

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これまでのシミュレーションで得られた成果をまとめ、それらをつなぐスケール間相互作用シミュレーションを開始した。②では海氷生産量のグローバルマッピングをさらに高度化するとともに、最新の現場観測データとリンクした南極域シミュレーションを開始した。③では北太平洋と黒潮をターゲットとして、「効率的な海洋変動モデリング手法」としてのネステッドグリッドモデルの開発を行った。④では既存アプリケーションの高負荷部分のチューニングを行った。

§ 2. 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 ((独)海洋研究開発機構、チームリーダー)
- 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
 - ・ 海氷モデル・パラメタリゼーション開発
 - ・ 海氷域 (オホーツク海・南大洋など) モデリングの実施

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(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、ウェッデル海における高密度陸棚水の輸送・変質過程を扱うシミュレーションを行い、これを起源とする南極底層水の形成量を定量化するとともに[①-1]、海底地形が大陸斜面上の高密度水輸送に及ぼす効果に関して力学的に明らかにした[①-2]。今後はシミュレーション領域を広げるとともにウェッデル海以外の南極底層水の起源領域にも適用し、深層水形成と縁辺海規模のスケール間相互作用を扱うシミュレーションに発展させる。

縁辺海規模に関して、これまでにシミュレーション手法を確立したオホーツク海と東南極域について、深層水の起源となる海氷生成に伴う高密度水形成を定量化し[①-3, 4]、さらに外洋との相互作用を扱う新たなシミュレーションに着手した。今後は縁辺海と大洋の水塊交換を軸に、大洋規模の循環形成におけるスケール間相互作用を扱うシミュレーションに発展させる。

大洋規模に関しては、上層に存在する小規模渦(水平数 km 規模)のパラメータ化を行った。このパラメータ化は、前年度の解析で明らかになった、小規模渦が海洋上層の位置エネルギーを解放する効果を表現するものである。このパラメタリゼーションの導入により、南大洋の混合層深度が著しく改善される(図1)。

全球規模の循環に関しては、全球規模深層循環のうち暖水路の形成および流量をコントロールすると考えられるアガラス海流の蛇行について、シミュレーションに基づいた生成機構の解明と定

量化を行った[①-5]。また、低解像度シミュレーションに基づく全球海洋循環のエネルギー解析を行い、南大洋の中規模渦が全球エネルギー収支において支配的な役割を果たすことを明らかにした[①-6, 7, 8]。低解像度シミュレーションでは中規模渦はパラメータ化して表されているが、今後は中規模渦を陽に解像した高解像度シミュレーションによってその働きをさらに詳しく明らかにしていく。

② 海氷-海洋相互作用モデリング

数値モデルの検証・境界条件データを作成する目的で、海氷生産量及び海氷域での海面熱塩フラックスのグローバルマッピングを行ってきたが、本年度は南大洋及びオホーツク海のマッピングを高分解能の衛星マイクロ波放射計 AMSR を用いることで、高精度化した[②-1]。これらのデータセットは数値モデルや観測研究(海外のものを含む)にも利用されている[①-3, ②-2]。また、本年度は北極海全域における海氷生産量マッピングを完成させた(図2)。

一方、海氷生産量マッピングから示唆された未知の南極底層水生成域であるケーブダンレー沖では係留観測を行い、実測から底層水の生成を明らかにし、底層水の生成・流動過程を解明しうる貴重なデータを得た。これらの観測成果と数値モデリングをリンクさせる研究を開始した。

オホーツク海に関しては、海氷生成・中層水形成過程及びそれらの経年変動や熱塩循環に与える影響を明らかにする目的で、海氷・海洋結合モデルによる研究を行っている。本モデル研究では、本グループが行ってきた、沿岸ポリニヤでの海氷生成・高密度水生成過程[②-1, 3]、北太平洋との海水交換過程[②-4]、潮流混合過程[②-5, 6, 9, 11]の研究結果も反映されている。モデルは上記の海氷生産量マッピングの結果をよく再現しており[①-4]、中層水の形成やその太平洋への影響もよく表現されている[②-8]。今後、温暖化の影響も含めた経年変動のメカニズムを明らかにする予定である。

