

# 国際活動報告：インドネシア多島海における乱流直接観測

東京大学大学院理学系研究科 日比谷 紀之（報告者）  
インドネシア技術評価応用庁（BPPT） Fadli Syamsudin  
東京大学大学院理学系研究科 永井平

## 1. 要旨

インドネシア多島海における潮汐混合が世界気候に果たしている役割を解明するため、前年度に引き続き、2019年8月6日から8月17日の間、インドネシア多島海西部海域（スラウェシ海、マカッサル海峡周辺海域）において、海面から海底直上までの乱流集中観測を実施した。

観測は、共同研究を行っている Fadli Syamsudin 博士が所属しているインドネシア技術評価応用庁（BPPT）所属の研究船「Baruna Jaya IV」を利用し、ビトゥンからマカッサルまでを結ぶ測線上に設定した観測点 29 点において、深海乱流計（VMP-5500）および投下式乱流計（VMP-X）、投下式水温・塩分計（XCTD）、吊下式音響ドップラー流速計（LADCP）による観測を実施した。

## 2. 研究の背景

世界で最も高い海面水温を持つインドネシア多島海は、その真上に熱帯域の大気大循環の心臓部ともいえる深い対流を発達させることで、グローバルな気候を強くコントロールしている。これまでの研究から、潮汐流により発生する鉛直混合（「潮汐混合」）がこのインドネシア多島海の海面水温に大きく影響することが示唆されてきた（Kida and Wijffels, 2012; Koch-Larrouy et al., 2010）。一方、潮汐混合はインドネシア通過流（ITF）の水塊変質にも影響することが知られている（Koch-Larrouy et al., 2007）。この変質された低温・低塩分の水塊はインド洋へ流出し、アガラス海流やルーイン海流などの大規模な海洋循環に影響を与える。このように、インドネシア多島海における潮汐混合強度分布の定量化は大気海洋循環の予測にとって不可欠な課題である。しかしながら、同海域においては、乱流直接観測はこれまでにほとんど実施されておらず、潮汐混合強度分布は未解明

なまま残されてきた。

## 3. 研究計画・作業仮説・方法

本調査では、インドネシア多島海域を対象とした数値シミュレーション（Nagai and Hibiya, 2015）によって存在が予測されている「乱流ホットスポット」を中心に深海乱流計（VMP-5500/VMP-X）を投入することにより、長年謎であったインドネシア多島海における乱流混合の定量的な把握を行った。さらに、CTD・LADCP による観測を同時に行うことで、鉛直乱流混合によって ITF の水塊特性が変成していく実態を明らかにし、インドネシア通過流の再現に鍵となる海域を明らかにした。対象海域は、スラウェシ海・マカッサル海峡とし、ビトゥンからマカッサルまでを結ぶ測線上の 29 点（図 1）で観測を実施した。また、数値モデルで大きな乱流混合とその時間変動が予測されている海峡部においては、乱流混合をはじめ、ITF、潮汐流、密度成層、鉛直シアなどの各物理パラメータの時間変動を明らかにするため、25 時間の時系列観測を実施した。

## 4. 成果

図 1 に各乱流観測点におけるエネルギー散逸率の全水深積分値を示す。これより、乱流ホットスポットが Sangihe 諸島や Labani 水道などの狭窄部に局所的に存在することが初めて直接観測により示された。

次に、各観測点におけるエネルギー散逸率（ $\varepsilon$ ）と浮力振動数（ $N$ ）より鉛直拡散係数（ $K_v = 0.2 \varepsilon / N^2$ ）を計算した（図 2）。ここでも、Sangihe 諸島および Labani 水道で  $K_v \sim 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  に達する非常に強い混合が観測された。Sangihe 諸島では、流速/密度擾乱が 24 時間周期変動を持っていたことから、混合が日周期の潮汐により強化されていることが推察される。一方、Labani 水道では、擾乱に顕著な周期性

