

数値海流予測：現状と将来の展望

宮 澤 泰 正*

正 員 早稲田 卓 爾**,*

Numerical ocean forecast: current status and future perspective

by Yasumasa Miyazawa

Takuji Waseda, Member

Key Words: Ocean observation, Data assimilation, Ocean general circulation model, Scale interactions

1. 緒 言

海流は、風や大気の熱によって海洋中の圧力が変化しそれによって駆動される水平方向の海の流れである。潮汐によって駆動され 1 日以下の短い周期で変動する潮流とは一般に区別され、一定の幅で同じ方向に流れていることが多い。特に外洋の海流には幅が 100km に及ぶ巨大なものもある。

海流の変動は、様々な時空間スケールの現象が組み合わさり、それらが相互に関係しあいながら生じている。海流変動に含まれる種々の時空間スケールの変動のうち、過去 20 年間の間に急速に発展した人工衛星観測網の現業化により、数 10 日周期、数 100 キロメートル規模の海洋中規模渦と海流の相互作用による海流変動¹⁾や、同様の時空間スケールをもつ、海流自体の不安定による蛇行²⁾等、外洋のいわゆる中規模変動を精度よく観測することが可能になった。そして、高速計算機上に構築した海洋大循環モデルを用いて予測する数値海流予測技術、すなわち「海中天気予報」が過去数年の間に確立した。

今後、数値海流予測は、中規模変動よりさらに小さな時空間スケールをもつ中規模以下（サブメソスケール）現象や、波浪・海上気象を含む海象全体、さらに海洋生態系の変動をも予測する方向に発展していくとみられる。

2. 海流を捉える地球規模の海洋観測網

海流の蛇行や中規模渦など、中規模海流変動を一定の精度で定期的に観測するために最も効果的な手段は衛星海面高度計である (Fig.1)。衛星からマイクロ波を海面に向けて投射し、その反射波を受信するまでの経過時間の差によって海面までの距離を測ると、それと衛星高度との差によって海面高度がわかる。海面高度にはジオイド面（静止している場合の海面高度）と海面の圧力を決める高度（海面力学高度）が含まれるが、ジオイド面の精度が高くないので平均からの偏差を求めることでジオイド面の精度の問題を回避している。準地衡流の力学を反映して、海表面の海流は海面力学高度の勾配に沿って流れ、勾配が強ければ強いほど海流も速くなる。平均海面力学高度が不明なので、海流の絶対値ではなく海流変動だけが衛星観測からわかることになる。現在、欧米が打ち上げた海面高度観測衛星が複数稼働しており、その

観測データはインターネットを通じて即時的に入手可能となっている。

代表的な衛星は Jason と呼ばれるもので、約 10 日で地球を周回している。衛星海面高度は雲を透過するマイクロ波で測定されているので常に一定の精度で観測されるという利点がある。Jason の前身である TOPEX/Poseidon 衛星は 1992 年から現業運用され 2000 年代の初めに Jason に交代しているので、過去 17 年以上にわたって全球規模の海流変動が一定の精度で観測されてきたことになる。

海流観測にとっては衛星観測による海面水温も重要な観測データである (Fig.2)。海面水温分布は、暖流、寒流、あるいは暖水、冷水塊の影響を受けるのでこれらに関係する海流分布をこれから推定できる。ただし、よく使われる NOAA の赤外放射計からの推定水温データは、赤外線が雲に吸収されるので衛星海面高度データと異なり観測密度にばらつきが出てくる。最近ではマイクロ波による観測と組み合わせて雲の影響を除去した高品質のデータが作成されるようになった。海流観測の面から言うと、夏季は特に亜熱帯・黒潮域で海流の影響によらず海面全体で様な水温分布となるので海流分布の把握は難しくなる。

