

論文内容の要旨

Evaluation of turbulent mixing associated with tidally induced eddies in the Bungo Channel and its impact on sporadic Kuroshio-water intrusion (*kyucho*)

(潮汐起源の渦に伴う豊後水道内の乱流混合の定量化と その急潮現象に果たす役割の評価)

永井 平

1 背景

瀬戸内海と太平洋とをつなぐ豊後水道の東岸では、黒潮起源の暖水塊が沿岸密度流として北上し、海域内の海況が短時間内に急変する「急潮現象」が発生することが古くから知られている。特に、豊後水道東岸の宇和島湾では、急潮に伴う水温上昇が最大で $5^{\circ}\text{C}/\text{day}$ にも達し、周辺の養殖業に甚大な被害を与えることが報告されている。

豊後水道内における急潮現象の発生時期は夏季の小潮時に集中しており、その顕著な周期性から冬季や大潮時に強化される鉛直混合との関連性が指摘されている (Takeoka et al., 1993)。しかし、これまで豊後水道内における鉛直混合強度の見積もりは行われておらず、その時空間分布はおろか、オーダーすらわかっていないのが現状である。

そこで、本研究では乱流直接観測と数値モデルの両面から豊後水道内における潮汐起源の乱流混合強度の定量化を図るとともに、得られた乱流混合場の情報を反映させた急潮再現実験を行うことで、豊後水道内における急潮の発生 / 抑制の物理機構を議論した。

2 豊後水道内における乱流混合強度の定量化

2.1 豊後水道内における乱流直接観測

2.1.1 観測概要

2012年8月20日(大潮)と9月10日(小潮)、愛媛大学沿岸環境科学センターの協力の下、豊後水道内の宇和島市日振島沖 ($132.210^{\circ} \sim 132.251^{\circ}\text{E}$, 33.175°N) の5点 (S1~S5) で、浅海用乱流計 TurboMAP5 (九州大学応用力学研究所所有) を使用した合計60キャストの乱流観測を行った。鉛直混合強度の指標である鉛直拡散係数 K_V は、乱流観測から得られたエネルギー散逸率 ϵ と成層強度 N を Osborn (1980) の式

$$K_V = \Gamma \frac{\epsilon}{N^2}$$

に代入することにより見積もった。ここで、混合効率 $\Gamma = 0.2$ とした。

2.1.2 結果

乱流観測から得られた鉛直拡散係数を図1に示す。大潮時には、日振島に近い測点 S4, S5 で $K_V \sim 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ に達するような非常に強い鉛直混合が観測された。観測した5点における鉛直拡散係数の平均値は大潮の上げ潮時で $K_{V \text{ MEAN}} \sim 9.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 下げ潮時で $\sim 9.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, また、小潮の上げ潮時で $\sim 1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 下げ潮時で $\sim 0.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ となり、大潮時と小潮時でおよそ1オーダーの隔たりがあることが明らかになった。

