

海面高度計およびArgoデータに基づく 3次元密度推定値を同化させた 海洋流動モデルの再現精度について

内山 雄介¹・神吉 亮佑²・高野 祥子³・山崎 秀勝⁴・宮澤 泰正⁵

¹ 正会員 神戸大学准教授 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

² 出光興産株式会社 (〒100-8321 東京都千代田区丸の内 3-1-1)

³ 東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科 (〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7)

⁴ 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)

⁵ 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ
(〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25)

海面高度計および Argo フロートデータを用いて 3 次元海洋密度場を推定し、TS (水温・塩分) nudging と呼ばれる簡易的な 4 次元データ同化を組み込んだ領域海洋循環モデル ROMS を用いて、日本沿岸の黒潮流域における海洋構造の再現性について検討した。水平・鉛直密度構造、メソスケール変動強度、黒潮流路および強度などに関する詳細な比較を行い、本手法の高い再現性を示した。この密度推定法は原理的にほぼ全球に適用可能であり、公開されているデータのみを用いるので新たなコストを必要としないため、一般性・汎用性が極めて高い。JCOPE2 に代表される高品質な海洋再解析データが存在しないような海域に対しても適用可能であり、ダウンスケーリング海洋モデリングに広く用いることが可能である。

Key Words : *Two-layer thermal estimate, JCOPE2-ROMS downscaling system, Kuroshio and Kuroshio Extension, TS nudging, mesoscale reproducibility*

1. はじめに

海底資源探査、熱水鉱床などの深海域を含む海洋生態系調査、ウェザールーティングなどにおいて、海洋流動予報・再解析の高精度化・高解像度化は極めて大きな課題である。我が国の太平洋沿岸域においては、黒潮や親潮などの海流の流路や、それらの強度の再現性の向上が特に重要な鍵となる。これに対して内山ら¹⁾は、黒潮続流域を対象としたROMSを用いたJCOPE2²⁾からの高解像度ダウンスケーリング海洋モデルにおいて、低周波の水温・塩分場へ緩和させる簡易的な4次元データ同化 (TS nudging, あるいはrobust diagnosis) を導入することにより、黒潮蛇行などのメソスケール海洋変動に対する再現性が格段に向上することを示した。しかしながら、JCOPE2に代表される高解像度・高品質の海洋データセットは随所に存在するわけではない。また、一般的に海洋再解析・予報モデルに用いられているデータ同化では、人工衛星リモートセンシングによる表層水温及び海面高度データ、船舶、係留系、フロートなどを用いた現地観

測による3次元水温データが用いられる。一方、例えば Ji ら³⁾、Troccoli ら⁴⁾は、3次元密度構造をより正確に反映させるために水温・塩分の両方を同時に同化に用いることが望ましいことを指摘している。しかし、塩分の現地観測は原理的・コスト的に水温観測に比べて容易ではなく、そのためデータ数も圧倒的に少ないことから、何らかの方法で塩分データを補完する必要がある。そこで本研究では、TS nudgingにより海洋モデルに緩和させるデータとして、Takano ら⁵⁾による衛星海面高度計データ (AVISO Ssalto/Duacs) に基づく水温推定値に加え、Argoプロファイリングフロートデータ⁶⁾およびWorld Ocean Atlas⁷⁾による経験的な塩分推定値を付加した新しい3次元密度推定データセット (以後TUMSAT-TSと呼称) を構築し、これを内山ら¹⁾によるJCOPE2-ROMSダウンスケーリング黒潮流域モデルに適用する。本報では、本モデルのメソスケール海洋構造の再現精度について、3次元変分データ同化を組み込んだJCOPE2再解析値の水温塩分場 (以後、JCOPE2-TSと呼ぶ) への緩和計算結果と比較する形で定量的かつ詳細に検討したので、その結果を報告する。

