

一般共同研究 報告書

高潮・波浪災害リスク軽減に向けた大気-海洋-
地盤系における界面力学過程に関する現地調査
(課題番号：24G-05)

平成 26 年 3 月 31 日

内山 雄介

神戸大学 大学院 工学研究科 市民工学専攻

一般共同研究（24G-05）報告書

「高潮・波浪災害リスク軽減に向けた大気-海洋-地盤系における 界面力学過程に関する現地調査」

目 次

1. 概要	5
1.1 研究目的と趣旨.....	5
1.2 研究経過.....	5
1.3 主要な研究成果.....	5
2. 実施体制	6
3. 台風通過に伴う海水温低下と海洋構造変化	7
3.1 はじめに.....	7
3.2 解析モデル.....	7
3.3 計算結果.....	9
3.4 EOF解析.....	11
3.5 おわりに.....	13
参考文献.....	14
4. 田辺湾湾口部における海水交換特性	16
4.1 はじめに.....	16
4.2 曳航観測.....	16
4.3 観測塔における連続観測.....	18
4.4 高解像度数値モデリング.....	19
4.5 海水交換特性.....	20
4.6 おわりに.....	23
参考文献.....	23
5. 台風通過時の広域海洋熱収支変化	25
5.1 はじめに.....	25
5.2 モデル.....	25
5.3 計算結果.....	27

5.4 海洋熱収支	29
5.5 おわりに	33
参考文献	33
 6. 研究成果の公表	 34
 7. 参考資料	 36

1. 概要

1.1 研究目的と趣旨

台風通過に伴う高潮・波浪災害リスク軽減に向けた荒天時の海洋混合過程を定量的に把握するために、白浜海象観測所・田辺中島高潮観測塔において2012年と2013年の夏期～秋期にそれぞれ約4ヶ月間の現地観測を実施した。あわせて、海洋再解析値JCOPE2を境界条件とした領域海洋循環モデルROMSを用いた4段ネストによって田辺湾周辺海域を最内側領域とした海洋モデリングを行い、台風接近時の海水混合に伴う水温低下の状況、田辺湾口部での海水交換、およびそれらのメカニズムを明らかにすることを目的とした共同研究を実施した。

1.2 研究経過

現地観測は2012年8月10日～11月1日、2013年8月9日～11月14日に実施した。観測項目はADCPによる流速鉛直分布、CTチェーンによる密度分布、波浪・水位、各種気象データである。現地観測では、紀伊半島沿岸を通過した2012年17号(JELAWAT)、2013年17号(TORAJI)、18号(MAN-YI)を含め、西日本に接近した6個の台風を捉え、台風の接近に伴う鉛直混合の強化とそれに伴う境界層の発達などに関する貴重なデータセットを取得することに成功した。海洋モデリングに関しては、2012年度は3段ネストによる瀬戸内海全域モデル(水平解像度600m)を、2013年度はさらにもう一段階ネストを深めた田辺湾モデル(水平解像度120m)を開発し、台風接近に伴う広域の海洋構造変化と、田辺湾口通過流量の変動特性とその原因についての詳細な解析を行った。

1.3 主要な研究成果

現地観測データおよび瀬戸内海全域モデルにより、台風接近に伴う大規模な水温低下現象は、単に台風の強風に伴う海洋混合による局地的な現象ではなく、九州東岸・四国南岸・瀬戸内海・紀伊水道を含む広域で生じていたこと、その変動パターンは季節変化に伴う線形トレンド、海上風によるエクマン輸送に伴う沿岸湧昇、高知沖などに形成される低気圧性中規模渦による湧昇と黒潮による冷水塊の移流などの寄与が複合していることなどを明らかにした。また、田辺湾モデルによって2013年観測期間における田辺湾口通過流量および海水交換機構に対する台風等の現象の寄与は、全流量変動振幅に対して40%程度であり、半日周期の潮流および内部潮汐の寄与に匹敵することなどを具体的に明らかにした。

2. 実施体制

研究代表者

内山 雄介（神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 准教授）

共同研究者／防災研究所内担当者

森 信人（京都大学防災研究所 大気・水研究グループ 准教授）

共同研究者

馬場 康之（京都大学防災研究所 流域災害研究センター 准教授）

平石 哲也（京都大学防災研究所 流域災害研究センター 教授）

研究期間

平成 24 年 4 月 1 日～平成 26 年 3 月 31 日

研究場所

白浜海象観測所，田辺中島高潮観測塔，神戸大学，防災研究所

共同研究参加者数

- 17 名（防災研外 12 名，所内 5 名）
- 大学院生の参加状況：8 名（修士 7 名、博士 1 名）（内数）
- 大学院生の参加形態 [観測補助，観測データ解析，数値モデリング，对外発表]

3. 台風通過に伴う海水温低下と海洋構造変化

3.1 はじめに

台風通過に伴う暴風時には、海面風応力の増大、ホワイトキャップによる TKE 供給、Langmuir 乱流などの影響によって海洋表層の鉛直混合が強化される。このような強風時の海洋構造変化を究明することは、高潮、高波、海岸浸食などの沿岸防災や、海洋生態環境変化に関する予測精度を向上させる上で重要となる。これまで、暴風時における海洋表層の構造変化については、主に海面境界条件の変化によって生じる鉛直拡散の評価に主眼が置かれていた（例えば、森ら、2009）。しかしながら、台風は数 100 km の直径を持つ反時計回りの大気の渦であるため、海洋に与える影響を考える上では局所的な鉛直混合の変化だけではなく、メソスケールの海洋応答、例えば強風に伴うエクマン輸送や中規模渦に伴う鉛直混合、水平移流拡散効果などを無視することはできない。

本研究では本州太平洋岸に位置する紀伊半島沿岸域（図-3.1）を対象海域に、2012 年 9 月を主な対象期間とし、台風通過時における広域の海洋構造変化について定量的に評価することを試みる。本海域は紀伊水道を介して瀬戸内海と太平洋が接続する海域であり、黒潮による外洋からのシグナルが海域の流動構造に強く影響している。そのため、黒潮流路、瀬戸内海流動、台風による海洋応答の三者が重畳し、独特な海洋構造変化が生じることが予想される。また、2012 年 9 月中旬から 10 月初旬にかけて 3 つの台風（16、17、18 号）が西日本に接近あるいは上陸し、図-2 に示すように本海域において顕著な水温低下をもたらした（Baba ら、2013）。このうち 17 号（Jelawat）は、太平洋上で中心気圧 905 hPa まで発達したのち、9 月 30 日 15 時頃に紀伊半島先端（和歌山県潮岬）付近を通過（通過時の中心気圧：965 hPa、最大風速：35 m/s、暴風域半径：約 200 km）、同 19 時頃愛知県東部において強い台風として本州に上陸し、本州に沿って東海・関東・東北へ北上した（図-3.3）。

そこで本研究では、気象庁 GPV-MSM 再解析データを海表面境界条件に用いた 3 段ネストによるダウンスケーリング海洋モデルを構築し、2012 年 8 月から 10 月末までの 3 ヶ月間を主な対象期間とした紀伊半島沿岸における高解像度数値実験を行う。観測データとの比較を通じてモデルの再現性を確認するとともに、台風通過に伴う紀伊半島沿岸域における海水温低下のメカニズムを明らかにすることを目的とする。本稿では特に、3 個の台風通過時に対する SST（海表面温度）モデル出力に対して EOF 解析を適用し、特徴的な水温変動パターンを抽出し、EOF モードと物理モードを関連付けるために各 EOF モードに対応する外力と変動メカニズムについて考察を行ったので、その結果について報告する。

3.2 解析モデル

本研究では、3 次元変分データ同化を組み込んだ日本近海の海況再解析・予報システム

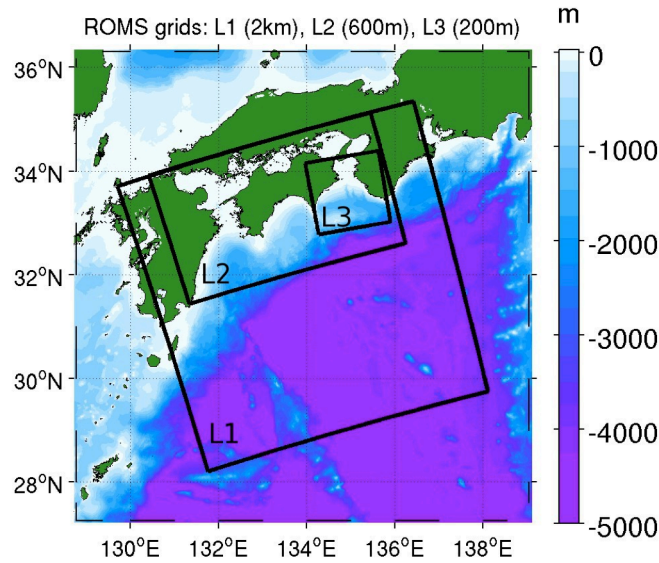


図-3.1 3段階のネスティング（L1：水平解像度 2 km，L2：600 m，L3：200 m）による ROMS 計算領域（黒枠）と水深分布（カラー）。

JCOPE2（Miyazawa ら，2009；水平解像度 $1/12^\circ$ ）を最沖側境界条件として与え，領域海洋循環モデル ROMS をベースとした 3 段階のネスティングにより，黒潮等の外洋影響を考慮しつつ，水平空間解像度を 2 km（ROMS-L1）→ 600 m（L2）→ 200 m（L3）へ順次細密化させた紀伊半島沿岸ダウンスケーリング海洋モデルを構築した（図-3.1）。なお，L1・L2 モデルには著者らによる瀬戸内海全域モデル（詳細については内山ら，2012 を参照，以下，前報と呼称）を用いており，紀伊半島沿岸高解像 L3 モデルはこれをさらにもう一段階ダウンスケーリングさせたものである。

本研究では L2 および L3 モデルの結果を用いるが，L2 領域は東西 480 km×南北 288 km（格子数は $800 \times 480 \times$ 鉛直 32 層），L3 は東西 153.6 km×南北 153.6 km（ $768 \times 768 \times$ 鉛直 40 層）である。L2，L3 とともに，海上風応力については気象庁 GPV-MSM の 1 時間値，その他海面フラックスについては COADS の月平均気候値，SST には AVHRR-Pathfinder データの月平均気候値を与えた。L2 開境界の順圧成分境界条件に TPXO7 全球調和定数による潮汐を与え，L2 → L3 間では L2 の解を 3 次元的に時空間内挿することにより，内部潮汐等を含む高周波シグナルを L3 領域内へ伝播させた。領域内に流入する一級河川（L1：29 本，L2：27 本，L3：2 本）を考慮し，流量は雨量・流量年表データベース（河川協会）から求めた 10 年間の月平均値を与えた。L1，L2 地形には JODC-JEGG500 データを SRTM30 データで補完したものを，L3 地形には内閣府中央防災会議による解像度 50m，150m，450m のデータを相互補完したものを使用した。鉛直乱流モデルには海表面・海底面の両境界層に対する KPP モデルを用い，波浪の影響は考慮しない。L1 モデルは 2003/1/1，L2 モデルは 2008/1/1，L3 モデルは 2012/8/1 から計算を開始し，それぞれ十分なスピナップ期間を設けている。本研究の主な解析対象期間は 3 個台風の接近時を含む 2012/9/10～2012/10/9 の約 1 ヶ月間である。

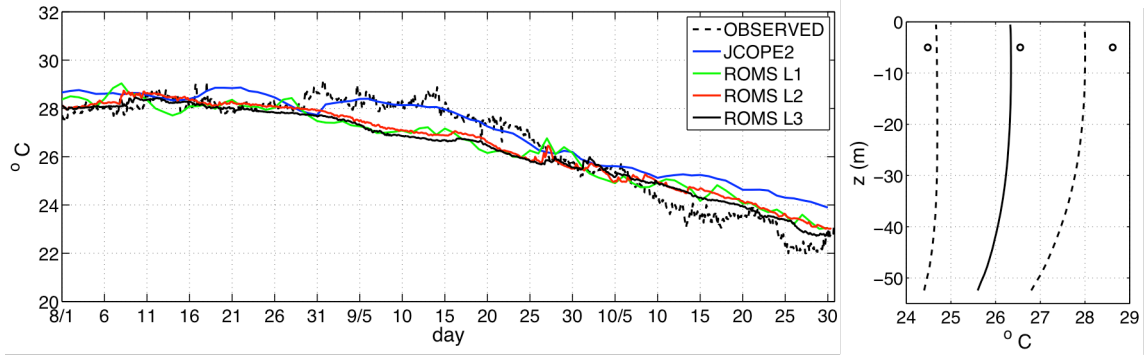


図-3.2 紀伊半島先端（和歌山県串本）における 2012/8/1～10/31 の（左）水深 5 m 水温の時系列（実線：計算値，破線：観測値），（右）平均水温（実線）と平均水温±標準偏差（破線）の鉛直分布（線：L3，○：観測値）。

