



半閉鎖性内湾における海水交換特性の季節変化とその形成メカニズムについて

岡田, 信瑛 ; 内山, 雄介 ; 多田, 拓晃 ; 遠藤, 鳩 ; 馬場, 康之 ; 水谷, 英朗 ; 久保, 輝広 ; 森, 信人 ; 渡部, 靖憲 ; 大塚, 淳一 ; 山田, 朋人 ; 猿…

(Citation)

土木学会論文集B2, 74(2):I_667-I_672

(Issue Date)

2018

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 2018 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90006804>



半閉鎖性内湾における海水交換特性の季節変化とその形成メカニズムについて

岡田 信瑛¹・内山 雄介²・多田 拓晃³・遠藤 颯⁴・馬場 康之⁵・
水谷 英朗⁶・久保 輝広⁷・森 信人⁸・渡部 靖憲⁹・大塚 淳一¹⁰・
山田 朋人⁹・猿渡 亜由未¹¹・二宮 順一¹²

¹ 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)

E-mail: eybuieybui@gmail.com

² 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)

³ 正会員 日本工営株式会社 名古屋支店技術部 (〒461-0005 愛知県名古屋市東区東桜2丁目17-14)

⁴ 非会員 伊藤忠商事株式会社 住生活カンパニー生活資材第三部 (〒107-8077 東京都港区北青山2-5-1)

⁵ 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)

⁶ 正会員 株式会社ハイドロ総合技術研究所 (〒530-6123 大阪市北区中之島 3-3-23 中之島ダイビル 26F)

⁷ 正会員 京都大学技術職員 防災研究所 (〒649-2201 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田2500-106)

⁸ 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)

⁹ 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)

¹⁰ 正会員 (国研) 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)

¹¹ 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)

¹² 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)

半閉鎖性内湾である和歌山県田辺湾湾口部において、2016年9月から12月にかけて田辺中島高潮観測塔計測システムおよび自記式ADCPを用いた長期連続観測を行い、海水交換特性に関する解析を行った。観測結果より、長期的には観測の前半期にあたる成層期は湾内から湾外への流出傾向、後半期の成層崩壊期は流入傾向にあることがわかった。流出期には台風16号が田辺湾を直撃し、瞬間に強い湾外流出イベントが惹起された。流入期・流出期ともに流動のスペクトルでは半日周期成分が卓越したのに比べ、風速・水位とのコヒーレンスでは半日周期成分は小さくなり、亜表層もしくは混合層以深における傾圧的な流速分布により流動方向が逆転したことが示唆された。また、流出期には黒潮流路変動やメソスケール還流の影響に伴うサブタイダル周期での水温上昇イベントが複数回発生し、海水交換に強い影響を与えていた。

Key Words : semi-enclosed bay, water exchange, ADCP, Kuroshio and subtidal fluctuations

1. はじめに

和歌山県・田辺湾は紀伊半島南西端に位置する半開放系の湾である（図-1）。本海域には台風が頻繁に接近し、特に秋季に散発的な気象擾乱の影響を強く受ける一方で、地形的には半閉鎖性であるという極めてユニークな条件下にある¹⁾。また、紀伊半島南端沖を東進する黒潮に伴う外洋の影響を間接的に受け、豊かな生態系が維持されている。そのため、田辺湾南部や奥部の静穏域は古来より養殖漁場として利用されてきたが、その半面、有機物負荷による赤潮や貧酸素水塊の形成がしばしば生じる²⁾。したがって、汚濁負荷低減策と並行して、湾の海水交換特性を定量的に理解し、水質管理計画に応用する技術の構築が求められている。これに対して筆者らのグループは、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）を用いて、毎年夏に台風接近時の気象・海象データ取得を目的とした現地観測を断続的に実施し、これまでに2009年18号³⁾、2013年17号、18号、26号^{1), 4)}、2014年18号、19号⁵⁾などの台風接近イベント時の海象情報を得ることに成功した。特に、観測結果と高解像ダウンスケーリング海洋モデルによる数値解析を組み合わせることにより、湾口部における流動構造と湾内外の海水交換特性に着目した詳細な解析を行った⁶⁾。それに加え、2015年には、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、欠損の少ない良質なADCPデータを取得することに成功し、数値海洋モデルに基づく推算結果¹⁾の整合性を確認した。しかしながら、台風接近イベント時を含むADCPデータを取得するには至っていなかった⁶⁾。本研究では、2016年夏季～冬季にかけて、田辺湾湾口部に位置する観測塔に常

