

海洋の渦・前線とそれらが生み出す大気海洋現象の解明

課題責任者

野中 正見 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ

著者

木戸 晶一郎*¹, 佐々木 英治*¹, 野中 正見*¹

*¹ 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門アプリケーションラボ

キーワード: 海洋サブメソスケール現象、中規模渦、西岸境界流、超高解像度海洋シミュレーション、海流経年変動予測

1. 本課題の概要

本課題では、高解像度海洋大気シミュレーションにより、①黒潮等の西岸境界流に伴う海面水温前線や中規模渦などの海洋局所構造の変動が、海洋や大気の大規模な循環の形成・変動に果たす役割、②高解像度領域モデルにより台風や爆弾低気圧と海洋との相互作用によって生じる影響、等々を明らかにすることを目的とする。これにより、気候変動予測や地球温暖化予測では従来ほとんど考慮されていない、海洋局所構造の変動とそれらが引き起こす大気海洋現象に対する知見を深め、地球気候の理解と予測の発展に貢献することを目指している。

令和4年度の成果から、特に海洋微細構造とそれが海面水温に及ぼす影響に注目した解析と黒潮続流、メキシコ湾流といった強い海流の経年変動の予測に関する成果を紹介する。

2. 超高解像度北太平洋シミュレーション

海洋の渦・前線は、海面水温の水平勾配が大きいため、海洋から大気に熱が放出される冬季に、海洋から大気循環への大きな影響があり、近年では数多くの研究が行われている。また、海洋の微細現象である数キロメートルから数10キロメートル規模のサブメソスケールの渦や筋状現象は、海洋内部のスケール間相互作用や物質輸送に影響を及ぼすが、大気にも影響を及ぼしうる可能性が考えられるようになってきた。

海洋のサブメソスケールの微細現象は、さまざまなメカニズムで生成される。外洋域では海洋が冷却される冬季に深い混合層で傾圧不安定が起き、サブメソスケールの渦や筋状現象が活発になる。この傾圧不安定で混合層内の有効位置エネルギーが運動エネルギーに遷移し、海洋表層の成層が強くなることが知られている。

また、海洋の微細現象を広範囲で観測することは困難であったが、2022年12月に海面高度を高解像度で捉え得る衛星 SWOT (<https://swot.jpl.nasa.gov/>) が打ち上げられ、サブメソスケールの渦や筋状現象が観測されることが期待されている。一方、サブメソスケール現象を再現し得る高解像度シミュレーションが実施されてきたが、混合層内の傾圧不安定で生成される微細現象のスケールは高緯度ほど小さくなると予想され、その現象を十分に解像するためには、水平解像度 1km 以上の高解像度が必

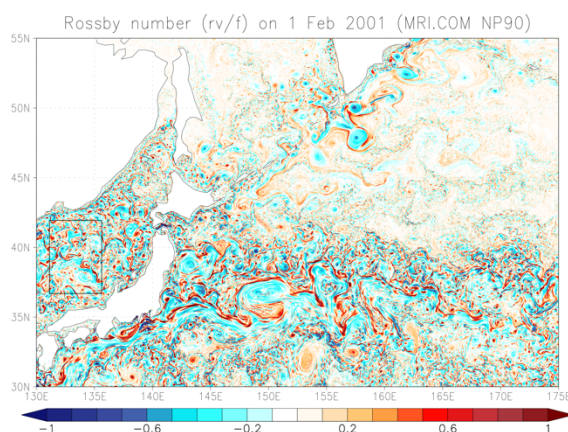


図1. 北太平洋領域、水平解像度 1/90 度の気象研究所共用海洋モデル(MRI.COM)の2001年2月1日の日平均海面流速から求めたロスビー数(相対渦度/コリオリパラメーター)