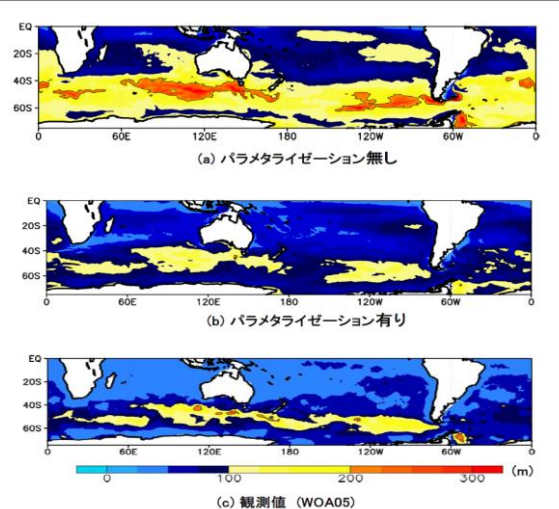


図1: 年平均の混合層深。(a)小規模渦をパラメータ化しない場合、(b)パラメータ化した場合。(c)観測値。

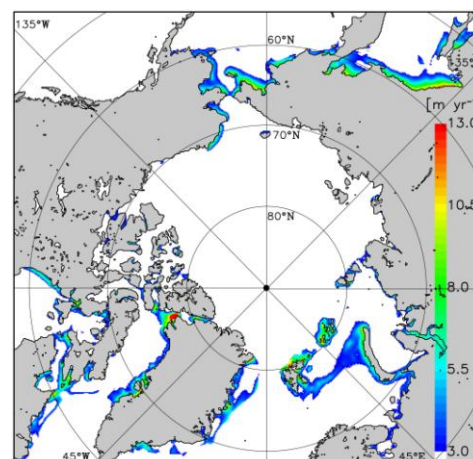


図2: マイクロ波放射計による海氷厚(アルゴリズムを作成して導出)を用いて熱収支計算から求めた、北極海における年間海氷生産量分布(1992～2007 年で平均)。

③ マルチタイムスケール海洋変動モデリング

前年度までに様々な解像度と時間スケールを設定して行ったシミュレーションによって抽出された問題に対して、①・②における成果等の反映[③-1, 2]、およびネスティッドグリッドによる重要領域の部分的な高解像度化により解決を図った。今年度は北太平洋における黒潮の挙動をターゲットとして、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」に沿ったモデルシステム開発と実験を行った。黒潮を含む北太平洋全域に関して、従来よりも格段に高い効率で現実的な循環とその変動をシミュレートすることが可能となった。今後は、これを全球シミュレーションの枠組みで行うこと、および①でこれまでターゲットにしてきた様々な領域や現象に対して適用することを行っていく。

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、前年度に抽出された高負荷部分のチューニングを行った。現在はその実装・検証を実施しており、今年度中に得られる結果を踏まえ、今後は必要なアルゴリズム再開発等を実施する。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

- ①-1: Matsumura, Y., and H. Hasumi, Modeling ice shelf water overflow and bottom water formation in the southern Weddell Sea, *Journal of Geophysical Research*, in press.
- ①-2: Matsumura, Y., and H. Hasumi, Dynamics of cross-isobath dense water transport induced by slope topography, *Journal of Physical Oceanography*, submitted.
- ①-3: Kusahara, K., H. Hasumi, and T. Tamura, Modeling sea ice production and dense shelf water formation at coastal polynyas around East Antarctica, *Journal of Geophysical Research*, submitted.
- ①-4: Sasajima, Y., H. Hasumi and T. Nakamura, A sensitivity study on the Dense Shelf Water formation in the Okhotsk Sea, *Journal of Geophysical Research*, in press.
- ①-5: Tsugawa, M., and H. Hasumi, Generation and growth mechanism of the Natal Pulse, *Journal of Physical Oceanography*, in press.
- ①-6: Urakawa, L. S., and H. Hasumi: The energetics of global thermohaline circulation and its wind-enhancement, *Journal of Physical Oceanography*, **39(7)**, 1715-1728, doi: 10.1175/2009JPO4073.1, 2009.
- ①-7: Urakawa, L. S., and H. Hasumi: A remote effect of geothermal heat on the global thermohaline circulation, *Journal of Geophysical Research*, **114(7)**, C07016, doi:10.1029/2008JC004825, 2009.
- ①-8: Urakawa, L. S., and H. Hasumi, Role of parameterized eddies in the energetics of the global

thermohaline circulation, *Journal of Physical Oceanography*, in press.