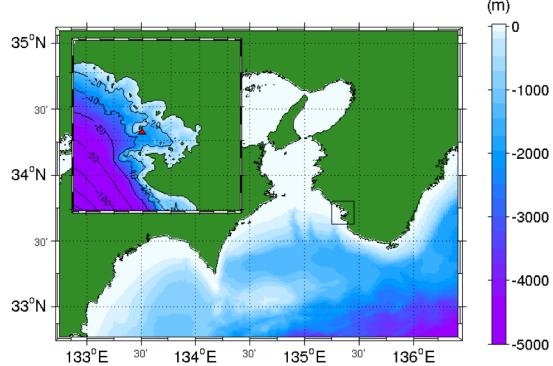


図-1 観測海域(和歌山県田辺湾、黒枠). カラー:水深. 図中左上のインセットは、田辺湾周辺(黒枠部)の拡大図であり、インセット中の赤三角印は京都大学防災研究所・田辺中島高潮観測塔の位置を示す.

設された波高・周期、潮位、海水温、海上風計測に加え、長期連続ADCP観測（2016年9月1日～12月7日、図-1）を実施し、台風12号、台風16号の気象擾乱の影響を含んだ連続的でノイズレスなADCPデータの取得に成功した。本論文では、台風イベントを含む夏季～冬季における田辺湾湾口部における海水交換特性に着目し、長期連続観測データ解析を通じて湾口フラックスの時間変動・季節変動特性を定量化し、その形成メカニズムを明らかにする。さらに海上風速に代表される外力と海水交換の周波数特性との関係について着目した解析を行ったので、その結果を報告する。

2. 現地観測

(1) 観測の概要

田辺湾湾口に常設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、観測塔）およびその周辺海域において、2016年9月1日から2016年12月7日まで長期連続係留観測を実施した。観測塔における波高、潮位、海水温、海上気象計測に加えて、ADCP（Acoustic Doppler Current Profiler、超音波流向流速計、Teledyne RDI社製 Workhorse Sentinel 1200 kHz）による流速分布計測、水深30 mまでの海水温鉛直分布計測、水深30 m地点での塩分計測を行った（図-2）。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、気圧、波高などが観測されている。ADCPは水深10 mの位置に上向きに設置し、水深10 mまでの流速分布を計測した。なお、水深10 mまでの表層付近については、水温計を集中的に配置した。連続観測の詳細については、馬場ら⁷⁾を参照されたい。

(2) 観測結果

約3ヶ月分の連続観測データのうち、主要な項目の時

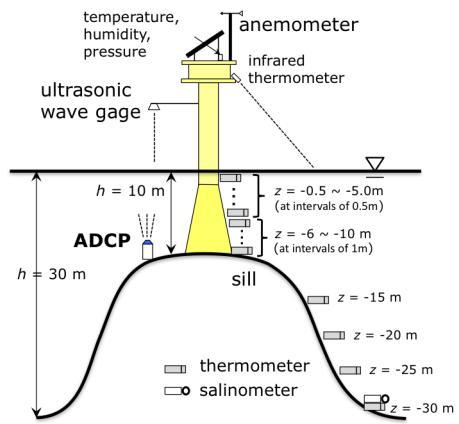


図-2 田辺中島高潮観測塔周辺における計測器の設置概況.

