

羽角 博康

東京大学 気候システム研究センター 准教授

海洋循環のスケール間相互作用と大規模変動

1. 研究実施の概要

本研究の目的は、現在の海洋の状態を司る物理プロセスのモデリングによる把握と、その理解に基づく効率的な海洋変動モデリング手法の開発である。特に、気候の中・長期変動や大規模変動において重要となる、海洋の中・深層循環をターゲットとする。この目的に対し、本研究では「①中・深層循環マルチスケールモデリング」、「②海氷－海洋相互作用モデリング」、「③マルチタイムスケール海洋変動モデリング」という 3 個のサブテーマを設定している。また、次世代スパコン追加配賦課題として「④高並列チューニング」も実施している。本年度、①では深層水形成領域・縁辺海・大洋の各スケールについて現実をよく再現する高解像度シミュレーションを実施し、各々のスケールにおける中・深層水の形成・変質過程に関する定量的評価を行った。②では海氷生産量のグローバルマッピングに基づく海面熱塩フラックスデータの整備を行い、それを検証材料とした海氷域シミュレーションを通して中・深層水形成に対する海氷過程の評価を行った。③では高並列化への対応を中心にネステッドグリッドモデルの開発を進めるとともに、それを用いて 10 年スケールから 1000 年スケールまでの各種海洋変動を適切にシミュレートするための仕様の決定に向け、パイロットモデルを用いた各種シミュレーションと結果解析を行った。④では既存アプリケーションの分析を行った。

2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

① 中・深層循環マルチスケールモデリング

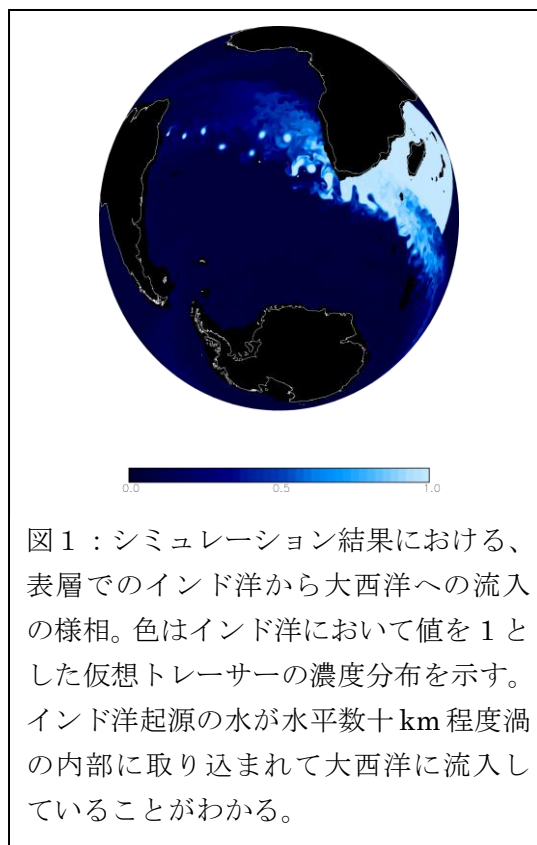
深層水形成領域に関して、前年度までに開発された非静水圧海洋モデル[①-1, ①-2]を用い、ウェッデル海の深層水形成の中でも特に高密度陸棚水の沈降過程に関するシミュレーションを行い、深層水形成とその過程における各種物理プロセスの定量化を行った。今後はさらに広い領域のシミュレーションに発展させ、ウェッデル海全体における深層水形成の定量的把握を行う。

縁辺海規模に関して、主要な深層水形成領域であるラブラドル海とオホーツク海のシミュレーションを実施した。いずれにおいても現実的な深層対流領域や形成される深層水の

特性を再現することができた。ラブラドル海に関しては、隣接する領域から沿岸流として流入する高温水や低塩分水がラブラドル海中央部へ渦運動によって輸送される過程について、定量的な解析を行った。オホーツク海に関しては、シベリア沿岸のポリニヤにおける海水生成に伴う高密度水形成について、海面境界条件や太平洋からオホーツク海への流入の影響を明らかにした[①-6]。

大洋規模に関して、南大洋のモデリング結果に基づき[①-3, ①-4]、サブメソスケール（水平数 km 以下）渦が海洋の大局的温度・塩分構造の決定において果たす役割に関するパラメタリゼーションの検討を行った。本年度は特に混合層において発達するサブメソスケール渦について、局所的な超高解像度モデリングを通してその影響の定量的把握を行った。今後は本研究課題の最終成果となるシミュレーションシステムへの適用を前提として、この効果を水平格子 20 km 程度の設定において表現するためのパラメータ化を行う。

