

— 2021年度日本海洋学会岡田賞受賞記念論文 —

## 西部北太平洋・縁辺海における乱流鉛直混合による 栄養塩輸送に関する研究\*

田中 雄大<sup>†</sup>

### 要 旨

西部北太平洋およびその縁辺海は、世界でも有数の生物生産の高い海域として知られている。この研究では、乱流鉛直混合という物理過程に注目し、乱流計を用いた船舶観測を中心として、高い植物プランクトン生産の維持に寄与する栄養塩輸送過程の解明に取り組んだ。ベーリング海南東部の大陸棚斜面域での乱流観測および採水観測と、数値実験から、潮汐混合に伴う下層からの硝酸塩・鉄供給が、夏季の持続的な植物プランクトンの生産を維持する上で重要であることを示した。また、高解像度の乱流観測を行った黒潮や津軽暖流域では、流路上に点在する海底地形の起伏に富んだ海域が、乱流鉛直混合に伴う下層からの硝酸塩輸送のホットスポットであることを示した。栄養塩乱流鉛直輸送の観測は、観測技術の進歩とともに、多項目化および高解像度化しており、栄養塩輸送過程のさらなる理解に向けた今後の観測研究の課題についても議論する。

キーワード：乱流鉛直混合，栄養塩鉛直輸送，西部北太平洋・縁辺海

### 1. はじめに

西部北太平洋およびその縁辺海は、生物生産・漁業生産が非常に活発な海域である (Takahashi *et al.*, 2002)。海洋内部での乱流鉛直混合は、上下の海水を混合することで、熱や塩分、溶存物質等を鉛直方向に輸送することから、下層の豊富な栄養塩を有光層に供給し、生物生産

を維持する重要な物理過程の一つとして考えられてきた (Sarmiento *et al.*, 2004)。しかし、乱流鉛直混合に伴う栄養塩鉛直輸送量の正確な見積もりには、鉛直微細構造を測定する乱流観測で得られた鉛直混合強度と、各種栄養塩濃度の鉛直プロファイルの両方を取得した観測データセットを必要とするため、本海域での実測に基づく栄養塩鉛直輸送量の定量的知見は限られていた (Cyr *et al.*, 2015)。殊に、乱流鉛直混合強度には、数オーダーに及ぶ大きな時空間変動があることから、栄養塩の鉛直循環像や生物生産への影響を評価する上では、その背景にある物理過程の解明を含めた栄養塩輸送過程の統合的な理解が重要である。本稿では、大陸棚斜面域 (第2章) や海峡域 (第3章) など、海底地形の起伏に富んだ海域で実施した、筆者らによる研究を紹介し、今後の観測研究

\* 2021年12月25日受領 2022年12月12日受理

著作権：日本海洋学会，2022年

† 国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産資源研究所  
〒985-0001 宮城県塩釜市新浜町3-27-5  
TEL: 022-365-9928  
e-mail: takahiro@affrc.go.jp

の課題について議論する(第4章)。

## 2. ベーリング海

ベーリング海南東部大陸棚斜面域は、夏季でも高い一次生産が持続し、魚類や海生哺乳類が集積する海域として知られ、グリーンベルトと呼ばれている(Springer *et al.*, 1996)。夏季になると、西側の海盆域は、有光層内に栄養塩が残存しているにも関わらず、微量金属元素である鉄が不足することで一次生産が停止するHNLC(High Nutrient Low Chlorophyll)海域となる一方、東側の陸棚域は、有光層内に鉄は残存するものの、栄養塩が枯渇し、一次生産が停止してしまう(Aguilar-Islas *et al.*, 2007)。海盆域および陸棚域に挟まれた大陸棚斜面域では、如何にして栄養塩および鉄が供給され、夏季でも一次生産が維持されるのか、これまで行われてきた様々な研究により、その理解が深められてきた(Coachman and Walsh, 1981; Mizobata *et al.*, 2006; Aguilar-Islas *et al.*, 2007 など)。

大陸棚斜面域には、ベーリング斜面流(Bering Slope Current(BSC))と呼ばれる北西向きの海流(平均流速 $0.15\text{ m s}^{-1}$ 程度, Kinder *et al.*, 1975)があり、グリーンベルトの位置は、このBSCに伴う陸棚縁辺フロントと概ね対応している(Iverson *et al.*, 1979; Okkonen *et al.*, 2004)。大陸棚斜面域で頻繁に見られる中規模渦(Mizobata and Saitoh, 2004)は、水平混合により、陸棚一海盆間の物質交換を促進し、海盆域の豊富な栄養塩(特に硝酸塩)を陸棚方向へ輸送する(Coachman and Walsh, 1981; Mizobata *et al.*, 2006)。鉛直2次元のボックスモデルを用いた解析から、この陸棚方向への硝酸塩輸送は、表層ではなく、約80 m以深の亜表層で大きいと見積もられていたが(Coachman and Walsh, 1981)、その描像は、実際に観測で得られた硝酸塩鉛直断面分布からも支持された(Mizobata *et al.*, 2006)。陸棚縁辺フロント直下の亜表層に輸送された硝酸塩は、陸棚縁辺近傍での強い鉛直混合により、表層へと輸送されると考えられた(Coachman and Walsh, 1981)。

しかし、これまで乱流鉛直混合の強度を実測した研究がなく、陸棚縁辺近傍で強い鉛直混合が生じる物理過程も明らかではなかった。また、陸棚縁辺フロントを挟ん

で陸棚側は、外部陸棚と呼ばれる海底水深100-200 mの海域であり、とりわけ海底付近での溶存鉄濃度が高い(Aguilar-Islas *et al.*, 2007)。この海底付近に豊富な鉄が、どのようにして陸棚から大陸斜面域の表層有光層へと輸送され、グリーンベルトの夏季一次生産が維持されるのか、その輸送過程の定量的な理解が求められていた(Simpson and Sharples, 2012)。

### 2.1. 夏季グリーンベルトでの硝酸塩・溶存鉄乱流鉛直輸送過程の観測

そこで、筆者らは、2009年8-9月、学術研究船白鳳丸航海に参加する機会を得て、海盆から陸棚にかけて大陸棚斜面を横断する観測を実施し、グリーンベルトの維持に関わる栄養塩・鉄の輸送過程を明らかにする研究を行った(Tanaka *et al.*, 2012, 2017)。この研究では、乱流計で計測した乱流鉛直混合強度のデータに加え、久万健二北海道大学名誉教授らによって採水・測定された溶存鉄( $< 0.22\ \mu\text{m}$ )データも併せて、後述する乱流鉛直混合による下層から有光層への溶存鉄輸送量を、初めて見積もった。

本航海で測定した硝酸塩および亜硝酸塩濃度(以降、「硝酸塩濃度」と表記する)は、陸棚側で枯渇するのに対し( $< 0.1\ \mu\text{mol l}^{-1}$ )、海盆側表層では残存していた(Fig. 1a)。それとは逆に、溶存鉄濃度は、海盆側表層で枯渇する一方( $< 0.1\ \text{nmol l}^{-1}$ )、陸棚上で高く、特に海底付近で濃度が大きく上昇する分布となっていた(Fig. 1b)。表層でクロロフィル濃度が $1\ \mu\text{g l}^{-1}$ を超える陸棚縁辺(海底水深約200 m)から沖側の大陸棚斜面域では、表層の溶存鉄が硝酸塩に対して相対的に不足していたが、亜表層(125 m深,  $26.2\text{-}26.3\ \sigma_\theta$ 付近)には、溶存鉄濃度の鉛直極大が形成され、亜表層から表層にかけて溶存鉄濃度の鉛直勾配が強化されていた(Fig. 1bの赤矢印点。以降、溶存鉄濃度の鉛直極大が見られたこの観測点を、「陸棚縁辺沖観測点」と呼ぶ)。この濃度の鉛直極大は、陸棚海底付近の豊富な溶存鉄が、アリューシャン海峡を経て太平洋から流入した暖かい水塊と等密度面混合することにより形成されると考えられた(Tanaka *et al.*, 2017)。

乱流鉛直混合による上向きの硝酸塩・溶存鉄輸送量(Flux)は、乱流鉛直拡散係数 $K_\rho$ と濃度の鉛直勾配 $\partial C/$

$\partial z$  ( $C$ : 硝酸塩・溶存鉄濃度,  $z$ : 上向き正の鉛直座標) から,

$$Flux = -K_\rho \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1)$$

で計算される。本海域で計測した乱流データから、乱流鉛直混合は、陸棚上の海底付近 (100 m 以深) や、陸棚縁辺沖観測点の垂表層 (70-80 m 深) において特に強化され、 $K_\rho = O(10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$  に達していた (Fig. 1c)。その結果、これらの観測点では、 $O(10^{-2} \text{ nmol Fe m}^{-2} \text{ s}^{-1})$  以上の、大きな溶存鉄乱流鉛直輸送が生じており (Fig. 1d)、陸棚縁辺沖観測点では、溶存鉄極大層から表層混合層までの溶存鉄平均鉛直輸送量は、 $280 \text{ nmol Fe m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  と見積もられた。一方、陸棚縁辺沖観測点よりもさらに海盆側では、乱流鉛直混合は弱く ( $K_\rho = O(10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$  以下)、溶存鉄濃度の鉛直勾配も小さいことから、溶存鉄の鉛直輸送量は  $O(10^{-5} \text{ nmol Fe m}^{-2}$

$\text{s}^{-1})$  程度と、陸棚縁辺沖観測点に比べて 2 オーダー以上も低い値であった。

グリーンベルトでの夏季新生産に関する既往の知見 (Sambrotto *et al.*, 2008) および、主に珪藻に対する鉄と炭素の取り込み比 (Aguilar-Islands *et al.*, 2007; Sunda and Huntsman, 1995; 1997; Sunda *et al.*, 1991) から、 $150\text{--}3000 \text{ nmol Fe m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  の鉄供給が、夏季の新生産の維持に必要であると見積もられたが、陸棚縁辺沖観測点で得られた乱流鉛直混合による下層からの溶存鉄輸送量は、その下限値を上回る量であった (Tanaka *et al.*, 2012)。また、この点における下層からの硝酸塩輸送量は、 $2.6 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  と見積もられ、硝酸塩と溶存鉄の輸送量の比 ( $Flux_{NO_3}/Flux_{D-Fe}$ ) は、 $1 \times 10^4$  であった。鉄と炭素の取り込み比 (Aguilar-Islands *et al.*, 2007; Sunda and Huntsman, 1995, 1997; Sunda *et al.*, 1991) とレッドフィールド比 (Redfield *et al.*, 1963) から、グリーンベルトでの夏季の一次生産で消費される硝酸塩：鉄の

