

黒潮と内部波が影響する 伊豆諸島周辺海域における流動場の解明

増永 英治¹・鈴江 洋太²・内山 雄介³・山崎 秀勝⁴

¹正会員 茨城大学助教 広域水圏科学教育研究センター (〒316-8511茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail:eiji.masunaga.office@vc.ibaraki.ac.jp

²正会員 株式会社建設技術研究所 中部支社 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦 1-5-13)

E-mail:yta-suzue@ctie.co.jp

³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 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

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

⁴非会員 東京海洋大学教授 大学院海洋科学技術研究科(〒108-8477東京都港区港南4-5-7)

E-mail:hide@kaiyodai.ac.jp

潮汐と内部潮汐が伊豆諸島周辺海域に及ぼす影響を評価するために、潮汐の外力を組み込んだ領域海洋モデルROMSを用いた解析を実施した。内部波のエネルギーフラックスを推定した結果、伊豆諸島周辺では非常に強い内部波が発生していることがわかった。内部波のエネルギーフラックスは潮汐によってバックグラウンドの値の10倍以上に増幅され、対象海域の内部波は潮汐によって支配されていることがわかった。また、潮汐により運動エネルギー全体量は増大するが、順圧的な運動エネルギーはむしろ減少し、傾圧(内部波)成分の運動エネルギーは増大していた。したがって、対象海域では黒潮や風に比べ潮汐によって発生した傾圧的な流れを伴う内部波が流動場に対して卓越して影響していること、内部潮汐が伊豆諸島周辺海域の海水運動に強く寄与していることがわかった。

Key Words : *internal tides, nonlinear internal waves, baroclinic motion, Izu-Ogasawara Ridge,*

1. はじめに

沿岸海域において、潮汐波は傾圧的な内部潮汐を励起させ密度場の擾乱を伴う非常に強い流れを発生させる。内部潮汐によって発生する等水温面の振幅は100 mを超える場合があり(Sheaら¹)、潮汐順圧流による流れの強さの十倍を超える傾圧流を発生させる(Masunagaら²)。強い内部潮汐は一般的に分散関係式で示される内部波のビーム角と海底斜角が一致する海域や地形の起伏によって発生する(Cacchioneら³, Alfordら⁴)。大陸棚で励起された内部波は、浅海域もしくは深海域へ伝搬し最終的に散逸する。

大陸棚において発生した内部潮汐は、浅海域の伝搬に伴い非線形性を強めることがわかっている(Masunagaら², Venayagamoorthyら⁵)。非線形性を強めた内部潮汐は、海底斜面上において非常に強い流れと乱流混合を発生させることが近年の研究により明らかとなった(Masunagaら⁶)。非線形性を強めた内部波は、強い物質輸送を伴い、沿岸海域と外洋間の物質輸送を強化していると考えられている(Van Weeringら⁷)。また内部潮汐によって発生した物質及び熱輸送は海洋生態系や地球規模の熱循環に密接に関わっていると考えられている(Walshら⁸)。しかしながら、日本近海における内部波及び内部潮汐の発生機構やその

動態は未解明な点が多く、詳細なメカニズムは明らかとなっていない。

日本本州南岸の海洋環境は、潮汐流に加えて強流と暖水を伴う黒潮に強い影響を受けている。黒潮により発生する強い流れは、流速2 m/sを超えることもあり、日本周辺海域の海水運動に大きな影響を与えている。黒潮により発生した流れや渦が浅海域に現れると強い混合を伴う流れが発生することが知られ、Hasegawaら⁹)は黒潮が伊豆諸島を通過時に強い鉛直混合を発生させ物質輸送を強化していることを明らかにした。

このような背景の中、本研究では潮汐と黒潮が影響する伊豆諸島周辺海域における流動場を3次元海洋モデルJCOPE2-ROMSを用い、対象海域における内部波の動態を調査した。沿岸海域における詳細な流動場を調査するためにJCOPE2-ROMSシステム(内山ら¹⁰)を3段階ダウンスケールングすることで、対象海域の水平解像度を300 mまで向上させた。内部潮汐が強化されると考えられる夏季(2013年7月から8月)に着目し、潮汐による効果を検証するために、潮汐を外力として与えたモデルと潮汐を外力として与えない2ケースを比較し、潮汐と内部波によって発生する内部波エネルギーフラックス及び運動エネルギーの解析を行った。また、潮汐によって強化される渦運動エネルギーについても報告する。

