

Observational studies on turbulence and associated vertical nitrate flux around the Kuroshio and the Kuroshio Extension

(黒潮および黒潮続流域における乱流強度と硝酸塩乱流鉛直輸送に関する観測的研究)

論文審査の結果の要旨

氏名 金子 仁

黒潮流軸北側の水温が急変する前線部には、植物プランクトンが高密度で分布することが知られており、餌環境を通じて魚類資源変動にも関わっている可能性が指摘されている。しかし、黒潮の前線部における高い生物生産を支える栄養塩供給過程については、主要因の一つである乱流鉛直混合による栄養塩鉛直輸送の観測がなされておらず原因は不明であった。本研究は、北西太平洋亜熱帯海域での生物生産の制限要因である硝酸塩の鉛直輸送について、乱流強度と硝酸塩鉛直フラックスの黒潮流軸横断方向の分布を実測に基づいて定量化し、前線部における表層から亜表層にかけての強い乱流と硝酸塩鉛直輸送が、黒潮北側前線部での高い生物生産の維持に重要な役割を果たしていることを示した。

本論文は5章で構成されている。第1章は導入であり、乱流鉛直混合を通じた栄養塩鉛直輸送過程の重要性と黒潮・続流域での知見について、他前線域における既存研究と対比しながら総括され、本論文の目的が示される。第2章では、本研究を始める端緒となった北西太平洋を広く南北に横断する乱流と硝酸塩の直接観測に基づき、広域での乱流と硝酸塩鉛直フラックス分布が示され、黒潮続流域での強い乱流と硝酸塩鉛直輸送の存在が指摘される。これを受けて、第3章では、黒潮強流帯付近の詳細な観測に基づき、黒潮流軸を横切る乱流強度分布と流速・密度構造との関係が明らかにされ、第4章では黒潮強流帯を横切る硝酸塩乱流鉛直フラックスの分布が示される。第5章では総合考察として、本研究の位置付けと今後の課題が述べられている。

第2章では、北緯10度から45度間を東経155度線に沿って夏季に実施された、鉛直高解像度で観測された乱流エネルギー散逸率で代表される乱流強度と硝酸塩観測から、黒潮続流域の0-500m深で、黒潮続流強流域の南北に比べて強い乱流の存在を明らかにした。この強い乱流に伴い、亜熱帯循環海域に比べ1オーダー大きい乱流による硝酸塩供給速度（硝酸塩乱流鉛直フラックス）が、亜表層クロロフィル極大下部から中層深度に存在したことから、黒潮続流強流域での乱流による硝酸塩鉛直輸送過程が示唆された。一方、黒潮続流強流域の南に位置する亜熱帯モード水が分布する海域では、表層から中層での乱流強度・硝酸塩乱流鉛直フラックスが、ともに黒潮続流強流域に比べて小さかった。これらの結果は、黒潮前線域が、乱流及び硝酸塩供給におけるホットスポットになっている可能性を示唆していた。この強い乱流が見出された黒潮前線域は、黒潮流軸（最大流速

位置)の南北で水塊及び流速構造が大きく異なるため、黒潮流軸を挟んで乱流や硝酸塩鉛直フラックス分布も大きく異なっている可能性があった。

第3章では、春季に黒潮強流域で数年にわたって取得された強流横断観測のデータに、流軸(表面流速最大位置)からの相対距離で平均をとる流軸座標系を適用し、流軸横断方向-深度断面での流速・水塊と乱流強度の平均構造を抽出した。乱流強度は、流速の絶対値とは必ずしも対応せず、流速の鉛直勾配(鉛直シア)と相関し、海面から150m深では、流軸の南北40kmの範囲で、その外側よりも有意に大きな値をとった。流軸の南北で乱流強度と流速場との関係は異なり、大きな密度の南北勾配(前線)が存在する流軸北側では、強い乱流は大きな地衡流鉛直勾配と対応して分布していた。一方、流軸南側では乱流・流速シアはともに強いが、地衡流鉛直勾配は小さく、強い流速シアは非地衡流成分に占められており、乱流強化過程は流軸の南北で異なっていることが推測された。

第4章では、春季の乱流と硝酸塩の同時観測データに、3章と同様の流軸座標系を適用し、黒潮流軸横断方向-深度断面での平均硝酸塩乱流鉛直フラックス分布を明らかにした。植物プランクトンが高密度で分布した黒潮流軸の北側では、0-250m深での強い乱流に伴い、硝酸塩が高濃度で分布する中層から光合成が可能な生物生産層下部まで、周辺よりも1オーダー大きい $0(10^{-6}) \text{ mmol N m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の硝酸塩乱流鉛直フラックスが鉛直方向に連続的に分布し、硝酸塩が、乱流鉛直輸送によって中層から生物生産に効率的に輸送されていることが明らかとなった。生物生産層への硝酸塩鉛直輸送速度は、既往研究による生物手法によって求められた春季の植物プランクトン新生産による硝酸塩消費速度と同程度であることから、流軸北側の黒潮前線域での強い乱流と硝酸塩鉛直フラックスが、生物生産に寄与していることが明らかとなった。一方、黒潮流軸の南側では、表層乱流強度は大きいですが、硝酸塩鉛直勾配が小さく、硝酸塩乱流鉛直フラックスが小さくことが、低い植物プランクトン密度につながることを示唆された。

以上、本研究は、黒潮流軸周辺での春季の乱流鉛直混合と硝酸塩鉛直輸送の分布を定量的に明らかにし、黒潮流軸北側前線域での中層から表層における強い乱流による大きな硝酸塩鉛直輸送が、黒潮流軸に沿って維持される高い植物プランクトン分布の維持に寄与することを示した。この強乱流および硝酸塩鉛直輸送は、亜熱帯循環に沿った水平栄養塩輸送や、北太平洋中層水を通じた亜寒帯域から亜熱帯域への栄養塩輸送と関連して、黒潮域における栄養塩鉛直分配を担う重要なプロセスであると考えられ、今後の発展が期待できる。本論文の成果は、生物地球化学及び海洋物理学の境界領域の研究として評価され、本学の学位論文として十分な水準に達していると判断できる。なお、本論文の第2-4章は指導教員の安田一郎教授他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あり、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、博士(理学)の学位を授与できると認める。