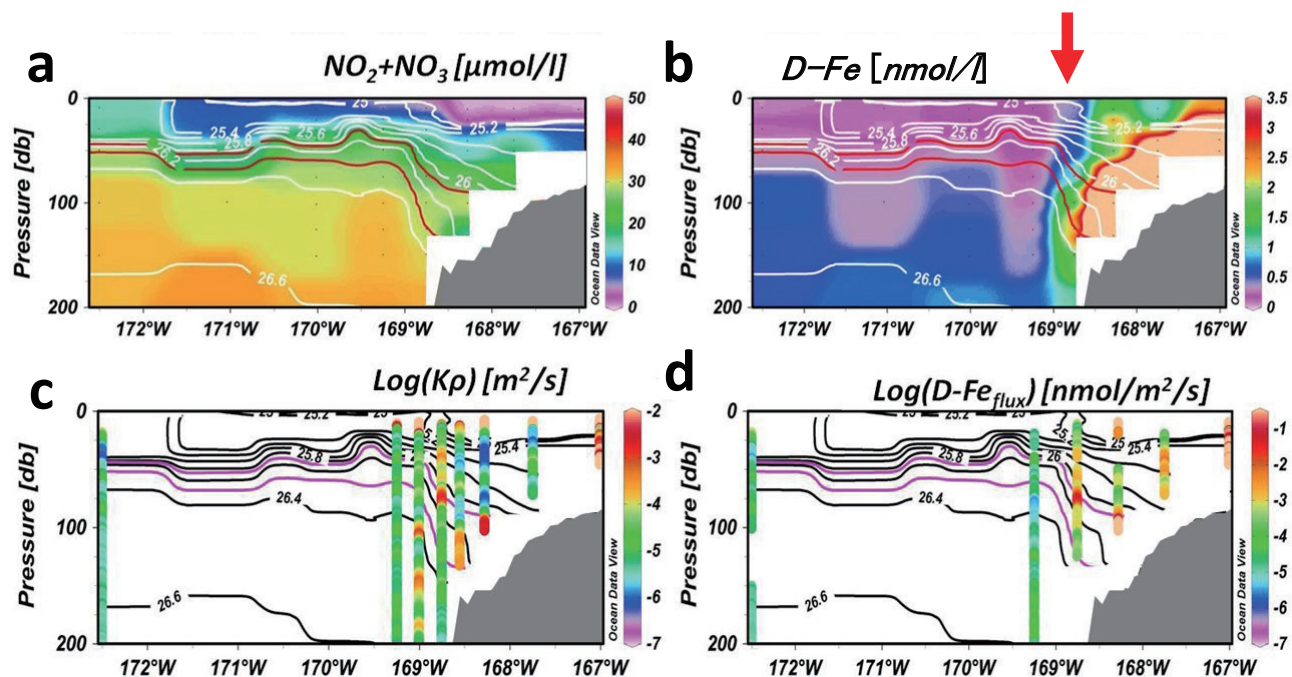


Fig. 1. Cross-sectional distributions of (a) nitrate + nitrite concentration, (b) dissolved iron concentration, (c) vertical eddy diffusivity, and (d) vertical turbulent iron flux across the continental slope of the southeastern Bering Sea (Tanaka *et al.*, 2012, with some modifications). Contours are the isopycnal ( $26.1 \sigma_\theta$  and  $26.3 \sigma_\theta$  are colored by red (a and b) or pink (c and d)). The red arrow in (b) is referred to as the station off the shelf break in the text.



割合は  $0.5\text{--}5.0 \times 10^4$  と見積もられることから、陸棚縁辺沖観測点では、グリーンベルトでの一次生産の維持に好適な溶存鉄・硝酸塩供給が生じていることが示唆された。一方、海盆側（陸棚側）の観測点での輸送量比は、 $5.0 \times 10^4$  以上 ( $0.5 \times 10^4$  以下) であったことから、鉄不足（硝酸塩不足）により、一次生産が停止することと整合的であった。

これらの結果から、夏季グリーンベルトへの溶存鉄輸送について、以下のような亜表層を介したプロセスが考えられた。(A) 陸棚域の海底付近での強い鉛直混合によって巻き上げられた溶存鉄が、(B) 中規模渦等による等密度面混合によって、海盆方向に輸送され、陸棚縁辺沖亜表層 (100 m 深,  $26.2\sigma_\theta$  付近) に溶存鉄濃度の鉛直極大層を形成する。(C) その結果、亜表層から表層にかけて、大きな溶存鉄濃度の鉛直勾配が形成され、陸棚縁辺沖亜表層での強い鉛直混合により、グリーンベルトの表層有光層へ溶存鉄が効率的に供給される。

## 2.2. 夏季グリーンベルトでの硝酸塩・溶存鉄乱流鉛直輸送に寄与する内部潮汐波動に関する数値計算

前節の (A) および (C) で述べた乱流鉛直混合に伴う溶存鉄・硝酸塩輸送は、夏季グリーンベルトの一次生産維持に重要な寄与をすると考えられた。しかし、なぜ陸棚上海底付近および陸棚縁辺沖亜表層で乱流鉛直混合が強化されるのか、その背景にある物理過程を明らかにするため、観測および数値計算を用いた研究を進めた (Tanaka *et al.*, 2013, 2015)。大陸棚斜面域は、潮汐流が BSC の流動場に大きく影響する海域であり、特に日周潮汐流の影響が大きいと考えられてきたが (Schumacher and Reed, 1992; Foreman *et al.*, 2006)、乱流鉛直混合の強化に影響する大陸棚斜面域での内部潮汐波の励起・伝播・散逸特性は明らかではなかった。そこで、筆者らは、ベーリング海南東部を対象として、外部境界に日周期 (K1 潮) および半日周期 (M2 潮) の順圧潮汐を与えた高解像度 3 次元数値モデル (MITgcm, Marshall *et al.*, 1997) による数値実験を行い、乱流強度の 3 次元空間分布や、グリーンベルトでの鉛直混合に関与する日周潮・半日周潮内部潮汐波の特性を明らかにする研究を行った (Tanaka *et al.*, 2013)。

モデルの詳細については、Tanaka *et al.* (2013) に譲

るが、ベータ面近似を施した静水圧モデルで、水平格子間隔は 1.25 km、鉛直格子間隔は海面から 200 m 深までを 10 m、200 m 以深は段階的に格子間隔を大きくした。初期成層として、水平一様の夏季鉛直密度プロファイル (World Ocean Atlas 2009 (WOA09; Locarnini *et al.*, 2010; Antonov *et al.*, 2010) から取得して与え、静止状態から 10 日間モデルを駆動し、最後の 1 日間に解析に使用した。乱流鉛直混合強度の指標として、以下で定義したエネルギー散逸率  $\varepsilon$  を計算した。

$$\varepsilon = A_H \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + A_V \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (2)$$

ここで、 $A_H \cdot A_V$  は水平・鉛直粘性係数 (各々  $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  を使用)、 $u, v$  は水平流速、 $x, y, z$  はモデル内での空間座標である (モデル領域は時計回りに 43 度回転して設定した)。なお、本稿では、エネルギー散逸率と鉛直拡散係数は、

$$K_\rho = \frac{\Gamma \varepsilon}{N^2} \quad (\Gamma: \text{混合効率} (= 0.2), \\ N: \text{浮力振動数}) \quad (3)$$

により、互いに関連づけられるとする (Osborn, 1980)。鉛直積算した 1 日間の平均エネルギー散逸率の空間分布は、陸棚域および陸棚縁辺周辺で大きく、海盆側で小さい (Fig. 2a)。但し、 $\varepsilon$  に海水密度  $\rho_c$  を乗じた値の鉛直積算値を図示)。そして、陸棚縁辺周辺の強いエネルギー散逸は、2 つの峡谷域 (Pribilof Canyon, および, Zhemchug Canyon) を中心に、普遍的に分布していることが示された。また、白鳳丸観測と同じ測線 (Fig. 2a のライン P) に沿った鉛直断面内のエネルギー散逸率は、陸棚上の海底付近と陸棚縁辺から沖側の表層・亜表層で強化され (Fig. 2b)、陸棚縁辺近傍の上層 100 m 深では、観測・数値実験ともに、概ね  $\varepsilon = O(10^{-8} \text{ W kg}^{-1})$  であった (Fig. 2c)。また、このような断面分布は、峡谷域以外の海域 (Fig. 2a のライン S) でも見られた (Fig. 2d)。しかしながら、乱流観測では、陸棚縁辺沖の 70-80 m 深において、 $O(10^{-7} \text{ W kg}^{-1})$  に達する局所的な乱流強化が見られているが、数値実験では、このような局所的な構