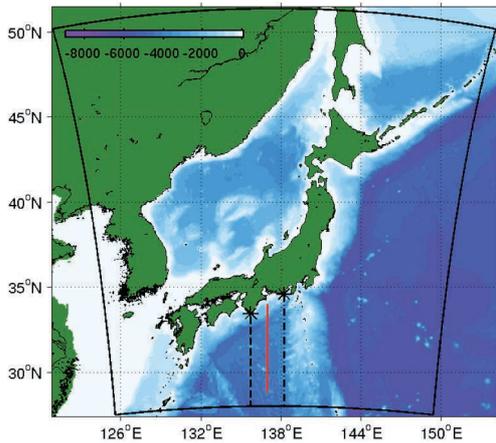


図-1 ROMS 計算領域. 赤線は気象庁東経 137 度線を示す.

2. ダウンスケーリング海洋モデル

JCOPE2 (水平解像度: 約10 km) による日平均再解析値を時空間内挿したデータを側方境界条件とし, 領域海洋循環モデルROMSを用いた1-way offlineネスティングによりROMS領域 (解像度3 km) へとダウンスケーリングを行った (図-1). ROMSモデルのグリッド数は, 水平格子784×864, 鉛直方向には32層 (地形適合 σ 座標, 海表面で細密化) とし, 黒潮及び黒潮続流域を解析対象とした. 海面風応力には気象庁GPV-GSM日平均値, その他の海面放射・熱フラックス等についてはCOADS月平均気候値, SSTにはPathfinder-AVHRRの月平均気候値, 海

底地形データにはJODCのJ-EGG500をSRTM30で補完したデータをそれぞれ用いた. 計算期間は2010年から2012年の3年間とした. 本研究では, TS nudging¹⁾によりTUMSAT-TSに緩和させたケース (以下, ROMS-TUMと称) と, 比較のためにJCOPE2の10日平均密度場 (JCOPE2-TSと称) に緩和させたケース (ROMS-JCPと称) の2通りのデータ同化実験を行った. 緩和強度は一律 (10 day)⁻¹とし, 浅海域を除く水深 $h > 20$ mの領域でTS nudgingによる緩和を実施した. ただし, 事前検討によりTUMSAT-TSの塩分場は海洋表層での推定精度が低いことが明らかとなったため, 鉛直座標 $z < -80$ mにおいてのみ緩和を施した. また, TUMSAT-TSは主に太平洋側に焦点を当てたデータセットであり, Argoデータ数の少ない日本海域や沿岸域・浅海域においては再現性が不十分であることから, それらの海域ではJCOPE2-TSをTUMSAT-TSにブレンドさせる形で補間を行った.

3. 水温塩分推定モデルの精度

TUMSAT-TS推定値の再現性を確認するために, 密度構造について観測値との比較を行った. ここでは一例として, 気象庁東経137度観測線 (図-1の赤実線) 鉛直断面における春期の塩分・水温構造の比較結果を示す (図-2). 観測値としては気象庁による曳航観測結果を用い, いずれも1997年から2010年までのデータを使用して気候値を求めた. いずれも概ね良好に一致しているが, 水温分布では等温線の鉛直位置に若干のずれが見られ, また,

