

(別紙)

研究課題名

潮汐フロント域における乱流混合過程の研究

共同研究者名

吉江直樹（愛媛大学沿岸環境科学研究センター）、郭新宇（愛媛大学沿岸環境科学研究センター）、董孟洪（愛媛大学沿岸環境科学研究センター）、森本昭彦（愛媛大学沿岸環境科学研究センター）

研究目的

沿岸や大陸棚の海洋では、潮汐混合と浮力加入のバランスによって混合域と成層域が生じ、その境界の前線は潮汐フロントと呼ばれる。この潮汐フロント域では高いクロロフィル濃度が観測され、生物生産のホットスポットであることが知られている。既存の潮汐フロント理論では、形成要因の1つが鉛直混合であり、潮流が生じる海底摩擦起源の乱流がその生成機構である。しかし現実の潮汐フロント域の乱流過程については、海底摩擦のみでは説明できない現象が観測されている。例えば豊後水道の豊予海峡南部に形成される潮汐フロントでは、海底よりもむしろ表層で強い乱流混合が生じている。しかし、潮汐フロントで生じている乱流混合過程は明らかでなく、またそれが潮汐フロントの消長やフロント域の物質輸送に与える影響も不明である。本研究では、豊後水道をフィールドとして、潮汐フロント周辺で生じる乱流混合過程の実態の解明を目的とする。

研究方法

愛媛大学沿岸環境科学研究センター調査実習船「いさな」を利用し、豊後水道において乱流微細構造と流速の現場観測を実施した。潮汐フロントを横断する断面(測点 A03-A12)をとり、乱流微細構造プロファイラ（JFE アドバンテック社製 TurboMAP-5）と音響ドップラー流速計（ADCP）を用いた乱流と流動の調査及び多項目水質計（JFE アドバンテック社製 RINKO Profiler）を用いた CTD 観測を行った。ADCP はいさな搭載の RDI 社 300-

kHz WH Sentinel ADCP (計測層厚 2 m)に加え、CMES 所有の RDI 社 600-kHz WH Sentinel ADCP (計測層厚 0.5 m)を使用した。調査は 2022 年 5 月の 8 日から 10 日までの小潮期及び 15 日から 17 日までの大潮期に実施し、上げ潮・下げ潮のタイミングで CTD 観測を行い、潮時毎の潮汐フロントの構造を捉えるとともに、フロント周辺での集中的な乱流の調査を実施した。

研究成果

上げ潮・下げ潮時に合わせて実施した CTD 断面観測から、潮汐フロントは上げ潮時に北西に移流されその水温勾配が弱まる一方で、下げ潮時に南東に移流される際には水温勾配が強まる様子が捉えられた。これは Dong and Guo (2022) の豊後水道潮汐フロントに関する衛星水温データ解析結果及び数値実験結果と整合的である。5 月 15 日午後の下げ潮時には、混合域から成層域にかけての数百メートルで表層水温が約 2°C 上昇する潮汐フロントが A11 測点に形成されていた (図 1)。この下げ潮時の潮汐フロント域の流動について、混合域側ではフロントへの収束流が生じており、フロント上では混合域を右手に見てフロントに沿う地衡流的な流れが生じていた (図 2, 図 3a-c)。また、フロントでは混合域の冷水が 0.1 m s^{-1} に及ぶ強い下降流を伴って成層域の垂表層に潜り込むような流動となっていた (図 3d)。この垂表層上の暖水中では、不安定成層が生じており、乱流エネルギー散逸率が 10^{-6} から $10^{-5} \text{ W kg}^{-1}$ と著しい鉛直混合が生じていたことが示唆される (図 3f)。フロントにおける流動は鉛直シアを持つ流れであったが、Tidal Straining の観点からは成層を安定化させる流れであり、観測された不安定乱流はシア不安定に起因して生じたと推察された。

今後の課題

3 次元的な潮汐フロント域の流動と著しい乱流混合の発生が本研究により明らかにされたが、断片的な観測であり、潮汐フロント域における流動と不安定乱流の発生機構の解明には至っていない。この全容を明らかにするためには、今後、潮汐フロントの構造を 3 次元的に観測するとともに、高解像度の数値モデリングによって力学的に解釈する必要がある。

