

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 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

夏季から秋季にかけて豊後水道で発生する底入り潮は, 黒潮域から栄養塩を供給し, 豊後水道と瀬戸内海の生態系に影響を与えている. 底入り潮の発生は潮汐の大潮・小潮に関連し, その栄養塩の表層への供給に潮汐混合が重要な働きをしているため, 潮汐現象とそれに伴う乱流混合を理解することは豊後水道の栄養塩動態と生態系理解の鍵となる. 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を用いて現場観測を実施し, 豊後水道の潮汐・潮流と栄養塩動態との関係を明らかにすることを目的とする.

研究内容

当初は 2018 年 8 月 20 日から「いさな」による豊後水道航海を実施する予定であったが, 台風 19・20 号とその後に続けて発生した低気圧の影響のために月末まで航海が実施できず, 年度内の乱流・栄養塩観測の実施を断念せざるを得ない状況となった.

代替として, 豊後水道においてドローン空撮による内部波の観測を行った. 豊後水道においては成層期に非線形性の強い内部波が発生し表層に収束帯を生じるため, 海面に内部波に沿った筋目が形成される. 実際に法華津湾において 2017 年に実施した係留計による水温・流動場の高解像度観測からは, 筋目の通過時に海中で鉛直変位振幅 2-3m, 鉛直流速が 2 cm s^{-1} の明瞭な非線形内部波が捉えられている. このような内部波の動態を明らかにすることは, 物質・質量輸送の理解に有用であると考えられる.

9 月 5-6 日に豊後水道航海を実施し, 戸島北方の定点 (北緯 33 度 16.17 分, 東経 132 度 20.87 分: 図 1 星印) において, 9 月 5 日の 14 時 30 分より 17 時まで断続的に空中ドローン(Phantom 4, DJI 社)を用いた海面画像

の空撮を行った。ドローンの飛行は、14:40, 15:10, 16:00, 16:50 の 4 回行い、計 71 枚の画像を取得した。

また、H29 年度に実施した豊後水道乱流観測結果の理解のために、数値海洋モデル MITgcm (Marshall et al. 1997) を用い、豊予海峡に生じる強い鉛直混合の再現を試みた。H29 年度には、豊予海峡南部において内部潮汐に起因した顕著な乱流混合が観測されたため、内部波場とそれに伴う不安定乱流の再現を念頭に数値モデルを設定した。

豊後水道の複雑な地形を解像するため、水平グリッド幅を 200m、鉛直グリッド幅を表層 80m においては 2m、それ以深においては徐々に粗く設定した (最大 100 m)。初期条件は九州大学応用力学研究所の海況予報モデル DREAMS (Liu et al. 2017) から 2017 年 8 月の平均水温・塩分を与え、海面から 8 月の平均海面熱フラックス (Tsutsumi and Guo 2016) および開境界から主要 4 分潮の順圧潮汐 (Guo et al. 2013) でモデルを駆動した。なお、本モデルでは開境界における黒潮の流入・流出、および河川からの淡水の流入は考慮していない。水平粘性・拡散係数はそれぞれ $1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ の一定値を与え、鉛直粘性・拡散係数は背景の値として $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ を与えるとともに Mellor-Yamada 2.0 と呼ばれる局所的な乱流運動エネルギーバランスを仮定したスキームを用い、リチャードソン数が小さくなる不安定なグリッドでは鉛直粘性・拡散係数を増大させた (Satoh 2004)。

研究成果

1. 空中ドローンによる内部波観測結果

図 2 に定点から北方 (左図) および南方 (右図) を撮影した写真を示す。写真中に見られた筋目は黄線で強調している。撮影時刻はそれぞれ 16 時、17 時であり、ほぼ満潮時であった。定点北方に見られた筋目は南北方向から北東-南西方向に数本並んでおり、時間の経過とともに西向きに移動する傾向が見られた。また、定点南方に見られた筋目も概ね南北方向に並んでおり、これらについても西方への移動が認められた。

