

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2013～2016

課題番号：25287123

研究課題名（和文）ラングミュア循環に伴う運動量の乱流混合：現場観測と数値実験

研究課題名（英文）Turbulent mixing of momentum due to Langmuir circulation: Field and numerical experiments

研究代表者

吉川 裕 (Yoshikawa, Yutaka)

京都大学・理学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：40346854

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,900,000円

研究成果の概要（和文）：海洋表層の乱流混合の主要因の一つと目されるラングミュア循環の特性を明らかにするため流動構造の観測を行った。ラングミュア循環の組織的な渦構造を捉えることに成功し、さらにその乱流強度は波強制が強いときに大きいが、熱強制にも影響を受けること、などを明らかにした。また、波向きと風向きが一致しない場合には従来とは異なり風強制の影響も無視できないことも明らかにした。またこれらの結果は数値実験でも確認された。これらの結果から、ラングミュア循環は波強制が強いときには生じうるが、その特性は波向きと風向きに強く依存することが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：Field experiments of turbulent velocities were conducted in order to reveal Langmuir circulation, a potential ingredient of ocean surface mixing. Coherent structures of Langmuir circulation were successfully captured in our field experiments. Observed turbulence was intense when surface waves, a driver of Langmuir circulation, were strong, while its intensity was also affected by surface heat flux. We also find that wind forcing play an important role in Langmuir turbulence when wind and wave are misaligned. Numerical experiments support these observed features. These results indicate that Langmuir turbulence mixes ocean surface strongly when surface waves are intense, but associated mixing properties are highly dependent on wind and wave directions.

研究分野：海洋物理学

キーワード：海洋表層混合 ラングミュア循環

1. 研究開始当初の背景

海面を漂う物質の輸送を担う表層流には、地衡流や潮流と呼ばれる流れに加え、直上の風に起因する吹送流(エクマン流)と波に起因するストークス流が寄与する。これらの流れ(以下では境界層流と呼ぶ)は、全水深からすれば薄い層を占めるに過ぎないが、強風域は洋上にあまねく存在するため広範囲に分布し、物質輸送に大きく貢献する。特に、海面付近の流れの収束・発散は境界層流が担う。従って、例えば震災瓦礫などの漂流物の集積海域の推定などには、境界層流の推定精度が鍵となる(Kubota 1994)。

海面での境界層流の流向・流速を知るには、風から与えられた運動量が、海の中を深さ方向にどのように混合されるかを知る必要がある。運動量はベクトル量であるため、流れの大きさだけでなく向きについても考慮する必要があり、水温などのスカラー量の混合よりも複雑となる。また、海面付近での混合には風、海面熱フラックス、地球自転に加え、波も関与し、ことさら複雑である。

これまでの数多くの数値実験に基づく研究によれば、ラングミュア循環と呼ばれる、吹送流と波に起因する組織的な渦が、海洋表層の混合を著しく促進する(例えば Skillingstad and Denbo 1995; McWilliams et al. 1997)。しかし、現場観測では、ラングミュア循環が卓越した場合に予想される流動変動が計測されない(例えば D'Asaro 2001)。このように、海洋表層での乱流混合については(とりわけラングミュア循環の影響については)、数値実験と現場観測に齟齬があり、その実態に関して未解明な点が多く残されている。

2. 研究の目的

上述の数値実験と現場観測の齟齬の一因は、数値実験では(複雑な現象の理解のため)状況を単純化して行っている一方で、現場観測では精度良い計測が難しいため現象の全体を捉えていないことにあると考える。そこで本研究課題では、集中的な現場観測を行い、ラングミュア循環による混合の実態を定量的に明らかにするとともに、観測結果を踏まえた数値実験を相補的に行い、ラングミュア循環に基づく混合の特性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 現場観測 当初は東シナ海などの外洋で計測を試みたが、天候の制約などから十分なデータが得られなかった。そこで京都大学防災研究所の観測塔(和歌山県白浜沖)周辺での観測を追加した。合計3機の ADCP を観測塔周辺に設置し、流れの水平・鉛直構造と波浪を詳細に計測した。また観測塔の気象計から、風や熱フラックスを計測した。(図1)

また、人工衛星の可視画像を解析することで、ラングミュア循環が漂流物の集積に与える影響を検討した。

(2) 数値実験 観測された流動構造をより詳細に理解するため、乱流を精度よく表現する数値モデル(Large Eddy Simulation, LES)を用いて再現実験を行った。模型海洋は単純な矩形海としたが、外力として与える風応力や熱フラックス、波浪は、観測結果を模式的に表して与えた。(図2)



