

半閉鎖性海域湾口部における成層期および成層崩壊期の流動構造と海水交換について

内山 雄介¹・吉木 智軌²・多田 拓晃²・馬場 康之³・水谷 英朗⁴・久保 輝広⁵・森 信人⁶・猿渡 亜由未⁷・大塚 淳一⁸・二宮 順一⁹・渡部 靖憲¹⁰・山田 朋人¹⁰

¹正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp

²学生会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒649-2201 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田2500-106)

⁴正会員 京都大学助教 防災研究所 (〒649-2201 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田2500-106)

⁵正会員 京都大学 防災研究所 白浜海象観測所 (〒649-2201 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田2500-106)

⁶正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁷正会員 北海道大学助教 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

⁸正会員 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)

⁹正会員 金沢大学助教 理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

¹⁰正会員 北海道大学准教授 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

半閉鎖性内湾である和歌山県田辺湾湾口部において、ADCP、塩分水温計などを用いた長期連続観測を行い、主に流動構造と海水交換特性に関する解析を行った。クロススペクトル解析結果から、流速鉛直構造と外力との対応については、表層付近の日周期変動には海上風が、成層期の混合層下部の半日周期変動には内部潮汐が、成層崩壊期の混合層全層では半日周期潮汐がそれぞれ寄与していることが分かった。一方、海水交換に対しては半日周期潮汐変動が最も寄与しているのに対し、それと同程度に周期約3日にピークを有するサブタイダル長周期成分の影響が大きかった。この長周期変動は紀伊水道スケールで生じる地形性のメソスケール渦の消長と密接に関係しており、モデルによる先行研究と整合的であった。

Key Words : semi-enclosed bay, water exchange, semi-diurnal tide and topographic mesoscale eddy

1. はじめに

和歌山県田辺湾(図-1)は紀伊半島の西海岸に位置し、半島南端付近を東進する黒潮の間接的な影響を受けて、豊かな生態系が維持され、湾奥では養殖業が盛んに行われる、生産性の高い半閉鎖性内湾海域である。一方で、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、貧酸素水塊や赤潮の形成などが生じることがある²⁾。田辺湾の諸元として、湾口幅 4.05 km、面積 17.95 km²、湾内最大水深 28 m、湾口最大水深 28 mを用いると、本海域の閉鎖度指標³⁾は 1.05 と評価される。閉鎖度指標が 1 以上の海域は海水交換が悪く、富栄養化の恐れがあり、水質汚濁防止法による排水規制を受ける水域とされる。

本海域では、湾内水質や生態系に強く影響する成層期の海水交換機構に関する幾つかの先行研究が行われてきた。例えば、吉岡ら⁴⁾、田中ら⁵⁾は、北風に伴う沖向き表層エクマン輸送による沿岸湧昇性の内部急潮、仁木ら

⁶⁾は黒潮二次流の接岸状況に応じた湾外水の侵入がそれぞれ湾口域における海水交換に対して多大な影響を及ぼしていることを指摘した。また、著者らを含む合同観測グループは、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)において、台風接近時の気象・海象データ取得を目的とした現地観測を複数年にわたって実施し、これまでに 2009 年 18 号⁸⁾、2013 年 17 号、18 号、26 号⁹⁾、2014 年 18 号、19 号¹⁰⁾などの台風の接近を捉えることに成功した。取得されたデータの解析と、それに依拠した海洋モデリング^{8),12),13)}によって、強風・高波浪下における海面過程とエアロゾル生成¹⁴⁾を始め、海洋表層の機械的な混合、鉛直シア不安定、海面冷却に伴う傾圧不安定に起因する鉛直混合の促進、およびそれらによって励起される海面温度低下機構について、主として局所的な鉛直混合の強化という観点から広範に議論されてきた。

