

田辺湾における夏季成層時の海水交換過程

仁木将人* ・山下隆男**・芹澤重厚***
山口弘誠****・福神和興*****

和歌山県田辺湾では内部潮汐と沿岸湧昇が夏季の海水交換を促進している。進入外洋水の湾内挙動の把握を目的として、広域観測と数値モデルによる追算を行い、海水交換機構および進入外洋水の湾内での挙動を検討した。その結果、黒潮の影響による表層への暖水の進入や、底層への外海水の浸入阻害が確認された。また、潮汐周期よりも長い3~4.5°Cの水温低下現象は潮汐の下げ時、湾への流入方向の流れとともに発生していた。さらには、大気圧勾配に駆動される大規模な海水流動により、外洋の底層水が湾内に進入する可能性が指摘され、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

和歌山県の田辺湾は図-1に示すように、紀伊水道の入り口にあり太平洋に面している。ここでは、海面熱収支が負となる冬季においては、海面冷却により表層を岸向きに、底層を沖向きに流れるような鉛直循環流や、冬季の北西風による吹送流循環と突発的に発生する急潮によって、頻繁に3次元的な海水交換が行われているが、強い太陽放射により海面熱収支が正となる夏季においては、成層が発達し、この成層を介しての特異な海水交換が観られる。紀伊半島の他の半閉鎖湾と同様に、田辺湾でも夏季の成層時には顕著な内部潮汐が観測され、これにより低層部からの外洋水の出入りを周期的に行っている。潮汐成分を差し引いた残差流としての湾内の海水交換は、10日前後の周期で発生することが観測結果からわかっているが、その発生機構には複数の要因が考えられる。すなわち、北からの風に起因するエクマン湧昇や紀伊半島西岸を北西進する黒潮二次流、内部波とエクマン湧昇の複合によって発生する内部急潮、それ以外の紀伊水道を通しての海水流動機構等により海水交換が行われていると考えられる(吉岡ら, 1998; 田中ら, 1999)。

本研究では、2003年の夏季に実施した進入外洋水の湾内挙動の把握を目的とした広域観測の結果と、海洋モデルPOMによる数値解析結果から、田辺湾での海水交換機構および進入外洋水の湾内での流動特性を検討する。

2. 観測方法

観測は2003年7月4日から8月4日まで行われた。観測期間中は田辺湾湾奥の近畿大学水産研究所の養殖筏において(図-1中1)、毎日午前9時に多項目水質計(Sea-Bird-Electronics社製SBE-25)により水質(水温、塩分、溶存酸素、クロロフィルa、光透過率)の鉛直分布の観測を行った。同時に水深3mの海水を採水し、植物

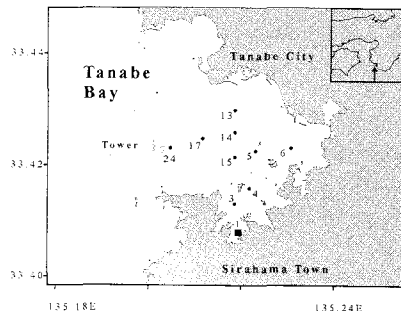


図-1 観測地点の概要

プランクトンを計数した。さらに、2日から3日に一度の割合で田辺湾全域での水質観測を行った。また、湾口部の田辺中島高潮観測塔では、外洋波浪、海上風、潮位、水温、気温、大気圧、日射量などの気象・海象条件を常時計測し、さらには観測塔西側の海山斜面の途中約30m地点に設置したADCP(Acoustic Doppler Current Profiler, 1200 kHz)により、1分平均流速(7月1日~30日; 層厚2m, 15層/31日~8月8日; 層厚1m, 35層)の鉛直分布を連続で計測した。