要と考えられている。

我々の課題では、これまでに水平解像度 3 km の高解像度北太平洋シミュレーションを実施し、昨年度の Annual Report で、冬季に活発なサブメソスケールの海洋微細現象の経年変動を示し、その変動は混合層内の傾圧不安定の強度の変動に起因することを報告した[1]。そこで、今年度は高緯度の亜寒帯域のサブメソスケール現象を十分解像し得る水平解像度が約 1 km (1/90 度) で、北太平洋域の超高解像度シミュレーションを気象研究所共用海洋モデル(MRI.COM) [2] を用いて、2000年、2001年の2年間実施(以下、解像モデル)した。

解像モデルの2年目の2001年2月1日のロスビー数の分布(図1)では、活発なサブメソスケールの微細現象が、黒潮、黒潮続流の周辺、日本海、クリル諸島周辺、および沿岸域で見られた。一方、北西太平洋のおよそ北緯42度以北の亜寒帯の外洋域では、弱い微細現象が分布しているが、黒潮続流域と比較すると活発ではなかった。この要因は、シミュレーションの解像度が不十分のためではなく、黒潮続流域と比較すると混合層の深さが浅く、海面密度の南北勾配が弱い(図略)ため、表層に蓄積される有効位置エネルギーが小さく、混合層での傾圧不安定が弱いためと考えられる。

また、並行して実施した水平解像度のみを約 3km (1/30

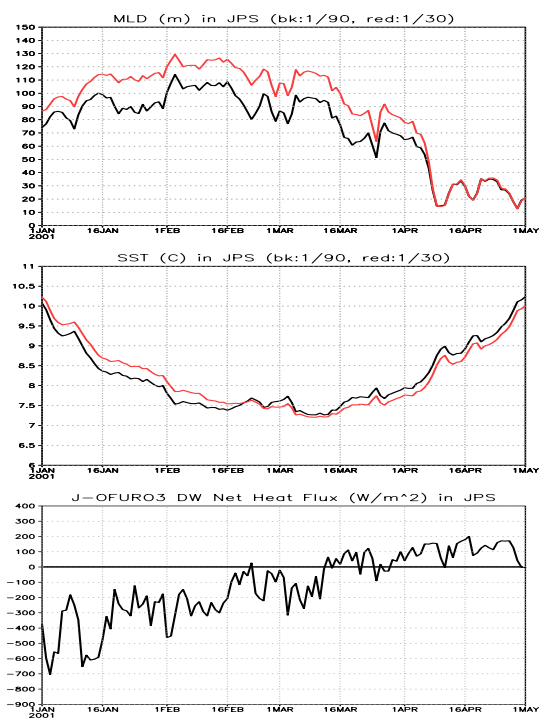


図2. 水平解像度 1/90 度 (黒線) と 1/30 度 (赤線) の日本海 (図1の矩形領域: 東経 131-136 度、北緯 37-42 度) の(上図)混合層厚さ (m)、(中図)海面水温 (°C) と衛星観測 J-OFURO3 の下向き海面熱フラックス (W/m^2) の 2001 年 1 月から 4 月の時系列。

度) に変更したシミュレーション (以下、許容モデル) との比較も実施した。注目した海域は冬季に大陸からの北西季節風にさらされる日本海 (東経 131-136 度、北緯 37-42 度) で、その領域の混合層深 (図 2 上図) と海面水温 (図 2 中図) の 2001 年 1 月から 4 月の変動を調べた。

解像モデルの混合層深 (黒線) は 2 月初旬に最深の約 114m に達しているが、許容モデル (赤線) は約 130m とさらに深くなっていた。その差は、1 月中旬から 3 月中旬まで 15m から 20m で継続し、その後徐々に小さくなり、4 月初旬にほとんどなくなっていた。この混合層深の差は、解像モデルが冬季の活発なサブメソスケール現象を解像することで、再成層化がより強くなり、許容モデルの混合層深よりも浅くなったと考えられる。また、海面水温 (図 2 中図) は、1 月から 2 月中旬まで解像モデル (黒線) が許容モデル (赤線) より低く (およそ $0.3^{\circ}C$)、その水温差は 2 月下旬以降に反転、解像モデルの方が高温 (およそ $0.2^{\circ}C$) になっていた。

