

ラングミュア乱流の観測 (その二)
Observation of Langmuir Turbulence (Part II)

○吉川 裕・馬場 康之・水谷 英朗・久保 輝広

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

Quasi 3D structure of turbulent flows in an ocean surface boundary layer was measured in early winter in 2014 and 2015 using ADCPs deployed at around the marine tower station of the Shirahama Oceanographic Observatory. Organized vortex structure associated with Langmuir circulations was clearly identified under strong winds and waves where the former often misaligned with the latter. The vortex was found to be mostly oriented to the direction of Lagrangian velocity shear (=wind-induced velocity shear + wave-induced velocity shear). Turbulent kinetic energy analysis revealed that the turbulence was mainly generated by Stokes production (representing wave effects), but contribution from shear production (representing wind-induced shear flow effects) was found to be non-negligible. These features indicate that directions of wind and waves are an important parameter for the Langmuir turbulence.

1. はじめに

ラングミュア循環とは、風が海面に作るシア（渦度）と波の軌道運動による渦度の傾斜によって生じる、海洋表層の二次循環である（例えば Fujiwara et al. 2018）。この循環に伴う乱流（ラングミュア乱流）は海洋表層での混合を強め、混合層を深めると同時に海面水温を低下させるため（例えば Noh et al. 2004）、大規模な海洋場や大気・気候場に影響を与える（例えば Belcher et al. 2012）。したがって、ラングミュア乱流の生成機構を解明し、それを適切に表現するスキームを海洋モデルに取り込むことが、海洋や大気、気候変動の正確な理解と予測に重要である。

ラングミュア乱流に関する現状の知見は、これまで多く行われてきた（単純化された）数値実験の結果に依るところが大きい。それらの結果によると、ラングミュア乱流はラングミュア数 $(\sqrt{U_*}/U_S, U_*$ は風応力から決まる摩擦速度、 U_S は波のストークス速度) が 0.3、ヘニッカー数 $(BH/U_*^2 U_S, B$ は海面での浮力加速度フラックス、 H は混合層深度) が 0.1 より小さいときに風成乱流や対流より優勢となり、その場合には乱流のエネルギーはシア項ではなく（波の寄与を表す）ストークス項を通じて生成されること、などが明らかになっている。

一方、現実の海洋では風向と波向が一致しないなど、ラングミュア乱流が発生する状況は、多く

の数値実験で想定されるほど単純ではない。唯一 Van Roekel et al. (2016) が風向と波向きが異なる場合の数値実験を行っており、ラングミュア循環の発生直後とその後では、レイノルズ応力の向き（すなわちシア項とストークス項の寄与）が変化することなどを示している。ラングミュア乱流の発生機構を定量的に明らかにするには、現場観測に基づいてラングミュア乱流の実態を明らかにし、これまでの知見と照らし合わせる必要がある。

このような背景のもと、我々は 2014 年と 2015 年の 11~12 月に、白浜の海象観測塔において ADCP を用いたラングミュア乱流の現場観測を実施した。ラングミュア循環に伴う組織化された渦構造の検出に成功し、ラングミュア乱流に伴う鉛直流の強度がこれまでの数値実験結果と概ね整合的であることなどを見出した（平成 28 年度防災研究所発表講演会 C18）。本講演では、組織渦の向きや乱流運動エネルギーの収支について、さらなる解析を行ったので紹介する。

2. 観測の概要

観測は、五つの送受波面を持つ ADCP（RD 社製、Sentinel-V、1000kHz）を観測塔付近の海底（水深約 9m）に上向きに、三つの送受波面を持つ ADCP（RD 社製、H-ADCP、600kHz）二機を観測塔の脚部（水深 3.5m）に横向きにそれぞれ設置し、流れの準三次元的構造を計測した。さらなる詳細は前報

告の要旨や Yoshikawa et al. (2018)を参照されたい。

3. 結果

3. 1 ラングミュア循環の向き

観測期間中の風向きは北西より、風向は西よりが卓越していた。数値実験 (Van Roekel et al. 2016) によれば、ラングミュア循環の組織渦の向きは、風が生むシア一流と波が生むストークス流の和 (ラグランジュ流速) のシアーの方向と一致する。そこで組織渦の構造を単純な正弦波構造と仮定し、組織渦の構造が明瞭に捉えられている H-ADCP の反射強度との相関係数が最も高い方位をラングミュア循環の向きとして (図 1)、解析を行った。

