

第5回研究助成

## 海洋4次元地図帳:モデリングと可視化のニューフロンティア

プロジェクトリーダー

升本 順夫 東京大学大学院理学系研究科

プロジェクトメンバー

佐々木英治 海洋研究開発機構

東塚知己 東京大学大学院理学系研究科

**Patrice Klein** フランス国立海洋開発研究所

荒木文明 海洋研究開発機構

**Jim Potemra** ハワイ大学国際太平洋研究センター

山形俊男 海洋研究開発機構

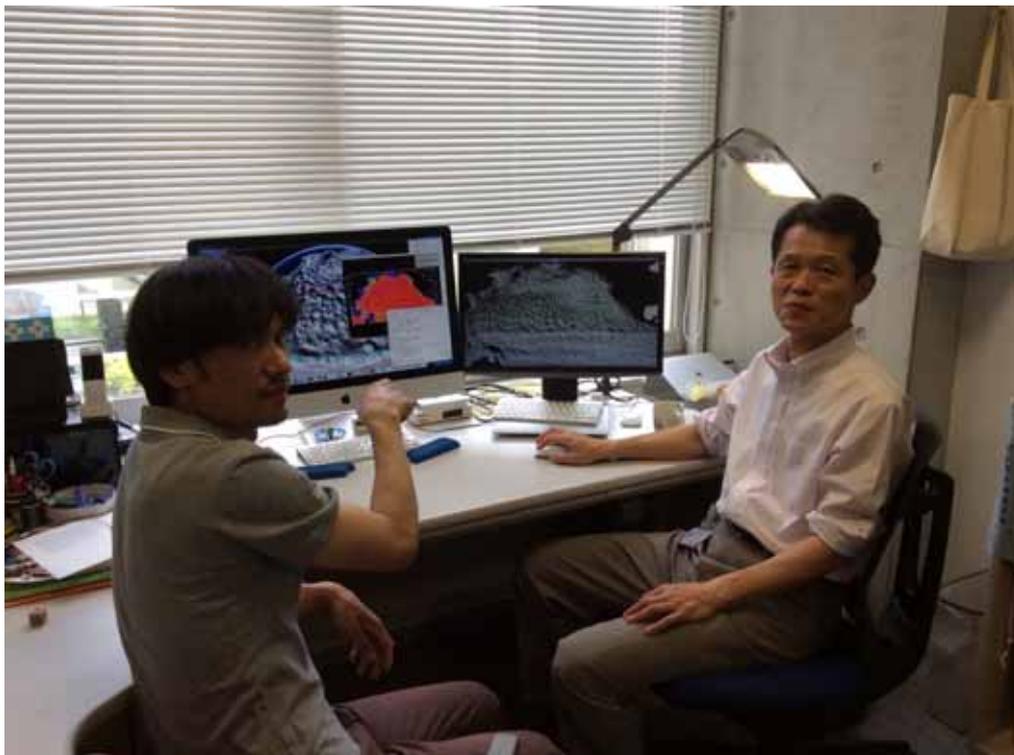
竹村真一 京都造形芸術大学



ポストドク研究員

青木 邦弘(東京大学大学院理学系研究科、現:海洋研究開発機構研究員)

伊原 千絵(東京大学大学院理学系研究科)



高解像準全球モデルの結果を見ながらサブメソスケール現象の議論が進む  
(左から青木邦弘氏、佐々木英治氏)

## 1. 研究の背景と達成目標

### (1) 研究の狙い

近年の海洋モデリングは、大洋規模の循環系を現実的に再現するとともに、中規模渦程度(メソスケール;数十～百キロメートル規模)の空間規模を持つ現象も解像し、両者の関連性を議論できるまでに発展してきている。現在、さらに1段階空間規模の小さなサブメソスケール(数キロメートル規模)現象を再現できるシミュレーションが行われるようになっている。しかし、その多くは素過程に着目していることや計算資源の制約などから、異なるスケール間の関連まで含めた研究はほとんど行われていない。そこで海洋モデリングの新時代を切り開くため、サブメソスケール現象を再現できる大洋規模の海洋シミュレーションに挑戦し、海洋変動におけるメソスケール・サブメソスケール現象の特性把握や、それらの現象と大規模循環との相互作用に関する新たな知見を蓄積する必要がある。また、得られる膨大なデータに対して最新の可視化技術を用いて「海洋4次元地図帳」を作成し、研究者や一般社会などの様々なレベルに対して新たな海洋循環像を分かりやすく示すことが求められている。

