

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340138

研究課題名(和文) 極域海洋における熱塩循環駆動プロセスの数値モデリング研究

研究課題名(英文) Numerical modeling study for driving processes of the thermohaline circulation in the polar oceans

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) 15,400,000円、(間接経費) 4,620,000円

研究成果の概要(和文)：極域海洋の深層水形成過程においてこれまで無視されることが多かったプロセスを扱うモデリング手法を確立し、それを適用した数値実験によってそれらのプロセスが熱塩循環に及ぼす影響を評価した。潮汐の存在が南極大陸周囲の海水分布への影響を通して南極大陸棚上での高密度水形成を顕著に活発化すること、および高密度水の大陸斜面上への流出が潮流による非対称的な輸送によって促進されることが示された。氷床-海洋相互作用過程の存在により、南極周囲の深層水形成を起源とする熱塩循環が小さくなること、および気候温暖化のもとでは氷床融解が促進されるためにこの熱塩循環の弱화가より顕著になることが示された。

研究成果の概要(英文)：We developed modeling methods for some physical processes, which had usually ignored in previous modeling studies, associated with deep water formation in the polar oceans. By applying the developed methods, we estimated the influence of those physical processes on the oceanic thermohaline circulation.

The existence of tides significantly enhance dense water formation on the Antarctic continental shelves through their influences on sea ice distribution. Tides also enhance the export of dense water onto the continental slopes as they transport dense water in an asymmetric way.

Interaction between ice shelf and ocean reduces the thermohaline circulation starting around Antarctica. Under a warming climate, enhanced melt of ice shelf accelerates the weakening of the thermohaline circulation.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学 気象・海洋物理・陸水学

キーワード：熱塩循環 極域海洋 数値モデル

1. 研究開始当初の背景

熱塩循環は様々な海洋循環の形態の中で、表層と深層をつないで全大洋を巡る唯一のものであり、その膨大な熱量と溶存物質の輸送を通して、海洋および気候の長期・大規模変動に本質的に重要な役割を果たす。その起点となるのは高密度化された海水の沈降であり、深層水形成と呼ばれるこの過程は、現在の気候状態においては南北両半球の極域で生じている。この深層水形成は半閉鎖的な縁辺海や大陸棚上という外洋から切り離された海域で生じており、そこでの海水の高密度化の様相は個々の海域の特殊性に依存し、またそれが深層水として大洋に流出する過程には様々な力学的制約や周囲水との混合現象による変質が介在する。それらの物理プロセスの定量的把握が海洋熱塩循環の科学的理解のためには必要とされるが、未解明のプロセスがいまだ残されているのが実情である。

極域海洋における深層水形成・変質・流出に関するモデリング研究はこれまでも様々に行われているが、局所領域規模(水平100~1,000 km)以上のモデリングにおいてこれまで陽に取り扱われることがなかったプロセスがいくつか存在する。その実態を定量的に把握することが、全球規模の熱塩循環の科学的理解を一段階深め、海洋・気候の大規模変動特性を明らかにするために必要とされる次なるステップである。それらのプロセスが取り扱われてこなかった理由は、プロセスのスケールが微小であるために計算資源と解像度の制約から表現できなかった、もしくはプロセスの観測的実態把握が決定的に不足していたためにモデリングの指針を得られなかったことにある。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り、後者の事情については国際極年や地球温暖化問題などを動機とした極域観測プロジェクトの進展によってモデリングに対する貴重な検証材料が整備されつつある。数値モデリングを通してこれらのプロセスの実態把握を深めるには、絶好のタイミングである。

2. 研究の目的

極域海洋における深層水形成・変質・流出過程に寄与する物理プロセスの中で、これまでの海洋大循環モデリングで満足に表現されていない、重力沈降流における混合過程・潮汐・氷床-海洋相互作用の3種に焦点を絞り、局所規模のモデリング手法を確立した上でそれらの物理的特性を明らかにする。各物理プロセスについての具体的な研究目的は以下の通りである。

(1) 重力沈降流とは、大陸棚上で形成された高密度水が大陸斜面上を下る流れを指す。地球の自転効果は大陸斜面上の高密度水を等深度に沿って流すように働くため、高密度水が

外洋に流出するためにはその制約を破る力学プロセスが必要である。本研究でターゲットとする混合過程はエントレインメント過程とも呼ばれ、水平1 km以下の小規模スケールで生じる力学的不安定により、沈降する高密度水が周囲の低密度水を取り込むことで、上述の制約を破るプロセスとして働くとともに、高密度水を変質させつつ沈降流量を増す役割を果たす。その物理的特性を超高解像度シミュレーションによって定量的に把握し、それを陽に解像しない比較的低解像度のモデルでの表現方法(パラメータ化)を開発する。