2. 海洋モデル

本研究ではJCOPE2再解析値を境界条件とした3段階ネスティングを採用し、伊豆諸島周辺海域を水平解像度300 mで解像するダウンスケーリング領域海洋モデルROMSを用いた(図-1)。2段ネスティングL2領域(水平解像度1 km)までの領域において2011年12月から2013年6月までを潮汐エネルギーを与えない助走期間として設定し、2013年7月からL2領域の海境界から潮汐を海面高度の外力として与え、同時に高解像度L3領域へダウンスケーリングを行った。潮汐外力にはTPXO7.2潮位モデル値を用いたが、北西太平洋での再現性が低いため、ニュートン法を用いて伊豆大島岡田港の潮位観測データにフィッティングするように補正を加えた。海面風応力と海面放射・熱フラックスについては、気象庁GPV-MSM再解析値とCOADS月平均気候値を外力としてそれぞれ用いた。数値計算データの解析には、潮汐を外力として与えた後、20日間を潮汐助走期間として設定し、2013年7月21日から2013年8月14日までの計算データを解析に用いた。過去の研究により、本モデルは日本周辺海域における物理現象及び解析に対する十分な精度が担保されていることが示されている(例えば内山ら¹¹⁾)。

潮汐を外力として海洋モデルに与える場合、潮位変動の再現性がモデル精度に大きな影響を与える。そこで伊豆大島岡田港における主要4分潮(S_2 , M_2 , K_1 , O_1)の振幅

表-1 伊豆大島岡田港における潮位の比較。表内の差はモデルから観測値を差し引いた値を示す。

	振幅差	遅角差	R_E
S_2	1.8 mm	1.27°	8.2%
M_2	-17.1 mm	1.70°	1.6%
K_1	-29.8 mm	1.96°	8.9%
O_1	-7.9 mm	-5.13°	7.0%

