

# 紀淡海峡における水質変動特性と栄養塩輸送

西田修三<sup>1</sup>・金 漢九<sup>2</sup>・高地 慶<sup>3</sup>  
入江政安<sup>4</sup>・中辻啓二<sup>5</sup>

紀淡海峡周辺海域において 2 年間にわたり実施した水質観測結果と, 2005 年夏季に実施した断面フラックスの調査結果を基に, 流動と水質の変動特性を明らかにするとともに, 紀淡海峡を通じての物質輸送に及ぼす黒潮離岸の影響について解析を行った。その結果, 黒潮離岸時と接岸時では流動・水質の断面構造に明瞭な相違が認められ, 海峡断面を通じての栄養塩の輸送に大きな影響を及ぼしていることがわかった。特に黒潮離岸時には硝酸態窒素とリン酸態リンが底層で高濃度を示すことがわかった。しかし, 海峡部の水質は黒潮離岸の影響を上回るほどの大きな季節変動を有し, 特に溶存態の窒素・リンは冬期に高濃度を示すことも明らかとなった。

## 1. はじめに

最近の研究より, 瀬戸内海のような半閉鎖性の海域においても, 外洋からの栄養塩の流入が無視できないことが指摘されている(例えば, 沿岸海洋研究部会, 2006; 瀬戸内海環境保全協会, 2004)。大阪湾に関しても, 黒潮の離岸による影響が湾口部に位置する紀淡海峡付近にまで及び, 流動および水質構造が変化することが明らかとなり, 外洋起源の栄養塩の大阪湾への輸送に黒潮が関与している可能性が示唆された(金, 2003; 高志, 2002)。しかし, このような水質構造や物質輸送が黒潮離岸の影響も含め季節的にどのように変動するかについては観測例が少なく, その実態は未だ明らかになっていない。これまで, 筆者らは紀淡海峡周辺海域において, 成層期の流動構造と栄養塩輸送機構に関する現地観測を継続して実施してきた(中辻ら, 2002)。しかし, 海峡断面を通じての物質輸送量の定量的評価とともにその変動の実態を明らかにするには至っていなかった。

そこで, 紀淡海峡周辺海域において黒潮接岸期と離岸期を含む 2 年間にわたり月 1 回の定期観測を実施するとともに, 2005 年夏季には海峡部において横断観測も実施し, 現地データの蓄積を行った。本研究では, 得られたデータを基に海峡部の流動・水質構造とその変動特性を明らかにし, 紀淡海峡を通じての物質輸送の定量的評価を行う。また, 水質変動や物質輸送に及ぼす黒潮離岸の影響について, 過去の調査結果も含めて解析を行う。

## 2. 観測概要

### (1) 縦断観測

紀淡海峡を南北に縦断する 6 測点(図-1(b)):

A-1~A-9) において, 2003 年 7 月から 2005 年 7 月まで, 毎月 1 回, 小潮時を選んで流動と水質の断面分布調査を実施した。観測は A-9 測点から始め, 北上しながら A-1 測点まで順に行った。各測点にて ADCP による流速測定と多項目水質計による水質測定を実施し, 南北両端の測点(A-1 および A-9)では, 表層から水深 20 m 毎に採水を実施し, 栄養塩の分析も行った。分析項目はアンモニア態窒素, 亜硝酸態窒素, 硝酸態窒素, 溶存有機態窒素, 溶存態全窒素, 粒子態全窒素, リン酸態リン, 溶存態全リン, 粒子態全リン, ケイ酸塩である。観測時の黒潮離岸の状況は 2003 年 7 月~2004 年 6 月までは接岸, それ以降は離岸状況にあった。

### (2) 横断観測

2005 年 8 月 10 日に紀淡海峡を東西に横断する測線(図-1(b): B<sub>3</sub>測線)において流動調査と水質調査を実施した。測線上を ADCP を用いて一潮流間(13 時間)の連続流速測定を行うとともに, 9 測点(B<sub>3</sub>1~B<sub>3</sub>9)において多項目水質計による水質測定と水深 20 m 毎の採水(断面内 29 点)を実施し, 栄養塩の分析を行った。分析項目は縦断観測と同様である。一潮流間に流速測定は 12 回, 水質測定と採水は 6 回実施した。