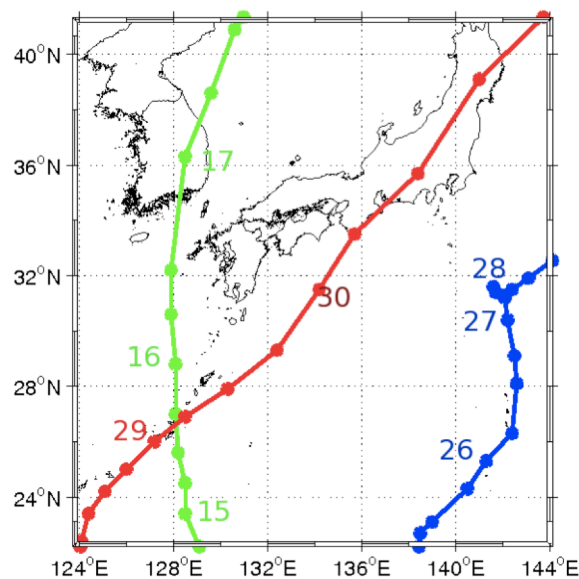


図-3.3 気象庁による 2012 年 9 月に発生した台風 16 号（緑）17 号（赤），18 号（青）のベストトラック（数字は日付）。

3.3 計算結果

(1) ダウンスケーリングモデルの再現性

瀬戸内海モデル（JCOPE → L1 → L2）の再現性については前報の通りであり，L3 モデルに関してもほぼ同様な再現性を確認している．一例として，和歌山県串本における水温の観測値（水産総合研究センター）と計算値の比較を図-2 に示す．L1～L3 モデルは 9 月以降の長期的な水温低下傾向を概ね再現できていることが分かる（図-3.2 左）．データ同化された JCOPE2 は，forward モデルである ROMS よりも 9 月中の再現性は高いが，逆に 10 月以降の再現性は低い．また，期間内の水温の平均値，標準偏差（図-3.2 右）も概ね一致していることが確認される．

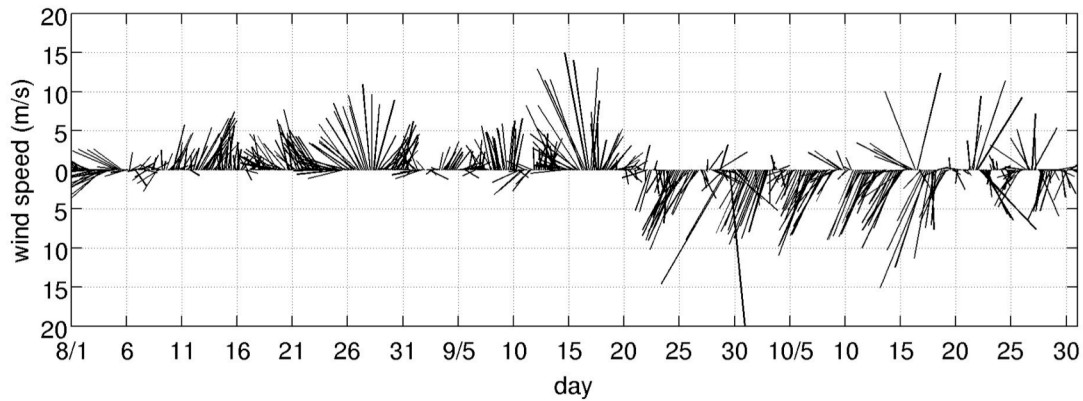


図-3.4 気象庁 GPV-MSM による室戸沖の風速ベクトル。

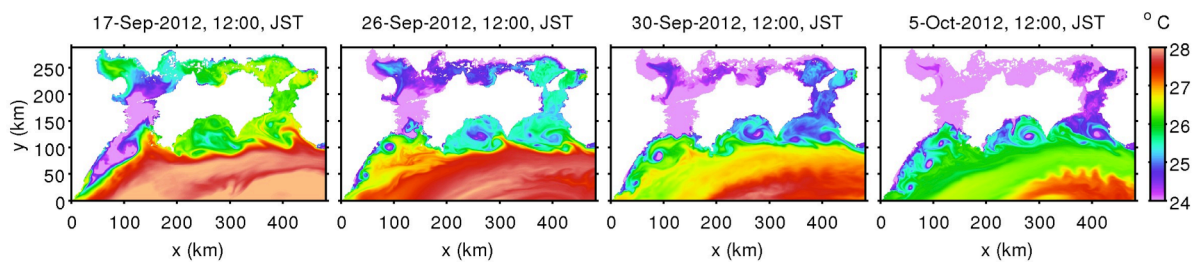


図-3.5 ROMS-L2 による海表面温度 SST の瞬間像 (左から, 2012/9/17/12:00, 9/26/12:00, 9/30/12:00, 10/5/12:00 JST)。

(2) 紀伊半島沿岸における水温低下

2012 年 9 月に日本近海を通過した 3 個の台風の経路を図-3.3 に示す。台風 16 号が九州西岸を通過した 9/16 以降の約 15 日間において、紀伊半島沿岸域で海洋表層水温が約 2°C 減少するという特徴的な低温化現象が生じている (図-3.2)。この期間の海上風を見ると (図-3.4)、まず、16 号の通過に伴って 9/15 から 9/18 にかけて強い SSE 風が生じている。9/19 以降、風向は NNE 方向に転じ、後続する 2 個の台風 (9/27 に最接近した 18 号、9/30 に本海域を直撃した 17 号) の影響を受けつつも、その後約 30 日間にわたって NNE 風が維持されている。台風に伴う海上風速のピークは 9/16、9/25、9/30 に出現している。

この期間における L2 モデルによる海表面水温 (SST) の経時変化を図-3.5 に示す。連続する 3 個の台風の影響などにより、瀬戸内海、黒潮流路を含む全領域で SST 低下が生じている。約 28°C 程度であった黒潮流路の SST は 26°C 程度まで漸次低下し、9/17 に九州東岸から豊後水道にかけて存在する 24°C 以下の冷水塊は、伊予灘、安芸灘、燧灘、備讃瀬戸を経て、10/5 には播磨灘、大阪湾に達している。瀬戸内海を時計回りに輸送されるこの冷水塊は、そもそもは 9/15 からの SSE 風によるエクマン輸送によって九州東海岸で生じた沿岸湧昇に伴うものである。また、黒潮流路のすぐ北側の海域ではメソスケール、サブメソスケール渦に伴う顕著な SST 変化が生じている。四国・土佐湾沖および紀伊水道では反時計回りのメソスケール渦が経時的に強化され、それぞれの渦の中心では SST が低減していることから、低気圧性渦に伴う湧昇によって冷水渦を形成していることが分かる。九州東岸から豊後水道にかけての海域では、直径 20 km 程度のサブメソスケール冷水渦が発達している。これらの冷水渦は豊後水道、土佐湾、紀伊水道において孤立した冷水塊を形成しつつも、黒潮による移流効果によって東方へ輸送され、紀伊半島沿岸の SST を低下させている。9/30 に

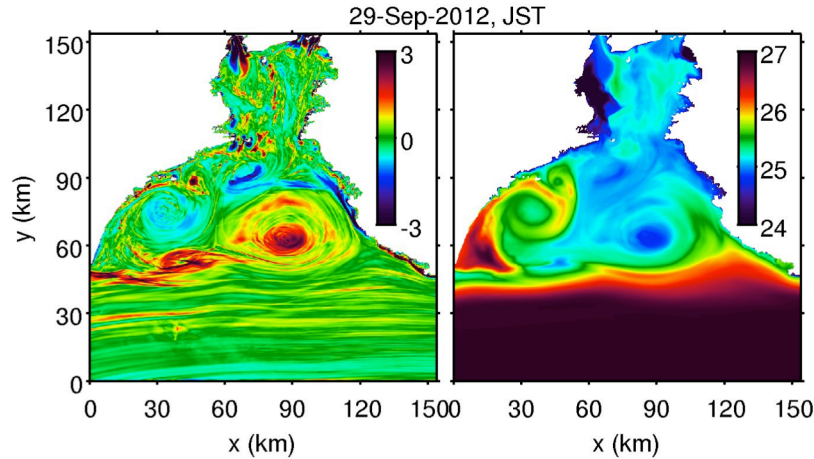


図-3.6 ROMS-L3 による紀伊半島沿岸域における（左）表層無次元相対渦度，（右）SST の日平均値（2012/9/29）.

表-3.1 トレンドを含んだ場合（図-3.7 に対応）と除去した場合の EOF 各モードにおける寄与率.

	モード 1	モード 2	モード 3	モード 4
トレンド有り	81.0%	4.2%	3.0%	2.0%
トレンド無し	25.5%	15.7%	10.4%	6.5%

ピークを有する強い NNE 風に伴う沿岸湧昇によって瀬戸内海東部から紀伊水道東岸での SST 低下が生じている様子も見て取れる。紀伊半島沿岸域における顕著な SST 低下は、これらの現象が重畳したものであると考えられる。

L3 モデルによる表層無次元相対渦度と SST の 9/29 における日平均値のスナップショットを図-3.6 に示す。四国東岸沖に負、紀伊半島沖に正の強い渦度をもつ渦が対を成して停滞しており、渦中心の SST は高気圧性渦では高く、低気圧性渦では低い様子が示されている。これらの渦に連行される形で黒潮系暖水が岸に沿って輸送され、紀伊水道方向（北方向）へ暖水を間欠的に供給している。気象庁によると、2012 年 9 月の黒潮流路は足摺岬、室戸岬、潮岬では月を通して接岸傾向にあった。黒潮接岸時には紀伊水道から外洋への流出量が抑制されるため（例えば前報）、冷水渦が紀伊半島沿岸域に停滞しやすい構造が形成され、SST 低下を助長させたものと考えられる。

3.4 EOF 解析

前章で記述した広域的な SST 低下現象を定量的に記述し、その形成メカニズムについて検討するため、L2 モデルによる SST データに対して EOF 解析を行う。SST データマトリクスを $h(x, y; t)$ とすれば、EOF 解析ではその固有値問題を解くことにより

$$h(x, y; t) = \sum_{n=1}^m e_n(x, y) \cdot c_n(t)$$

のように、 m 個の有限な EOF モードに h が分解される。ここに、 $e_n(x, y)$ ：固有関数（EOF，単位は $^{\circ}\text{C}$ ）， $c_n(t)$ ：時間関数（主成分，無次元）， n ：モード番号である。

