

令和元年5月27日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247080

研究課題名(和文)大陸棚-外洋間海水交換とその海洋循環への影響に関する数値モデリング研究

研究課題名(英文) Numerical modeling study on shelf-ocean water exchange and its influences on the ocean circulation

研究代表者

羽角 博康 (Hasumi, Hiroyasu)

東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号：40311641

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,400,000円

研究成果の概要(和文)：大陸棚海底付近の海水輸送・混合に関わる微小規模物理過程、および大陸棚縁における小規模現象による大陸棚から外洋への流出過程を扱うモデリング手法を開発し、これを適用して大陸棚-外洋間の海水交換に関する現実的シミュレーション研究を行った。全球海洋深層循環において重要な南極周囲および北極海に関して、海水交換が生じるメカニズムとその変動要因を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大量の海水を蓄える海洋深層の状態や循環は、気候の安定性や大規模変動をコントロールする要素であり、気候温暖化の進行においても重要な役割を果たすと考えられている。深層海水の起源は極域で冷却されて高比重となった海水であり、その沈降に端を発して全海洋をめぐる海洋深層循環が形作られている。この海洋深層循環がどのようにして成り立ち、気候温暖化に対してどのように応答するかを知るためには、海底が浅い大陸棚上と海底が深い外洋域の間でどのように海水が交換されるかを把握する必要があるが、その理解は十分ではない。本研究では南極周囲および北極海における大陸棚-外洋間海水交換メカニズムを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We conducted realistic simulations for oceanic water exchanges between continental shelves and open oceans by developing and applying methods to deal with small scale physical processes which induce cross-shelf water movement and water transport and mixing at the base of continental shelves. We clarified the mechanisms of water exchanges and their variability for the Arctic Ocean and the region around Antarctica which are important in the global-scale oceanic deep circulation.

研究分野：海洋物理学

キーワード：大陸棚 外洋交換 海洋大循環 数値モデル

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

大陸棚 - 外洋間の海水交換は、海洋の大規模な物理的循環や物質循環をコントロールする重要要素のひとつである。例えば、全球海洋深層循環の起点となる深層水形成過程では、大陸棚上での高密度水形成と流出、および流出を補償する大陸棚上への外洋海水流入がどのように起こるかが重要である。また、海洋中の様々な物質の循環においては河川を通じた陸域からの流入が重要であるが、流入した物質は化学・生物過程によって大陸棚上の海底に堆積することが多く、そうした物質の外洋への広がりにおいては大陸棚海底付近の海水の乱流混合や微小規模擾乱に伴う輸送過程が問題となる。大陸棚と外洋の間で海水が交換されるためには、海底深度や海洋密度構造の変化に伴う力学的制約を打ち破る必要があるが、どのような物理的メカニズムが働く結果としてどれだけの交換が生じるかについての理解は不十分である。

海洋数値モデリング研究において、大陸棚（沿岸）域と外洋域はこれまで別々に扱われることがほとんどであった。これは、興味の対象となる現象の時空間スケールが両者の間で大きく異なるために両者の相互作用を扱うモデリングが困難であったこと、および、大陸棚 - 外洋間交換で重要になると考えられる小規模物理過程の実態について観測的知見が十分に蓄積されていなかったことによる。前者の事情については、計算機の発達やモデリング手法開発の進展によって大幅に改善されつつある。また、後者の事情については、様々な目的のもとで実施された大陸棚から大陸斜面上での長期係留観測によるデータの蓄積、人工衛星リモートセンシング、最新の機動的な手法を用いた観測の展開によって実態が明らかになりつつあり、モデリングの検証材料として利用できる段階に達している。

### 2. 研究の目的

大陸棚海底付近の海水輸送・混合に関わる微小規模物理過程、および大陸棚縁における小規模現象による大陸棚から外洋への流出過程を扱うモデリング手法を開発し、これを適用して陸域から外洋への物質輸送に関する現実的シミュレーション研究を行う。また、その成果を応用して、大陸棚 - 外洋間海水交換の中でも全球海洋深層循環において重要性が高い、南極大陸周囲の深層水形成領域において外洋深層から比較的高密度の海水が大陸棚上に乗り上げる過程、および太平洋・大西洋から北極海大陸棚上に流入した海水が北極海中深層に浸入する過程をターゲットとした現実的シミュレーション研究を行う。具体的には以下の4項目を実施する。

(1) 大陸棚上および大陸棚縁の物理過程を適切にモデリングする手法を開発し、陸域起源物質の外洋への輸送の実例に適用したシミュレーションを通して妥当性を検証する。この研究項目で得られる結果や開発されるモデリング手法には一般性・汎用性があり、他の研究項目の遂行において随時活用する。

(2) 南極大陸周囲全体を現実的に扱う高解像度シミュレーションによって外洋深層から海水が大陸棚上に貫入する過程を扱い、海洋深層水/深層循環形成環境を大陸棚 - 外洋相互作用の観点から統一的に論ずるとともに、南極大陸氷床の融解における役割を定量的に評価する。