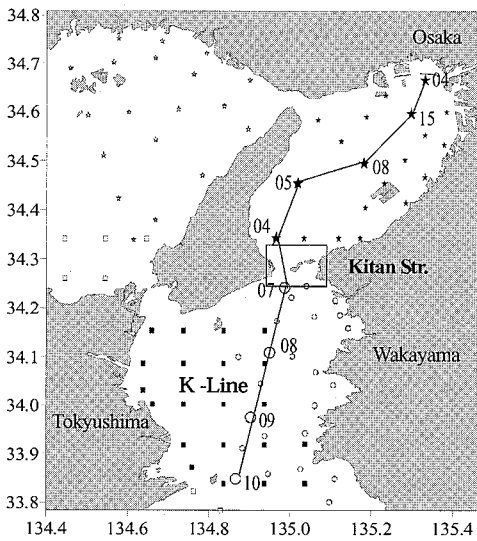
## 3. 観測結果

### (1) 流動と水質の断面構造

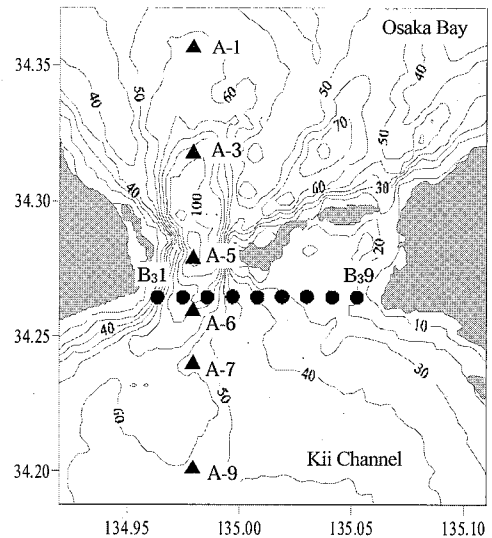
図-2 に 2005 年夏季に実施した測線 B<sub>3</sub>断面における残差流と一潮流平均した密度分布を示す。流速ベクトルは, 上向きが紀伊水道から大阪湾への流れ(北流), 左向きが東から西への流れ(西流)を示している。

残差流は断面の東側(和歌山側)では西向き, 西側(淡路島側)の上層では南向き, 下層では北向きの流れを示し, 同じく黒潮が離岸していた 2000 年, 2001 年の流況と酷似し, 1999 年, 2002 年の接岸時の流況とは大きく異なっており, 黒潮離岸時の特徴的な流況を示していると言える。比較のため 2001 年と 2002 年の観測結果を図-3 に示す。

1 正 会 員 工 博 大阪大学大学院助教授 地球総合工学専攻  
2 学生会員 修(工) 大阪大学大学院 地球総合工学専攻  
3 修(工) 兵庫県東播磨郡農政局 県土整備部  
4 正 会 員 博(工) 大阪大学大学院助手 地球総合工学専攻  
5 フェロー 工博 大阪大学大学院教授 地球総合工学専攻



(a) 紀淡海峡周辺海域と浅海定線調査地点



(b) 紀淡海峡における観測点

図-1 紀淡海峡周辺海域と観測点

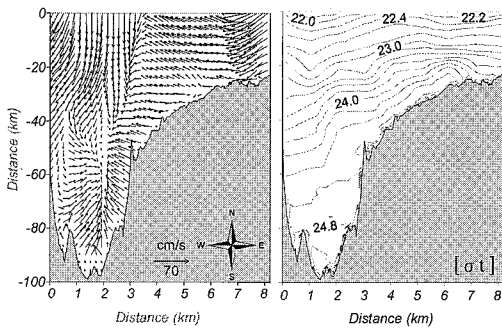


図-2 残差流と平均密度分布 (2005年 8月 10日)

密度の断面分布も、黒潮が離岸し大きな表底密度差 (約  $\Delta\sigma_t = 3.0$ , 水温差約  $6^\circ\text{C}$ ) を示した 2000 年と 2001 年のパターンとよく一致しており、海峡部においても成層構造が認められる。

