

# 論文の内容の要旨

## 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)

氏名 金子 仁

日本南岸を流れる黒潮および房総沖から東へと続く黒潮続流（以下黒潮）は北太平洋の亜熱帯循環の一部であり、その強い流れによって多くの熱・塩分・栄養塩などの物質や生物が輸送されている。黒潮の流れの最も強い「流軸」からその北側にかけては、水温や密度などの南北勾配が大きな「前線」を形成している。前線部では、春季の表層密度成層以後も流軸に沿ってしばしば高密度の植物プランクトンが帯状に分布し、そこでの植物プランクトン分布の変動は餌環境として魚類資源変動にも影響する [Nishikawa et al., 2012]。この植物プランクトンの高密度帯状分布は、春季の密度成層以降も、前線部では光合成に必要な栄養塩の供給が存在することを示唆している。他海域における近年の研究から、前線部の乱流混合に伴う栄養塩鉛直供給の重要性が指摘されている (湾流: Hales et al. [2009]; カリフォルニア海流: Johnston et al. [2011]) が、黒潮については乱流混合による栄養塩鉛直輸送の現場観測に基づいた知見は殆どなく、高密度植物プランクトンの帯状分布との対応も不明であった。黒潮域における乱流鉛直輸送はまた、亜熱帯循環に沿った水平的な栄養塩輸送 [Guo et al., 2012] や亜寒帯に起源をもつ北太平洋中層水の黒潮域における形成 [Yasuda et al., 1996; Yasuda, 1997] などと関連して、北太平洋の海盆規模の物質循環に対しても重要であると考えられる。そこで本研究は、重要な栄養塩のひとつである硝酸塩に着目し、乱流混合に伴う鉛直輸送 (硝酸塩乱流鉛直フラックス) の黒潮横断方向の分布について、北西太平洋の広域観測を含め実測に基づき定量化を行った。硝酸塩乱流鉛直フラックスは ①乱流強度の直接観測から求めた鉛直拡散係数、と ②硝酸塩鉛直高解像度観測によって得られた硝酸塩の鉛直勾配、の掛け合わせによって求めた。その結果、黒潮前線部の表層から中層にかけて、有意に強化された乱流鉛直混合が存在し、春季の植物プランクトンの要求量に匹敵する硝酸塩乱流鉛直フラックスが、表層から中層にかけて鉛直連続的に存在していたことが明らかとなった。従って乱流鉛直輸送が春季の黒潮前線部の植物プランクトン生産維持に貢献していることが示された。また、黒潮が単に亜熱帯循環の境界領域ではなく、栄養塩や物質の顕著な鉛直輸送を担っている海域であることが示唆された。

本論文ではまず、北西太平洋の硝酸塩乱流鉛直フラックス分布の定量評価を目的とし、北緯11.5度から45度間を東経155度線に沿って夏季に実施された、乱流強度と硝酸塩分布の鉛直高解像度観測 (図1a) のデータを解析した。南北密度勾配の大きい黒潮続流および亜熱帯反流などの前線域では、その他の海域に比べ高い硝酸塩乱流鉛直輸送が見いだされた。硝酸塩乱流鉛直輸送のピーク (鉛直極大) には二種類あり、ひとつは亜表層の植物プランクトン密度極大の直下、もうひとつは中層の硝酸塩躍層の周辺であった。前者は植物プランクトン極大濃度と正の相関がみられ、後者は北太平洋中層水の分布と対応していた。亜表層の乱流強度は密度の南北勾配と有意な正の相関があり、また前線域 (黒潮続

流・亜熱帯反流)では硝酸塩乱流鉛直フラックスに対する乱流の寄与が大きかったことから、前線域における硝酸塩乱流鉛直輸送の強化が示唆された。一方、亜熱帯モード水の分布海域(黒潮続流域と亜熱帯反流域の間の海域)では、表層や中層での乱流強度・硝酸塩乱流鉛直フラックスは、ともに黒潮続流域に比べて小さかった。以上の結果は、黒潮続流域の表層から中層にかけて、北西太平洋の中でも活発な乱流鉛直輸送が生じていることを示唆していた(2章)。