以上の 2 種類の衛星データに比べて数は少ないものの重要な観測データが、「アルゴフロート」とよばれる自動昇降型の無人観測機や、船舶によって定線で観測される水温・塩分データである (Fig.3)。観測数は少ないものの、間接的にしか海面下の水温・塩分分布を推定できない衛星データに比べ直接海面下の水塊分布についての情報を与えるという点で重要である。特に日本列島沿岸では月 1 回を原則とする都道府県水産試験研究機関の定線観測が維持されているので観測密度は比較的高い。外洋航路では篤志の一般商船による高密度観測が実施される場合があり、Fig.3 の南東部にその一部が見えている。

以上の観測データは、世界各国の関係者のたゆまぬ努力によって国際的なデータ交換の枠組みが整備されたため、インターネットを通じて即時的に誰でも容易に入手できるようになっている。海洋研究者にとって素晴らしい時代が実現していると言える。

3. 海洋大循環モデルとデータ同化

海流運動を推算するための海洋大循環モデルは、非圧縮性流体の運動を記述する物理方程式（ナビエ・ストークス方程式）と水温・塩分の輸送方程式を記述した計算プログラムである。海洋大循環モデルは地球規模の流体運動にとって重要なコリオリ力の効果を含んでおり、津波などの外部重力波に比べて比較的時間スケールが長いロスビー波等を効率よく表現できるように計算アルゴリズム

* 海洋研究開発機構・地球環境変動領域

** 東京大学大学院・新領域創成科学研究科

ムが工夫されている。

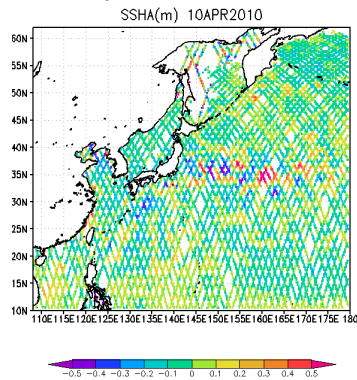


Fig. 1 Satellite sea surface height anomaly (in m) used for the initialization of the JCOPE2 forecast system on 10 April 2010.

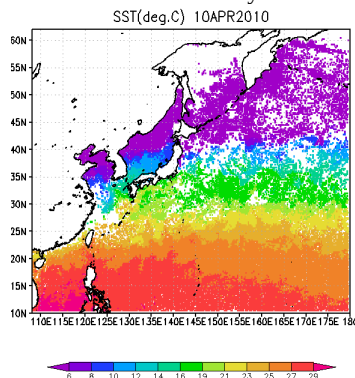


Fig. 2 As in Fig.1 except for satellite sea surface temperature (in deg.C).

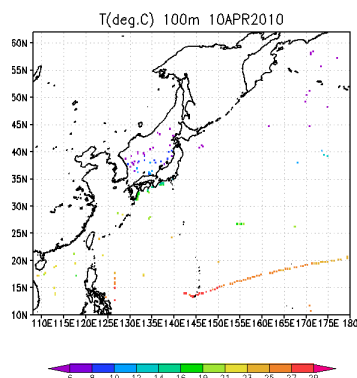


Fig. 3 As in Fig. 1 except for observed temperature at 100m depth.

地球規模の海洋運動は、大気の流れと熱による海表面の外力によって駆動される。海表面の外力はバルク式と呼ばれる経験式によって運動量および熱フラックスに変換して海洋大循環モデルに入力する。海上風、海上気温、海上湿度などの値は通常、数値天気予報の予報データを用いることが多い。特に海流を駆動する外力として重要になる海上風は、近年の衛星散乱計観測データの数値天気予報への同化によって再現精度が向上している。

海流運動は非線形現象なので、最初に観測値に近い状態から出発して計算を開始したとしても、外力や初期値のわずかな誤差が拡大して計算結果を歪めてしまう（予測可能性の限界）。そこで、データ同化と呼ばれる手法を用いて予報変数を定期的に観測データによって補正し、その都度予報していく必要がある。中規模変動による予

