

紀伊半島田辺湾湾口部における海水交換特性に関する研究

Water Exchange at the Mouth of Tanabe Bay in Kii Peninsula, Japan

内山雄介¹・松川大佑²・神吉亮佑³・馬場康之⁴・森 信人⁴・水谷英朗⁵・
渡部靖憲⁶・大塚淳一⁷・山田朋人⁶・猿渡亜由未⁸・二宮順一⁹

Yusuke UCHIYAMA, Daisuke MATSUKAWA, Ryosuke KANKI, Yasuyuki BABA,
Nobuhito MORI, Hideaki MIZUTANI, Yasunori WATANABE, Junichi OTSUKA,
Tomohito YAMADA, Ayumi SARUWATARI and Junichi NINOMIYA

Tanabe bay is a small embayment connected directly to the Pacific Ocean to the south, whereas frequently suffer from harmful algal blooms due to sewage effluent and the local aquaculture industry. For preserving the ecosystem in the bay, it is necessary to understand an oceanic structure in the bay along with water exchange at the bay entrance. We thus conduct a comprehensive investigation consisting of a shipboard measurement, a season-long platform observation, and a triply nested high-resolution ocean modeling. The water exchange at the bay mouth is largely affected by semi-diurnal tidal currents and episodic subtidal intrusion of the offshore water controlled by mesoscale circulations.

1. はじめに

紀伊半島南西端近くに位置する和歌山県・田辺湾は、黒潮流路に近いために外洋影響を強く受けつつも、地形的にやや閉鎖性が強い内湾である。湾口部の水質は比較的良好であるが、湾奥部では河川出水、養殖業、生活排水等による環境負荷に伴う水質悪化や貧酸素水塊・赤潮の発生などが依然として報告されている（上出，2003）。田辺湾の水質及び生態系保全の問題の解決に取り組むにあたり、湾周辺の海洋構造、特に外洋との境界である湾口での海水交換特性を理解する必要がある。本海域においては、主に夏期を対象とした海水交換機構に関する幾つかの先行研究が行われており、北風に伴う沖向き表層エクマン輸送に起因する沿岸湧昇性の内部急潮（吉岡ら，1998；田中ら，1998）や、黒潮二次流の接岸状況に対応した湾内への外洋水侵入（仁木ら，2004；Niki，2004）などが湾内水質環境に少なからぬ影響を及ぼしている可能性が指摘されている。

著者らのグループでは、田辺湾湾口部に位置する京都大学防災研究所・田辺中島高潮観測塔（以下、観測塔）を用いて、台風接近時の気象・海象データ計測を目的とした現地観測を継続して実施しており（馬場ら，2012；

馬場ら 2014；およびそれらの参考文献を参照），2013 年夏期～秋期に実施した連続観測では台風 17 号（TORAJI）および 18 号（MAN-YI）の接近を捉えることに成功した（馬場ら，2014）。本研究では，2013 年 8 月上旬～10 月中旬に観測塔において実施した係留系等を用いた連続観測，船舶による ADCP 曳航観測，および 3 段ネスティングによる高解像度領域海洋循環モデルの 3 通りのアプローチにより，夏期～秋期における外洋影響を考慮した田辺湾湾口部における海水交換特性とそのメカニズムについて検討したので，その結果について報告する。