これに対して内山ら¹⁾は、3 段ネスト高解像度海洋モデルを用いた田辺湾を含む広域数値解析を行い、田辺湾

口における海水交換に対しては、黒潮流路変動に伴う紀伊水道程度のサイズのメソスケール渦の発生・発達による湾内への沖側水塊の波及が約 44.1%，半日周期・日周期潮汐による局所的な高周波交換フラックスがそれぞれ約 41.8%・11.0%の寄与を有することを定量的に明らかにした。この結果は、本海域の海水交換および内湾環境がメソスケールの海洋変動影響を極めて強く受けることを示唆するものであるが、解析対象期間の ADCP データが欠損していたため、現場データによる直接的な裏付けが取れていなかった。そこで本研究では、田辺湾湾口部の観測塔周辺において、成層期から成層崩壊期に至る約 3 ヶ月間の長期連続係留観測を行い、良質な ADCP データを取得するとともに、湾口部における流れの鉛直構造、その周波数特性、それらと外力との関係、海水交換特性などについて解析したので、その結果を報告する。

2. 現地観測

(1) 観測の概要

田辺湾湾口に設置された、京都大学防災研究所白浜海象所田辺中島高潮観測塔（図-1）およびその周辺海域において、成層期から成層崩壊期を経て非成層期に至る 2015年8月20日から2015年11月2日までの75日間にわたって長期連続係留観測を実施した。湾口部の水深は平均 30 m 弱であるが、観測塔は天端水深約 10 m の小規模な孤立シルの上に敷設されており、観測塔の海面上では風向・風速、波高・周期、気圧などが常時観測され（図-2），毎時平均値として記録されている。連続観測では観測塔直近の海面下に水温計および塩分水温計を複数台設置し、水深 $h = 4$ m, 8 m, 15 m, 30 m で塩分を、 $h = 4$ m, 5 m, 6 m, 8 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m で水温を計測した。また、 $h = 10$ m に海底設置型自記式 ADCP（RDI Workhorse Centinel 600 kHz）を上向きに設置し、サンプリング周波数 2 Hz、バースト間隔 5 分、1 バーストあたりのサンプル数 90、層厚 0.5 m で 3 次元流速の鉛直分布を測定し、各バーストの平均値を記録した。

(2) データ処理と品質管理

ADCP データに内在する海表面近傍でのノイズを除去するために、5 分毎のバースト平均値の期間全体に対する標準偏差の 2 倍を閾値として、隣合う二時刻における流速差がそれを超えた場合には前後のデータの平均値に置き換えるというノイズ除去操作を行った。同時に、解析には S/N 比が十分に小さいと判断された波のトラフレベル以下の流速データのみを用いた。なお、観測機器は約 2 週間ごとに潜水士による清掃を施したが、水深 $h = 4$ m, 8 m, 15 m の塩分計にはワイパーが装備されていないため、生物付着の影響を受けて精度が劣化する時期を

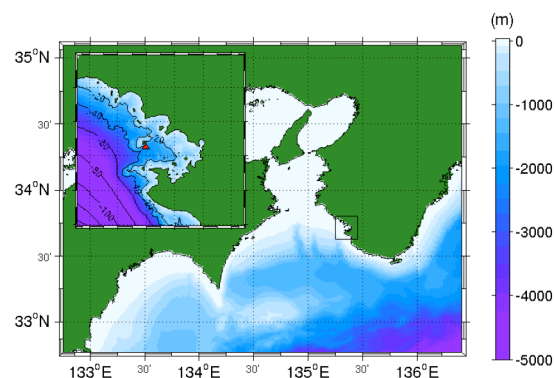


図-1 観測海域(和歌山県田辺湾, 黒枠). カラー:水深. 図中左上のインセットは、田辺湾周辺(黒枠部)の拡大図であり、インセット中の赤三角印は京都大学防災研究所・田辺中島高潮観測塔の位置を示す。

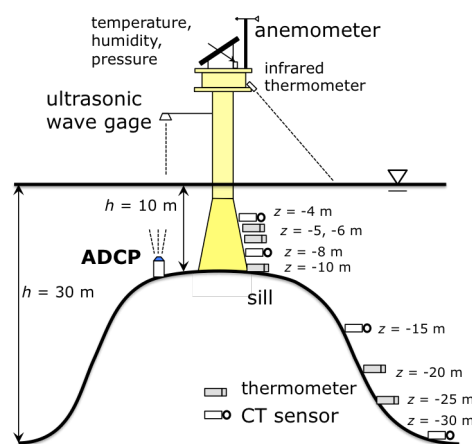


図-2 田辺中島高潮観測塔周辺における計測器の設置概況。図右側が湾内方向。

含んでいる点に注意されたい。また、観測開始直後の 8 月下旬には観測塔の電気系統トラブルにより、8/24～8/27 の約 4 日間にわたって一部の測器に欠測が生じた。