### (2) 研究項目毎の目標

そこで、シミュレーションの実施、結果の解析研究、可視化とデータ公開という3つの研究活動項目を作り、それぞれに以下の目標を設定した。

#### ① サブメソスケール現象を再現できる大洋規模の海洋シミュレーション

全球規模でサブメソスケール現象を再現できる海洋モデルを構築し、数年単位での積分を行うことで、サブメソスケール現象の時空間特性を把握するための基礎データを作成する。

#### ② サブメソスケール現象の特性や大規模循環との相互作用の研究

上記のシミュレーション結果を利用して、サブメソスケール現象の時空間特性、メソスケール(中規模)渦や海流系変動との関連や相互作用に関する研究を行う。

#### ③ シミュレーション結果の提供、新たな海洋循環像の可視化

国際的な研究コミュニティーにデータを公開する。また、新たな可視化手法を取り入れ、効果的な結果の提示方法を検討する。

## 2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

- ・ サブメソスケール解像の準全球モデル用いた2年間のシミュレーションを実現し、世界にも類を見ないデータセットを作成  
作成されたデータの一部は、国際的に知られたデータセンターを通じて世界の研究者へ提供。サブメソスケール現象に興味を持つ多くの研究者に注目されており、今後、このデータの解析結果として多くの成果が期待される。
- ・ サブメソスケール現象や中規模渦等の変動や発展を効果的に可視化する手法を開発  
渦やストリーマー構造などの鍵となる現象を正しく検出し、その移動、分離、統合などの時間発展を簡単に抽出することが可能となり、研究者の解析用ツールとして、また専門外の方への分かりやすい説明用に効果を発揮することが期待される。
- ・ サブメソスケール現象の時空間特性や中規模渦変動の特性などで新たな知見  
サブメソスケール現象の季節変動や空間分布に関する結果や、黒潮続流域での中規模渦と平均流との相互作用に関する結果は、関連研究分野で世界をリードする成果の発信となっている。

### 3. 研究成果

#### (1) 全球規模の高解像度海洋シミュレーション

2000年代はスーパーコンピュータの飛躍的向上により、100 km 規模の中規模渦を解像する高解像度海洋シミュレーションが可能となり、中規模渦だけでなく西岸境界流の離岸や海洋前線を含めた海洋循環を現実的に再現できるようになった。一方、衛星観測の画像解析やさらに解像度を高めた理想化数値実験などにより、数 km から数十 km のサブメソスケール現象が海洋循環場に及ぼす影響も無視できないことが示唆されるようになった。そこで、サブメソスケール現象を相当程度に解像する 3 km の水平格子間隔を用いた全球規模の高解像度海洋シミュレーションを実施した。

海洋大循環モデルは OFES (OGCM for the Earth Simulator) を用い、領域は極域を除く南緯 76 度から北緯 76 度の準全球とした。水平解像度は 1/30 度 (約 3 km)、鉛直レベル数は 105 層、最大深度は 7,500 m としている。本モデルを駆動する際の初期値は、水平解像度 1/10 度の過去再現実験で得られた水温と塩分の 2000 年 1 月 1 日の出力値を用い、静止状態から JRA55-do ver0.8 の 3 時間毎の大気再解析データを用いて 2000 年と 2001 年の 2 年間のシミュレーションを行った。

サブメソスケール現象の時空間変動が全球規模でどのように再現されているかを確認するため、表層水平流速の相対渦度分布を、微細現象が十分に発達していることが期待される 2001 年の 3 月と 9 月について図 1 に示す。相対渦度は、中規模渦やサブメソスケール現象に伴って流れが空間的に大きく変化している場所で大きな値を示すため、サブメソスケール現象の発生場所などを見る際に有効な指標となる。3 月 1 日の相対渦度分布は、冬半球に相当する北半球の西岸境界流である黒潮や大西洋の湾流域で、活発な微細渦や筋状構造の発達に伴って大きな値を示しており、さらに西部太平洋の北緯 20 度付近の亜熱帯反流の流域でも数多くの微細現象が見られている。夏半球に相当する南半球では、1 年を通じて中規模渦やサブメソスケール現象が多く見られる南極