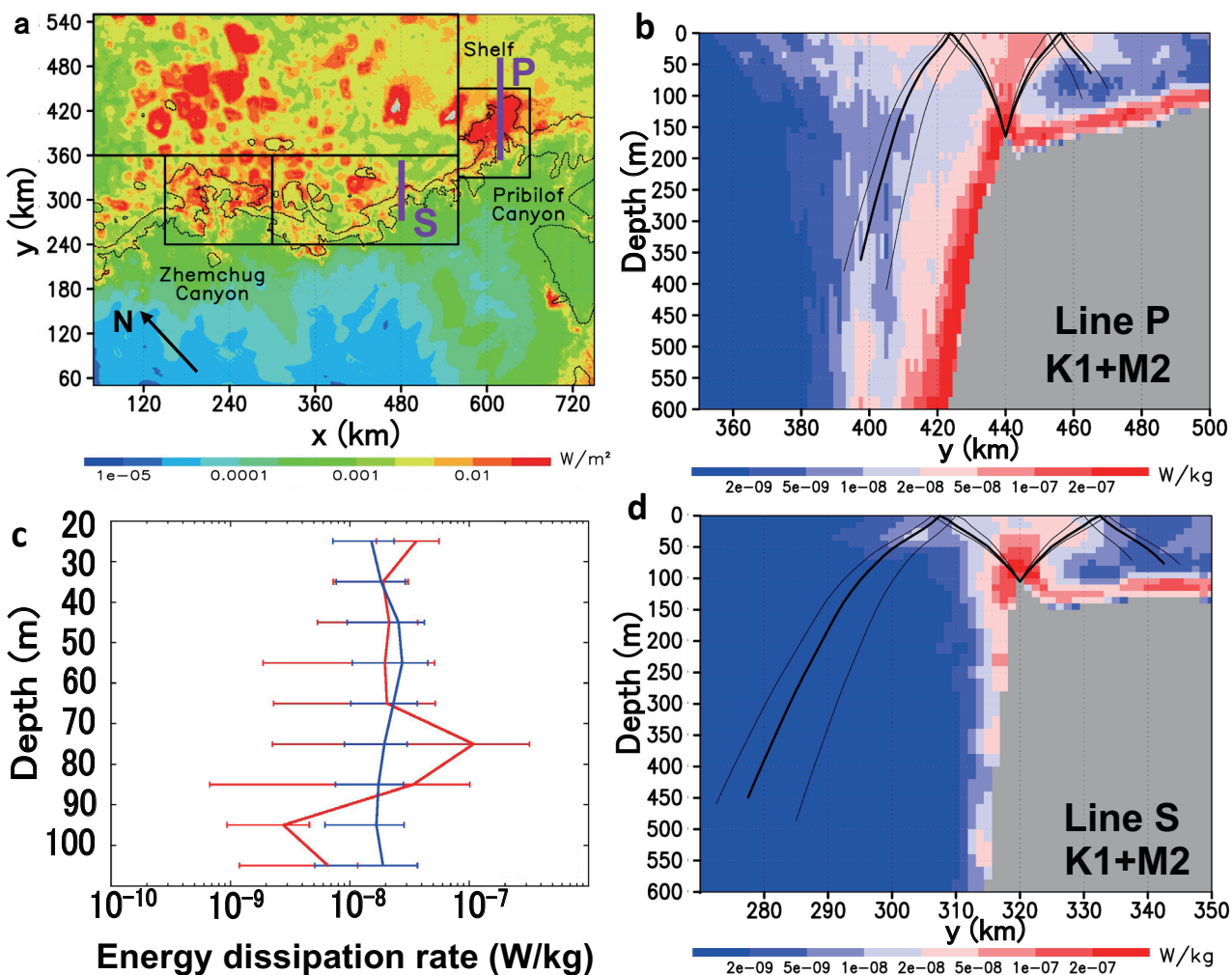


Fig. 2. Horizontal distribution of depth-integrated energy dissipation averaged over the final 1-day period of the numerical experiment driven by K1 + M2 barotropic tide. The dotted lines represent the 200- and 2000-m isobaths. The model domain is rotated clockwise by 43 deg, and  $x$  and  $y$  are the horizontal coordinates of the numerical model. Also represented are the cross-sectional distributions of the energy dissipation rate averaged over the final 1-day period (b) along line P and (d) along line S. Line P corresponds to the observational transect mentioned in Section 2.1. Black lines represent the semidiurnal characteristics. Thick (thin) lines are for  $k^2 = l^2/4$  ( $k^2 = 0$  and  $l^2$ ), where  $k$  ( $l$ ) is the wave number in the  $x$  ( $y$ ) direction derived from the possible direction of horizontal propagation (Tanaka *et al.*, 2013). (c) is a comparison of the observed (red) and modeled (blue) energy dissipation rate in the proximity to the shelf break (Tanaka *et al.*, 2013, with some modifications).

造は再現できていない。より高解像度で、正確な海底地形を組み込んだ、非静水圧モデルによる検証が今後必要である。

陸棚縁辺近傍で乱流が強化される成因を探るため、日周潮のみでモデルを駆動した場合と、半日周潮のみで駆

動した場合のエネルギー散逸率分布の比較を行った。日周潮のみで駆動した場合、エネルギー散逸の強化は、陸棚縁辺周辺の海底付近に限定されるが (Fig. 3a), 半日周潮のみで駆動した場合は、陸棚縁辺沖の表層・亜表層でも強化された (Fig. 3b)。また、ライン S だけでは

く、陸棚縁辺 (150 m 等深線で定義) からの相対的な座標において、エネルギー散逸率の鉛直断面分布をコンポジット平均した際にも見られた (Fig. 3c および Fig. 3d)。観測で乱流強化が見られた陸棚縁辺沖海域 (i.e., 陸棚縁辺から約 20 km 海盆側) では、日周潮よりも半日周潮で行った実験の方が、概ね 100 m 深以浅において、大きな散逸率を示していた。この違いは、この緯度帯での慣性周波数  $f$  が、日周期の周波数よりも大きく、半日周期の周波数よりも小さいことに起因すると考えられた。つまり、日周期の内部潮汐波は、斜面に捕捉されながら、南東から北西方向に伝播する地形性捕捉波となるのに対し、半日周期の内部潮汐波は、斜面から海盆側へ自由伝播する内部波として存在可能である。この伝播特性の違いによって、日周期の内部潮汐波に伴う流速構造は、陸棚縁辺の海底付近でのみ振幅が大きく強化されるのに対し、半日周期の流速構造は、内部波のエネルギー伝播経路である特性曲線近傍で振幅が強化される (Fig. 2b, 2d, 3b の黒線。伝播する角度  $\alpha (= \sqrt{k^2 + l^2}/m, k(l, m) : x(y, z)$  軸方向の波数) は、 $\omega_{M2}$  を半日潮周波数として、 $\sqrt{\omega_{M2}^2 - f^2}/\sqrt{N^2 - \omega_{M2}^2}$  で与えられる)。このことは、日周期と半日周期の潮流で、異なる場所で流速シアの強化が生じることを意味する。すなわち、日周内部潮汐波は、前節 (A) で述べた陸棚海底付近の乱流鉛直混合の強化に寄与するのに対し、半日周内部潮汐波は、前節 (C) で述べた陸棚縁辺沖垂表層の乱流鉛直混合を強化すると考えられた。

なお、Fig. 3e は、数値実験で得られた内部フルード数 ( $Fr = U/C_p$  ( $U$ : 半日周潮順圧潮流の振幅,  $C_p$ : 第 1 モードの内部波の位相速度) の空間分布である (計算の詳細は、Tanaka (2014) を参照)。 $Fr$  が 1 を超えると、全てのモードの陸棚側への伝播がブロックされるため、陸棚縁辺沖周辺で大きな振幅を持った内部波が発生し、非線形性が重要になるが (Hibiya, 2004)、本海域では、陸棚域の一部を除いて、 $Fr < 1$  のため、非線形性の強い大振幅の内部波が発生する可能性は低いと考えられる。また、ライン P における tidal excursion ( $= U/\omega_{M2}$ ) と地形の水平スケール ( $= L$ : shelf break から斜面の底までの水平距離 (Legg, 2004)) の比 ( $R = 2\pi U/\omega_{M2}L$ ) は 0.09 となり、1 より十分小さいことから (陸棚縁辺近傍での  $U = \sim 0.2 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L = \sim 100 \text{ km}$ )、移流・非線形性の効果

は小さく、発生する内部潮汐波は、外部強制で与えた周波数が卓越すると考えられる。

一方、地形の 3 次元性には留意が必要であり、現場観測を行った Pribilof Canyon 内では、半日周潮だけでなく、日周潮についても、陸棚縁辺沖の表層・垂表層で大きな散逸を生じることが示唆されている (Fig. 3f, Tanaka, 2014)。これは、「日周内部潮汐=陸棚縁辺海底付近での散逸強化、半日周内部潮汐=陸棚縁辺沖表層・垂表層での散逸強化」という上記の特徴とは異なる傾向であり、Canyon 内では、斜面の勾配が緩く、地形性捕捉波に伴う海底付近での強い流速シアが、陸棚縁辺のより沖側まで影響を及ぼしている可能性が考えられる (Tanaka *et al.*, 2013)。2012 年におしよる丸航海で行った Pribilof Canyon での観測では、平均流による流速シアに比べて、日周・半日周潮流による流速シアが卓越しており、半日周潮流が作る流速シアに、日周潮流による流速シアおよび、日周潮流と半日周潮流の相互作用に伴う流速シアが重なることで、乱流強化が生じる可能性が示唆されている (Tanaka *et al.*, 2015)。

### 3. 日本近海

上述の一連の研究は、ベーリング海南東部の陸棚縁辺周辺海域が、乱流鉛直混合による下層からの栄養塩・溶存鉄輸送のホットスポットであることを示唆している。栄養塩鉛直輸送のホットスポットは、ベーリング海に限らず、様々な海域で報告されているが、日本近海を含む北西太平洋での観測的知見は限られていた (Cyr *et al.*, 2015)。2015 年から始まった科学研究費補助金・新学術領域研究「海洋混合学の創設：物質循環・気候・生態系の維持と長周期変動の解明」(OMIX, 領域代表者：安田一郎 (東京大学大気海洋研究所教授)) では、日本近海や周辺の縁辺海を中心に多くの観測航海が実施され、筆者も多くの研究に関与させて頂く機会を得た。近年の観測技術の発達によって、センサーで様々な海洋環境パラメーターの測定が可能となり、硝酸塩の乱流鉛直輸送量も、硝酸塩センサーを搭載した乱流計で定量化が可能になった (長谷川ら, 2019)。乱流観測と CTD・採水観測を交互に行わなくても、黒潮などの強流帯に流されながら、高頻度に乱流観測を行うのみで、硝酸塩の乱流鉛直