と遅角の比較をした(表-1)。また下記式(1)と(2)から観測値と比較した潮位の変動の相対RMSエラー値(R_E)を求めた(Carterら¹²⁾)。

$$R_E = \frac{E}{A_O} \quad (1)$$

$$E = \sqrt{\frac{1}{2}(A_O^2 + A_M^2) - A_O A_M \cos(G_O - G_M)} \quad (2)$$

A は振幅、 G は遅角、 O と M はそれぞれ観測値とモデルの値であることを示す。 R_E は8.9%以下を示し、主要4分潮

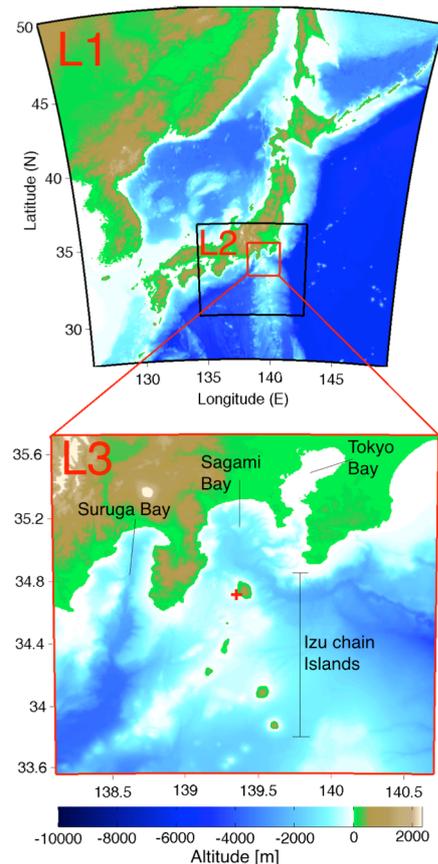


図-1 3段ネスト海洋モデルROMSの計算領域

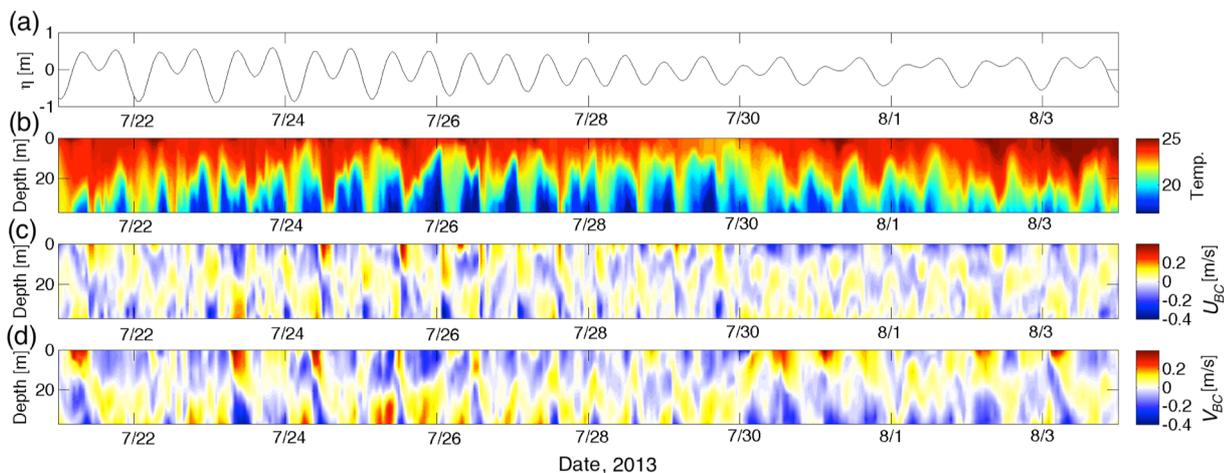


図-2 伊豆大島西側(図-1 L3領域中の赤十字点)における(a)潮位、(b)水温、(c)東西と(d)南北方向の傾圧成分(U_{BC} 及び V_{BC})の流速の鉛直時系列図(2013年7月21日～8月3日)。

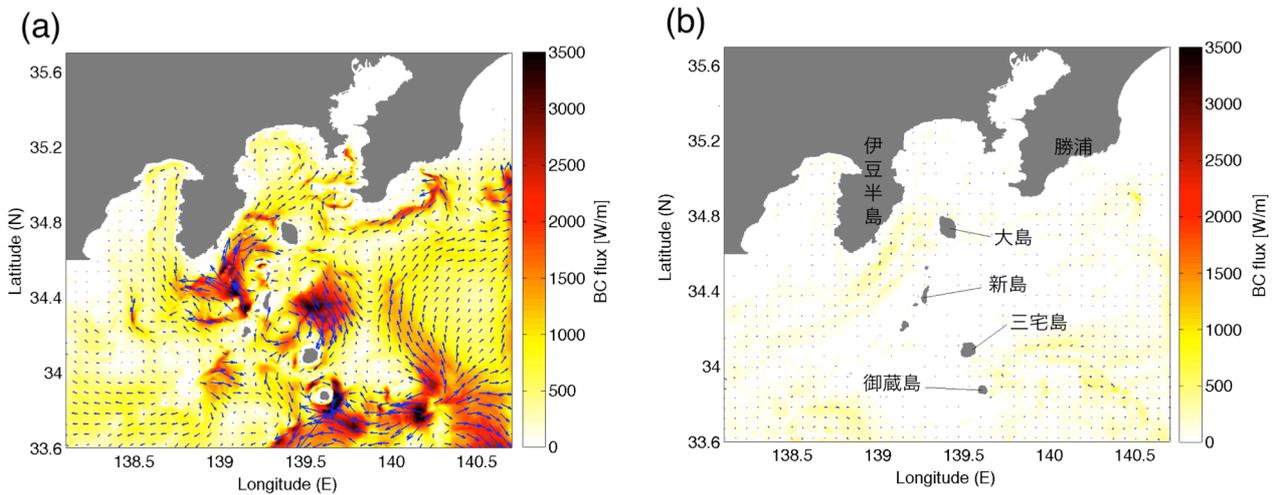


図-3 (a) 潮汐を外力として与えたモデル結果から推定した内部波エネルギーフラックスと(b) 潮汐を外力として与えていないモデル結果から推定した内部波エネルギーフラックス