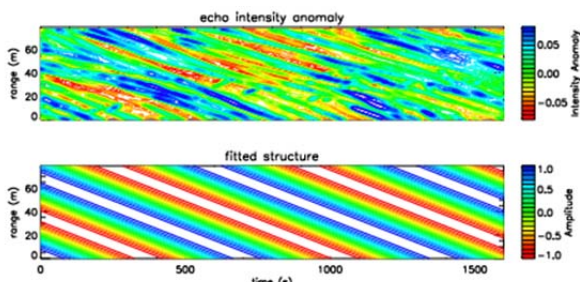


図 1 H-ADCP の反射強度 (上段) とフィッティングさせた正弦波構造 (下段)。横軸は時間、縦軸は観測塔からの水平距離。計測時刻は 2015 年 12 月 3 日 18:00-18:20。

検出されたラングミュア循環の向きはラグランジュ流速のシアーの向きと良く対応していた (図 2)。観測では (数値実験と異なり) 風向と波向が時々刻々と変化していたが、その場合でも追従して向きを変える様子が捉えられた。

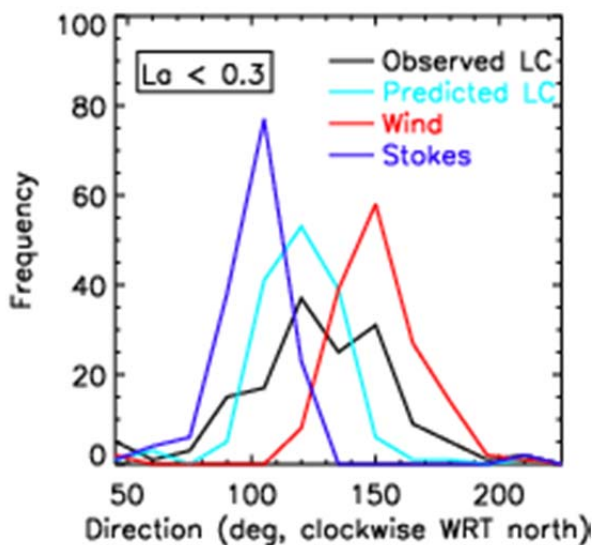


図 2 組織渦の方位 (黒実線)、ラグランジュシアーの方位 (水色)、風向 (赤)、波向 (青) の頻度分布。ラングミュア数が 0.3 以下の場合を抽出。

3. 2 運動エネルギーの収支

次に計測で見積もられた乱流運動エネルギーの収支を Sentinel-V の流速データを用いて見積もった。まず、五つの方向の視線流速データに分散法 (Lohrmann et al. 1990) を適用してレイノルズ応力を見積り、シアー生成項とストークス生成項を見積もった。次に鉛直方向の視線流速データにスペクトル法 (McMillan et al. 2016) を適用して、散逸率を求めた。浮力生成項は海面の浮力加速度フラックスから推定した。鉛直輸送項はこれらの残差として評価した。ラングミュア乱流が優勢となる条件 (ラングミュア数が 0.3 以下、ヘニッカー数が 0.1 以下) で平均をとりその鉛直分布 (図 3) を調べた。その結果、ストークス生成項の寄与が最大であったが、シアー生成項の寄与も無視できないほど大きいことが分かった。レイノルズ応力の向きを詳しく調べると、ストークス速度ではなく風の向きにより平行となる事例が多く、このことがシアー生成項の寄与を増加させている原因であると考えられる。この結果は Van Roekel et al. (2016) の数値実験結果と整合的であるが、そうなる理由 (力学的解釈) については今後の検討課題である。

以上の結果から、現実海洋でのラングミュア循環・乱流には、風向と波向の違いにも大きな影響を受け、その特性が変化していることが明らかとなった。現実海洋で生じるラングミュア循環・乱流の実態を明らかにするには、風向と波向の違いを考慮したさらなる調査が必要と考える。

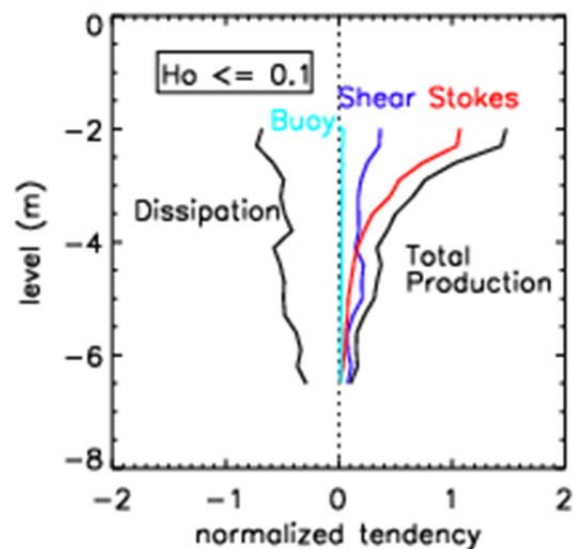


図 3 乱流運動エネルギーの収支の鉛直分布。シアー生成項 (青)、ストークス生成項 (赤)、浮力生成項 (水)、それらの和 (右の黒)、散逸項 (左の黒)。