

羽角 博康

東京大学大気海洋研究所・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。この目的に対して本研究では 3 個のサブテーマを設定しているが、研究後半となる本年度以降は再編成を行い、「①海洋スケール間相互作用モデリング」、「②小規模領域用海水モデル開発」、「③海洋変動モデリング手法開発」としている。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－縁辺海間および縁辺海－大洋間について、スケール間相互作用を調べるシミュレーションを実施した。②ではシミュレーション結果の検証データセットをこれまでに引き続き整備するとともに、これまでの様々な観測的知見やモデル開発を反映させたオホーツク海シミュレーションを実施した。③では全球海洋モデルをベースとしたネスティッドグリッドモデルを開発し、各種計算スキームやパラメタリゼーションの開発と合わせて、「効率的な海洋モデリング手法の開発」を実施した。④では既存アプリケーション単体の性能測定と、その性能向上に向けたチューニングを実施した。

§ 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 (東京大学大気海洋研究所、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、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 (北海道大学低温科学研究所、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 海洋スケール間相互作用モデリング

深層水形成領域－縁辺海相互作用に関して、従来から行っていたウェッデル海のモデリング[11]に加え、②グループの係留系観測で顕著な深層水形成の可能性が示された南極ダンレー岬周囲のモデリングを行った。いずれのモデリングにおいても、底層水生成・流動の再現に成功し、その力学機構を提示することができた。今後はモデル領域を広げ、東南極全域での底層水の生成・変質・輸送過程[2, 5, 19]のモデリングへ発展させる。

縁辺海－大洋相互作用に関して、オホーツク海－太平洋相互作用モデリングおよび東南極大陸棚域－南大洋相互作用モデリングを実施した。前者においては、北太平洋とオホーツク海の海水交換について、オホーツク海内の微小混合過程や海氷過程に対する依存性が定量的に示されるとともに[13]、それらの過程が北太平洋中層循環の形態を決める力学機構を明らかにした[14]。後者においては、深層水の形成と流出が現実的に再現され、その力学的機構が明らかになった[2, 10, 25]。また、東南極アデリーランド沖で最近生じた深層水形成領域の環境変化に対する、海洋の大規模かつ長期的な将来応答を評価するモデリングを実施した[24]。

ケープ海盆－暖水路モデリングに関して、暖水路の流量評価を目的として従来から行っていたシミュレーション[7]と比べて、ケープ海盆を高解像度化したモデリングを開始した。その結果、暖

水路を担うアガラス渦の挙動がより現実的なものとなった。今後はその渦の挙動に関する解析を進め、暖水路の流量を決定する力学的機構の解明を目指す。

② 小規模領域用海氷モデル開発

モデルの検証・境界条件データを作成する目的で昨年度まで行ってきた海氷生産量のデータセットに加え、今年度は南大洋での海面熱塩フラックスのデータセットを完成させた[21]。これらのデータセットは海氷海洋結合モデルの検証・境界条件データとして利用された[10, 13]。現在、高分解能の衛星マイクロ波放射計 AMSR を用いてデータセットの高精度化を全球的に展開中である[27]。

オホーツク海に関して 3 種類の海氷-海洋結合モデルを用いて、海氷-海洋相互作用に関わる研究を展開した[13, 23]。温暖化実験では、観測された中層水の変質を再現することに成功し(図 1)、海氷減少が熱塩循環に

与える機構を明らかにした。これらのモデル研究では、本グループが行ってきた、沿岸ポリニヤ過程[12, 23]、海氷過程のパラメタリゼーション[22, 26]、北太平洋との海水交換過程[15, 16]、潮流混合過程[1, 3, 4]の研究成果が反映されている。

③ 海洋変動モデリング手法開発

中期的海洋変動モデリング手法開発に関しては、昨年度までに開発した太平洋に対するネスティッドグリッドモデルを発展させて、全球海洋モデルをベースとして海氷モデルまでを含んだネスティッドグリッドモデルを開発した。現在のところ、日本近傍を高解像度領域に選んだシミュレーションを実施している。日本近傍の海洋現象としては、黒潮・親潮といった強海流やそれらの海流にともなう前線構造の再現が、日本近傍の局所的問題にとどまらず全球規模の問題にとっても重要である。このネスティッドグリッドモデルでは、従来のモデルと比べて格段に低コストでそれらを妥当に再