9 月中旬から発生する広域的な低温化を解析対象とするため、L2 モデルによる 2012/9/10

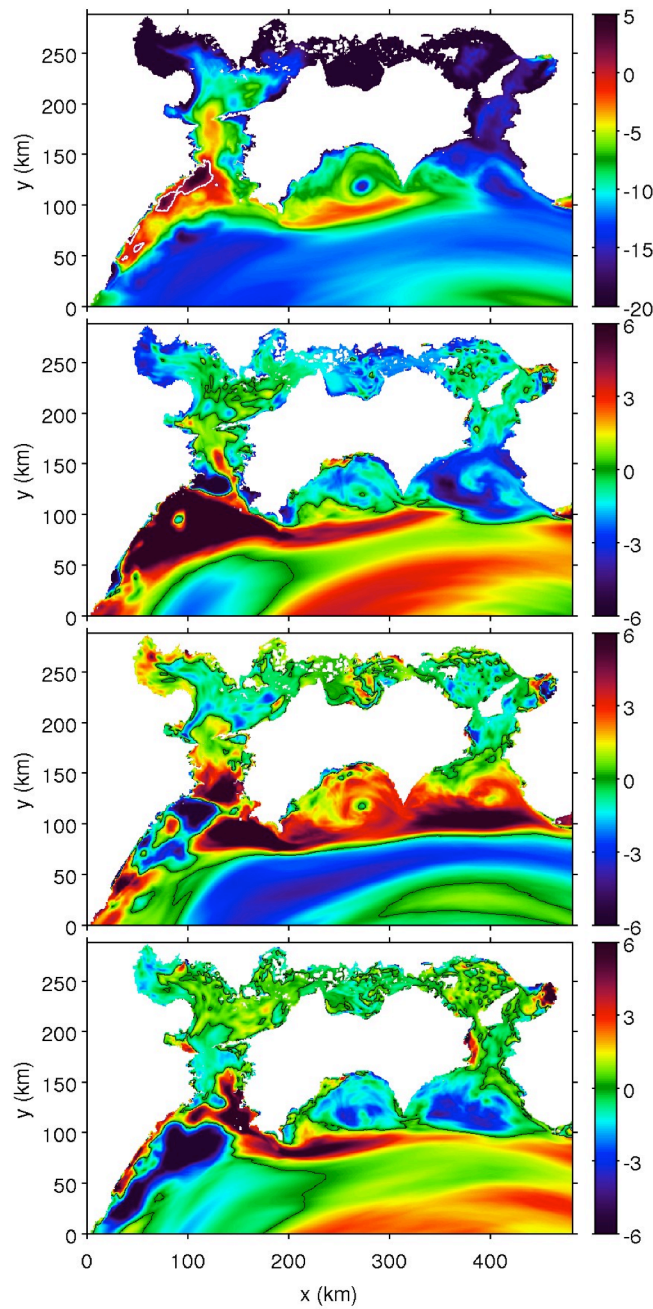


図-3.7 L2 モデル SST に対する EOF による固有関数 e_n の空間分布. 上からモード 1~4. 等高線は 0 を表している.

～10/9 の 30 日間の SST (2 時間毎の平均値) に対して EOF 解析を適用する. 主要 4 モードの固有関数 e_n の空間分布を図-3.7 に, その寄与率を表-3.1 に示す. モード 1 では, 固有関数 e_1 は九州東岸沿岸のごく一部を除くとほぼ全域で負値を取っており, 時間関数 c_1 (図-3.8 左) は概ね単調に負から正に増加していることから, 期間全体を通じて SST が全域的に低下することを意味している. EOF モード 1 の物理モードは, e_1 と SST の線形時間変化率分布がほぼ一致することから, SST 線形トレンドの効果を表していると考えられる (図-3.9 上).

一方, $-c_1$ は室戸沖における SST の線形回帰直線 (図-3.8 右) と同様に変化しており, 寄与率も 81% と高く, 広域 SST 変化の大部分を説明している. この SST トレンドは季節的な

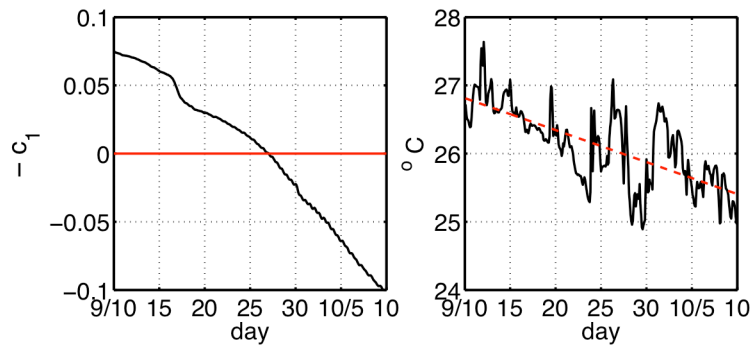


図-3.8 (左) モード1 時間関数 $-c_1$ と (右) 室戸沖における L2 モデルによる SST (実線. 赤破線は線形回帰直線).

海洋構造変化に対応している (図-3.10). すなわち, 9/10~10/9 にかけて気温は低下し, 混合層深さは増加 (季節成層の発達), 鉛直拡散係数は増大し, 浮力振動数は低下 (成層の不安定化) している. 混合層深さのトレンド (図-3.9 下) を見ると, 土佐湾, 紀伊水道, 豊後水道では強い負の値を示しており, 鉛直混合が強化されて季節成層が著しく発達している様子が分かる. したがって, 気温低下に伴う海面冷却によって成層が弱まり, 鉛直混合が促進されて混合層が深くなるという, 夏から秋への季節変化が反映されたものである.

元データから線形トレンドを除去して EOF 解析を行ったところ, モード1 は元データに対するモード2 にほぼ完全に一致し, 同様にモード2 と3, モード3 と4 に非常に良好な相関が見られた. その時の寄与率は表-3.1 の通りであり, 元データに対する EOF 高次モードは季節変動に起因する線形トレンドからの残差を表し, トレンドを含む寄与率は見かけ上小さいが, 台風などの短期的なイベントに対しては有意かつ重要であることが理解される.

モード2 (図-3.7, 図-3.11 左) を見ると, 土佐湾および紀伊水道において 9/17 から 9/25 までに急激に SST が低下・上昇していることが分かる. 反対に, 九州東岸沖から四国沖にかけては同期間に SST の急増と急減が生じている. 固有関数の分布 (図-3.7) および時間関数 (図-3.11 左) から, モード2 と4 の間に高い類似性が見られる. 時間関数 c_2 , c_4 と室戸沖における南北風速 (図-3.11 右) を比較すると, モード2 は 9/17 と 9/25 に, モード4 は 9/17 と台風17号が本海域を直撃した 9/30 にピークを有し, 3者はそれぞれ関連していることが分かる. つまり, モード2 と4 は南北風によるエクマン輸送に伴う沿岸湧昇による SST 低下を示すものと考えられる.

モード3 (図-3.7, 図-3.12 左) では, 土佐湾および紀伊水道における黒潮流路の北側海域に強いシグナルが現れており, 9/16 から 9/20 頃まで SST が低下し, その後 10/3 に至るまで増大することが分かる. 時間関数 c_3 の傾向は, 渦に関連する室戸沖における海面高度 (SSH) の変化と概ね一致している. したがって, モード3 は土佐湾および紀伊水道で発達するメソスケール渦による湧昇と, それが黒潮に連行されて東方向に輸送される効果を表しているものと考えられる.

3.5 おわりに

高解像度海洋モデルと気象庁 GPV-MSM により, 紀伊半島沿岸域における台風通過に伴う強風下に生じる広域的な SST 低下現象を再現し, そのメカニズムを考察した. 四国沖および紀伊半島沖に発達する複数のメソ/サブメソスケールの低気圧性渦による湧昇, エクマ

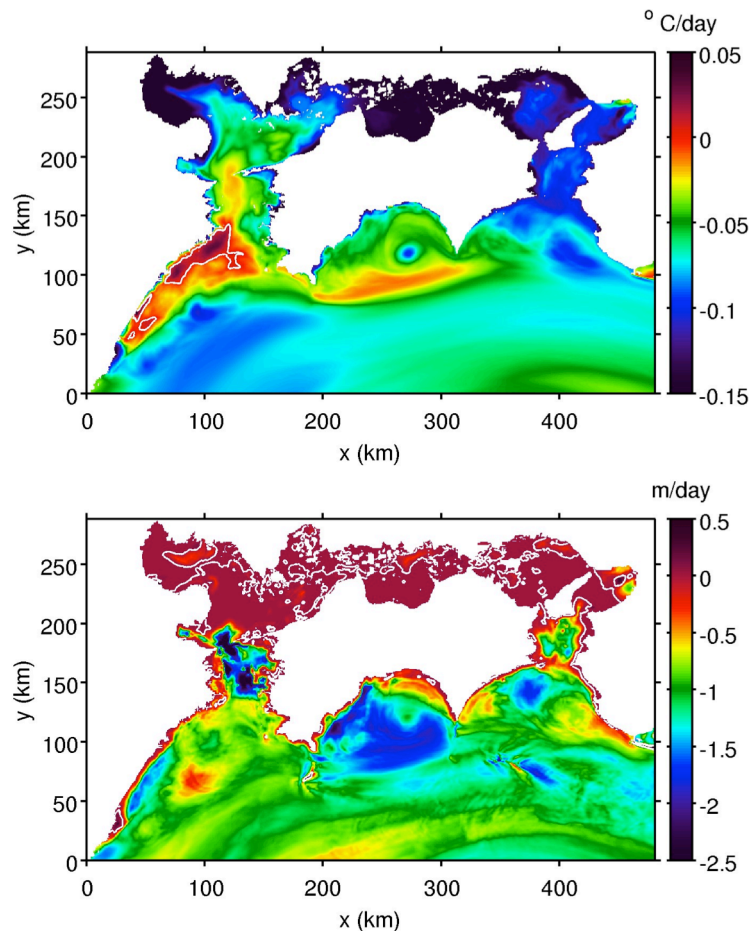


図-3.9 ROMS-L2 領域における 2012/9/10～10/9 の（上）SST および（下）KPP モデルによる混合層深さの線形トレンド．等高線は 0 を表している．

ン輸送に伴う沿岸湧昇が鍵となっており、前者は黒潮による東向き輸送および流路の接岸による冷水渦の停滞などで特徴づけられた。また、L2 モデル SST データに対して EOF 解析を行ない、その物理モードについて検討した。海面気温の低下に伴う季節成層の発達による長期的な SST 線形トレンドがモード 1 に出現し、台風を含む短期的なイベントはモード 2 以降で表現された。モード 2 および 4 は南北風による沿岸湧昇を、モード 3 は土佐湾および紀伊水道で発達する渦の効果を表していた。すなわち、1 ヶ月程度の時間スケールにおける台風による海洋応答には、広域流動の影響が強く現れることが示された。

参考文献

- 内山雄介・栗山善昭（2003）：仙台湾蒲生干潟前面海浜の中期地形変動に関する複素主成分解析，土木学会論文集，No.747/II-65，pp.135-154.
- 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)，Vol. 68，No. 2，pp. I_441-I_445.

森 信人・高田理絵・安田誠宏・間瀬 肇・金 洙列 (2009) : 強風時の表層鉛直混合が高潮
および物理環境へおよぼす影響, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 65, No.1, pp.
I_241-I_245.

Baba, Y., Kubo, T., Uchiyama, Y., Kihara, N., Mori, N., Muto, Y. and Suzuki, T. (2013): Field
observations at an offshore observation tower during the typhoon seasons, *Proc. 35th IAHR
World Congress*, Chengdu, China (CD-ROM).

Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou
and K. Komatsu (2009): Water Mass Variability in the Western North Pacific Detected in
15-Year Eddy Resolving Ocean Reanalysis, *J. Oceanogr.*, Vol. 65, pp. 737 -756.