以前の観測結果を含め海峡断面の流動構造と黒潮離岸の関係性をまとめると、以下のような特性が認められる。

海峡深水域の流動は、離岸時 (2000 年, 2001 年, 2005 年) には上層が南流, 下層では北流を示し, 接岸時 (1999 年, 2002 年) には水深方向にはほぼ一様な構造を示し, 黒潮の離岸による影響が顕著に認められる。密度構造に関しても, 離岸時には海峡部においても明瞭な成層構造を示すが, 接岸時には鉛直方向に一様化される。

海峡断面を通じての物質収支は流れの影響を強く受け, 一潮汐あたりの栄養塩収支は今回の観測では大阪湾からの流出成分が卓越していた。しかし, 表-1 に示す水深別の断面輸送量 (一潮汐あたり) は黒潮離岸時には 50 m 以深で流入傾向を示し, 図-4 に示すように底層から大阪湾へ栄養塩の輸送がなされていることがわかる。この

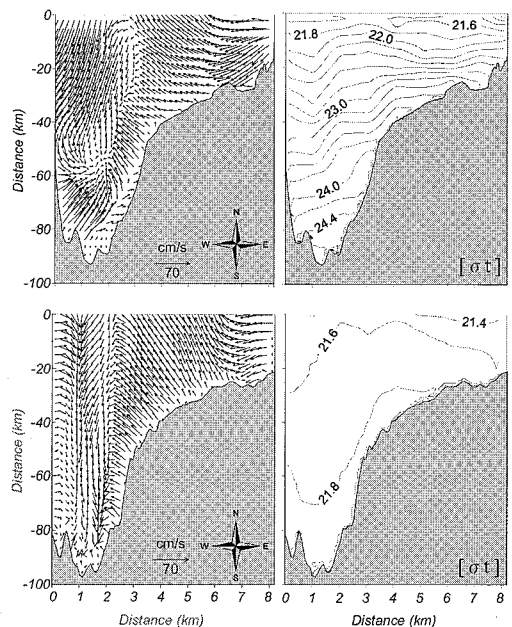


図-3 残差流と平均密度分布

(上: 2001年 8月 10日, 下: 2002年 9月 10日)

ことは, 大阪湾に外洋起源の栄養塩が供給されている可能性を示す結果でもある。この 50 m 以深の底層から大阪湾へ輸送される栄養塩の量は, 今回の観測では全窒素が約 150 ton/day, 全リンが約 18 ton/day と算定され, この量は陸域からの大阪湾への流入負荷量 (門谷, 1991) に匹敵する。同じく黒潮が離岸していた 2001 年においても, それぞれ 162 ton/day, 25 ton/day の流入量が算定された。

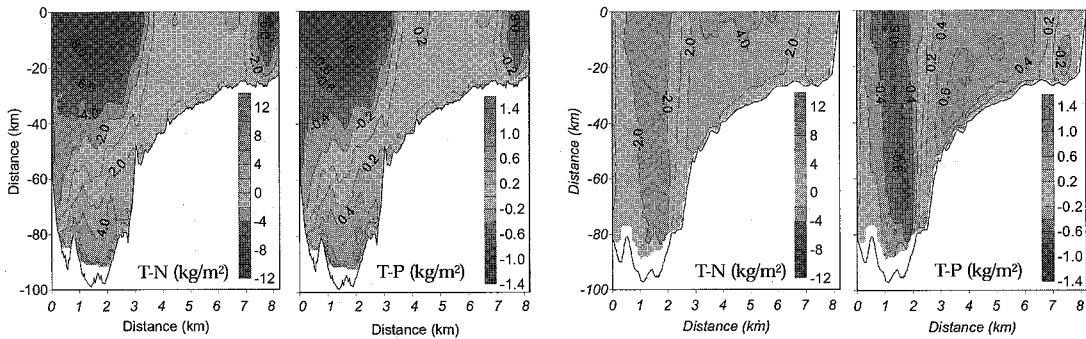
表-1 水深別の断面輸送量(2005年8月10日)