全球規模に関して、全球規模熱塩循環の通り道として提唱されている cold water route と warm water route の量的関係を明らかにするためのシミュレーションと解析を行った。Warm water route に相当する表層でのインド洋から大西洋への流入については、アフリカ大陸東岸に沿って存在するアガラス海流がアフリカ大陸南端で切り離す渦によって大部分が説明される（図 1）。この渦の切離については、アガラス海流の上流部分で発生する小規模な蛇行現象であるナタール・パルスが重要であることが過去に指摘されているが、それを現実的にシミュレートすることに成功し、その発生・成長機構を明らかにすることができた。またこれにより warm water route に関して信頼性の高いシミュレーションが得られた。



② 海氷－海洋相互作用モデリング

これまでに行ってきた**海氷生産量のグローバルマッピング**に基づき、数値モデルの境界条件として適用するための海氷域での海面フラックスデータの整備を、南大洋を中心に行った。南極海での海氷生産量マッピングを高精度化し[②-1]、衛星海氷データと熱収支計算と組み合わせることで、熱塩フラックスデータを作成した（図 2）。海氷域でこのようなデータが示されたのは初めてである。海氷による熱の流れ（沖→沿岸）や淡水の流れ（沿岸→沖）が定量性をもって示されており、海洋・海氷モデルへの比較検証データ・境界条件データとして今後様々なモデリングにおいて有用に活用される。

昨年度作成したオホーツク海の海洋中層のデータセットから明らかにされた海水生成・熱塩循環の弱화를再現し、そのメカニズムを解明すべく、海氷・海洋結合モデルを用いた温暖化実験を開始した。また、オホーツク海では、従来用いていた SSM/I より分解能が 2 倍高いマイクロ波放射計 AMSR を用い、高精度の海氷生産量マッピングを行った[②-2, ②-3]。この研究では、サハリン沿岸ポリニヤで取得した係留氷厚計による現場海氷データを比較・検証データに用いている[②-4, ②-5, ②-6]。このマッピングはオホーツク海氷・海洋結合モデルの検証・比較データとして使用される。

また、南極周囲における海氷生成に伴う高密度水形成に関するシミュレーションを実施した。海氷生成に関しては、これまで本研究で作成してきた海氷生産量マッピングと良く整合する結果が得られており、結果として得られる高密度水生成も信頼性の高いものである。また、このシミュレーションを通して、沿岸ポリニヤにおける高海氷生産の表現や座礁氷山の扱いについて、観測的事実とも整合する適切な手法を考案した[②-11, ②-13]。こうして大陸棚上で生成される高密度水は、南極大陸周囲を流れる沿岸流等[②-8, ②-12]と相互作用しながら大陸斜面を下り、最終的には全海洋へと広がる深層水へとつながっていく。今後はそれら過程に関してさらにシミュレーションを進める。

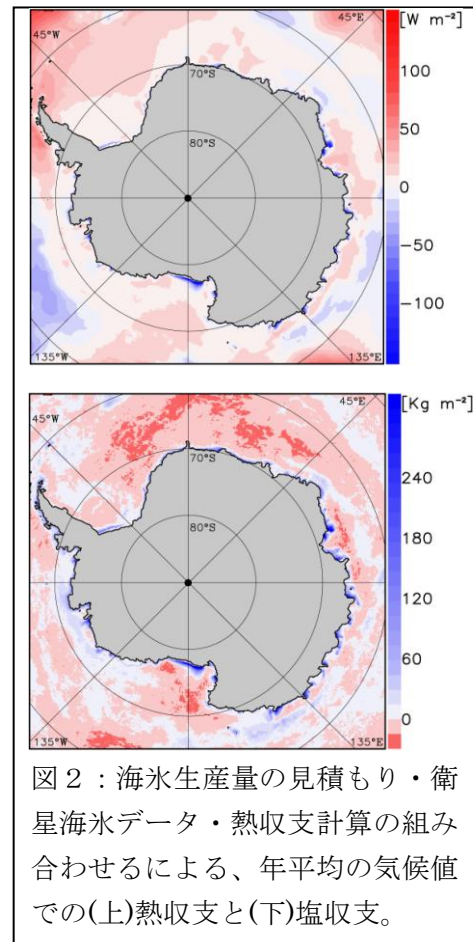


図 2：海氷生産量の見積もり・衛星海氷データ・熱収支計算の組み合わせによる、年平均の気候値での(上)熱収支と(下)塩収支。

③ マルチタイムスケール海洋変動モデリング

本研究課題の最終目標である「海洋変動の効率的・効果的シミュレーション方法開発」の核となる、重要領域の部分的な高解像度化を実現するネスティッドグリッドモデルについて、北太平洋を対象にしたパイロットスタディーを行うとともに、高効率な並列計算を実現するための技術的な開発を行った。現状では 1,000 程度の並列数まで比較的良いスケーラビリティを持つことを確認しているが、今後さらにチューニングを行い、超高並列へ対応していく。