2. 数値モデルによる 2017 年豊予海峡付近で観測された乱流拡散の再現

モデルの計算領域とモデルで計算された 2017 年 8 月 27 日における日平均海面水温を図 3 に示す。モデルは夏季の豊後水道と伊予灘に見られる

混合域（冷水域）とフロント構造（例えば Iwasaki et al. 2015）を定性的には再現していた。図 4 に豊予海峡南部の測点 2(2017 年 8 月 25 日正午)における成層構造，流れ，鉛直拡散の観測値(実線)とモデル計算値(破線)を示す。成層と流れに関しては，モデルは観測された成層と流れの大まかな鉛直構造は再現できていたが，鉛直拡散に関しては概して過小評価となっていた。特に，観測では内部波の碎波に起因して最大 $10^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ もの大きな鉛直拡散が垂表層（40-60m）で生じていたのに対して，モデル中では流れの鉛直シアーが弱いため不安定が生じておらず，拡散係数は背景値のまま（ $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ）であった。このような傾向は他の測点に共通しており，モデルでは水柱のほとんど(全測点で見ても 93%)で拡散係数が背景値のままであった。一方，モデル中で流れが不安定になった場合でも，計算された鉛直拡散係数は観測に比べ 1~2 オーダー過大評価となっており，観測された鉛直拡散をモデルは全体的に再現できていなかった（図 4d）。

上述のモデルの鉛直拡散の再現性が良くない原因としては，内部波の再現性が十分でない点とモデルで使用した鉛直拡散パラメタリゼーションが現実を表現できていない点が挙げられる。特に後者については，沿岸数値モデリングに共通する普遍的な課題であり，改善が強く望まれる。

成果発表

なし

今後の問題点

本研究の数値モデルはドローンで空撮された内部波についても再現できていなかった(図は省略する)。この理由として成層構造の再現性（海面熱フラックスの問題，観測とモデルの時期の違いの問題）とグリッド解像度の不足が挙げられる。上述の鉛直拡散の再現性の問題と合わせて今後の課題とし，現場観測データの蓄積をベースとして改善に取り組みたい。

謝辞

現場観測では「いさな」の大西秀次郎船長，愛媛大学大学院理工学研究科大学院生の眞野能さんにご協力をいただきました。また，ドローン空撮写真の解析についても大西秀次郎船長にご助力いただきました。記して感謝申し上げます。

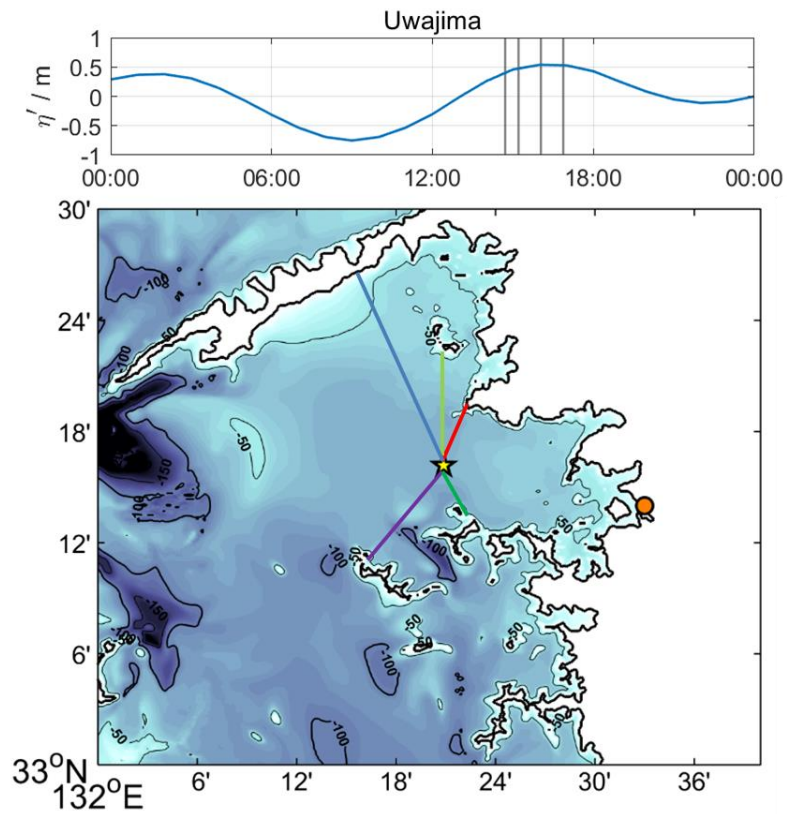


図1 2018年9月5日に実施したドローン観測位置と潮位: (上図) 宇和島験潮所(下図赤丸)で観測された水位変動. 縦線はドローン飛行時刻を示す. (下図) 戸島北部におけるドローン観測点(星印).



図2 ドローン空撮によって捉えられた海面の筋目(黄線で強調している). (左) 16時における北方撮影図. (右) 17時における南方撮影図. 図中の青・黄緑・赤・緑・紫の実線は定点と沿岸地形間の位置関係を示す(図1下図).

