

論文審査の結果の要旨

氏名 後藤 恭敬

鉛直乱流混合は熱や物質を鉛直方向へ輸送することで海洋大循環を制御し、気候や生態系の維持・変動に影響を与える重要な物理過程である。時空間変動の大きな鉛直乱流混合の実態の解明には多くの観測データが必要であるが、乱流微細構造の測定は困難であり、特に、深層に至る乱流観測は現在でも手法が限定されている。このため、深層に至る乱流観測を簡便かつ頻繁に行うことができる手法の開発が喫緊の課題であった。本論文は、船舶観測において広く用いられている CTD (Conductivity-Temperature-Depth profiler) のフレームに高速水温計を搭載する観測システムの開発によりこの乱流観測の簡便化を実現することで、深層に至る広範な乱流強度の把握に向けた観測手法のブレークスルーを図ったものである。

本論文は5つの章から構成されている。

第1章は導入部となっており、海洋大循環における乱流鉛直混合の重要性と、乱流強度の定義、および、乱流観測の現状と解決すべき課題が述べられている。

第2章では、乱流強度の指標である乱流エネルギー散逸率を高速水温計によって測定する際に、その精度を保つためのデータ処理方法が明らかにされている。高速水温計は乱流スケールの微細な水温場を測定するセンサーであり、測器の振動によるノイズを受けにくいことから、CTD フレーム等の様々な観測機器に搭載することで多くの乱流データを容易に取得できる可能性がある。しかしながら、その一方で、高周波数成分の測定精度には問題があるため、これまであまり使用されてこなかった。この欠点を克服し、高速水温計を用いて正確な乱流強度を見積もるために、得られた水温勾配スペクトルの高周波数領域の補正を行った。すなわち、時定数を7ミリ秒(3ミリ秒)とした single-pole (double-pole) のローパスフィルタ型の関数の逆数を水温勾配スペクトルに掛け合わせることで、高精度ではあるが測器の振動には弱い流速微細構造測定用シアセンサーと同程度の鉛直乱流強度を見積もられることを明らかにした。

第3章では、CTD フレーム搭載型高速水温計を用いて得られた乱流データの信頼性に関する議論が展開されている。CTD は船舶観測で広く行われているため、そのフレームに高速水温計を搭載することで大量の乱流データが簡便に取得できることが期待されるが、その一方で、CTD フレームは船舶の動揺によって測定中に大きく揺れるため、これが乱流微細構造の測定に悪影響を及ぼす恐れがある。そこで、この CTD フレーム搭載型高速水温計を用いて見積もった乱流強度の信頼性を、同地点で行われた自由落下型乱流計と比較することで検証し

た。その結果、CTD フレームの降下速度 W (ms^{-1}) が小さく、その標準偏差 W_{sd} (ms^{-1}) が大きな場合には、フレーム搭載型高速水温計から見積もった乱流強度が過大評価となること、 $W_{\text{sd}} > 0.2W - 0.06$ となるデータを除くことで、自由落下型乱流計と同程度の乱流強度の見積もりが可能となることを明らかにした。

第4章では、「凌風丸」や「啓風丸」など気象庁の調査船、「みらい」や「白鳳丸」など海洋研究開発機構の研究船の航海中に CTD フレーム搭載型高速水温計を用いて得た 400 キャスト以上に及ぶ観測データに第2章、3章で導入した処理を施すことで明らかにした北西太平洋における乱流強度分布が示されている。これを、深層における放射性炭素分布を再現した海洋大循環モデル (Oka and Niwa, 2013) 内で内部潮汐波エネルギー分布に基づいて仮定された乱流エネルギー散逸率 ε と比較したところ、その空間分布は良く対応するものの、10 倍以上小さな値を示した。そこで、数値モデル内において内部潮汐波の発生域から離れた領域 (far-field) での ε_{FAR} の鉛直構造を浮力振動 N^2 に比例するように、また、背景場における鉛直乱流拡散係数の一定値 K_{BACK} が観測で得られた最低値 $10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ と一致するように $\varepsilon_{\text{BACK}}$ を変更することで、より観測結果に近い乱流エネルギー散逸率の空間分布モデルを構築した。

第5章では、全体のまとめ、本論文で開発した新しい乱流見積もり手法のさらなる課題、および、今後の展望が述べられている。

以上、本論文は、まず、高速水温計の応答不足の問題を解決した上で、これを CTD フレームに搭載した際の有用性を、自由落下型乱流計を用いた既存の乱流見積もり手法と比較することで検証するとともに、この新手法による観測を、気象庁や海洋研究開発機構の船舶を用いて実施することで、北西太平洋深層の広域乱流分布を初めて明らかにした。この新たな乱流観測手法の開発は、より現実に応じた海洋大循環モデルの構築を可能とするとともに、乱流混合による鉛直物質輸送量の正確な見積もりを通じて生物地球化学的循環における乱流混合の役割を明瞭にするもので、海洋物理学分野のみでなく、広い分野にまたがる海洋科学の今後の進展に計り知れない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安田一郎教授ほかとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって研究を行ったもので、その寄与は十分であると判断できる。

したがって、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。