| Depth   | Discharge<br>m <sup>3</sup> /tide | Salinity<br>ton/tide | Chl-a<br>ton/tide | TN<br>ton/tide | NO <sub>2</sub> -N<br>ton/tide | NO <sub>3</sub> -N<br>ton/tide | NH <sub>4</sub> -N<br>ton/tide | (NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub> )-N<br>ton/tide | DIN<br>ton/tide |
|---------|-----------------------------------|----------------------|-------------------|----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------|
| 0-10 m  | -6.59E+08                         | -2.16E+07            | -4.35             | -147.1         | -1.76                          | -17.12                         | -22.26                         | -18.88                                            | -41.13          |
| 10-20 m | -4.49E+08                         | -1.48E+07            | -2.66             | -105.6         | -1.56                          | -25.29                         | -10.41                         | -26.86                                            | -37.27          |
| 20-30 m | -2.70E+08                         | -8.99E+06            | -1.15             | -66.8          | -1.12                          | -26.26                         | -3.86                          | -27.38                                            | -31.25          |
| 30-40 m | -1.62E+08                         | -5.48E+06            | -0.50             | -41.9          | -0.79                          | -23.96                         | -1.69                          | -24.75                                            | -26.44          |
| 40-50 m | -6.65E+07                         | -2.31E+06            | -0.12             | -18.4          | -0.45                          | -15.37                         | -0.68                          | -15.81                                            | -16.49          |
| 50-60 m | 6.24E+06                          | 5.83E+04             | 0.04              | -1.2           | -0.17                          | -5.67                          | -0.21                          | -5.84                                             | -6.05           |
| 60 m 以深 | 3.11E+08                          | 1.04E+07             | 0.52              | 78.4           | 0.71                           | 35.62                          | 3.12                           | 36.33                                             | 39.45           |
| Total   | -1.29E+09                         | -4.26E+07            | -8.21             | -302.7         | -5.14                          | -78.05                         | -35.99                         | -83.20                                            | -119.18         |

| Depth   | DON<br>ton/tide | DTN<br>ton/tide | PTN<br>ton/tide | TP<br>ton/tide | PO <sub>4</sub> -P<br>ton/tide | DOP<br>ton/tide | DTP<br>ton/tide | PTP<br>ton/tide | Si(OH) <sub>4</sub><br>ton/tide |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|
| 0-10 m  | -83.62          | -123.1          | -23.88          | -17.42         | -11.71                         | -2.60           | -14.10          | -3.28           | -141.0                          |
| 10-20 m | -51.51          | -87.1           | -18.18          | -11.95         | -8.48                          | -1.44           | -9.55           | -2.30           | -122.2                          |
| 20-30 m | -26.39          | -56.3           | -10.13          | -7.40          | -5.62                          | -0.59           | -5.97           | -1.36           | -99.5                           |
| 30-40 m | -12.74          | -38.3           | -3.45           | -4.62          | -3.92                          | -0.22           | -3.90           | -0.68           | -76.0                           |
| 40-50 m | -5.22           | -21.1           | 2.72            | -2.03          | -2.20                          | 0.01            | -2.04           | 0.02            | -38.2                           |
| 50-60 m | -1.53           | -7.4            | 5.81            | -0.10          | -0.69                          | 0.16            | -0.49           | 0.39            | -0.6                            |
| 60 m 以深 | 17.77           | 56.6            | 21.78           | 9.25           | 6.54                           | 0.70            | 6.22            | 3.03            | 151.8                           |
| Total   | -163.23         | -276.6          | -25.32          | -34.27         | -26.08                         | -3.97           | -29.84          | -4.19           | -325.7                          |

[D: Dissolved, I: Inorganic, O: Organic, P: Particle, N: Nitrogen, P: Phosphorus, T: Total]

図-4 TN と TP の断面フラックス分布  
(左: 2005年8月10日, 右: 2002年9月10日)