(3) 北極海全域を対象として、太平洋・大西洋起源海水の大陸棚上への流入、大陸棚上での循環と変質、大陸棚からの流出、そして北極海での循環までを一貫した数値モデリングで扱う。

(4) 上記各研究項目で得られた成果を全球海洋モデリングに反映させ、全球海洋深層循環・物質循環に及ぼす影響を評価する。

### 3. 研究の方法

初年度には、大陸棚上/縁の物理過程を扱うモデリング手法の開発(研究項目(1))を開始するとともに、南極域(研究項目(2))・北極域モデル(研究項目(3))の設定と予備実験を実施する。第2年度には、(1)のモデリング手法開発を継続して実施するとともに、(2)では外洋深層水貫入過程のモデリング、(3)では大陸棚上での変質過程に着目したモデリングを実施する。第3年度には(1)で開発される手法を適用して、(1)では陸域起源物質輸送、(2)では南極域深層水形成環境と氷床融解、(3)では北極海循環・成層構造形成に関する数値実験を実施する。最終年度には、これまでの成果を反映させた全球海洋大循環モデルを構築し、大陸棚 - 外洋間海水交換が全球海洋深層循環・物質循環に及ぼす影響を評価する(研究項目(4))。

### 4. 研究成果

(1) 非静力学数値海洋モデルに組み込んで使用する粒子追跡手法を開発した。本手法における粒子は、従来の手法と同様に数値海洋モデルで計算された流れ場に基づいて移動するのみならず、粒子自体が独自の密度を持って重力や浮力の作用による運動を表現し、さらには粒子の移動の影響を流れ場に反映させることも可能なものである。また、粒子の通過した環境(水温・塩分等)履歴を保存することも可能にしている。これらの機能を高並列計算環境下で効率よく稼働するように実装しており、同時に $10^8$ 個程度の粒子を追跡することが可能になっている。これにより、河川からの土砂流入や海底堆積物の巻き上げ・輸送を陽にシミュレートすることができる。

本手法の利点を顕著に示す適用例として、海水結氷過程のシミュレーションを実施した(成果論文)。海水の結氷初期にはフラジルと呼ばれる小さな針状結晶が形成され成長することが知られている。一方、海面冷却による結氷では主に氷結晶からの塩分排出によって海面付近の海水が高密度化し、それが上下方向の対流運動を駆動する。フラジルを陽に表現しない結氷シ

ミュレーションでは、海面の結氷が開始すると速やかに海面全体が凍結し、その氷が断熱材として働くために以降の海水冷却や結氷が抑制されるという結果が得られる。しかしながら、フラジルの生成・成長・運動を陽に取り扱うことができる本手法によるシミュレーションでは、結氷によって駆動された対流がフラジルを下方に輸送するため、結氷開始後しばらくの間は海面全体の凍結には至らず、海水冷却や新たな結氷（フラジル生成）が続くという結果が得られた。対流によって下方に運ばれたフラジルは最終的には浮力によって海面に浮上して海面を凍結させるが、フラジルの一部は輸送された先で融解してその水温を下げる。海水の結氷温度は圧力の影響により水深が深いところほど低くなるため、こうして海面よりも十分に深いところ（数十メートル深）に形成される低温水は、海面に持ち上げた状態では過冷却となる場合がある。こうした状態は潜在的過冷却と呼ばれるが、結氷海域ではそうした状態が観測されることがあり、本シミュレーションがその形成過程を示したものと考えられる。

(2) 南極大陸周囲の大陸棚上に形成される高密度大陸棚水（DSW: dense shelf water）の低緯度側への広がり、海洋深層循環や全地球規模気候において重要な役割を果たす。DSW は結氷海域の隙間である沿岸ポリニヤにおける局所的かつ継続的な海水生成を起源とし、周囲の海水と混合しながら全海洋の最深部を占める海洋深層水である南極底層水（AABW: AntArctic Bottom Water）となる。しかしながら、大陸棚上で形成された DSW がどのように外洋域へ広がっていくのかは未だ明らかでない。この課題に対して、我々は南極大陸沿岸から南大洋全域までを広く覆う数値海洋 - 海水 - 棚氷結合モデルを適用し、海水生成を起源とする DSW が外洋へ輸送される過程をシミュレートした（成果論文）。

数値実験においては、南極沿岸を 9 個の領域に分けて、それぞれ異なる“色付け”をした水 DSW 生成と同じだけ与える仮想色水実験を実施した。これにより、南極沿岸の各海域から外洋域への海水輸送の経路が明確に示されるとともに、形成された DSW のうちおよそ半分が外洋域に輸送されること、および DSW の 7 %程度が棚氷下に輸送されるという結果を得た。

(3) 北極海は年間を通じた結氷海域であるが、海面付近の浅い深度以外における水温は結氷温度より顕著に高い。特に、深さ 200 ~ 500 m には 0 を上回る海水が存在する（典型的な海水の結氷温度は -2 程度）。この暖水は北大西洋の暖流であるメキシコ湾流の延長として北極海に流入している。近年、気候の温暖化に伴って北極海の海水が急速に減少していることが観測されており、その原因や今後の行方に大きな注目が集まっている。北大西洋から北極海に流入する暖水が高温化していることも観測されており、その海水への影響を明らかにすることは重要な課題である。本研究では、数値海洋 - 海水モデルを用いた北極海および周辺海域の現実的なシミュレーションを通して、大西洋からのフラム海峡を通過して北極海へ流入する暖水の経年変動の要因を調べた（成果論文）。