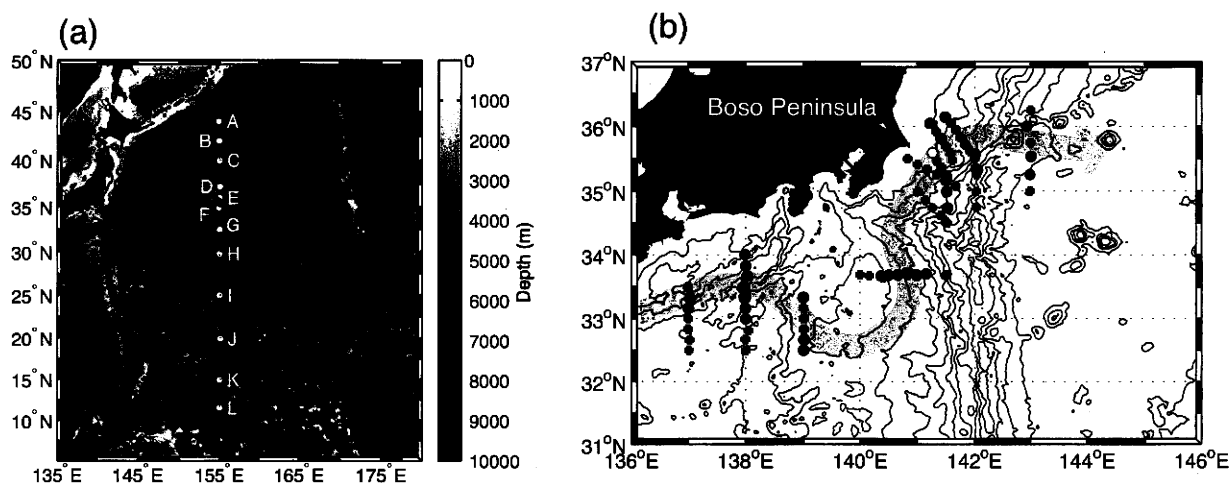


図1: 観測海域。(a) 北西太平洋縦断観測(2章)(b) 黒潮強流横断観測(3, 4章)。丸印は乱流観測実施点, 十字は水温, 塩分, 深度の観測を実施した点。図中の矢印は黒潮の流れを模式的に表したもの。

強い乱流が見いだされた黒潮続流域は、流軸の南北で水塊及び流速構造が大きく異なるため、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る。そこで次に、高密度の植物プランクトン分布が最も明瞭に現れる春季に、黒潮域で2007-2009年、2011年にわたって取得された水平分解能 15 海里程度の強流横断観測のデータ(図1b)を用いて、乱流強度の指標となるエネルギー散逸率と鉛直拡散係数の流軸横断方向-深度断面での平均構造を抽出した(図2)。平均化の際には、流軸(表面流速最大位置)からの相対位置で規格化する流軸座標系を用いた。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)と対応し(図3a)、海面から150 m 深では、流軸の南北 50 kmの範囲で、その外側よりも有意に大きな値をとった(図2b, d)。流軸の南北で乱流強度とシア強度との関係は異なっていた。密度の大きな南北勾配が存在する流軸北側では、乱流強度と地衡流の鉛直勾配の間には有意な正相関があった(図3b, 十字)が、流軸南側での強い乱流・流速シアは地衡流鉛直勾配とは対応していなかった(図3b, 丸印)。この結果から流軸の南北で異なる乱流強化機構が機能していることが示唆された。流軸の北側では、大きな地衡流鉛直勾配を通じて強乱流を引き起こすと指摘されている対称不安定[Hoskins, 1974; D'Asaro et al., 2011]が表層付近(40 m 以浅)で示唆されたこと、また黒潮と同様の前線構造をもつ湾流やフロリダ海流における乱流強化の知見[Hales et al., 2009; Johnston et al., 2011]と整合的であったことから、流軸北側の前線構造そのものが普遍的な強乱流につながっている可能性が高いことが示された(3章)。

