

ラングミュア乱流の観測 Observation of Langmuir Turbulence

○吉川 裕・馬場 康之・水谷 英朗・久保 輝広

○Yutaka YOSHIKAWA, Yasuhiro BABA, Hideaki MIZUTANI, Teruhiro KUBO

Langmuir turbulence, considered as an energetic source of mixing near the ocean surface, is not well quantified by in-situ observations. Here we measured turbulent velocity near the surface with ADCPs deployed at the Tanabe-Nakashima observation tower of Shirahama Oceanographic Observatory in November of 2014 and 2015. Strong (≤ 4 cm/s) up/downward velocity, accompanying with coherent streak patterns of horizontal velocities of a few 10 m width, was observed. In 2014, such strong vertical velocities were observed mostly in Langmuir favorable conditions based on wind, surface heat flux, and surface waves. Observed vertical velocity is well scaled with theoretically predicted velocity of Langmuir turbulence in these conditions. These results show that Langmuir turbulence dominates surface mixing in our observations and is well scaled with previous theories.

1. はじめに

ラングミュア乱流とは、波浪（深水波）と吹送流（シアー流）の非線形作用により生じる鉛直循環（ラングミュア循環）が引き起こす乱流のことである（例えば Thorp 2004）。近年の数値実験によれば、このラングミュア乱流が海洋混合層の深化に、そして海面水温を通じて大気や気候に影響を与え得ることが示唆されている（Huang et al. 2015; Li et al 2015）。このため、どんな時に・どの程度の強さのラングミュア乱流が生じるのかを明らかにしておくことが重要である。

これまでの数値実験やスケーリング解析をまとめると、ラングミュア乱流の鉛直速度スケール V_* は摩擦速度 U_* と深水波が引き起こすストークス速度 U_s を用いて $(U_*U_s)^{1/3}$ と表される（Li et al. 2005）。一方、外洋や沿岸で行われたいくつかの鉛直流の直接観測結果は、ラングミュア乱流が卓越すると予想される場合においても鉛直流速は（ V_* ではなく） U_* に比例していると報告されている（Smith 1992; D'Asaro 2001）。 U_* と U_s が比例している可能性が指摘されているが（D'Asaro 2014; Gargett and Grosch 2014）、詳細は不明である。また、数値実験に基づく先行研究の見積り（例えば Belcher et al. 2012）によると対馬海峡においてもラングミュア乱流は活発であると予想されるが、同海峡における吹送流の観測結果（Yoshikawa and Masuda 2009）からは、ラングミュア乱流の寄与が小さいことが予想される。

このようにラングミュア乱流に関しては、数値実験結果と観測結果に少なからず祖語がみられる。詳細な観測事例が少ないことが、この祖語の一因と考える。そこで、白浜海象観測所の田辺中島高潮観測塔にて、ADCP を中心としたラングミュア乱流の観測を行い、その発生条件や速度スケールなどについて先行する理論と比較した。

2. 観測概要

観測は5つの送受波面を持つ ADCP（RD 社製、Sentinel-V、1000kHz）を海底（水深 9m）に上向きに、3つの送受波面を持つ ADCP（RD 社製、H-ADCP、600kHz）2機を観測塔の脚部（水深 3.5m）に横向きにそれぞれ設置し、水平・鉛直の流速成分を準3次的に計測した。音波の発信間隔を十分に小さく（1Hz 以上）することで、流速の波浪成分（周期 $T < 30$ 秒）、乱流成分（ $30 \text{ 秒} < T < 20 \text{ 分}$ ）、平均流成分（ $T \geq 20 \text{ 分}$ ）を捉えることに成功した。本解析では主に乱流成分の鉛直流を解析する。また、波浪スペクトルよりストークスドリフト（ U_s ）を算出した。観測塔で計測する気象データを用いて、摩擦速度 U_* と熱フラックス H も推定した。観測期間は2014年11月と2015年11月のそれぞれ約1月である。本報告では2014年のデータに基づいて述べる。

3. 観測結果

2014年の観測期間中、風は北～西よりで風速は

最大 19m/s、有義波高は最大 1.7m、熱フラックスは海面冷却が卓越していた（最大 515W/m²）が、日中は加熱（最大-488W/m²）も見られた。図 1 には 2014 年 11 月 13 日、12:00-12:20 に計測された鉛直流速の鉛直分布の時間変化である。強い（0.04m/s 程度）の鉛直流が海面付近から海底近傍まで及んでおり、活発な乱流混合が起こっている様子が伺える。このとき風速は 13.4m/s、有義波高は 0.72m、熱フラックスは-233W/m²（加熱）であった。平均流の水平流速は 0.10~0.12m/s で鉛直にほぼ一様であったが、ストークス速度は海面で 0.29m/s もあった。横向きに据えた ADCP には、乱流成分の水平流速にストリーク構造が明瞭に確認できた。以上の結果は、この強い鉛直流がラングミュア乱流の一部であることを強く示唆する。