測可能性期間は渦や蛇行の変動時間スケールを反映し1-2 カ月³⁾である。データ同化による初期値の補正は週1回程度の頻度で行われることが多い。海上風等の外力の影響を直接受ける現象の予測可能性は外力の予測精度に依存する。

データ同化は、統計理論的には「線形不偏最小分散推定」となるように行われることがほとんどである。具体的には変分法とカルマンフィルターの2大系統がよく使われている。ただし、変分法およびカルマンフィルターをそのまま用いると、海洋大循環モデル自体の計算量をはるかにしのぐ膨大な計算量となるので、現業予測システムにおいてはこれらの手法を簡単化して用いることが多い。

4. JCOPE 数値海流予測システム

海洋研究開発機構・地球環境変動領域では、その前身である地球フロンティア研究システムの時代である1997年に「日本沿海予測可能性実験：Japan Coastal Ocean Predictability Experiment (JCOPE)」の一環として数値海流予測システム JCOPE の開発を始め、現在、定期的に予測システムを更新しその予測結果をウェブサイト上に可視化し公開している。

開発を始めた当初の研究目的は、海洋学上の謎であった日本南岸の黒潮大蛇行の形成過程の解明であった。幸いにも本予測システムによって実際に2004年8月に発生した黒潮大蛇行発生を3カ月前に予測することに成功した。さらにこの大蛇行形成が、台湾沖に生じた、従来まれにみるほど巨大な海洋渦と黒潮との相互作用に起因することを明らかにした⁴⁾。

研究を重ね、予測結果を公開していくうちに、同予測システムの出力データが、水産業、海上交通、海底開発等様々な分野の研究・産業応用に適用可能であることがわかった。現在、数値海流予測データを実利用者に実際に定期的に提供するとともに、同データの諸分野への活用を目的とした多くの共同研究を実施している。

5. 今後の展開

最近、一定の精度で定期的に予測できるようになった外洋の中規模海流変動と、波浪、潮汐、沿岸の海流変動等、より小さな時空間スケールの現象との間に生じている未知のスケール間相互作用に焦点を当てた研究を開始した。このようなスケール間相互作用の理解は、従来の海流モデリングにおいてなおも不十分であった、水塊形成に関係する乱流による水平・鉛直混合のモデリングを高精度化していくために必須である。また、スケール間相互作用を精度よく再現することによって、海洋生態系変動の解明といった種々の応用、すなわち海流予測研究の高付加価値化のために大変重要な、海流による移流や乱流混合によって生じる海洋中の物質輸送過程の解明に貢献することが期待できる。

スケール間相互作用について詳細に調べるには現在の主要なモデルで用いている水平10km間隔程度の格子では不十分であり、モデルをさらに高解像度化していく必要がある。また、従来は海流モデリングにおいて導入されていなかった波浪、潮汐、河川といった時空間スケールの異なる新たな外力を導入する必要がある。海上の風、気温、湿度等の海面の熱収支を決める物理量についても高解像度気象モデルの導入等によって高解像度化が必要が生じてくる。このような、モデルの単なる高解像度化にとどまらないモデリングの詳細化は「ダウンスケー

リング」と呼ばれる。結果として、最終的なダウンスケーリングは気象モデル・波浪モデルと海流モデルの双方向結合モデリングとなり、海流のみにとどまらず海上気象や波浪を含む「全海象」変動の理解と予測を可能にする。