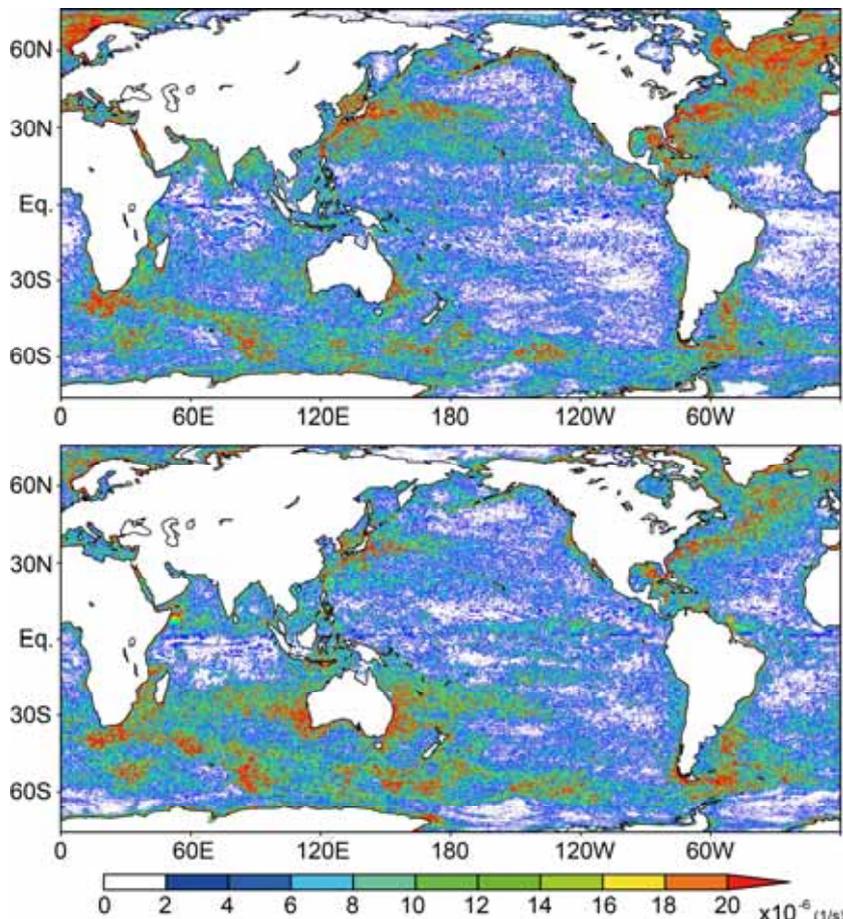


図 1: 準全球高解像度シミュレーションにより得られた海面流速の相対渦度の大きさ。(上图)2001年3月1日および(下图)9月1日の分布。相対渦度は流れのシアにより海水を回転させようとする度合いを示す量で、中規模渦やサブメソスケール現象が存在すると大きな値を示す傾向があるため、微細構造を表す指標ともなる。

周極流海域を除くと、活発なサブメソスケールの微細現象はあまり見られない。一方、9月1日の相対渦度分布では、冬半球に相当する南半球で、南緯20度付近のインド洋と西部太平洋の亜熱帯反流の流域で微細現象が活発になっている。夏半球に相当する北半球では、西岸境界流、亜熱帯反流の流域で冬季に活発であった微細現象が穏やかになっていることがわかる。

このようなサブメソスケール現象の季節変動には、海洋表層に発達する混合層内での不安定過程が関わっていると考えられており、全球規模で季節変動を示す結果は他にない。また、新たに興味深い特徴も見られている。例えば、大西洋の湾流は北大西洋海流として北東に高緯度まで延びているが、冬季に活発な微細現象のスケールは高緯度ほど小さくなっている。海洋変動の代表的な空間規模は高緯度ほど小さくなる一般的特徴はあるものの、その他の要因が寄与している可能性も大きい。また、南極周極流の流域では、微細現象の明確な季節変動が見られない。この要因として、鉛直密度構造の季節変動が小さいことが考えられる。これらの詳細は今後の研究テーマとして残されている。

