

論文審査の結果の要旨

氏名 松村 義正

深層海洋大循環の起源となる深層水形成は、冷却や結氷の結果として高密度化された海水が周囲の海水と混合して変質しながら沈降する過程であり、世界海洋の極めて限られた海域のみにみられる現象である。南極沿岸は主要な深層水形成領域のひとつであり、その実態を定量的に記述するとともに、それを支配する物理過程を明らかにすることは、現在の海洋大循環の成因を解き明かすのみではなく、地球温暖化に代表される大規模気候変動を議論する上でも重要である。南極沿岸の深層水形成については、極めて局所性が高い現象であることや、氷海域であるために冬季の現場観測が困難であることなどにより、これまでの観測的研究では十分な知見は得られていない。また、数値モデリングの試みもこれまでに存在するが、微小スケールの物理プロセスを適切に表現しながら深層水の形成過程全体を取り扱うことは、これまでの数値モデルおよび計算機資源のもとでは大きな困難が伴っていたため、大幅に理想化された枠組みでしか行われていない。本論文は、南極沿岸で生じる深層水形成のうち、特にウェッデル海において棚氷水と呼ばれる高密度水が沈降する過程について、研究に必要とされる数値モデルの開発、および、数値シミュレーションの結果に基づく定量的評価と支配的な物理過程の解明を行ったものである。

本論文は全5章と補遺1章からなる。第1章は序章であり、南極沿岸における深層水形成に関する研究の海洋科学および気候科学における重要性、本研究が対象とするウェッデル海の棚氷水に関するこれまでの観測的知見、高密度水の沈降・変質過程に関する力学的背景、および、深層水形成過程の数値モデリングにおいて克服すべき課題が述べられ、本研究の位置づけと目的が記述されている。

第2章では、本研究で開発・使用される3次元非静力学海洋モデルの概要が記述されている。3次元非静力学海洋モデルでは3次元ポワソン方程式の数値計算効率がモデル全体の計算効率を大きく左右する。本研究では、海底地形という複雑な境界条件の存在や領域の縦横比が非常に大きいことなど、現実的な海洋シミュレーションに特有な問題設定に対して、マルチグリッド法を前処理とする共役勾配法を最適化することにより、高い計算効率を実現した。これにより計算負荷が静力学海洋モデルと同程度にとどまる非静力学海洋モデルが実現され、従来に比べてその適用性が格段に高められた。なお、このモデルの定式化や数値計算手法の詳細については補遺で述べられている。

第3章では、ウェッデル海における棚氷水の沈降過程に関する数値シミュレーション結果とその力学的な解釈が記述されている。大陸棚から大陸斜面へ供給された棚氷水は、コリオリ力の作用によって斜面上の等深線を沿うように流れる傾向があり、その沈降には前線不安定・海底摩擦・海底地形の起伏など、地衡流の制約を破る要素の作用が必要とされる。このうちの海底地形の起伏について、理想化された問題設定のもとで沈降が生じる一般的な力学的条件を導き、ウェッデル海の棚氷水の沈降においてそれが確かに主要因となっていることを数値シミュレーションの結果から確認した。さらに、設定を変えたいくつかの仮想的な数値実験を通して、ウェッデル海における高密度水の4000m以深への沈降においては、前線不安定や海底摩擦ではなく、小規模な海底起伏の作用とサーモバリック効果（海水圧縮率の温度依存性）が本質的に重要であることを明らかにした。

第4章では、第3章で得られた結果に関する議論が述べられている。特に、エントレインメント過程と呼ばれる、高密度水と周囲の海水との混合過程の重要性に関する議論がなされ、これに関する今後の研究の必要性が述べられている。また、本研究で得られた知見を海洋大循環の数値モデリングに適用するためのパラメタリゼーションの可能性についても議論されている。

第5章は結論であり、本論文全体をまとめ、深層水形成過程の数値モデリング研究に関する今後の展望が述べられている。

以上、本論文は、新規的な数値モデルの開発によって海洋中の物理過程の研究に新たな展望を切り拓いた点、およびその数値モデルを現実的問題に適用することで南極沿岸での深層水形成過程に関して新たな力学的知見を得たという点で、高く評価できる。また、この研究成果および開発された数値モデルは、今後の海洋物理学研究において大きなインパクトを持つものと期待される。

なお、本論文は指導教員である羽角博康准教授との共同研究であるが、論文提出者が主体となって数値モデル開発・数値実験・結果解析を行ったものであり、その寄与が十分であると判断できる。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。