

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870021

研究課題名(和文)非静力学海洋モデルと現場係留観測に基づく南極底層水形成の実態把握

研究課題名(英文)Quantification of Antarctic Bottom Water formation processes based on high-resolution modeling and direct mooring observations

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は数値海洋モデルと現場係留観測を相補的に活用し、南極底層水形成機構の定量的な理解を得ることを当初の目的としていたが、後者の観測計画が順調に進まなかったため、計画を変更し数値モデル高度化に取り組んだ。まず非静力学海洋モデルに粒子追跡法を組み込み、微小なフラジルアイスラグランジュ的に扱う新規的な海水・海洋結合モデルを開発した。これにより、南極底層水形成の起点である沿岸ポリニヤでの海水生成過程の直接数値シミュレーションに成功した。次に粒子追跡法を海底堆積物の浮上・輸送過程に適用した。開発した数値モデルは様々な研究対象に応用可能であり、今後の発展が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Although Antarctic Bottom Water formation plays very important roles in the Earth's climate, it has not yet been realistically reproduced by numerical simulations. The present study focuses on the improvement of numerical model code by implementing a Lagrangian particle tracking system built-into a non-hydrostatic ocean model. Using this Eulerian-Lagrangian hybrid approach, we develop a new coupled sea ice-ocean model that explicitly deals with frazil ice as Lagrangian particles. It successfully simulated small scale sea ice formation processes in a coastal polynya. We also develop a model that explicitly simulates suspended sediments and their effects on the apparent density of seawater. The newly developed non-hydrostatic ocean model with a built-in Lagrangian particle tracking system has many potential applications.

研究分野：海洋物理学

キーワード：フラジルアイス 非静力学モデル 海洋海水結合モデル 粒子追跡法

1. 研究開始当初の背景

南極大陸沿岸のポリニヤでは、活発な海氷生成によって低温高塩の高密度陸棚水が形成され、これが大陸斜面を沈降することにより、全球海洋で最も重い水塊である南極底層水が形成される。南極底層水形成は全球規模の海洋大循環を駆動・維持する役割を担っており、その理解は地球の気候形成を論ずる上でも重要である。しかし直接観測が困難であることなどから、どこでどれだけ量の底層水が形成されているか、という定量的な理解は十分に得られていなかった。

近年、衛星観測から沿岸ポリニヤでの海氷生産量を詳細に見積もることが可能となり、東南極ケープダンレーポリニヤの海氷生産量が顕著に高いことが指摘され (Tamura et al., 2008)、この海域で南極底層水の起源となる高密度陸棚水が形成されていることが示唆された。これを受け、ケープダンレーポリニヤ内および大陸斜面上に係留系を多数設置することによる、活発な海氷生成による高密度陸棚水の形成と、それが大陸斜面を降る過程の直接観測が計画された。ただし係留系による観測では、係留点でのデータしか得られないため、そこから底層水形成量を見積もるには補完による不確実性が避けられない。

他方、従来の数値モデリング研究においては、解像度の不足や海底地形データの不確実性等から南極底層水形成の現実的な再現は困難であった。また、そもそも数値シミュレーション結果の妥当性を検証するための観測データが存在しないという本質的な問題が存在する。本研究では研究代表者が開発する非静力学海洋モデルと、同時期に展開される現場直接観測によって得られるデータを相補的に用いることで、当該海域での南極底層水形成が定量的に明らかになることが期待された。

2. 研究の目的

研究開始当初においては、日本南極地域観測隊による直接観測計画が進行中の東南極沿ケープダンレー沖をターゲットとして、係留系や船舶観測から得られる観測データをもとに数値モデルを駆動して可能な限り現実的な設定で高解像度シミュレーションを実施することで、この海域での南極底層水形成の全容を定量的に明らかにすることを目標としていた。しかしながら上記の日本南極地域観測隊観による現場観測計画が順調に進まず、係留系回収の目処がたたないなど、研究実施初期の段階で当初想定した観測データが得られないことが明らかになり、計画を変更する必要が生じた。そこで今後観測データが得られた際により高精度かつ先駆的

なシミュレーションが実施できるよう、本研究の主要な目標を数値モデル高度化とした。具体的には底層水の形成やその沈降過程に重要な役割を担うにも関わらず、従来の数値モデルでは考慮されていなかったプロセスを陽にモデル化することを目標とする。また GPU に代表される次世代型の計算機アーキテクチャへ数値モデルコードを移植し、将来の大規模シミュレーションのフィージビリティを確保することも本研究の目的とする。