系列変化を図-3に示す。上から順に、海面気圧、平均水位、海上風速ベクトル、海水温の鉛直分布、塩分（水深30 m地点）、流速鉛直分布（東向き、北向きの水平2成分と、鉛直方向上向き）、流向（北向きから反時計周り）の時系列である。12月の気圧・風速データは欠測となっている。まず、ADCPによる東向き流速および流向から、観測期間前半の9月から10月下旬にかけては西向きの流速成分が強く、湾内から湾外への流出傾向にある（以下、流出期と呼称）一方で、11月以降は東向きの流速成分が強く、流入傾向にあった（以下、流入期と呼称）と判断できる。水温の鉛直分布に着目すると、期間を通じて一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。成層期はおおむね流出期と対応しており、成層崩壊期は流入期と対応しているものと考えられる。前半の成層期において、台風12号、台風16号が接近した9月8日、9月20日に気圧の大幅な低下と、水深30 m付近における水温の一時的な低下が見られる。その後、流出から流入へ転じる期間中である10月21日以降の2-3日間では、水深10 m以深において水温の急激な上昇が発生し、同時に塩分も上昇した。また、後半の非成層期には表層付近で複数回の水温の上昇が見られる。これらの水温上昇イベントについては、3. (4)で検討する。後半期においては、表層の水温変動は見られるが、水深30 m地点の塩分は時間的にほぼ一定であり、同様に水深30 m付近の水温変動も前半に比べると非常に小さい。また、前半は風向の反転がみられるが、後半は北向き風が卓越していた。

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は、成層期から非成層期への季節的な表層混合層の発達と、卓越風向変化に連動した流動特性の変化で特徴づけられる。加えて、風に代表されるイベント的な水温塩分低下と風速強化が重畠していたと考察される。そこで以降では、周波数スペクトル解析によって流速の周期数特性および外力との相関を評価とともに、湾口通過フラックスを算定し、流入量変動を詳