の平均値は6.4 %であった。よって領域モデル内における潮位変動は数%の誤差内において良好に再現できると言える。

3. 内部潮汐

伊豆大島西側水深40 m 地点の潮位、水温、傾圧流速成分を図-2に示す。図-2(c, i)に示している傾圧流速は、流速から鉛直平均した流速を差し引いた流速であり、内部潮汐による傾圧的な運動成分を示している。水温20°C以下の冷水が低層から遡上し浅海域に断続的に現れ、冷水の遡上と同時に流速 0.4 m s^{-1} を超える強い傾圧流が発生していた。このような強い冷水の遡上は、潮汐を外力として与えていないモデルでは確認されなかった。そのため、図-2に見られるような大きな等水温面の変動を伴う冷水の伝搬は、潮汐により励起された内部潮汐によって引き起こされたと考えられる。内部潮汐に伴う水温の変動は複雑な構造を示し、線形的な潮位変動から大きく離れ、周期も一致していない。このような沿岸海域で複雑な構造を伴う内部波は、非線形性内部波もしくは internal bores と呼ばれ頻繁に海洋において観測される (Masunagaら²⁾。

領域内における内部波の伝搬動態を定量的に調査するために、鉛直積分した内部波エネルギーフラックス(F_E)を下記式より求めた (Kangら¹³⁾。

$$F_E = \int_z \mathbf{u}'_{BC} p' dz \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{u}'_{BC} は対象周期の傾圧流速、 p' は対象周期の圧力変動である。半日 (S_2, M_2) から日周期 (K_1, O_1) の内部波に着目するために、3日間より短い周期の成分をハイパスフィルターによって求め、内部波のエネルギーフラックスとした。潮汐を外力として与えたケースのエネルギーフラックスとフラックス発散の大潮小潮周期 (7

月21日から14日間) の時間平均値を図-3(a)に示す。伊豆諸島周辺海域では、 3 kW/m を超える強いエネルギーフラックスが確認された。特に強い内部波エネルギーの発生・増幅は新島の西及び東側の海域と御蔵島の南東海域で見られた。新島西側で発生した内部波は伊豆半島及び大島に伝搬し、新島東側で発生した内部波は三宅島方向へ伝搬していた。御蔵島南東海域で発生した内部波は複雑な伝搬構造をしているが、概ね御蔵島南東から御蔵島方向へ伝搬していた。これらの強い内部波は、順圧的な潮汐波が浅い伊豆海嶺を伝搬するとき地形の効果を受け傾圧的な運動を伴う内部潮汐にエネルギーが変換されるためであると考えられる。伊豆諸島周辺以外の東京湾口や房総半島勝浦沖においても強い内部波の発生が確認できるが、フラックスの強さは伊豆諸島周辺に比べて弱い。

潮汐を外力として与えないケース(図-3(b))では、内部波エネルギーフラックスは計算領域全体で 0.5 kW/m 以下の値を示し、潮汐を考慮した計算の場合に比べ10倍程度低い値を示した。潮汐以外の内部波を励起させる要因として、風によって発生する内部波や地球自転による近慣性周期内部波が考えられる (例えばIgetaら¹⁴⁾。対象海域における慣性周期は20時間程度であるため、図-3に示した内部波フラックスには近慣性周期の内部波が含まれる。しかしながら、潮汐以外の外力によって発生する内部波の強さは内部潮汐に比べて非常に弱く、伊豆諸島周辺では潮汐が内部波場を支配していることがわかった。

4 運動エネルギー

海水の運動エネルギーは以下のように順圧成分(KE_{BT})と傾圧成分(KE_{BC})に分けることが可能である(Kangら¹³⁾。

$$KE_{BT} = \frac{1}{2} \rho (U^2 + V^2) \quad (4)$$

$$KE_{BC} = \frac{1}{2} \rho (u_{BC}^2 + v_{BC}^2 + w^2) \quad (5)$$

ここで ρ は密度、 U, V は順圧成分流速、 u_{BC}, v_{BC} は傾圧成分の流速、 w は鉛直流速である。内部波エネルギーフラックス同様に鉛直積分（全水深）及び14日間で時間平均した全運動エネルギー密度、順圧成分の運動エネルギー密度、傾圧成分の運動エネルギー密度及び、潮汐の有無による運動エネルギーの比を図-4に常用対数スケールで表す。運動エネルギーの比は潮汐ありのケースでの値を潮汐なしの場合の値で除した値とした。潮汐を外力として与えたケースでは、新島の南北の海域において運動エネルギー密度 $1 \times 10^2 \text{ J m}^{-3}$ を超える非常に強い海水運動が発生し、潮汐を考慮しないモデルに比べて10倍以上のエネルギーであった。潮汐により運動エネルギーが大きく増大している海域では、黒潮による流れや風による効果に比べ潮汐が流動場に卓越して影響していると言える。特に新島の北西側の海域では、運動エネルギーが潮汐により20倍以上増加している海域が存在していた。

