外洋から沿岸に向けたモデリングの取り組み*

宮澤 泰正**・美山 透**・郭 新宇**^{,†}・Sergey M. Varlamov**

Modeling Efforts from Open Ocean toward Coastal Seas

Yasumasa Miyazawa, Toru Miyama, Xinyu Guo and Sergey M. Varlamov

海流予測の現状と今後の方向性について考察する.陸棚域の外側(外洋)では、衛星観測,現場観測と、数値モデルの 組み合わせにより、直径100 km以上の中規模渦を再現し、その挙動を予測することが可能になっている.今後予想され る、「面的」海面高度観測衛星の登場により、中規模現象の把握はおおよそ完成すると期待できる.しかし陸棚域の内側 (沿岸)については、現況を把握するための観測データが不足している.それを克服するための手段の一つとして、漂流 ブイと内航船による観測の活用を提案する.

We discuss the current status and future directions of the ocean current forecast. Combining the satellite and in-situ observation with numerical modeling has established nowcast and forecast of the mesoscale eddies with a radius larger than 100 km outside of the shelf break (open ocean). The wide-swath altimeter satellites that will appear in the near future could be effective for capturing the mesoscale eddies over almost all scale ranges. Inside of the shelf break (coastal seas), in contrast, there are insufficient observation data for monitoring of the coastal phenomena. We suggest utilization of drifting buoys and coastal shipping in order to resolve this issue.

キーワード:海流予測,外洋,沿岸,定期観測,数値海洋モデリング

はじめに

過去20年における海洋観測網の継続的な発展により, 陸棚域より外側(おおむね,水深が200mより深い海域 に相当する)の外洋における海流予測が確立した¹⁾.海 面下の密度分布に関する情報を与えるという意味で最も 重要な観測データである衛星海面高度計観測は,1992年 に開始された TOPEX/Poseidon 衛星の継続的な高精度観 測の成功以来,海流予測にとって必須の要素であり続け てきた²⁾.これに,衛星から得られる海面水温データ や,自動昇降型の水温塩分観測器(アルゴフロート)に よる観測,気象・水産試験研究機関等による定線観測デ ータ等を加え,数値モデルに同化することで初期値を作 成し予測を更新する枠組みが,現在いくつかの研究機関 において確立している³⁾.現時点では,海面高度計衛星 から得られる情報から,直径100 km 程度までの中規模

* 2014年9月12日受領, 2014年11月11日受理

** 独立行政法人海洋研究開発機構アプリケーションラボ * 愛媛大学沿岸環境科学研究センター

連絡先:宮澤泰正,独立行政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
 E-mail: miyazawa@jamstec.go.jp

渦を捕捉できる⁴⁾. 今後予想される, COMPIRA²⁾や SWOT⁵⁾といった, 従来の「線的」ではなく「面的」に 海面高度を観測する衛星の登場により, 日本周辺では数 日に1回, 5km間隔の格子で空隙無く一様に海面高度 を観測することが可能になると見込まれており²⁾, これ によって直径数10km程度までの中規模渦の捕捉が実現 することが期待できる.

海流予測が,地球回転と成層の効果が同程度に支配的 という意味で地球流体力学的な現象を継ぎ目なく表現す ることを最終目的だとすれば,表現するべき時空間スケ ールの最小限界(地球流体力学的ダウンスケーリングの 限界)を示すことができる.現象の層厚によって表現さ れる空間スケールは異なり,層厚が1,000 m に達するよ うな現象の場合,空間スケールは数100 km,時間スケ ールは数日~数十日,層厚が数メートルのごく薄い現象 の場合であれば空間スケールは10 km,時間スケールは 数日程度となる¹⁾.実際の海洋を観察してみると,前者 が亜熱帯循環等の大洋循環や中規模渦,後者が中規模以 下(submesoscale)現象や,沿岸で見られる諸現象に対 応するとみなせる.後者は具体的には,河川水,温排水 等が一定期間にわたって沿岸付近を薄く広がるような現 象に相当する.数値モデルにおいて地球流体力学的ダウ ンスケーリングは、入れ子手法⁶⁾等を用いて格子間隔を 小さくし、散逸を小さくして移流過程を適切に表現すれ ば基本的に実現できる.地球流体力学的な枠組みでのダ ウンスケーリングは、1km 程度の格子までは問題なく 行えるので、この程度の格子間隔での現業的な予測を当 面の目標とするべきであろう(砕波帯⁷⁾や細かな潮汐渦⁸⁾ を表現するには1km以下の格子が必要になるが、これ らの現象は上述の意味で地球流体力学的な現象とはいえ ない).海洋の地球流体力学的ダウンスケーリングが、 前述した「面的」海面高度観測衛星データや高解像度海 面水温データの活用⁹⁾とともに、どの程度精度良く行え るかどうかについては、今後の研究の進展が待たれると ころである.