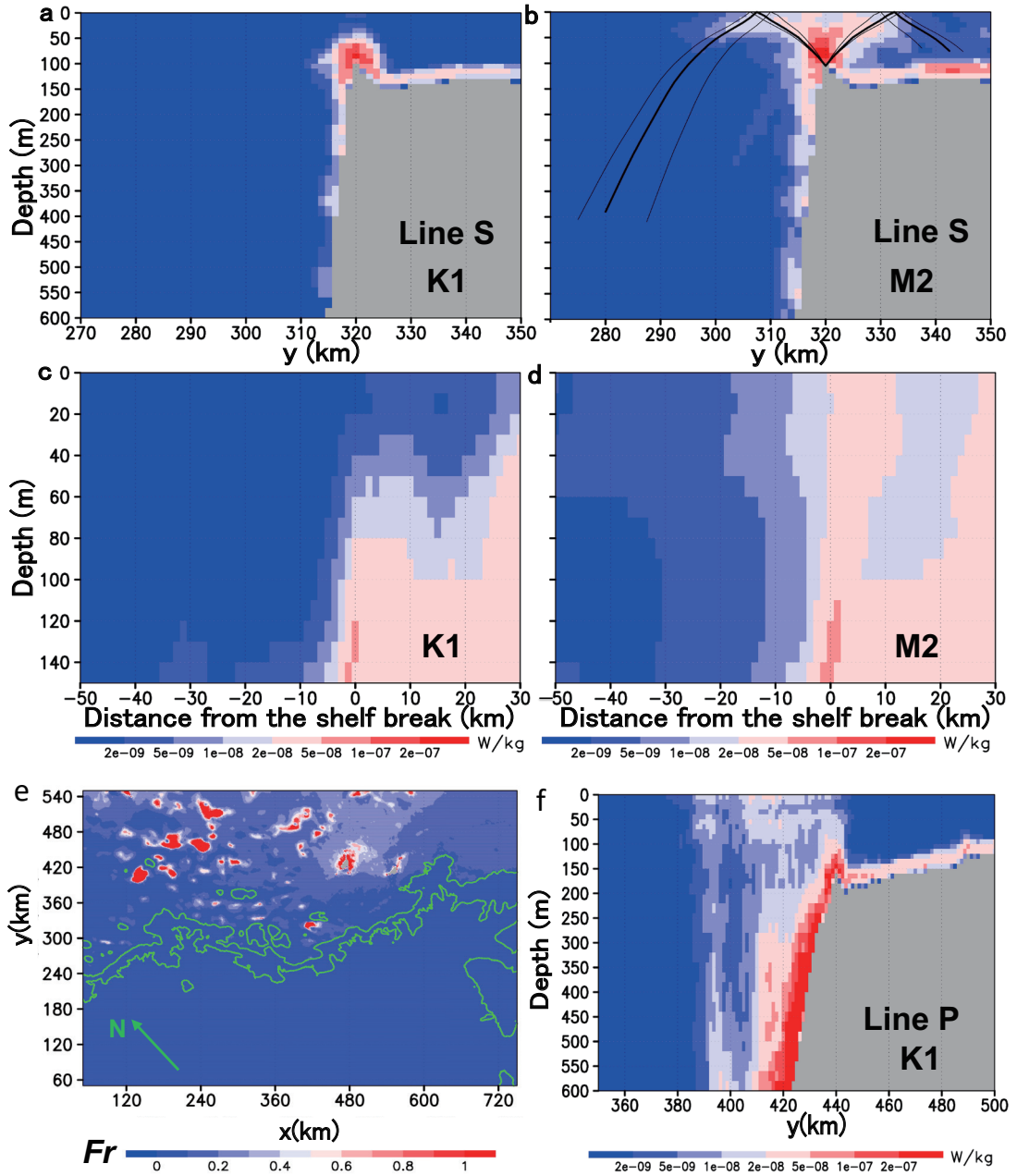


Fig. 3. The cross-sectional distributions of the energy dissipation rate averaged over the final 1-day period along line S from the experiments driven solely by (a) K1 and (b) M2 tide, respectively. Black lines represent the semi-diurnal characteristics. Thick (thin) lines in (b) are for  $k^2 = l^2/4$  ( $k^2 = 0$  and  $l^2$ ), where  $k$  ( $l$ ) is the wave number in the  $x$  ( $y$ ) direction derived from the possible direction of horizontal propagation (Tanaka *et al.*, 2013). Composite cross-shelf distribution of the energy dissipation rates averaged during the final 1-day period concerning the distance from the shelf break (150-m isobath) derived from a numerical experiment driven by (c) K1 or (d) M2 barotropic tide (Tanaka *et al.*, 2013, with some modifications). (e) is the distribution of the computed Froude number. The model domain is the same as in Fig. 2a. Green dotted lines represent the 200- and 2000-m isobath. (f) is the cross-sectional distributions of energy dissipation rate averaged over the final 1-day period along line P derived from a numerical experiment driven by K1 barotropic tide (Tanaka 2014, with some modifications).



輸送量の高分解度の鉛直断面分布を取得することができる。筆者らは、黒潮が急峻な海底地形を通過する海峡・海嶺域で、この手法を用いた観測を実施し、硝酸塩鉛直輸送のホットスポットの存在を明らかにした (Tanaka *et al.*, 2019; Hasegawa *et al.*, 2021)。同様の方法で高分解度乱流観測を行った、津軽海峡での研究結果 (Tanaka *et al.*, 2021b) も併せて、以下に紹介する。

### 3.1. 黒潮が通過する伊豆海嶺・トカラ海峡での硝酸塩乱流鉛直輸送の観測

黒潮は、貧栄養である亜熱帯海域を起源とする西岸境界流であるが、マイワシやマサバなど多くの浮魚の産卵・回遊に利用される海域である。「黒潮パラドックス」 (Saitoh, 2019) とも呼ばれるこの特徴的な黒潮生態系の維持過程として、下層からの栄養塩輸送の重要性が指摘されてきた (Hasegawa, 2019 など)。近年の活発な観測研究によって、黒潮上の様々な海域において、乱流ホットスポットの存在が明らかとなってきた一方で (Hasegawa *et al.*, 2004; Nagai *et al.*, 2009, 2012, 2017; D'Asaro *et al.*, 2011; Kaneko *et al.*, 2012; Chang *et al.*, 2013, 2016; Tsutsumi *et al.*, 2017), 乱流に伴う栄養塩鉛直輸送量の見積もりは限られた海域でしか行われてこなかった (Kaneko *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2013)。特に、黒潮が急峻な海底地形上を乗り越える海峡域や海嶺域では、島影効果など地形性の擾乱に伴って、下層からの大きな栄養塩供給があると考えられてきたが、OMIX による集中的な観測が行われる以前には、その定量的な見積もりや低次生産への影響評価は限られていた (Hasegawa *et al.*, 2009)。

筆者らは、2016 年の新青丸航海において、硝酸塩センサーを搭載した乱流計を用いて、黒潮が通過する伊豆海嶺での硝酸塩乱流鉛直輸送量を初めて見積もった (Fig. 4a, Tanaka *et al.*, 2019)。黒潮の流れに乗りながら、繰り返し行った乱流観測によって、黒潮が伊豆海嶺内の浅瀬を乗り越える際に、乱流鉛直混合が強化され (Fig. 4b,  $\varepsilon = O(10^{-8} - 10^{-7} \text{ W kg}^{-1})$ ,  $K_\rho = O(10^{-4} - 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$ ), 植物プランクトンによる局所的な新生産量に匹敵する  $O(10^{-1} \text{ mmol N m}^{-2} \text{ day}^{-1})$  の硝酸塩鉛直フラックスが、有光層下部 (1% 光強度) で生じていることを確認した (Fig. 4c, Tanaka *et al.*, 2019)。また、Hasegawa *et*

*al.* (2021) は、トカラ海峡で行われた 2016 年のかごしま丸航海において、平瀬と呼ばれる岩礁を黒潮が通過した際、下流側でケルビン・ヘルムホルツ波が波高 50 m 以上にまで発達し、砕波して乱流化する様子を、乱流計観測と魚探による音響観測によって明瞭に捉えることに成功した。ケルビン・ヘルムホルツ波の砕波に伴う硝酸塩鉛直輸送量は最大で  $O(10^3 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ day}^{-1})$  に達していたほか、湧昇に伴う硝酸塩輸送も  $O(10^2 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ day}^{-1})$  と見積もられるなど、世界最大級の硝酸塩鉛直輸送が生じていることが明らかとなった。実測で得られた下層からの硝酸塩供給は、下流での植物プランクトンによる一次生産の励起と動物プランクトンによる摂餌を促進することで、黒潮生態系の維持に大きく寄与していることが、硝酸塩を添加した培養実験からも示された (Kobari *et al.*, 2020)。

伊豆海嶺およびトカラ海峡での乱流鉛直混合は、表層有光層内への硝酸塩供給だけではなく、より深い深度帯での硝酸塩輸送にも重要な役割を果たしている可能性がある。黒潮の水平流速は概ね表層ほど大きいですが、その一方で、硝酸塩濃度の方は下層ほど高濃度であることから、水平流速と栄養塩濃度の積である水平方向の硝酸塩輸送量は、亜表層 (概ね  $26.0 \sigma_\theta$  面) で極大となる (Guo *et al.*, 2012; 2013)。この硝酸塩水平輸送の極大構造は、「Nutrient Stream」と呼ばれ、北大西洋の西岸境界流である Gulf Stream でも同様の構造が見られる (Pelegrini and Csanady, 1991)。東シナ海から日本南岸にかけて、黒潮の上層 (概ね  $26.5 \sigma_\theta$  以浅) では、下流へ行くに従って硝酸塩濃度が増加する傾向にあり (Guo *et al.*, 2013), 下層からの硝酸塩輸送の効果が指摘されてきた。乱流による硝酸塩鉛直輸送が、下流での硝酸塩濃度上昇に与える影響について、Gulf Stream でも議論が盛んに行われているが (Palter and Lozier, 2008; Whitt, 2019), 黒潮域では、定量的な議論を行うために必要な観測データが十分ではなかった。

伊豆海嶺で行った 2016 年の観測では、最も大きな硝酸塩鉛直輸送は、300-400 m 深 ( $26.0-26.6 \sigma_\theta$ ) で観測され、 $O(10 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ day}^{-1})$  に達していた (Fig. 4c および, Fig. 4d, Tanaka *et al.*, 2019)。この硝酸塩乱流鉛直輸送量の鉛直プロファイルを用いて、各密度面において鉛直方向の収束・発散を計算すると、 $26.6 \sigma_\theta$  面で収支が