現在行っているダウンスケーリングの一例を Fig. 4 に示す。Fig. 4 上図は、従来から運用を続けている水平約 10km (1/12 度) 格子のモデルによる 2010 年 4 月 10 日の紀伊半島沖の黒潮の現況推定である。前述した種々の観測データの同化により、観測 (Fig. 4 下図) に合うように黒潮流路の位置をよく再現していることがわかる。暖かい黒潮系水と冷たい沿岸水の間に前線 (黒潮前線) が形成されていることもわかる。Fig. 4 中図は、水平 1km (1/108 度) 格子までダウンスケーリングした結果である。黒潮流路の位置は変わらないが、黒潮前線の細かな変動がより顕著に表現されている。特に、黒潮が四国の室戸岬や紀伊半島南端の潮岬に近づき、それぞれの岬の西側に暖水波及を引き起こしている様子が観測 (Fig. 4 下図) に近い形で表現されている。潮岬の西側では暖水波及を伴う北西向きの流れと黒潮前線に沿って南東方向に流れる流れが分岐している。これは紀南分岐流と呼ばれる沿岸の海流変動であり、「振り分け潮」として古くから知られている現象である。また潮岬の東側では黒潮前線の勾配が強くなり結果として黒潮の流れも加速している。この現象も熊野灘沖の黒潮急加速現象として従来から知られている。理論解析によって、急加速現象は、黒潮と海底地形の相互作用による地球流体力学的「跳水」現象として解釈できることがわかった⁵⁾。また図には示さないが、計算結果には、潮岬の東では急加速領域が断続的に形成され、黒潮流路に沿って下流側に射出されていく様子が表現されていた。Waseda ら (2003)¹⁾は、約 10km 格子のモデルを用い、黒潮と陸岸地形との相互作用によって生成された小さな渦が下流に伝播しそこの黒潮流路変動に影響を与えるというスケール間相互作用の存在を示唆しているが、ダウンスケーリングにより、より具体的な相互作用の描像が明らかになりつつある。

ここで、Fig. 4 で紹介したような、ダウンスケーリングによって新たに表現可能となった現象の時空間スケールについて整理しておこう⁶⁾。地球流体で重要となる回転と成層の効果を表す無次元数であるロスビー数 $\varepsilon = 2\pi L\Omega/U$ と内部フルード数 $\sigma = (1/2)\rho_0 U^2 / \Delta\rho gH$ が同程度となる時空間スケールを考えると、 $\varepsilon \sim \sigma \sim 1$ とすれば、

$$L \sim \frac{2\pi}{\Omega} \sqrt{\frac{2\Delta\rho gH}{\rho_0}} \quad U \sim \sqrt{\frac{2\Delta\rho gH}{\rho_0}}$$

と表すことができる。地球の海洋では、 $\Omega = 7.29 \times 10^{-5} (1/s)$, $g = 9.81 m/s^2$, $\rho_0 = 1028 kg/m^3$, $\Delta\rho = 2 kg/m^3$ である。これに黒潮や中規模渦の鉛直構造のスケールである海洋主温度躍層の厚さのオーダーである $H = 1000m$ を代入すると、 $L \sim 500km$, $U \sim 6m/s$ を得る。これは海流中規模現象に対応する時空間スケールであるとみなすことができる。他方、 $H = 10m$ を代入すると、 $L \sim 10km$, $U \sim 0.2m/s$ となる。これが、中規模スケールよりさらに小さい、中規模以下スケール (サブメソスケール) である。サブメソスケールは中規模現象の縁 (前線) に形成される層厚の薄い現象であり、ダウ

ンスケールした場合、中規模現象の前線部に頻出してくる。地球流体力学に従うので方程式系は従来どおりのものでよいが、空間スケールが 10km なので、陽に表現するためには 1km 程度の空間格子が必要である。層厚が薄いので、風や大気熱など海表面外力の影響が大きい。予測可能性を考えると、中規模現象の縁の部分に形成されるので中規模現象の予測可能性の影響を受けるが、表面外力算出の元となる数値天気予報の精度から、高々 1 週間程度の予測可能性しかもたない表面の外力の影響も大きいので、結果として 1 週間程度の予測可能性期間であると考えられる。