## (2) 中規模渦の黒潮続流への影響

黒潮は日本東岸で離岸した後、黒潮続流と呼ばれる定常的な東向きの強流(ジェット)を形成する。このジェットは、その始点からしばらく強流を維持した後、東に向かって次第に減衰する。この単純な様相に反して、黒潮続流の形成機構はほとんど解明されていない。その理由の一つが、黒潮続流の定常状態が、自らの不安定によって生成した渦との相互作用の結果として成立することにある。この種のジェットと渦の相互作用では、渦の引き起こす水平的な運動量輸送(レイノルズ応力)が重要な役割を担っている。本研究では黒潮続流の形成機構解明に向けて、定常状態における力学バランスから黒潮続流の定常状態実現のためのレイノルズ応力の役割を調べた。本研究を行うに当たっては、中緯度亜熱帯循環系とともに中規模渦を完全に再現できる解像度を持つモデルの利用が不可欠であり、OFESの結果は理想的な解析対象となる。

定常的な黒潮続流の維持において、レイノルズ応力は上流と下流で異なる役割を持つ。上流ではレイノルズ応力はジェットの減速に寄与し、下流では逆に加速に寄与する。下流における結果は、一見すると黒潮続流が東に向かって減速するという事実と矛盾する。しかし、下流のレイノルズ応力は同時に流下方向への圧力の増大をもたらすため、これによって黒潮続流の減速が実現される。この圧力増大は地衡流とは異なる南向きの流れ(非地衡流と呼ぶ)の発生と対応し、それに伴うコリオリ力によって黒潮続流が減速されることが示唆された。

この結論を導く上で注意すべきは、レイノルズ応力が動圧を発生させることである。動圧は発散場を与えるだけであり、回転場が支配する黒潮続流等の西岸境界流の力学には影響しない。この動圧はまた、黒潮続流の減速をもたらすのと同様な非地衡流循環場を形成する。そこで、黒潮続流の定常状態の力学を正しく理解するために、動圧に伴う非地衡流循環場がどのような過程を経て形成されるかを調べた。

レイノルズ応力の作る動圧の一つは、渦の運動エネルギーである。定常場では、渦の運動エネルギーは黒潮続流上に極大を取り、その極大を右に見た時計回りの非地衡流循環場が形成される(図2)。定常場はその時の瞬間場を“蓄積”した状況であるので、個々の瞬間場を調べたところ、リング状に分布した渦の運動エネルギー上に時計回りの非地衡流が生じており(渦の極性によらない)、さらに、これらは良い近似で、非地衡流と遠心力がバランスした旋向風バランスの関係にあることが分かった。

定常状態での渦の運動エネルギー周りの非地衡流循環場の形成は、旋向風バランスした渦の広い範囲での発生(渦の移動も含む)によって説明される。すなわち、渦がある一点にしか見出されない場合、それが作る平均場は瞬間場と同じであるが、渦が広い範囲に分布する場合は、非負性を持つ渦の運動エネルギーは領域内部で極大化する一方で、単一の極性を持つ非地衡流循環場は内部で相殺が起きて大規模化するからである(ストークスの定理のアナロジー)。図3は、この本質を表す簡単なモデルでの実証として、黒潮続流域に発生する渦を全て軸対称渦で書き換えた場合の結果であるが、渦の運動エネルギーの極大域を右に見た非地衡流循環場がよく再現されているのが分かる。

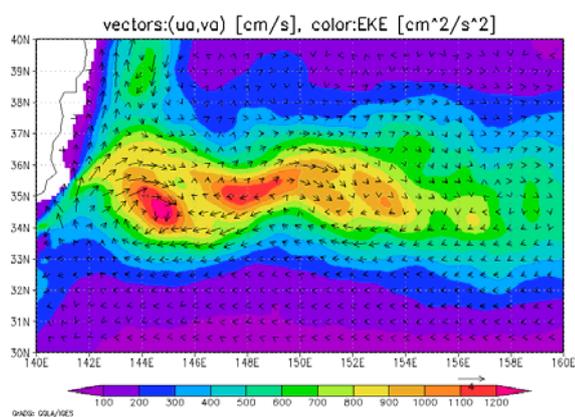


図 2: 表層における非地衡流(ベクトル)と渦運動エネルギー(陰影)の関係(深度 200 m)。単位はそれぞれ、 $\text{cm s}^{-1}$  および  $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$