2. 曳航観測

2013 年 8 月 28 日に実施した曳航観測では，防災研・白浜海象観測所所有の調査船に搭載された ADCP（1200

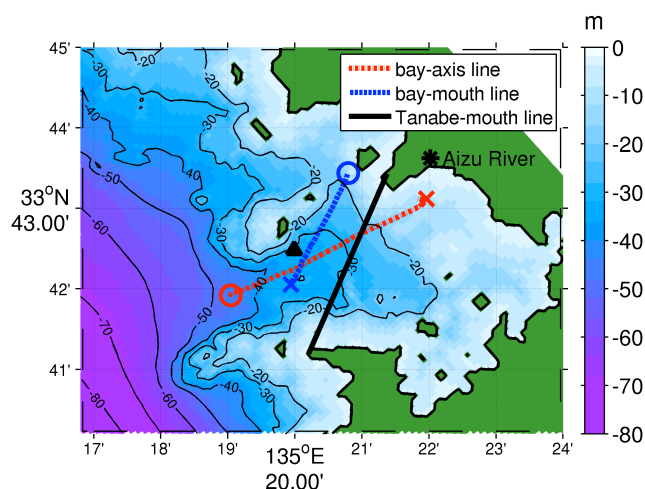


図-1 田辺湾の水深分布（カラー），曳航観測における湾軸ライン（赤一点鎖線：○は始点，×は終点）および湾口ライン（青点線），黒実線：海水交換解析に用いる田辺湾口ライン，▲：田辺中島高潮観測塔。

1	正会員	博(工)	神戸大学准教授 大学院工学研究科
2		学(工)	神戸大学工学部市民工学科（現 和歌山県）
3	学正会員	学(工)	神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻
4	正会員	博(工)	京都大学准教授 防災研究所
5	正会員	博(工)	京都大学助教 防災研究所
6	正会員	博(工)	北海道大学准教授 大学院工学研究院
7	正会員	博(工)	(独法) 土木研究所寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム
8	正会員	博(工)	北海道大学助教 大学院工学研究院
9	学正会員	修(工)	京都大学大学院 工学研究科

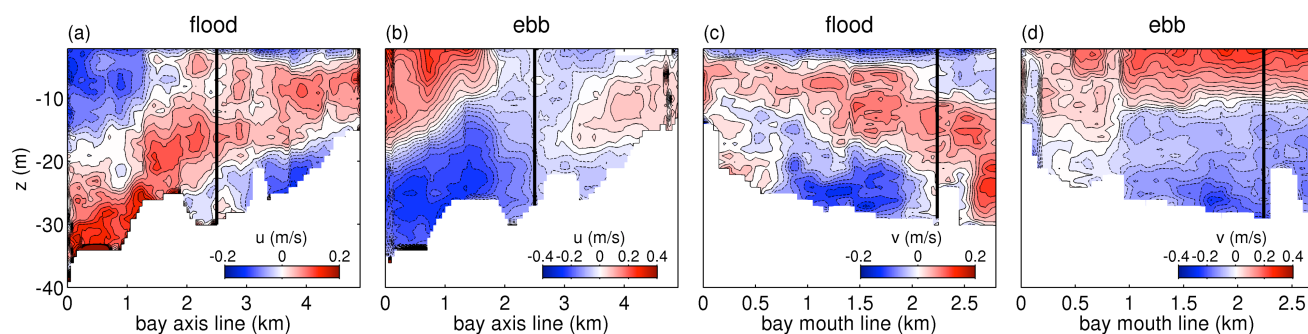


図-2 湾軸方向流速の鉛直分布。湾軸ラインにおける (a) 上げ潮, (b) 下げ潮時の湾内向き流速, 湾口ラインにおける (c) 上げ潮, (d) 下げ潮時の断面通過流速。いずれも正值 (実線) が湾内への流入を表す。黒太線は両ラインが交差する位置を示す。

