

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

Cold-water Formation and Oceanic Response Associated with Typhoon Passages off Kii Peninsula

内山雄介¹・西井達也²・森 信人³・馬場康之⁴

Yusuke UCHIYAMA, Tatsuya NISHII, Nobuhito MORI and Yasuyuki BABA

Oceanic response to a series of typhoon passages is investigated with a triply-nested oceanic downscaling model forced by the assimilative GPV-MSM reanalysis dataset for the coastal marginal sea off Kii Peninsula, Japan. Temperature is decreased about 2 degrees for 2 weeks during three typhoons passing by. An EOF analysis decomposes the modeled SST properly into 1) a seasonal signal as a linear trend attributed to enhanced vertical mixing and mixed layer deepening due to the seasonal surface cooling in the 1st mode, 2) coastal upwelling at several locations through the Ekman transport due to the stormy surface wind field in the 2nd and 4th modes, and 3) SSH changes caused by the meso- and submeso-scale, cyclonic cold eddies near the topography and subsequent eastward transport by the Kuroshio in the 3rd mode.

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100km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-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905hPa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：965hPa，最大風速：35m/s，暴風域半径：約200km），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）。

そこで本研究では、気象庁GPV-MSM再解析データを海面境界条件に用いた3段階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

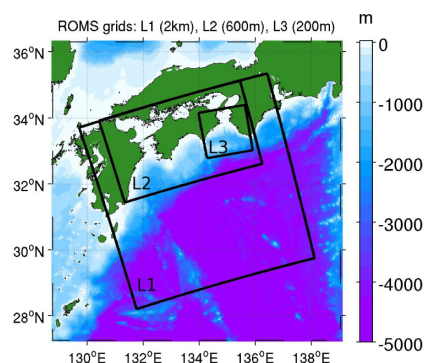


図-1 3段階のネスティング（L1：水平解像度2km，L2：600m，L3：200m）によるROMS計算領域（黒枠）と水深分布（カラー）

- | | | |
|--------|------|------------------------|
| 1 正会員 | 博(工) | 神戸大学准教授 大学院工学研究科市民工学専攻 |
| 2 学生会員 | 学(工) | 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 |
| 3 正会員 | 博(工) | 京都大学准教授 防災研究所 |
| 4 正会員 | 博(工) | 京都大学准教授 防災研究所 |

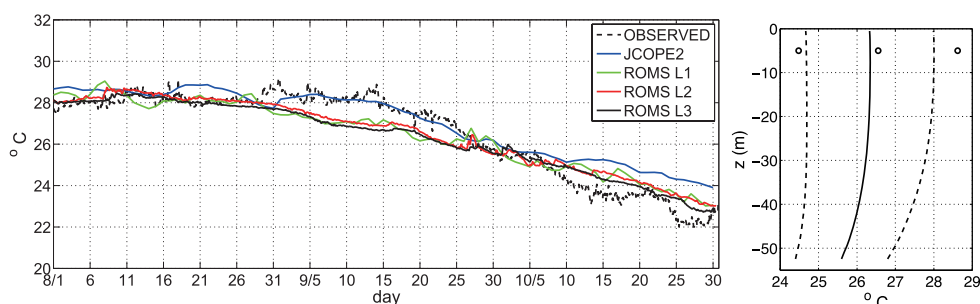


図-2 紀伊半島先端 (和歌山県串本) における2012/8/1～10/31の(左)水深5m水温の時系列(実線:計算値, 破線:観測値), (右)平均水温(実線)と平均水温±標準偏差(破線)の鉛直分布(線:L3, ○:観測値)

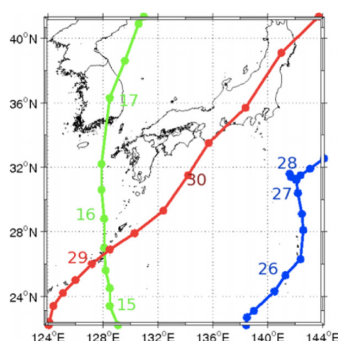


図-3 気象庁による2012年9月に発生した台風16号(緑)17号(赤), 18号(青)のベストトラック(数字は日付)

