C109

夏季田辺湾における混合層深度と乱流強度に水面波が及ぼす影響
Influence of the Ocean Surface Waves on the Mixed Layer Depth and Turbulence in Summer Tanabe Bay

○吉川浩一朗・吉川裕・馬場康之・久保輝広
○Koichiro KIKKAWA, Yutaka YOSHIKAWA, Yasuyuki BABA, Teruhiro KUBO

The effects of the wave-induced Langmuir turbulence on the ocean surface mixed layer depth and the turbulent intensity remain unquantified, especially under the surface heating. We deployed an ADCP near the observation tower of Shirahama Oceanographic Observatory and temperature loggers to the ladder of the tower below the water surface to measure the turbulent kinetic energy dissipation rate ε and the mixed layer depth (MLD). Our data show that the dissipation rate ε under surface heating and weak wave forcing deviates from the scaling proposed in the previous studies on the atmospheric boundary layer. Some parts of the MLD under the same conditions are found to be roughly scaled with the length scale including the Coriolis parameter f, which suggests that the dissipation rate ε could be affected by the Earth's rotation.

１．はじめに

海洋表層には，乱流が混合を引き起こすことで水温などが鉛直一様化された混合層が存在する。この混合層全体で混合が引き起こされるため，混合層が深い(浅い)ほど，水温変化は小さい(大きい)。そのため，海面水温やそれに影響を受ける大気現象の予測には，混合層深度や，混合層を形成する乱流の強度の正確な見積もりが不可欠である。

海面加熱時の混合層では，風によってシアー乱流が，水面波(以下，単に波と呼ぶ)によってラングミュア乱流が駆動され，海面加熱が乱流を抑制する。この風，波，熱の 3 つの強制力のうち，風と熱は大気境界層と共通の強制力であることから，比較的理解が進んでいる(例えば Wyngaard and Coté 1971)。

一方で，風と熱だけを取り入れた海洋大循環モデルでは，特に夏季において混合層深度を過小評価する傾向があり，海洋に特有である波(ラングミュア乱流)が海面加熱時に混合層を深めている可能性があることが指摘されている(Belcher et al.2012)。

しかし，我々の数値実験(Kikkawa 2023 修士論文)の結果では，ラングミュア乱流による混合層の深化が，強い海面加熱によって抑制されること，風と熱で作られる混合層深度に対する波長の比に依存性を持つことが示されている。また，海面加熱時におけるラングミュア乱流の数値実験や観測は少ないため，海面加熱時における乱流強度(乱流運動エネルギー散逸率ε)の波強制力への依存性は不明である。

以上から，海面加熱時において，ラングミュア乱流が混合層を実際にどれだけ深めているのか，そして散逸率εがどのような強制力依存性を持つのかを，現場観測によって明らかにする必要がある。そのため本研究では，防災研究所白浜気象観測所の観測塔(田辺中島高潮観測塔)周辺海域で，乱流と水温の観測を行った。

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ー流速計(TRDI, Sentinel-V 1000)を設置し，水面から水深約 8m までの流速を 8Hz で常時計測した。設置期間は 2023/07/25-2024/11/25 である。流速から得られるエネルギースペクトルを用いて，散逸率εを 20 分ごとに各深度で求めた。

観測塔側面の水面下に附設された梯子に水温計(MX2203)を設置し，水温の観測を行った。平均水深が0.75mから4.75mまでの深さを0.5m毎に 1 つずつ設置し，水深4.0mの位置にも 1 つ設置した(計 10 台)。計測した水温の鉛直分布から，混合層深度(MLD)を計算した。

これらのデータに加えて，観測塔の常時計測データ(風速，気温，湿度，海面水温)も利用した。

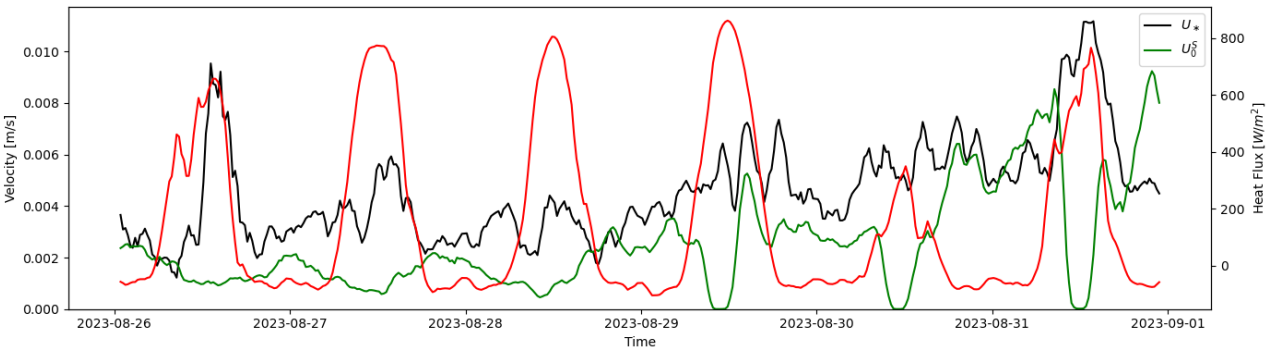

図 1：各強制力の時系列。黒は風摩擦速度U_* [m/s]，緑は海面ストークスドリフト速度U_0^S [m/s]，赤は熱フラックスQ[W/m^2]である。期間は 2023 年 8 月 26 日から 2023 年 8 月 31 日。