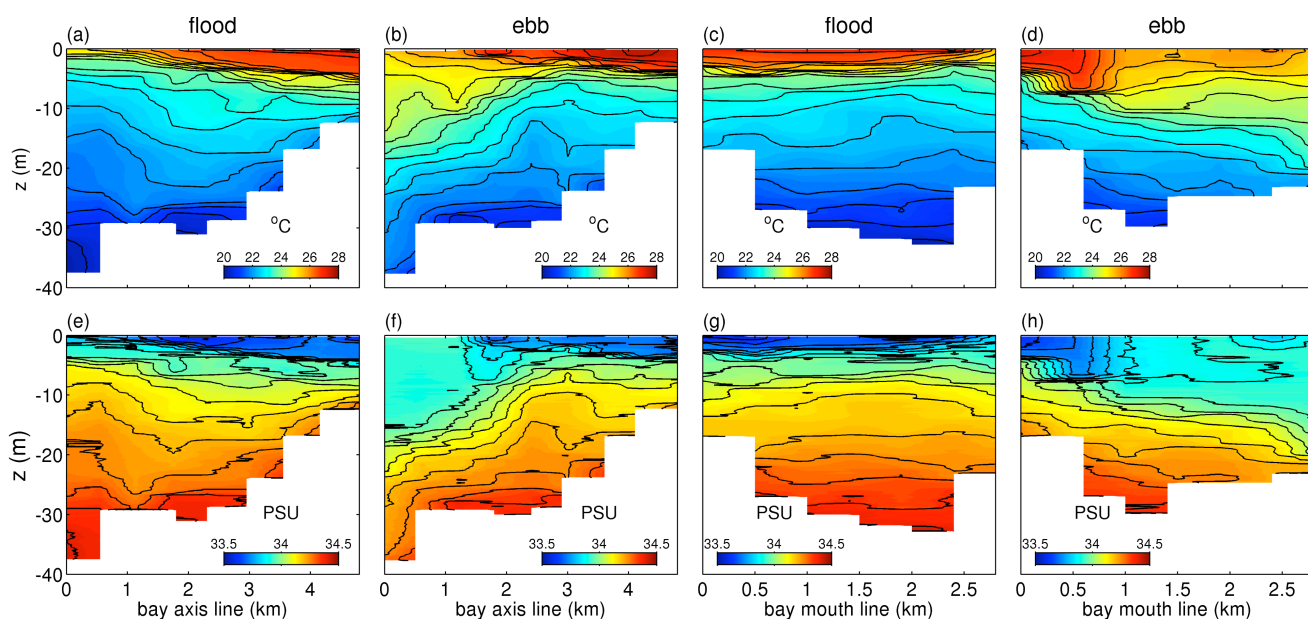


図-3 CTD による上げ潮, 下げ潮時の湾軸 (a, b, e, f) および湾口ライン (c, d, g, h) での水温 (上段) と塩分 (下段) 分布。

kHz) と投げ込み式 CTD (塩分水温水深計) を用いて、図-1 に示す湾軸ラインおよび湾口ライン沿った断面において上げ潮時と下げ潮時の二回ずつ、流速、水温、塩分の鉛直分布を計測した。

湾軸ライン断面内流速分布 (図-2 (a), (b)) では北東方向を正とした湾軸ラインに沿う方向の流速成分を示しており、横軸距離 2 km あたりを境界として西 (左) 側を湾外, 東 (右) 側を湾内と定義する。上げ潮時 (図-2 (a)) の流速分布は 3 層構造を形成しており、沖側表層で湾外へ流出, 中層から湾内表層にかけて流入, 湾内下層で流出が生じている。下げ潮時 (図-2 (b)) には湾外での流速分布は反転する。湾内では上げ潮下げ潮に関わらず最表層において流出が生じているが、これは前日の降雨による湾奥部の会津川河口からの淡水流出の影響を表している。一方、湾内では下げ潮時であっても水深 20 m 程度までの亜表層において流入域が広く残存しており、地形的に潮流の影響が湾奥に到達しにくい構造であることが分かる。また、湾口ライン断面内流速分布 (図-2 (c), (d)) で

は、ラインに直行する東南東方向 (湾内への流入) を正と定義しており、上げ潮時は表層で流出, 中層で流入, 中央部付近の下層では流出という 3 層構造が明瞭に見られる。しかしながら、下げ潮時には表層の流出域が縮退し、2 層構造化しており、湾軸ライン断面と同様の流動構造が確認できる。