4. 田辺湾湾口部における海水交換特性

4.1 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。

4.2 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 kHz）と投げ込み式 CTD（塩分水温水深計）を用いて，図-4.1 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-4.2 (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-4.2 (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-4.2 (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-4.2 (c), (d)）では，ラインに直行する東南東方

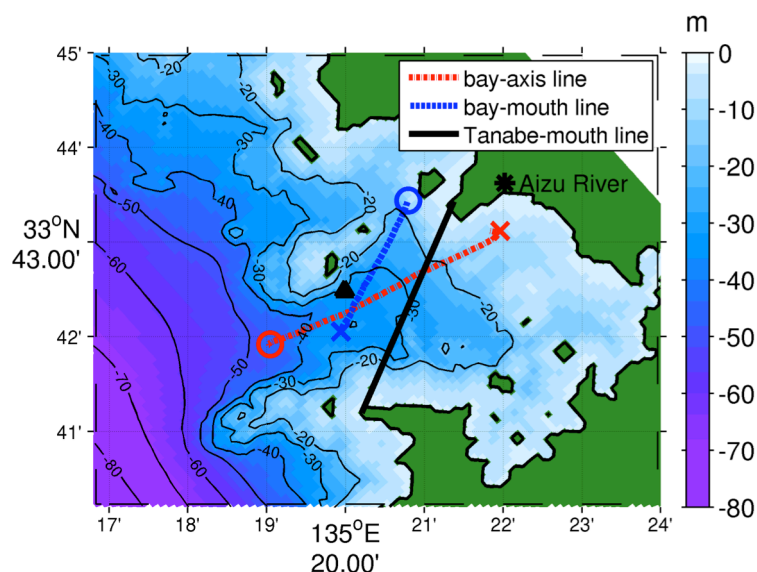


図-4.1 田辺湾の水深分布（カラー），曳航観測における湾軸ライン（赤一点鎖線：○は始点，×は終点）および湾口ライン（青点線），黒実線：海水交換解析に用いる田辺湾口ライン，▲：田辺中島高潮観測塔。

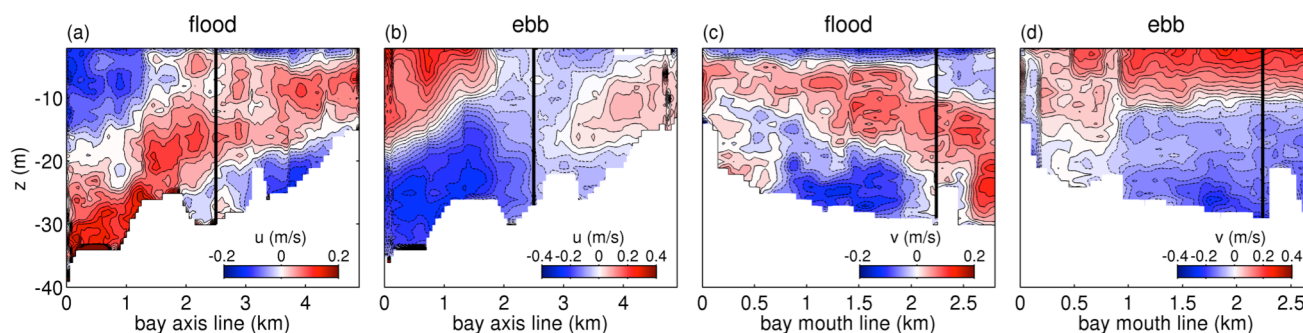


図-4.2 湾軸方向流速の鉛直分布. 湾軸ラインにおける (a) 上げ潮, (b) 下げ潮時の湾内向き流速, 湾口ラインにおける (c) 上げ潮, (d) 下げ潮時の断面通過流速. いずれも正值（実線）が湾内への流入を表す. 黒太線は両ラインが交差する位置を示す.

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-4.3），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-4.1）に沿って流出入する内部潮汐波が湾口沖側での混合と成層弱化に寄与していることが分かる．

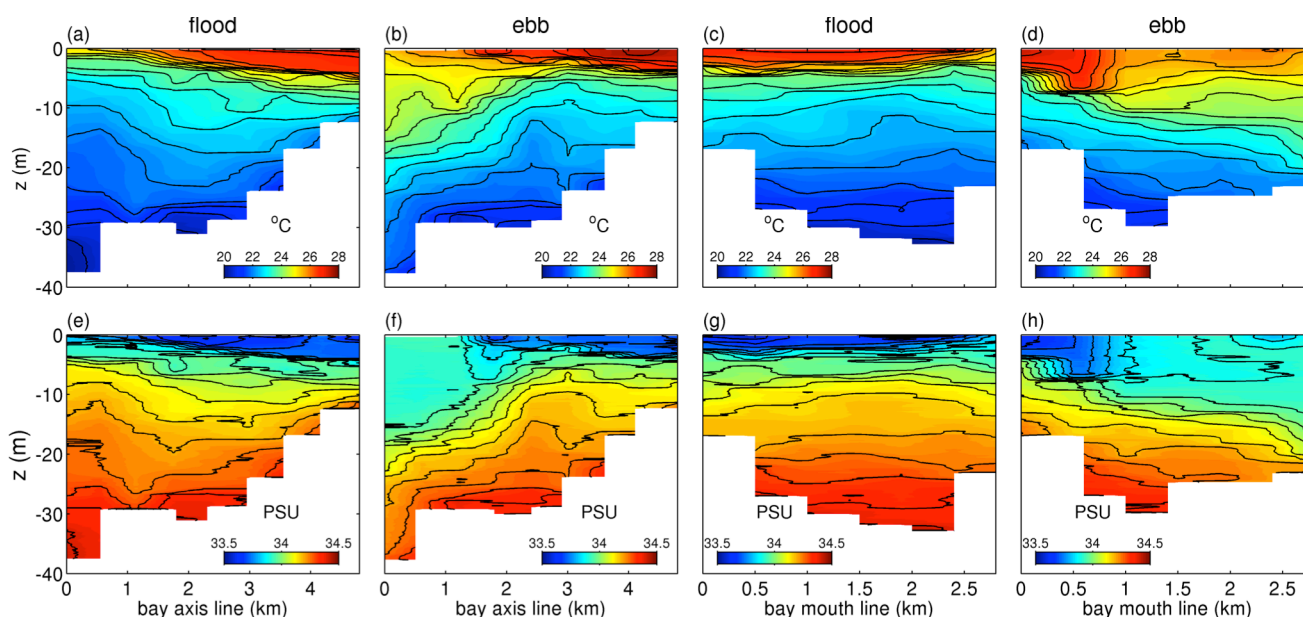


図-4.3 CTDによる上げ潮，下げ潮時の湾軸 (a, b, e, f) および湾口ライン (c, d, g, h) での水温（上段）と塩分（下段）分布。

4.3 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-4.4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。

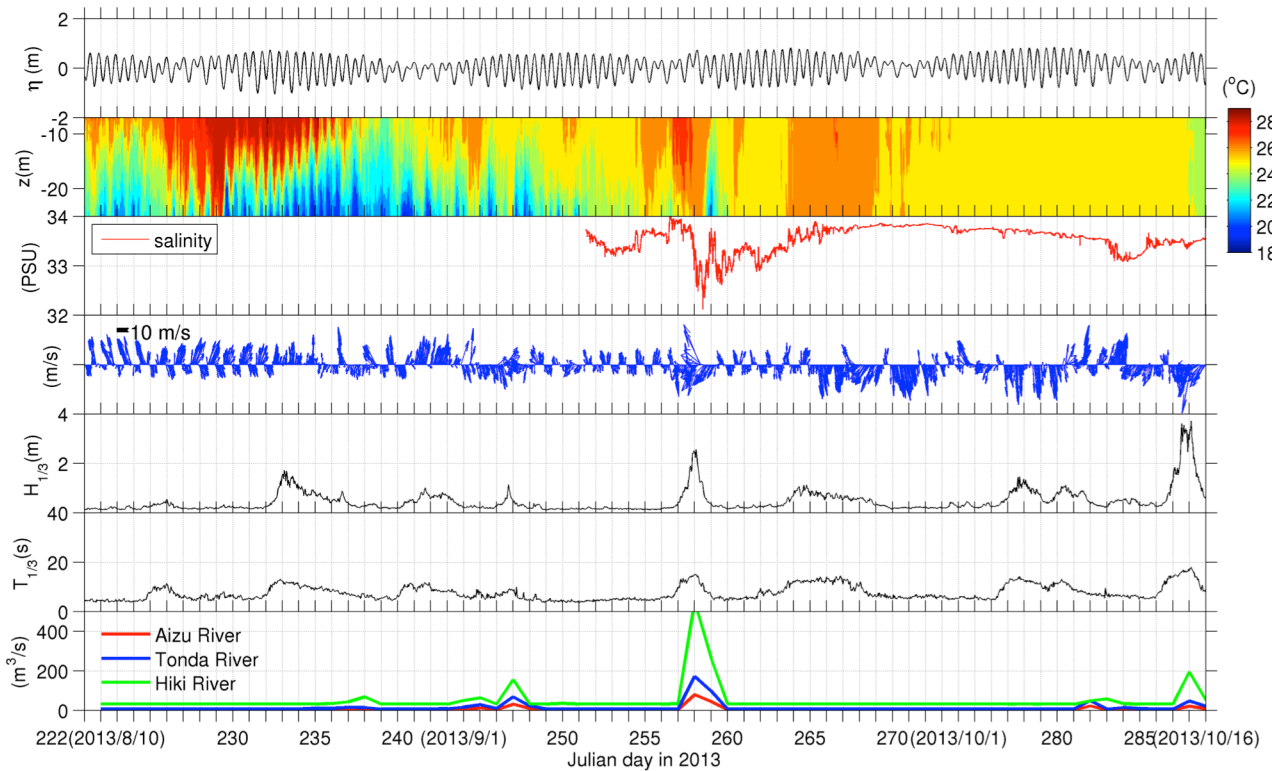


図-4.4 田辺湾口部に位置する田辺中島高潮観測塔における 2013 年夏・秋期に実施された連続観測結果の一例. 上から, 潮位, 水温鉛直分布, 水深 10 m における塩分, 海面上 10 m の風速ベクトル, 有義波高, 有義波周期, 2 級河川流量推定値 (日平均値).

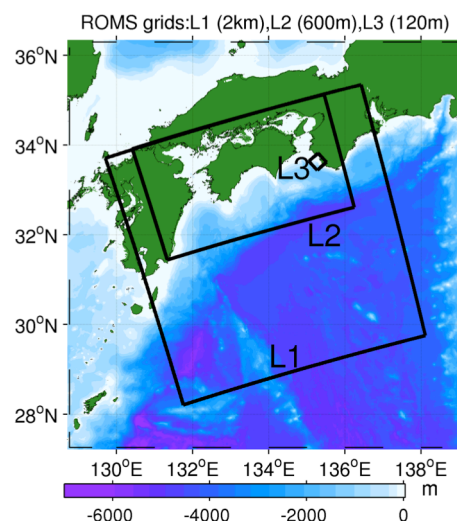


図-4.5 ROMS による 3 段ネスト領域と水深分布 (カラー). 黒枠は外側から, ROMS-L1 (水平解像度 2 km), L2 (同 600 m : 瀬戸内海全域モデル), L3 領域 (同 120 m : 田辺湾モデル) の境界を示している.

4.4 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

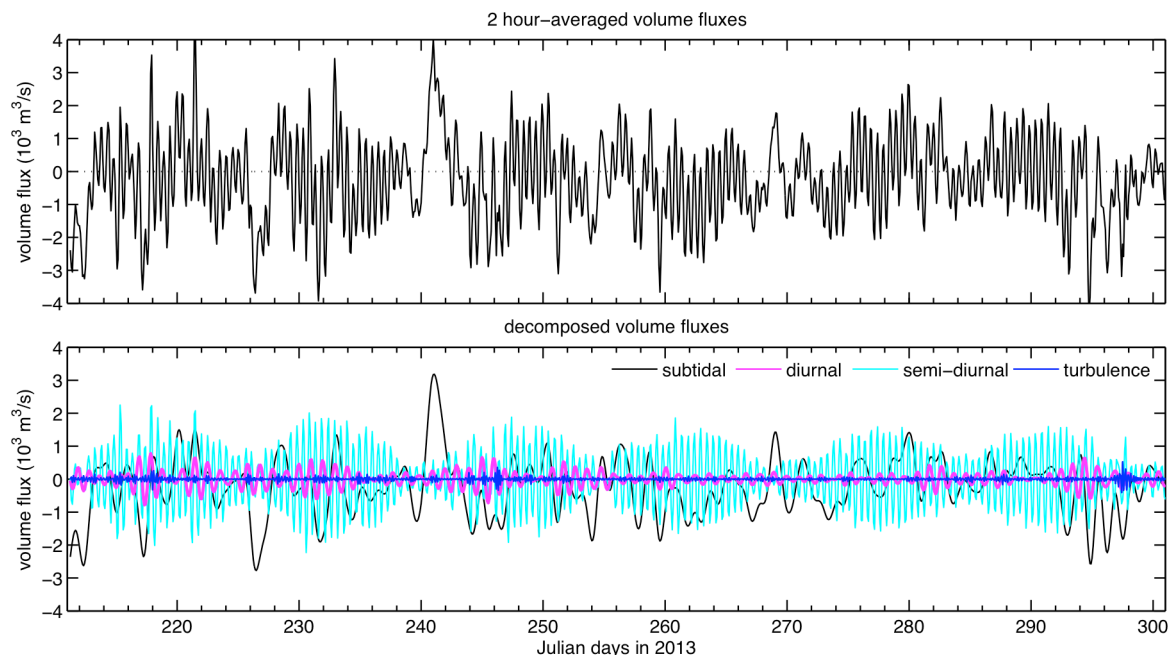


図-4.6 田辺湾口ライン（図-1 黒実線）を通過する体積フラックスの時系列. (上) 2 時間平均値, (下) 周波数分解された体積フラックス. 下段では, 周期 28 時間以上の subtidal 成分 (黒), 18~28 時間の日周成分 (マゼンタ), 8~18 時間の半日周成分 (シアン), 8 時間未満の乱流成分 (青) に分解した.

