

## 論文審査の結果の要旨

氏名 高橋 杏

南極周極流域は、活発な渦活動を伴い海底まで達する地衡流場と、上空を吹く強い偏西風の擾乱に伴い励起される近慣性波や、地衡流が海底地形の凹凸にあたることで励起される風下波など様々な内部波が共存する、特殊な海域である。近慣性波や風下波の砕波に伴って生じる強い乱流混合は深層循環に影響を与えるため、南極周極流域における乱流混合強度の定量化は、深層海洋大循環像を解明していく上で、重要な課題である。

鉛直波長スケール 0(10-100 m) の水平流速鉛直シアーや密度ストレインの鉛直波数スペクトルを用いて乱流混合強度を推定するファインスケール・パラメタリゼーションは、直接観測が困難な乱流混合強度の空間分布を効率よく把握する方法として広く用いられてきた。しかし、南極周極流域では、ファインスケール・パラメタリゼーションから推定した乱流エネルギー散逸率が実際の散逸率を過大評価することが報告されている。この事実は、背景内部波間の非線形相互作用に伴うエネルギーカスケード過程を想定した既存のファインスケール・パラメタリゼーションでは、内部波場と地衡流場が共存する南極周極流域における乱流混合過程を把握できないということを示唆している。本研究では、現場観測と数値実験の両面から、既存のファインスケール・パラメタリゼーションが過大評価傾向を示す原因を突き止め、さらに、乱流混合の主要因である「内部波の砕波」において地衡流シアーがどのような役割を果たすのかを明らかにすることで、南極周極流域における乱流混合過程の新たな描像を提示することに成功した。

本論文は5つの章から構成されている。

第1章では、イントロダクションとして、深層海洋大循環に対して南極周極流域の乱流混合が果たす役割や、ファインスケール・パラメタリゼーションの開発の歴史に関する先行研究のレビューが行われた後、本論文の目的が述べられている。

第2章では、南極周極流域で実施された乱流混合強度、水平流速、水温・塩分の同時観測データの解析を通じて、ファインスケール・パラメタリゼーションによる乱流散逸率の過大評価傾向が、シアーおよびストレインの「鉛直波数スペクトルの歪み」と関連していることを明らかにした。さらに鉛直波数スペクトルの歪みを定量的に評価するために“hump parameter”という量を定義し、内部波パラメータ等との関係について重相関解析を用いて調べることで、鉛直波数スペクトルの歪みの形成に「地衡流シアーによる近慣性波の励起・捕捉」や「地衡流に伴う風下波の励起」が関わっているという、興味深い結果を明らかにした。

第3章では、内部波の砕波に伴う乱流混合過程を再現する「波追跡シミュレーション」を用いて、第2章で確認された「鉛直波数スペクトルの歪み」によってファイン

スケール・パラメタリゼーションが乱流散逸率を過大評価してしまう原因を明らかにした。波追跡シミュレーションという比較的簡単な手法を用いることで、「背景内部波スペクトルの内部波エネルギーレベルが大きく、特にシア/ストレイン比が小さい場合に、ファインスケール・パラメタリゼーションによる過大評価が顕著となる」という観測結果の特徴をよく再現するとともに、その背後にあるメカニズムを明確にした。

第4章では、南極周極流域におけるファインスケール・パラメタリゼーションの過大評価傾向の原因として先行研究 (Waterman et al. 2014) で挙げられていた「平均流シアに伴う波-平均流相互作用」が乱流混合強度に与える影響について、波追跡シミュレーションを用いて定量的に検証した。その結果、先行研究では単色の風下波パケットと平均流シアのみを対象としていて、様々な周波数・波数を持つ内部波が重なり合っている現実の背景内部波場の存在を一切考慮していないという問題点を指摘するとともに、背景内部波場が存在する現実的な状況においては「平均流シアに伴う波-平均流相互作用はファインスケール・パラメタリゼーションの過大評価傾向の原因にはなり得ない」ことを明確に示した。

第5章では、全体のまとめに加えて、今後のファインスケール・パラメタリゼーションの改良の方向性について重要な指針を示している。

ファインスケール・パラメタリゼーションの原案が提示されて以降、これまでは背景内部波スペクトルの「周波数方向の歪み」に着目した改良が行われてきた。それに対して本研究では、現場観測、数値実験、それらに基づく理論的考察から、南極周極流域においては背景内部波スペクトルの「鉛直波数方向の歪み」が大きくなり、それによって既存のファインスケール・パラメタリゼーションの精度が悪くなるということを示した。本研究で得られた成果は、中規模渦活動の活発な他海域（黒潮流域等）における乱流混合過程の解明や、深層海洋大循環モデルにおける乱流パラメタリゼーションの精度向上、ひいては、気候変動予測の精度向上に大きく貢献をもたらすものとして高く評価できる。なお、本論文の第2章～第4章は、指導教員である日比谷 紀之 教授、および、短期留学先であるサザンプトン大学の Alberto Naveira Garabato 教授との共同研究による成果であるが、論文提出者が主体となって解析および数値実験を行っており、その寄与は十分であると判断できる。

従って、審査員一同は、論文提出者に博士(理学)の学位を授与できると認める。