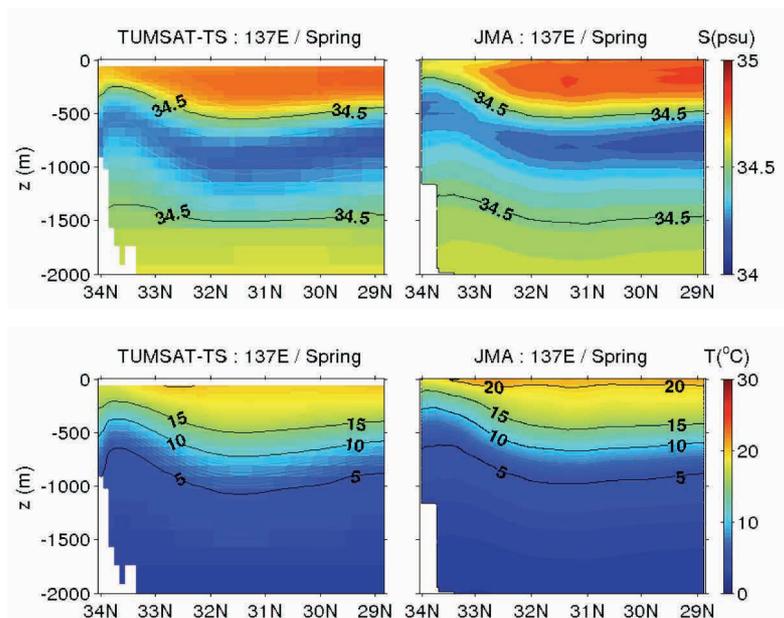


図-2 気象庁東経 137 度線断面における春期に対する (上) 塩分, (下) 水温分布の季節平均値. (左) TUMSAT-TS および (右) 気象庁観測値による.

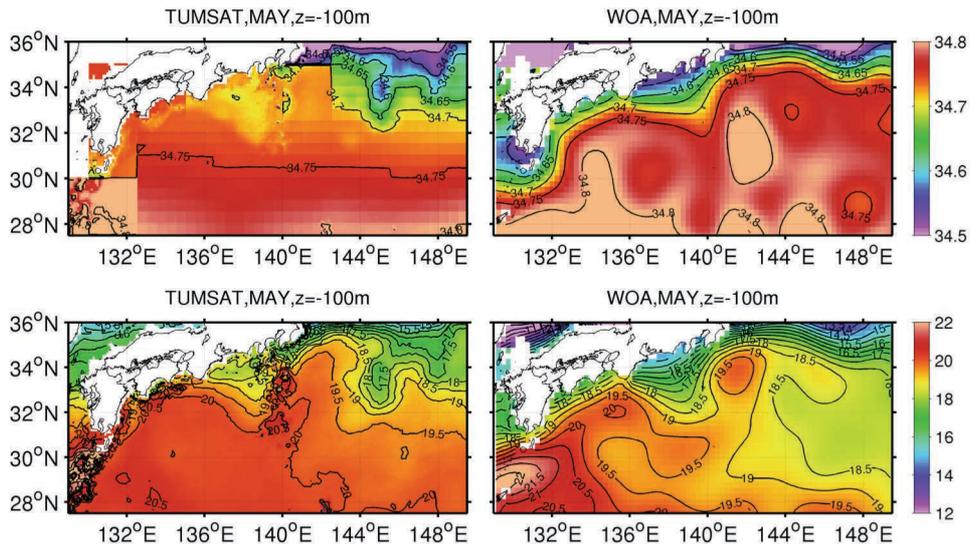


図-3 水深100 mにおける(左) TUMSAT-TS および(右) World Ocean Atlas の3月の月平均の(上) 塩分(単位はpsu)と(下) 水温(単位は°C)の水平分布。