(3) 観測結果

以上のような処理を施した 75 日間の連続観測データのうち、主要な項目の時系列変化を図-3 に示す。上から順に、平均水位（潮位）、水深 $h = 30$ m までの水温と塩分の鉛直分布、気圧、水深 $h = 10$ m までの一時間平均流速（北向き、東向きの水平 2 成分と、鉛直上向き成分）、風速ベクトル、有義波高、有義波周期である。図中の白抜き箇所は欠測を表している。8 月下旬から 9 月上旬、および 10 月下旬の表層塩分が著しく低下しているが、これは河川出水などの淡水フラックスの影響というよりは生物付着によるものと推定される。ここでは図示しないが、期間全体を通じて大規模な降雨は生じておらず、湾奥から流入する会津川や、湾外の河川での出水は無視できる程度であったことを確認している。また、気圧変動は ± 10 hPa 程度であり、有意な低気圧の接近は生じていないことなどが確認される。つまり、本観測期間の天候は総じて穏やかであったといえる。

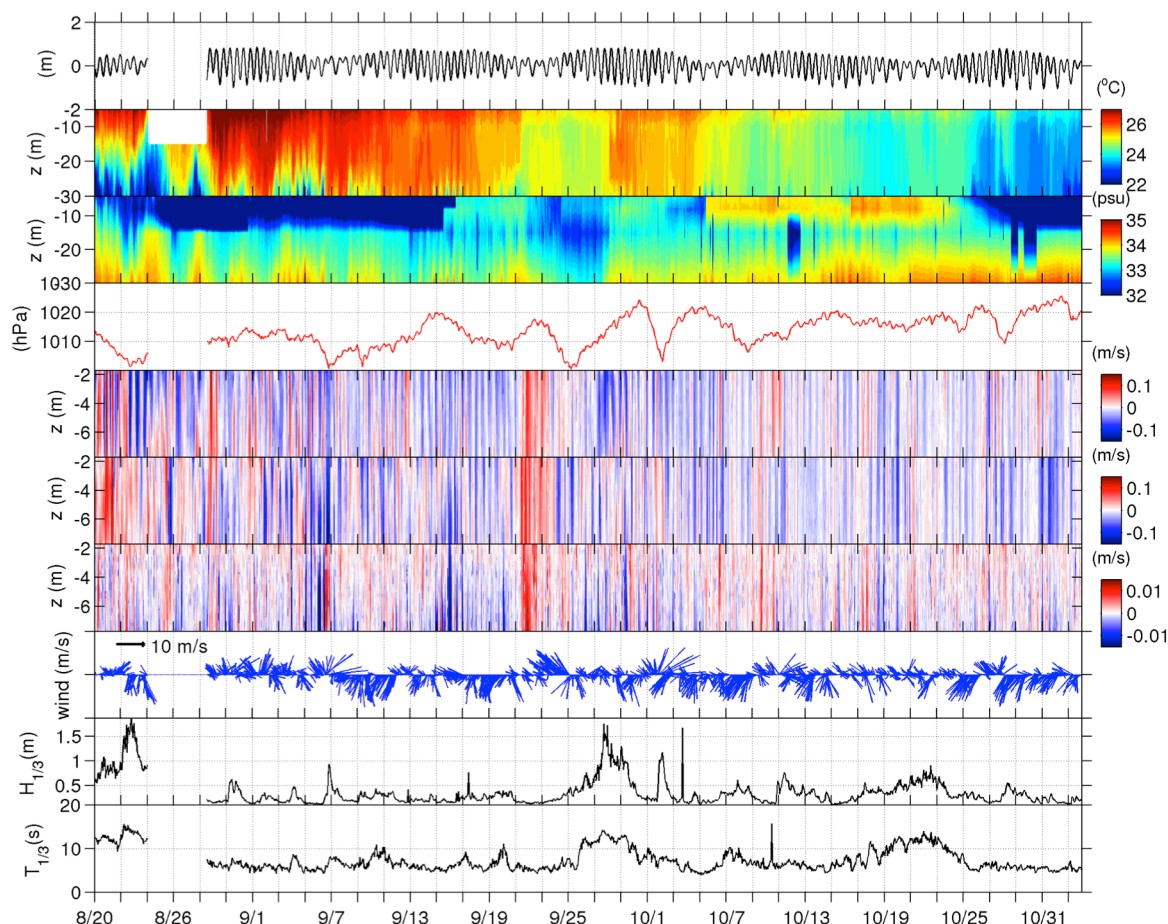


図-3 和歌山県田辺湾湾口海域における 2015 年 8/20～11/2 の連続観測結果. 上から, 平均水位, 水温鉛直分布, 塩分鉛直分布, 海面気圧, 北向き流速, 東向き流速, 上向き鉛直流速, 海上風ベクトル, 有義波高, 有義波周期の時系列.

水温の鉛直分布に着目すると, 期間を通じて全般的に徐々に低下しており, 夏季(成層期)から秋季(成層崩壊期・非成層期)への季節的な長期変化が卓越している. 8/20 から 9/20 頃にかけては水温の鉛直勾配が大きく, 明確な水温成層が形成されている. 成層期の水温は潮位変動に伴って振動しており, 内部潮汐の影響を受けていることが示唆される. 