沿岸においては、外洋におけるダウンスケーリングの 進行とともに、沿岸の外洋側開境界条件の精度が向上す ることで予測の精度が向上していくことは間違いな い¹⁰⁾.しかし、沿岸それ自体には、外洋における海面高 度やアルゴフロートに対応するような. 現業的かつ領域 を包含するような観測データが存在しない11). あえてそ れに対応するデータがあるとすれば、潮位計データであ ろうか、潮位計や、最近整備が進められつつある海洋短 波レーダーによる海面流速データ11)等の、外洋で利用が 一般化している衛星データや、フロートデータ等の世界 気象通信網(GTS)で利用可能な現場水温塩分データ以 外のデータを海流予測に活用していく研究を進めていく べきである.本稿では、外洋での利用が一般化している 衛星データや GTS において流通する現場水温・塩分デ ータを「伝統的」データ、それ以外のデータを「非伝統 的」データと呼び、「非伝統的」データ活用を目指した 試みとして, 漂流ブイデータの同化と, 篤志船観測デー

タによる海流予測の検証について述べる.これらの事例 をもとに、沿岸でのデータ同化と、これを用いた海流予 測の可能性について考察する.

1. 漂流ブイデータ同化の可能性

漂流ブイ観測は海洋学において既に長い歴史を有し, 1990年代から本格化したデータ同化研究においてもその 冒頭からそのデータ同化の研究が行われており¹²⁾,「非 伝統的」データと定義するのは一般的には適切ではな い.ただし,海洋モデルへの現業的な同化は一般化して いないようであり,世界的な研究動向を見ても現業的な 同化の研究は最近になって本格化してきているように見 えるので¹³⁾,ここで改めてその可能性について論じる価 値はあると考える.また,後で述べるように同様な手法 が船舶ドリフトデータ¹⁴⁾の同化にも活用できるので,今 後の発展性がある.

漂流ブイは、その軌跡そのものが得られる観測データ であり、軌跡を直接モデルに同化することが最も自然な こととして考えられる、本稿ではその前段階として、一 定の時空間スケールを仮定して軌跡からブイの移動速度 を求め、固定点でのオイラー流速に変換して同化するこ とを考える、さらに、オイラー流速のうち地衡流成分の みを同化することにする、この仮定によって、後述する ように従来の同化手法がそのまま使えるという利点を得 る、同化する前に、従来の海流予測モデルの結果がどの 程度ブイ流速と一致するのか、また地衡流成分を同化す るという仮定が妥当であるかどうか確認する.

ここでは, NOAA/AOML Global Drifters Program にお いて保管されている漂流ブイデータのうち, ドローグ付 きで, かつ6時間毎のデータとして再処理されたものを



Fig. 1 (a) Relationship between the surface buoy drifts and surface flow data obtained from the JCOPE2 reanalysis. The period of the buoy data sampling is 2009, and the locations to which the data apply are within $120^{\circ} - 130^{\circ}$ E, $20^{\circ} - 36^{\circ}$ N.

(b)As in (a), except for relationship between the surface buoy drift and geostrophic flow data calculated from the sea surface height of the reanalysis.