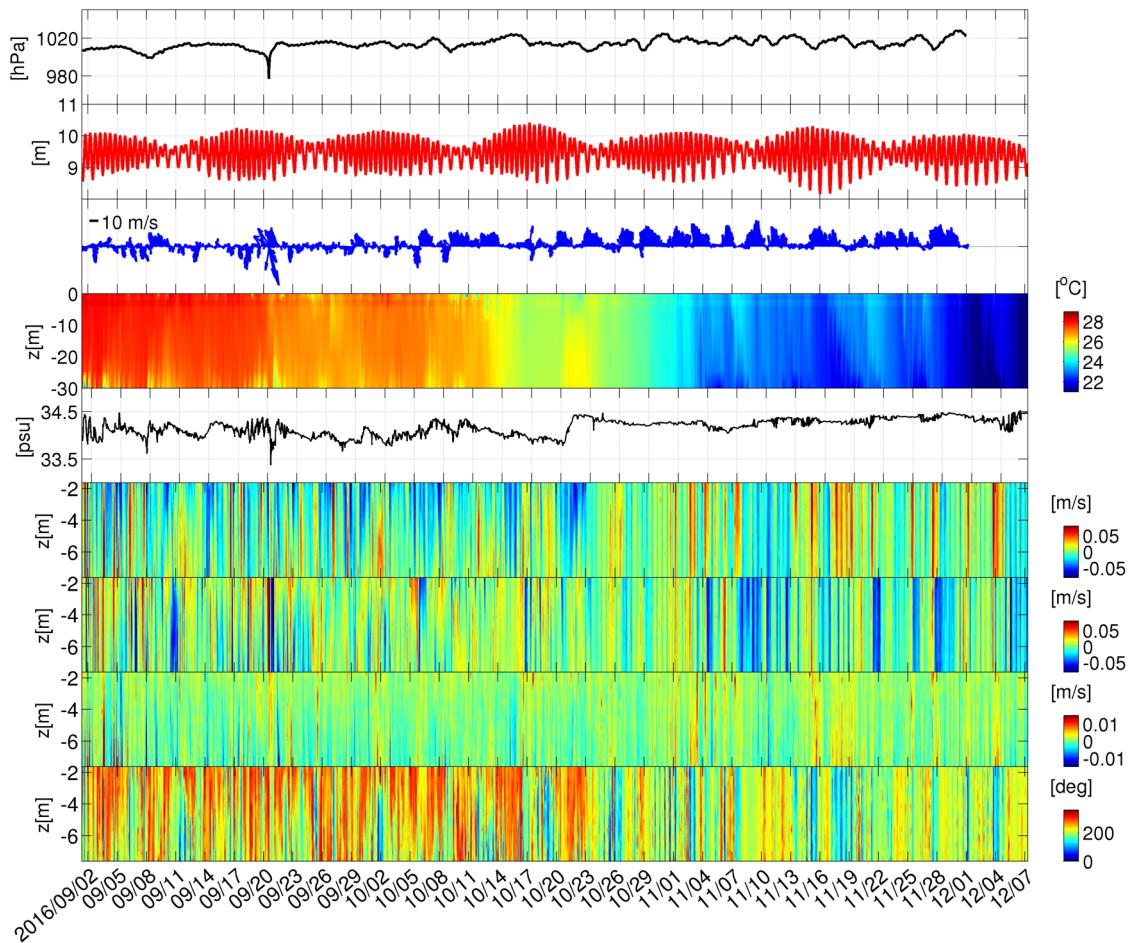


図-3 連続観測結果の時系列。上から、田辺湾口観測塔における海面気圧、平均水位、海上風速ベクトル、水温鉛直分布、塩分(水深30m地点)、流速鉛直分布(上から東向き、北向き、鉛直方向上向き)、水平流向(北向きから反時計周り)の時系列(2016年9月1日～12月7日)。気圧・海上風速は観測塔頂部付近の気圧・風向風速計、水温は水深30mまで設置した海水温計、塩分は水深30m地点の塩分水温計、他はADCP(設置水深10m)による観測値を使用。

細に評価する。さらに、通過フラックスを周波数分解することで、台風の間欠性を反映した乱流成分、内部潮汐に影響された潮流成分などの各周波数成分の寄与率、歪度を求め、湾口流動特性について詳細な解析を行う。

3. 解析と考察

(1) 流速変動特性に関するスペクトル解析

観測期間を10月20日より前の流出期(成層期)と、それ以降の流入期(非成層期)に分割し、それぞれについて東向き・鉛直上向き流速の周波数スペクトル密度鉛直分布を求めた(図-4)。東向き流速については、流出期、流入期ともに半日周期、日周期、および2日程度以上の長周期帯において、全水深にわたってパワーが大きい。両期間を比較すると、流入期では日周期帯のパワーが表層付近に集中し、周期3日以上の長周期成分が特に強化されている。前半の流出期においては、日周期帯の両側の帯域を含めて全体的にパワーが強く、様々な周波数の

外力変動の影響を含んでいると考えられる。同様の傾向は北向き流速に対しても確認された。鉛直流速についても定性的に同様の傾向が見られるが、表層付近よりも水深5m以深において顕著に見られ、内部界面変動(内部波)の影響をより強く反映していることが分かる。

(2) 湾口通過フラックス

田辺湾の海水交換特性を評価するために、ADCPによる流速の湾口ラインを直交する成分を取り出し、海表面から水深10mまで鉛直積分することにより、単位幅表層体積フランクス Q として評価した(図-5、流入を正とする)。なお、田辺湾の湾口ラインは概ね南北方向に約3.5 km、水深は約30 mであり、一点の流速データで海水交換を代表させることはできないが、観測塔位置は水平地形の影響を受けづらい湾口ライン中央部付近であること、ADCPが計測する混合層内外の表層流は湾口流動の大部分を占めることから、 Q は湾口フランクスを特徴づける量と考えることができる。

