan, Journal of Oceanography, Vol. 55, pp. 427-437.