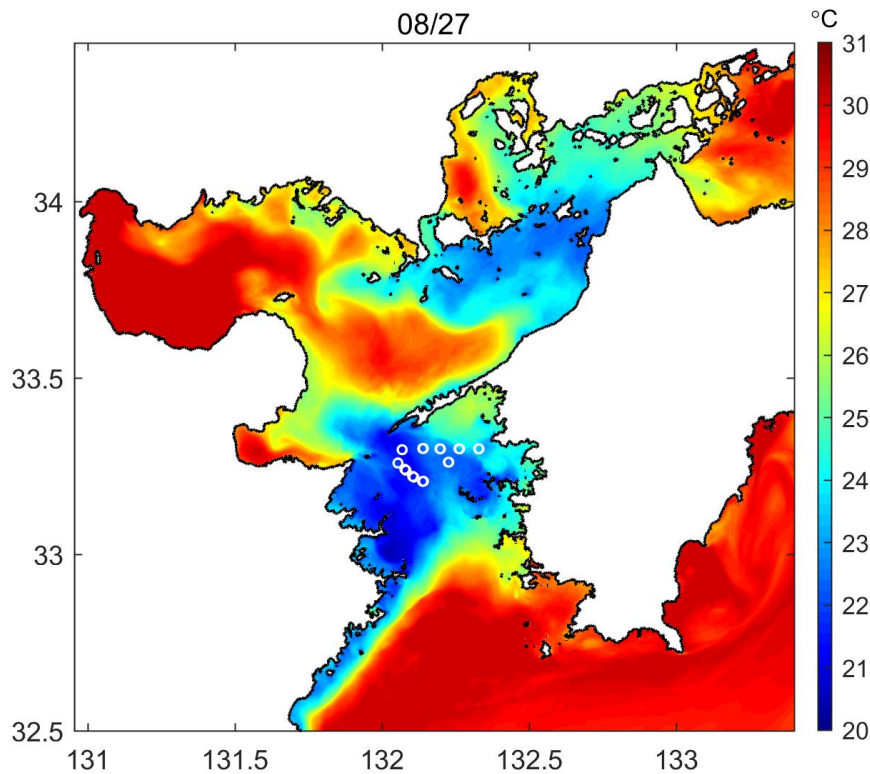


図3 数値モデルの計算領域. カラーシェードは数値モデルで計算された2017年8月27日における日平均表面海水温度を示す. 図中の白丸は同日に乱流観測を実施した測点を示す.

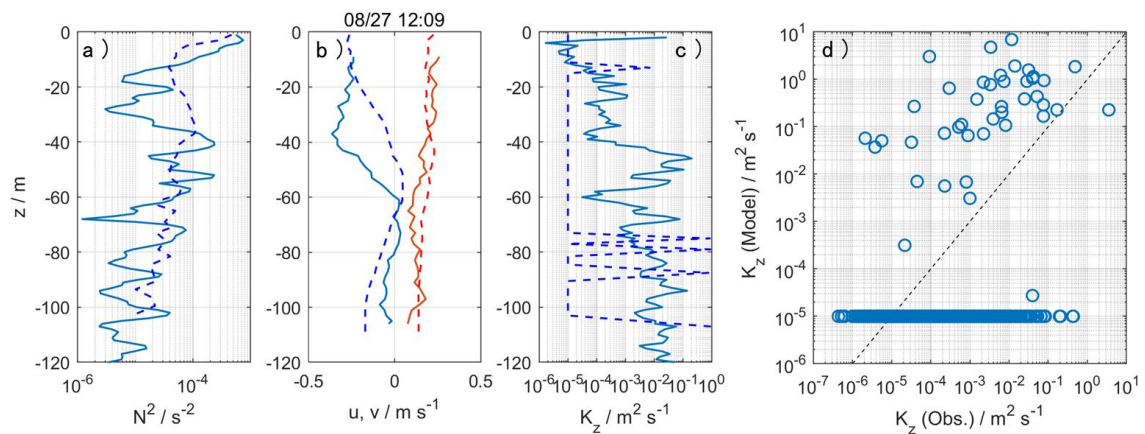


図4 (a-c) 豊予海峡南部の測点における成層, 流れ, 鉛直拡散の観測-モデル結果比較: (a) 浮力振動数 N^2 , (b) 東向き流速 u (青線)・北向き流速 v (赤線), (c) 鉛直渦拡散係数 K_z . 実線は観測値, 破線はモデル結果を示す. (d) 全観測点における鉛直拡散係数の観測-モデル間比較.