3. 研究の方法

本研究で使用する数値モデルは、研究代表者が開発・運用している非静力学モデル kinaco である。本モデルも一般的な海洋モデルと同じく、構造化格子に基づく有限体積法により流速と温度・塩分等のトレーサー値を予報するものであるが、近年の海洋モデリング研究の進展に伴い、海洋モデル一般において扱えるトレーサーの精度や数に対する需要が高まりつつある。例えば本課題が対象とする底層水形成に関する研究においては、仮想トレーサーが有効な解析手法の一つとなっているが、生成場所と生成時期を詳細に追跡するには地域・年代別のトレーサーを用意する必要がある。さらに堆積物輸送や生態系モデリングといった様々な応用的研究への適用を視野にいと、計算負荷や精度の観点から個別のトレーサー毎にオイラー的な格子平均量の時間発展を解く従来の手法は適さない可能性がある。

そこで様々な用途で利用することを想定し、汎用的なオンラインラグランジュ粒子追跡を実装した。オンラインとは粒子追跡コードが有限体積法に基づく海洋数値モデルに組み込まれ、タイムステップ毎に流速等の予報と同時に粒子追跡を行うことを意味している。オンライン粒子追跡では流速場出力時間間隔に関わらず渦輸送が表現できる、単なるパッシブトレーサーではなく粒子自身が流速場や温度・塩分に影響を与える事ができる等の点でオフライン粒子追跡より有用であり、これによりオイラー的に予報される海水の運動と、海水中に多数分散して存在しラグランジュ的に予報される粒子群 (例えばフラジルアイスや懸濁粒子等) が力学的・熱力学的に結合されたオイラー・ラグランジュ型、または Particle in Cell (PIC) 型の混相流シミュレーションが可能となる (図1)。

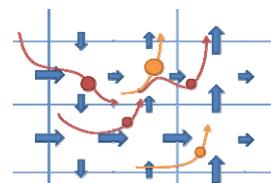


図1: 粒子追跡による PIC 型モデルの概念図

ただし、オンライン粒子追跡の実施によりモデル全体のパフォーマンスの劣化を招かぬよう、粒子追跡部分の計算負荷を低く抑える必要がある。特に衝突・近接判定といった粒子間相互作用や局所的に存在する粒子群が現場の流速・水塊特性に与える影響の評価を高速に実施するには、時々刻々個別に移動し続ける膨大な数の粒子に対して、如何に近傍に存在する粒子をグループ化し高い検索性をもたせることができるかが肝要である。本研究では粒子のデータ構造として連結リストを採用することでこの問題に対処した。具体的には粒子を個別の ID, 座標, 粒子種別及びその他の複数の属性と、それらに加えて近接粒子への参照として機能する整数値を保持する構造体として定義し、各格子に含まれる粒子群でそれぞれ連結リストを構築する。このようなデータ構造とすることで特定の座標を指定すればその近傍に存在する粒子群を配列全体をスキャンすることなく高速に特定することができる。移流によって粒子が別の格子に移動した場合にも参照インデックス値を更新するだけで連結リストの整合性が保たれ、また逐次メモリのアロケート/解放を行うことなく任意の時刻・場所で粒子の生成・消滅が実現できる (図 2)。

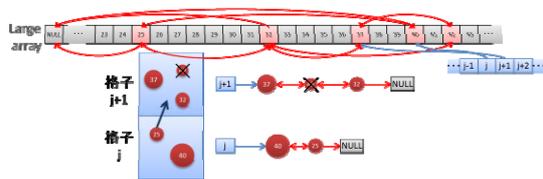


図 2: 連結リストによる粒子群の表現の模式図

本研究ではこの新たに開発した PIC 型海洋モデルをフラジルアイスや懸濁物質に適用し、理想化した設定での数値シミュレーションによってそれらの影響を調査した。

4. 研究成果

(1) フラジルアイスのモデリング

南極底層水の形成は沿岸ポリニヤ内での活発な海氷生成を起点としている。海面が穏やかな場合には大気によって熱が奪われると海表面に一樣な薄氷が形成され、それが徐々に成長して厚い氷板となるが、一方強い海上風等の条件下で海表面が乱流状態にある場合、表層にフラジルアイスと呼ばれる微小な氷の粒子が無数に形成・成長し、それらが徐々に集積しグリース状の海水・海水混合物をなす。このように海水の様相は結氷時の海面状況に大きく影響されるが、これは大気海洋間の熱収支や正味の海氷生成量においても重要な差異を生じ得る。一樣な氷板はある程度厚みを増すと断熱材として機能し以後の熱交換と新規の海氷生成を妨げるのに対