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-4.5) 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-4.4) 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.

4.5 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-4.1 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-4.6). 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,

表-4.1 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 (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

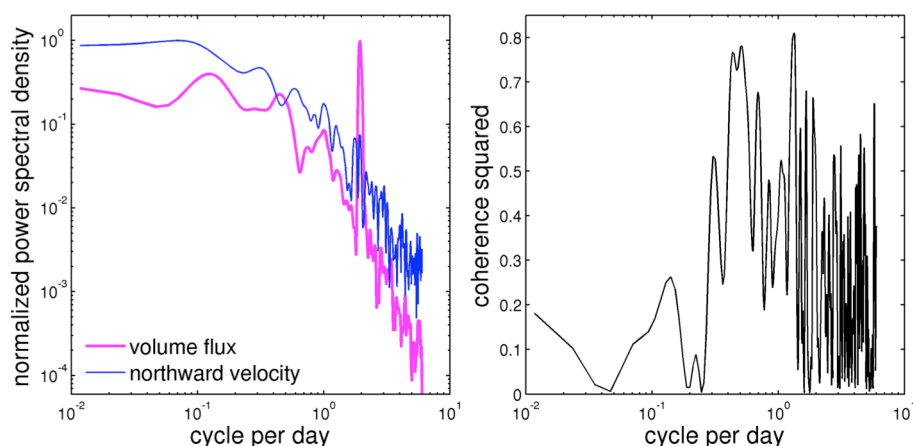


図-4.7 (左) 湾口通過体積フラックス (マゼンタ) と田辺湾沖合における北向き表層流速 (青) の無次元パワースペクトル, (右) 両者のコヒーレンス.

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-4.6 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-4.1). 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-4.7), 半日周期に強いピーク, 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

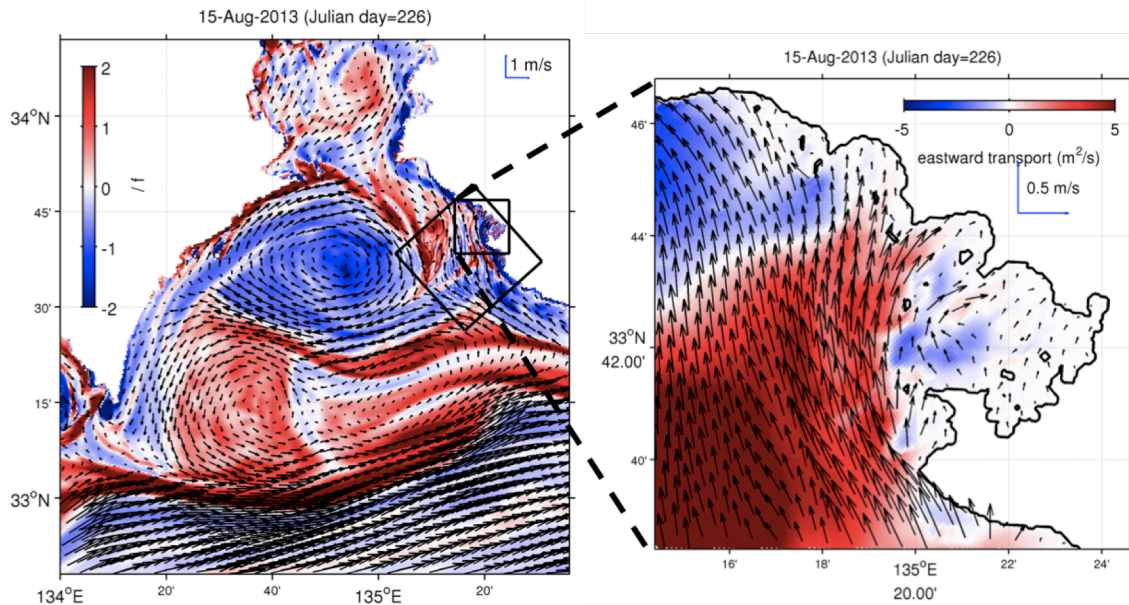


図-4.8 流出イベント時 (2013/8/15) における (左) 田辺湾を含む周辺海域の海洋表層無次元相対渦度 (カラー), (右) 田辺湾口周辺における東向き体積輸送量 (カラー). ベクトルはいずれも表層流速である. 右図は左図中の L3 領域を含む正方形ボックス内の拡大図である.

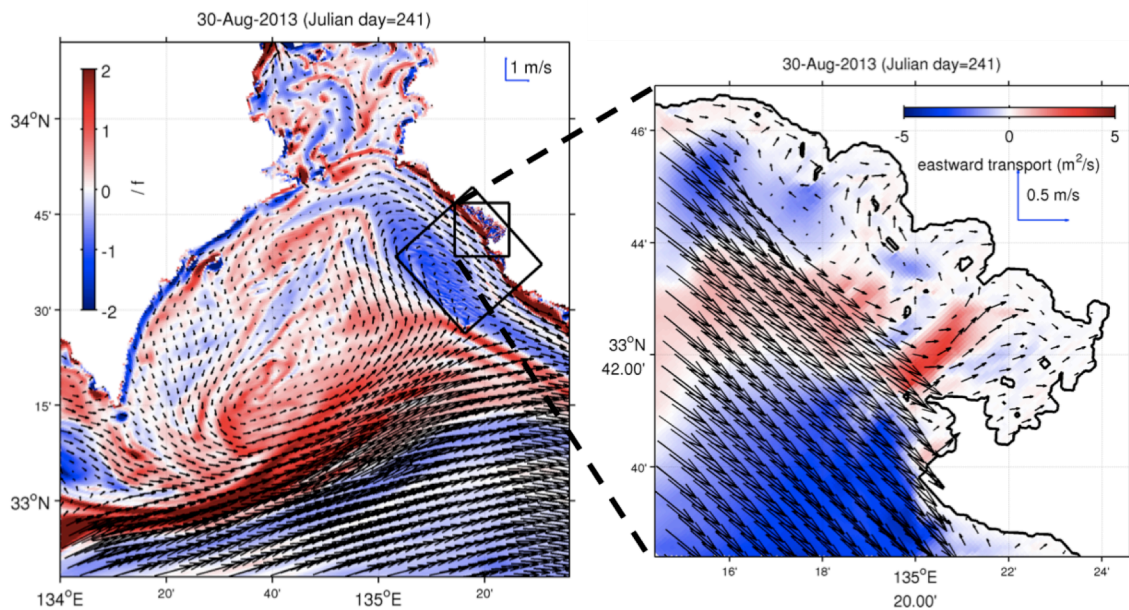


図-4.9 図-4.8 と同じ. ただし, 流入イベント時 (2013/8/30) のスナップショット.

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-4.8) および最も強い流入が生じた 8/29 (図-4.9) 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-4.8 左), 田辺湾湾口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-4.8 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周り(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.

4.6 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.

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-, 和歌山農林水技セ研報, 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.

5. 台風通過時の広域海洋熱収支変化

5.1 はじめに

台風は数 100km の直径を持つ反時計回りの大気の渦であるため、台風通過に伴う暴風時の海洋構造変化を究明する上では、鉛直混合による局所的な構造変化だけでなく、メソスケールの海洋応答や、海洋熱収支の広域的変動に関しても検討が必要である。海洋での熱収支は大きく分けて、(1) 海面を通じての大気との熱交換、2) 移流による熱輸送の 2 つに分けられ、例えば強風に伴う海面冷却や、黒潮系移流の作用を受けた熱輸送などを無視することはできない。このような強風時における広域での海洋構造を明らかにすることは、高潮、高波、沿岸防災や、海洋生態環境変化に関する予測精度を向上させる上で重要となる。

本研究では、瀬戸内海周辺海域を研究対象海域（図-5.1）として、台風通過時における広域海洋構造変化について定量的に評価することを試みる。瀬戸内海は東西 2 つの狭窄な水道で結ばれた長い水路とみなすことができるが、その内部構造は決して単調ではなく、多数の海峡・湾・灘によって構成され、約 3,000 の島嶼群を有し、しかもそれら海岸線の複雑性なども相まって、極めて特徴的な海岸海底地形条件下にある。また、瀬戸内海は豊後水道と紀伊水道を介して太平洋と接続されており、外洋からの黒潮の流入が内部の流動構造に多大な影響を与えていることがよく知られている。

2012 年 9 月中旬から 10 月初旬にかけて 3 つの台風（16 号、17 号、18 号）が、2013 年 9 月には、2 つの台風（17 号、18 号）が西日本に接近あるいは上陸し（図-5.1）、瀬戸内海及び紀伊水道沿岸域において顕著な水温低下などの海洋構造変化をもたらした。2012 年における 3 個の台風通過時に対する SST（海面水温）モデル出力に対して EOF 解析を適用した結果、海面気温の低下に伴う季節成層の発達による長期的な SST 線形トレンド（SST 低下）がモード 1 に出現し、台風を含む短期的なイベントはモード 2 以降で表現された（詳細については内山ら、2013 を参照。以下、前報と呼称）。事前調査の結果、2013 年の台風通過時の SST に対する EOF 各モードの応答は、2012 年夏季～秋季の場合と概ね同様の傾向であることを確認している。

そこで本研究では、気象庁 GPV-MSM 再解析データを海表面境界条件に用いた 2 段ネストによるダウンスケーリング海洋モデルを構築し、2012、2013 年の夏期を主な対象期間とした瀬戸内海周辺海域における高解像度数値実験を行う。観測データとの比較を通じてモデルの再現性を確認するとともに、台風通過に伴う SST 低下時の広域海洋構造変化を定量的に把握することを目的とする。本稿では、前報の海洋モデルをベースとして、バルク式に沿った精緻な計算により海面熱収支を解いた瀬戸内海全域モデルを新たに開発した。このモデル出力を用いて台風通過に伴う SST 低下時の広域海洋熱収支変化に関する解析と考察を行ったので、その結果について報告する。

5.2 モデル

本研究では、3 次元変分データ同化を組み込んだ日本近海の時況再解析・予報システム

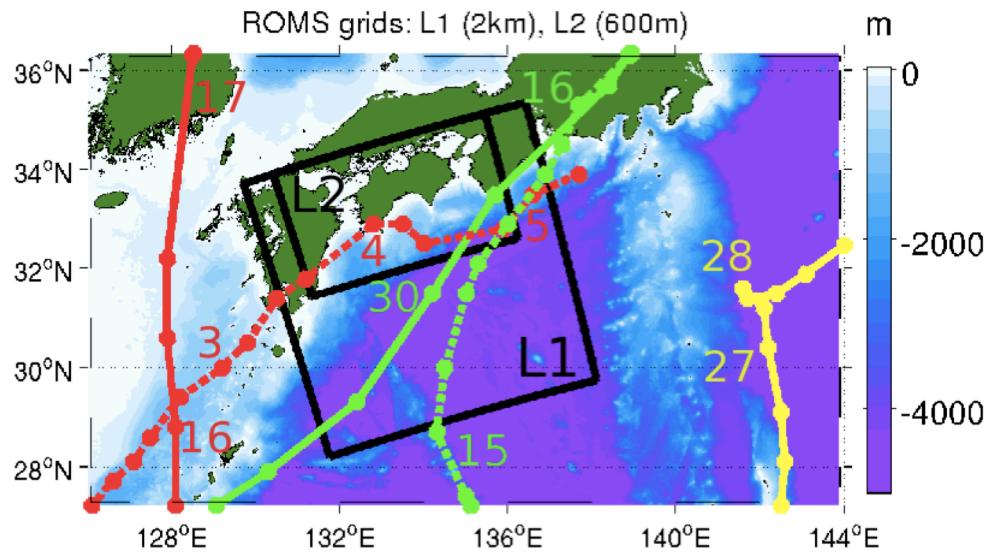


図-5.1 2段階のネスティング (L1 : 水平解像度 2 km, L2 : 600 m,) による ROMS 計算領域 (黒枠) と水深分布 (カラー). 2012 年 (実線) 9 月に発生した台風 16 号 (赤), 17 号 (緑), 18 号 (黄), 2013 年 (点線) 9 月に発生した台風 17 号 (赤), 18 号 (緑) のベストトラック (数字は日付).