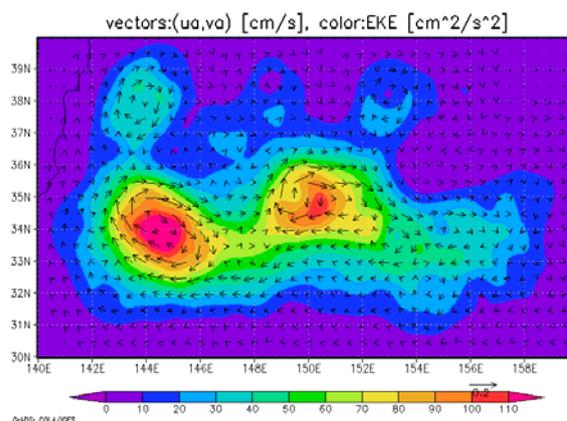


図 3: 理想化したモデルの結果であることを除いて図 2 に同じ。このモデルでは、領域に発生する全ての渦について、その海面高度(表層の圧力場)を軸対称形に書き換えてから渦の運動エネルギーと非地衡流を計算し、その時間平均を算出している。海面高度の軸対称化では、振幅が 50 cm で分散が 100 km の二次元ガウス分布を採用している。

#### 4. 今後の展開

サブメソスケール現象の研究は、世界的に見てもまだ緒についたばかりである。本プロジェクトで行った計算を継続し、さらに長期のデータセットを作成することで、サブメソスケール現象を中心に据えたスケール間相互作用の研究という新たな研究分野の展開が期待できる。また、米国で 2020 年に打ち上げ予定の SWOT 衛星や JAXA で計画中の COMPIRA 衛星等のサブメソスケール現象をターゲットとする衛星プロジェクトの事前基礎データを提供することにもなり、地球観測ミッションへの貢献も大きい。また、サブメソスケール現象は海洋表層における生物活動や生態系変動にも大きく影響を及ぼしていると考えられているため、本プロジェクトで得られた成果は、海洋における物理、化学、生物過程の統合的理解にも大きく貢献するものとなる。

#### 5. 発表実績

##### 論文

- 1) Aoki, K., and Y. Masumoto (2017), The Reynolds stress caused by accumulation of axisymmetric geostrophic eddies, *J. Fluid Mech.* (submitted)
- 2) H. Sasaki, P. Klein, Y. Sasai, and B. Qiu (2017), Regionality and seasonality of mesoscale and submesoscale turbulence in the North Pacific Ocean, *Ocean Dyn.* (in revision)
- 3) Ogata, T., M. Nagura, and Y. Masumoto (2017), Mean subsurface upwelling induced by intraseasonal variability over the equatorial Indian Ocean, *J. Phys. Oceanogr.* (in press)
- 4) Qiu, B., S. Chen, P. Klein, C. Ubelmann, L.-L. Fu, and H. Sasaki (2016), Reconstructability of 3-dimensional upper ocean circulation from SWOT sea surface height measurements. *J. Phys. Oceanogr.*, **46** (3), 947-963.
- 5) Matsuoka, D., F. Araki, Y. Inoue, and H. Sasaki (2016), A New Approach to Ocean Eddy Detection, Tracking and Event Visualization -Application to the Northwest Pacific Ocean-, *Procedia Computer Science*, **80**, 1601-1611.
- 6) Matsuoka, D., F. Araki, and Y. Yamashita (2015), Multiple Scatter Plots based Multi-Dimensional Transfer Function

and its Application to Ocean Data Visualization, *Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering*, **2** (2), 292-308.

- 7) Qiu, B., S. Chen, P. Klein, H. Sasaki, and Y. Sasai (2014), Seasonal mesoscale and submesoscale eddy variability along the North Pacific Subtropical Countercurrent, *J. Phys. Oceanogr.*, **44** (12), 3079–3098.

#### 学会発表等

- 8) Y. Masumoto, Scale-interactions in the tropical Indian Ocean, Indo-Pacific Ocean Variability and Air-Sea Interaction (IPOVAI) Workshop, 10<sup>th</sup> IOC WESTPAC International Scientific Conference, Apr. 17-Apr.20, 2017, Qingdao, China (Invited presentation)
- 9) Daisuke Matsuoka, Fumiaki Araki, Yumi Inoue and Hideharu Sasaki, “Event Detection and Visualization of Ocean Eddies based on SSH and Velocity Field”, European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 17-22 April, 2016
- 10) 佐々木 英治 (JAMSTEC)・Patrice Klein (IFREMER)・笹井 義一 (JAMSTEC), 北太平洋東部亜熱帯域のサブメソスケール現象の生成要因, 日本海洋学会 2016 年度秋季大会, 2016/09/12