9/21 から 9/27 にかけて一時的に水温が全層的に低下し, 同時に流速は 3 成分ともに強化されるとともに, 塩分も大きく減少している. この水温塩分の同時低下イベントの実態については, 3. (4) で検討する. その後 9/28 以降は, 水温は一旦上昇したのち再び徐々に低下し, 期間全体で見ると 3°C 程度低温化したことが分かる. 9 月中旬以降の水温は少なくともデータのある水深 30 m まで鉛直方向にほぼ一様化しており, 海面冷却に伴う季節成層の発達によって表層混合層が 30 m 以上にまで深くなったことが示されている.

流速分布は概ね潮汐変動に追従して周期的に変動しているが, 水温低下イベント時および観測開始直後には全体的に流れが強化されている. 流速変動振幅は観測期間前半の成層期に大きく, 後半の混合層発達期には相対的に小さい. また, 気圧変動および南東向き海上風の発達に追従して, 8/22-23, 9/27-29 に有義波高と有義波周期

が増大している. しかしながら, それぞれ最大で 1.8 m, 13 s 程度であり, 外洋に近く, 南西方向に長いフェッチを有する田辺湾での値としては特に大きなものではない.

以上のことから, 本観測期間における田辺湾湾口部の海洋表層力学特性を大別すると, 季節消長に代表される密度および流動の長期変動, イベント的な水温塩分低下と流速強化, 成層期に特に顕著に発現する潮汐周期での短周期変動の少なくとも 3 つの時間スケールの現象が重畳して形成されていることが明らかとなった. そこで以降では, 周波数領域におけるクロススペクトル解析によって流速と水温の周期数特性および外力との相関を評価するとともに, 水温鉛直分布変動に見られる内部潮汐の兆候を確認するために, 水温および流速の周波数スペクトルの鉛直分布を解析する.

3. 解析と考察

(1) 流速変動特性に関するスペクトル解析

ADCP による東向きおよび鉛直流速の周波数スペクトル密度鉛直分布を見ると (図-4), とともに半日周期, 日周期, および 3 日程度以上の長周期帯でのパワーが大きい. 水平流速は半日周潮汐の影響を強く受けて全水深

