

内部潮汐卓越型の湾内海水交換過程に及ぼす外洋水の影響

仁木将人*・山下隆男**・芹澤重厚***・福神和興****

紀伊水道の水塊構造は黒潮流路により強く影響を受けている。水塊構造の変化は、そこに面する内湾での海水交換や水質分布に大きな影響を及ぼすと考えられ、田辺湾での観測結果を通して黒潮流路が内湾に与える影響に関して検討を行った。その結果、黒潮接岸時には湾内の流動が小さくなり、湾奥では底層から貧酸素化が進むと推測された。それに対して黒潮離岸時には流動も大きくなり貧酸素化しない。しかし、沿岸湧昇等と結びつくと、外洋水が湾奥まで進入し貧酸素化・高栄養塩化するが、頻繁に発生する強い底層流れにより数日で解消している。検証のために両者の成層構造により追算を行ったが、数値計算もこうした結果を支持するものであった。

1. はじめに

沿岸の海況変動に与える外洋からの影響に対する重要性が認識され、沿岸と外洋の相互作用に焦点を当てた様々な研究が行われている(杉本, 1994)。従来、沿岸域での水質・生態環境に与える外的インパクトは、人間活動に由来する流域からの影響が重視されてきたが、市民や行政の流出汚濁負荷削減の努力により相対的に外洋が与えるインパクトが大きくなっている。また、紀伊水道の底層に外海起源の栄養塩水塊があり、大阪湾や瀬戸内海への栄養塩の供給源となっていることが指摘されている(藤原ら1997)。一方、紀伊水道での水塊構造は黒潮流路により強く影響を受けており、これが外洋からの栄養塩流入の多寡を決めているとの報告もある(高志ら, 2002)。紀伊水道での水塊構造の変化は、そこに面する内湾で夏季成層時の内部潮汐や沿岸湧昇と相まって、海水交換や水質分布に大きな影響を及ぼすと考えられる。しかし、外洋水の内湾での振る舞いや内湾側の応答特性に関する知見は未だ多くない。本研究では、これまで行われてきた和歌山県田辺湾での水質観測の結果を、黒潮流路との関係から整理し、水塊構造と水質の関係を考察した。ついで、紀伊水道に黒潮の離岸時、接岸時それぞれの水塊構造を与えた場合の田辺湾への影響を数値解析により検討した。

2. 現地観測の概要

田辺湾では1998年以降、湾内環境の変化や赤潮予測手法の確立を目的として環境観測を継続的に行っている。観測項目は、湾口観測塔(図-1のTower)での気象・海象条件の常時計測、観測塔付近でのADCPを使つての流況観測、小島により遮られた水質の良い湾奥部

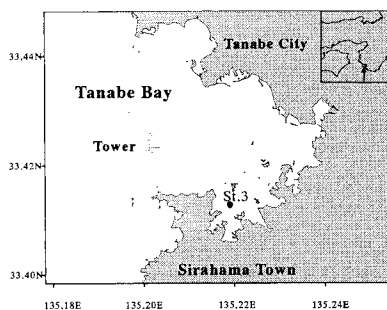


図-1 観測地点の概要

(田辺湾南部(図-1のSt. 3))においてCTDを使用し、水質の定点観測、湾奥底層での電磁流速計による流速観測、湾奥での採水による植物プランクトンの種同定および栄養塩計測等である。また、紀伊水道や紀伊半島沿岸域では和歌山県農林水産総合技術センターによって定点観測が行われている(和歌山農林水産総合技術センター, 2000, 2001)。

竹内ら(1997)によれば、黒潮の流軸が潮岬沖から20海里より離れると紀伊水道の下層に低温・高塩分の水塊が進入する。これに従い、海上保安庁が発行する海洋速報(<http://www.kaiho.mlit.go.jp/>)から、黒潮流路が安定的に20海里以内に接岸していた1999年を黒潮接岸年とし、また、黒潮流路が8月の下旬を除いて20海里以上に離岸していた2000年を黒潮離岸年として、両年の観測結果の比較により黒潮の影響を議論した。