さらに 2008, 2009, 2011年春季の乱流と硝酸塩の同時観測データに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調べた。その結果、黒潮流軸の北側では、0-250 m 深での強い乱流に伴い、周辺よりも1オーダー以上大きい  $O(10^{-6}) \text{ mmol N m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  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、硝酸塩が中層から生物生産層下部まで、

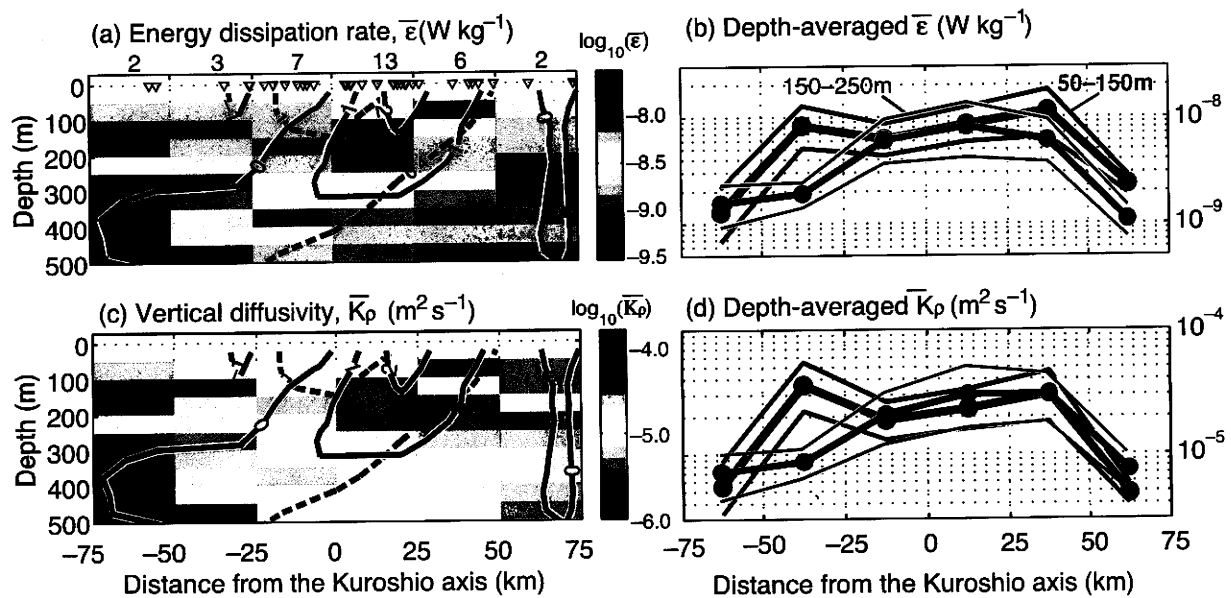


図2: 乱流強度のコンポジット分布 (a) 乱流運動エネルギー散逸率  $\bar{\epsilon}$  のコンポジット断面, (b)  $\bar{\epsilon}$  の鉛直 100 m 平均値, (c) 鉛直拡散係数  $\bar{K}_\rho$  のコンポジット断面, (d)  $\bar{K}_\rho$  の鉛直 100 m 平均値. (a) および (c) の実 (破) 線は相対渦度 (流速), (b) および (d) の太 (細) 線は平均値 (95% 信頼区間).