3. 観測結果

観測期間中に、4回(7月4日前後, 14日前後, 25日前後, 31日前後)海底層(水深25-30m)において急激な水温変化がみられる(図-2)。田辺湾では夏季には、弱い南寄りの海上風が卓越するが、上記の4期間全てにおいて、強さと吹送時間に違いはあるものの、エクマン湧昇を引き起こす可能性のある北風が吹いている(図-6)。水温のスペクトル解析を行うと、15m以下の層では半日周潮のピークが見られる。夏季の田辺湾では、通常、海底層から中央部(水深約15m)に温度躍層が形成され、水温変化幅2°C程度の顕著な内部潮汐が観測されるが、上述した4期間では潮汐周期を持たない(変動周期の長い)、3~4.5°Cの水温低下が観測されている。吉岡ら(1998)はこれを内部急潮と呼び、田辺湾での夏季の海水交換の主要因であると位置付けているが、これら以外に

* 正会員 工博 京都大学防災研究所 COE 研究員
** 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所
*** 京都大学助手 防災研究所
**** 学生会員 京都大学大学院工学研究科
***** 工修 (株)ニュージェック

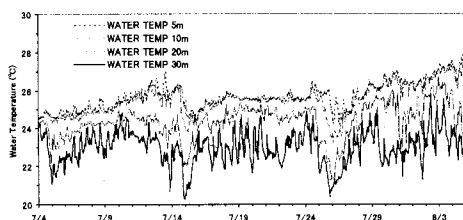


図-2 田辺中島高潮観測塔での水温変化

も外洋に面する半閉鎖性の湾である田辺湾での海水交換機構として、以下のようなによるが考えられる。

- 1) 南風や黒潮二次流に起因する外洋表層水の浸入（紀伊半島を北西進する表層水の流動）
- 2) 北西太平洋での海面大気圧分布やその変動による外洋水の流動が湾内に及ぼす影響・湧昇進入や流出
- 3) 紀伊水道での北風によるエクマン湧昇が田辺湾への底層水の侵入を発生させる
- 4) 内部潮汐による周期的な侵入
- 5) これらの重ね合わせ

以下では、観測データに基づき、上記のような海水交換機構の検討を行う。まず、1)と2)の根拠となっている観測データの検討を行い、その後、湾口観測塔での海象観測や湾全域での水質観測結果を利用して、複合要因について考察する。

(1) 南風および黒潮二次流による外洋表層水の侵入

図-3に示すように、海面水温変動は、25時間移動平均（潮汐成分を消す操作）の水位変動と有意な相関を持つ。田辺湾近海では10日周期程度で黒潮二次流の発生が衛星画像により確認されている。このような事実から、25時間移動平均水位は、黒潮二次流の接岸時に湾内の水位が上昇し、離岸時に水位が低下すると考える。また、海上保安庁の発行している海洋速報の黒潮の位置によると、2003年7月の潮岬沖の黒潮の位置は上旬に日本列島に接岸し、中旬は位置を変えず、下旬は離岸している。7月上旬の水位上昇に比べ下旬の水位上昇のピークは小さく、こうした黒潮本流の離接岸も水位変動と関係していることが確認される。

(2) 大気圧変動による外洋水の変動が湾内に及ぼす影響

田辺湾から紀伊水道を挟んで対岸に位置する小松島（徳島県）との気圧差および潮位差を図-4に示す。これらの数値は、気象庁が作成しているGPVデータ（領域客観解析データ）および気象庁HPからのデータによるものである。両者はよく似た傾向を示しているが、7月25日から7月29日の期間は気圧の変動ほどには水位は変動していない。田辺一小松島間の1hPaの気圧差が田辺の約1cmの水位変化を発生させると考える。変動傾向

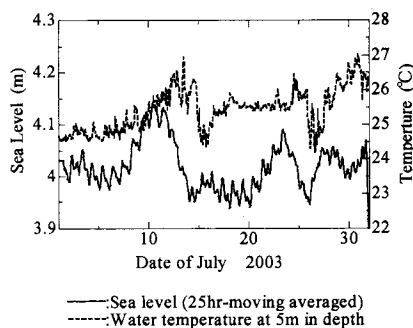


図-3 表層水温と水位の24時間移動平均

が一致している期間にはそれに近い水位差となっている。

田辺一小松島間の気圧差（気圧の正負を反転）と底層の水温変化の関係を図-5に示す。これより田辺側で大きく気圧が低下する14日や24日より、約1日遅れて田辺湾の海底水温の低下がみられる。これより、海底水温の低下は顕著な潮汐成分の振幅増大によるものではなく、緩やかな外洋水の底部からの浸入に起因するものとも考えられる。