3. 観測結果の考察

(1) 湾口観測塔観測結果

図-2に黒潮接岸年である1999年と黒潮離岸年である2000年の湾口観測塔での夏季(7月~8月の2ヶ月)の水温鉛直分布の時系列変化を示す。どちらの年にも底層付近の観測結果に欠損する時期がある。1999年の観測結果では7月の初旬を除くと水温が全層で25°C以上あり、表層から底層までの水温差も最大で約2°C程度である。

* 正会員 工博 東海大学海洋学部 講師
** 正会員 工博 京都大学防災研究所 助教授
*** 京都大学防災研究所 助手
**** 工修 (株)ニュージェック

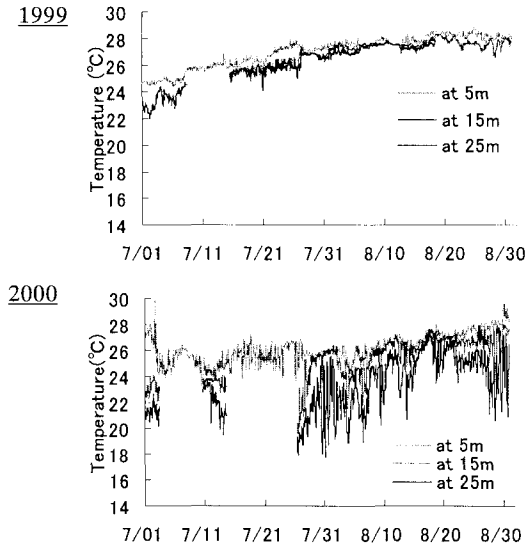


図-2 観測塔での水温変化

これに対して2000年の観測結果では、鉛直方向の水温差が大きく、底層付近では半日周期で 2°C 程度の水温変化を見せる。7月26日や8月4日、6日、28日には中層から底層にかけて潮汐周期よりも少し長い期間 2°C から 4°C 程度の水温低下がみられる。こうした水温低下は内部潮汐に北風吹送時の沿岸湧昇や気圧勾配による東向き流れが重畳して発生していることが指摘されている(吉岡ら, 1996; 仁木ら, 2004)。また、8月下旬に一時黒潮が接岸したため8月17日には、水温が一様化している。

図-3に北風が吹いた8月初旬上げ潮時の観測塔での流速の鉛直分布を示す。田辺湾は湾口を西に開いているため黒丸で表した東西方向成分(東向き正)が湾への流

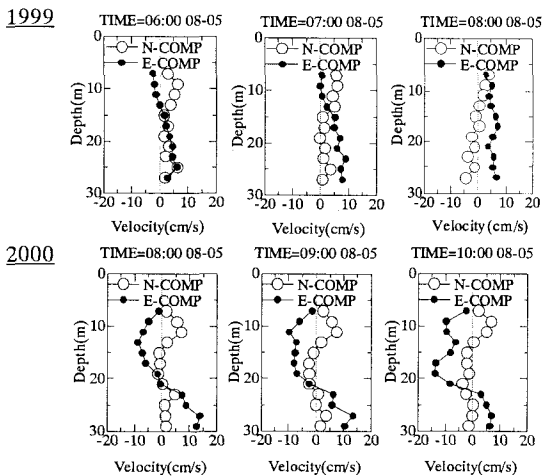
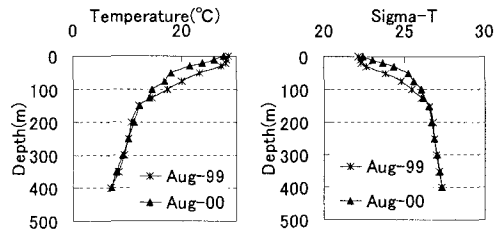


図-3 観測塔での流速の鉛直分布

出入を示している。2000年の観測結果を見ると上層と下層が逆位相を示す内部波の特徴がよく現れているのに対して、1999年は内部波的な特徴は弱く全層的に流入していることがわかる。また、全層的に流入するため最大流速が小さくなっている。

図-4に紀伊水道沖での8月の水温と σ_t の定点観測結果を示す。130mより浅い水深での違いが大きく、黒潮離岸年である2000年の水温が低く σ_t が大きい。田辺湾の水深に相当する40m以浅では、1999年は水温や σ_t の値の差が小さいため成層面が50m以下にあると判断されるのに対して、2000年は浅い水深でも成層が発達していることがわかる。