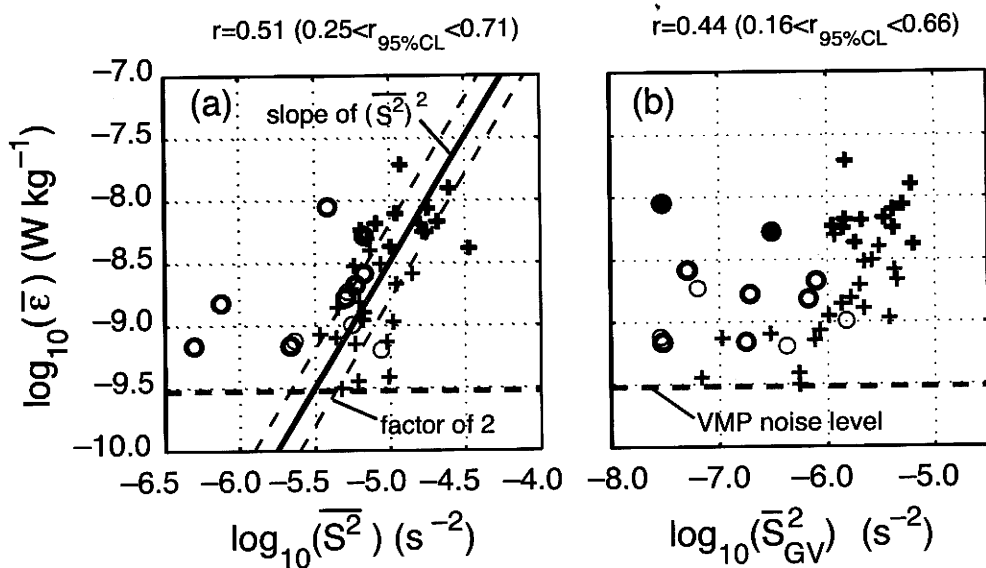


図3: 散布図. (a) 超音波流速計による流速の鉛直勾配 (シア) の二乗 (横軸) と乱流運動エネルギー散逸率. (b) 地衡流の鉛直勾配の二乗と乱流運動エネルギー散逸率. マーカーの色は深度 (橙: 50-150 m, 青: 150-250 m, 灰: 250-500m). パネル上の  $r$  は対数空間における相関係数とその 95% 信頼区間. (a) の黒実線および破線は対数空間における最小二乗フィッティングおよびその factor of 2 (1/2-2倍). 灰色の破線は乱流計の検出下限.

乱流混合によって輸送されていることが明らかとなった (図4a)。この高い硝酸塩乱流鉛直フラックスが分布した流軸の北側の 25-50 km の表層では、植物プランクトンが高密度で分布しており、春季の流軸に沿った高濃度植物プランクトン帯状分布に対応するものと考えられた。生物生産層底部 (1% 光深度) における硝酸塩乱流鉛直フラックスは、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平均硝酸塩消費速度 [Yokouchi et al., 2006] と同程度であることから、流軸北側の前線部の硝酸塩乱流鉛直フラックスが春季の新生産を維持しうることが示された。また中規

模渦の鉛直移流による硝酸塩供給 [McGillicuddy et al. 2003] と同程度と見積もられ、定量的にも重要であることが示された。一方、植物プランクトン密度の低い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かった。生物生産層への硝酸塩乱流鉛直フラックスと生物生産層内の鉛直積算植物プランクトン密度には正の相関がみられ (図 4c)、活発な乱流鉛直供給が生じている海域では植物プランクトン現存量も高いことが明らかになった (4章)。

本研究は、黒潮流軸北側の前線域の表層から中層にかけて強乱流が存在し、それに伴う大きな硝酸塩鉛直輸送が、流軸に沿った春季の高密度植物プランクトン分布の維持に寄与することを実測に基づいて示した (図5)。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から亜熱帯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る。