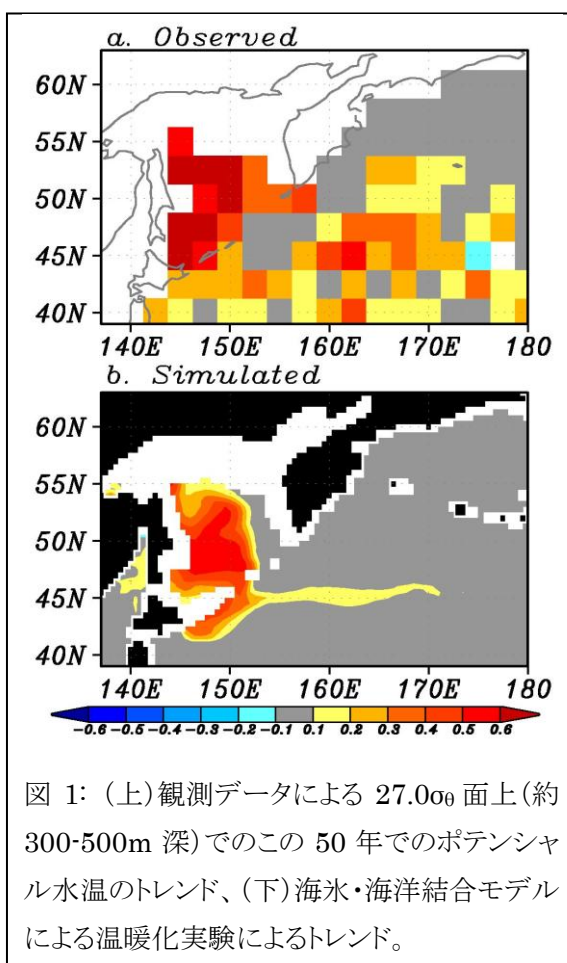


図 1: (上) 観測データによる 27.0 σ_θ 面上(約 300-500m 深)でのこの 50 年でのポテンシャル水温のトレンド、(下)海氷・海洋結合モデルによる温暖化実験によるトレンド。

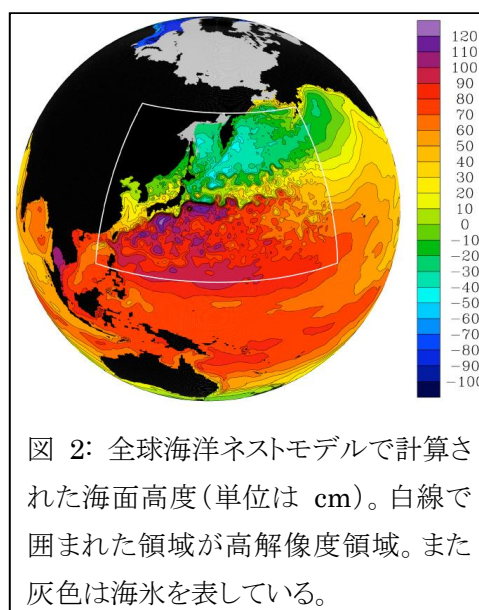


図 2: 全球海洋ネストモデルで計算された海面高度(単位は cm)。白線で囲まれた領域が高解像度領域。また灰色は海氷を表している。

現することができる(図 2)。

長期的海洋変動モデリング手法開発に関しては、水平格子およそ 100 km および 300 km の全球海洋モデルについて、各種計算スキームやパラメタリゼーションの開発・適用を行い、設定を完了した。また、これらのモデルを用いたシミュレーションを通して、気候変動にとって重要性が高い熱帯太平洋の海洋構造の解明[9]や、全球海洋循環に関するエネルギーバランスの解明[8]を行った。

④ 高並列チューニング

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、前年度に行われた高負荷部分チューニングの成果を踏まえ、単体性能測定と超高並列環境での性能予測を行った。また、その結果を受けて、入出力に関する高並列向け開発を行った。