JCOPE2 (Miyazawa ら, 2009 ; 水平解像度 $1/12^\circ$) を最沖側境界条件として与え, 領域海洋循環モデル ROMS をベースとした 2 段階のネスティングにより, 黒潮等の外洋影響を考慮しつつ, 水平空間解像度を 2 km (ROMS-L1) $\rightarrow$ 600 m (L2) へ順次細密化させた瀬戸内海ダウンスケーリング海洋モデルを構築した (図-5.1). なお, ROMS-L1, L2 モデルは前報の瀬戸内海全域モデルをベースとしており, これに新たにバルク法による海面熱収支計算を適用し (前報では月平均気候値を使用), 計算期間を延長したものである.

本研究では ROMS-L2 モデルの結果を用いるが, L2 領域は東西 480 km $\times$ 南北 288 km (格子数は 800 $\times$ 480 $\times$ 鉛直 32 層) の大きさを有し, 四国沖の黒潮流路から瀬戸内海全域を水平解像度 600 m で表現している. 海上風応力については気象庁 GPV-MSM の 1 時間値, 海面熱フラックスには COAMPS (Hodur, 1997) に準拠したバルク式により評価する. バルク法への入力データとしては, 風応力, 海上気温・比湿などについて原則として MSM 再解析値を与えるが, 下向き短波放射量については気象庁による全天日射量観測値を用いた. SST は AVHRR-Pathfinder データの月平均気候値に弱く緩和させ, ドリフトを抑制した. 領域内に流入する一級河川 (L1 : 29 本, L2 : 27 本) を考慮し, 流量は雨量・流量年表データベース (河川協会) から求めた 10 年間の月平均値を与えた. L2 境界において TPXO7.1 による天文潮汐も考慮した. L1, L2 地形には JODC-JEGG500 データを SRTM30 データで補完したものを使用した. 鉛直乱流モデルには海表面・海底面の両境界層に対する KPP モデルを用いた. L1 モデルは 2007 年, L2 モデルは 2008 年から計算を開始し, それぞれ十分なスピンアップ期間を設定している. 本研究の主な解析対象期間は, 台風の接近時を含む 2012, 2013 年の夏期～秋期である.

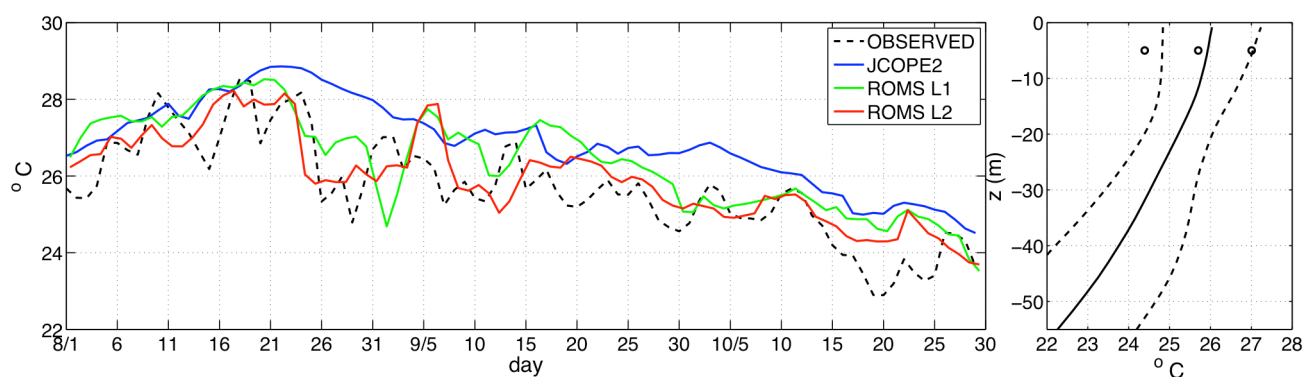


図-5.2 紀伊半島先端（和歌山県串本）における 2013/8/1~10/29 の（左）水深 5m 水温の時系列（実線：計算値，破線：観測値），（右）平均水温（実線）と平均水温±標準偏差（破線）の鉛直分布（線：L2，○：観測値）。

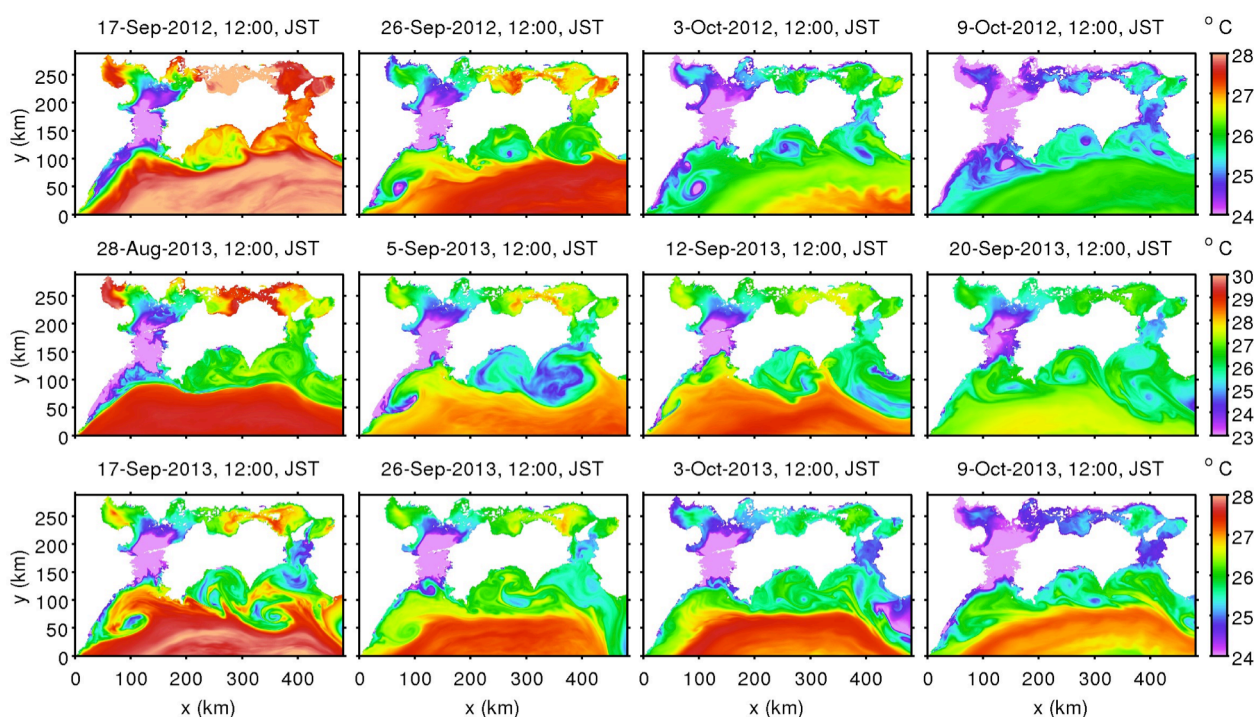


図-5.3 ROMS-L2 による海表面水温 SST の瞬間像（左上から，2012/9/17，9/26，10/3，10/9，左中央から 2013/8/28，9/5，9/12，9/20，左下から 2013/9/17，9/26，10/3，10/9 における正午）。

5.3. 計算結果

（1）ダウンスケーリングモデルの再現性

瀬戸内海モデル（JCOPE → L1 → L2）の出力特性については，前報および内山ら（2012）によって評価されており，各種観測データに対して良好な再現性が確認されている。ここではその一例として，和歌山県串本における水温の観測値（水産総合研究センター）と，本研究で新たに開発した L2 モデルによる計算値の比較を図-5.2 に示す。L1~L2 モデルは9月以降の長期的な水温低下傾向を概ね再現できていることが分かる（図-5.2 左）。また，解析期間全体を通して，同化や緩和を行わない forward モデルである ROMS 出力は，人工衛星デー

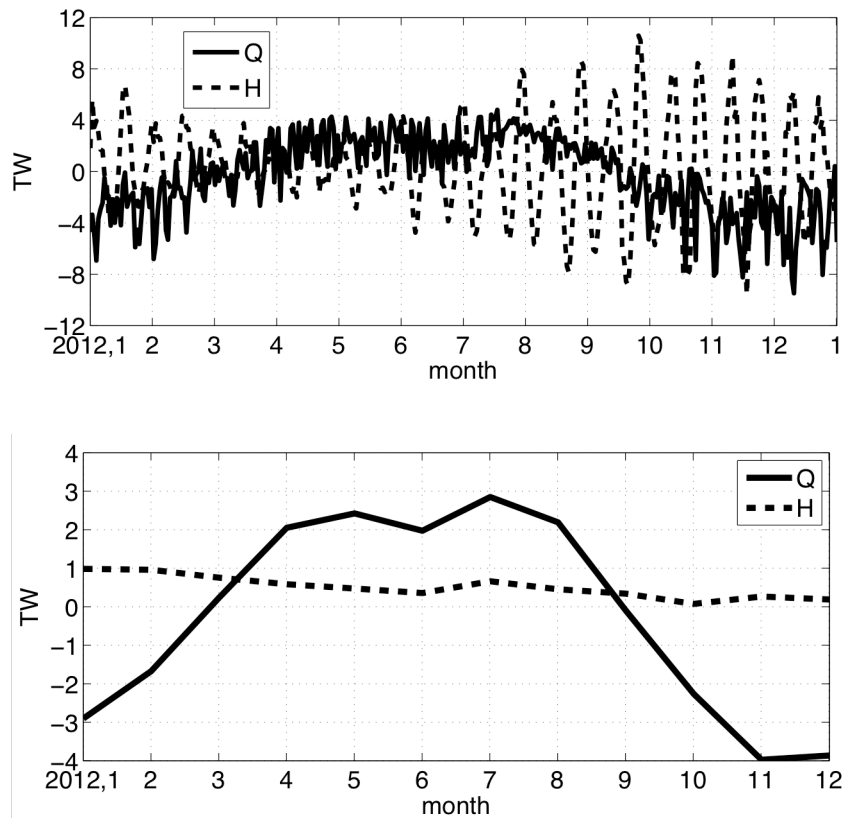


図-5.4 2012 年の瀬戸内海領域における正味の海面熱フラックス Q と移流による熱輸送量 H の日平均値 (上) と月平均値 (下)。

タや ARGO データに同化された JCOPE2 と同程度以上の再現性を有することが見て取れる。さらに、同期間内の水温の平均値、標準偏差 (図-5.2 右) に関しても、観測値と概ね一致していることが確認される。

(2) 瀬戸内海における水温低下

2012 年 9 月に日本近海を通過した 3 個の台風と、2013 年 9 月に日本近海を通過した 2 個の台風の経路 (ベストトラック) は図-5.1 の通りである。図には示さないが、瀬戸内海領域における海上風速のピークは、2012 年は 9/16, 25, 30 に、2013 年は 9/4, 15 に出現している。2012 年に台風 16 号が九州西岸を通過した 9/16 以降に、黒潮流路含む瀬戸内海全域で長期的な SST 低下が発生し、2013 年は 8 月末から SST が低下し、9/5 に台風 17 号通過に伴って一時的ではあるが急激な SST 低下イベントが発生していることが確認できる (図-5.3 上, 中央)。このような長期的な SST 低下は、夏から秋にかけての気温低下に伴う季節成層の発達の影響を最も強く受けており、台風の影響としては、南北風によるエクマン輸送に伴う沿岸湧昇と、土佐湾および紀伊水道で発達するメソスケール渦による湧昇に伴って SST 低下現象が形成されたものである (前報)。2013 年において、2012 年の台風接近時と同期間の SST を見てみると、九州東岸および黒潮流路上での SST 低下が 2012 年と比べると緩やかであり、さらに、2012 年に見られる土佐湾からの冷水渦の東向き輸送と、紀伊半島沿岸域における冷水渦の停滞現象はそれほど顕著ではない (図-5.3 下)。これは、2013 年の 9 月中旬から 10 月初旬にかけては、2012 年のような強風イベントが生じなかったことと、8~10 月に