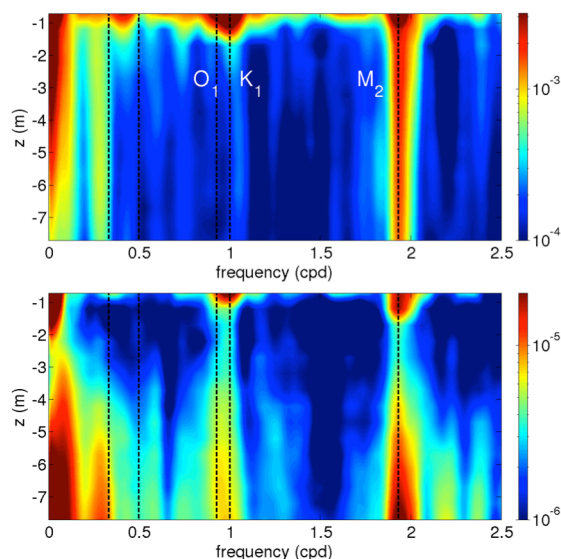


図-4 ADCP 流速データに対する周波数スペクトル解析結果（カラー：対数スケール，単位： m^2s^{-1} ）。（上）東向き水平流速，（下）鉛直上向き流速。縦軸：平均海面 $z=0$ を基準とした鉛直上向き座標，横軸：周波数（cycle/day）（図-5,6 も同様）。

にわたって半日周期にピークが出現するが，日周期のピークは表層に限定されている。鉛直流速についてもピークの出現特性は水平流速と類似しているが，半日周と日周成分は水深が深くなるにつれて増大している。

(2) 流速変動と外力との関係

流動変動の発生メカニズムを定量的に明らかにするために，局所的な外力として風速と水位に着目し，流速各成分とのコヒーレンスによって周波数ごとの相関を評価した（図-5）。水平流速は表層付近の日周期帯で風速との相関が最も高くなるが，水位との相関が見られるのは半日周期帯であり，しかもそこでは全層で相関が高い。すなわち，海上風変動（海陸風モード）に伴う吹送流によって表層では日周期の水平流動が，半日周期の潮汐によって順圧的な半日周期の水平流動が形成されたことが分かる。また，長周期流動は風速よりもむしろ水位変動と関係があることから，広域的な海面高度偏差，すなわち中規模現象の影響を受けたものと考えられる。

(3) 内部潮汐の影響

一方，鉛直流速と相関が高いのは半日周期であり（図-5），スペクトル鉛直分布（図-4）と同様に表面から遠ざかるにつれて相関が増大しており，内部潮汐の影響が示唆される。そこで水温の周波数スペクトルの鉛直分布を見ると（図-6），やはり半日周期に明確なピークが現れ，しかも水深が深いほどパワーが増大することから，亜表層部の流速変動に対しては内部潮汐に伴う半日周期流動が重要であることが分かる。

(4) 流速鉛直構造特性と水温塩分低下イベント

夏・秋季の典型的な海洋構造として，成層期，非成

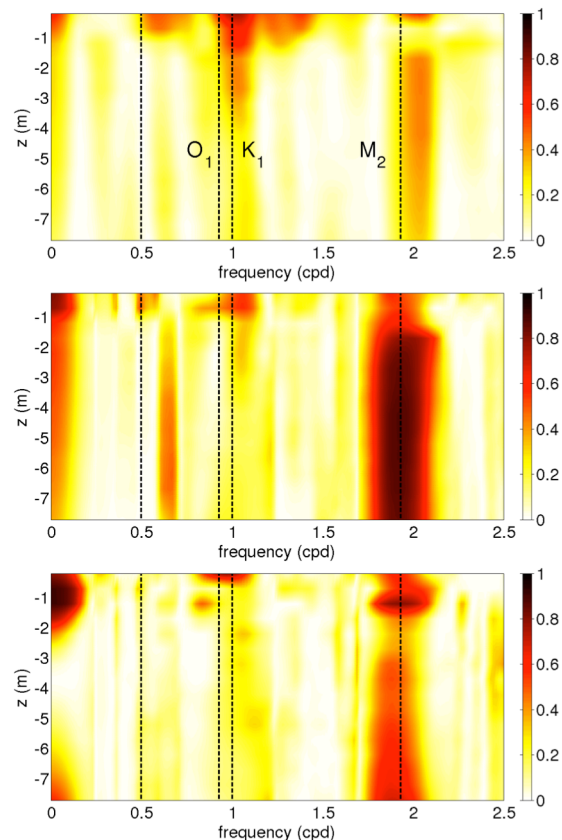


図-5 流速と外力（風速，水位）とのクロススペクトル解析結果。カラー：コヒーレンス（無次元）の鉛直分布。上から順に，東向き風速と東向き流速，水位と東向き流速，水位と鉛直流速のコヒーレンス水深分布。