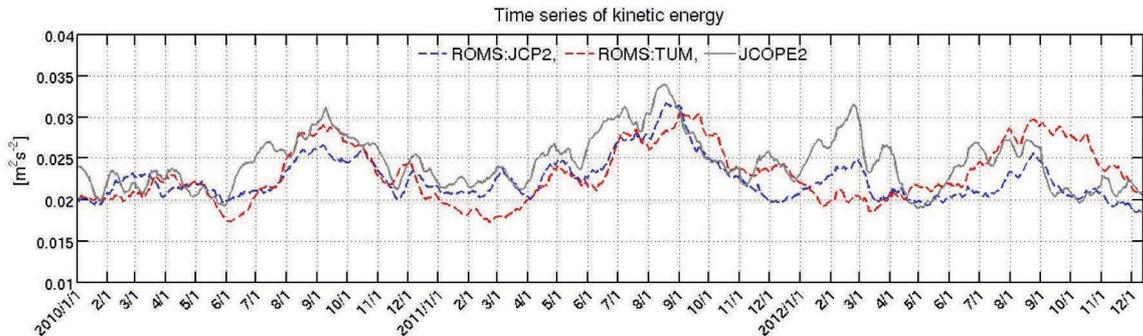


図-4 海洋表層 ($z < -400$ m) における平均運動エネルギー (KE) の時系列

塩分分布では水深800 m周辺における低塩分水塊の分布範囲がTUMSAT-TSのほうがやや鉛直方向に広く分布している。これらの違いを除けば、等値線の傾きや極大・極小値の分布などについて、東経137度線断面内におけるTUMSAT-TSは良好な再現性を保持しているといえる。次に、水深100 mでの3月の水温・塩分に関する月平均気候値の平面分布について、World Ocean Atlas⁷⁾による観測値との比較を行った(図-4)。水温分布は比較的良好に一致しているが、TUMSAT-TSの塩分分布には不連続な面が見られ、広範囲で一様な値が分布している領域も確認されることから、塩分の再現性は水温に比べて若干劣るものと判断される。不連続面は、塩分推定時に5度格子で領域分割したブロック毎にTとSの回帰を行なったことが原因である(詳細については別途報告予定)。東経137度線断面における成層構造(図-2)は塩分・水温ともに良好に一致しているように見られたが、鉛直方向のわずかなずれが水平方向の分布に影響を与えたものと解釈される。すなわち、TUMSAT-TS塩分推定値にはさらなる改善の余地があるものといえる。

4. データ同化数値モデルの再現性

(1) 海洋表層メソスケール変動

海洋表層のメソスケール変動に関して、データ同化を施したROMSの2ケース(ROMS-JCP, ROMS-TUM)と、AVISO海面高度計データおよびJCOPE2再解析値との比較を行い、同化計算結果の再現性を評価する。図-4は太平洋側における表層($z < -400$ m)での運動エネルギー(KE)の平均値の時系列を示している。2010年ではTS nudgingを施した2ケースともにKEのレベルや変動パターンがJCOPE2再解析値によるKE変動とほぼ一致しており、良好な再現性が確認される。しかしながら、計算期間が進むにつれて徐々に再現性が低下しており、3年目の2012年では変動パターンに有意な差異が見られる。つまり、TS nudgingを用いた同化計算はスピニング終了後1~2年程度の期間では高い再現性が確保されることが分かる。次に、AVISOによる2010年のSSH(海面高度)の分散(メソスケール変動強度に対応)、平均表層