し、海面がグリース状の海水・海水混合物であれば海水が大気に接するため大きな熱フラックスと高い海氷生産を維持できる。しかし既存の海洋海氷結合モデルではこれらの海氷形態の差は十分に考慮されていない。グリースアイス構成するフラジルアイスは冷却と塩分排出が駆動する鉛直対流や海上風によって励起された乱流によって混合層内部に広く存在し得る事が現場係留観測から知られている。そこでオンライン粒子追跡法を用いてフラジルアイスの挙動を陽に扱うモデルを構築した。ただし実際のフラジル結晶は無数に存在しその全てをシミュレートする事は原理的に不可能であるため、モデルで扱う粒子はまとめて移流するクラスター状のフラジル群であるとみなし、各粒子毎に結晶の総質量を保持する。各粒子は移流しながら現場の水温と結氷点の差に応じて熱力学的に成長又は融解し、その量に応じて各格子での予報温位・塩分に対して潜熱と淡水のやりとりを行う (図 3)。結晶の浮上速度は体積力である浮力と水平投影面に依存する抵抗のバランスで定まるため、小さい結晶は海水の流れにしたがって移流されやすいのに対し、十分大きく成長した結晶は対流に逆らい表層まで浮上する傾向にある。表層でフラジル集積度が高まるにつれグリースアイスが形成されるが、その力学的効果はモデル格子中のフラジルアイスの体積比に応じて粘性を高めることで表現される。またグリースアイス中の固相の比率が十分に高まると氷板に遷移し断熱効果を持つことが想定されるが、その効果を単位面積あたりに表層 10 cm 以浅に存在するフラジル体積から算出した有効海氷厚を用いてパラメタ化した。以上のような数値モデルを用いて活発な海氷生成の生じる厳冬期の沿岸ポリニヤを想定した理想化数値実験を実施した (図 4)。

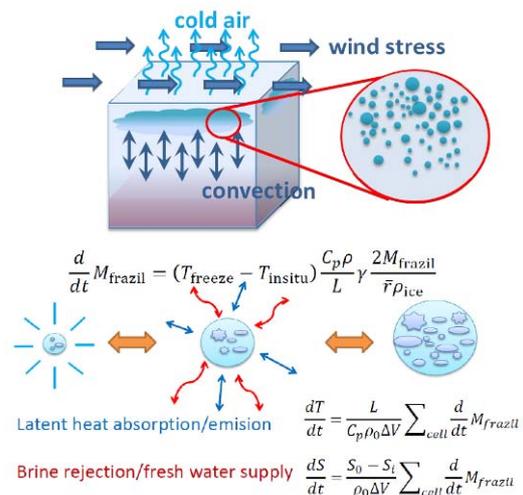


図 3: 粒子追跡によるフラジルアイスモデルの概念図

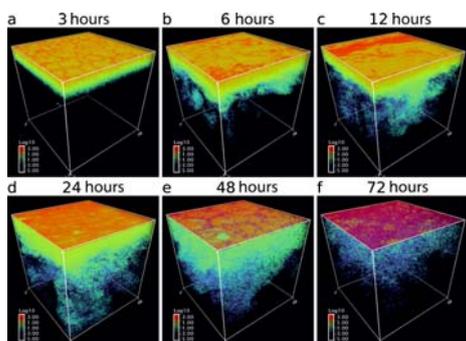


図 4: フラジルアイス層を陽に考慮した海氷生成過程の理想化シミュレーション結果。色は海水中にフラジルアイスが占める割合であり、初期に海面付近で生成されたフラジルアイスが対流により下層に移流され、数日後に浮力によって浮上して海面を覆う様子が再現されている。

フラジル粒子の力学的・熱力学的挙動を陽にシミュレートすることにより、沿岸ポリニヤ域において開水面が強い大気冷却にさらされた場合にしばしば観測される数10m深でのポテンシャル過冷却（海水の温位が表層の結氷点より低くなる現象）等の特徴的な現象を再現することに成功した。このポテンシャル過冷却は海面での熱損失が直ちに氷板成長に用いられる従来の海洋海水モデルでは原理的に表現できない現象である。フラジルアイス・グリースアイス層を陽に表現する本モデルは氷板成長のみを考慮する従来のモデルに比べ、海上風が強く海面での乱流混合が活発な場合に海水と大気が直接接する期間が相対的に長くなるため、特に開水面が冷却に晒されてから24時間程度の結氷初期において高い熱損失が維持され、正味の海水生産量が増加するという結果が得られた。また沿岸ポリニヤ全体を対象とするより広範囲のシミュレーションにおいては、衛星画像で特徴的にみられるグリースアイスの筋状構造が再現された(図5)。このような筋状構造は海上風と海面での熱的強制によって海洋表層で生じる微小スケールの循環にフラジル粒子が移流・集積されることで生じるもので、本研究によって初めて数値シミュレーションでの再現に成功した。