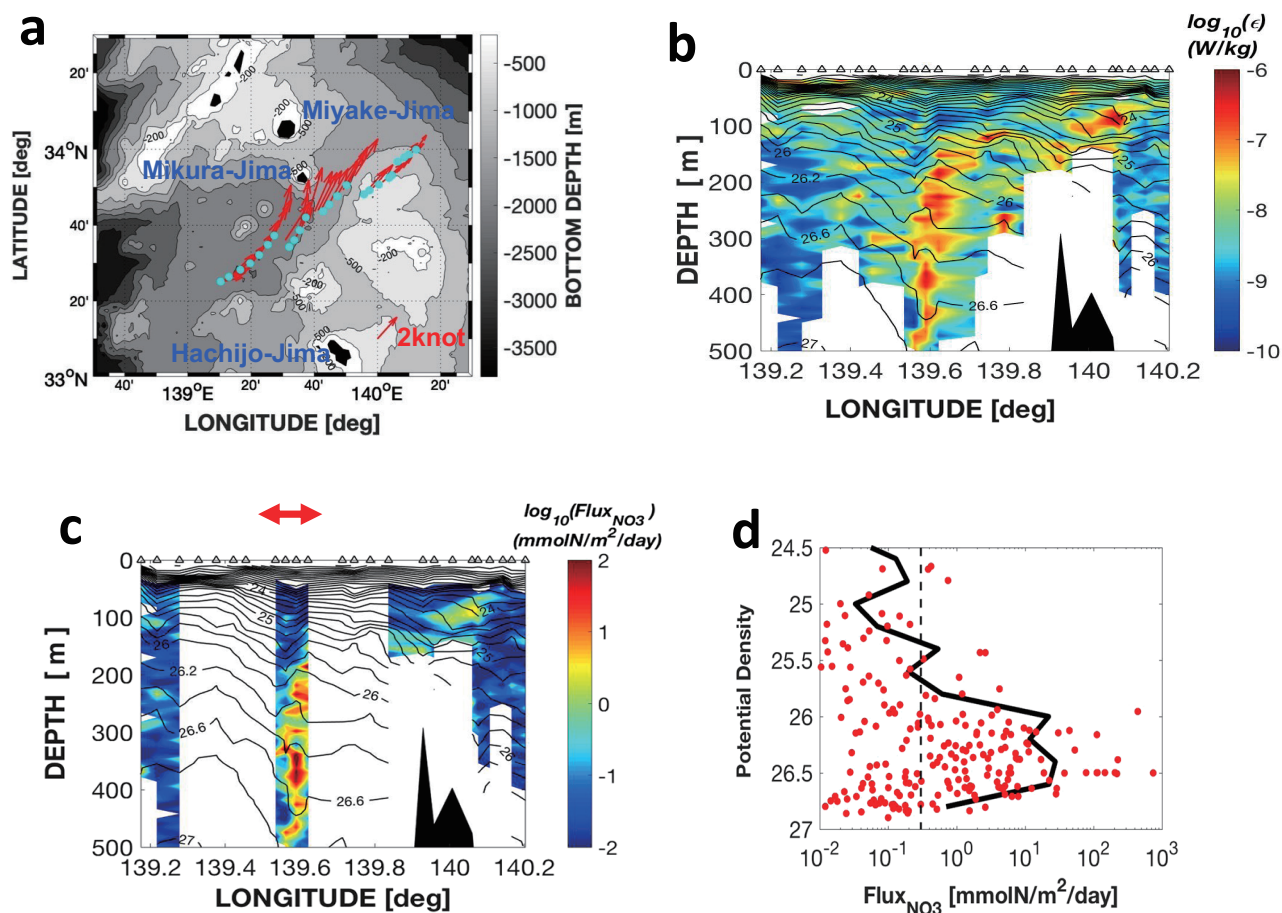


Fig. 4. (a) Observational stations across the Izu Ridge along the Kuroshio with arrows showing the surface velocity derived from the shipboard ADCP. (b) and (c) are cross-sectional distributions of energy dissipation rate and vertical turbulent nitrate flux overlaid with isopycnal contours at  $0.2\sigma_\theta$  interval. Black triangles on the top are the stations shown in (a). Note that the data around 139.4 and 139.7 E are missing in (c) because the nitrate sensor stopped recording due to the low battery life and high internal temperature. (d) is the vertical turbulent nitrate flux observed across the Izu Ridge at four stations denoted by the red arrow in (c). The black line is the arithmetic mean for each  $0.2\sigma_\theta$  bin. (Tanaka *et al.*, 2019, with some modification)

大きく負となる一方で ( $O(10 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ day}^{-1})$ ), より上層 ( $25.9\sigma_\theta$  や  $26.3\sigma_\theta$ ) で正となった。このことは、中層 ( $\sim 26.5\sigma_\theta$ ) から Nutrient Stream コア ( $26.0\text{--}26.2\sigma_\theta$ ) へ大きな硝酸塩輸送があることを示唆している (Tanaka *et al.*, 2019)。同様の鉛直構造と同程度の硝酸塩鉛直輸送はトカラ海峡でも観測されており、海峡内の上流から下流にかけての 100 km の区間で  $O(10 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ day}^{-1})$  の硝酸塩鉛直輸送が存在していると仮定すると、黒潮がトカラ海峡を通過する際に  $25.5\text{--}26.5\sigma_\theta$  面が受ける硝酸塩濃度の上昇分は、Guo *et al.* (2013) が示した東シ

ナ海 PN ラインから四国沖 ASUKA ラインまでの濃度変化 ( $\sim 0.5 \text{ mmol m}^{-3}$ ) に匹敵する (Tanaka *et al.*, 2021a)。これらの結果は、伊豆海嶺およびトカラ海峡での硝酸塩乱流鉛直輸送が、黒潮 Nutrient Stream の硝酸塩輸送に重要な役割を果たしている可能性を強く示唆している。

### 3.2. 津軽海峡での内部跳水に伴う栄養塩輸送の観測

東シナ海からトカラ海峡を通過して日本南岸を東進する黒潮に対して、対馬海峡を経て本州北岸を北上する対馬暖流は、最終的に津軽海峡もしくは宗谷海峡からそれ

ぞれ太平洋およびオホーツク海に流出する。津軽海峡から流出した津軽暖流水は、三陸・道南沖で親潮水など異なる水塊との海洋前線を形成し、マサバなど浮魚の漁場となる。夏季の衛星データによると、津軽海峡の東部太平洋側では、西部日本海側に比べ、夏季でも海面クロロフィル濃度が高く維持される傾向が見られている (Tanaka *et al.*, 2021b)。津軽海峡には、日本海側から、対馬暖流表層の高温低塩水と、それ以深の低温高塩水が密度躍層を伴って流入するが、出口である太平洋側では、密度が鉛直一様化し、栄養塩濃度が表層近傍で上昇するなど、海底摩擦及び潮汐流による海峡内での鉛直混合の影響が示唆されてきた (e.g., Saitoh *et al.*, 2008)。また、津軽海峡西部の龍飛岬沖では、津軽海峡通過流が起伏の激しい海底地形上を通過する際、大振幅の内部波が観測されるなど (太田ら, 2015)、急峻な海底地形近傍での内部波の碎波に伴う鉛直混合の強化が示唆されてきたが、その確認には乱流観測に基づく定量的な評価が必要であった。

そこで、海峡内での水塊変質・栄養塩鉛直輸送過程を明らかにするため、2017年9月の若鷹丸航海では、津軽海峡を東西に横断するCTD観測および、龍飛岬沖での乱流観測を行った (Tanaka *et al.*, 2021b)。海底直上まで行ったRinko Profiler (JFEアドバンテック社製) による横断観測では、日本海側の50m深付近に見られる顕著な塩分極大およびクロロフィルの垂表層極大が、太平洋側へ近づくにつれて上下方向に拡散していくなど、水塊が徐々に変質しながら海峡を流出する様子が捉えられた (Fig. 5a)。特に、龍飛岬沖では、急峻な海底地形 (以下、「シル」と呼ぶ) を横切った際、等密度面が大きく下方に押し下げられており (Fig. 5a 赤矢印)、既往研究 (太田ら, 2015) で報告された大きな振幅の内部波の存在が確認された。

この龍飛岬沖のシル近傍での水塊変質過程を明らかにするため、津軽海峡通過流に流されながら、シルの上流から下流にかけて乱流観測を繰り返すとともに、船底ADCPで取得した流動場と併せて解析を行った。等密度面が大きく下方に押し下げられるシル下流端近傍では、密度躍層 ( $\sim 24.0\sigma_\theta$ ) より上層が厚くなり、シルを通過する流れが非常に弱くなるのに対し、密度躍層より下層では、シルを通過する流れが海底付近で1 m/sを超えて

おり、強いジェットを形成していた (Fig. 5b)。また、シルを越えると、下層は逆向きの流れとなり、流れの剥離が生じるなど、hydraulic controlを受けた流動場・海洋構造の特徴を有していたことから (e.g., Farmer and Armi, 1999),  $24.0\sigma_\theta$ を境界とした2層流体として、内部フルード数  $Fr$  の計算を行った。 $U$ を下層 ( $24.0\sigma_\theta$ 以深) の平均流速、 $N$ を下層の平均成層強度、 $l$ を下層の層厚として、 $Fr (= U/Nl, \text{Layer Froude number (Musgrave et al., 2016)})$ を計算したところ、シル上の下流端において、1を超えていたことから、内部跳水の発生が示唆された (Fig. 5c)。また、 $Fr$ が1となる臨界点から下流にかけて、著しい乱流強化が見られ (Fig. 5c および Fig. 5d。  $\epsilon = O(10^{-7} - 10^{-6} \text{ W kg}^{-1})$ ,  $K_\rho = O(10^{-4} - 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$ ), 黒潮が通過する伊豆海嶺やトカラ海峡に匹敵する  $O(1 - 10 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ day}^{-1})$  の硝酸塩乱流鉛直輸送が見積もられた。