上記シミュレーションシステムの仕様を決定する目的で、様々な解像度と時間スケールを設定したパイロットモデルによるテストと問題抽出を行っている[③-7, ③-8]。比較的高解像度のモデルを用いた過去 50 年程度に関する**歴史的海洋再現実験**を通しては、パイロットモデルとして設定した水平格子 20 km 程度で表層から中層にかけての大洋スケールの十年規模変動が妥当にシミュレートされることが示された。一方、黒潮をはじめとする西岸境界流の流路・流量に関してはこの解像度では不十分であることが示された。その再現

については上述のネスティッドグリッド手法による部分的な高解像度化によって対応することになるが、その際に必要な設定に関する実験を進める。低解像度モデルに関しては、現在海洋再現実験結果の力学的解析[③-5, ③-6]やそれによる物質循環の側面[③-2, ③-3]から妥当性の検証を行っているが、さらに**古海洋再現実験**を通すことにより、北大西洋高緯度の深層水形成について、現在海洋の再現実験だけでは表立って見えない問題が明らかになった。現在海洋の状態において、グリーンランド海とラブラドル海の2箇所で生じている深層水形成について、その総量は観測的にほぼおさえられているものの、各々の寄与率はよくわかっていない。モデルのパラメータチューニング次第で現在海洋のシミュレーションにおけるその相対的寄与率を調節することが可能であるが、古海洋の再現性がその調節に大きく依存することが明らかとなった。本質的な問題は北大西洋表層でメキシコ湾流からラブラドル海へ流入する経路の再現性にあるものと推定される。今後この問題に対して、パラメタリゼーションないしネスティッドグリッドによる部分的な高解像度化を通して、解決を図る。

④ 高並列チューニング

①の深層水形成領域モデリングで用いるアプリケーション（非静力学海洋モデル）について、高並列チューニングへ向けた分析を行い、高負荷部分の抽出を行った。今後はこれに基づいて、高負荷部分のチューニングとその実装・検証を行い、必要なアルゴリズム再開発等を実施する。

3. 研究実施体制

(1)「変動モデリング」グループ

① 研究分担グループ長: 羽角 博康(東京大学、准教授)

② 研究項目

- ・海洋モデル開発
- ・変動モデリングの手法開発と実験実施
- ・観測データに基づく実験結果検証
- ・高並列チューニング

(2)「循環モデリング」グループ

① 研究分担グループ長: 田中 幸夫(海洋研究開発機構、グループリーダー)

② 研究項目

- ・縁辺海から大洋までの各スケール別およびスケール間相互作用モデリングの実施
- ・高解像度モデルを用いた海洋変動モデリングの実施
- ・棚氷－海洋相互作用モデル開発

(3)「海氷モデリング」グループ

① 研究分担グループ長: 大島 慶一郎(北海道大学、教授)

② 研究項目

- ・海水モデル・パラメタリゼーション開発
- ・海水域(オホーツク海・南大洋など)モデリングの実施

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

- ①-1:Matsumura, Y., and H. Hasumi: A nonhydrostatic ocean model with a scalable multigrid Poisson solver, *Ocean Modelling*, **24**, 15-28, 2008.
- ①-2:Matsumura, M., and H. Hasumi: Brine-driven eddies under sea ice leads and their impact on the Arctic Ocean mixed layer, *J. Phys. Oceanogr.*, **38**, 146-163, 2008.
- ①-3:Tanaka, Y., and H. Hasumi: Injection of Antarctic Intermediate Water into the Atlantic subtropical gyre in an eddy resolving ocean model, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L11601, 2008.
- ①-4:Tanaka, Y., and H. Hasumi: Resolution dependence of eddy fluxes, in *Ocean Modeling in an Eddying Regime*, American Geophysical Union, 101-113, 2008.
- ①-5:Tsugawa, M., Y. Tanaka and T. Matsuno: An ocean general circulation model on a quasi-homogeneous cubic grid, *Ocean Modelling*, **22**, 66-86, 2008.
- ①-6:Sasajima, Y., H. Hasumi and T. Nakamura: A sensitivity study on the dense shelf water formation in the Okhotsk Sea, *J. Geophys. Res.*, submitted.
- ②-1:Tamura, T., K. I. Ohshima and S. Nihashi: Mapping of sea ice production for Antarctic coastal polynyas, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L07606, 2008.
- ②-2:Nihashi, S., K. I. Ohshima, T. Tamura, Y. Fukamachi, and S. Saitoh: Thickness and production of sea ice in the Okhotsk Sea coastal polynyas from AMSR-E, *J. Geophys. Res.*, submitted.
- ②-3:Nihashi, S., and K. I. Ohshima: Bulk heat transfer coefficient in the ice-upper ocean system in the ice melt season derived from concentration-temperature relationship, *J. Geophys. Res.*, **113**, C06008, 2008.
- ②-4:Fukamachi, Y., K. Shirasawa, A. M. Polomoshnov, K. I. Ohshima, E. Kalinin, S. Nihashi, H. Melling, G. Mizuta, M. Wakatsuchi: Direct observations of sea-ice thickness and brine rejection off Sakhalin in the Sea of Okhotsk, *Cont. Shelf Res.*, submitted.
- ②-5:Ono, J., K. I. Ohshima, G. Mizuta, Y. Fukamachi and M. Wakatsuchi: Diurnal coastal-trapped waves on the eastern shelf of Sakhalin in the Sea of Okhotsk and their modification by sea ice, *Cont. Shelf Res.*, **28**, 697-709, 2008.
- ②-6:Ono, J. and K. I. Ohshima: Numerical model studies on generation and dissipation of the diurnal coastal-trapped waves over the Sakhalin shelf in the Sea of Okhotsk, *Cont. Shelf Res.*, submitted.
- ②-7:Ishida, K. and K. I. Ohshima, 2009: Ice band characteristics of Antarctic seasonal ice