潮汐により運動エネルギーが強化されている領域のうち、伊豆諸島の岸に近い海域では順圧成分の運動エネルギーの増大が大きい（図-4(h)）。これは順圧的な潮汐波が浅い伊豆海嶺を通過する時に生じる強い海水運動に起因すると考えられる。一方、岸近くでは傾圧的な運動エネルギーは順圧成分ほど潮汐により増加していないが、岸から離れたより広い海域において運動エネルギーが増大しており、順圧成分の傾向と一致しない（図-4(h, i)）。傾圧的な運動エネルギーは主に内部波によって増幅されるため、潮汐によって沖合で励起された内部

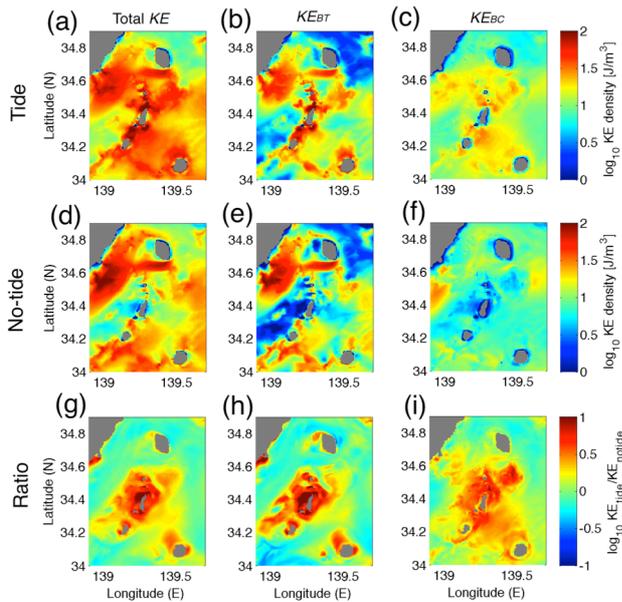


図-4 伊豆諸島周辺の運動エネルギー密度。(a, b, c) 潮汐を外力として与えたケース、(d, e, f) 潮汐を外力として与えていないケース、(g, h, i) 潮汐の有無による運動エネルギーの比。(a, d, g) 全成分、(d, e, f) 順圧成分、(g, h, i) 傾圧成分

波や岸近くで励起された内部波が伝搬することで広い海域の海水運動に影響を及ぼしていると考えられる。

潮汐による運動エネルギーの変化をより詳細に調査するために、伊豆諸島周辺海域（図-4内に示す海域）における100 m 海底水深毎の運動エネルギーの空間積分値、積分値の潮汐の有無による比、海底水深に対する累積運動エネルギー（いずれも時間平均値）を求めた（図-5）。水深毎の全運動エネルギーは、水深500 m程度までは潮汐により増加しているが、それ以下の水深では潮汐による変化はほとんど見られなかった。また全水深帯で積分した全運動エネルギーの潮汐の有無による違いは非常に小さい（図-5(e)）。よって潮汐が外力として加わることにより、岸に近い浅い海域では運動エネルギーが増