§4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. Nakamura T., Y. Isoda, H. Mitsudera, S. Takagi and M. Nagasawa, Breaking of unsteady lee waves generated by diurnal tides, *Geophysical Research Letters*, **37(4)**, L04602, 2010. (doi:10.1029/2009GL041456)
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*, **115(4)**, C04027, 2010. (doi:10.1029/2009JC005812)
3. Ono, J. and K. I. Ohshima: Numerical model studies on the generation and dissipation of the diurnal coastal-trapped waves over the Sakhalin shelf in the Sea of Okhotsk, *Continental Shelf Research*, **30(6)**, 588-597, 2010. (doi:10.1016/j.csr.2009.06.006)
4. 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*, **30(6)**, 598-607, 2010. (doi:10.1016/j.csr.2009.07.010, 2010)
5. Fukamachi, Y., S. R. Rintoul, J. A. Church, S. Aoki, S. Sokolov, M. Rosenberg and M. Wakatsuchi, Strong export of Antarctic Bottom Water east of the Kerguelen Plateau, *Nature Geoscience*, **3(5)**, 327-331, 2010. (doi:10.1038/ngeo842)
6. Fukamachi, Y., K. I. Ohshima, N. Ebuchi, T. Bando, K. Ono and M. Sano: Volume

- transport in the Soya Strait during 2006-2008, *Journal of Oceanography*, **66(5)**, 685-696, 2010. (doi:10.1007/s10872-010-0056-2)
7. Tsugawa, M., and H. Hasumi, Generation and growth mechanism of the Natal Pulse, *Journal of Physical Oceanography*, **40(7)**, 1597-1612, 2010. (doi:10.1175/2010JPO4347.1)
 8. Urakawa, L. S., and H. Hasumi, Role of parameterized eddies in the energy budget of the global thermohaline circulation: cabbeling versus restratification, *Journal of Physical Oceanography*, **40(8)**, 1894-1901, 2010. (doi:10.1175/2010JPO4361.1)
 9. Tatabe, 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*, **35(3)**, 245-252, 2010. (doi:10.1016/j.ocemod.2010.07.011)
 10. 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*, **115(10)**, C10006, 2010. (doi:10.1029/2010JC006133)
 11. Matsumura, Y., and H. Hasumi, Modeling ice shelf water overflow and bottom water formation in the southern Weddell Sea, *Journal of Geophysical Research*, **115(10)**, C10033, 2010. (doi:10.1029/2009JC005841)
 12. Kawaguchi, Y., S. Nihashi, H. Mitsudera and K. I. Ohshima, Formation mechanism of huge coastal polynyas and its application to Okhotsk Northwestern Polynya, *Journal of Physical Oceanography*, **40(11)**, 2451-2465, 2010. (doi:10.1175/2010JPO4304.1)
 13. Sasajima, Y., H. Hasumi and T. Nakamura, A sensitivity study of the dense shelf water formation in the Okhotsk Sea, *Journal of Geophysical Research*, **115(11)**, C11007, 2010. (doi:10.1029/2009JC005697)
 14. Kawasaki, T., and H. Hasumi, Role of localized mixing around the Kuril Straits in the Pacific thermohaline circulation, *Journal of Geophysical Research*, **115(11)**, C11002, 2010. (doi:10.1029/2010JC006130)
 15. Nakanowatari T., K. I. Ohshima and S. Nagai, What determines the maximum sea ice extent in the Sea of Okhotsk? Importance of ocean thermal condition from the Pacific, *Journal of Geophysical Research*, **115(12)**, C12031, 2010. (doi:10.1029/2009JC006070)
 16. 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*, **57(13-14)**, 1247-1256, 2010. (doi:10.1016/j.dsr2.2009.12.012)
 17. Nomura, D., H. Yoshikawa-Inoue, T. Toyota and K. Shirasawa, Effects of snow,