大きな振幅の内部波に伴い、シルの下流端では、流れが加速した下層と、流れが停滞する上層との間で、強いシアが生じ (Fig. 5e の赤矢印近傍)、密度躍層近傍において、シア不安定による  $\epsilon = O(10^{-6} \text{ W kg}^{-1})$  の強い乱流が発生する。加えて、この大きな等密度面変位の下部においては、水平スケールの小さな ( $= O(100 \text{ m})$ ), 振幅50 m程度の内部波列に分裂している様子が見られ (Fig. 5f),  $0.1 \text{ m s}^{-1}$ を超える大きな鉛直流を伴っていた (Fig. 5g)。この内部波列は、内部波の非線形効果と分散効果とのバランスによって生じると考えられ、最終的に碎波もしくは、波の強い分散性による散乱 (山口ら, 2020) により、乱流散逸していくと考えられる。

本海域は、日周潮流の振幅が大きな海域であり (小田巻, 1984), 大振幅の内部波の発達過程に対する潮汐流の影響が考えられている (太田ら, 2015)。既往の観測研究からは、シルを越える東向きの流れが極大から減少し始める頃にかけて、密度躍層が下方に押し下げられて振幅が増幅すること、シルを越える流れが弱まると、水平スケールが小さい内部波列が見られ、シルを越える流れが最も弱い時に消滅することが報告されている。本研究の乱流観測は、大潮で、シルを越える東向きの流れが弱まる時に実施されたものであり、既往の観測と同様の時間発展を示していた。潮流変動に伴う跳水現象を報告した Farmer and Armi (1999) などのように、瞬間的なフ



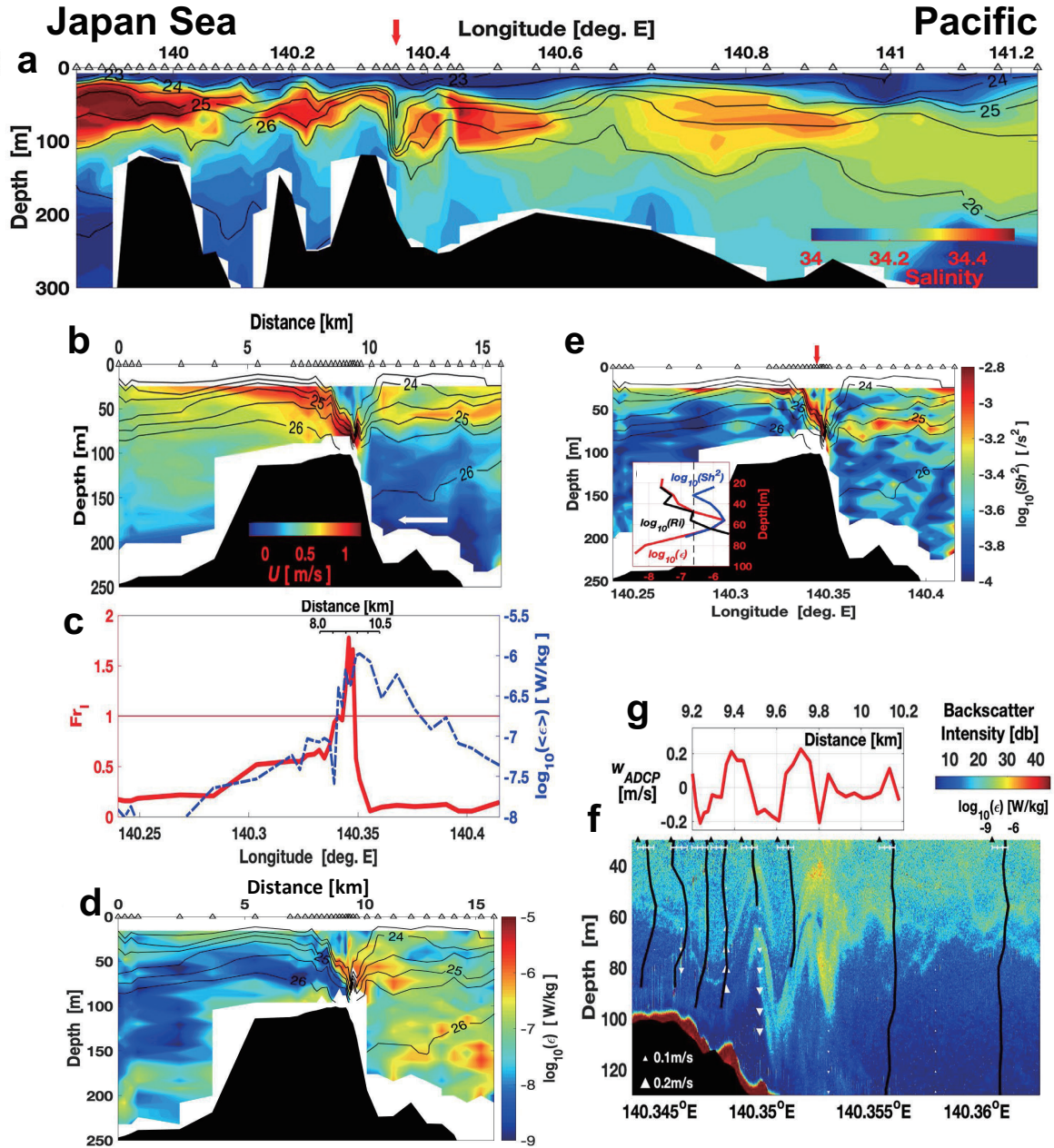


Fig. 5. (a) Cross-sectional distribution of salinity profile during the hydrographic observation across the Tsugaru Strait. Contours are isopycnal. (b), (d) and (e) are the cross-sill flow, energy dissipation rate, and vertical shear squared, respectively, across a sill off the cape Tappi in the Tsugaru Strait during a microstructure survey. The contours are isopycnal. Vertical profiles of energy dissipation rate (red), vertical shear squared (blue), and the Richardson number (black) at a station denoted by the red arrow in (e) are also shown in the small box in the bottom left corner. (c) is the distribution of layer Froude number (red line) and the energy dissipation rate averaged at 50–100 m depth (blue dashed line). (f) is the backscatter intensity near the lee edge of the sill with vertical profiles of energy dissipation rate taken by a microstructure profiler at each point denoted by a black triangle on top. (g) is the vertical velocity measured using the shipboard ADCP (Tanaka *et al.*, 2021b, with some modification).

ルード数が1を超えている状態をもって、擾乱が内部跳水であると解釈するためには、本海域における tidal excursion parameter ( $= 2\pi U/\omega_{K1}L$ ) が、1を大きく上回ることが必要である。日周潮流の振幅  $U = 1$  m/s, シルの水平スケール  $L = 10$  km とすると、このパラメータは 8.6 であり、上記のような(準定常的な)解釈が可能であると考へた。一方、内部波の増幅機構に関して、「フルード数が1になると、上流伝播する内部波が、シル下流端の励起源に停滞し効率的に重なり合うことで、その振幅が顕著に増加していく」という Hibiya (1986) の理論による解釈もなされており(太田ら, 2015; 山口ら, 2020)、今後、潮流が弱い小潮時との比較など検討を進めることが重要と考へている。

#### 4. 栄養塩輸送の観測研究に係る今後の課題

上述のように、筆者は、北西太平洋およびその縁辺海において、急峻な海底地形近傍における、乱流鉛直混合と栄養塩の鉛直輸送過程の解明に取り組んできた。ベーリング海大陸棚斜面域では、潮汐流との相互作用による内部潮汐波の励起・伝播特性が、乱流エネルギーの散逸分布に影響し、硝酸塩・鉄の鉛直輸送を強化する。黒潮や津軽暖流域では、強い流れが海底地形の起伏の激しい海域を通過する際、ケルビン・ヘルムホルツ不安定や内部跳水によって鉛直混合が著しく強化される。前節で述べたように、津軽海峡での内部波の発達過程には、潮汐流の影響が示唆されているが、トカラ海峡や伊豆海嶺も、半日周内部潮汐の顕著な発生海域と考へられており(e.g., Niwa and Hibiya, 2001; Masunaga *et al.*, 2018)、半日周内部潮汐波の伝播に伴う流速シアの変動が、係留観測で捉えられている(Tanaka *et al.*, 2021a)。加えて、本海域では、日周期の内部潮汐もしくは、近慣性内部波に伴う流速シアが、乱流を強化する可能性についても報告されている(e.g., Nagai *et al.*, 2017)。黒潮と内部波の相互作用の詳細な力学過程と、栄養塩の乱流鉛直輸送への影響に関する理解を、今後深めていく必要がある。

一方、物質循環や生物生産への寄与という観点からは、乱流鉛直混合以外のプロセスに伴う栄養塩輸送の定量的評価も、今後益々重要になると考へられる。例えば、ベーリング海大陸棚斜面では、斜面を横切る鉛直断面内

で潮汐残差流による循環(Maas and Zimmerman, 1989)が形成されている可能性が、数値実験から示唆されている(Tanaka *et al.*, 2013)。実際にその存在が観測データによって確認された暁には、この潮汐残差流が当該海域における溶存鉄・硝酸塩輸送に果たす役割に関しても定量的に明らかにしていく必要がある。また、これまで述べてきたような鉛直方向の栄養塩輸送に加えて、水平方向の輸送量の評価も重要である。すでに述べたように、ベーリング海では、海盆から陸棚にかけて深くなる 25.4  $\sigma_\theta$  面において、中規模渦による等密度面混合により、陸棚海底付近の物質が、直接グリーンベルトに供給される可能性が、過去の研究からも指摘されている(Sambrotto *et al.*, 2008; Hurst *et al.*, 2010)。詳細は Tanaka *et al.* (2017) に譲るが、この等密度面混合によるグリーンベルト有光層への溶存鉄輸送は、乱流鉛直混合によって下層から供給される量に匹敵する可能性がある。今後も、乱流鉛直混合をはじめとして、高いプランクトン生産性の維持に不可欠な栄養塩輸送への様々な物理過程の寄与を定量的に明らかにしていく必要がある。