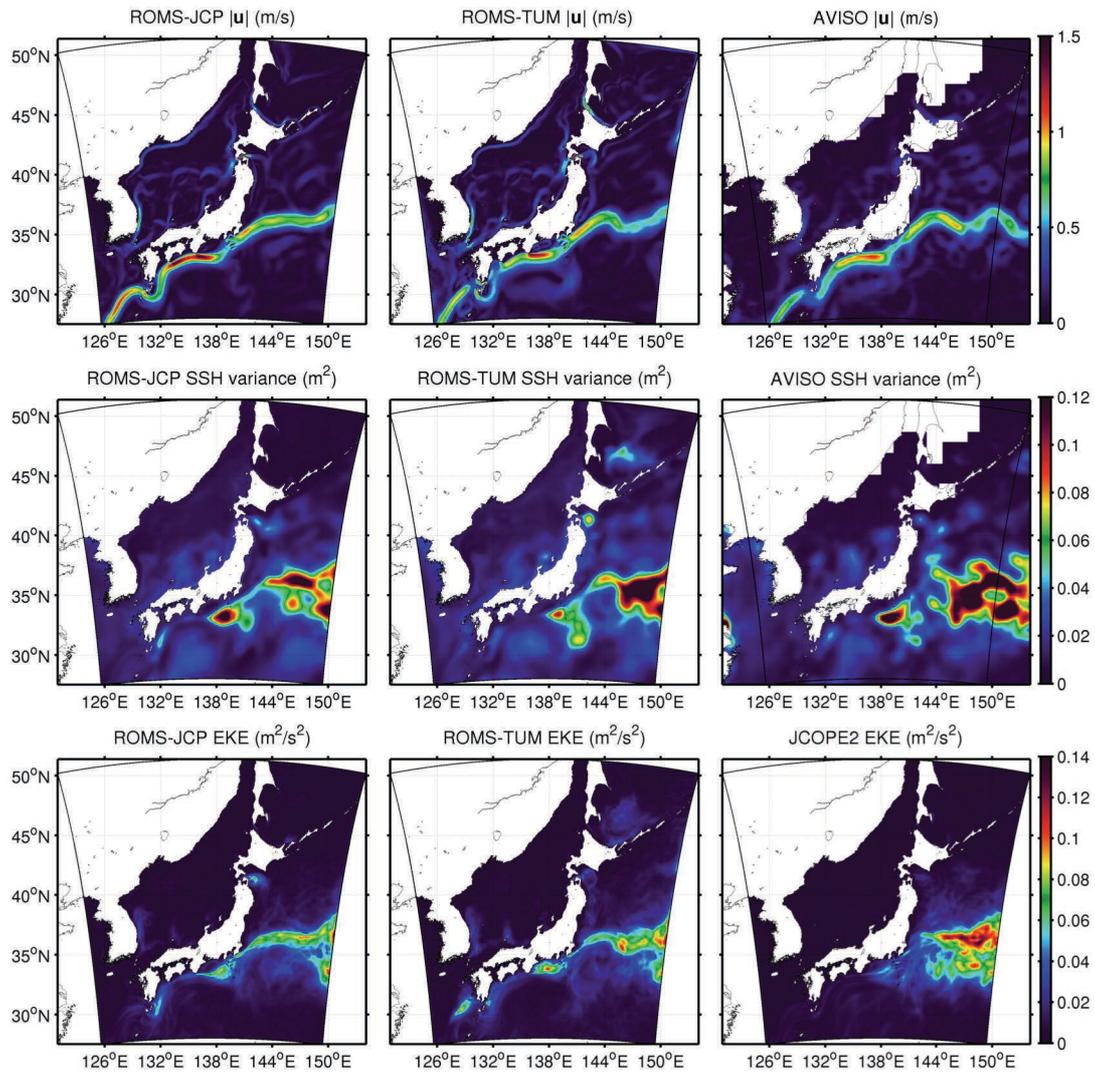


図-5 (上) 表層流速絶対値, (中) 海面高度 (SSH) 偏差の分散, (下) 季節変動成分を除去した渦運動エネルギー (EKE) の空間分布. いずれも 2010 年の年平均値. (左) ROMS-JCP, (中) ROMS-TUM, (右) JCOPE2 データによる.