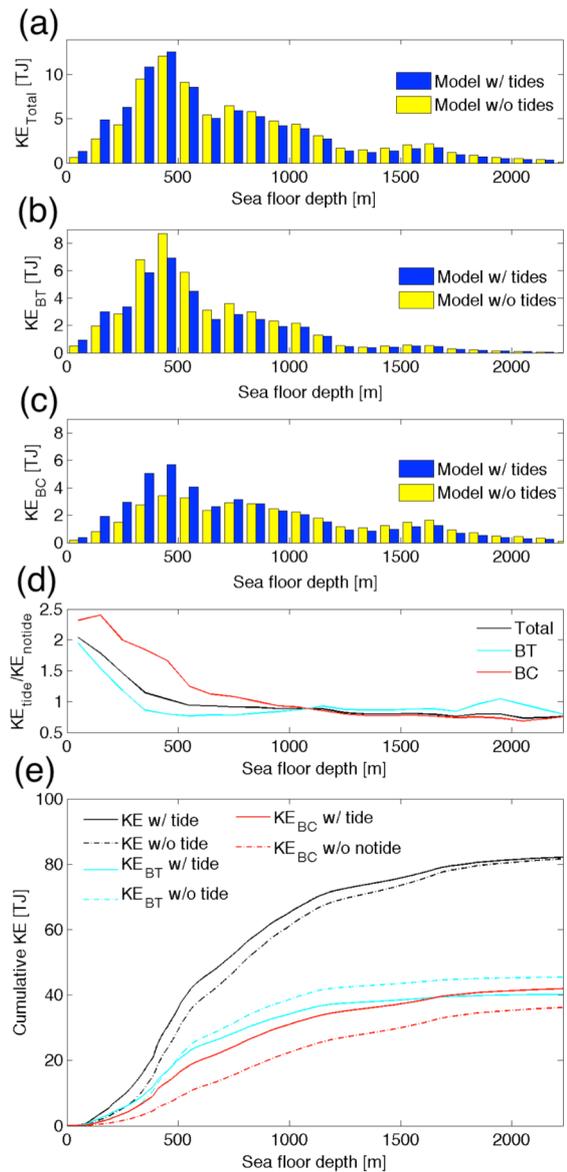


図-5 伊豆諸島周辺海域において100 m海底水深毎に積分した (a) 全運動エネルギー、(b) 順圧成分の運動エネルギー、(c) 傾圧成分の運動エネルギーと (d) 潮汐の有無による運動エネルギーの比。(e) は海底水深に対し累積した運動エネルギーを示す

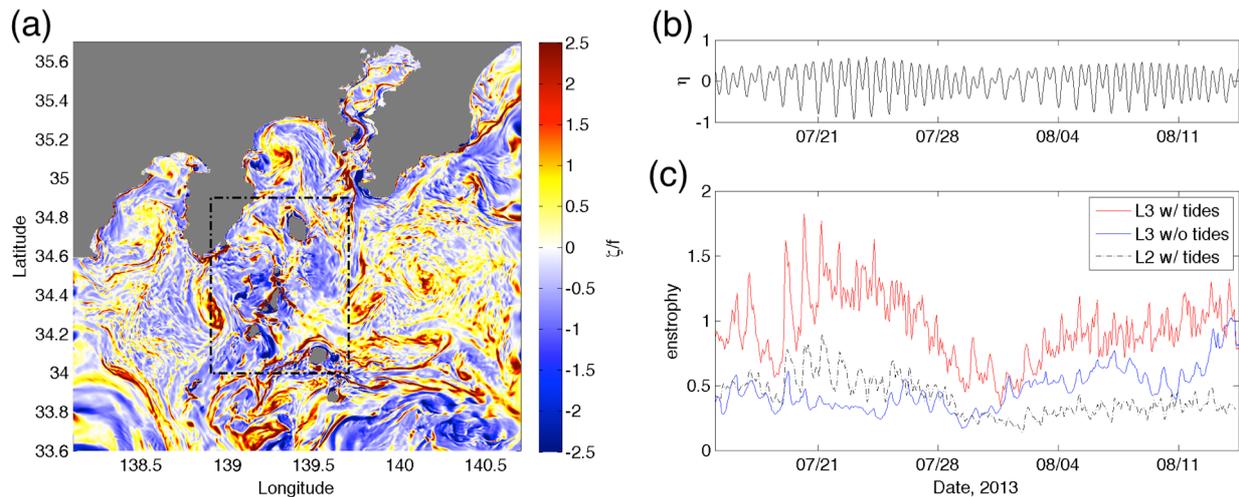


図-6 2013年7月24日4:00における(a)海面の相対渦度(ζ/f)のスナップショット (b) 潮位, (c) 伊豆諸島周辺海域における渦運動エンストロフィーの時系列

加し、岸から離れた沖合の深い海域では減少していたと言える。順圧成分の運動エネルギーは、水深 300 m までの海域では潮汐による増加が現れているが、水深 500 m 程度の海域ではエネルギーが減少していた。内部波により強く影響される傾圧成分の運動エネルギーは、水深 500 m 程度の海域まで潮汐による増加が大きく、増加率は順圧成分に比べて大きかった。岸から水深 500 m 程度の海域までの累積運動エネルギーは、内部波による傾圧成分が2倍程度に増加していた。一方順圧成分は、500 m 水深までの累積値にほとんど変化はなく、500 m 以深までの海域の累積値は潮汐により運動エネルギーが低下していた。以上のことから、海底水深 500 m 程度の海域では、潮汐のエネルギーの多くは傾圧的な海水運動に変換され内部潮汐として伝搬していると言える。このことは図-3(a)において内部波エネルギーフラックスの強い部分が接岸した海域ではなく沖合側で強いことと一致する。