上記のモデル間の混合層深と海面水温の差の要因について検討するため、衛星観測の海面熱フラックス (図 2 下図) を調べた。その時系列を見ると、1 月から 2 月中旬までは、海洋が $200 W/m^2$ 以上の大きな熱を大気に放出、その熱放出はその後に減少、3 月 10 日頃から反対に海洋は大気から熱を受け、4 月以降は約 $100 W/m^2$ に達していた。一方、モデル間の海面水温差は、解像モデルの方が許容モデルより 2 月 20 日以前は低く、3 月中旬以降に高くなっていた。この海面水温差の反転は、混合層深が浅い解

像モデルの方が、熱フラックスに対する海面水温の感度が大きいと考えられる。

本報告ではサブメソスケールを解像する超高解像度の北太平洋シミュレーションで再現された北西太平洋域の冬季のサブメソスケールの分布を示し、さらにサブメソスケール許容モデルとの比較により、冬季に活発なサブメソスケール現象による海洋表層の再成層化が海面温度に影響を及ぼしうることを示唆した。今回注目した日本海の冬季の海面水温は、日本海側の積雪に影響を及ぼすことが知られており、サブメソスケール現象が海面水温を通じて大気に影響を与える一つの可能性を示唆している。

3. 準全球渦解像海洋予測システムによる西岸境界流変動の予測可能性の検証

黒潮およびメキシコ湾流はそれぞれ北太平洋/北大西洋を流れる西岸境界流であり、風成循環の重要な構成要素として知られている。両海流の時空間変動は我が国を含めた中緯度域での沿岸気象や漁獲高などにも幅広い影響を及ぼすことから、そのメカニズムを正しく理解した上で予測を行うことは、社会経済活動の観点からも重要であると言える。近年の衛星観測や高解像度海洋モデルを用いた研究によって、西岸境界流の変動を引き起こしうる物理的な要因の理解が進みつつあるものの、実際に観測された西岸境界流の年々変動が現業的どの程度のスキルで予測可能であるのかという点については、未だ明らかになっていない。そこで本研究では、新たに構築した準全球海洋再解析・予測システム JCOPE-FGO [3]を用いた過去予測実験を行うことで、黒潮およびメキシコ湾流の予測可能性を検証した。

今回は予測実験として、JCOPE-FGO の再解析場から得られた 1994-2019 年の各年の 1 月 1 日の状態を初期値として 30 年間、データ同化をかけない状態で 30 ヶ月海洋大循環モデルを積分した。大気外力変動および海洋初期値が予測にもたらすインパクトの相対的な重要性を調べるため、境界条件に用いる大気/河川外力として (1) 経年変動を含む場合 (ReaFor 実験) および (2) 気候値のみの場合 (ClimFor) を用いた 2 種類の実験を行った。さらに、系の非線形性に起因する、外力によらない変動の影響を考慮するため、両実験とも初期値がわずかに異なる 5 つのアンサンブルメンバーの元で行った。これは海洋大循環モデルを 650 年分 (=2.5 年 × 5 メンバー × 26 ケース × 2 種類) 積分することに相当する。

予測実験から得られた黒潮/メキシコ湾流の流速を衛星観測と比較したところ、ReaFor/ClimFor 実験ともに観測された年々変動を適切に捉えていることが明らかになった。実際、観測と予測結果の Root mean squared error (平均二乗誤差) を用いてスキル評価を行ったところ、両実験ともに持続予報を大きく上回るスキルを有しており (図 3)、1-2 年先まで有意な予測可能性が見られた。黒潮・メキシコ湾流の流速の増大/減少は両海域の中規模渦の活動度を変調させることが近年報告されているが、