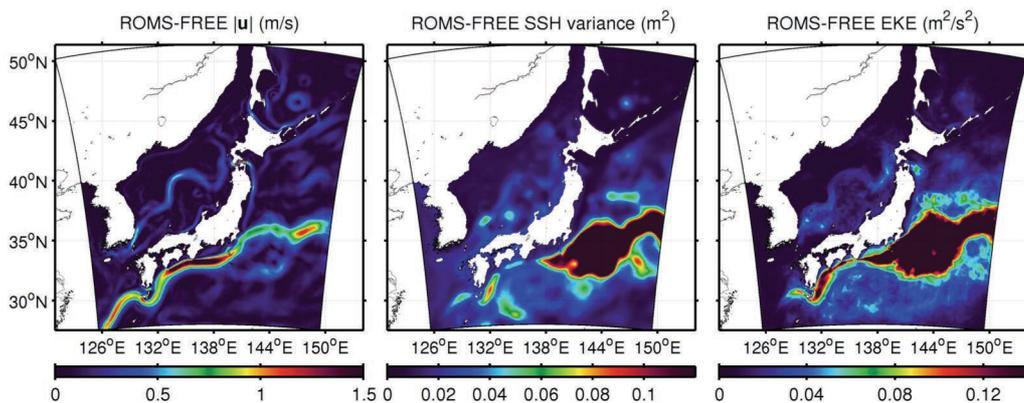


図-6 ROMS-FREE (TS-nudging なしケース) による (左) 表層流速絶対値, (中) SSH 分散, (右) 季節変動成分を除去した EKE の空間分布. いずれも 2010 年の年平均値.

流速の絶対値, JCOPE2 による季節変動成分 (周期 90 日以上) を除去した表層渦運動エネルギー (EKE) の水平分布を ROMS 2 ケースの結果と比較する (図-5). いず

れも良好な一致が確認され, 黒潮流域・続流域周辺での ROMS による 2 ケースはともに海洋表層メソスケール変動に対して高い再現性があることが分かる.

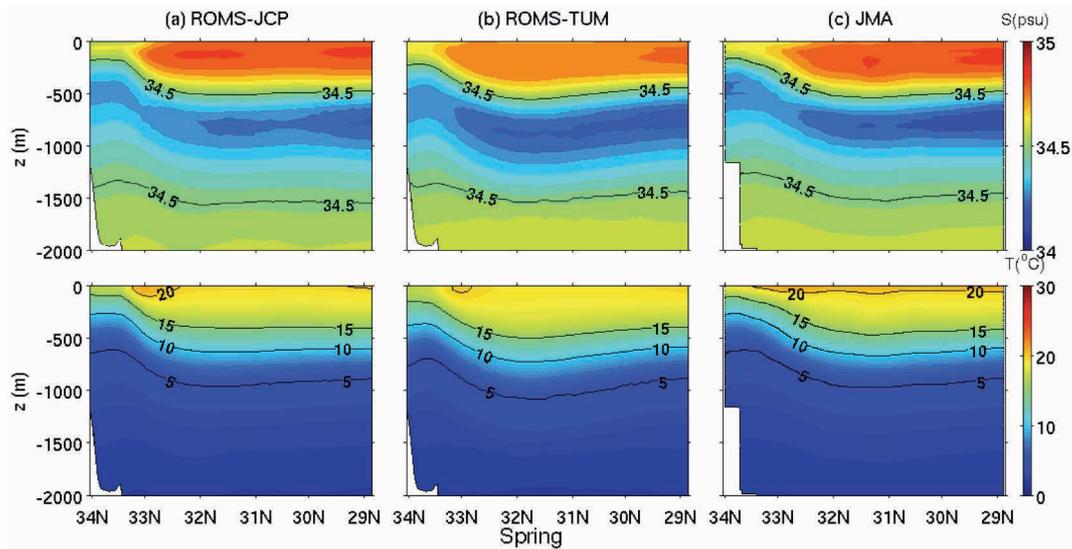


図-7 気象庁東経137度線断面における春期に対する(上)塩分、(下)水温分布の季節平均値。(左)ROMS-JCP、(中)ROMS-TUM、および(右)気象庁観測値による。