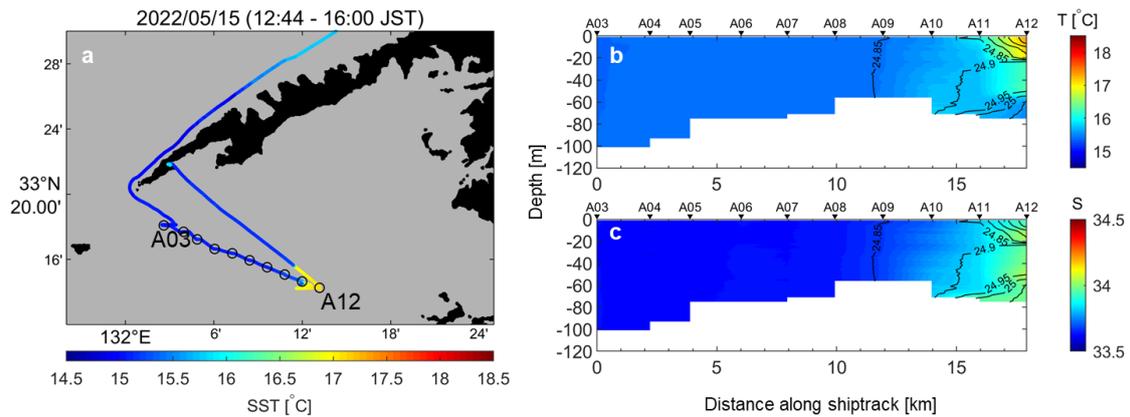


図1 2022年5月15日午後の下げ潮時（流れは南東方向）に実施したCTD観測結果。(a) いさな搭載の表層水温計で得られた航跡上の水温．丸印は観測点（北西のA03測点から南東のA12測点まで）を示す。(b) RINKO Profilerで得られた水温の鉛直断面。等値線は海水の密度（シグマティ）を示す。(c) 塩分の鉛直断面。

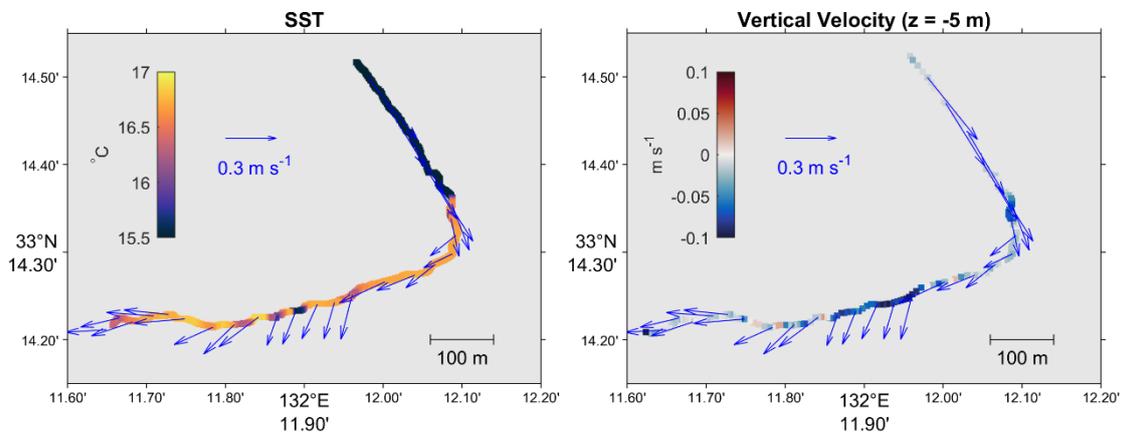


図2 A11測点付近の潮汐フロント上で実施した乱流観測時の調査船「いさな」の漂流航跡上の水温と流れ。(左図カラー)表層水温。(右図カラー)鉛直流速。両図の矢印は水平流速を示す。乱流観測はフロントの北側（混合域側）から開始し、初めはフロントに向かう南東方向の流れに乗って漂流したが、フロントに達した後はフロントに沿って流れに乗って西向きに漂流した。