(3) 複合要因に関する検討

前述の4つの期間以外にも、北風が吹いていた期間は存在するが、風速が弱く吹送時間も短い。そこで7月8日から27日までの20日間に焦点を絞り、5日ずつ4つの期間に分け田辺湾の海水交換機構を考察する。以下では急激な水温低下が見られなかった7月8日から12日

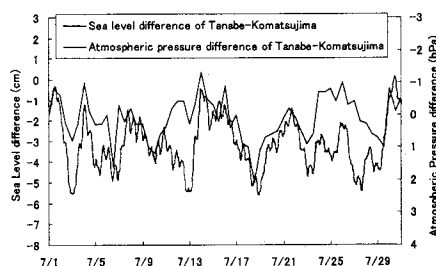


図-4 水位と気圧の偏差（田辺から小松島を引いた）

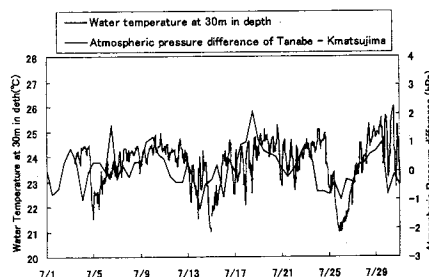


図-5 底層水温と気圧差（気圧は軸を正転）

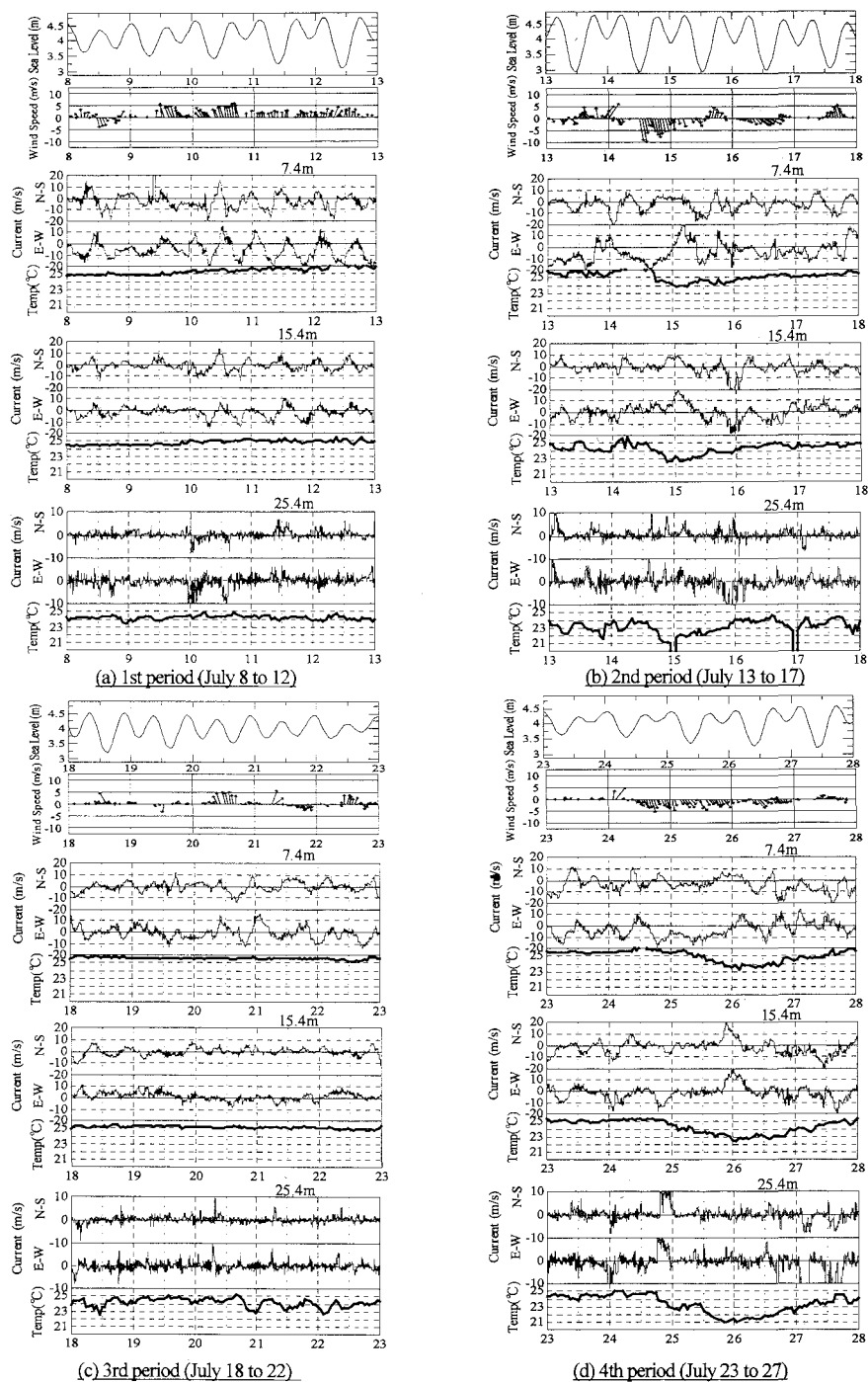


図-6 湾口観測塔での潮位、風速と水深 7.4 m, 15.4 m, 25.4 m での流速、水温の観測結果

を期間 A, 水温低下が見られた 14 日を含む 7 月 13 日から 17 日を期間 B, 水温低下が見られなかった 7 月 18 日から 22 日を期間 C, 25 日に水温低下が見られた 7 月 23 日から 27 日を期間 D とする。

図-6 に、各期間の湾口での潮位、風速(海面上 20 m)と水深 7.4 m (表層), 15.4 m (中層), 25.4 m (底層)における 15 分移動平均流速, 水温の観測結果を示す。方向は、北向きと東向きをそれぞれ正とした。田辺湾は西

に開いているため、東向き流れが田辺湾への進入方向を表している。