湾口での流れの鉛直分布と併せて考えると、黒潮接岸年である1999年は黒潮の影響により一様化された水温構造や流動構造を形成しているのに対して、黒潮離岸年である2000年は成層が発達し内部波的な流れを形成するため底層流速が大きくなり、普段から紀伊水道沖にある冷たい水が潮汐周期で流出入しているが、沿岸湧昇等のイベントと重なると中層から底層にかけて大きな海水交換が行われると考えられる。

図-4 紀伊水道での水温・ σ_t

(2) 湾奥部観測結果

図-5にCTDによる水温、塩分、溶存酸素濃度およびクロロフィル a の観測結果を示す。CTD観測は毎日午前9時に近畿大学の養殖筏で行われた。観測期間は、1999年7月21日から8月17日、2000年は少し短く7月25日から8月11日である。1999年は湾奥に関しても湾口同様水温が鉛直方向に一様であり、表層と底層の温度差が 2°C 以内しかない。塩分もまとまった降雨がみられた8月10、11日に表層で低い値を示す程度で、概ね一様である。水温、塩分から判断して成層化していないようであるが、溶存酸素は底層でしばしば低い値を示す。クロロフィル a は降雨後に少し上昇するものの概ね低い値で推移している。これに対して2000年には、7月26日や8月4日、6日に底層で急激な水温低下と塩分上昇がみられる。これは湾口での水温変化に追従するもので、すなわち湾口で中層から底層にかけての水温低下が観測さ