今回新たに開発したシステムはこうした渦活動の年々変動についても(特にジェットの下流において)適切に予測することができていた。さらに、予測可能性をもたらすシグナルを同定するため、再解析および予測から得られた海面高度場や風との対応を検証した。その結果、流速変動の予測には主に海盆内部で作られたシグナルおよびその西方への伝播が重要であり、西岸境界流直上の外力の影響は二次的であることが明らかになった。本研究の結果は、渦を陽に解像する海洋大循環モデルをデータ同化によって適切に初期化した上で積分することによって、西岸境界流の変動を1-2年先まで現業的に予測することが可能であるということを示唆している。詳細な解析結果については現在論文投稿中である。

速はジェットの流軸上で計算した海面での地衡流速を145°-160°E (70°-55°W)の経度幅で東西平均したものであり、また経年~十年規模変動を取り出すため13ヶ月の移動平均をかけている。

謝辞

本研究はJSPS 科研費19H05701の支援を受けています。

文献

- [1] H. Sasaki, B. Qiu, P. Klein, M. Nonaka, and Y. Sasai, "Interannual variations of submesoscale circulations in the subtropical northeastern Pacific," *Geophysical Research Letters*, vol.49, no.7, e2021GL097664, 2022.
- [2] K. Sakamoto, H. Nakano, S. Urakawa, T. Toyoda, Y. Kawakami, H. Tsujino, and G. Yamanaka, "Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model version 5 (MRI.COMv5)", *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, no.87, 357pp., 2023.
- [3] S. Kido, M. Nonaka, and Y. Miyazawa, "JCOPE-FGO: an eddy-resolving quasi-global ocean reanalysis product," *Ocean Dynamics*, vol.72, no.8, pp.599-619, 2022.

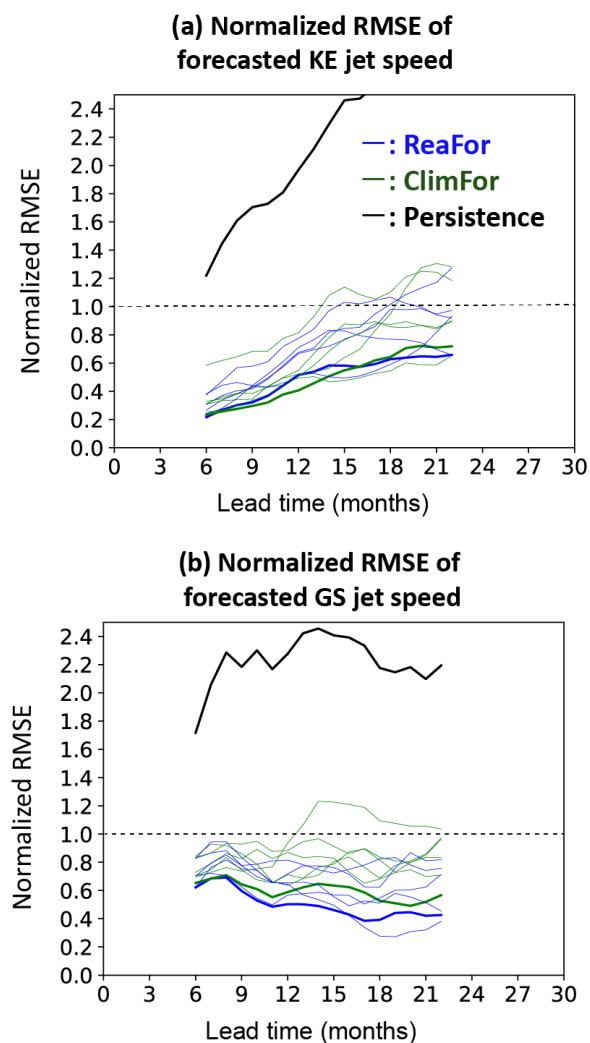


図 3: リードタイム毎に計算した、(a)黒潮続流 および (b)メキシコ湾流の予測スキル(観測と予測結果の平均二乗誤差:RMSE を規格化したものとして定義)。黒線は持続予報、青線はReaFor、緑線はClimFor のRMSE を表している。また、5メンバーのアンサンブル平均に対する結果は太線で、それぞれのアンサンブルメンバーに対する結果は細線で示してある。なお、黒潮続流(メキシコ湾流)の流