## (2) 水質の季節変動

図-5 に測点 A-1 と A-9 における栄養塩濃度の季節変化を示す。傾向を捉えるために前後一ヶ月の移動平均を施している。[亜硝酸態+硝酸態]窒素の濃度変化を見ると、測点 A-1, A-9 とともに冬季に 0.06 mg/L 以上の高濃度となる季節変動が認められる。この季節変動に加え、黒潮離岸時 (2004 年 7 月以降) には表層を除くと春季から夏季にかけて黒潮接岸時 (2004 年 6 月以前) よりも濃度が高く、表層を除く測点 A-9 や測点 A-1 の底層では冬季に匹敵する高濃度となっていることがわかる。また、測点 A-1 と A-9 を比較すると、濃度変化はほぼ同じ傾向を示していることがわかる。リン酸態リンに関しては、測点 A-9 の底層では黒潮が接岸から離岸に転じた 2004 年 6 月から 7 月にかけて 0.015 mg/L 以上の高濃度となっているが、これを除くと[亜硝酸態+硝酸態]窒素と同様に冬季に高濃度となる季節変動に加え、黒潮離岸時には春季から夏季にかけても冬季に匹敵する高濃度を示していることがわかる。

粒子態全窒素と粒子態全リンの濃度変化からは、溶存

態ほどの顕著な季節変動は捉えられないものの、粒子態全窒素は春季に高い値を示し、測点 A-1 と A-9 ではほぼ同様の変動傾向を有していることがわかる。2004 年 5 月には粒子態全窒素は両測点ともに高濃度を示したのに対し、粒子態全リンは測点 A-1 でのみ高濃度を示した。この時のクロロフィル a の測定値をみると、測点 A-1 の表層で 20 μg/L を超える高い値を有していた。これより植物プランクトンの増殖により測点 A-1 の表層で 0.10 mg/L 以上の高濃度を示したものと考えられる。

一方、図には示していないが、全窒素については顕著な季節変動はみられなかった。しかし、2005 年の春季から夏季にかけて測点 A-9 では表層以外でやや高濃度を示し、黒潮離岸の影響を受けている可能性が示唆された。そして、全窒素に占める粒子態窒素、溶存有機態窒素の割合は大きく、物質輸送の中で重要な役割を果たしていることもわかった。