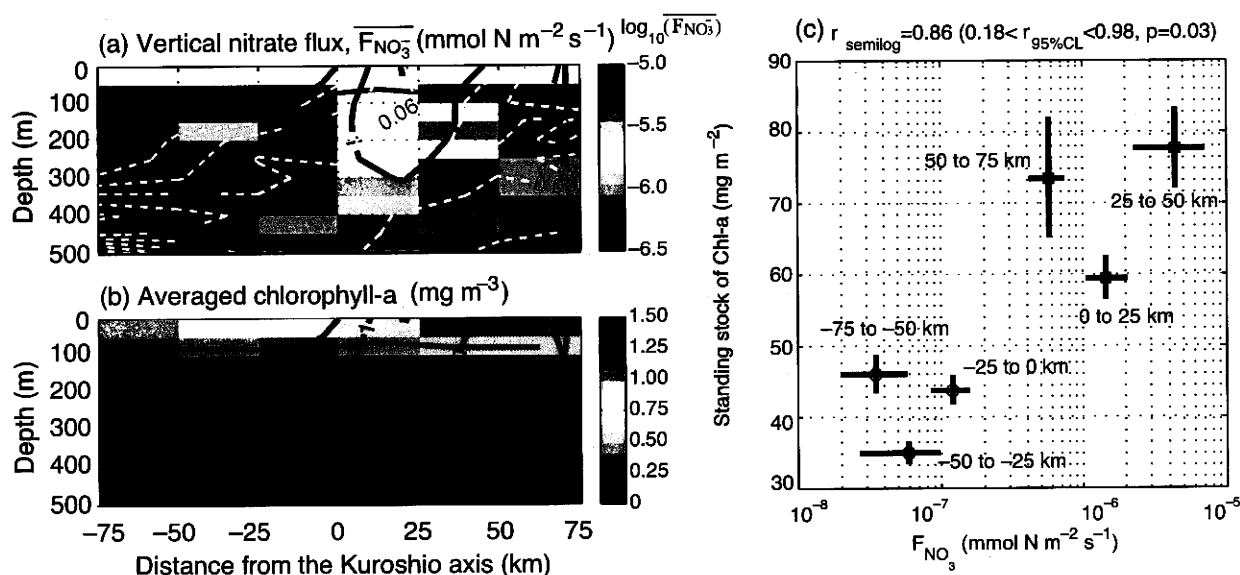


図4: (a) 硝酸塩乱流鉛直フラックス, (b) クロロフィル a 濃度のコンポジット断面分布. 橙色の線は表層生物生産層の底部 (1% 光深度). 白破線は硝酸塩の鉛直勾配. 黒線は 図2 と同じ. (c) 生物生産層底部における硝酸塩乱流鉛直フラックスと鉛直積算クロロフィル a 濃度の散布図. 十字線の長さは 95% 信頼区間を表す.

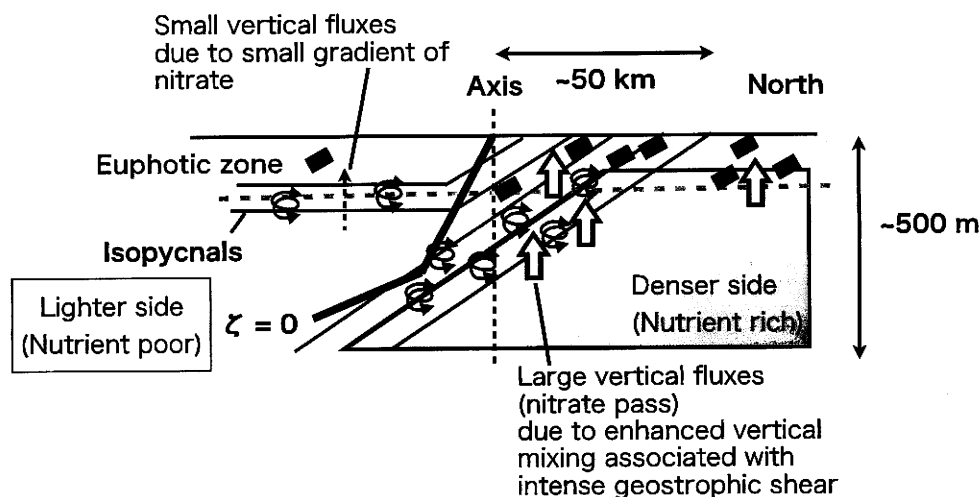


図5. 黒潮横断方向の乱流および硝酸塩乱流鉛直フラックスとクロロフィル a 分布の模式図.