(a) 期間 A (7/8~7/12)

図-6(a)では、7月8日の午後に北からの風が吹くものの、この期間は夏季の特徴である南寄りの弱い風が卓越している。この期間には、表層では北東に流入し南西に流出する潮汐周期の変動となっている。中層では振幅は小さいものの表層にやや遅れて同様の変動が見られるが、底層では振幅が小さく、卓越周期もない。表層や中層では1)で考察したように、南風と黒潮二次流の影響で水温が上昇し、底層では、1°C程度の水温変化が見られるものの変化は小さい。

以降で述べられる各期間と比較しても、海水の流出入に対して水温変動の幅が小さい。これは、黒潮二次流が冷たくて重い外海水の進入を妨げているものと考えられる。

(b) 期間 B (7/13~7/17)

期間 B では、13日の午前中、14日の午後から15日の午前および16日に北からの風が卓越している(図-6(b))。特に14日の午後は非常に強い北風がみられる。北風が強い期間を除けば中層では、期間 A と同じく潮汐周期の変動が卓越している。しかし表層では、水温が低下する16日まで潮汐周期の変動は見られない。また水温の低下は14日の午後から15日にかけて全層で同時に発生している。14日の午後に見られる低高潮から15日の0時に見られる高低潮の下げ潮時(通常下げ潮時は西向き流れ)に生じる東向きの流れにより水温低下が生じたと考えられる。

(c) 期間 C (7/18~7/22)