流出期の期間平均 Q は $-0.036 \text{ m}^2/\text{s}$ 、流入期は $+0.104 \text{ m}^2/\text{s}$ と見積もられた。期間最大値は9月20日午後の台風16号接近時の $-1.411 \text{ m}^2/\text{s}$ であり、瞬間的であるが非常に強い流出が惹起されている。さらに Q を周波数分解し、各成分のRMS、およびRMS寄与率を求めたところ、最も寄与の高い長周期成分は流出期に32.9%、流入期に42.7%であった（表-1）。台風に伴う間欠的な外乱の寄与を強く反映する乱流成分（周期8時間以下）は、流出期に18.8%、流入期で14.7%であり、流出に対する気象擾乱の影響は有意であったと考えられる。一方で、台風12号接近について、乱流成分の変動は確認できなかった。

周波数分解後の湾口通過フラックスの時系列分布を見ると（図-5下）、流入期である10月下旬以降において、期間を通してsubtidal成分に明確な流入傾向が現れていることが確認できる。そこで、それぞれの成分に対して歪度を求めたところ、流入期のsubtidal成分は他の成分と比べて最も強い正の歪度（+0.6048）を持っていた（表-1）。流出期のsubtidal歪度は+0.1154と流入期の1/4程度にとどまっており、湾口フラックス形成に対してsubtidal成分が極めて重要であることが理解される。つまり、日周期や潮汐周期で生じる連続的な外力というよりは、散発的に発生する現象や、長い時間スケールでゆっくりと変動する現象（外洋影響）の影響が強いことが示唆される。

③ 外力との関係

各期間における湾口通過フラックス Q の変動の形成要因を定量的に評価するため、外力である北向き風速、東向き風速、水位と通過フラックス Q のコヒーレンスをそれぞれ求めた（図-6）。流出期の短周期・乱流成分で風速と強い相関を有することから、台風の影響が再確認さ

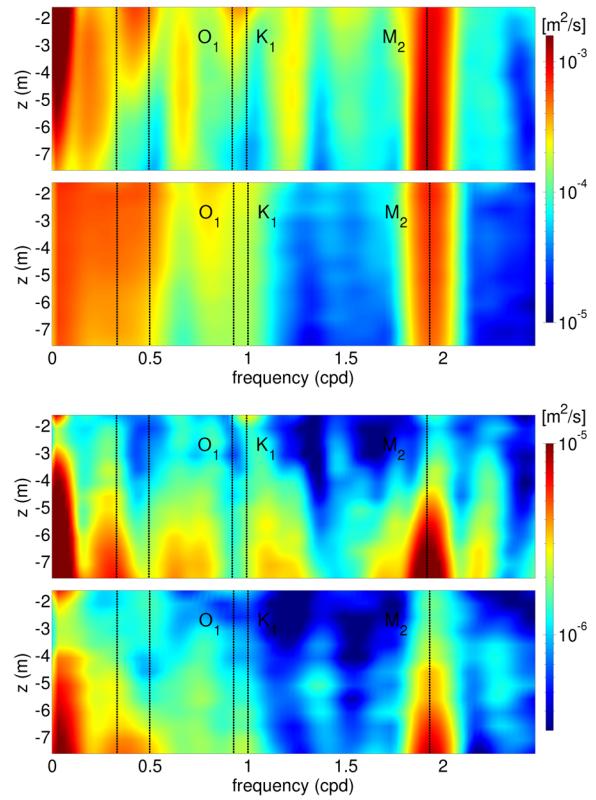


図-4 周波数スペクトル鉛直分布。上2枚：東向き流速、下2枚：鉛直上向き流速。それぞれ、上：流出期（観測前半の成層期）、下：流入期（後半の非成層期）。縦線は左から順に、3日、2日、 O_1 （~25時間）、 K_1 （~24時間）、 M_2 （~12時間）周期に対応する。

れる。流出期では、北向き風速は4~5日周期、東向き風速は2~3日周期で Q との相関が高いことから、北風に伴う東向きエクマン輸送と、局所的な東風による吹送流の影響が両方とも強かったことが示されている。実際に、流入期においては風向は北寄りの傾向が強く（図-1），