- zone observed using MOS MESSR images, *Atmosphere-Ocean*, in press.
- ②-8:Aoki, S., N. Fujii, S. Ushio, Y. Yoshikawa, S. Watanabe, G. Mizuta, Y. Fukamachi and M. Wakatsuchi: Deep western boundary current and southern frontal systems of the Antarctic Circumpolar Current southeast of the Kerguelen Plateau, *J. Geophys. Res.*, **113**, C08038, 2008.
 - ②-9:Ohshima, K. I., and D. Simizu: Particle tracking experiments on a model of the Okhotsk Sea: toward oil spill simulation, *J. Oceanogr.*, **64**, 103-114, 2008.
 - ②-10:大島慶一郎, 小野純, 清水大輔: オホーツク海における漂流物の粒子追跡モデル実験, 沿岸海洋研究, **45**, 115-124, 2008.
 - ②-11:Toyota, T., K. Nakamura, S. Uto, K. I. Ohshima and N. Ebuchi: Retrieval of sea ice thickness distribution in the seasonal ice zone from air-borne L-band SAR, *Int. J. Remote Sens.*, in press.
 - ②-12:Kusahara, K., and K. I. Ohshima: Dynamics of the wind-driven sea level variation around Antarctica, *J. Phys. Oceanogr.*, in press.
 - ②-13:Kusahara, K., and H. Hasumi: Modeling sea ice production and dense shelf water formation at coastal polynyas around East Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, submitted.
 - ③-1:Hasumi, H., I. Yasuda, H. Tatebe and M. Kimoto: Pacific bidecadal climate variability regulated by tidal mixing around the Kuril Islands, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L14601, 2008.
 - ③-2:Oka, A., S. Kato and H. Hasumi: Evaluating effect of ballast mineral on deep-ocean nutrient concentration by using an ocean general circulation model, *Global Biogeochem. Cycles*, **22**, GB3004, 2008.
 - ③-3:Oka, A., H. Hasumi, H. Obata, T. Gamo and Y. Yamanaka: Study on vertical profiles of rare earth elements by using an ocean general circulation model, *Global Biogeochem. Cycles*, submitted.
 - ③-4:Watanabe, E., and H. Hasumi: Pacific water transport in the Arctic Ocean by an eddy-resolving coupled sea ice-ocean model, *J. Phys. Oceanogr.*, in press.
 - ③-5:Urakawa, L. S., and H. Hasumi: An energetic view of global thermohaline circulation and its wind-enhancement, *J. Phys. Oceanogr.*, in press.
 - ③-6:Urakawa, L. S., and H. Hasumi: A remote effect of geothermal heat on the global thermohaline circulation, *J. Geophys. Res.*, in press.
 - ③-7:Sakamoto, T. T., and H. Hasumi: Pacific upper ocean response to global warming –climate modeling in an eddying ocean regime–, in *Ocean Modeling in an Eddying Regime*, American Geophysical Union, 265-279, 2008.
 - ③-8:Suzuki, T., H. Sasaki, N. Nakashiki and H. Nakano: Common success and failure in simulating the Pacific surface currents shared by four high-resolution ocean models, in *Ocean Modeling in an Eddying Regime*, American Geophysical Union, 165-175, 2008.

平成 20 年度 国内特許出願件数：0 件（CREST 研究期間累積件数：0 件）