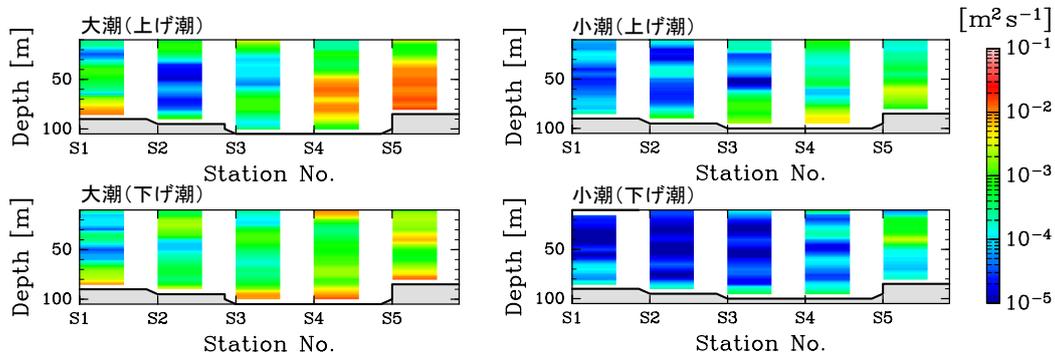


図1: 豊後水道内における鉛直拡散係数の観測値。

2.2 高解像度数値モデルを用いた豊後水道内の乱流混合強度の見積もり

豊後水道内で観測された強い乱流混合の発生機構を調べるため、上述の観測結果をもとに高解像度、非静力モデルを用いた潮汐混合のシミュレーション実験を行った。

2.2.1 数値モデル

本研究では MITgcm を用いて数値実験を行った。支配方程式はブシネスク近似を施した回転系の三次元非静水圧 (Navier-Stokes) 方程式である。潮汐混合過程を再現するため、計算領域は急潮が発生する豊後水道東岸のみとし、水平解像度は $\sim 100 \text{ m}$, 鉛直解像度は 3 m とした。水平境界条件として、別途順圧潮汐モデルを用いて計算した海面変位と水平流速を与えた。初期条件として、上述の観測から得られた温度、塩分場を理想化したものを設定し、大潮、小潮それぞれのケースについて観測日を含む4潮汐周期(1潮汐周期 = 12.41時間)にわたる計算を行った。

2.2.2 結果

数値実験から得られたエネルギー散逸率をそれぞれの潮時において観測値と比較した結果、その違いは最大でも3倍程度に収まっていたことから、本数値実験の乱流場の再現性が確認された。図2に下げ潮時における水深平均のエネルギー散逸率と順圧流速を示す。大潮時には潮汐流の風下側の島陰に旋衡風バランスを満たす直径 1 km 程度の小規模渦が発生し、その付近で特に大きなエネルギー散逸が見られる。このことから、豊後水道東岸の複雑な海岸地形と潮流との相互作用により励起された小規模渦が豊後水道東岸に強い混合域を形成していると考えられる。この多島海域において流速場に対し潮汐平均(25時間平均)を施すと、直径 5 km 以下の「潮汐残差流渦」が見られるが、これによって強化される「水平混合過程」も、急潮の抑制過程にとって重要な役割を果たす可能性がある。この潮汐残差流渦は従来の解像度 1 km 程度の数値モデルでは満足に再現できない。