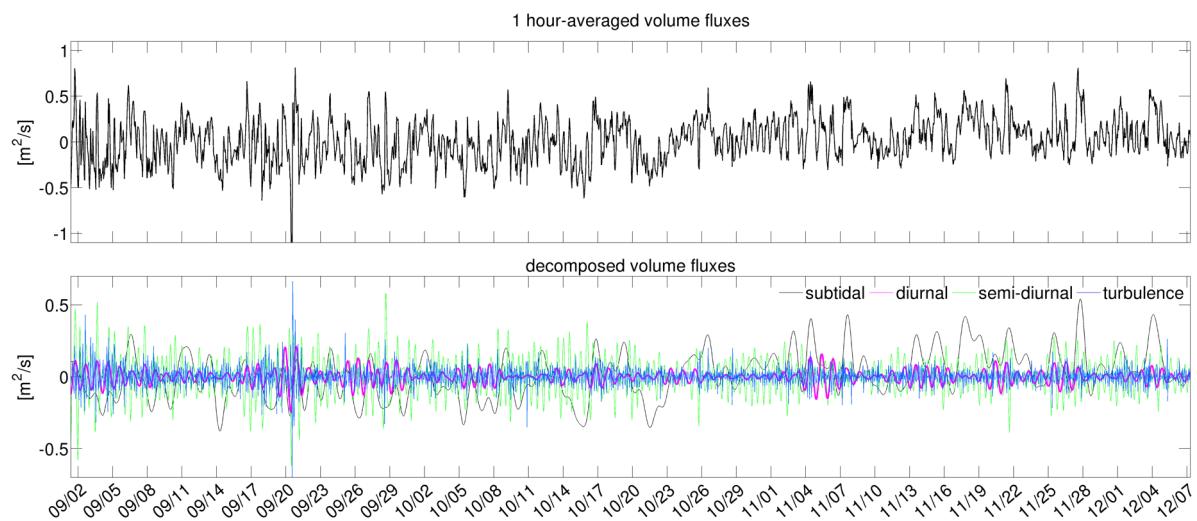


図-5 観測点における湾口通過フラックスの時系列。海表面から水深10mまでの鉛直積分値（単位幅、 m^2/s ）。流入が正。（上）1時間平均値。（下）周波数分解された湾口通過フラックス。下段では、周期28時間以上のsubtidal成分（黒）、18~28時間の日周成分（マゼンタ）、8~18時間の半日周成分（緑）、8時間未満の乱流成分（青）に分解した。

表-1 湾口通過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, 歪度.

	流出期			流入期		
	RMS	RMS 寄与 (%)	歪度	RMS	RMS 寄与率 (%)	歪度
subtidal	0.1874	32.87	0.1554	0.1920	42.66	0.6048
日周期	0.0713	12.50	0.0045	0.0590	13.11	0.0117
半日周期	0.2043	35.83	-0.0268	0.1330	29.55	-0.0391
乱流	0.1072	18.80	0.0520	0.0661	14.69	-0.0379

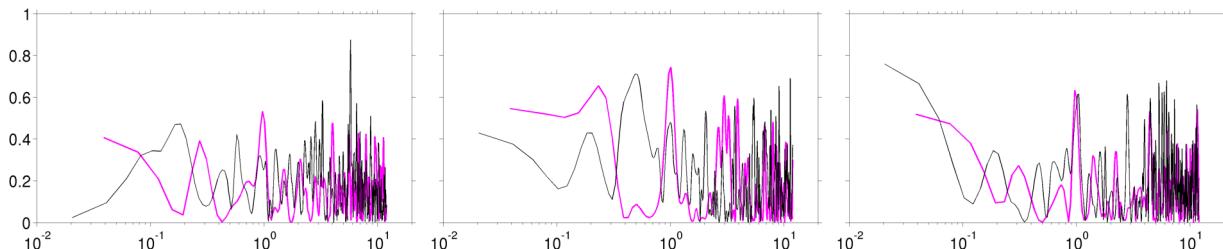


図-6 観測塔における各外力と湾口フラックス Q とのコヒーレンス. 横軸は cpd (cycle per day) . 左から順に、北向き風速と Q 、東向き流速と Q 、水位と Q . 黒：流出期（観測前半）、マゼンタ：流入期（後半）である.