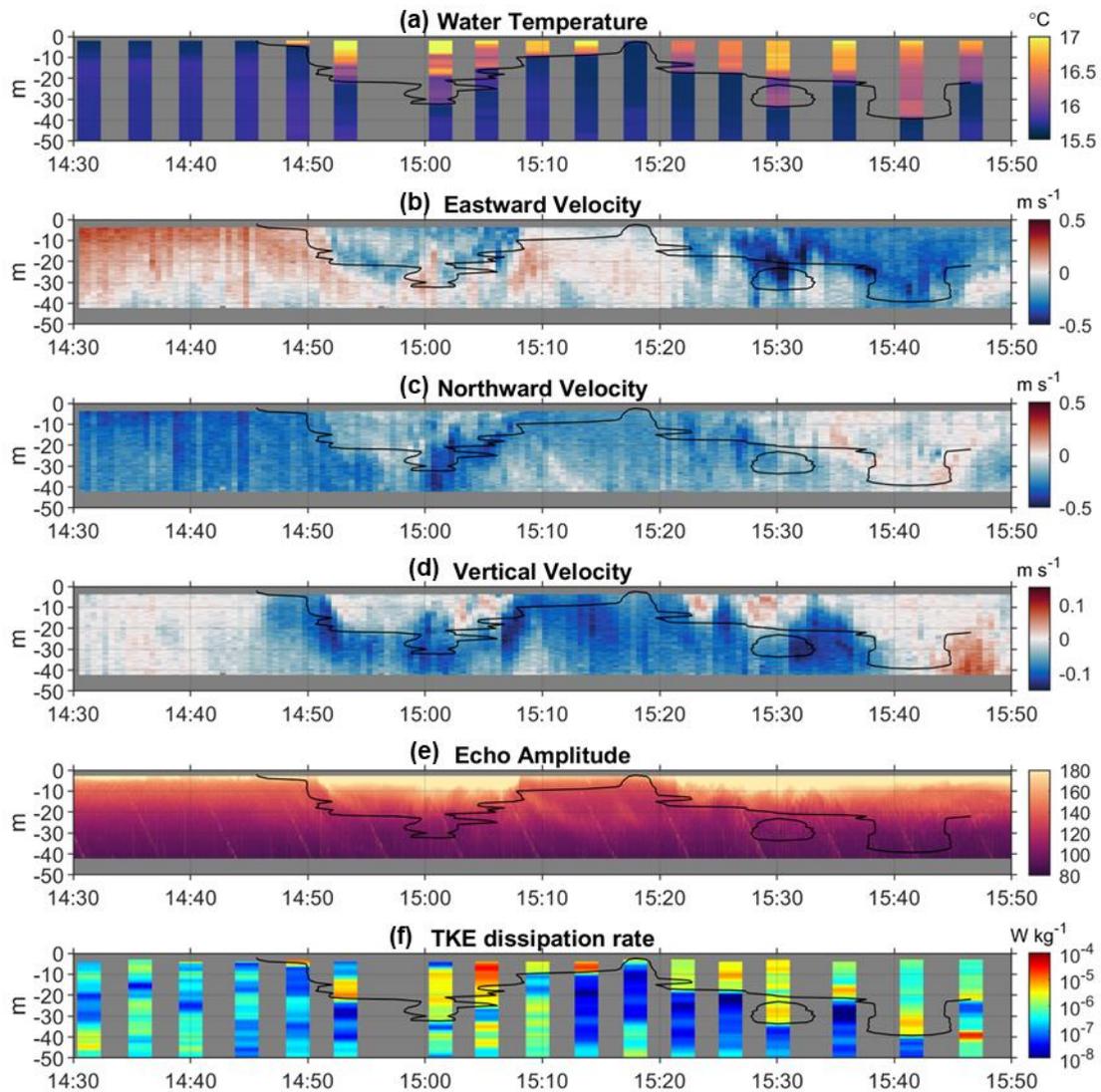


図3 2022年5月15日午後A11測点付近の潮汐フロント上で実施した水温、乱流、および流動の観測結果。(a) 水温 (b) 東西流速 (c) 南北流速 (d) 鉛直流速 (e) 音響散乱強度 (f) 乱流運動エネルギー散逸率。図の横軸は時刻、縦軸は深度を示す。流速に関しては600-kHz ADCPによる計測結果を示す。各図中の実線は潮汐フロントの指標となる15.9°Cの等温線を表す。14:30頃にフロントの北側から乱流観測を開始、フロント方向へ漂流し14:50頃フロントに到着、以降15:50頃までフロントに沿って観測を行った(図2)。