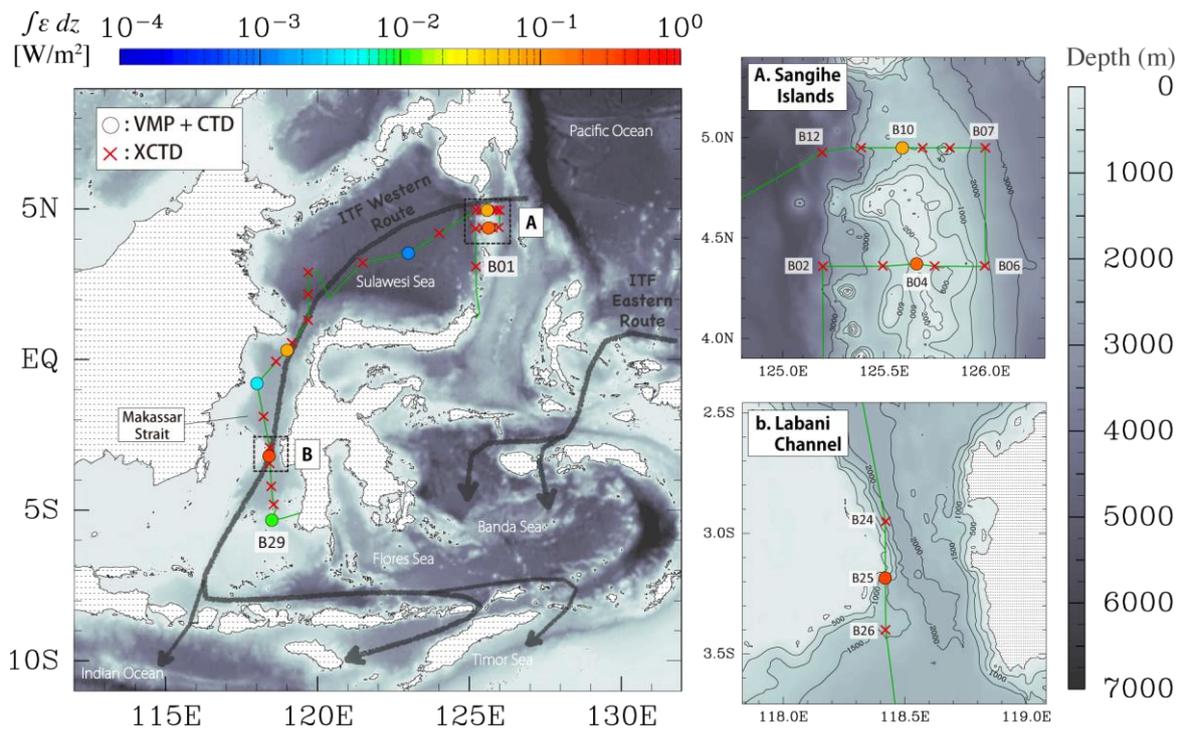


図1 観測点 (丸印 : 乱流観測点、X 印 : XCTD 観測点)。図中のカラーは乱流観測で得られたエネルギー散逸率 ( $\varepsilon$ ) を全水深積分した値を示す。

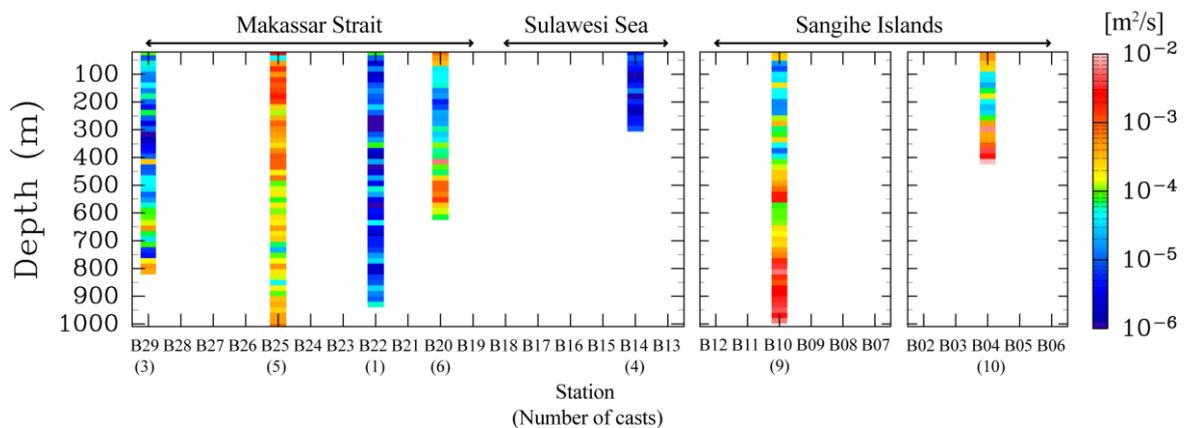


図2 乱流観測から得られた、各観測点における平均の鉛直拡散係数の鉛直プロファイル。観測点名の下  
の数字は乱流観測のキャスト数を表す。

が見られなかった。その一方で、上層部においてインドネシア通過流に伴う非常に強い平均流シアが観測された。このことから Labani 水道では、潮汐流ではなく、インドネシア通過流の強いシアに起因する混合が支配的であることが推察される。これらの観測結果に関しては今後詳細に解析していきたい。