(2) 潮汐は以下の3種類のプロセスを通して深層水に影響を及ぼす。潮流自体は長時間平均するとほぼ0になるが、潮流が運ぶ熱や塩分の輸送(以下では「潮流輸送」と呼ぶ)が同じく0になるとは限らない。特に大陸棚縁に存在する高密度水に対しては、潮流輸送が効果的に大陸斜面上に流し出す効果を持ち得る。また、急峻な斜面上で摩擦効果が働く場合には潮流の長時間平均が顕著な平均流を生じる。この潮汐残差流は上述の重力沈降流の振舞に影響を及ぼす。また、潮流に対する海底摩擦は海底付近での乱流混合を励起し、上述の重力沈降流のエントレインメント過程のひとつになる。従来、海洋大循環のモデリングで潮流を陽に表現することはほとんどなく、潮流輸送や潮汐残差流は基本的に無視され、潮汐混合は無視されるもしくは潮流の実態とは関係なく非常に大雑把な形で拡散係数としてパラメータ化されていた。本研究では、潮流について高解像度局所領域シミュレーションで検証および実態把握を行ったのち、比較的低解像度のモデルで潮流輸送と潮汐残差流を適切に表現する方法を考案する。潮汐混合については、上述の重力沈降流を扱うモデルと同様の枠組みの超高解像度シミュレーションによる実態把握を通して、陽に表現された潮流のもとでの既存の乱流混合パラメタリゼーションの適用方法を考案する。

(3) 氷床-海氷相互作用は、ここでは特に棚氷(海上にせりだした大陸氷床で、その下端が海底まで達していない部分)下における特殊な力学・熱力学過程に伴う高密度水形成やその循環を指す。通常の海水は1気圧での結氷点(約-2℃)以下にはならないが、水深100~200 mにある低温の棚氷下面と接した海水はそれよりも顕著に低い温度を獲得できる。また、棚氷下面の融解やそこにおける海水結氷は主に塩分変化に伴う密度対流を生じ、棚氷下に独自の循環を形成し、その様相が棚氷下で形成された非常に低温かつ高塩分の高密度水の外洋への輸送をコントロールする。この棚氷下の力学・熱力学過程を扱うモデルを開発し、高解像度局所領域シミュレーションで検証した上で、大循環モデルに取り込む。

さらに、これら3種類の物理プロセスの効果を海洋大循環モデルに取り込み、熱塩循環への影響を評価する。近年世界各国の研究者・研究機関がこれらのプロセスの大循環モデルへの取り込みの努力を開始しているが、完全な実用化には至っていない。

3. 研究の方法

(1) 初年度には各プロセスのモデリングに関する設定準備を行う。重力沈降流における混合過程に関しては、南極大陸縁のウェッデル海で生じている高密度水形成・沈降を対象とした予備実験と設定作成を行う。潮汐に関しては初年度中に大陸棚から大洋底にかけて局所領域規模の潮流・残差流のモデリング手法を確立するとともに、南極周囲の主たる深層水形成領域のひとつである東南極大陸棚域を対象とした設定作成を行う。氷床・海洋相互作用に関しては、開発済みのプロセスモデルの高度化を行いつつ、南極全域を対象とした設定作成を行う。

(2) 初年度に作成した潮流・残差流モデリングの領域および結果をベースとして、第2年度に、氷床・海洋相互作用に関しては棚水域まで領域を広げる形で、重力沈降流における混合過程に関しては潮流・残差流を取り込んだ上でさらに限定された局所領域での高解像度化という形で、それぞれシミュレーションを行って現象の定量化とプロセスのパラメータ化を行う。

(3) 最終年度には、各プロセスの効果を取り込んだ海洋大循環シミュレーションを行い、それらを考慮しない従来のモデルとの比較により、全球海洋熱塩循環におけるこれらのプロセスの影響を評価する。

4. 研究成果

(1) 重力沈降流における混合過程に関しては、理想化された状況における超高解像度シミュレーションを実施してその影響を定量化するとともに、現実的な広領域を扱う数値モデルにおいてその影響をパラメータ化して取り込む手続きを開発した。この手法は動的LES (large eddy simulation) と呼ばれるもので、流体力学分野では様々な応用実績が存在するものの、海洋モデリングにおいては海洋特有の事情(領域の縦横比の大きさ、鉛直方向に卓越する密度変化に伴う異方性、など)のためにこれまであまり適用されてこなかったものである。この手続きを理想化された状況のシミュレーションを通して検証し、有効性を確かめることはできたものの、使用可能な計算資源との兼ね合いにより、海洋大循環モデルに組み込んだ上で本研究が対象とする現実的な状況の数値実験を実施するには至らず、深層水の変質への影響を適切に評価することはできなかった。計算機事