#### 謝辞

このたびは、栄誉ある日本海洋学会岡田賞を頂くこととなり、大変光栄に存じます。今回の受賞にあたり、推薦および選考に携わって頂いた関係者の皆様方に厚く御礼申し上げますとともに、これまでの研究において、多くの方々のご協力やご指導を頂きましたことを、心より感謝いたします。特に、東京大学大気海洋研究所の安田一郎教授には、ベーリング海グリーンベルトを研究海域として提案して頂き、観測データの取得から、得られた結果に関する議論に至るまで、修士課程から丁寧にご指導頂きました。改めて感謝する次第です。また、東京大学大気海洋研究所の伊藤幸彦准教授をはじめ、海洋物理に関わる先生方や、所属研究室内外の先輩、後輩の皆様方との議論を通して、本研究についての理解を深めることができました。加えて、東京大学理学系研究科の日比谷紀之教授(現・東京大学名誉教授)をはじめ、修士・博士論文の審査に携わって頂いた先生方にも、多くのご指導を頂きました。この場をお借りして心より感謝いたします。

水産研究・教育機構の塩釜庁舎(旧東北区水産研究所)に赴任してからは、奥西武グループ長や長谷川大介主任研究員をはじめ、海洋環境部の皆様方には、普段の研究・業務、調査航海、グライダー観測など常日頃よりお世話になっており、改めて感謝いたします。また、研究・業務を進めるにあたり、塩釜庁舎の皆様方だけではなく、横浜・長崎・釧路・新潟・八戸の各庁舎の皆様方にも、ご協力を頂いており、感謝する次第です。本研究は、様々な観測航海で得られた成果がベースとなっており、乗船されていた全ての研究者・学生の皆様ならびに乗組員・観測技術スタッフの皆様のご協力に感謝いたします。また、下船後も共同で研究をさせて頂く機会も多く、北海道大学の久万健志名誉教授、北海道大学低温科学研究所の西岡純准教授をはじめ、ご協力頂いた先生方や研究者の皆様方に深く感謝いたします。

ベーリング海グリーンベルトに関する一連の研究は、日本学術振興会特別研究員制度の助成を頂きました。また、科学研究費補助金・新学術領域研究「海洋混合学の創設：物質循環・気候・生態系の維持と長周期変動の解明」(OMIX, JP15H05818)では、国内外の多くの研究者の皆様と共同研究・観測の機会を頂きました。改めて感謝いたします。最後に、これまでサポートしてくれた家族と、本稿の査読者として貴重なコメントを頂きました日比谷紀之先生に感謝いたします。

## References

- Aguilar-Islas, A. M., M. P. Hurst, K. N. Buck, B. Sohst, J.G. Smith, M. C. Lohan, and K. W. Bruland (2007): Micro- and macronutrients in the southeastern Bering Sea: insight into iron-replete and iron-depleted regimes. *Prog. Oceanogr.*, **73**, 99-126.
- Antonov, J. I., D. Seidov, T. P. Boyer, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, and D. R. Johnson (2010): NOAA atlas NESDIS 69. In World Ocean Atlas 2009, vol. 2, Salinity, edited by S. Levitus, 184 pp., U.S. Gov. Print. Off., Washington, D. C.
- Chang, M.-H., T. Y. Tang, C.-R. Ho, and S.-Y. Chao (2013): Kuroshio-induced wake in the lee of green island off Taiwan. *J. Geophys. Res. Océ.*, **118**, 1508-1519. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20151>.
- Chang, M.-H., S.-Y. Jheng, and R.-C. Lien (2016): Trains of large Kelvin-Helmholtz billows observed in the Kuroshio above a seamount. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 8654-8661. <https://doi.org/10.1002/2016GL069462>.
- Coachman, L. K., and J. J. Walsh (1981): A diffusion model of cross-shelf exchange of nutrients in the southeastern Bering Sea. *Deep-Sea Res.*, **28**, 819-846.
- Cyr F., D. Bourgoault, P. S. Galbraith, and M. Gosselin (2015): Turbulent nitrate fluxes in the Lower St. Lawrence Estuary, Canada. *J. Geophys. Res. Océ.*, **120**, 2308-2330. <https://doi.org/10.1002/2014JG0010272>.
- D'Asaro, E., C. Lee, L. Rainville, R. Harcourt, and L. Thomas (2011): Enhanced turbulence and energy dissipation at ocean fronts. *Science*, **332**, 318-322. [doi:10.1126/science.1201515](https://doi.org/10.1126/science.1201515).
- Farmer, D., and L. Armi (1999): Stratified flow over topography: the role of small-scale entrainment and mixing in flow establishment. *Proc. R. Soc. Lond. A*, **455**, 3221-3258.
- Foreman, M. G. G., P. F. Cummins, J. Y. Cherniawsky, and P. J. Stabeno (2006): Tidal energy in the Bering Sea. *J. Mar. Res.*, **64**, 797-818.
- Guo, X., X.-H. Zhu, Q.-S. Wu, and D. Huang (2012): The Kuroshio nutrient stream and its temporal variation in the East China Sea. *J. Geophys. Res. Océ.*, **117**, C01026. [doi:10.1029/2011JC007292](https://doi.org/10.1029/2011JC007292).
- Guo, X. Y., X.-H. Zhu, Y. Long, and D. J. Huang (2013): Spatial variations in the Kuroshio nutrient transport from the East China Sea to south of Japan. *Biogeosci.*, **10**, 6403-6417. [doi:10.5194/bg-10-6403-2013](https://doi.org/10.5194/bg-10-6403-2013).
- Hasegawa, D. (2019): Island mass effect. In *Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical, and Ecosystem Dynamics*, edited by Nagai T., Saito H., Suzuki K., Takahashi M., Geophysical Monograph Series, **243**. John Wiley and Sons Inc, Hoboken, New Jersey, pp 163-174.
- Hasegawa, D., H. Yamazaki, R. G. Lueck, and L. Seuront (2004): How islands stir and fertilize the upper ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L16303. [doi:10.1029/2004GL020143](https://doi.org/10.1029/2004GL020143).
- Hasegawa D., M. R. Lewis, and A. Gangopadhyay (2009): How islands cause phytoplankton to bloom in their wakes. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L20605. <https://doi.org/10.1029/2009GL039743>.
- 長谷川大介・田中雄大・松野健・千手智晴・堤英輔・中村啓彦・仁科文子・小針統・吉江直樹・郭新宇・長井健容・奥西武・安田一郎 (2019): センサによる硝酸塩鉛直乱流拡散フラックスの計測. 沿岸海洋研究, **57**, 59-64.
- Hasegawa, D., T. Matsuno, E. Tsutsumi, T. Senjyu, T. Endoh, T. Tanaka, et al. (2021): How a small reef in the Kuroshio cultivates the ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2020GL092063. <https://doi.org/10.1029/2020GL092063>.
- Hibiya, T. (1986): Generation mechanism of internal waves by tidal flow over a sill. *J. Geophys. Res.*, **91**, 7697-7708.
- Hibiya, T. (2004): Internal wave generation by tidal flow over a continental shelf slope. *J. Oceanogr.*, **60**, 637-643.
- Hurst, M. P., A. M. Aguilar-Islas, and K. W. Bruland (2010): Iron in the southeastern Bering Sea: elevated leachable particulate Fe in shelf bottom waters as an important source for surface waters. *Cont. Shelf Res.*, **30**, 467-480.
- Iverson, R. L., T. E. Whitledge, and J. J. Goering (1979): Chlorophyll and nitrate fine structure in the southeastern Bering Sea shelf break front. *Nature*, **281**, 664-666.
- Kaneko, H., I. Yasuda, K. Komatsu, and S. Itoh (2012): Observations of the structure of turbulent mixing across the Kuroshio. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L15602. <http://dx.doi.org/10.1029/2012gl052419>.
- Kaneko, H., I. Yasuda, K. Komatsu, and S. Itoh (2013): Observations of vertical turbulent nitrate flux across the Kuroshio. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 3123-3127. <http://dx.doi.org/10.1002/grl.50613>.
- Kinder, T. H., L. K. Coachman, and J. A. Galt (1975): The Bering slope current system. *J. Phys. Oceanogr.*, **5**, 231-244.
- Kobari T., T. Honma, D. Hasegawa, N. Yoshie, E. Tsutsumi, T. Matsuno, T. Nagai, T. Kanayama, F. Karu, K. Suzuki, T. Tanaka, X. Guo, G. Kume,



