

様式3

愛媛大学沿岸環境科学研究センター
共同利用・共同研究拠点「化学汚染・沿岸環境研究拠点」
共同研究報告書

平成30年 2月 28日

化学汚染・沿岸環境研究拠点 拠点長 殿

申請者（研究代表者） 堤 英輔
所属機関 九州大学 応用力学研究所
職 学術研究員
氏名 堤 英輔

下記の共同研究について、別紙の通り報告します。

1 研究課題 豊後水道における流動、乱流混合と硝酸塩濃度の観測

2 研究組織

氏名	所属	職	分担研究課題
代表者	堤 英輔	学術研究員	観測の実施，データ解析 研究の取りまとめ
分担者	松野 健	特任教授	海洋観測・データ解析へ助言
	郭 新宇	教授	海洋観測のアレンジ・助言
	吉江 直樹	講師	栄養塩の分析
拠点対応教員	郭 新宇	教授	

3 研究内容 （別紙）

愛媛大学化学汚染・沿岸環境研究拠点 共同研究内容

研究課題名：豊後水道における流動，乱流混合と硝酸塩濃度の観測

代表者 九州大学応用力学研究所 堤 英輔

共同研究者 九州大学応用力学研究所 松野 健

共同研究者 愛媛大学沿岸環境科学研究センター 郭 新宇

共同研究者 愛媛大学沿岸環境科学研究センター 吉江直樹

研究目的

春季から秋季にかけての瀬戸内海・豊後水道の海洋構造の形成には，黒潮域から供給される外洋水が大きな役割を果たしている．特に豊後水道底層で生じる黒潮亜表層水の侵入・北上現象である底入り潮は，豊後水道から瀬戸内海に栄養塩を供給することで生物生産に影響を与えていると考えられている．豊後水道では海底地形と潮汐および成層間の相互作用に起因する内部波(内部潮汐)や地形性水平渦により時空間的に複雑な流動と乱流拡散の場が存在するため，外洋水に由来する底層栄養塩がどこでどのように表層の有光層へ供給されるかは単純でなく，その実態は明らかでない．本研究は CMES の所有する調査実習船「いさな」と水中紫外線硝酸塩アナライザー，九州大学応用力学研究所の乱流微細構造プロファイラを用いた現地観測を実施することで，豊後水道の流動場・乱流場と硝酸塩を測定し，物理場と栄養塩濃度分布との関係を明らかにすることを目的とする．

研究内容

2017 年 8 月 27 日 (中潮期) に愛媛大学沿岸環境科学研究センター研究船「いさな」を用いて豊後水道における海洋観測を実施した．図 1 に示す 10 点 (Stn.2-6 および Stn.A-E) において，微細構造プロファイラ TurboMAP-5 (JFE Advantech 社) を用いて，乱流強度の指標である乱流運動エネルギー散逸率 ε と水温・塩分・蛍光クロロフィルを計測した．同時に「いさな」搭載の音響ドップラー流速プロファイラ ADCP (Teledyne RD Instruments 社) によって水平方向流速を計測した．さらに Stn.E 点を除く全ての点で，水中紫外線硝酸塩アナライザー SUNA V2 (Sea-Bird Scientific 社) を用いた硝酸塩濃度計測を実施した．SUNA は圧力計を搭載していないため，多項目水質計 RINKO プロファイラ (JFE Advantech 社) とともに金属製フレームに取り付けて運

用した. SUNA によって計測した硝酸塩濃度は, Stn.2, 4, 6 のそれぞれ 4 層において取得した採水サンプルの分析結果によって校正した.

栄養塩の表層への供給を調べるために, 硝酸塩の鉛直乱流フラックス

$$F_{NO_3^-} = -K \frac{\partial C_{NO_3^-}}{\partial z}$$

を見積もった. ここで K は硝酸塩に対する鉛直渦拡散係数, $C_{NO_3^-}$ は硝酸塩濃度である. 鉛直座標 z は上向きを正にとるため, 正の $F_{NO_3^-}$ は上向きのフラックスを意味する. K の値は, 硝酸塩と海水密度に対する鉛直渦拡散係数が等しいと仮定し ($K = K_\rho$), Osborn (1980)の式

$$K_\rho = 0.2 \frac{\varepsilon}{N^2}$$

から見積もられる. ここで $N = [-(g/\rho_0) (\partial\rho/\partial z)]^{1/2}$ (ρ : 海水密度) は浮力振動数で, ε と共に TurboMAP の計測結果から計算される. 現場観測では, TurboMAP のキャストと SUNA/RINKO のキャスト間に時間差が生じるが, その間の内部波による成層構造の変化を考慮するため, $F_{NO_3^-}$ の計算の際には同じ海水密度の値上で K と $\partial C_{NO_3^-} / \partial z$ 間の積を取った.