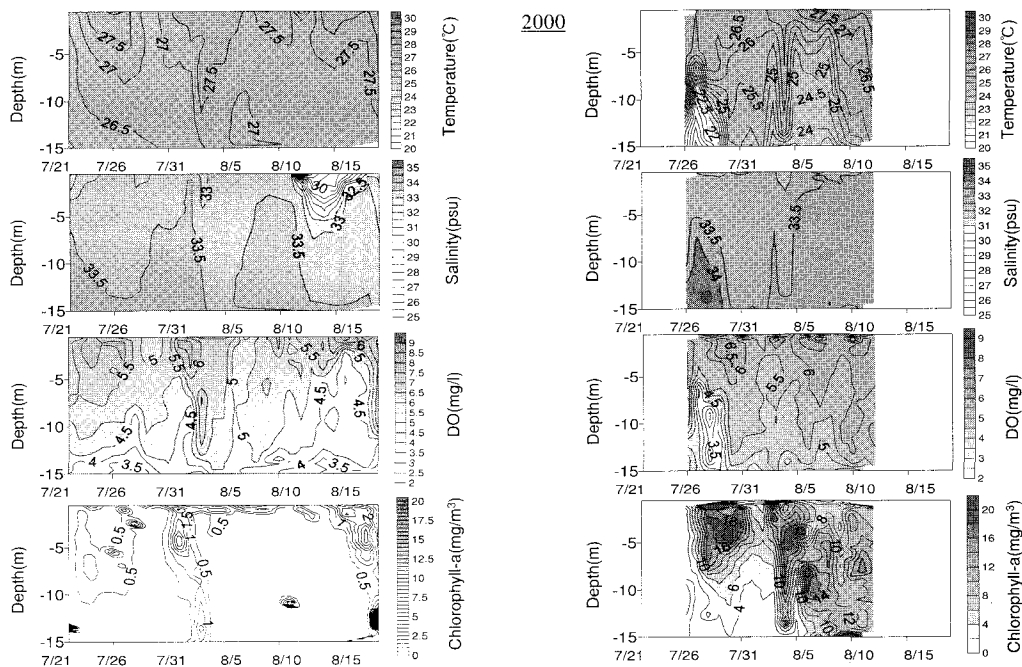


図-5 湾奥でのCTD観測結果

れたとき湾奥でも底層水温が低下している。冷たい水塊の進入により溶存酸素濃度が低下しているが、クロロフィル α 値も進入後上昇している。

図-6 に電磁流速計による底層での流速の変化を示す。南方向の流れが湾奥への流入を表している。1999年は2000年に比べ全体として流速の値が小さく、5 cm/s を超えることはほとんどない。観測塔での流れは、黒潮接岸年は弱く離岸年が強くなっていたが、湾奥でも同様の結果となった。CTD の観測結果と併せて考えると、1999年は底層から貧酸素化が進んでいるが、これは湾奥方向への強い南向き流れが底層で生じないためであり、強い南向き流れが発生した8月4日に一旦解消している。これに対して2000年にはしばしば強い南向き流れが生じているが、これが湾口での中層から底層にかけての外洋水の進入と結びついたときには、湾奥底層への冷たい水の進入が起きる。こうした冷水塊により溶存酸素濃度が低下するものの、強い南向き流れが頻繁に発生しているためすぐに解消している。

紀伊水道の下層に進入する低温高塩分の水塊は高栄養塩であることが知られている。CTD の観測結果を見ても湾奥に冷水塊が進入するとクロロフィル α 濃度が増加している。そこで水温と硝酸態窒素の相関を求め図-7 に示す。ただし、栄養塩観測はCTD 観測とは観測期間や頻度が異なる。また、観測期間中降雨があり流域からの影響も考えられることから、塩分濃度が極端に低いも

のは除いて考えた。1999年は非常に観測値が少ないが、水温も高く栄養塩濃度が低い。それに対して2000年には24°C 以下の観測結果に水温と栄養塩の負の相関が見られる。これは紀伊水道でみられるものと同様の傾向であり、外洋水が湾奥にまで到達していることがわかる。また、外洋水に比べると普段の栄養塩濃度は低く外洋水の進入が栄養塩の供給源になっていることが分かる。

田辺湾は1990年代の前半までは水環境の劣化から底層でしばしば貧酸素化していた。今回の観測結果の解析から黒潮接岸時には底層付近に生じる流れが弱くなるため、湾奥方向への強い南向き流れが発生するまで底層から次第に貧酸素化していることがわかった。当時の貧酸素化はおそらく養殖魚への生餌の大量投与等による底質環境の悪化によるものであり、近年の養殖技術の向上によりそうした貧酸素状態の発生が減少しているのではないかと考えられる。しかし依然として黒潮接岸時には底層から貧酸素化が進んでいるようである。また、黒潮離岸時に発生する外洋から湾奥底層への冷水塊の進入は、同時に貧酸素化と高栄養塩化をもたらす。普段は底層でしばしば発生する強い南向き流れによって1, 2日程度で解消しているが、外洋水の進入後顕著な南向き流れが生じず黒潮の接岸が起きるといった複合的な場合には、底層の貧酸素化が長期化する恐れがあり注意が必要である。