CTD による水温・塩分分布の観測結果を見ると (図-3)、湾内では上げ潮と下げ潮時で成層構造に大きな変化はなく、湾内における潮流の影響が限定的であるという流速計測と同様の傾向が見て取れる。湾軸ラインでは、湾外表層において上げ潮時にボア状の低温高塩分水塊が湾奥方向へ進入して成層を強化しているのに対し、下げ潮時にはこの部分の水温が上昇 (塩分は低下) し、混合が強化されて成層が弱くなっている。これは内部潮汐の伝播に伴う混合を示唆しており、特に下げ潮流によって湾口部沖側において強い鉛直混合が生じたものと解釈される。湾口ライン断面における成層構造にも同様の傾向が見られるが、湾口域北部の浅海岩礁海域での水塊混合は比較的弱く、海底地形 (図-1) に沿って流出入する内部潮汐

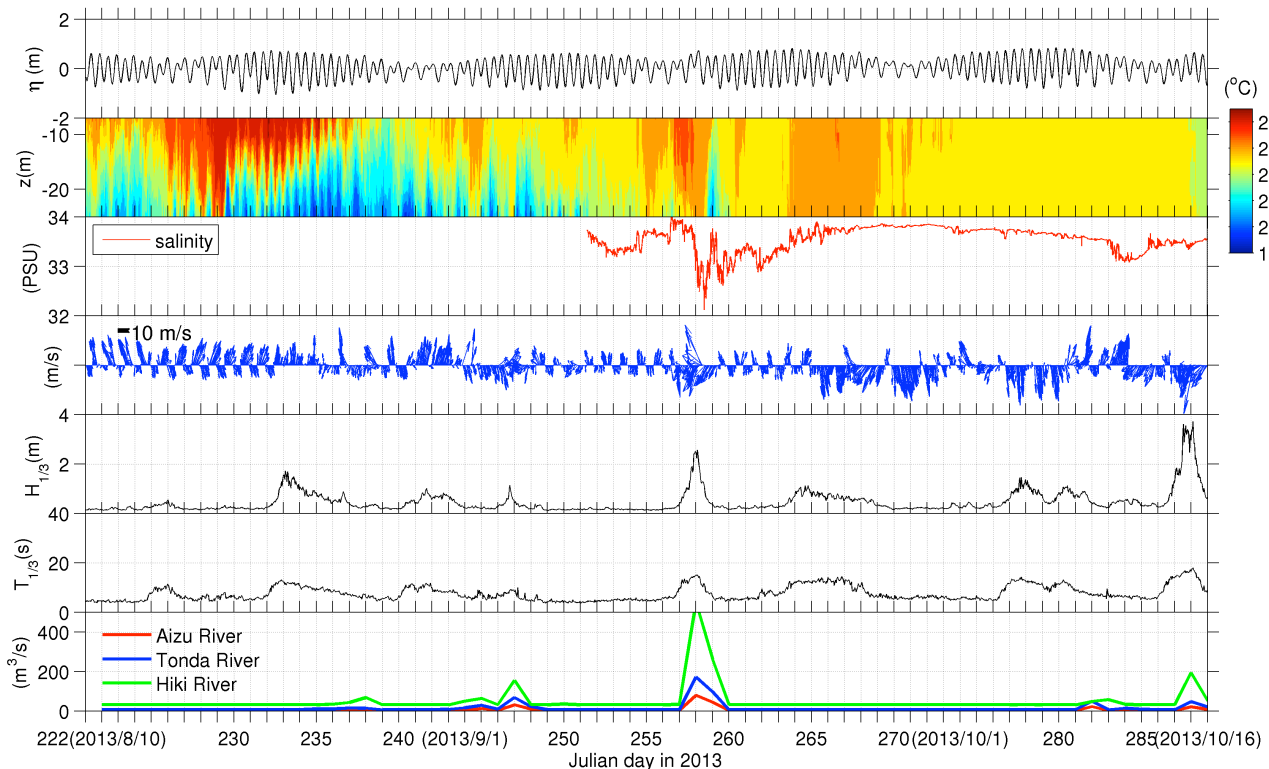


図-4 田辺湾口部に位置する田辺中島高潮観測塔における 2013 年夏・秋期に実施された連続観測結果の一例. 上から, 潮位, 水温鉛直分布, 水深 10 m における塩分, 海面上 10 m の風速ベクトル, 有義波高, 有義波周期, 2 級河川流量推定値 (日平均値).