研究成果

図 2 に最も強い乱流が計測された測点 3 における観測結果を例として示す. 測点 3 は水深 40 m 以深に成層が形成されていたが, そこでは 10^{-6} Wkg^{-1} を超えるエネルギー散逸率と $10^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ に達する鉛直拡散係数が観測された. さらにその近傍では水深が深くなるとともに流速が反時計回りに回転している様子および密度逆転が見られることから, 上向きに伝播する内部波の砕波によって猛烈な乱流混合が生じていたと考えられる. 硝酸塩フラックスの分布は乱流強度の分布に良く対応しており, 40 m 以浅で $10^{-1} \sim 10^0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, 以深でその 10 倍のオーダーであった.

図 3 に横軸に観測点, 縦軸に水深をとった観測結果の断面図を示す. 南部の測点(4-5)と東部の測点(C-E)の底部には, 低温・高硝酸塩の水塊が存在しており, 外洋系の水塊が底入り潮として侵入している様子が見られた. 一方で海峡部に近い測点(2, 3, A)では強い乱流によって水柱は比較的鉛直的に混ぜられていた. また, 測点 2, 3, B-E の水深 10 m 付近には, 明瞭なクロロフィル極大が形成されていた. 乱流硝酸フラックスは表層のクロロフィル極大の下部では概ね $10^0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ のオーダーであった

が、測点 2 では強い乱流に対応して $10^1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ のオーダーであり、本研究によって豊後水道における栄養塩と乱流強度の同時分布が観測され、乱流硝酸塩フラックスを初めて見積もることが出来た。

成果発表

・学会発表

堤 英輔, 吉江 直樹, 眞野 能, 神田 泰成, 藤井 直紀, 郭 新宇, 豊後水道における乱流硝酸塩フラックスの見積もり, 2017年度九州沖縄地区合同シンポジウム(日本海洋学会西南支部・水産海洋学会合同シンポジウム)「乱流混合と海洋環境」.

・発表論文

堤 英輔, 吉江 直樹, 眞野 能, 神田 泰成, 藤井 直紀, 郭 新宇, 豊後水道における乱流硝酸塩フラックスの見積もり, 水産海洋研究, 印刷中 (査読なし).

今後の問題点

本研究で得られた硝酸塩の乱流輸送量を、海峡部付近の栄養塩ダイナミクスの中で評価し、生物の生産過程の理解に結びつけることが今後の課題である。例えば、測点 2 の水深 20-40 m における大きな上向き硝酸塩フラックスはその上部のクロロフィル極大と定性的には良く対応しているが、測点 B-D のクロロフィル極大の付近には顕著な硝酸塩フラックスは存在しておらず、硝酸塩フラックスでは単純にクロロフィル分布を説明できない。このことをはじめとした栄養塩供給と生物生産間の関係を理解するためには、物理的な側面からは、Takeoka et al. [1993]が提唱する栄養塩バイパスのような栄養塩の水平輸送過程、および強い乱流(フラックス)の時間スケールの把握が今回の研究に加えて必要だと考えられる。そのためには、より時空間的に効率の良い乱流と硝酸塩(栄養塩)の観測方法とそれによる観測データの蓄積が必要である。

謝辞

本研究の現場観測と栄養塩分析では、愛媛大学沿岸環境科学研究センターの大西秀次郎船長、同大学院理工学研究科大学院生の眞野能さん、神田泰成さん、中川美和さん、佐賀大学低平地沿岸海域研究センターの藤井直紀特任助教に多大なご協力をいただきました。記して感謝申し上げます。