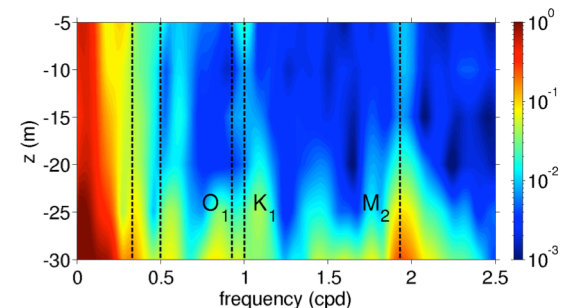


図-6 水温に対する周波数パワースペクトル密度の鉛直分布。単位は $^{\circ}\text{C}^2\text{s}$ 。図-4,5 とは水深レンジが異なる点に注意。

層期，外洋からの冷水塊侵入イベント時の 3 例を取り上げ，日平均流速に対してホドグラフ解析を行った（図-7）。成層期は表層では反時計回りに，その下部では逆に時計回りに流向が回転している。したがって，湾口部における成層期の海面境界層は 2 層構造を形成し，表層では平均的に湾外へ流出，下層（亜表層）では湾内へ流入することが分かる。非成層期では表層から下方に向かって時計回りに螺旋を描いており，海上風によるエクマン螺旋が発達していることが確認される。また，長周期流動に伴う海水温低下イベント発生時のホドグラフには全層でほぼ一様に湾内へ流入する傾向が見られる。海面水温データを見ると（図-8），9/21 に生じた潮岬における黒潮の離岸に伴い，紀伊水道に発達する時計

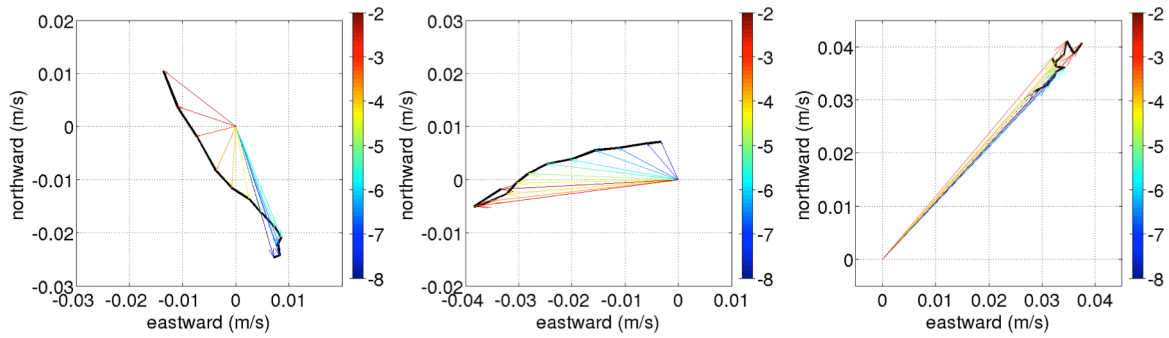


図-7 ADCPによる水平流速(日平均値)のホドグラフ。縦軸:北向き, 横軸:東向き流速(ms^{-1}), 左から, 8/30(成層期), 9/29(成層崩壊後), 9/23(水温塩分同時低下イベント時)に対応。各直線は原点を基準とした流速と流向を表しており, カラーは各流速の測定水深(m)である。黒太線はホドグラフを構成する各ベクトルの頂点を結んだものである。