## (3) 黒潮離岸の影響

観測結果より黒潮離岸時には、春季から夏季にかけて[亜硝酸態+硝酸態]窒素とリン酸態リンが特に底層で高

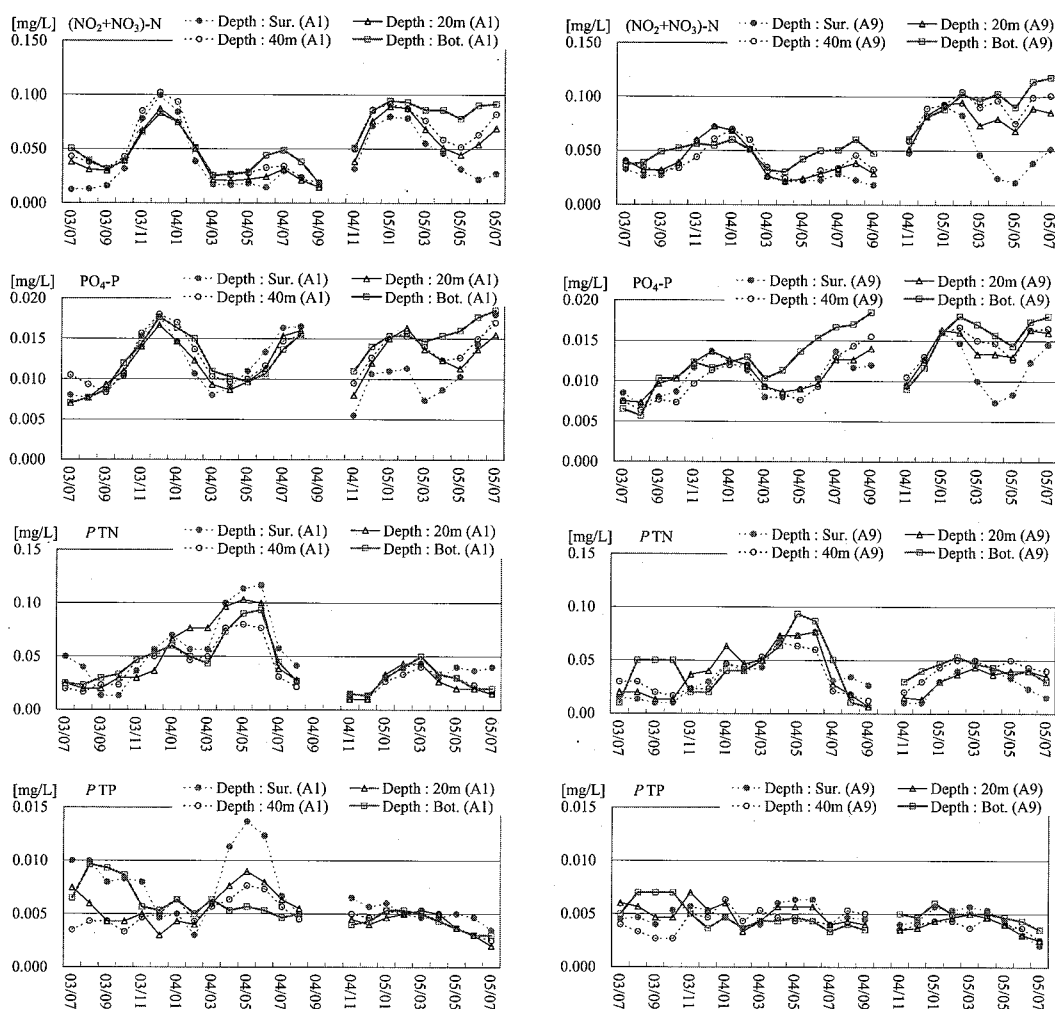


図-5 測点 A-1 と A-9 における栄養塩濃度の季節変動

濃度になることがわかった。そこで、黒潮離接岸が大坂湾の水質に及ぼす影響を明らかにするために、周辺府県が年4回実施している浅海定線調査データを用いた解析を試みた。解析には、図-1に示す紀伊水道入口から紀淡海峡を経て大阪湾奥部に至る、K-Lineの底層データを使用した。図-6は、各測点の栄養塩濃度の変動と黒潮離接岸の関係を示したものである。離接岸距離は海上保安庁の海洋速報を基に、潮岬から黒潮流軸までの距離を抽出し、まとめたものである。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20~30海里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。図-6から黒潮が離岸していた2000年、2001年、2005年の夏季には、高栄養塩の水塊が底層に存在し、紀淡海峡にまで及んでいることがわかる。2001年には、大阪湾の南部海域においても高濃度水塊が感知されてお

り、大阪湾に影響が及んでいることがわかる。

黒潮離接岸の大阪湾への影響を見るために、大阪湾で1989~2004年の夏季(8月)に観測された底層の硝酸態窒素の平均濃度分布を図-7に示す。測点ごとのデータを黒潮接岸時と離岸時に分けて平均したものである。黒潮接岸時に比べ離岸時は、大阪湾南西部で高い濃度を示し、その濃度差は0.03 mg/L以上に及んでおり、黒潮離接岸の影響が大阪湾西部海域に達していることが示唆される。春季(5月)のデータ解析からも同様の傾向が認められた。しかし、このような高濃度域は紀淡海峡周辺海域に限られ、大阪湾では黒潮離接岸による変動よりも季節変動の方が大きいこともわかった。

