

海洋表面波が引き起こす乱流の観測  
Observational Study on Turbulence Induced by Ocean Surface Waves

○吉川裕・馬場康之・久保輝広・本田卓也・今村春香・吉川浩一朗

○Yutaka YOSHIKAWA, Yasuyuki BABA, Teruhiro KUBO, Takuya HONDA, Haruka IMAMURA,  
Koichiro KIKKAWA

Several features of wave-induced turbulence in the ocean surface boundary layer (OSBL) remain unquantified, despite its large potential impacts on sea surface temperature variations. Here we deployed an ADCP near the observation tower of Shirahama Oceanographic Observatory to measure turbulence (kinetic energy dissipation rates,  $\epsilon$ ) in the OSBL, and its intensities were compared with turbulence due to wind and waves measured at the tower. Our data in July 2020 show relatively high ( $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ )  $\epsilon$  nevertheless of calm wind (less than 0.5 m/s in speed). The data indicate turbulence generated by secondary circulations generated by interaction between surface waves and wind- and/or wave's attenuation-induced shear flows.

### 1. はじめに

海面近くで発生する海洋中の乱流は、海水を掻き混ぜることで鉛直に一樣な層を形成する。日射や蒸発による海面加熱・冷却による水温変化は、この混合層と呼ばれる鉛直一樣な層全体で生じる。混合層が深い（浅い）と変化する水の量が増える（減る）ため、水温変化量は混合層深度に依存する。海面水温は大気・海洋間の熱フラックスを規定し、台風などの気象や温暖化などの気候変動にも影響することから、海洋表層の乱流の生成要因を正確に理解し、混合層深度を精確に見積もることが、海面水温の推定・再現精度を高め、相互に作用する大気・海洋現象、例えば台風の予測精度の向上に繋がる。

近年の観測や実験により、砕波しない水面波が強い混合を引き起こすことが指摘されている（例えば D' Asaro 2014, Yoshikawa et al. 2018）。吹送流と水面波の相互作用で生じるラングミュア循環に伴う混合（e.g., McWilliams et al. 1997）はその代表的なものである。一方、室内実験での観測をもとに、非砕波混合（e.g., Qiao et al. 2004; Babanin 2006）と呼ばれる、風が無くても波単独で生じる乱流も混合要因として提唱されている（Qiao et al. 2004; Babanin 2006）。ラングミュア混合と非砕波混合の形成機構はこれまで別々として考えられてきたが、我々の数値実験（Imamura et al. 2023）の結果、どちらもシア一流と水面波の相互作用による渦度の生成で説明

可能であること、両者の違いはシア一流の生成要因（前者は風応力、後者は波の摩擦減衰による応力（仮想波応力））であることが明らかになっている。

一般に仮想波応力は風応力に比べて無視できるほど小さいと考えられるが、この応力を波の減衰による波から平均流への運動量輸送（波減衰応力）と捉えるなら、その影響は必ずしも小さいとは言えない可能性がある。なぜなら、風の直下の波生成域で波から平均流に輸送される運動量（風応力）に対して、生成域から遠くに伝播・減衰することで波が平均流に渡す運動量（減衰波応力）は、総量としては無視できないと考えられるからである。

以上のように、水面波が関わる海洋表層での乱流混合は、徐々に明らかにされつつあるものの、波の減衰の影響など、実態に不明な点も多い。海洋表層の乱流の生成要因を明らかにするためには、水面波や風など乱流生成要因と乱流強度を現場観測し、両者の関係を整理する必要がある。そこで、防災研究所白浜観測所の観測塔周辺海域で観測を実施した。本講演ではその初期成果を報告する。

### 2. 観測の概要

観測塔近くの水深約 10m の海底に音響ドップラ一流速計（TRDI, Sentinel-V 1000）を 2019 年 12 月に設置し、水面から水深約 8m までの流速を 8Hz で常時計測した。計測された流速データの品質管理を行った後、それぞれの視線流速のエネルギー