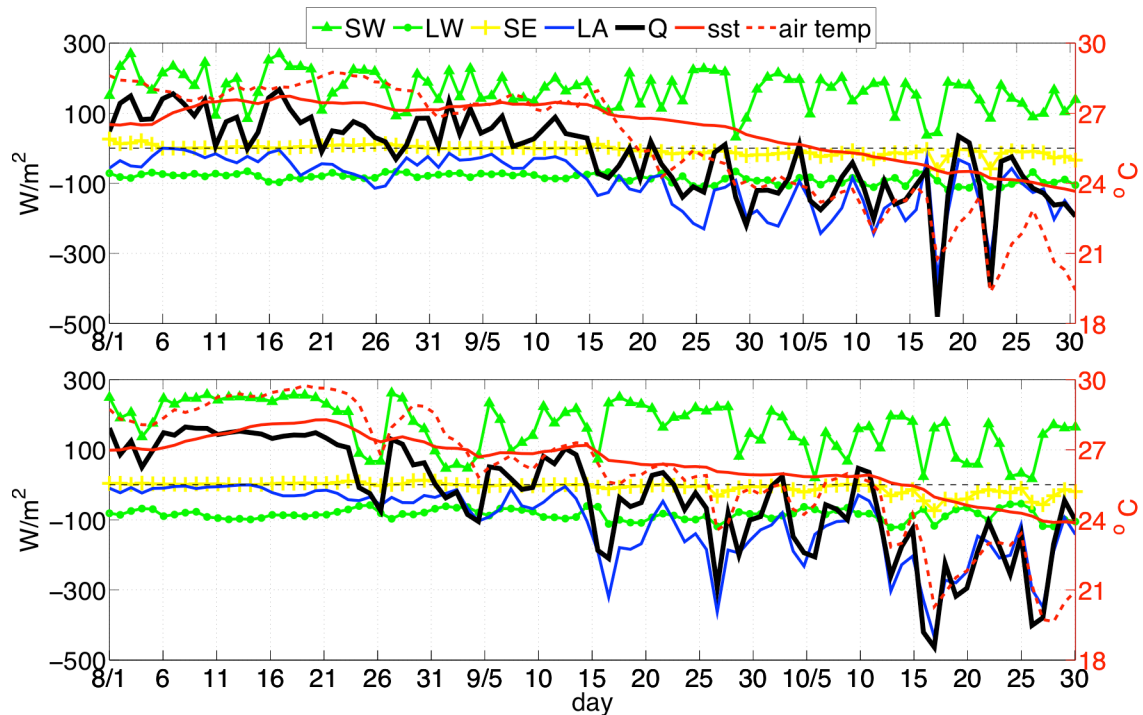


図-5.5 2012 年（上）と 2013 年（下）夏期の ROMS-L2 領域における各種海面熱フラックス（短波放射 SW，長波放射量 LW，顕熱フラックス SE，潜熱フラックス LA，海面での正味の熱フラックス Q），SST，気温の空間平均値（日平均）。（黒色破線：0）

かけて黒潮流路の離岸状態が継続した（気象庁報告）ことが原因だと考えられる。すなわち，2012 年は黒潮が接岸傾向であったため，紀伊水道から外洋への流出が抑制され，冷水渦が紀伊半島沿岸域に停滞しやすい構造が形成されたものと解釈される。

5.4 海洋熱収支

前章で記述した夏から秋にかけての季節変化と，台風通過に伴う SST 低下時の海洋熱収支変化に関する検討を行う。海洋熱収支は，以下のような正味の海面熱フラックス Q および水平移流による熱輸送量 H から構成される。

$$Q = SW + LW + SE + LA$$

SW：短波放射量，LW：長波放射量（下向き放射から上向き放射を差し引いたもの），SE：顕熱フラックス，LA：潜熱フラックスであり，下向きを正と定義する。移流熱輸送量は，

$$H = \int \int \rho C_p T v dx dz$$

と定義される。ここに， ρ ：海水密度， C_p ：海水の比熱， T ：水温， v ：断面に直交する流速， x ：格子転換の水平距離， z ：層厚である。

まず，正味の海面熱フラックス Q と熱輸送量 H の関係を定量的に把握するために，2012 年の瀬戸内海領域（豊後水道と紀伊水道で囲まれた北側の海域）における時系列を示す。なお， Q は瀬戸内海領域における各グリッドの総和をとったもの， H は，豊後水道からの流入熱輸送量（北向き正）から紀伊水道からの流出熱輸送量（南向き正）を差し引いたものと定

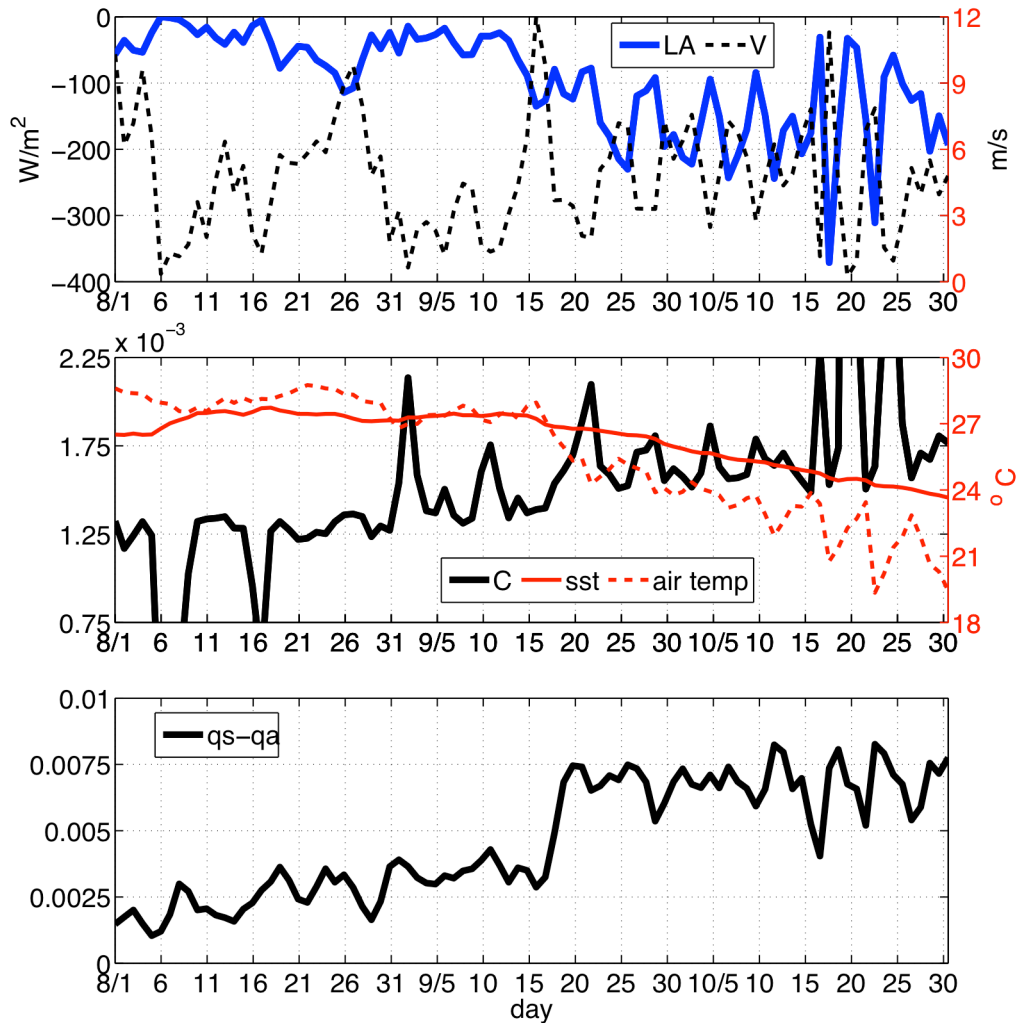


図-5.6 2012 年（上）と 2013 年（下）夏期の ROMS-L2 領域における各種海面熱フラックス（短波放射 SW，長波放射量 LW，顕熱フラックス SE，潜熱フラックス LA，海面での正味の熱フラックス Q），SST，気温の空間平均値（日平均）。

義した。月平均値で見ると、移流による熱輸送量 H の季節変動は小さく、正味の海面熱フラックス Q の季節変動が相対的に大きいことが分かる（図-5.4 下）。一方、日平均値では、 H の値も大きく短期的な水温変動には有意な影響を及ぼしていることが推察できる（図-5.4 上）。しかしながら、台風通過時において H は概ね規則的な変化（潮汐変動が卓越）をしており、有意な長周期変動傾向が見られなかったため、本稿では SST 低下時における海面熱フラックス変化についての検討結果を示す。

L2 領域における 2012, 2013 年夏期の海面熱収支変化を図-5.5 に示す。長波放射量 LW，顕熱フラックス SE には長期変化傾向はほぼ見られないが、短波放射量 SW は夏から秋にかけて緩やかに減少し、潜熱フラックス LA は 9 月中旬以降に負方向に増大（すなわち蒸発の強化）しており、短波放射と潜熱フラックスが正味の海面熱フラックス Q に対して支配的な影響を及ぼしていることが分かる。2012 年 9 月中旬から Q が負に転換し、海面から熱が奪われるため、SST 低下を強力に促進する海洋構造が形成されていたことが明らかになった（前報の EOF モード 1 に対応）。2013 年は、8 月下旬から 9 月上旬の西日本を中心とした継続的な大雨による短波放射量の減少に伴って、 Q が 8 月末から 9 月初旬にかけて短期的に負