波が湾口沖側での混合と成層弱화에寄与していることが分かる.

3. 観測塔における連続観測

田辺湾における中長期的な海洋構造変化を把握するために, 連続係留観測データの解析を行った. 湾軸ラインと湾口ラインの交点付近に位置する観測塔に水温塩分計, 風向風速計, 超音波式波高計, ADCP (1200 kHz) などを設置し, 2013 年 8 月上旬から約 2 ヶ月間にわたって気象・海象データを収集した. 連続観測データの詳細については馬場ら (2014) を参照されたい. 本稿ではデータの一例として, 2013/8/10~10/20 の各物理量の時間変化を図-4 に示す. このうち 2 級河川流量推定値とは, 和歌山県による過年度の流量公表値と気象庁 AMeDAS 雨量データに対して最小二乗法を適用して流量-雨量関係式を求め, 観測期間中の実測雨量から推定した河川流量である.

水温の鉛直分布を見ると, 8 月中に発達した強い温度成層は 9 月以降徐々に弱まり, 9 月下旬にはほぼ解消されている. 成層期である 8 月中は潮位変動に対応した温度躍層の振動が顕著に見られ, 湾口域は内部潮汐の影響を受けていることが分かる. 9/4, 9/15, 10/15 にそれぞれ台風 17 号, 18 号, 26 号が来襲し, そのたびに鉛直混合作用を受けて水温が一様化し, 台風通過後の潜熱低下や河川出

水によって再成層化するというプロセスが確認される. しかしながら, 9 月下旬以降は少なくとも水深約 25 m までは水温がほぼ一様となり, 海面冷却に伴う混合層の季節的な発達が生じている. また, 台風接近に伴って風速の強化と南から北への風向変化が生じ, 同時に有義波高, 有義波周期, 河川流量が増加している. 成層構造が比較的明瞭であった 9/4 と 9/15 に最接近した台風に着目すると, 水温データから, 暴浪による鉛直混合効果は表層 20 m 程度に達しており, 9/15 は台風に伴う降雨による河川出水の影響によって大規模な低塩分化が生じている.

4. 高解像度数値モデリング

曳航観測と連続観測の結果から, 季節成層の消長に伴う混合層の発達, 3 つの台風に伴う鉛直混合の助長とその後の再成層化, 成層期における内部潮汐の影響など, 長・短周期現象と突発的な気象擾乱イベントが重畳して湾口周辺の水塊構造が形成されていることが示された. そこで次に, 湾口での通過流量の時間変動とその原因を解析するため, 領域海洋循環モデル ROMS を用いた 3 段階のネスティングによる田辺湾モデル (図-5) を構築し, 2013 年夏・秋期の高解像度再解析を実施した. JCOPE2 (水平解像度 10 km) →ROMS-L1 (同 2 km) →ROMS-L2 (同 600 m の瀬戸内海全域モデル; 内山ら, 2012, 2013) を

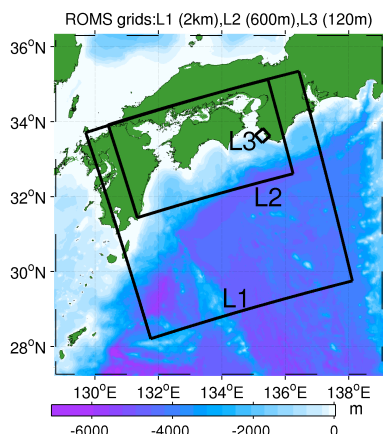


図-5 ROMSによる3段ネスト領域と水深分布（カラー）。黒枠は外側から、ROMS-L1（水平解像度 2 km）、L2（同 600 m：瀬戸内海全域モデル）、L3 領域（同 120 m：田辺湾モデル）の境界を示している。