用いる.地衡流の時間スケールを考慮し、1.25日の移動 距離からブイの移動速度を算出し、これを軌跡の中央点 におけるオイラー流速であるとみなす.2009年のデータ を、JCOPE2 再解析データ¹⁵⁾の対応する表面流速と比較 した結果を Fig.1aに示す.両者の相関は0.55であり有 意な値を示している.また両者の平均二乗差は0.28 ms⁻¹である.再解析データの海面高度から算出した地 衡流速度との相関(Fig.1b参照)も同様に有意な相関 (値は0.56)と、同様な大きさの平均二乗差(値は0.27 ms⁻¹)を示しており、時間スケール1.25日においてブ イから算出した移動速度が地衡流成分を相当程度表現し ていることがわかる.以上の結果から、ブイ流速が含む 様々な変動成分のうち、地衡流成分を同化するという仮

ここでは,JCOPE2海流予測システムで用いている三 次元変分法¹⁵⁾におけるコスト関数に以下の項を付加する ことを考える.

定は妥当であることが確認できる.

 $\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2Err_{i}^{2}} (D_{i} - (Ug(SDH)_{i} \cos\theta_{i} + Vg(SDH)_{i} \sin\theta_{i}))^{2}$ (1)

 D_i , θ_i , *Err*_iは, *N* 個のブイ移動速度データのうちブ

イ*i*の移動速度,移動方向,観測誤差をそれぞれ示す. 東西方向流速であれば $\theta_i = 0$ °であり,南北方向流速で あれば $\theta_i = 90$ °である. Ug(SDH), Vg(SDH)はモデル の力学的海面高度 SDH から算出した地衡流を示す. 従 来の同化では,海面高度偏差データのみを同化していた が,この項の付加によってブイの移動速度の地衡流成分 を同化することが可能になる.モデルの力学的海面高度 は水深1,500 m - 800 m 以浅の水温,塩分から算出して おり,同化によって水温・塩分場を修正することにな る.

JCOPE2における三次元変分法では、7日毎に、前後 数日間に取得された観測データを同化して水温塩分解析 値を作成している.漂流ブイデータに関しては、前後4 日間に取得されたデータを同化することにした.2009年 のうち、比較的ブイのデータが多い期間として、2009年 10月3日を選び、前後の期間のデータを同化して水温 (塩分)解析値を作成した.同化に用いた初期推定値水 温をFig.2aに示す.初期推定値には日本南岸を流れる 黒潮に相当する水温前線がみられ、海洋速報の流軸(図 中の太線)が示す位置とほぼ一致した分布を示している が、九州南東沖における黒潮の離岸の表現がやや不正確



Fig. 2 Temperature at 200 m depth south of Japan on 9 October 2009. A thick contour denotes the Kuroshio path at that time estimated by the Japan Coast Guard.

 $(a)\ensuremath{\mathsf{First}}$ guess prior to the JCOPE2 3DVAR data assimilation.

 $(b)\ensuremath{\mathsf{Analysis}}$ after assimilation of the buoy drift data alone.

(c) Analysis after assimilation of the sea surface height, temperature, and salinity data.

(d)Analysis after the assimilation of the all available data including sea surface height, temperature, salinity, and buoy drift data.

である. Fig. 2bは、コスト関数(1)を用いてブイのデー タ(Fig.3aのベクトル矢印参照)のみを同化した結果 である.同化により、初期推定値に比べ、ブイ流速にた いする残差が0.35 ms⁻¹から0.31 ms⁻¹に減少した.結 果として、九州南東沖の黒潮の離岸に伴う水温の低下と 遠州灘沖の黒潮前線の水温勾配が,初期推定値に比べ,よ り強く表現されている。このことは Fig.3 に示す同化前 と後の水温差を見れば、より明確に確認できる. また、 Fig.3aのベクトル矢印と同化に伴う水温修正値を比較 すると、コスト関数(1)がブイのデータに含まれる地衡流 成分を同化できることが改めて確認できる. Fig.3bか ら,同化による水温が,九州南東沖の黒潮の離岸と紀伊 半島南側海域での接岸傾向をより強調する結果となって いることがわかる.ブイのデータを除き従来どおり海面 高度・水温・塩分データを同化した結果(Fig.2c)は, 細部は異なるもののブイデータのみを同化した結果と同