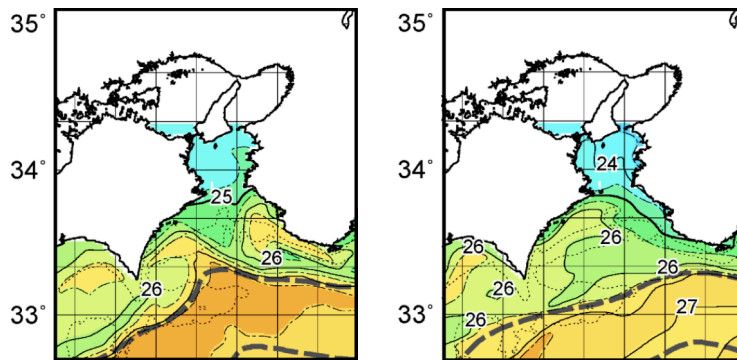


図-8 関東・東海海況速報(三重県水産試験場)による海表面水温分布。
(左) 2015年9月20日17時, (右) 2015年9月21日17時。

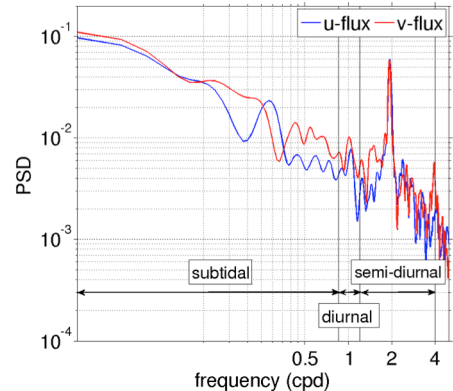


図-9 湾口通過線流量(u :東向き, v :北向き成分)に対する周波数パワースペクトル密度。

回りの中規模渦が強化され, 北方向から田辺湾湾口方向へ冷水塊が輸送されたことが確認される。この水塊は瀬戸内海の低塩分水塊を含むことから, 9/21-27に見られたイベントは, この内湾性の低温・低塩分水塊が中規模渦によって田辺湾湾口へと輸送されたものと判断される。

(5) 実測データに基づく湾口での海水交換特性

ADCPによる水平流速を鉛直平均することにより, 湾口通過平均線流量(m/s)を求め, 水平2成分に対して周波数スペクトルを求めた(図-9)。両成分ともに半日周期に明確なピークを持つが, 日周期および周期3日程度(サブタイダル成分)にもピークが視認できる。この3周期を中心とした周波数帯でスペクトル密度を積分して平方根を取ることによって帯域毎の標準偏差を計算すると, 半日周成分: 0.120 m/s , 日周成分: 0.042 m/s , サブタイダル成分: 0.118 m/s となり, 湾口交換流量変動に対する3者の寄与は, 42.8%, 15.0%, 42.1%と見積もられる。これは数値海洋モデルに基づく推算結果(44.1%, 11.0%, 41.8%)とほぼ一致しており, 田辺湾湾口における海水交換に対しては, 半日周期潮汐および周期3日程度を中心としたサブタイダル成分が同程度の寄与を有することを直接的に示すものである。

特にサブタイダル成分は, 9/21-27に見られた水温塩分同時低下イベントに代表される紀伊水道スケールでの

中規模渦の消長と関連がある。例えば, Bearman¹⁵⁾による特性ストローハル数 St は, 代表長さにシア流によるせん断層間隔 d を用いて $St = fd/U$ で表現される。ただし, f : 代表周波数, U : 代表流速である。この St は地球流体中のカルマン渦列の整理に用いられるなど, その適用範囲が広いことが知られており, Reynolds数にほぼ無関係に $St = 0.181$ であることが実験的に明らかにされている。紀伊水道の緯度方向距離を約55 km, 黒潮の平均流速を 1.2 m/s とすると, 代表周期は約71時間と見積もられ, ADCPデータから得られたサブタイダル帯のピーク周期である約3日と一致する。つまり, 紀伊水道スケールの地形と黒潮に規定されたシア不安定により準周期的に励起される中規模渦の発生・発達, 田辺湾湾口の海水交換に対して重要な役割を果たしていることが示唆される。

4. おわりに

2015年の成層期から成層崩壊期に実施した長期連続観測結果に対して主にスペクトル解析を行い, 和歌山県田辺湾湾口部における流動構造と海水交換特性を明らかにした。主要な結論は以下の通りである。(1) 成層期の混合層は浅く, 海洋表層付近で半日周期内部潮汐が卓越する。(2) 非成層期に至る過程で混合層は深くなり, 表層密度分布は一様化し, 順圧的な半日周期潮汐の影響が

強くなる。(3) 表面付近の日周期流速流動には海上風の影響が重畳するが、湾口海水交換への寄与は限定的である。(4) 以上の局所的な流動により、半日周期潮汐の寄与は42.8% (モデル¹⁾では44.1%) に達する。(5) 加えて、紀伊水道スケールで生じるメソスケール渦の消長に伴う沖側水塊の波及の影響も極めて強く、それらを含むサブタイダル長周期成分の寄与は42.1% (モデル: 41.8%) と見積もられる。(6) 一方で、海上風による日周期流動の寄与は15.0% (モデル: 11.0%) である、