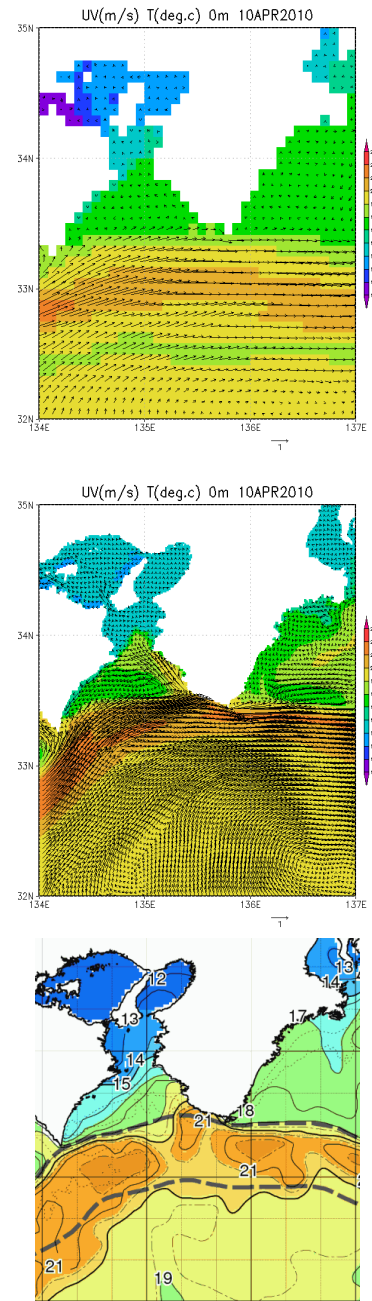


Fig. 4 Upper: Daily mean snapshot on 10 April 2010 of surface flow (in m/s) and temperature (in deg.C) calculated by the JCOPE2 ocean forecast system with 1/12 degree grids. Middle: As in upper panel except for calculated by the JCOPE2 downscaling forecast system with 1/108 degree grids. Lower: Observed sea surface temperature (in deg.C) on 10 April 2010 created by the local fishery research agencies. Dashed contours indicate the main axis of the Kuroshio.

従来、海流モデルにおいて 1 日以下の変動が卓越する潮汐変動は水平・鉛直混合過程として陰的に取り扱われることがほとんどであった。我々は新たに汎用的な潮汐モデルを開発しこれを高解像度（水平 2km 格子）黒潮予測モデルに陽的に導入した⁷⁾。その結果、沿岸域での潮汐混合効果以外にも、薩南諸島や小笠原諸島のような地形変化に富んだ沖合海域で、内部潮汐の発生とそれによる密度場の変化が見られた。また、潮汐を考慮しない黒潮モデルと比較すると、潮汐を取り込んだ黒潮モデルでは、トカラ海峡東部の黒潮離岸、豊後水道沖の黒潮接岸、および四国沖から小笠原諸島までの黒潮の離岸が見られた。このような黒潮流軸変化にตอบสนองして黒潮本流から沿岸域までの密度場や流動場も変化することがわかった。

紀伊半島周辺海域において、潮汐の有無による結果の違いを示したのが Fig. 5 である。潮汐の導入により、鳴門海峡を通過する強い潮汐流が陽に表現されている。また、潮汐によって表現された水平・鉛直混合の効果によって沿岸水の温度が低下していることもわかる。これに伴い、黒潮水の暖水波及が抑制されているようにみえる。ただし、黒潮の本体温度が潮汐ありのモデルの場合高めになっているが、潮汐ありのモデルでは海表面の外力を計算するバルク式を変更していることもあり今後検討を要する。