- snow-melting and re-freezing processes on air-sea ice CO₂ flux, *Journal of Glaciology*, **56(196)**, 262-270, 2010. (doi:10.3189/002214310791968548)
18. Nomura, D., J. Nishioka, M. A. Granskog, A. Krell, S. Matoba, T. Toyota, H. Hattori and K. Shirasawa, Nutrient distributions associated with snow and sediment-laden layers in sea ice of the southern Sea of Okhotsk, *Marine Chemistry*, **119(1-4)**, 1-8, 2010. (doi:10.1016/j.marchem.2009.11.005)
 19. Rintoul, S. R., K. Speer, M. Sparrow, M. Meredith, E. Hoffmann, E. Fahrbach, C. Summerhayes, A. Worby, M. England, R. Bellerby, S. Speich, D. Costa, J. Hall, M. Hindell, G. Hosie, K. Stansfield, Y. Fukamachi, T. de Bruin, A. Naveira Garabato, K. Alberson, V. Ryabinin, H. C. Shin and S. Gladyshev, Southern Ocean Observing Systems (SOOS): Rationale and Strategy for Sustained Observations of the Southern Ocean, Proceedings of OceanObs '09: Sustained Ocean Observations and Information for Society (Vol. 2), ESA Publication WPP-306, 2010.
 20. 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*, **85**, 141-150, 2010.
 21. Tamura, T., K. I. Ohshima, S. Nishishi and H. Hasumi, Estimation of surface heat/salt fluxes associated with sea ice growth/melt in the Southern Ocean, *Scientific Online Letter on the Atmosphere*, **7**, 17-20, 2011. (doi:10.2151/sola.2011-005)
 22. Toyota, T., S. Ono, K. Cho and K. I. Ohshima, Retrieval of sea ice thickness distribution in the Sea of Okhotsk from ALOS/PALSAR backscatter data, *Annals of Glaciology*, **52(57)**, 177-184, 2011.
 23. Uchimoto, K., T. Nakamura, J. Nishioka, H. Mitsudera, M. Yamamoto-Kawai, K. Misumi and D. Tsumune, Simulations of chlorofluorocarbons in and around the Sea of Okhotsk: Effects of tidal mixing and brine rejection on the ventilation, *Journal of Geophysical Research*, **116(2)**, C02034, 2011. (doi:10.1029/2010JC006487)
 24. Kusahara, K., H. Hasumi and G. D. Williams, Impact of the Mertz Glacier Tongue calving on dense water formation and export, *Nature Communications*, **2**, 159, 2011. (doi: 10.1038/ncomms1156)
 25. Kusahara, K., H. Hasumi and G. D. Williams, Dense shelf water formation and brine-driven circulation in the Adelie And George V Land region, *Ocean Modelling*, **37**, 122-138, 2011. (doi: 10.1016/j.ocemod.2011.01.008)
 26. Fukamachi, Y., K. I. Ohshima, Y. Mukai, G. Mizuta and M. Wakatsuchi: Sea-ice drift characteristics revealed by measurement of acoustic Doppler current profiler and ice-profiling sonar off Hokkaido in the Sea of Okhotsk, *Annals of Glaciology*, **52(57)**, 1-8, 2011.
 27. Nishishi, S., N. Ebuchi, Y. Fukamachi, and S. Takahashi: Characteristics of sea ice

- in the Okhotsk coastal polynyas revealed from satellites, ice-profiling sonar, and digital camera observations, *Annals of Glaciology*, **52(57)**, 133-139, 2011.
28. Williams, G. D., M. Hindell, M-N Houssais, T. Tamura, and I. C. Field: Upper ocean stratification and sea ice growth rates during the summer-fall transition, as revealed by Elephant seal foraging in the Adelie Depression, East Antarctica, *Ocean Science Discussions*, **7**, 1-40, 2011. (doi:10.5194/osd-7-1-2010)
 29. Yamaguchi, H., K. I. Ohshima, and N. Nakazawa: Numerical prediction of spilled oil behavior in the Sea of Okhotsk under sea ice conditions, *Arctic Technology Conference, Offshore Technology Conference*, OTC22123, 2011.
 30. Toyota, T., C. Hass 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.
 31. Toyota, T., R. Massom, K. Tateyama, T. Tamura and A. Fraser, Properties of snow overlying the sea ice off East Antarctica in late winter, 2007. *Deep-Sea Research Part II*, in press.
 32. Williams, G. D., A. J. S. Meiners, A. Poole, P. Mathiot, T. Tamura, and A. Klocker: Late winter oceanography off the Sabrina and BANZARE coast (117-128E), East Antarctica. *Deep-Sea Research Part II*, in press.