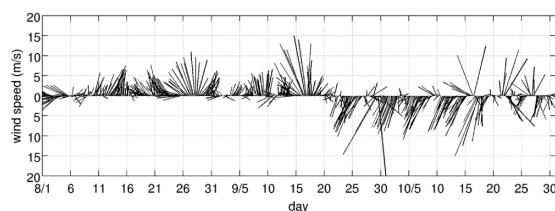


図-4 気象庁GPV-MSMによる室戸沖の風速ベクトル

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。

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海況再解析・予報システム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2km (ROMS-L1)→600m (L2)→200m (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-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480km×南北288km(格子数は $800 \times 480 \times$ 鉛直32層)、L3は東西153.6km×南北153.6km(768×

768×鉛直40層)である。L2, L3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境界の順圧成分境界条件にTPX07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ニングア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。

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

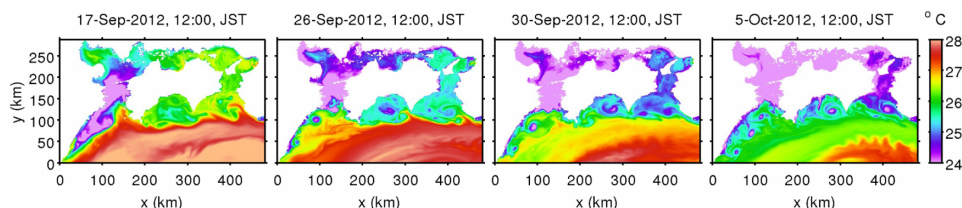


図-5 ROMS-L2による海表面温度SSTの瞬間像（左から、2012/9/17/12:00, 9/26/12:00, 9/30/12:00, 10/5/12:00JST）

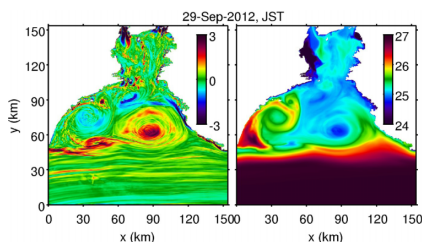


図-6 ROMS-L3による紀伊半島沿岸域における（左）表層無次元相対渦度、（右）SSTの日平均値（2012/9/29）

水温低下傾向を概ね再現できていることが分かる（図-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-2右）も概ね一致していることが確認される。

(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20°C減少するという特徴的な低温化現象が生じている（図-2）。この期間の海上風を見ると（図-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-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20km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-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。

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°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2012/9/10～10/9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。

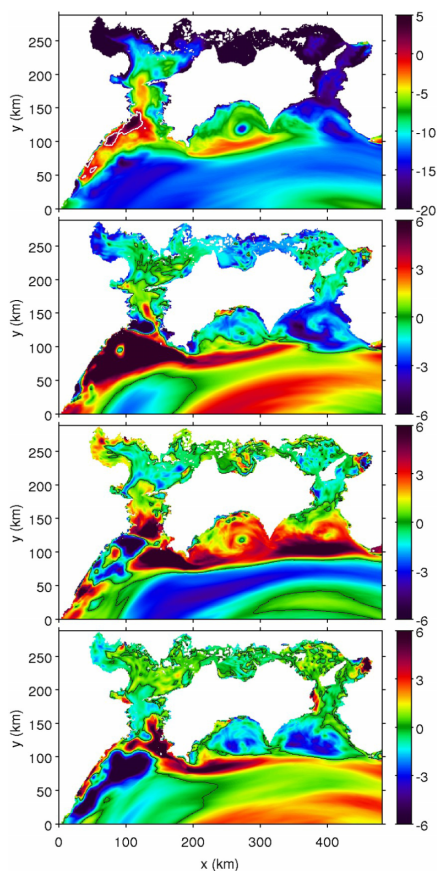


図-7 L2モデルSSTに対するEOFによる固有関数 e_n の空間分布 (上からモード1～4. 等高線は0を表している)

表-1 トレンドを含んだ場合 (図-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%

主要4モードの固有関数 e_n の空間分布を図-7に、その寄与率を表-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-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-9上)。一方、 $-c_1$ は室戸沖におけるSSTの線形回帰直線 (図-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海洋構造変化に対応している (図-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