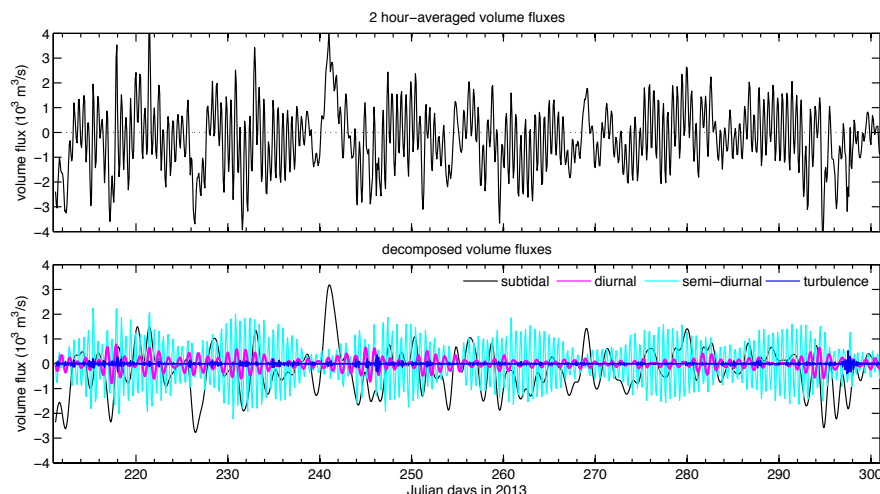


図-6 田辺湾口ライン（図-1 黒実線）を通過する体積フラックスの時系列。（上）2 時間平均値，（下）周波数分解された体積フラックス。下段では、周期 28 時間以上の subtidal 成分（黒）、18～28 時間の日周成分（マゼンタ）、8～18 時間の半日周成分（シアン）、8 時間未満の乱流成分（青）に分解した。

ベースに ROMS-L3 領域（田辺湾モデル）を新たに開発した。L3 領域の格子数は $256 \times 256 \times$ 鉛直 32 層、水平解像度は 120 m であり、L2 の 2 時間平均出力を境界条件とした。地形データには内閣府中央防災会議によるデータ（解像度 50m）を与え、海面フラックスは気象庁 GPV-MSM データを用いた COAMPS 型バルク法により評価し、領域内に河口を有する 3 本の 2 級河川流量推定値（図-4）を考慮した。紙面の都合上図示しないが、観測塔における水温の鉛直構造や水位変動、曳航観測時の流速・密度分布等に関してデータとモデル出力とを比較し、モデルの再現性が十分であることを確認している。

5. 海水交換特性

(1) 湾口通過体積フラックス

L3 モデルの結果を用いて田辺湾湾口における海水交換特性について解析する。ここでは、湾口ライン（図-1 黒実線）直交方向の流速成分を断面積分することにより湾口通過体積フラックス（流量）を求め、さらにそれを周波数分解して各成分の寄与を評価する（図-6）。本解析では、周期 28 時間以上を subtidal 成分とし、それ以下の短周期成分を日周、半日周、周期 8 時間以下の乱流成分に分けることで、計 4 成分に分解した。図-6 下から、振幅が明らかに大きいのは subtidal 成分および半日周成分であることが分かる。それらの寄与を定量的に評価するために、各成分による流量変動の RMS（標準偏差）を求めた（表-1）。subtidal 成分と半日周成分による流量 RMS は $800 \text{ m}^3/\text{s}$ を超えるが、これらは全体の変動レベルの 40% 以上にも及ぶ。湾口ライン内側の田辺湾の容積を流量 RMS で除すことにより求められる海水交換時間スケールは、subtidal 成分、半日周成分ともに 5 日弱である。一方、日周成分の寄与は半日周成分の 1/4 程度にとどまっ

表-1 湾口通過体積フラックスの各周期成分における流量変動の RMS, RMS 寄与率, 海水交換時間スケール

周期	$T(\text{h})$	流量 RMS (m^3/s)	RMS 寄与率 (%)	海水交換時間 スケール (日)
subtidal	$T > 28$	884	44.07	4.70
日周期	$20 < T \leq 28$	220	10.97	18.89
半日周期	$6 < T \leq 20$	838	41.77	4.96
乱流	$T < 6$	64	3.19	64.92