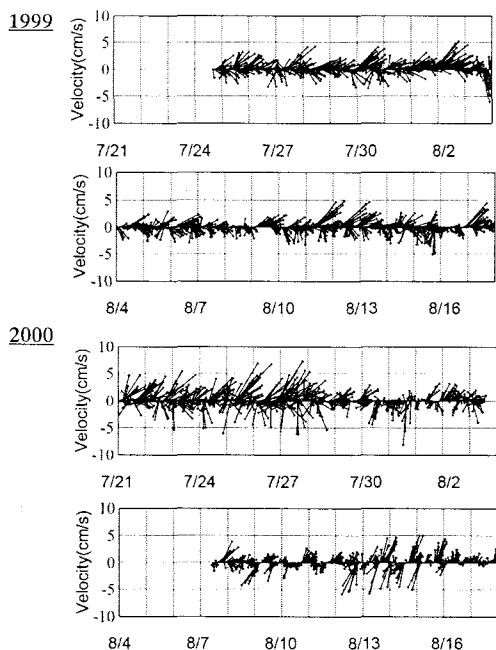


図-6 湾奥底層での流速

4. モデルの概要

観測結果の考察から、黒潮の離接岸による水温構造の違いは場の構造を規定するのみならず流れの構造を変え、その影響は湾奥にまで到達していることが分かった。しかし、考察は湾口観測塔と湾奥の観測点での結果からのみ行われている。そこで黒潮接岸時と離岸時の水温・塩分構造を与え再現計算を行うこととした。計算にはPOMを使用した。σ座標に起因する数値拡散に関してこれまで様々な研究が行われている。その一つに密度に関して座標系を新たな矩形格子として切り直すSVK法 (Stelling・van Kester, 1994) がある。SVK法は部分的なコードの改良で効果的な補正が行われる (Kliem and Pietrzak, 1999) が、オリジナルのSVK法は圧力勾配項を過小評価するようであり、Slørddal (1997) による改良SVK法がしばしば用いられる。改良SVK法では密度の中心で格子を再定義して新たに矩形格子を考え、隣り合う格子の定義位置のずれは補完をおこない密度勾配を求める。しかし実際に計算で求めたい密度勾配の定義点は、スタッガード格子を使用しているため、格子形成の基準にした密度の定義点とは鉛直方向と水平方向に各半格子のズレがあり、再定義した格子とは無関係である。そのため求めた密度勾配をさらに補完する作業が必要であるため計算負荷が大きい。そこで密度の定義点ではなく密度勾配の定義点を中心に格子を再定義する

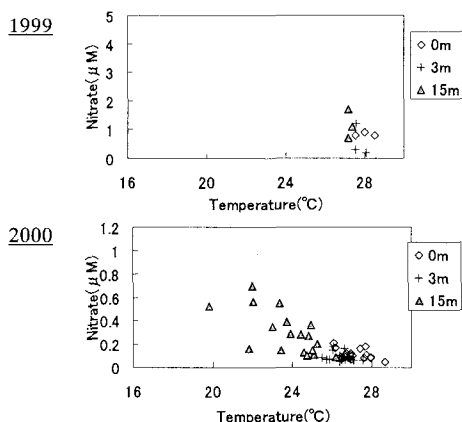


図-7 水温・栄養塩の相関図

改良を行った。

計算領域は紀伊水道を含む紀伊半島南部の沿岸であり、水温および塩分の初期値は図-4に示した和歌山県農林水産総合技術センターの定点観測結果を使用した。境界では潮変動を考慮し (Matsumoto ら, 2000), 計算は7日間行った。開始から2日間は無風状態で水温・塩分の計算は行わず、3日目から夏季の季節風である南風2 m/sを与え、5日目以降沿岸湧昇が発生する北風3 m/sを与えた。水平の格子間隔は1分とし、鉛直層数は30層とした。

5. 計算結果

図-8 湾口観測塔に当たる格子での北風吹送時の流速の東西方向の鉛直分布を示す。計算結果は2000年に鉛直分布が逆位相を示す内部波の特徴がよく現れているのに対し、1999年は全層的であり観測結果の傾向をよく現している。図-9に紀伊水道での水温の東西方向断面分布を示す。東端 (右側) の水深40 m程度の領域が田辺湾である。2000年の計算結果では、海底勾配に沿う流れが田辺湾付近まで冷たい水を押し上げているのに対して、1999年には海底勾配に沿う流れが弱く、上に乗る温かい水がブロックしている。水温変化も概ね観測結果を再現しており、黒潮の離接岸が田辺湾の水温構造や水交換、進入外洋水を決定する最も大きな要因であることが分かった。

6. おわりに

観測結果および数値解析結果から得られた主要な結論は次のようである。(1) 田辺湾では黒潮離岸時に夏季成層の影響により内部波的特徴を現すが、黒潮接岸時には表層50 m付近の水温が一様化するため、顕著な内部波的特徴が現れない。そのため湾内の流動が小さく、