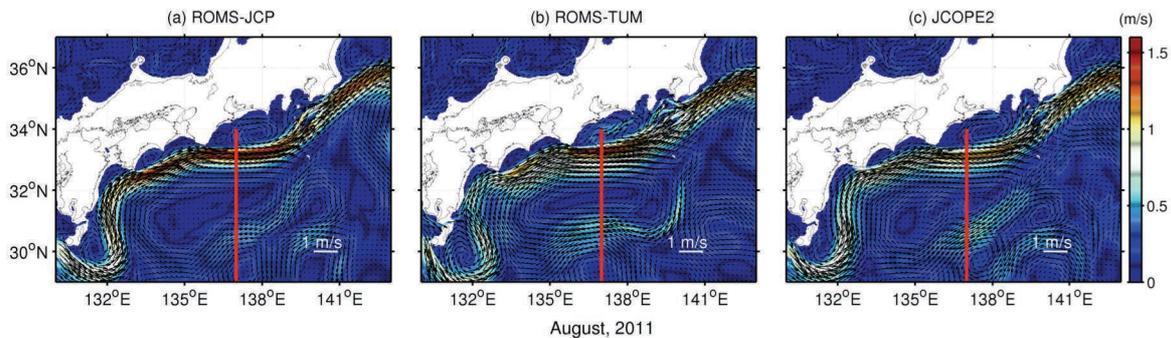


図-8 水深100mにおける流速絶対値と流速ベクトル。2011年8月の月平均値。(左)ROMS-JCP、(中)ROMS-TUM、(右)JCOPE2による。

(2) メソスケール再現性に対するTS nudgingの効果

TS nudgingの有無が再現性に与える効果を調べるために、一切の同化を施さない比較計算を行った(以降、ROMS-FREEと呼ぶ)。TS nudging以外の計算条件はROMS-TUM、JCPと全く同様である。ROMS-FREEによる2010年のSSH分散、平均表層流速の絶対値、季節変動成分を除去した表層EKE分布(図-6)を見ると、エネルギーの散逸が不十分となるため、TS nudgingを施した場合(図-5)と比較して中規模渦が過剰に発達してSSH分散やEKEが高い領域が広く分布することが確認できる。このことから、黒潮域海洋構造の再現に対してTS nudgingが極めて有効に機能することが再確認される。

(3) 密度構造

ROMS-TUM及びROMS-JCPの密度構造の再現性を確認するために、図-2と同様に東経137度線での比較を行った(図-7)。水温、塩分ともに全体的な傾向は3ケースとも一致している。しかしながら、ROMS-TUMでは元データであるTUMSAT-TSと同様に北緯32~33度周

辺における等温線位置がやや深くなっており、亜表層($z = -800$ m周辺)での低塩分域が観測値よりも鉛直方向に広く分布しており、TUMSAT-TSの構造を引き継ぐ傾向が見られる。

(4) 黒潮流路・強度の再現性

黒潮流路および強度の再現性を確認するために流速分布について検討した。一例として、図-8に水深100mにおける流速ベクトルおよびその絶対値の2011年8月の月平均値を示す。3ケースとも黒潮流路での流速分布はよく一致しており、黒潮流路位置やその強度に関する再現性が高いことが分かる。紙面の都合上ここでは示さないが、東経137度・北緯31度周辺に見られる西向き流れの季節変動特性や鉛直構造に関して調べたところ、ROMS-TUMはこれをやや過大評価する傾向があることが判明した。広域密度分布や力学的高度を用いて解析した結果、TUMSAT-TSに含まれる伊豆海嶺近傍での水温誤差が原因であることが分かった。このことは、図-3に見られた塩分推定誤差と併せて、今後改善の必要がある

点であると認識している。

5. おわりに

本研究では、衛星海面高度計データ (AVISO) および Argo データにもとづく塩分水温推定値 (TUMSAT-TS) のメソスケール海洋再解析に対する利用可能性について調査した。TUMSAT-TS は、Takano ら⁵⁾による AVISO データと2層モデルによる水温推定値に、Argo フロートデータおよび World Ocean Atlas による経験的な塩分推定値を付加した新しい3次元海洋密度推定値であり、公開されている既存のデータセットから構築するため、新たなコストが不要であるほか、ほぼ全球に対応しているため、JCOPE2²⁾のような高精度再解析値がない任意の海域においても適用可能であるという高い一般性がある。