謝辞: 本研究は京都大学防災研究所一般共同研究 (26G-05), 科研費補助金 (15H04049) の援助を受けた。

参考文献

- 1) 内山雄介, 松川大佑, 神吉亮佑, 馬場康之, 森 信人, 水谷英朗, 渡部靖憲, 大塚淳一, 山田朋人, 猿渡亜由未, 二宮順一: 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, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp. I_446-I_450, 2014.
- 2) 上出貴士: 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-, 和歌山農林水技セ研報, Vol. 5, pp. 107-116, 2013.
- 3) 国松孝男, 村岡浩爾: 河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版, 266 p., 1989.
- 4) 吉岡 洋, 芹澤重厚, 高山知司, 田中祐志: 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, 1998.
- 5) 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: 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, 1998.
- 6) 仁木将人, 山下隆男, 芹澤重厚, 山口弘誠, 福神和興: 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, 2004.
- 7) Niki, M.: 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, 2004.
- 8) 森 信人, 鈴木崇之, 木原直人: 海洋表層鉛直混合におよぼす風応力と波浪の影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp. 311-315, 2010.
- 9) 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: 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, pp. I_476-I_480, 2014.
- 10) Baba, Y., Kubo, T., Uchiyama, Y., Kihara, N., Mori, N., Muto, Y. and Suzuki, T.: Field observations at an offshore observation tower during the typhoon seasons, *Proc. 35th IAHR World Congress*, Chengdu, China, 2013.
- 11) 久保慎也, 二宮順一, 森 信人, 馬場康之, 水谷英朗, 久保輝広, 内山雄介, 渡部靖憲, 山田朋人, 大塚淳一, 猿渡亜由未: 現地観測に基づく水温躍層の破壊と鉛直混合に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, 2016. (印刷中)
- 12) 内山雄介, 西井達也, 森 信人, 馬場康之: 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), Vol.69, No.2, I_481-I_485, 2013.
- 13) 内山雄介, 西井達也: 瀬戸内海周辺海域を対象とした台風通過時の広域海洋熱収支解析, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 71, No. 2, pp. I_383-I_388, 2015.
- 14) 猿渡亜由未, 渡部靖憲, 山田朋人, 大塚淳一, 馬場康之, 水谷英朗, 久保輝広, 内山雄介, 森信人, 二宮順一: 大気エアロゾルの海上現地観測, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.72, 2016 (投稿中) .
- 15) Bearman, P. W.: On vortex street wakes, *J. Fluid Mech.*, Vol. 28, pp. 625-641, 1967.

(2016.3.16 受付)

UPPER-OCEAN DYNAMICS AND WATER-EXCHANGE AT THE ENTRANCE OF A SEMI-ENCLOSE BAY UNDER STRATIFIED AND UNSTRATIFIED CONDITIONS

Yusuke UCHIYAMA, Tomomichi YOSHIKI, Hiroaki TADA, Yasuyuki BABA, Hideaki MIZUTANI, Teruhiro KUBO, Nobuhito MORI, Ayumi SARUWATARI, Junichi OTSUKA, Junichi NINOMIYA, Yasunori WATANABE and Tomohito YAMADA

For rigorous description of upper ocean dynamics and resultant volume transport at the mouth of Tanabe Bay, Wakayama, Japan, a comprehensive field campaign was conducted from summer to fall of 2015. The vertical structure of transient dynamics in the surface boundary layer and consequent water exchange at the mouth are characterized by high-frequency variability peaked at around the semi-diurnal period as well as in the lower-frequency subtidal band centered at 3 day period, consistent with the previous modeling study. A spectral coherence analysis indicates that near-surface currents are mainly driven by wind stress peaked at the diurnal frequency, whereas subsurface currents fluctuate rather by semi-diurnal internal tides. The upper ocean cools down gradually, corresponding to seasonal transition from summer to fall condition. However, an abrupt cooling event is observed albeit in a calm local forcing condition where an offshore subtidal cold water intrusion induced remotely by the fluctuating Kuroshio path plays an essential role.