情は年を追うごとに格段に改善されており、本研究を引き継ぐ形となる採択済み課題の中でこの手続きを実用することができるものと考えている。

(2) 潮汐の影響に関しては、その存在が南極大陸周囲の海水分布(沿岸ポリニヤを含む)への影響を通して南極大陸棚上での高密度水形成を顕著に活発化すること、生成された高密度水が周囲の海水との混合によって失われる割合が潮汐によって大きくなること、および高密度水の大陸斜面上への流出が潮流による非対称的な輸送によって促進されることが示された。高密度水の大陸斜面上への流出量という観点で潮汐が存在する場合と存在しない場合のシミュレーション結果を比較すると、前者では後者と比べてより少ない量の高密度水をより効率的に流出させるという結果となり、最終的な流出量としては大きく変わらないという結果が得られた。しかし、現実の現象における潮汐の寄与という意味では、潮汐が存在する場合において、潮流輸送による流出量が全体のどれだけ占めるかという見積もりが重要である。これについては、特に東南極アデリーランド沖で形成された高密度水の流出に関して、潮流輸送が全流出の20%程度を説明し、潮汐が深層水形成にとって無視できない役割を果たしていることが示された。流出した高密度水が外洋の深層水となる過程で受ける混合過程(エントレインメント)については上述の通り定量的な評価には至らず、今後の課題として残された。

(3) 氷床・海洋相互作用過程に関しては、それが存在することにより南極周囲の深層水形成を起源とする熱塩循環は10%程度小さくなること、および気候温暖化のもとでは氷床融解が促進されるためにこの熱塩循環の弱화가より顕著になることが示された。一方、南極周囲の個々の棚氷について気候温暖化に対する応答を見ると、融解がほとんど促進されないものがあり、融解水の存在自体が作る流れがそこに影響していることが示された。氷床融解水の振舞については、融解当初は低密度であるために海面付近に分布して流れるが、途中で通過する沿岸ポリニヤでの塩分排出の影響を受けることで、一部が深層にも達することが示された。このことは南極周囲の主要な深層水形成領域で近年になって顕著な塩分低下が観測されている事実と整合するものの、モデリング結果における氷床融解水の深層への流入量は観測的に示唆される量よりも小さいことも見出された。これは氷床融解水の南極大陸沿岸の流れる過程で、一部が現実とは異なる経路を辿ることによると考えられる。さらなる高解像度化を含めて、より高精度のシミュレーションを行うことが今後の課題である。

5 . 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

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

Urakawa, L. S., and H. Hasumi (2014) Effect of numerical diffusion on the water mass transformation in eddy-resolving models, *Ocean Modelling*, 74, 22-35, doi:10.1016/j.ocemod.2013.11.003.

Kusahara, K., and H. Hasumi (2013) Modeling Antarctic ice shelf responses to future climate changes and impacts on the ocean, *J. Geophys. Res.*, 118, 1182-1194, doi:10.1002/jgrc.20166.

Urakawa, L. S., and H. Hasumi (2012) Eddy-resolving model estimate of the cabbeling effect on the water mass transformation in the Southern Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, 42, 1288-1302, doi:10.1175/JPO-D-11-0173.1.

Matsumura, Y., and H. Hasumi (2011) Dynamics of cross-isobath dense water transport induced by slope topography, *J. Phys. Oceanogr.*, 41, 2402-2416, doi:10.1175/JPO-D-10-05014.1.

Kusahara, K., H. Hasumi and G. D. Williams (2011) Dense shelf water formation and brine-driven circulation in the Adelie and George V Land region, *Ocean Modelling*, 37, 122-138, doi:10.1016/j.ocemod.2011.01.008.

[学会発表](計16件)

Matsumura, Y., and K. I. Ohshima: Modeling frazil crystals and their impacts on ocean mixed layer, *IGS International Symposium on Sea Ice in a Changing Environment*, 10-14 March 2014, Hobart (Australia).

Kusahara, K., and H. Hasumi: Modeling Antarctic ice shelf responses to future climate changes, *Ocean Sciences Meeting*, 23-28 February 2014, Honolulu (USA).

Kawasaki, T., and H. Hasumi: High-resolution modeling study on the Atlantic water inflow to the Arctic Ocean, *IAHS-IAPSO-IASPEI Joint Assembly*, 22-26 July, 2013, Gothenburg (Sweden).

廣田和也, 羽角博康, 草原和弥: 東南極大陸棚上の高密度水形成と流出に対する潮汐の影響, 日本海洋学会秋季大会, 2013年9月17-21日, 北海道大学(北海道).

Matsumura, Y., and H. Hasumi: High-resolution modeling on the Antarctic Bottom Water formation, *IUGG General*

Assembly, 28 June-7 July 2011, Melbourne (Australia).

Urakawa, L. S., and H. Hasumi: Cabbeling effect on the water mass transformation in the Southern Ocean, *IUGG General Assembly*, 28 June-7 July 2011, Melbourne (Australia).

6 . 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

松村 義正 (MATSUMURA, Yoshimasa)
北海道大学・低温科学研究所・助教
研究者番号: 70631399

草原 和弥 (KUSAHARA, Kazuya)
北海道大学・低温科学研究所・特任助教
研究者番号: 20707020