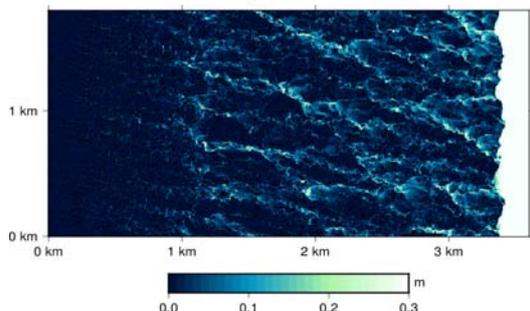


図 5: 数値モデルによって再現された沿岸ポリニヤでのグリースアイスがなす筋状構造。左端が岸、右端が沖のポリニヤ端であり、起き向きの海上風により生成されたフラジルアイスが移流され、ポリニヤが維持されている。

(2) 粒子追跡による懸濁物質のモデリング
 高密度水が大陸斜面を下る際には、強い鉛直シアにより堆積物が再浮上し、海底混合層内に懸濁物質が巻き上がる。浮上した懸濁物質は高密度水の流れによって移流され、重力の影響により次第に沈降していく。この過程は沿岸域の物質を沖方向に輸送するだけでなく、流れの場にも影響を与える可能性がある。すなわち、海水より比重の重い堆積物粒子を豊富に含む懸濁した海水は見かけの密度が高くなり、重力流として大陸斜面上の沈降を加速させる。懸濁物質の再浮上により見かけの密度が増加したことで獲得された位置エネルギーは、重力流として斜面を下る際に運動エネルギーに変換され、最終的に乱流エネルギーにカスケードして懸濁粒子を攪拌し、懸濁物質が除去されるのを妨げるように作用する。このような海水中の懸濁物質による見かけの密度変化を数値モデルに導入するには、懸濁物質濃度を新たなトレーサーとして予報し、状態方程式にこの懸濁物質濃度への依存性を加えればよい。しかし海水中の懸濁物質の実体は様々な粒径をもち、それぞれが別々に運動する粒子であり、粒径や組成によって異なる沈降速度で除去されていく。このため格子平均の懸濁物質濃度としてオイラー的に表現するには限界がある。本研究ではオンライン粒子追跡によって懸濁物質粒子の運動をラグランジュ的に陽に扱い、個々の粒子が海水から受ける形状抵抗の反作用の総和を海水の運動を記述するナビエーストークス方程式の右辺に加えることで、海水中を漂う多数の粒子が海水に及ぼす影響を直接モデルに導入した。個々の粒子が海水から受ける形状抵抗は粒子の形状や向きに大きく依存するため厳密に評価することは困難であるが、扱う粒子は十分に小さく慣性が無視できると仮定すれば、全ての粒子は海水の流れに対する相対速度が終端沈降速度の状態にあるとみなすことができる。この場合個々の粒子が海水から受ける形状抵抗は浮力とつり合っているため、粒子を構成する物質の密度と粒子体積から評価できる。

この海水中の懸濁粒子の力学的影響を陽に扱うことのできる数値モデルを用いて、次に述べる理想化実験を実施した。

① 底層水が斜面を下る際の典型的な流速を用いて海底堆積物の再浮上および輸送過程の理想化実験を実施した。

② (1)で述べたフラジルアイスモデルと結合し、浅い陸棚での海水生成時に海上風による乱流混合等で海面まで海底堆積物が巻き上げられ、凝結する海水に取り込まれる過程の直接シミュレーションを実施した。

③ 氷河末端から海洋に流出する、陸起源の懸濁物質を含んだ高濁度水プルームの数

値実験を実施した(図 6)