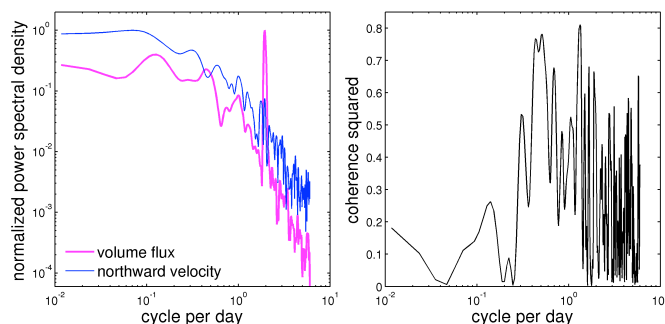


図-7 (左) 湾口通過体積フラックス（マゼンタ）と田辺湾沖合における北向き表層流速（青）の無次元パワースペクトル，（右）両者のコヒーレンス。

ており、日周潮や慣性振動（本海域の慣性周期は約 21.5 h）の寄与は限定的であるとともに、半日周以下の乱流成分の寄与は極めて小さい。したがって、田辺湾の海水交換には半日周成分、すなわち半日周期の潮流および内部潮汐の寄与と、subtidal 成分、すなわち長周期の流量変動が同程度に影響することが明らかとなった。

(2) 湾口フラックスと沖合（湾外）流動との関係

湾口通過体積フラックスと様々な変量との相関を取って比較したところ、湾外の沖合海域における南北流速との相関が極めて高いことが判明した。両者の無次元パワースペクトル密度を求めると（図-7）、半日周期に強いピ

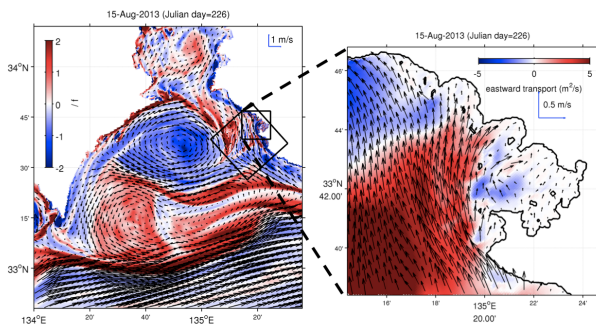


図-8 流出イベント時 (2013/8/15) における (左) 田辺湾を含む周辺海域の海洋表層無次元相対渦度 (カラー), (右) 田辺湾口周辺における東向き体積輸送量 (カラー). ベクトルはいずれも表層流速である. 右図は左図中の L3 領域を含む正方形ボックス内の拡大図である.

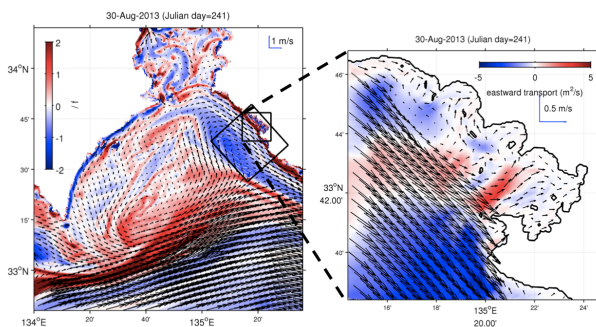


図-9 図-8 と同じ. ただし, 流入イベント時 (2013/8/30) のスナップショット.

ーク, 日周期に弱いピークが見られ, 低周波成分のパワーが全体的に高くなっている. 両者の相関を二乗コヒーレンスによって評価すると, スペクトルピークに対応して半日周期近傍で 0.8 以上の相関が見られ, 同時に周期 2・3 日の subtidal バンドにも 0.78 程度の相関が見られる. つまり, 2・3 日周期で変動する沖合南北流速によって subtidal 流量変動が引き起こされているものと理解できる.