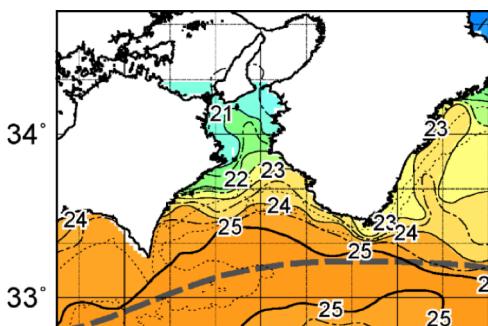


図-7 関東・東海海況速報（三重県水産試験場）による海表面水温分布. 2016年11月21日.

エクマン輸送による東向き輸送（流入）が卓越していたと考えられる。流入期の風と Q の相関の大小は、2~5日周期においては東向き、北向きともに流出期と反対の関係にあり、外力への応答特性の差が Q の差を生じたと考えられる。なお、日周成分の風との相関も高く、海陸風モードに代表される気象場の日内変動の影響が Q 形成に寄与していたことが確認できる。この日周期の風と Q の相関は非成層期である流入期のほうが若干高い。流出期である成層期には強い海陸風モードが表れるはずであるが、乱流成分や数日周期成分の方がより強かったため、相対的に小さく評価されたものと推察される。また、水位と Q の関係を見ると（図-6右）、日周期と長周期での相関が高いことから、日周期の内部潮汐と、成層や流動場の季節消長・黒潮流路変動等による長周期の外洋条件変化の影響が重畠して表れたことが分かる。

一方、流入期・流出期とともに半日周期成分の流速は全水深にわたってパワーが大きく（図-3），順圧的な潮流の影響が現れたと推察される。しかしながら、その鉛直積分値である Q については風速、水位ともに半日周期での相関が低く、流入期の方がその傾向が顕著である。こ

れは、 Q が水深10mまでの流速の鉛直積分であるため、表層から下方に向かうにつれて流入出の方向が反転するような傾圧流の影響を反映した結果、半日周期の流量が鉛直方向に相殺され、単独の外力と Q との直接的なコヒーレンスが小さくなったものと推察される。

（4）外洋影響

水温鉛直分布からは、流出期から流入期へ遷移する時期である10月21日頃に、水深30m付近の水温と塩分がともに上昇した。当時、黒潮は潮岬において接岸流路を取っていたため、高温高塩分である黒潮水塊の影響を反映したことものと推察される。その後の塩分変動は小さかったが、海面冷却の進展に伴い水温は徐々に低下した。水深30m付近での弱い水温変動傾向から、流動もまた弱かったと考えられる。一方、図-5より、黒潮水塊の流入が生じたと思われる同時期の表層付近は流出傾向にあり、表層と亜表層での流動特性に差異が生じたことが示唆される。また、11月中に複数回水温の上昇が確認されるが、表層付近での現象であることから、黒潮水塊の流入の直接影響を反映したものではないと考えられる。

内山ら¹⁾は、田辺湾の長周期の海水交換と湾内環境は、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還流の影響を強く受けていることを報告している。2013年に発生した流入イベント時においては、紀伊半島南西部において反時計周りの中規模渦が生じ、その補償流として紀伊半島側沿岸部に負の渦度が生じ、紀伊半島西岸に沿って強い南下流が発達したと述べている。今回の観測結果より、subtidal成分による流入（図-5）と、南向き流速の発達（図-4）は同時期に発生しており、2013年と同様の現象が発生した可能性が示唆される。11月21日から22日にかけて起こった流入に着目すると、田辺湾