期間 C では、21日の午後を除いて南寄りの弱い風が卓越している(図-6(c))。期間 A と同様に、表・中層では北東に流入し南西に流出する潮汐周期の変動が見られ、底層では振幅も周期もはっきりしない。この期間は底層での水温の変動が期間 A に比べ大きい。これは黒潮二次流が離岸しており、冷たく重い外海水の進入が容易になったためと考えられる。

(d) 期間 D (7/23~7/27)

期間 D では24日から27日にかけて北風が卓越している。期間 B と異なり、水温の低下は底層で起こり、ついで中層、最後に表層の水温が低下する。底層水温の低下は24日午後の低高潮から高低潮にかけての下げ潮時に生じ、25日午後の下げ潮時に再び生じる。25日には中層、表層では湾口からの顕著な流入がないにもかかわらず水温が徐々に低下している。これは底層に進入していた冷たい水が湧昇により表層に達したことを示している。

水温低下時に田辺湾内で計測された海水温、塩分濃度の空間分布を見ると、期間 B は底層から一様に湾内に冷

水が浸入しているのに対して、期間 D では北側から冷水が浸入し、湾を時計回りに回り、湾口南部(ADCP 設置位置付近)から流出している。上で考察された観測塔での流速分布と併せて考えると、期間 B と期間 D では冷水の進入パターンが異なっていると考えられる。

以上の考察は、湾口1点での海象観測データによるもので、湾内外での時空間的な分布に基づいているわけではなく、かなりの部分は主観的に行われている。以下では、数値モデルを援用することで、湾内外での時空間変動を考慮した考察を試みる。

4. モデルの概要

海水交換の再現計算は、POM に SVK 法(Stelling・van Kester, 1994)で水平圧力勾配の補正を施したモデルを作成し、これに外洋の潮汐、黒潮の影響を取り込んだ数値解析を行った。外洋条件は、紀伊水道付近を含む広領域において、地球フロンティアの JCOPE データ(2日間平均値)の水温、塩分の空間分布を初期条件・境界条件として与え、境界での水位に潮変動を入れ(Matsumoto ら, 2000)、広領域の海洋条件(水温、塩分、流速の3次元分布)の再計算を行った。これに、図-7に示すような2段階のネスティングを介して、田辺湾の流れ場を数値計算した。それぞれの計算領域の水平の格子間隔は5分、2 km、400 m、鉛直層数は35層で、気象外力は気象庁の GPV 客観解析データを用いた。計算は、2003年7月14日の外洋水進入を含む、7月8日から16日の8日間とした。

5. 計算結果

図-8にドメイン I で計算した、紀伊水道中央での東西方向流速分布の鉛直プロファイルを示す。白角は気圧を入れた場合、黒角は気圧を入れていない計算ケースである。田辺側で気圧が低下した7月14日の結果である。表層では風の影響が大きく両者の違いは小さいが、中層から底層にかけて気圧を与えた場合の計算結果が東向きに2から3 cm/s 程度大きい。観測結果から考察したように、大気圧勾配に駆動される大規模な海水流動の存在が計算からも再現され、その流れは中・底層で働いているようである。田辺湾付近のグリッドで水温の計算結果を求めると、風向が北に転ずる7月14日に30 m 以浅の層で水温の急激な低下が見られる。これは本モデルが北風による沿岸湧昇を再現していることを表している。しかし、半日周期の水温変動は見られず、内部潮汐の再現に至っていない。和歌山県水試の定線測量データを見ると、この時期田辺湾付近の海域では20~30 m に水温勾配が急激に変化している。モデルではそうした水深を鉛直格子幅30 m 程度の1グリッドで計算しているため、急激