- ①-9: Watanabe, E., and H. Hasumi: Pacific water transport in the western Arctic Ocean simulated by an eddy-resolving coupled sea ice-ocean model, *Journal of Physical Oceanography*, **39(9)**, 2194-2211, doi:10.1175/2009JPO4010.1, 2009.
- ②-1: 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, *Journal of Geophysical Research*, **114**, C10025, doi:10.1029/2008JC005222, 2009.
- ②-2: Williams, G. D., S. Aoki, S. S. Jacobs, S. R. Rintoul, T. Tamura, and N. Bindoff: Antarctic Bottom Water from the Adelie and George V Land coast, East Antarctica (140-149E), *Journal of Geophysical Research*, in press.
- ②-3: Fukamachi, Y., K. Shirasawa, A. M. Polomoshnov, K. I. Ohshima, E. Kalinin, S. Nihashi, H. Melling, G. Mizuta, and M. Wakatsuchi: Direct observations of sea-ice thickness and brine rejection off Sakhalin in the Sea of Okhotsk, *Continental Shelf Research*, **29(11-12)**, 1541-1548, doi:10.1016/j.csr.2009.04.005, 2009.
- ②-4: Ohshima K. I., T. Nakanowatari, S. Riser, and M. Wakatsuchi: Seasonal variation in the in- and outflow of the Okhotsk Sea with the North Pacific, *Deep-Sea Res. Part II*, in press.
- ②-5: Nakamura T., Y. Kawasaki, T. Kono, and T. Awaji: Large-amplitude internal waves observed in the Kruzenshtern Strait of the Kuril Island Chain and possible water transport and mixing, *Continental Shelf Research*, in press.
- 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, *Continental Shelf Research*, in press.
- ②-7: 中野渡拓也, 三寺史夫, 本井達夫, 大島慶一郎, 石川一郎: 渦解像海洋大循環モデルで再現される北太平洋中層水の 50 年規模の低温化, 海と空, in press.
- ②-8: Matsuda J., H. Mitsudera, T. Nakamura, K. Uchimoto, T. Nakanowatari, and N. Ebuchi: Wind and buoyance driven intermediate-layer overturning in the Sea of Okhotsk, *Deep-Sea Research I*, **56(9)**, 1401-1418, doi:10.1016/j.dsr.2009.04.014, 2009.
- ②-9: Nakamura T., T. Toyoda, Y. Ishikawa, and T. Awaji: Effects of mass source/sink at the western boundary on the wind-driven gyres: Implications for North Pacific ventilation through convection in the Okhotsk Sea and tidal mixing at the Kuril Straits. *Journal of Oceanography*, **66**, 41-60, 2010. (※Citation Index も Impact Factor も存在する国際誌ですが、DOI が公表されていません)
- ②-10: 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, *International Journal of Remote Sensing*, **30(12)**, 3171-3189, 2009.
- ②-11: Nakamura T. and T. Awaji: Scattering of internal waves with frequency change over rough

- topography, *Journal of Physical Oceanography*, **39(7)**, 1574-1594, doi:10.1175/2008JPO3795.1, 2009.
- ②-12: Ishida, K. and K. I. Ohshima: Ice-band characteristics of the Antarctic seasonal ice zone observed using MOS MESSR images, *Atmosphere-Ocean*, **47(3)**, 169-183, doi:10.3137/OC300.2009, 2009.
- ②-13: Toyota, T., C. Haas, and T. Tamura: Size distribution and shape properties of relatively small sea ice floes in the Antarctic marginal ice zone in late winter, *Deep-Sea Research Part II*, in press.
- ②-14: Fukamachi, Y., S. R. Rintoul, J. A. Church, S. Aoki, S. Sokolov, M. A. Rosenberg, and M. Wakatsuchi: Strong export of Antarctic Bottom Water east of the Kerguelen Plateau, *Nature Geoscience*, in press.
- ③-1: Kusahara, K. and K. I. Ohshima: Dynamics of the wind-driven sea level variation around Antarctica, *Journal of Physical Oceanography*, **39(3)**, 658-674, doi:10.1175/2008JPO3982.1, 2009.
- ③-2: Tatebe, H., and H. Hasumi: Formation mechanism of the Pacific equatorial thermocline revealed by a general circulation model with a high accuracy tracer advection scheme, *Ocean Modelling*, submitted.
- 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 Biogeochemical Cycles*, **23(4)**, GB4025, doi:10.1029/2008GB003353, 2009.