の北西部における表層水温分布が23~23.5°Cとなっており(図-7)、今回の観測結果と整合的であるといえる。

4. おわりに

本研究では、田辺中島観測塔およびADCPを用いた約3ヶ月間の連続観測を行い、9月から10月下旬の湾内から湾外への流出期と、10月下旬から12月上旬にかけての流入期に分割した解析を行った。台風による気象擾乱、黒潮流路、気象場の季節変動に伴う長周期外力変動の影響を最も強く受け、ついで内部潮汐に伴う短周期変動が寄与していた。主要な結論は以下の通りである。

(1) 流出期の台風16号接近時には瞬間流出量が $1.411\text{ m}^3/\text{s}$ となり、期間最大値を記録した。流入期は期間を通してsubtidal成分による安定した流入が続いているのに対し、流出期には、台風などの突発的なイベントの影響が相対的に強く現れた。(2) 水深10mまでの東向き・北向き流速の周波数スペクトルには半日周期のパワーが強く表れていたが、これを鉛直積分した湾口通過フラックスでは、半日周期の外力との相関が小さかった。これは観測地点における流速分布の傾圧性による流向の反転により表層と亜表層の流速が相殺された結果であると推察された。(3) 流入期へ切り替わる時期、および流入期全体にわたり暖水の流入が見られた。これは主に外洋影響、特に黒潮が接岸流路を取った結果、紀伊水道スケールでのメソスケール還流の影響を受けたものと考察された。

謝辞：本研究は科学研究費（15H04049, 15KK0207, 18H03798、代表：内山雄介）、京都大学防災研究所一般共同研究費の援助を受けた。

参考文献

- 1) 内山雄介、松川大佑、神吉亮祐、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 - , 和歌山県農林水技セ研報, Vol.5, pp.107-116. 2003.
- 3) 森信人、鈴木崇之、木原直人：海洋表層鉛直混合における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.
- 4) 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, I_476-I_480. 2014.
- 5) 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、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, pp.I_487-I_492, 2016.
- 6) 内山雄介、吉木智軌、多田拓晃、馬場康之、水谷英朗、久保輝広、森信人、猿渡亜由未、大塚淳一、二宮順一、渡部靖憲、山田朋人：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、土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.72, No. 2, pp. I_493-I_498, 2016.
- 7) 馬場康之、水谷英朗、久保輝広、内山雄介、森信人、渡部靖憲、山田朋人、猿渡亜由未、大塚淳一、二宮順一：田辺中島高潮観測塔における2016年夏季観測結果、京都大学防災研究所年報、第60号B, No.2, pp.664-671, 2017.

(2018.3.15受付)

SEASONAL VARIABILITY OF WATER EXCHANGE AT THE ENTRANCE OF A SEMI-ENCLOSED BAY AND ITS UNDERLYING MECHANISMS

Nobue OKADA, Yusuke UCHIYAMA, Hiroaki TADA, So ENDO, Yasuyuki BABA,
Hideaki MIZUTAMI, Teruhiro KUBO, Nobuhito MORI, Yasunori WATANABE,
Junichi OTSUKA, Tomohito YAMADA, Ayumi SARUWATARI, and Junichi NINOMIYA

An extensive field campaign was carried out to examine water exchange at the entrance of the semi-enclosed Tanabe Bay, Wakayama, from September until December 2016 using the observing system of the Tanabe-Nakashima observatory and an ADCP. The first half of the observation period mostly under stratified condition is characterized by a gross outflow from the bay, while the second half under unstratified condition is dominated by inflow into the bay. Typhoon 201616 attacked the bay during the first half, which excited intensive instantaneous outflow. Although the semi-diurnal component prevails in the upper ocean velocity during both periods, the coherent analysis indicates that the external forcing such as wind and sea surface height is less correlated at this frequency. This suggests that baroclinic velocity profiles at depth would yield inversion of flow direction that cancels the vertically-integrated volume flux, which is viewed as a proxy of the water exchange. During the second half, the subtidal low-frequency component is responsible for the exchange, which may be caused by meridional shift of the Kuroshio path and associated mesoscale circulations formed in the Kii Channal that leads to multiple warming events.