様な傾向を示しており(ブイデータは同化していない が、ブイ流速に対する残差は0.34 ms⁻¹となり減少して いる)、ブイデータは、他の観測データが含む情報と矛 盾しない情報を含んでいたことがわかる. ブイデータと 他のデータをすべて同化した結果(Fig.2d)において, ブイデータ以外を同化した場合(Fig.2c)に比べて紀 伊半島沖での黒潮前線の勾配がより強く表現されてい る. この場合、ブイ流速に対する残差も0.32 ms⁻¹とな り、ブイデータを同化しない場合に比べて減少してい る.このことは、ブイデータが従来のデータと単に矛盾 しないだけでなく、さらにこれを補完する情報としての 付加価値を有する可能性を示唆している.本稿における 結果は1サイクルのみの同化の結果であるが、実際の同 化過程においては複数サイクルで同化が行われその効果 が累積していくことから、ブイ流速の同化効果はさらに 大きなものになる可能性があるので、今後もこうした検 討を継続していく必要がある.

より沿岸の海域で漂流ブイデータを利用する場合を考 えてみる. 漂流ブイは、他の観測機器に比べ単価が比較 的安価であり、高密度に投入できるという利点がある. 最近では沿岸海域用に特化した小型でより安価な漂流ブ イも開発されている.こうした動きをさらに進め、水温 や塩分の鉛直分布も観測する沿岸用のプロファイリング フロート展開も提案されている11). 今後,沿岸海域観測 に特化した漂流ブイあるいはフロートの観測が活発に展 開されていく可能性がある.また、2節で示したコスト 関数におけるパラメータを船舶の船首方向だとすれば. 船舶の航海ログから推定される船舶の船首方向でのドリ フト速度14)も同様に同化できる、したがって、こうした 漂流ブイなどのドリフトデータを効果的にモデルに同化 する技術を進めていく意義は十分にあると考えられる. ただし、外洋に比べ、沿岸海域での漂流ブイ流速には非 地衡流成分がより多くなることから、本稿で示した、地 衡流成分のみを同化する手法では効果的に同化できない 可能性もあり、同化手法そのものを慎重に検討していく 必要がある.

2. 篤志船観測データによる海流予測の検証

NPO 法人ヴォース・ニッポン(ウェブサイト http:// www.vos-nippon.jp/)では、オーストラリアと日本を往 復する石炭運搬船の冷却水取り込み機構に水温・塩分計 を設置し、運航時の表面水温・塩分を1分毎に測定し、 そのデータを公開している.JCOPE2 海流予測システム では、2014年6月から同データの同化を開始した(http: //www.jamstec.go.jp/frcgc/jcope/htdocs/home.html参照). ここでは、同化しない状態のJCOPE2 再解析データと同 データを比較検証し、今後ありうる篤志船観測の活用に ついて考察する.Fig.4には黒潮流路上での比較結果、



Fig. 3 (a) Analysis increment represented by the difference in temperature at 200 m depth between first guess (Fig. 2a) and analysis (Fig. 2b). Arrows denote the buoy drift data used for the data assimilation.
(b) As in Fig. 3a except for not showing the buoy drift data, but showing the Kuroshio path estimated by the Japan Coast Guard (a thick contour).

Fig.5には太平洋内部領域での比較結果を示す.比較に あたって、JCOPE2再解析データからは日平均値をと り、 篤志船データからは移動間隔が0.05度になる範囲で 平均をとり、その両者を比較した、両者において JCOPE2 再解析データは独立な(同化されていない)観 測値に対しておおむね一致する傾向を示している. ただ し.1度(約100km)以下の空間スケールの細かな変 動はモデルでは表現しきれていない場合が見受けられ る. 塩分の場合はさらに、北緯15-25度において空間ス ケールの大きな違いがみられる. 再解析データが1/12 度格子の日平均値であることを考えれば、より高い時空 間解像度をもつ観測データに比べて滑らかな分布になる のは当然のことである。ただしこうした違いの原因は、 前者の場合は、前述したような海面高度データの空間解 像度の限界等のため、現状のデータ同化において100 km 以上の空間スケールの現象を再現することを前提と

していることが原因として考えられる.具体的には,三次元変分法で与えている背景誤差共分散の空間スケール (平滑化の空間スケールと考えてもよい)が100 km 以 上となっていること¹⁵⁾が関係していると考えられる.後 者の塩分データにおける場合は,同化のための表面塩分 の観測データが不足していることと,現状用いている塩 分の表面境界条件が月平均気候値への緩和のみによるも のであり,降水や蒸発の時空間変動を表現する精度が不 足していることも原因として考えられる.