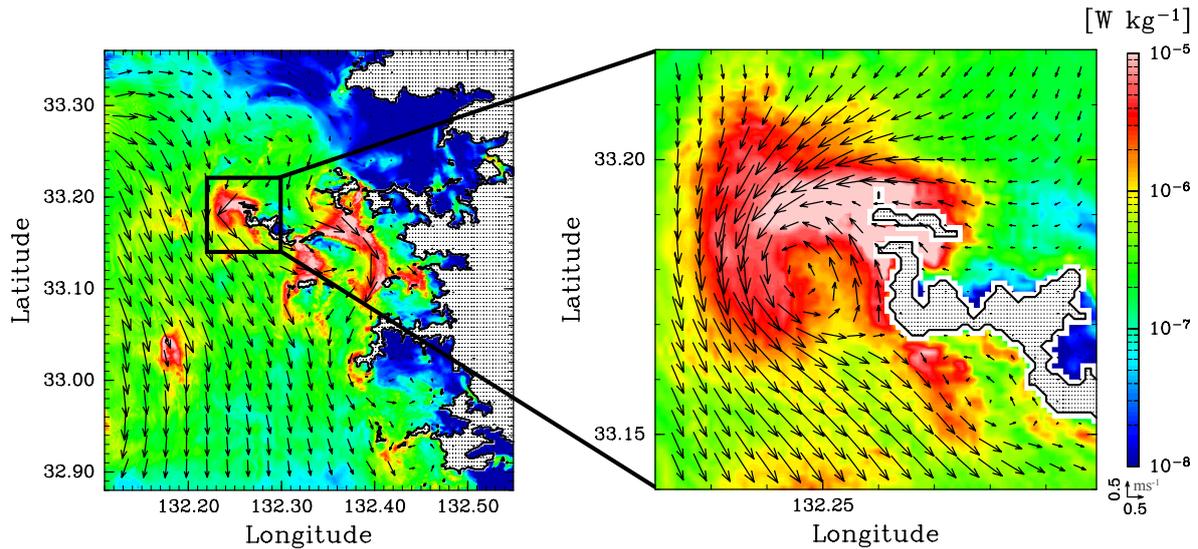


図 2: 大潮の下げ潮時における水深平均のエネルギー散逸率（色）と順圧流速（矢印）。

3 急潮再現実験

第 2 節において再現された鉛直混合や潮汐残差流渦が急潮に与える影響を調べるために、上述の数値モデルを用い「急潮再現実験」を行った。ただし、急潮（密度流）を発生させるため、豊後水道南部の表層 48 m の水温を 30 に緩和した。小潮時と大潮時、それぞれのケースについて 9 日間の計算を行った。

3.1 結果

図 3 a, b はそれぞれ小潮時、大潮時の「急潮再現実験」から得られた、計算開始 8 日後の海面水温・流速（潮汐平均場）である。大潮時には暖水は複雑な海岸地形を持つ豊後水道東岸を通り抜けることができないのに対して、小潮時には暖水が強い流速を伴いながら、豊後水道東岸を北上し、宇和島湾に侵入していく急潮現象が再現された。また、宇和海において、小潮時（青実線）には半日の間に 2 程度の急激な水温上昇がみられるが、大潮時（赤実線）にはそのような水温上昇は見られなかった（図 4）。ここで、豊後水道東岸において、小潮時、大潮時それぞれの南北傾圧流速、水温についての力学バランスを調べたところ、大潮時に暖水の北上が妨げられる物理的要因として、これまでの先行研究で指摘されていた「鉛直渦粘性・渦拡散」の効果に加えて、「潮汐残差流渦による水平移流」の効果の重要性が示唆される結果となった。この直径 5 km 以下のスケールの「潮汐残差流渦による水平移流」は、内部変形半径 5–7 km の空間スケールを持つ密度流にとって「水平渦粘性・渦拡散」と同等の働きをすると考えられる。

次に、大潮時に急潮が抑制される物理機構をより直接的に調べるために、潮汐流により強められた鉛直渦粘性・渦拡散係数をパラメタライズし、潮汐流の代わりに数値モデルに組み込んだ「鉛直混合実験」と、鉛直渦粘性・渦拡散係数に加えてさらに潮汐残差流を組み込んだ「鉛直混合+残差流実験」とを行った。実験の結果、「鉛直混合実験」では暖水塊の北上は完全には抑制されず（図 3c）、宇和海にまで暖水が到達する（図 4 黒破線）のに対し、「鉛直混合+残差流実験」では暖水塊の北上が抑制され（図 3d）、宇和海では大潮時の「急潮再現実験」と同様な水温上昇が再現される結果となった（図 4 黒実線）。このことから、急潮を抑制する物理機構として、これまで指摘されてきた鉛直混合のみならず、豊後水道東岸で活発に励起される潮汐残差流渦による水平混合の効果も重要であることが明らかになった。

4 まとめ

本研究では豊後水道内の乱流混合の定量化とその急潮現象に果たす役割の評価を行った。

豊後水道内における初の乱流直接観測を行った結果、大潮時の鉛直拡散係数は平均で約 $10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ であり、小潮時よりも1オーダー程度大きな値であることが明らかになった。乱流直接観測から得られた情報をもとに、潮汐混合を陽に再現した高解像度数値実験を行った結果、複雑な海岸地形の存在する豊後水道東岸において、潮汐流の風下側の島陰に発生する小規模渦が鉛直混合過程に大きく寄与すること、そして潮汐残差流渦が活発に励起されることが明らかになった。