- A. Nishina, and H. Nakamura (2020): Phytoplankton growth and consumption by microzooplankton stimulated by turbulent nitrate flux suggest rapid trophic transfer in the oligotrophic Kuroshio. *Biogeosci.*, **17**, 2441-2452. <https://doi.org/10.5194/bg-2019-377>.
- Legg, S. (2004): Internal tides generated on a corrugated continental slope. Part I: Cross-slope barotropic forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 156-173.
- Liu X., K. Furuya, T. Shiozaki, T. Masuda, T. Kodama, M. Sato, H. Kaneko, M. Nagasawa, and I. Yasuda (2013): Variability in nitrogen sources for new production in the vicinity of the shelf edge of the East China Sea in summer. *Cont. Shelf Res.*, **61-62**, 23-30.
- Locarnini, R. A., A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, and D. R. Johnson (2010): NOAA atlas NESDIS 68, In World Ocean Atlas 2009, vol. 1, Temperature, edited by S. Levitus, 184 pp., U.S. Gov. Print. Off., Washington, D. C.
- Maas, L. R. M., and J. T. F. Zimmerman (1989): Tide-topography interaction in a stratified shelf sea. 2: Bottom trapped internal tides and baroclinic residual currents. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, **45**, 37-69.
- Marshall, J., A. Adcroft, C. Hill, L. Perelman, and C. Heisey (1997): A finite-volume, incompressible Navier-Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. *J. Geophys. Res.*, **102**, 5753-5766.
- Masunaga, E., Uchiyama, Y., Suzue, Y., and Yamazaki, H. (2018): Dynamics of internal tides over a shallow ridge investigated with a high-resolution downscaling regional ocean model. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 3550-3558. <https://doi.org/10.1002/2017GL076916>.
- Mizobata, K., and S. Saitoh (2004): Variability of Bering Sea eddies and primary productivity along the shelf edge during 1998-2000 using satellite multi-sensor remote sensing. *J. Mar. Syst.*, **50**, 101-110.
- Mizobata, K., J. Wang, and S. Saitoh (2006): Eddy-induced cross-slope exchange maintaining summer high productivity of the Bering Sea shelf break. *J. Geophys. Res. Oce.*, **111**, C10017. <http://dx.doi.org/10.1029/2005JC003335>.
- Musgrave R. C., J. A. MacKinnon, R. Pinkel, A. F. Waterhouse, and J. D. Nash (2016): Tidally driven processes leading to near-field turbulence in a channel at the crest of the Mendocino Escarpment. *J. Phys. Oceanogr.* **46**, 1137-1155. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-15-0021.1>.
- Nagai, T., A. Tandon, H. Yamazaki, and M. J. Doubell (2009): Evidence of enhanced turbulent dissipation in the frontogenetic Kuroshio Front thermocline. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L12609, doi:10.1029/2009GL038832.
- Nagai, T., A. Tandon, H. Yamazaki, M. J. Doubell, and S. Gallager (2012): Direct observations of microscale turbulence and thermohaline structure in the Kuroshio Front. *J. Geophys. Res. Oce.*, **117**, C08013, doi:10.1029/2011JC007228.
- Nagai T., D. Hasegawa, T. Tanaka, H. Nakamura, E. Tsutsumi, R. Inoue, and T. Yamashiro (2017): First Evidence of Coherent Bands of Strong Turbulent Layers Associated with High-Wavenumber Internal-Wave Shear in the Upstream Kuroshio. *Sci. Rep.*, **7**, 14555. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15167-1>.
- Niwa, Y., and T. Hibiya (2001): Numerical study of the spatial distribution of the M<sub>2</sub> internal tide in the Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, **106**, 22,441-22,449.
- 小田巻実 (1984): 津軽海峡の潮汐・潮流について, 沿岸研究ノート, **22**, 12-22.
- 太田紗生・磯田豊・吉村志穂・荘司堅也・有田駿・河野航平・方曉蓉・小林直人 (2015): 津軽海峡内の浅瀬地形上で励起される内部潮汐波, 海と空, **90**, 63-84.
- Okkonen, S. R., G. M. Schmidt, E. D. Cokelet, and P. J. Stabenro (2004): Satellite and hydrographic observations of the Bering Sea. 'Green Belt'. *Deep-Sea Res. Part II*, **51**, 1033-1051.
- Osborn, T. R. (1980): Estimates of the local rate of vertical diffusion from dissipation measurements. *J. Phys. Oceanogr.*, **10**, 83-89.
- Palter J. B., and M. S. Lozier (2008): On the source of Gulf Stream nutrients. *J. Geophys. Res. Oce.*, **113**, C06018. <https://doi.org/10.1029/2007JC004611>.
- Pelegri J. L., and G. T. Csanady (1991): Nutrient transport and mixing in the Gulf Stream. *J. Geophys. Res.*, **96**, 2577-2583. <https://doi.org/10.1029/90JC02535>
- Redfield A. C., B. H. Ketchum, and F. A. Richards (1963): The influence of organisms on the composition of sea-water. In: The sea, vol 2. The composition of sea-water: comparative and descriptive oceanography. Wiley, New York, pp 26-77.
- Saito, H. (2019): The Kuroshio: its recognition, scientific activities and emerging issues. In *Kuroshio Current, Physical, Biogeochemical and Ecosystem Dynamics*, edited by Nagai T., Saito H., Suzuki K., Takahashi M., Geophysical Monograph Series, **243**, John Wiley and Sons Inc, Hoboken, New Jersey, pp 1-11.
- Saitoh Y., K. Kuma, Y. Isoda, H. Kuroda, H. Matsuura, T. Wagawa, H. Takata, N. Kobayashi, S. Nagano, and T. Nakatsuka (2008): Processes influencing iron distribution in the coastal waters of the Tsugaru Strait Japan. *J. Oceanogr.*, **64**, 815-830.
- Sambrotto, R. N., C. Mordy, S. J. Zeeman, P. J. Stabenro, and S. A. Macklin (2008): Physical forcing and nutrient conditions associated with patterns of Chl-*a* and phytoplankton productivity in the southeastern Bering Sea during summer. *Deep-Sea Res. Part II*, **55**, 1745-1760.
- Sarmiento, J. L., N. Gruber, M. A. Brzezinski, and J. P. Dunne (2004): High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity. *Nature*, **427**, 56-60, doi:10.1038/nature02127.
- Schumacher, J. D., and R. K. Reed (1992): Characteristics of currents over the continental slope of the eastern Bering Sea. *J. Geophys. Res.*, **97**, 9423-9433.
- Simpson, J. H., and J. Sharples (2012): Introduction to the Physical and Biological Oceanography of Shelf Seas. Cambridge University Press, New York, 424.
- Springer, A. M., C. P. McRoy, and M. V. Flint (1996): The Bering Sea Green Belt: Shelf edge processes and ecosystem production. *Fish. Oceanogr.*, **5**, 205-223.
- Sunda, W. G., D. G. Swift, and S. A. Huntsman (1991): Low iron requirement for growth in oceanic phytoplankton. *Nature*, **351**, 55-57.
- Sunda, W. G., and S. A. Huntsman (1995): Iron uptake and growth limitation in oceanic and coastal phytoplankton. *Mar. Chem.*, **50**, 189-206.
- Sunda, W. G., and S. A. Huntsman (1997): Interrelated influence of iron, light and cell size on marine phytoplankton growth. *Nature*, **390**, 389-392.
- Takahashi, T., S. C. Sutherland, C. Sweeney, A. Poisson, N. Metzl, B. Tilbrook, N. Bates, R. Wanninkhof, R. A. Feely, C. Sabine, J. Olafsson, and Y. Nojiri (2002): Global sea-air CO<sub>2</sub> flux based on climatological surface ocean pCO<sub>2</sub>, and seasonal biological and temperature effects. *Deep-Sea Res. Part II*, **49**, 1601-1622.
- Tanaka T. (2014): Studies on water mass structure and vertical mixing to sustain nutrient transport along the shelf break of the southeastern Bering Sea, PhD thesis, Dep. of Earth and Planet Sci., Univ. of Tokyo,

Tokyo.

- Tanaka, T., I. Yasuda, K. Kuma, and J. Nishioka (2012): Vertical turbulent iron flux sustains the Green Belt along the shelf break in the south-eastern Bering Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L08603. <http://dx.doi.org/10.1029/2012GL051164>.
- Tanaka, T., I. Yasuda, Y. Tanaka, and G. S. Carter (2013): Numerical study on tidal mixing along the shelf break in the Green Belt in the south-eastern Bering Sea. *J. Geophys. Res. Oce.*, **118**, 6525-6543, <http://dx.doi.org/10.1002/2013JC009113>.
- Tanaka, T., I. Yasuda, H. Onishi, H. Ueno, and M. Masujima (2015): Observations of current and mixing around the shelf break in Pribilof Canyon in the Bering Sea. *J. Oceanogr.*, **71**, 1-17, <http://dx.doi.org/10.1007/s10872-014-0256-2>.
- Tanaka, T., I. Yasuda, K. Kuma, and J. Nishioka (2017): Evaluation of the biogeochemical impact of iron-rich shelf water to the Green Belt in the southeastern Bering Sea. *Cont. Shelf Res.*, **143**, 130-138, <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2016.11.008>.
- Tanaka T., D. Hasegawa, I. Yasuda, H. Tsuji, S. Fujio, Y. Goto, and J. Nishioka (2019): Enhanced vertical turbulent nitrate flux in the Kuroshio across the Izu Ridge. *J. Oceanogr.*, **75**, 195-203. <https://doi.org/10.1007/s10872-018-0500-2>.
- Tanaka T., D. Hasegawa, I. Yasuda, D. Yanagimoto, S. Fujio, H. Nakamura, R. Inoue, and J. Nishioka (2021a): Enhanced vertical turbulent nitrate flux in the intermediate layer of the Kuroshio in the Tokara Strait. *J. Oceanogr.*, **77**, 45-53. <https://doi.org/10.1007/s10872-020-00581-3>.
- Tanaka, T., D. Hasegawa, T. Okunishi, H. Kaneko, and T. Ono (2021b): Internal hydraulic jump in the Tsugaru Strait. *J. Oceanogr.*, **77**, 215-228, <https://doi.org/10.1007/s10872-020-00588-w>.
- Tsutsumi, E., T. Matsuno, R.-C. Lien, H. Nakamura, T. Senjyu, T., and X. Guo (2017): Turbulent mixing within the Kuroshio in the Tokara strait. *J. Geophys. Res. Oce.*, **122**, 7082-7094, <https://doi.org/10.1002/2017JC013049>.
- Whitt D. B. (2019): On the role of the gulf stream in the changing Atlantic nutrient circulation during the 21st century. In *Kuroshio Current: Physical, Bio-geochemical, and Ecosystem Dynamics*, edited by Nagai T., Saito H., Suzuki K., Takahashi M., Geophysical Monograph Series, **243**. John Wiley and Sons Inc, Hoboken, New Jersey, pp 51-82.
- 山口卓也・磯田豊・伊藤海彦・向井徹・小林直人 (2020): 津軽海峡シル地形上の海面にストリーク帯を形成する内部波の観測とモデル実験. 海の研究, **29**, 71-90. doi: 10.5928/kaiyou.29.3\_71.

# Vertical turbulent nutrient transport in the western north Pacific and its marginal seas

Takahiro Tanaka<sup>†</sup>

## Abstract

The western North Pacific and its marginal seas are known for having the highest biological productivity in the world's oceans. Although vertical turbulent mixing is considered important in transporting nutrients to maintain primary production, no research into vertical turbulent nutrient flux based on microstructure measurements has been conducted in this area. Observational and numerical studies over the continental slope in the southeastern Bering Sea indicate the relevance of vertical nitrate and iron flux induced by tidal mixing for maintaining high summer primary production. This research also suggests that the abrupt topography in the path of the Kuroshio and Tsugaru Warm Current act as a hotspot for vertical turbulent nitrate transport from the lower layer. Finally, this article discusses the future direction of nutrient flux observations.

**Key words:** Vertical turbulent mixing, vertical nutrient flux, western north Pacific, marginal sea

(Corresponding author's e-mail address: takahiro@affrc.go.jp)

(Received 25 December 2021; accepted 12 December 2022)

(doi: 10.5928/kaiyou.32.1\_1)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2022)

---

<sup>†</sup> Fisheries Resources Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, Address: 3-27-5  
Shinhama-cho, Shiogama, Miyagi 985-0001, Japan  
e-mail: takahiro@affrc.go.jp