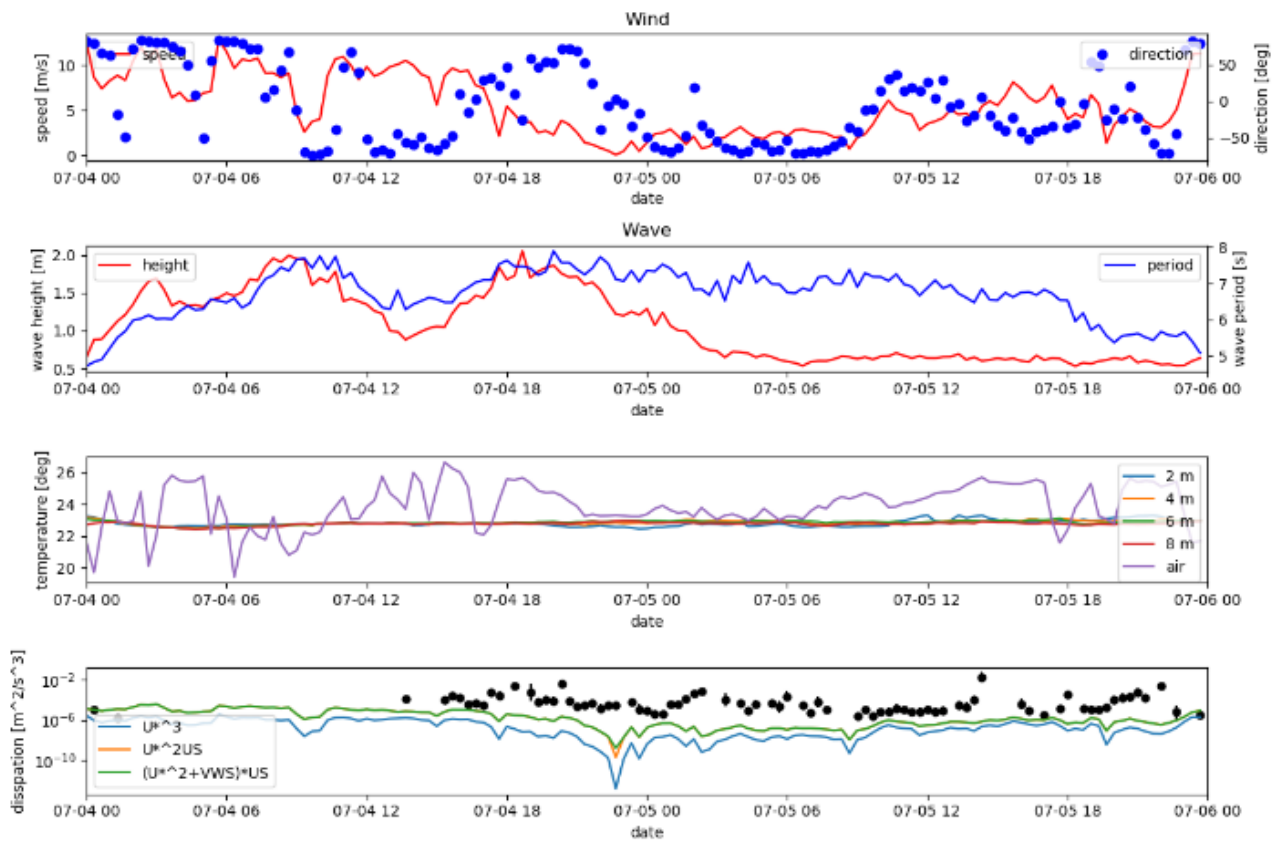


図1 上段：風向（青）・風速（赤）。上中段：有義波高（赤）・有義波周期（青）。下中段：気温（紫）・水温（紫以外）。下段：水深4.3mでの乱流エネルギー散逸率（黒点）・ $U_*^3/k|z|, U_*^2 U_S/H, (U_*^2 + VWS)U_S/H$ （青、橙、緑）。横軸はいずれも時間。

スペクトルを20分毎に計算し、慣性小領域におけるスペクトル形状から乱流エネルギー散逸率を各深度で評価した。また、観測塔で常時計測している風速（SONIC, SAT-550）、気温、水温（JFE Advantec, DEFI2、設置水深は2, 4, 6, 8m）を20分毎に平均し、20分毎に記録されている有義波高、有義波周期とともに、活用した。

### 3. 結果

本講演では、海面が冷却されていない夏季のデータの代表例として、2020年7月4日～6日のデータを紹介します。図1は同期間における風、有義波、気温・水温、そして超音波流速計から見積もられた水深4.3mでの乱流エネルギー散逸率（ $\epsilon$ ）の時系列である。例えば7/4 22:00-23:00においては、20m平均風速は0.51m/s以下、有義波高は1.2m以上、水温は鉛直にほぼ一様で、気温の方がやや高く、 $\epsilon$ の値は $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ であった。 $\epsilon$ の値は海面に近いほど大きく、乱流の生成要因は海面にあることが示唆された。風応力と中立成層時の壁法則から推定される $\epsilon$ （ $U_*^3/k|z|$ 、 $U_*$ は

風応力から求まる水側の摩擦速度、 $k$ はカルマン定数、 $z$ は深度）の値（図1下の青線）はこの時期急激に減少していることから、風が乱流の生成要因とは考えにくい。実際、ラングミュア循環による $\epsilon$ の指標である $U_*^2 U_S/H$ （ $U_S$ はストークス速度、 $H$ は水深）の値（図1下の橙線）は、風成乱流よりは減少幅が小さく、ラングミュア循環の寄与を示唆している。さらに有義波から推定した仮想摩擦応力を風応力に加えて同様に推定した $\epsilon$ （ $(U_*^2 + VWS)/H$ ）の値（図1下の緑線）は、ラングミュア循環の指標よりさらに減少が小さくなっており、波の減衰に伴うシア一流の生成も寄与している可能性を示唆する結果であった。より大きな問題は、いずれの推定値も実測された乱流エネルギー散逸率を過小評価しており、一部の期間においては時間変化の傾向も一致していないことである。今回は風応力をバルク式、ストークス速度や波減衰を有義波のデータより簡易に求めたが、これらの値をより精度よく推定し、解析を行う必要がある。また、観測を継続し、データ数を増やす必要がある。これらは今後の課題である。