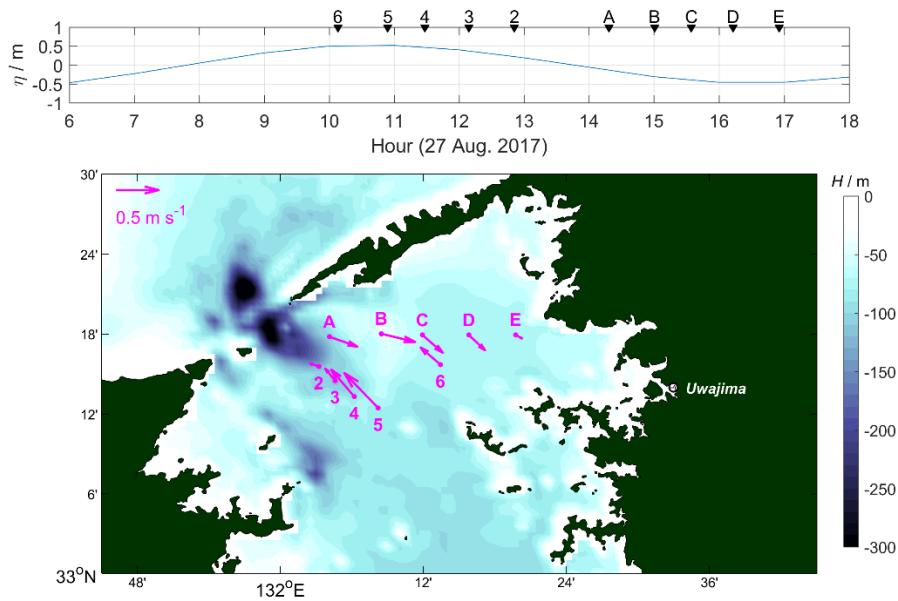


図1 (上図) 2017年8月27日の宇和島験潮所において観測された潮位変動と各測点における観測時刻. (下図) 豊後水道における乱流観測点 Stn.2-6 および Stn. A-E. 矢印は各測点に置ける鉛直平均流速ベクトルを示す.

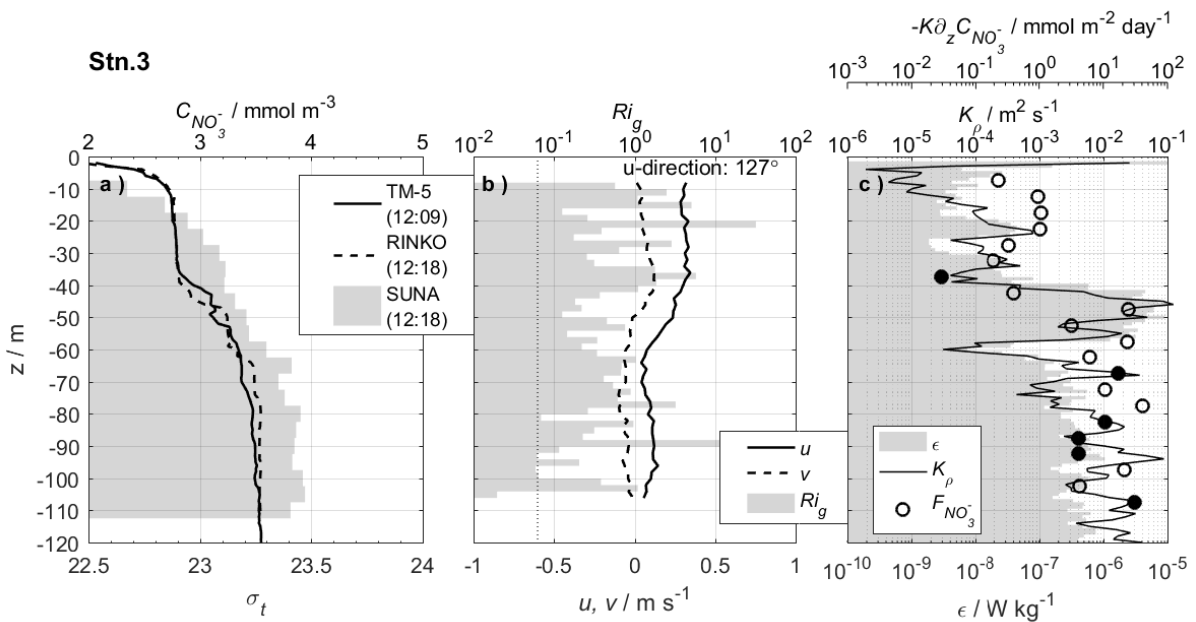


図2 測点3における観測結果: (a) 海水密度 σ_t (実線: TurboMAPによる測定, 破線: RINKOによる測定), 硝酸塩濃度 $C_{NO_3^-}$ (シェード) (b) 流軸方向成分の流速 u (実線), 流軸に直交する方向成分の流速 v (破線), 勾配リチャードソン数 Ri_g (シェード) (c) 乱流運動エネルギー散逸率 (シェード), 鉛直渦拡散係数 (実線), 硝酸塩フラックス $F_{NO_3^-}$ (丸印: 白丸は上向き, 黒丸は下向きを示す).