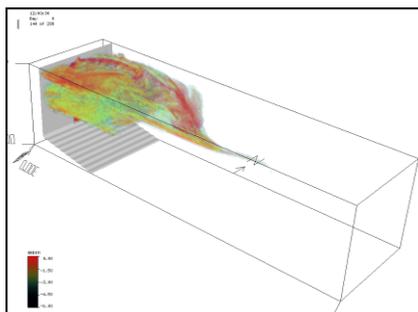


図 6: 氷河末端から湧き出る高濁度の融解水が形成するブルームのシミュレーション結果。色は懸濁物質濃度。ただし実験設定におけるコリオリパラメータは正(北半球)のため、ブルームは下流に向かって右側側壁に沿う傾向にある。南半球では逆となる。

ただしこれらの現象は現実海洋においてどのような条件で生じているか明らかでないため、現段階で実施できるシミュレーションは極めて理想化した設定に限定されている。現場観測研究と連携することで、より現実的なシミュレーションを実施することが今後の課題である。

(3) 数値モデルコードの高度化

上で述べたように本研究は当初の計画を変更し、比較的小規模の理想化実験を多数行うこととなったが、将来的に現実設定での大規模シミュレーションが可能となるよう、数値モデルコードの高度化を実施した。まず将来さらなる高並列化が想定される大型計算機の性能を十分に発揮できるよう、並列化効率の改善を実施した。これまで研究代表者が開発してきた海洋非静力学モデル kinaco はすでに MPI による並列化がなされていたが、将来の超高並列環境でもスケーラビリティを保てるよう、新たに OpenMP による共有メモリ型のスレッド並列化を実施し、MPI+OpenMP のハイブリッド並列に対応させた。特に粒子追跡コードでは複数のスレッドが同時に粒子の生成消滅による連結リスト操作を実施することを防ぐための排他処理を実装している。これにより、京コンピューター(理化学研究所)上で数万コア規模の高並列環境で膨大な数の粒子を扱う場合にも高い実効性能を発揮できることを確認した。

また、近年急速に普及しつつある GPU アーキテクチャへの移植も実施し、多重格子前処理などの近似演算を単精度で実施する混合精度演算を採用することで、CPU の 4 倍以上の実効性能を得ることに成功した(NVIDIA 社 K20C GPU と富士通 SPARC64 VIIIIfx CPU の比較において)。

本研究で開発したモデルは汎用的であり、今後様々な用途に応用可能である。オンライン粒子追跡を組み込んだ PIC 型海洋モデルという新規的な手法を採用しつつも、最新の計算機環境に対応し、高い効率で大規模シミュレーションを実施可能な海洋・海水結合系モデリングプラットフォームを構築できたことは本研究の重要な成果である。開発した数値モデルコードは下記 URL にて研究コミュニティに公開している。

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 2 件)

- ① Matsumura, Y. and K. I. Ohshima, Lagrangian modelling of frazil ice in the ocean, *Annals of Glaciology*, 56(69), 2015, pp.373-382, doi:10.3189/2015AoG69A657. 査読有
- ② Nakayama, Y., K. I. Ohshima, Y. Matsumura, Y. Fukamachi and H. Hasumi, A Numerical Investigation of Formation and Variability of Antarctic Bottom Water formation off Cape Darnley, East Antarctica, *Journal of Physical Oceanography*, 44, 2014, pp.2921-2937, doi:10.1175/JPO-D-14-0069.1. 査読有

[学会発表] (計 25 件)

- ① Yamagishi, T. and Y. Matsumura, A GPU acceleration of a non-hydrostatic ocean model using a mixed precision multigrid preconditioned conjugate gradient method, Supercomputing Conference 2015, 2015年11月17日, オースティン(アメリカ合衆国)
- ② Matsumura, Y. and K. I. Ohshima, Modeling frazil ice using Lagrangian particle tracking, 26th IUGG General Assembly 2015, 2015年7月1日, プラハ(チェコ)
- ③ Matsumura, Y., Modeling oceanic multiphase flow by using Lagrangian particle tracking, 2014 AGU fall meeting, 2014年12月16日, サンフランシスコ(アメリカ合衆国)
- ④ 松村義正, 大島慶一郎, 羽角博康, 南極底層水形成機構の高解像度モデリング, 日本地球惑星科学連合2014年大会, 2014年5月2日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

- ⑤ 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, 2014年3月11日, ホバート (オーストラリア)

[図書] (計 1 件)

- ① 大島慶一郎、深町康、青木茂、松村義正他、丸善出版、「低温科学便覧」第7章 南極海における海氷生成と深層水形成、2015、383(133-158)

[その他]

数値モデルコード公開 URL

<http://wwod.lowtem.hokudai.ac.jp/~ymatsu/work/kinaco.git>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究協力者

山岸 孝輝 (YAMAGISHI, Takateru)
(財)高度情報科学技術研究機構