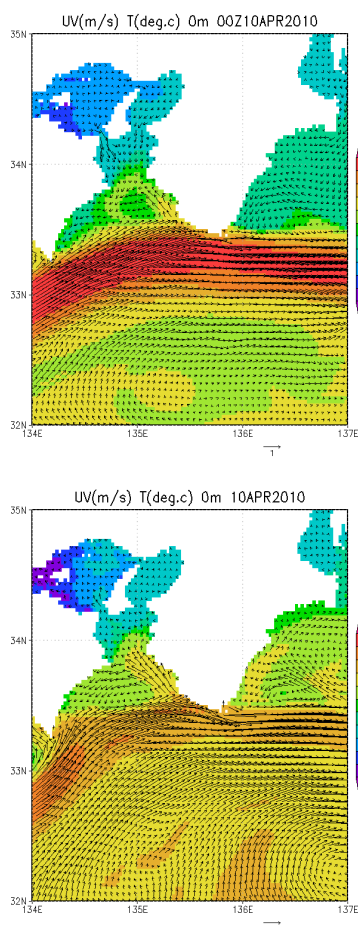


Fig. 5 Upper: hourly mean snapshot of surface flow (in m/s) and temperature (in deg.C) on 00UTC 10 April 2010 calculated by the tide resolving JCOPE2 ocean forecast system with horizontal 3km (1/36 degree) grids. Lower: As in upper panel except for daily mean snapshot on 10 April 2010

calculated by the non-tide resolving system.

ダウンスケーリングを進める一方、予測対象海域そのものは現在、地球シミュレータ 2 の活用により全球規模になっている(Fig.6)。今後、全球規模海流予測システムとダウンスケーリングの組み合わせにより、今や日本周辺だけでなく世界各地の海流変動を詳細に理解し予測することが可能になったと言える。

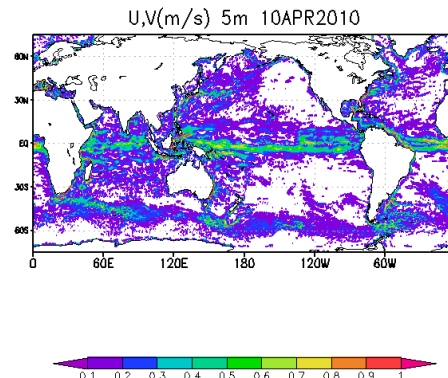


Fig. 6 Daily mean snapshot of magnitude (in m/s) of surface flow on 10 April 2010 calculated by the semi-global ocean forecast system.

今後の数値海流予測の最も重要な応用は、海洋中の物質輸送過程の解明であると考えられる。従来、最も把握が難しかった海洋の物理量が海流であり、観測と数値海流予測技術の双方がさらなる発展をとげれば、数値海流予測データは、いまだ未知の海洋中の物質輸送過程の解明のために決定的な役割を果たす可能性がある。そして最終的には、プランクトンや卵稚仔魚⁸⁾等、海流による物質輸送過程に著しく影響を受ける海洋生態系の詳細な予測の実現のために確かな役割を担っていくに違いない。

参考文献

- 1) T. Waseda *et al.* : On the eddy-Kuroshio interaction: Meander formation process, J. Geophys. Res., Vol108, 2003, NO. C7, 3220, doi:10.1029/2002JC001583.
- 2) Y. Miyazawa *et al.* : Roles of meso scale eddies in the Kuroshio paths, J. Phys. Oceanogr., Vol34, 2004, pp.2203-2222.
- 3) Y. Miyazawa *et al.* : Ensemble forecast of the Kuroshio meandering, J. Geophys. Res., Vol110, 2005, C10026, doi:10.1029/2004JC002426.
- 4) Y. Miyazawa *et al.* : The Kuroshio large meander formation in 2004 analyzed by an eddy-resolving ocean forecast system, J. Geophys. Res., Vol113, 2008, C10015, doi:10.1029/2007JC004226.
- 5) T. Miyama and Y. Miyazawa : Sudden acceleration of Kuroshio jet off the Cape Shionomisaki in JCOPE2 ocean reanalysis data, Abstracts of 2010 Ocean Sciences Meeting, PO23.
- 6) B. Cushman-Roisin : Introduction to Geophysical Fluid Dynamics, 1994, Prentice Hall.
- 7) 郭新宇ほか : 入れ子手法による沿岸海洋モデリング, 沿岸海洋研究, 47 号, 2010, pp.113-123.
- 8) K. Kiyomatsu *et al.* : The biomass fluctuation of Japanese Sardine (*Sardinops melanostictus*) and the bimodality of the Kuroshio and its extension, submitted., 2010.