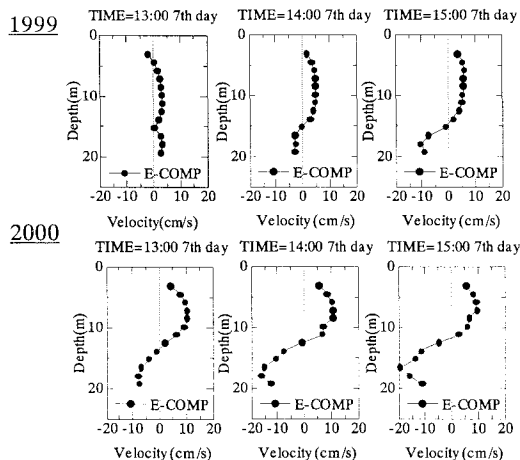


図-8 湾口での東西方向流速分布の計算結果

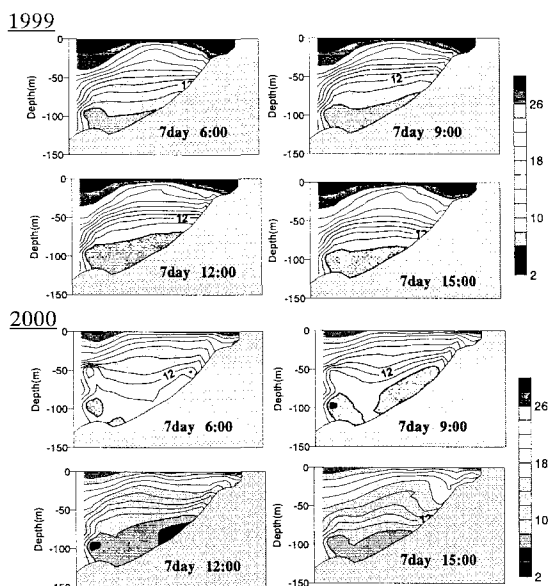


図-9 紀伊水道での東西方向水温分布の計算結果

の相関を求めたところ、黒潮離岸年の観測結果には水温 25°C 以下に強い負の相関が現れた。こうした負の相関は黒潮離岸時に紀伊水道の下層で見られるものと同一の傾向であり、紀伊水道低層の高栄養塩濃度の水塊がそのまま湾奥まで進入していることが分かった。(4) 数値モデルを使って1999年と2000年の水塊構造による流れの違いを検討したところ、2000年には湧昇を引き起こす北風が吹くと海底に沿う流れが生じ田辺湾まで進入するのに対し、1999年には表層の黒潮が進入を制限していた。紀伊水道での水塊構造が田辺湾での流動構造と物質循環を決定する最も影響の大きい因子である事が示唆された。

参考文献

- 杉本隆成 (1994): 総論 黒潮沿岸域の流動と海水交換, 月刊海洋 Vol. 26, No. 11, pp. 673-678.
- 高志利宣・藤原建紀・住友寿明・竹内淳一 (2002): 外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, 第2号, pp. 49-60.
- 仁木将人・山下隆男・芹澤重厚・山口弘誠・福神和興 (2004): 田辺湾における夏季成層時の海水交換過程, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 896-900.
- 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): 紀伊水道の流れと栄養塩輸送, 海と空, 第73巻, 第2号, pp. 31-39.
- 吉岡洋・芹澤重厚・高山知司・田中祐志 (1998): 夏季田辺湾における内部急潮による海水交換, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 456-460.
- 和歌山県農林水産総合技術センター水産試験場 (2000): 漁況海況予報事業結果報告書, 251p.
- 和歌山県農林水産総合技術センター水産試験場 (2001): 漁況海況予報事業結果報告書, 251p.
- Leiv Havard Slørdal (1997): The pressure gradient force in sigma-co-ordinate ocean models, Int. J. numer. methods fluids, Vol. 24 pp. 987-1017.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe (2000): Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan, Journal of Oceanography, Vol. 56, pp. 567-581.
- Nicolai Kliem and Julie D. Pietrzak (1999): On the pressure gradient error in sigma coordinate ocean models A comparison with a laboratory experiment, J. Geophys. Res., Vol. 104, pp. 29,781-29,799.
- Stelling, G. S. and J. A. Th. M. vanKester (1994): On the approximation of horizontal gradients in sigma co-ordinates for bathymetry with steep bottom slope, Int. J. numer. methods fluids, Vol. 18 pp. 915-935.

水温・塩分は全層的に変化し、底層の劣化した湾奥では底層から貧酸素化が進行することが確認された。(2) 黒潮離岸時、沿岸湧昇等が発生すると湾内に生じている強い底層流れと結びつき、冷たく塩分濃度の高い外洋水が素早く湾奥まで進入していると推測された。(3) 進入水は水温が低いため低溶存酸素であり、進入後にクロロフィル濃度の増加を引き起こしている。硝酸態窒素と水温