同様な強い鉛直流は観測期間中たびたび計測された。そこでこの強い鉛直流の成因を定量的に判断するため、鉛直流の分散 (W^2) をラングミュア数 (La 、乱流運動エネルギーに対するシアー生成と波生成の比) とヘニッカー数 (Ho 、熱生成と波生成の比) で分類した (図 2)。この結果、強い鉛直流は La と Ho が小さいとき、すなわちラングミュア乱流が発生しやすい条件のときに集中していた。また、 W^2 と V_*^2 の散布図 (図 3) を見ると、 La が小さいとき (ラングミュア乱流が卓越しやすいとき) に良く対応していることが分かった。以上の結果から、本観測においてはラングミュア乱流が主として活発な鉛直混合を引き起こしていること、その鉛直速度スケールは理論的に予測されるものと整合的であると結論付けられた。

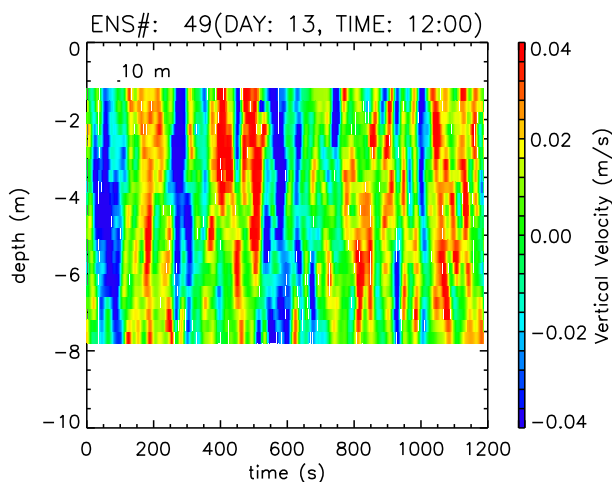


図 1 鉛直流速の時間（横軸）－深さ（縦軸）分布。赤が上昇流、青が下降流。観測日時は 2014 年 11 月 13 日、12:00-12:20。

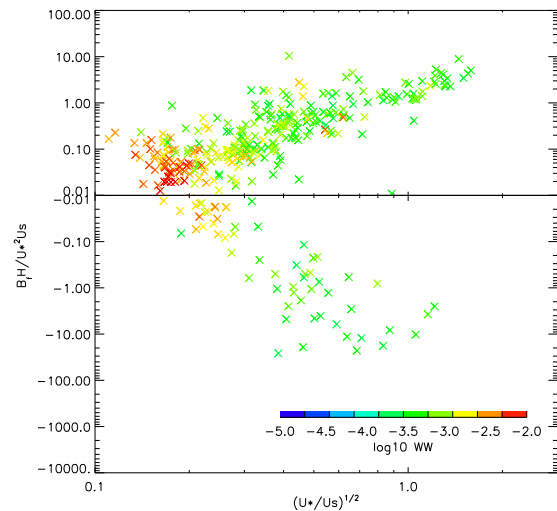


図 2 観測された鉛直流速の分散（色、暖色系ほど大きい）の、 La （横軸）および Ho （縦軸）依存性。両軸とも対数軸である。横軸は値が小さいほど波による乱流生成が、大きいほど風による乱流生成が大きいと期待される。縦軸の Ho は正負の値をとり（正が海面冷却）、-0.01 から 0.01 までは省略している。正の大きい値ほど、海面冷却による乱流生成が期待され、負の大きい値ほど、海面加熱による乱流抑制が期待される。

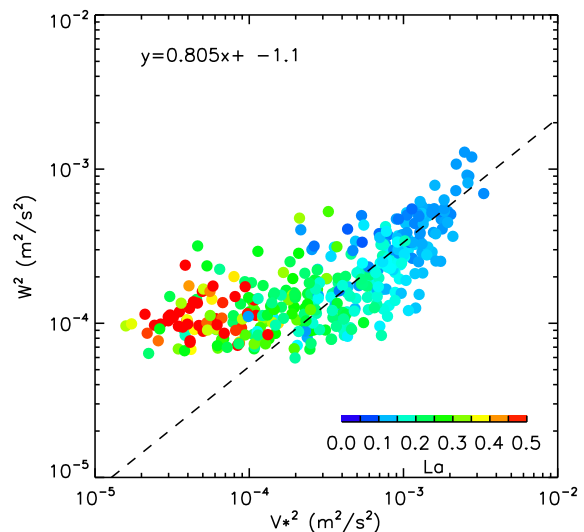


図 3 計測された鉛直流速分散（縦軸）とラングミュア速度分散 (V_*^2) の散布図。色は La を示す。破線は $La < 0.25$ での回帰直線。

謝辞 本観測は JSPS 科研費 25267123 の助成を受けました。また観測に際しては（株）ハイドロシステム開発の多大な協力を頂きました。