図3に水温塩分図を示す。インドネシア通過流の入り口である B07 では、塩分極大で特徴付けられる NPTW (北太平洋回帰線水) および塩分極小で特徴付けられる NPIW (北太平洋中層水) などが明確に確認できる。そして、これらの水塊の特徴が下流側に向かうにつれて、大きく変質していることがわか

る。特に、上層で大きな混合が観測された Labani 水道では、B24 と B25 の間のわずか 20 km の間で著しい水塊変質が引き起こされていた。このことは、インドネシア多島海における水塊変質が非常に局所的に発生している可能性を示唆するものである。今後、このような局所的な水塊変質の物理メカニズムについても考察を進めていきたい。

## 5. 謝辞

本研究は、新学術領域研究「海洋混合学の創設 (OMIX)」プロジェクトの一環として実行された。OMIX 代表の安田一郎教授に厚く感謝申し上げます。また、Baruna Jaya IV に乗船し観測を手伝ってくれた柳町隆裕氏、田沼夏美氏、観測機器の輸送や諸手続きに尽力して下さった吉山里佳氏に厚く感謝申し上げます。

## 6. 引用文献

1. Kida, S., and S. Wijffels (2012), The impact of the Indonesian Throughflow and tidal mixing on the

summertime sea surface temperature in the western Indonesian Seas, *J. Geophys. Res.*, 117, doi:10.1029/2012JC008162.

2. Koch-Larrouy, A., G. Madec, P. Bouruet-Aubertot, T. Gerkema, L. Bessieres, and R. Molcard (2007), On the transformation of Pacific Water into Indonesian Throughflow Water by internal tidal mixing, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L04604, doi:10.1029/2006GL028405.
3. Koch-Larrouy, A., M. Lengaigne, P. Terray, G. Madec, and S. Masson (2010), Tidal mixing in the Indonesian Seas and its effect on the tropical climate system, *Clim. Dyn.*, 34, 891–904, doi: 10.1007/s00382-009-0642-4.
4. Nagai, T., and T. Hibiya (2015), Internal tides and associated vertical mixing in the Indonesian Archipelago, *J. Geophys. Res.*, 120, 3373–3390, doi:10.1002/2014JC010592.

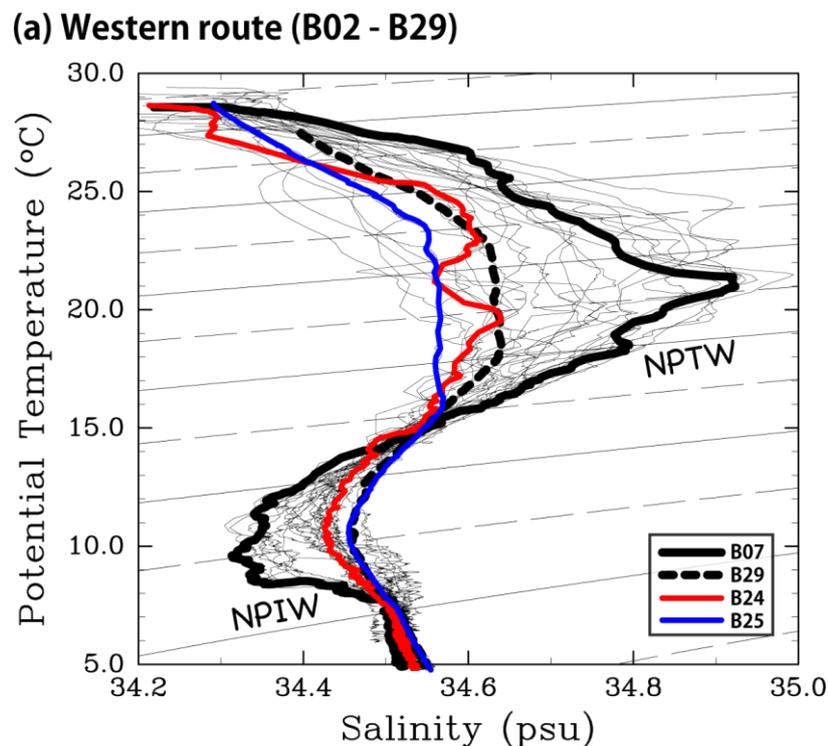


図3 各観測点における水温・塩分プロット。塩分極大は北太平洋回帰線水(NPDW)、塩分極小は北太平洋中層水(NPIW)を表す。

## 7. 成果論文

1. Syamsudin, F., N. Taniguchi, C. Zhang, A.D. Hanifa, G. Li, M. Chen, H. Mutsuda, Z. Zhu, X. Zhu, T. Nagai, and A. Kaneko (2019), Observing Internal Solitary Waves in the Lombok Strait by Coastal Acoustic Tomography, *Geophys. Res. Lett.*, doi.org/10.1029/2019GL084595.