こうした篤志船観測を,内航船で導入する場合を考え てみる.内航船は基本的に沿岸に沿った航路をとり,一 定の範囲で決まった航路を往復する場合が多い.ほぼ携 帯電話通信可能な範囲を航行するので,携帯電話通信を 活用した即時的なデータの取得が可能である.沿岸の場 合は水深が浅いので,表面の水温・塩分の観測データが 現象の再現に占める重要度は,外洋に比べて大きい.2



Fig. 4 Comparison of temperature (a) and salinity (b) data between the volunteer ship observation and JCOPE2 reanalysis for the period from 8 to 16 May, 2014. (c) Route of the volunteer observation ship during the period. Shade denotes the bottom topography. Thin solid contours indicate 200 m depth.

節で述べたように、内航船の航海ログデータ¹⁴⁾の同化も 試していく価値がありそうである.以上の条件から、内 航篤志船観測は、沿岸海域での高密度データとしてモデ ルへの同化に対し効果的であると期待できる.

おわりに

従来の外洋における同化プロダクトで用いられてきた 衛星データや,現場水温・塩分データに加えて,漂流ブ イ観測データを同化に用いる可能性について示し,さら に篤志船観測を沿岸海域で行う可能性について論じた.

こうしたデータを沿岸海域でモデルの同化に利用する ためには、データ同化手法もそれに適した手法としてい かなければならない。例えば、2節で示した三次元変分 法は、流速データの同化にあたり地衡流成分のうち傾圧 成分を同化することを前提としており、沿岸海域での適 用にあたり、非地衡流成分や、地衡流・非地衡流に関わ らず順圧成分も同化できる手法を検討していく必要があ る.また、3節で行った高密度観測データとの比較によ り、データ同化で想定する時空間スケールについて注意 したが、沿岸海域では外洋に比べ現象の時空間スケール が小さいのに加え、空間スケールが非等方、かつ時間的 に変動する場合が多い、現状用いている三次元変分法 は、想定する空間スケールは等方的であり、時間変化し ない、いわゆる「静的」同化手法である。今後、沿岸海 域では、非等方かつ時間変動する空間スケールを取り扱 うことができる「動的」同化手法の適用を進めていく必 要がある.実際、筆者が行った研究では、「動的」同化 手法であるアンサンブルカルマンフィルターを用いるこ とで、沿岸海域にみられるフロントの表現が明確にな り¹⁶、また観測データの持つ情報を空間的に平滑化しな いで効果的に表現できる⁹ことがわかっている。

さらに今後,データ同化手法に加え,モデルが表現す る物理過程を精緻化する必要もある。例えば,3節で論 じたように,塩分の表面境界条件を,降水・蒸発の詳し い時空間変化が表現できるものとする必要がある。また 沿岸海域では河川水が海流変動にもたらす影響が重要な



Fig. 5 As in Fig. 4 except for the period from 26 to 30 May, 2014.

6000 -5000 -4000 -3000 -2000 -1000 -500 -200

ので,これを精度良く表現する必要もある.その他,海 面での物理過程の精緻化のためには沿岸海域における海 上気象要素(風速・風向,気温,湿度)の観測データも 必要であるが,篤志内航船観測において海上気象要素の 観測も導入できれば効果的であろうと思われる.

謝 辞

NPO 法人ヴォース・ニッポンの中島直彦代表理事に は、同法人が取得した篤志船観測データを提供頂くとと もに、そのデータの活用について有益な助言を頂いた. 中島代表理事をはじめとする同法人、及び関係する篤志 船関係者のデータ取得への多大な尽力に敬意を表した い. また、査読者の方には有意義な改訂となる意見を頂 いた.