これらの鉛直混合や潮汐残差流渦の効果を分離した数値実験を行った結果、これまで急潮の発生機構として重要であると考えられてきた鉛直混合を考慮するだけでは急潮を再現することはできず、鉛直混合に加えて、潮汐残差流渦に伴う水平混合過程をモデルに組み込むことで初めてその再現が可能となることが明らかになった。この結果は、リアス式海岸や多島海域などの複雑な地形を持つ沿岸海域における海水交換過程を議論する際はもちろん、より大規模な海洋循環のモデリング時においても、乱流直接観測から得られたマイクロスケールの情報をフィードバックするとともに、潮汐残差流渦などのサブメソスケールの現象を考慮しなければならないことを強く示している。

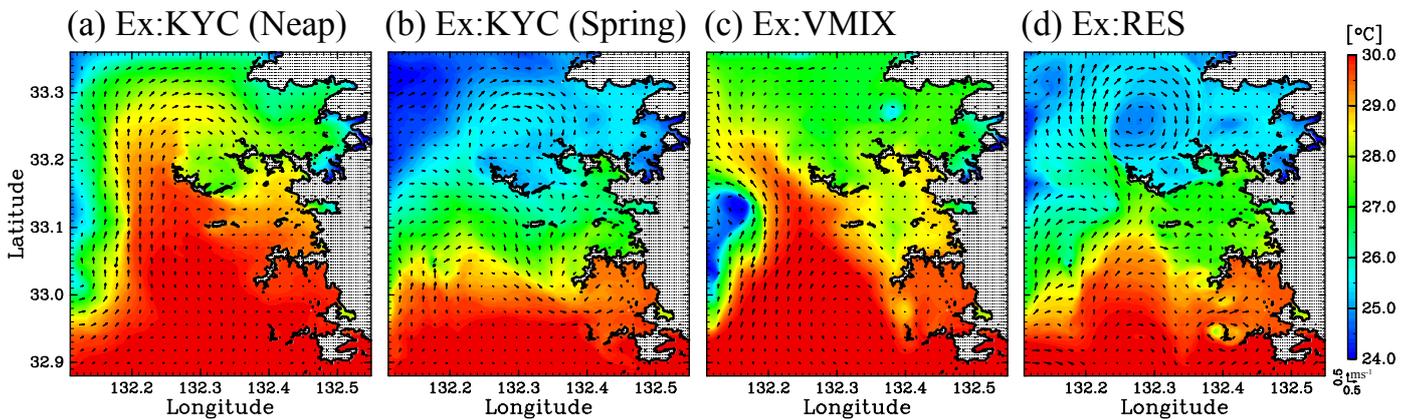


図 3: 計算開始から 8 日後における潮汐平均の海面水温 (色) と海面流速 (矢印) (a:「急潮再現実験 (Ex:KYC)」(小潮時), b:「急潮再現実験 (Ex:KYC)」(大潮時) c:「鉛直混合実験 (Ex:VMIX)」, d:「鉛直混合+残差流実験 (Ex:RES)」)。

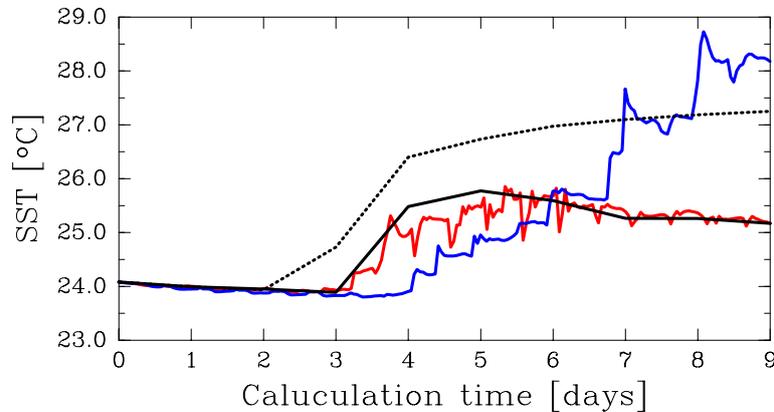


図 4: 各実験から得られた、宇和海 (33.21°N, 132.46°E) における表層水温の時系列 (青実線:「急潮再現実験」(小潮時), 赤実線:「急潮再現実験」(大潮時), 黒実線:「鉛直混合実験」, 黒実線:「鉛直混合+残差流実験」)。