本研究では簡易的な4次元データ同化手法である TS nudging¹⁾を組み込んだ黒潮域に対する JCOPE2-ROMS ダウンスケーリング海洋モデルにより、TUMSAT-TS および JCOPE2-TS を用いた双子の同化実験 (ROMS-TUM, ROMS-JCP) を行い、両者による結果を様々な観測データ等と比較する形でその再現性や適用性について議論した。まず、黒潮域における TUMSAT-TS は、水温については概ね良好な再現性を有する一方で、水深数 100 m 程度以深の海洋垂表層における塩分の再現性がやや不十分であった。ROMS-TUM は水平・鉛直密度分布、黒潮流路・強度、メソスケール変動強度などについて ROMS-JCP と同程度以上の再現性を有するものの、TUMSAT-TS の誤差を引き継ぐ形で垂表層 (水深 800 m 程度) での塩分の再現性がわずかに劣っていた。一方で、TS nudging を一切行わないケース (ROMS-FREE) では中規模渦の再現性が低下して乱流拡散に伴うエネルギー散逸が不十分

となり、海洋表層におけるメソスケール変動強度が著しく強化され、非現実的な流況が形成されていた。これらの結果から、いくつかの改善の余地はあるものの、TS nudging を組み込んだダウンスケーリング領域海洋循環再解析における TUMSAT-TS データの有用性と汎用性が示された。

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) および科学研究費基盤研究 C (24560622, 代表者: 内山雄介) の補助を受けた。

参考文献

- 1) 内山雄介・石井翔大・宮澤泰正: JCOPE2-ROMS 多段ネスティングによる黒潮続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.68, No. 2, pp. I_436-I_440, 2012.
- 2) Miyazawa, Y. and Coauthors: Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. *J. Oceanogr.*, Vol. 65, 737-756, 2009.
- 3) Ji, M., Reynolds, R.W. and Behringer, D.: Use of TOPEX / Poseidon sea level data for ocean analysis and ENSO prediction. Some early result. *J. Climate*, Vol. 13, pp. 216-231, 2000.
- 4) Troccoli, A. and Coauthors: Salinity adjustments in the presence of temperature data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 130, pp. 89-102, 2002.
- 5) Takano, A., Yamazaki, H., Nagai, T. and Honda, O.: A Method to Estimate Three-Dimensional Thermal Structure from Satellite Altimetry Data. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, Vol. 26, pp. 2655-2664, 2009.
- 6) Argo Science Team: *Argo: The global array of profiling floats. Observing the Oceans in the 21st Century*, C. J. Kobalinsky and N. R. Smith (Eds.), Bureau of Meteorology, pp. 248-258, 2001.
- 7) Levitus, S., Gurgett, R. and Boyer, T.P.: World Ocean Atlas 1994, Vol. 3: Salinity, *NOAA Atlas NESDIS 3*, 99 pp, 1994.

MESOSCALE REPRODUCIBILITY IN AN ASSIMILATIVE OCEANIC DOWNSCALING MODEL USING A 3-D STRATIFICATION ESTIMATE BASED ON SATELLITE ALTIMETRY AND ARGO FLOAT DATA

Yusuke UCHIYAMA, Ryosuke KANKI, Akiko TAKANO,
Hidekatsu YAMAZAKI and Yasumasa MIYAZAWA

The JCOPE2-ROMS downscaling oceanic modeling system improves mesoscale reproducibility by introducing a simple restoration to data which we call “TS (temperature and salinity) nudging”, where the prognostic temperature and salinity fields are weakly nudged four-dimensionally towards the assimilative JCOPE2 reanalysis (Uchiyama *et al.*, 2012). However, there is not always an accurate reanalysis for assimilative oceanic downscaling models, and therefore alternative dataset should be prepared. Takano *et al.* (2009) proposed an empirical method to estimate 3-D thermal structure from the near real-time AVISO altimetry data along with the ARGO float profiling data. We view the derived empirical TS data (referred to as TUMSAT-TS) as a candidate for assimilation. A synoptic forward modeling of the JCOPE2-ROMS downscaling system is thus conducted to explore usability of this empirical TS dataset by carrying out with the TS nudging towards the TUMSAT-TS.