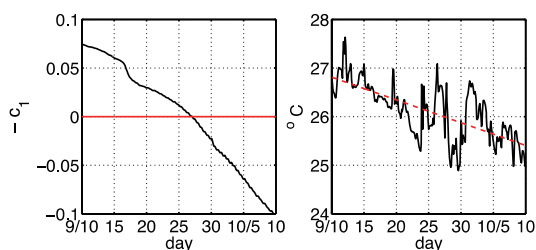


図-8 (左) モード1時間関数 $-c_1$ と (右) 室戸沖におけるL2モデルによるSST (実線. 赤破線は線形回帰直線)

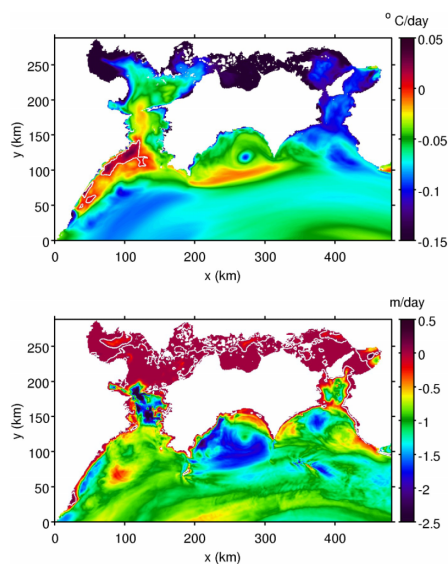


図-9 ROMS-L2領域における2012/9/10～10/9の (上) SSTおよび (下) KPPモデルによる混合層深さの線形トレンド (等高線は0を表している)

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-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-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-7, 図-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

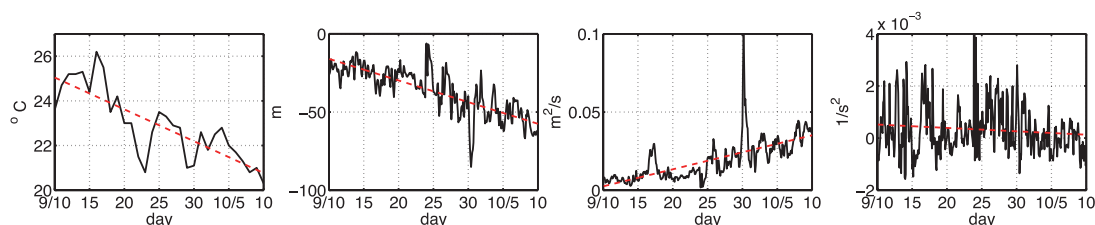


図-10 左から、9月10日～10月9日の室戸沖における気温 T_a の観測値（気象庁）、L2モデルによる混合層深さ h_m 、鉛直拡散係数 K_v 、浮力振動数 N^2 。実線：生データ、赤破線：線形回帰直線。 K_v および N^2 は混合層内平均値

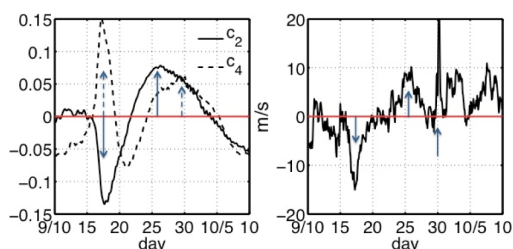


図-11 (左) モード2, 4の時間関数と(右)室戸沖における南北風速(北風が正)

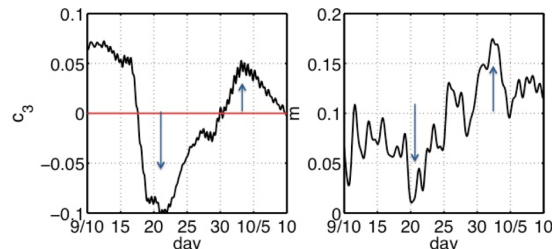


図-12 (左) モード3の時間関数と(右)室戸沖におけるL2モデルによるSSH (36時間以下の成分を除去)

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-7)および時間関数(図-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-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-7、図-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。

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(寄与率81.0%)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。

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

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, 35th IAHR World Congress, Chengdu, China. (投稿中)
- 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.