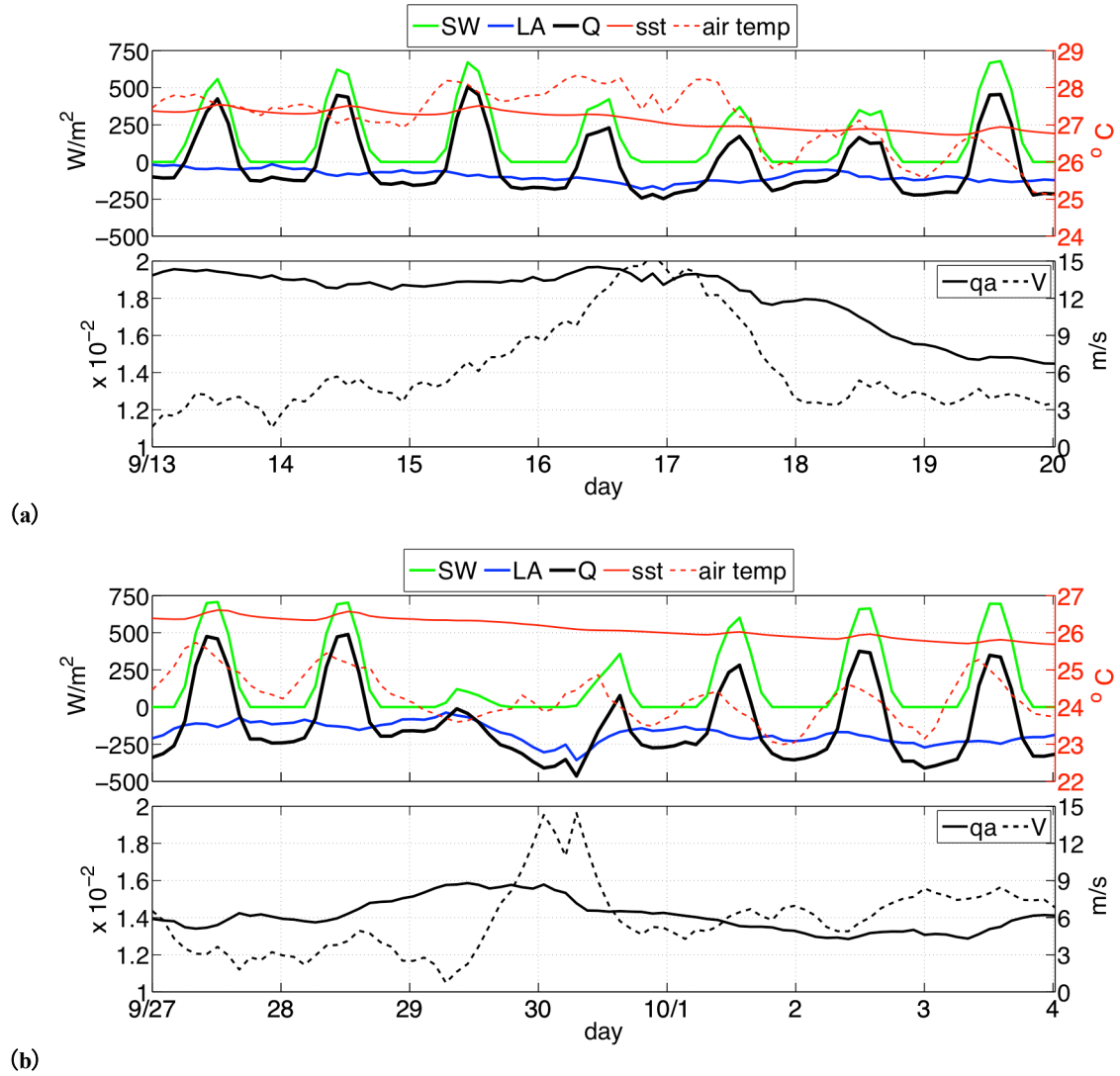


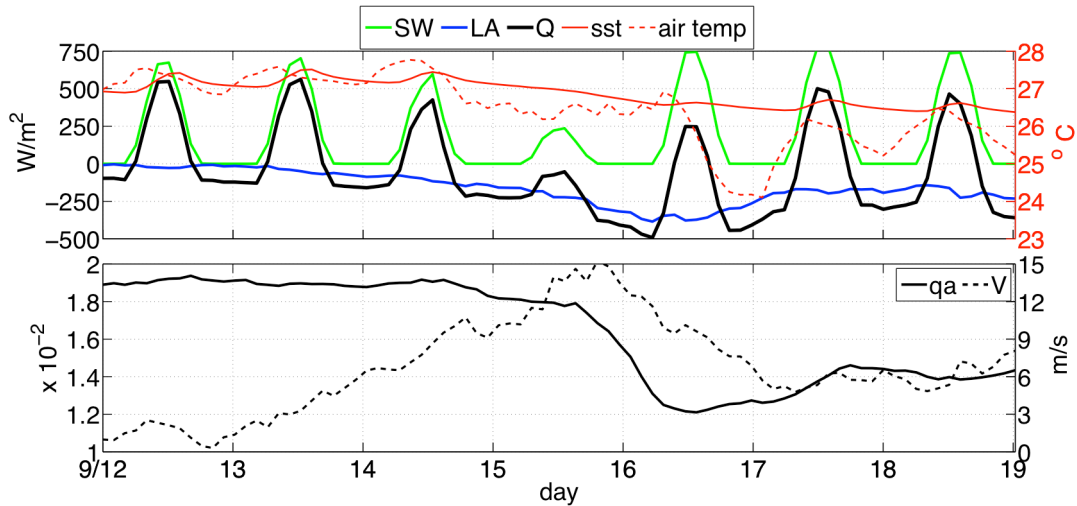
図-5.7 ROMS-L2における各種海面熱フラックス（短波放射SW，潜熱フラックスLA，海面での正味の熱フラックスQ），SST，気温，大気比湿，風速の空間平均値（2時間平均）．（a）：2012年台風16号通過時，（b）：2012年台風17号通過時．

値を取っているが，顕著な海面冷却は2012年の場合と同様に9月中旬以降に生じている．

次に，熱収支構造の季節的な消長に大きな影響を及ぼす潜熱フラックスの変動要因を検討する．本研究では潜熱フラックスは次式で定義されている．以下ではLAを構成する各要素の寄与について検討を行う．

$$LA = \rho L C V (q_s - q_a)$$

ここに， ρ ：大気密度， L ：蒸発の潜熱， C ：バルク係数， V ：絶対風速， q_s ：海面比湿， q_a ：大気比湿である．まず，絶対風速 V との関係を見ると，9月中旬以降では強風時に潜熱フラックスが顕著に強化されているが，それ以前では，強風時であっても潜熱強化が限定的であることが確認できる（図-5.6 上）．ここで，バルク係数 C の変化について見てみると，9月中旬から増加しており，潜熱変化は C の影響を受けていることが分かる（図-5.6 中央）． C は海上接地境界層の安定度によって定義されており，SSTと気温との差に比例し，絶対風速



(c)

図-5.7 続き. (c) : 2013 年台風 18 号通過時.

V の 2 乗に反比例する. 安定度は, $SST \leq$ 気温のとき安定状態, $SST >$ 気温のとき不安定状態と定義され, それぞれの場合に算出される C は, 安定時に小さく, 不安定時に相対的に大きな値となる (詳細については近藤, 1994 を参照). また, 海面比湿 q_s と大気比湿 q_a の差を見てみると, 9 月中旬以降に q_a が顕著に減少することで, $q_s - q_a$ が増大し, 潜熱強化を助長していることが分かる (図-5.6 下). ここでの q_a の減少は, 気温低下に伴う大気の水蒸気圧低下 (飽和混合比の減少) によるものである. なお, 蒸発の潜熱 L (SST に依存) に関しては, 潜熱強化に有意な影響を及ぼさなかった. すなわち, 1) 気温が SST を下回った海上接地境界層の不安定状態と, 2) 気温低下に伴う大気の比湿減少の 2 つの機構が重畳している状況下において, 強風が吹くと潜熱フラックスが強化される, という構造になっているものと理解される.

続いて, 台風最接近時における海面熱収支について検討する. 2012 年台風 17 号通過時の熱収支を見ると, 日射量低下に伴う短波放射 SW 減少と, 強風による潜熱 LA 強化が相まって, Q は -500 W/m^2 程度まで減少し, 顕著な海面冷却が生じていることが分かる. 一方, 2012 年台風 16 号接近時は (図-5.7 (a)), 気温が SST を上回っているため海面接地境界層は安定成層を形成しており, バルク係数 C の増大が限定的となるため潜熱強化は抑制され, 風速のピーク時においても Q はたかだか -150 W/m^2 程度にしか発達しないことが分かる. また, 図には示さないが, 2013 年台風 17 号は勢力が弱く最接近時の風速も小さかったため, 台風通過時の海面冷却はそれほど顕著にはならなかった. 一方で, 2013 年台風 18 号通過時は, 2012 年台風 17 号の場合と同様に最接近時に顕著な海面冷却が生じているが, 2012 年 17 号のケースとは違って, 台風通過直後にも潜熱が強化されている (図-5.7 (c)). これは, 乾燥した大気の流入に伴い急激な大気の比湿減少が発生し, 蒸発が促進されたことにより, 台風通過直後にも潜熱 LA が強化されたものである. 台風通過後半日～1 日程度で Q は元の状態に戻るため, 台風最接近時における領域平均された SST に顕著な変動は確認できなかったものの, 海面での熱収支が一時的に大きく改変され, しかもそれぞれの台風で異なる熱収支構造が形成されていることが示された.

5.5 おわりに

バルク式を組み込んだ高解像度海洋モデルと気象庁 GPV-MSM により、瀬戸内海周辺海域における台風通過に伴う SST 低下時の海洋熱収支変化に関する解析を行った。1 ヶ月程度の時間スケールでは、水平移流による熱輸送量の寄与は大きくなく、正味の海面熱フラックスの季節変動の影響が卓越していた。熱収支解析から、2012、2013 年ともに 9 月中旬以降に、気温低下に伴う海上接地境界層の不安定成層化と大気の水蒸気減少によって正味の海面熱フラックスが負となり、広域的な SST 低下で特徴付けられる海洋構造が形成されることが示された。この季節的な水温低下現象は、内山ら(2013)で行った SST に対する EOF 解析モード 1 に対応するものである。台風接近時の正味の海面熱フラックス変化は、強風と台風通過後の水蒸気減少に伴う潜熱フラックス強化、日射量低下に伴う短波放射量減少によって特徴付けられた。正味の海面熱フラックスは、台風通過後約半日～1 日程度で元の状態に戻るため、領域平均された SST には有意な変化はなかったが、海面での熱収支が顕著に改変されることが明らかになった。

参考文献

- 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), Vol. 69, No. 2, pp. I_481-I_485.
- 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), Vol. 68, No. 2, pp. I_441-I_445.
- 近藤純正 (1994) : 水環境の気象学-地上面の水収支・熱収支-, 朝倉書店, pp.98-184.
- Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou and K. Komatsu (2009): Water Mass Variability in the Western North Pacific Detected in 15-Year Eddy Resolving Ocean Reanalysis, *J. Oceanogr.*, Vol. 65, pp. 737 -756.
- Richard M. Hodur (1997): The Naval Research Laboratory's Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS), *Mon. Wea. Rev.*, Vol.125, pp. 1414- 1430.

6. 研究成果の公表

審査付き論文（審査付き国際会議 proceedings を含む）

- 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），Vol.69, No.2, I_481-I_485.
- Baba, Y., Kubo, T., Uchiyama, Y., Kihara, N., Mori, N., Muto, Y. and Suzuki, T. (2013): Field observations at an offshore observation tower during the typhoon seasons, *Proc. 35th IAHR World Congress*, Chengdu, China (on CD-ROM).
- Uchiyama, Y., Kanki, R. and Nakayama, A. (2014): Coastal dispersal of urban treated wastewater in semi-enclosed estuaries, *Proc. 24th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Busan, Korea, 4p (on CD-ROM).
- 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（2014）：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.（投稿中）
- 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）

その他の論文

- 馬場康之・久保輝広・内山雄介・森 信人（2013）：田辺中島高潮観測塔における 2012 年夏季観測結果，京都大学防災研究所年報，第 56 号 B, 441-447.
- 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（2014）：田辺中島高潮観測塔における 2013 年夏季観測結果，京都大学防災研究所年報，第 57 号.（投稿中）

学会等発表

- Uchiyama, Y. (2013): Wave-current interaction in inner shelf circulation: a high resolution regional ocean modeling with a vortex-force formalism, *International Workshop on Ocean Waves and Related Processes*, JAMSTEC, Yokohama, Japan, Jul. 2013.（招待講演）
- 西井達也・内山雄介・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機構，2013 年度日本海洋学会秋季大会・講演要旨集，2013 年 9 月（口頭発表）
- Nishii, T., Uchiyama, Y., Mori, N. and Baba, Y. (2014): Cooling the upper ocean around Seto Inland Sea due to typhoons, *Ocean Sciences Meeting 2014*, Honolulu, HI, USA, Feb. 2014.（ポスター発表）

- Uchiyama, Y. and Nishii, T. (2014): Heat budget analysis on cooling events associated with typhoon passages in Seto Inland Sea, Japan, *Japan Geosciences Union Meeting 2014*, Yokohama, Japan. (口頭発表)
- Uchiyama, Y. and Nishii, T. (2014): Cold water formation in response to typhoon passages in and around Seto Inland Sea, Japan, *AOGS 11th Annual Meeting (AOGS 2014)*, Sapporo, Japan, Jul. 2014. (口頭発表予定)
- 松川大佑・内山雄介 (2014) : 外洋影響を考慮した紀伊半島田辺湾周辺海域の海洋構造に関する研究, 土木学会関西支部年次学術講演会・講演概要集, 2014 年 6 月. (口頭発表)

7. 参考資料

以下の論文を順次添付する.

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), Vol.69, No.2, I_481-I_485.

Baba, Y., Kubo, T., Uchiyama, Y., Kihara, N., Mori, N., Muto, Y. and Suzuki, T. (2013): Field observations at an offshore observation tower during the typhoon seasons, *Proc. 35th IAHR World Congress*, Chengdu, China (on CD-ROM).

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 (2014): 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. (投稿中)

以上.