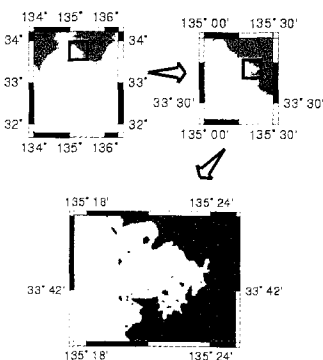


図-7 計算領域

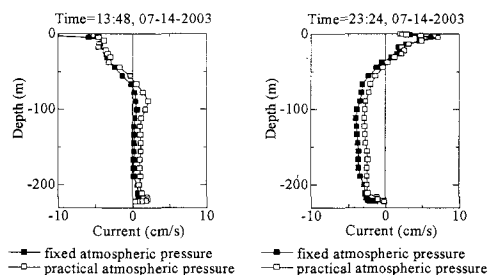
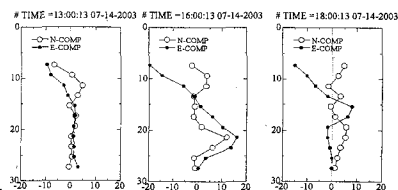


図-8 紀伊水道中央部での流速鉛直分布

Observation



Computation

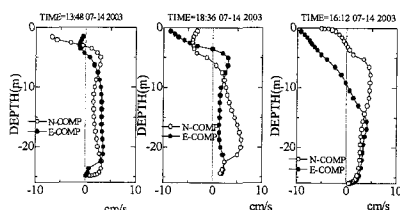


図-9 田辺湾湾口部での流速鉛直分布

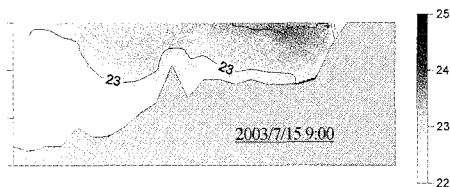


図-10 湾中央部での東西方向断面の水温分布

な密度勾配が再現されず、密度界面での鉛直混合が小さく見積もられているものと考えられる。

図-9に田辺湾領域で計算された湾口観測塔での流速の鉛直分布を示す。外海からの進入が見られた7月14日の結果である。南北成分および東西成分ともに、その傾向をよく示している。すなわち北からの風が卓越するため、表層では南北成分が大きく南向きの、東西成分が西向きの値を示している。また、その補償流として中層で東向きの流れが良く再現されているものの、ピークの値は小さい。これは内部潮汐の再現計算が十分に無いことに起因していると考えられる。図-10に7月14日の湾中央部での東西方向断面の水温分布を示す。流入ピークが小さかったために若干値が小さいが湾奥にまで達する進入が再現されている。

6. まとめ

以上をまとめると、田辺湾の海水の交換機構として次のようなことが考えられる。

(1) 黒潮二次流が接岸時に湾内の水位が上昇し、離岸時に水位が低下すると仮定できる。これによると、黒潮の接岸動で表層への暖水が湾内に進入し、底層への低温・高塩分の外海水の浸入を妨げている。

(2) 大気圧勾配に駆動される大規模な海水流動により、外洋の底層水が湾内に進入する可能性がある。数値

計算にでもこのような流れが再現される。

(3) 潮汐周期よりも長い3~4.5°Cの水温低下現象は潮汐の下げ時、湾への流入方向の流れとともに発生する。

(4) 北風による沿岸湧昇の発生時には、底層からの外洋水の進入過程には(南西方向の流れとして)湾口全域から進入する場合と、西または西北西から侵入する場合とがある。後者では、田辺湾内では時計回りの循環流である。

(5) 海洋モデルによる数値解析では、湾口での流れの観測結果の傾向は概ね再現できたが、内部潮汐の再現性を高めた数値解析方法の検討が必要である。

参考文献

- 田中祐志・芹澤重厚・吉岡 洋・山下隆男・加藤 茂・山根猛・土井 崇・菅原 亘 (1999): 田辺湾における海象、水質およびプランクトン個体数の観測(1998): TOO+WAP 98, 京都大学防災研究所年報, 第42号, B-2, pp. 415-419.
- 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, 海工論文集, 第45巻, pp. 456-460.
- 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, 56, 567-581.
- Stelling, G.S. and J. A. Th. M. vanKester (1994): On the approximation of horizontal gradients in sigma coordinates for bathymetry with steep bottom slope, Int. J. numer. methods fluids, 18 pp. 915-935.