シミュレーションは大西洋起源水の流路やそれに伴う渦活動を現実的に再現しており、フラム海峡を通過した暖水の熱量のうち 3 分の 2 は海面冷却によって失われる、もしくは北極海中央部に入り込まず西方に流れ去るという結果を得た。北極海中央部に入る残りの熱量に関して、その経年変動要因について各種気候データとの比較解析したところ、北大西洋振動と呼ばれる主要な気候内部変動モードと有意に相関していることが示された。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

Kawasaki, T., and H. Hasumi, Effect of freshwater from the West Greenland Current on the winter deep convection in the Labrador Sea, *Ocean Modelling*, 75, 51-64, 2014. doi:10.1016/j.ocemod.2014.01.003

Kusahara, K., and H. Hasumi, Pathways of basal meltwater from Antarctic ice shelves: A model study, *Journal of Geophysical Research*, 119, 5690-5704, 2014. doi:10.1002/2014JC009915

Nakayama, Y., K. I. Ohshima, Y. Matsumura, Y. Fukamachi and H. Hasumi, A numerical investigation of formation and variability of Antarctic Bottom Water off Cape Darnley, East Antarctica, *Journal of Physical Oceanography*, 44, 2921-2937, 2014. doi:10.1175/JPO-D-14-0069.1

Matsumura, Y., and K. I. Ohshima, Lagrangian modelling of frazil ice in the ocean, *Annals of Glaciology*, 56, 373-382, 2015. Doi:10.3189/2015AoG69A657

Kusahara, K., T. Sato, A. Oka, T. Obase, R. Greve, A. Abe-Ouchi and H. Hasumi, Modelling the Antarctic marine cryosphere at the Last Glacial Maximum, *Annals of Glaciology*, 56, 425-435, 2015. doi:10.3189/2015AoG69A792

Kawasaki, T., and H. Hasumi, The inflow of Atlantic water at the Fram Strait and its interannual variability, *Journal of Geophysical Research Oceans*, 121, 502-519, 2016. doi:10.1002/2015JC011375

Kusahara, K., H. Hasumi, 他 6 名, Modeling ocean-cryosphere interactions off the Adelie and George V Land coast, *Journal of Climate*, 30, 163-188, 2017.

doi:10.1175/JCLI-D-15-0808.1

Obase, T., A. Abe-Ouchi, K. Kusahara, H. Hasumi and R. Ohgaito, Responses of basal melting of Antarctic ice shelves to the climatic forcing of the Last Glacial Maximum and CO2 doubling, Journal of Climate, 30, 2473-3497, 2017. doi:10.1175/JCLI-D-15-0908.1

Kusahara, K., G. D. Williams, T. Tamura, R. Massom and H. Hasumi, Dense shelf water spreading from Antarctic coastal polynyas to the deep Southern Ocean: A regional circumpolar model study, Journal of Geophysical Research Oceans, 122, 6238-6253, 2017. doi:10.1002/2017JC012911

〔学会発表〕(計7件)

Hasumi, H., Resolution dependence of climate biases, variability and sensitivity in comprehensive Earth System Models, WGOMD Workshop on High Resolution Ocean Climate Modelling, 7 April 2014, Kiel (Germany).

Hasumi, H., Toward coordinated observational and modeling studies on the polar oceans, The 5th Symposium on Polar Sciences, 4 December 2014, Tachikawa (Japan).

松村義正, グリーンランド氷河融解水を起源とする高濁度水プルームのモデリング, 日本海洋学会春季大会, 2016年3月15日, 東京.

Matsumura, Y., Modeling sediment entrainment into newly formed sea ice, The 6th Symposium on Polar Sciences, 19 November 2015, Tachikawa (Japan).

Hasumi, H., Coordinated observational and modeling studies on the basic structure and variability of the Arctic sea ice-ocean system, The 6th Symposium on Polar Sciences, 18 November 2015, Tachikawa (Japan).

Kawasaki, T., A modeling study on the inflow of the Atlantic water to the Arctic Ocean, 26th IUGG General Assembly, 27 July 2015, Prague (Czech Republic).

Kawasaki, T., Interannual variability of Atlantic Water inflow and modification in the Barents Sea, Ocean Sciences Meeting, 23 February 2016, New Orleans (USA).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：松村義正

ローマ字氏名：MATSUMURA, Yoshimasa

所属研究機関名：東京大学

部局名：大気海洋研究所

職名：助教

研究者番号(8桁)：70631399

研究分担者氏名：草原和弥

ローマ字氏名：KUSAHARA, Kazuya

所属研究機関名：北海道大学

部局名：低温科学研究所

職名：特任助教

研究者番号(8桁): 20707020

(2)研究協力者

研究協力者氏名：川崎高雄

ローマ字氏名：Kawasaki, Takao

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。