累積した順圧成分の運動エネルギーが低下する要因として、潮汐波により黒潮などによって発生する流れが潮汐により減衰される、若くは潮汐波により順圧成分から傾圧成分へのエネルギー変換が強化されるのではないかと考えられる。潮汐による順圧成分の減衰メカニズムの詳細の解明は今後の課題である。

5. 渦運動エネルギー

海洋内におけるサブメソスケールスケール（数km ～ 数十km程度）の渦運動は、物質や熱輸送に大きく影響していると言われている（例えばKamidairaら¹⁵⁾）。特に日本本州南岸の海域では、黒潮の影響により渦運動が活発であると言われている（Maら¹⁶⁾）。海表面における相対渦度から対象海域では、数kmスケールの複雑な渦構造が現れていた（図-6(a)）。伊豆諸島の周辺海域（図-

6(a)内の黒破線で囲まれた海域）における海面の渦運動エンストロフィーを図-6(c)に示す。潮位差が大きい7月21日から28日の期間において、潮汐の効果により渦運動エネルギーが2～3倍上昇していた。潮位差が小さい小潮の時期（7月31日前後）では潮汐のによる効果は非常に小さかった。以上のことから潮汐により伊豆諸島周辺では渦運動が活性化し、渦運動による物質と熱の移流及び拡散が促進されていると考えられる。8月4日以降潮汐を外力として与えていないモデル結果におけるエンストロフィーの増大は、黒潮が伊豆諸島により接岸していたためである。

海洋モデルにより再現される渦構造は、計算領域の解像度に大きく左右される。一般的に解像度が高いほど渦運動が精度良く再現され、強い渦運動が再現される。高解像度L3領域にダウンスケーリングを行っていないL2領域（水平解像度1 km）のモデル結果から見積もった渦運動エンストロフィーは、L3モデルの値のおおよそ半分程度であった。よってダウンスケーリングの効果が対象領域の渦運動エネルギーの再現に強く影響し、渦運動の再現には水平解像度300 m以上の解像度が求められると言える。一方でL2とL3の2領域で計算された内部潮汐フラックスの強さは同様な値であったため、内部潮汐の再現という観点では水平解像度1000m程度で十分と言える。

6. 結論

潮汐を外力として考慮した高解像度JCOPE2-ROMS 3段階ダウンスケーリング領域海洋モデルによる計算・解析の結果から以下のことが明らかとなった。

(1) 伊豆諸島周辺海域では、地形と潮汐の効果により強

い傾圧流を伴う内部潮汐が発生していた。

- (2) 潮汐によって発生する内部波は、バックグラウンドの内部波エネルギーフラックスを10倍程度増大させ、対象海域の内部波場を支配していた。
- (3) 潮汐の効果により伊豆諸島沿岸の運動エネルギーは10倍程度増加し、黒潮、風による効果に比べ潮汐が卓越して流動場に影響していた。
- (4) 傾圧成分の運動エネルギーは、潮汐の効果により岸近くの浅い海域では大きく増大していた。一方、海底水深が500 mよりも深い沖合の海域では傾圧成分のエネルギーが減少し、対象海域全体での累積の傾圧成分運動エネルギーは潮汐により減少していた。
- (5) 傾圧成分の運動エネルギーは、潮汐により内部波が沖合で励起もしくは伝搬するため、岸から離れた海底水深500m前後の海域において大きく増大していた。
- (6) 潮汐により伊豆諸島周辺の渦運動エネルギーが数倍程度大きくなることがわかった。

謝辞：本研究は、JST-CREST「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する技術基盤の創出」領域（代表者：山崎秀勝，グラントナンバー：JPRMJCR12A6）の補助を受けた。