沖合流動と湾口フラックスの関係の例として, 最も強い流出が生じた 8/15 (図-8) および最も強い流入が生じた 8/29 (図-9) における沖合を含む広域の平面流動構造を調べた. 8/15 の流出イベント時には, 紀伊水道南西部で時計回り (負) のメソスケール渦が存在するが, 紀伊半島沿岸ではこれに逆行する強い北上流が発達し (図-8 左), 田辺湾湾口部において湾内の海水が連行されて負の東向き体積輸送, すなわち流出が卓越するという構造になっている (図-8 右). 一方, 8/29 の流入イベント時には, 紀伊水道南西部において弱い反時計回り (正) の渦が, 紀伊半島側沿岸域には負の渦度が生じ, 紀伊半島西岸に沿って強い南下流が発達しており, 沖合水塊の湾内への直接的な流入を助長している様子が見て取れる. つまり, 田辺湾の長周期の海水交換と湾内環境は, 沿紀伊水道と黒潮域に挟まれた海域に発達するメソスケール環流の影響を受けて形成される, 沿岸域における北上流・南下流に強く支配されているものと理解される.

6. おわりに

本研究では, 調査船を用いた短期曳航観測と, 田辺中島高潮観測塔を用いた約 2 ヶ月間の連続観測を行い, 田辺湾の海水交換が内部潮汐の伝播に代表される短周期現象と, 台風等の気象イベントを含む長周期現象の両者によって特徴付けられることを示した. さらに, 湾口での海水交換特性をより定量的に評価するために 3 段ネストによる高解像度海洋モデリングを行った. 湾口部での海水交換に対しては, 半日周期の潮流と内部潮汐による短周期変動成分に加え, 2~3 日の周期帯を中心とする subtidal 長周期成分の影響が大きく, 両者は同程度の寄与率を有することが示された (表-1). 特に subtidal 流量変動に対しては湾外におけるメソスケール渦に伴う広域循環流が重要な役割を果たしており, 主にその向き (相対渦度の正負) によって沖合水塊の湾内への流入・流出が助長されていた. つまり, 田辺湾における海水交換特性, ひいてはその湾内水質環境は, 100 km オーダーの広域の外洋影響を強く受けて形成されていることが示唆された.

謝辞: 本研究は京都大学防災研究所一般共同研究 (24G-05, 26G-05), 科学研究費基盤研究 C (24560622) の援助を受けた.

参考文献

- 内山雄介・栗山貴生・宮澤泰正 (2012): 外洋影響を考慮した瀬戸内海周辺海域の流動再現と黒潮流路変動の効果について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 68 (2), pp. I_441-I_445.
- 内山雄介・西井達也・森 信人・馬場康之 (2013): 紀伊半島沿岸域における台風通過に伴う海水温低下と海洋構造変化について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 69 (2), pp. I_481-I_485.
- 上出貴士 (2003): 和歌山県沿岸における赤潮-1981 年から 2000 年の赤潮発生状況-, 和歌山農林水技支援研報, Vol. 5, pp. 107-116.
- 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 (1998): 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, 京都大学防災研究所年報, 第 42 号, pp.415-420
- 仁木将人・山下隆男・芹澤重厚・山口弘誠・福神和興 (2004): 田辺湾における夏期成層時の海水交換過程, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 896-900.
- 馬場康之・久保輝広・森 信人・木原直人 (2012): 田辺湾中島高潮観測等における 2011 年夏期台風接近時の現地観測結果, 京都大学防災研究所年報, 第 55 号 B, pp. 343-350.
- 馬場康之・水谷英朗・久保輝広・内山雄介・森 信人・渡部靖憲・大塚淳一・山田朋人・猿渡亜由未・二宮順一 (2014): 台風通過に伴う田辺湾湾口部における海水温変化について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2 (投稿中)
- 吉岡 洋・芹澤重厚・高山知司・田中祐志 (1998): 夏期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.
- Niki, M. (2004): Coastal environment system and its numerical simulation -Observation and prediction of coastal environment in the Tanabe Bay-, Disaster Prevention Research Institute Annuals, Vol. 47 (C), pp.255-262.