3．結果・今後の課題

データの例として，2023 年 8 月 26 日から 2023 年 8 月 31 日までのデータを紹介する。この期間は日中の海面加熱が強く，波強制力が弱かった(図 1)。

この期間において，Monin-Obukhov 長で規格化した水深z/L_{MO}と，風強制力から見積もられる散逸率で無次元化した散逸率$\varepsilon\kappa|z|/U_*^3$の関係を調べた(図 2。$L_{MO}=-U_*^3/\kappa B_0$，$U_*$は風摩擦速度，$\kappa=0.4$はカルマン定数，$B_0$は浮力加速度フラックス，$z$は水深)。観測された散逸率は，Monin-Obukhov 長よりも浅い場所において，大気境界層についての先行研究 (Wyngaard and Coté 1971，Edson and Fairall 1998)で提案された関係式とは異なる水深依存性を持つことが分かった。これは，外洋の係留観測(Miller et al.2023)と同様の結果である。ここから，波強制が弱い海洋表層混合層であっても，散逸率εの強制力依存性が大気境界層とは異なる可能性が示唆された。

さらに 2023 年 8 月 27 日の水温と MLD の時間変化を調べると，MLD の観測値が，風強制，熱強制とコリオリパラメータでスケーリングされる混合層深度D_{wind}とある程度整合しており，これは Yoshikawa 2015 などの数値実験結果と一致する(図 3)。ただし観測値はD_{wind}に対してラグをもって変化しているようであり，このラグは強制力への応答にかかる時間であると考えられる。

以上から，海面加熱時における海洋表層混合層内のεにも，コリオリパラメータが関係する可能性がある。これらの関係をさらに整理し，波強制が弱いときのεのスケーリング則を新たに提案すること，そして波強制力によって，そこからどのように変化するかを調べることが次の課題である。

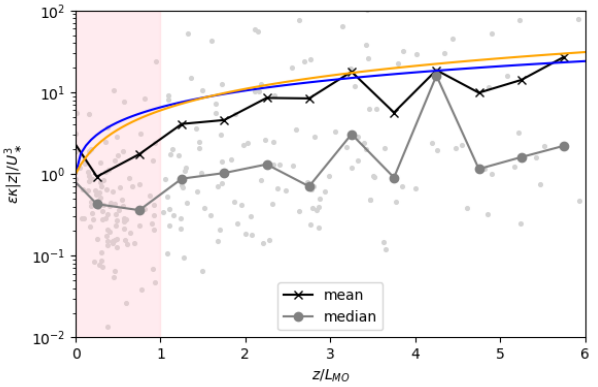

図 2：規格化した水深z/L_{MO}に対する，無次元化した散逸率$\varepsilon\kappa|z|/U_*^3$の依存性。黒実線は bin 内での平均値，灰実線は中央値である。青と橙はそれぞれ Wyngaard and Coté 1971，Edson and Fairall 1998 で提案されたスケーリングである。ピンク色の領域$z/L_{MO}<1$は，Monin-Obukhov 層内にあたる。

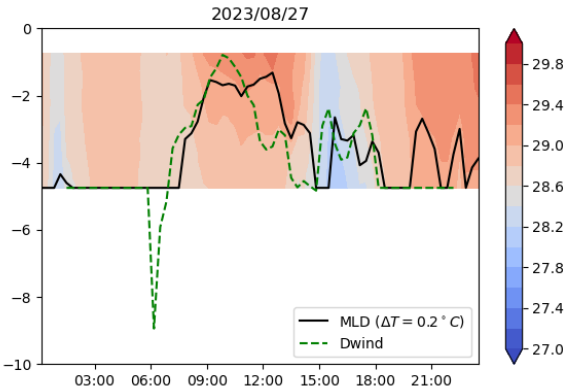

図 3：2023 年 8 月 27 日の水温の時系列。横軸は時間，縦軸は水深である。黒実線は MLD，緑の点線は強制力から見積もられたD_{wind}である。MLD は，最上部の水温計の位置($z=-0.75$m)の水温から 0.2℃小さい水温となる深さで定義した。