参考文献

- 宮澤泰正・早稲田卓爾(2010):数値海流予測:現状と将来の 展望.日本船舶海洋工学会講演会論文集,10,93-96.
- 市川香 (2014):21世紀初頭の衛星海面高度計. 海の研究, 23, 13-27.
- The Oceanographic Society (2009) : Special Issue on the Revolution in Global Ocean Forecasting-GODAE : 10 Years of Achievement. Oceanography, 22, 14-215.
- Fu, L. -L. and R. Ferrari (2008) : Observing Oceanic Submesoscale Processes From Space. Eos, Transactions American Geophysical Union, 89, 488.
- Fu, L.-L. and C. Ubelmann (2014): On the Transition from Profile Altimeter to Swath Altimeter for Observing Global Ocean Surface Topography. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 31, 560-568.
- 3 郭新宇・Sergey M. Varlamov・宮澤泰正 (2010):入れ子手法 による沿岸海洋モデリング、沿岸海洋研究, 46, 113-123.
- Uchiyama, Y., J. C. McWilliams and A. F. Shchepetkin (2010): Wave-current interaction in an oceanic circulation model with a vortex-force formalism: Application to the surf zone. Ocean Modelling, 34, 16-35.
- Nagai, T. and T. Hibiya (2012) : Numerical simulation of tidally induced eddies in the Bungo Channel : A possible role for sporadic Kuroshio-water intrusion (kyucho). Journal of Oceanography, 68, 797-806.
- 9) Miyazawa, Y., H. Murakami, T. Miyama, S. M. Varlamov, X. Guo, T. Waseda and S. Sil (2013) : Data assimilation of the highresolution sea surface temperature obtained from the Aqua-Terra

satellites (MODIS-SST) using an ensemble Kalman filter, Remote Sensing, **5**, 3123-3139.

- 10) Isobe, A., S. Kako, X. Guo and H. Takeoka (2012) : Ensemble numerical forecasts of the sporadic Kuroshio water intrusion (kyucho) into shelf and coastal waters, 62, 633-644.
- (2014):沿岸の海洋物理学における三つのパラダイム、沿岸海洋研究, 51, 145-149.
- 12) Ishikawa, Y., T. Awaji, K. Akitomo and B. Qiu (1996) : Successive correction of the mean sea surface height by the simultaneous assimilation of drifting buoy and altimetric data. Journal of Physical Oceanography, 26, 2381-2397.
- 13) Carrier, M. J., H. Ngodock, S. Smith, G. Jacobs, P. Muscarella, T. Ozgokmen, B. Haus and B. Lipphardt (2014) : Impact of Assimilating Ocean Velocity Observations Inferred from Lagrangian Drifter Data Using the NCOM-4DVAR. Monthly Weather Review, 142, 1509-1524.
- 14)加納敏幸・宮澤泰正・伊勢谷沙織・山崎英津子 (2011):海流 予測値と船舶での海流観測値との比較検討.日本航海学会論 文集,124,129-135.
- 15) 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 a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. Journal of Oceanography, 65, 737-756.
- 16) Miyazawa, Y., T. Miyama, S. M. Varlamov, X. Guo and T. Waseda (2012) : Open and coastal seas interactions south of Japan represented by an ensemble Kalman Filter. Ocean Dynamics, 62, 645-659.

質疑応答

問:データ同化に関して,どれ位の時空間スケールで考 えているのか.同化を離した場合,各スケールの現象 がどれ位の時間で合わなくなるのか.

(東海大学文明研, 杉本 隆成)

答:外洋では中規模変動の時空間スケールが支配的であ り,空間スケールでは100km 程度,時間スケールで は1週間程度が下限である.同化を離した場合は,中 規模変動の時間スケールで予測可能性が失われる.黒 潮流路変動の場合は,予測可能性は1-2ヶ月で失わ れる.沿岸海域の場合はさらに小さく,短い時空間ス ケールであると考えられるが,その詳細については今 後の研究の発展を待ちたい.