また、浅海定線調査データの解析により、頻度は高くないが黒潮接岸時に紀淡海峡南部海域の底層に高栄養塩の水塊の進入が認められた。

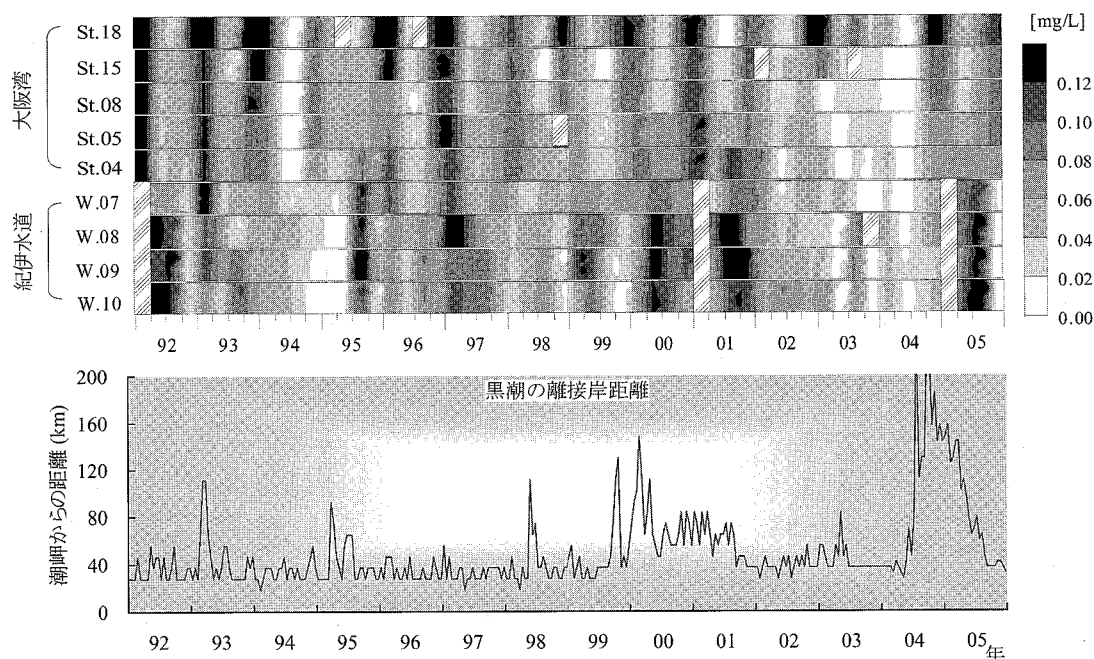


図-6 K-Line 底層の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の時空間変動 (W.10: 紀伊水道入口, St.18: 大阪湾奥部, 欠測: 斜線)

#### 4. おわりに

本研究で得られた主たる結果は、以下の通りである。

- ① 紀淡海峡深水域の流動は、黒潮離岸時には上層が南流、下層では北流を示し、接岸時には水深方向にほぼ一様な構造を有しており、黒潮の離接岸による影響が顕著に認められた。
- ② 栄養塩の輸送構造は流れの影響を顕著に受け、一潮汐あたりの物質収支は大阪湾からの流出成分が卓越していたが、水深別の断面輸送量は黒潮離岸時には 50 m 以深で流入傾向を示し、底層から大阪湾へ栄養塩の輸送がなされていることが確認された。その量は河川からの流入負荷量に相当する量と見積もられた。
- ③ 海峡付近の栄養塩濃度と黒潮の離接岸状況を比較すると、黒潮離岸時には春季から夏季にかけて「亜硝酸態 + 硝酸態」窒素とリン酸態リンが特に底層で高濃度になることがわかった。
- ④ 浅海定線データの解析より、春季から夏季にかけて大阪湾南西部海域の底層水質にも黒潮離接岸の影響がみられた。しかし、大阪湾の水質は紀淡海峡周辺海域を除けば黒潮離接岸による変動よりも季節変動の方が大きいことも明らかとなった。

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されたもので、その一部は科学研究費補助金・基盤研究(C) (No.16560447, 代表者 西田修三)の補助を受けている。また、兵庫県・大阪府・徳島

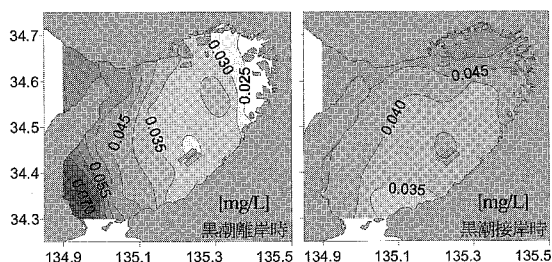


図-7 黒潮離岸時と接岸時の底層の  $\text{NO}_3\text{-N}$  分布 (8月)

県・和歌山県の各水産試験場には観測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

- 沿岸海洋研究部会(2006): 沿岸海域に存在する海洋起源のリン・窒素, 沿岸海洋研究, 第43巻, pp. 101-155.
- 金 漢九・西田修三・中辻啓二(2003): 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, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 926-930.
- 瀬戸内海環境保全協会(2004): 瀬戸内海におけるリン・窒素の挙動, 瀬戸内海, No.40, pp. 1-32.
- 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, 第73巻, 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.
- 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, 第29巻, pp. 13-27.