参考文献

- 1) Shea, R. E., Broenkow, W. W.: The role of internal tides in the nutrient enrichment of Monterey Bay, California. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, Vol. 15, pp. 57–66, 1982.
- 2) Masunaga, E., Homma, H., Yamazaki, H., Fringer, O., Nagai, T., Y. Kitade, Y. and Okayasu A.: Mixing and sediment resuspension associated with internal bores in a shallow bay, *Continental Shelf Research*, Vol. 110, pp. 85–99, 2015.
- 3) Cacchione, D.A., Pratson, L.F., Ogston, A.S.: The shaping of continental slopes by internal tides. *Science*, Vol. 296, pp. 724–727, 2002.
- 4) Alford, M. H., et al.: The formation and fate of internal waves in the South China Sea, *Nature*, Vol. 521, pp. 65–69, 2015.
- 5) Venayagamoorthy, S.K., Fringer, O.B.: Numerical simulations of the interaction of internal waves with a shelf break, *Physics of Fluids*, Vol. 18, DOI:10.1063/1.2221863, 2006.
- 6) Masunaga, E., Fringer, O.B., Yamazaki, H., Amakasu, K.: Strong turbulent mixing induced by internal bores interacting with tide-driven vertically-sheared flow, *Geophysical Research Letters*, DOI: 10.1002/2016GL067812, 2016.
- 7) Van Weering, T.C.E., De Stigter, H.C., Balzer, W., Epping, E.H.G., Graf, G., Hall, I.R., Vangriesheim, A.: Benthic dynamics and carbon fluxes on the NW European continental margin. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, Vol. 48., pp. 3191–3221, 2001.
- 8) Walsh, J. J.: Importance of continental margins in the marine biogeochemical cycling of carbon and nitrogen, *Nature*, Vol. 350, pp. 53–55, 1991.
- 9) Hasegawa, D., Yamazaki, H., Lueck, R.G. and Seuront, L.: How islands stir and fertilize the upper ocean, *Geophysical research letters*, Vol. 31(16), 2004.
- 10) 内山雄介, 石井翔太, 宮澤泰正: JCOPE2-ROMS 多段ネスティングによる黒潮流域でのダウンスケーリング効果の検証, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 66, No. 2, pp I_436-I_440, 2012.
- 11) Uchiyama, Y., Suzue, Y. and Yamazaki, H.: Eddy-driven nutrient transport and associated upper-ocean primary production along the Kuroshio, *Journal of Geophysical Research Oceans*, Vol. 122, DOI: 10.1002/2017JC012847.
- 12) Carter, G. S., and Gregg, M. C.: Intense, variable mixing near the head of Monterey Submarine Canyon, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 32, pp. 3145–3165, 2002.
- 13) Kang, D., and Fringer, O.: Energetics of barotropic and baroclinic tides in the Monterey Bay area. *J. Phys. Oceanogr.*, 42(2), 272–290, 2012.
- 14) Igeta, Y., Kumaki, Y., Kitade, Y., Senjyu, T., Yamada, H., Watanabe, T., Katoh, O. and Matsuyama, M.: Scattering of near-inertial internal waves along the Japanese coast of the Japan Sea, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 114(C10), 2009.
- 15) Kamidaira, Y., Uchiyama, Y. and Mitarai, S.: Eddy-induced transport of the Kuroshio warm water around the Ryukyu Islands in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.07.004>.
- 16) Ma, X., Chang, P., Saravanan, R., Montuoro, R., Hsieh, J.S., Wu, D., Lin, X., Wu, L. and Jing, Z.: Distant Influence of Kuroshio Eddies on North Pacific Weather Patterns?. *Scientific reports*, Vol. 5, DOI: 10.1038/srep17785, 2015.

(2017.3.15 受付)

A STUDY OF FLOW FIELD INFLUENCED BY INTERNAL TIDES AND THE KUROSHIO AROUND THE IZU-CHAIN ISLANDS

Eiji MASUNAGA, Yota SUZUE, Yusuke UCHIYAMA and Hidekatsu YAMAZAKI

Regional Oceanic Numerical simulations using ROMS with tidal forcing were conducted to investigate tidally induced internal waves (internal tides) in the vicinity of the Izu-chain Islands. The tides enhance the energy flux of internal waves by about 10 times as large around the islands. Therefore, in the study region, the internal waves are considerably energized by the tidal forcing. Although the total and baroclinic components of kinetic energy increase due to the tides, the barotropic kinetic energy component decreased by the tidal forcing. The internal waves accompanied by strong baroclinic flows largely contribute to the flow compared to the currents due to winds and the Kuroshio. The numerical simulations also revealed the enhanced eddy motions due to the tidal forcing, suggesting that the tides contribute to lateral mixing or transports via meso- and submesoscale eddies.