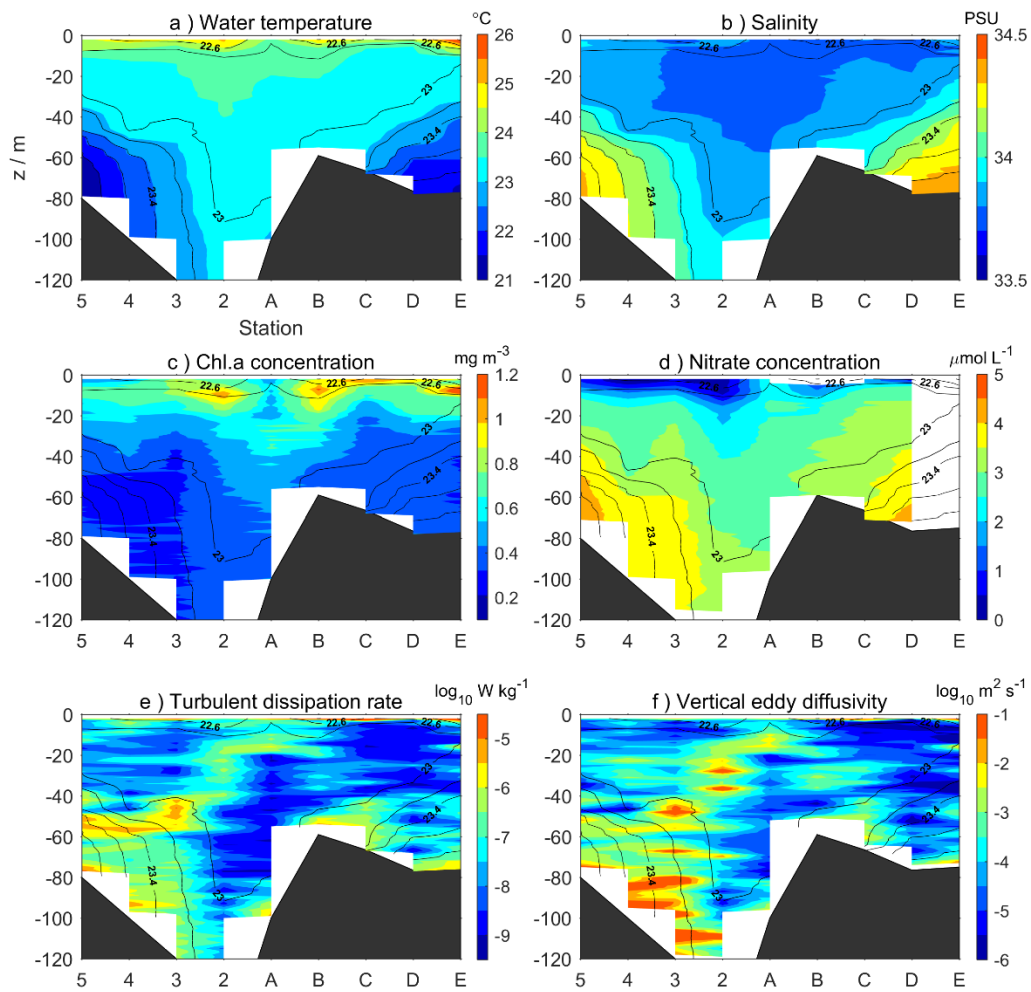


図3 観測結果の測点-水深断面図 (a) 水温 (b) 塩分 (c) クロロフィル濃度 (d) 硝酸塩濃度 (e) 乱流運動エネルギー散逸率 (f) 鉛直渦拡散係数. 各図中の等値線は海水密度(シグマティ)を示す.

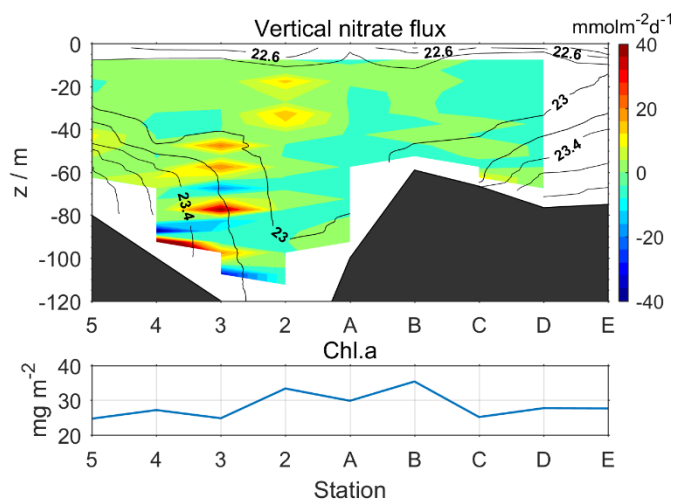


図4 (上図) 乱流硝酸塩フラックスの断面図. (下図) 海面から水深 50 m まで鉛直積分したクロロフィル量.