図1: 白浜沖観測塔(右上)、海底設置 ADCP(左上)、観測塔脚部に設置した ADCP(2機)

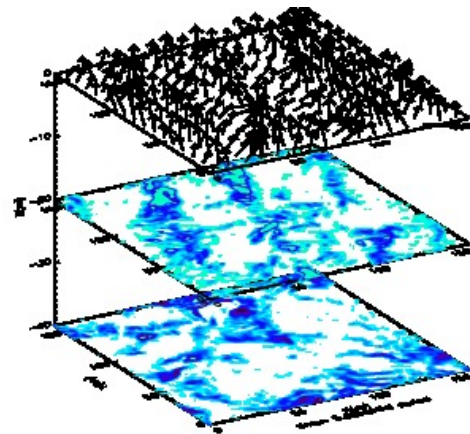


図2: 数値実験の模式図(立体図)。上面の矢印が海面での水平流速、中面および下面の色が鉛直流速の強さを表す。

4. 研究成果

(1) 現場観測 ラングミュア循環に起因する組織的な渦構造を流速計(ADCP)により明瞭に捉えることに成功した(図3)。そこで、乱流強度の指標となる鉛直流速の分散を、海底に設置した流速計(ADCP)に分散法を適用することで求め、その要因である風、熱そして波との関係を調べた。風強制と波強制の比であるラングミュア数(La)と、熱強制と波強制の比であるヘニッカー数(Ho)に対する

鉛直流速分散の依存性を調べたところ、 La および Ho が小さいときに鉛直流速分散が大きいこと (図4)、得られた La 、 Ho 依存性はこれまでのラングミュア乱流に関する数値実験 (例えば Li et al. 2005) で示されたものと整合的であること、などが判明した。これらの結果から、白浜沖で観測された乱流はラングミュア循環が主であることが判明した。また、従来の観測 (D'Asaro 2001 など) と同様な解析を行い、ラングミュア循環から予想される流動変動が見えないという先行研究の結果を確認したが、これは熱強制の効果 (Ho 依存性) を考慮していなかったことが一因であると推察できた。

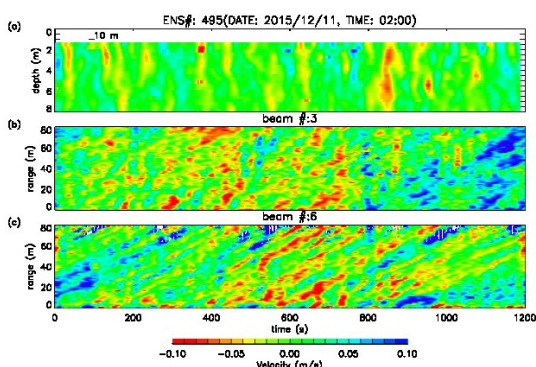


図3：ADCP が捉えた流速 (色) の時間変化。横軸は時間 (20 分)。(a) 海底設置 ADCP が捉えた鉛直流速。縦軸は海面からの深さ。(b)、(c) 観測塔脚部に水平に設置した ADCP (2機) が捉えた水平流速。縦軸は観測塔からの水へ距離。流速の縞状構造が組織的渦構造 (ストリーク構造) を表す。

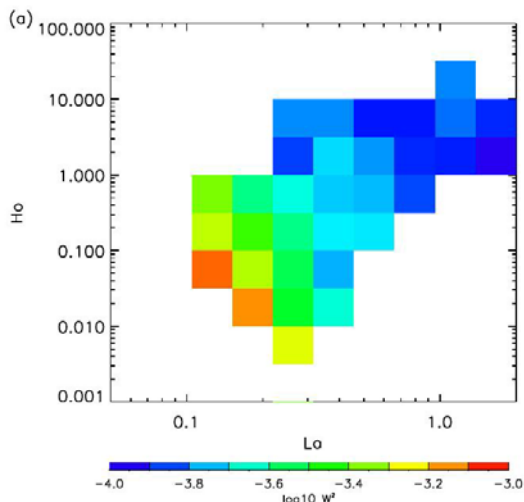


図4：観測で得られた乱流強度 (鉛直流速の分散、色) の La 、 Ho 依存性。冷却時のみ。

また、海底設置 ADCP で得られた鉛直流速にスペクトル法を適用し、エネルギー散逸率を求め、分散法で求めたレイノルズ応力から計算されるエネルギー生成率と合わせて、乱流運動エネルギーの収支を明らかにすることに成功した。その結果、(多くの数値実験結果が示す) 波強制に起因するエネルギー生成率だけでなく、風強制に起因するシアー生

成率も同程度に大きく、両者の和がエネルギー散逸率と概ねバランスしていることが明らかとなった (図5)。この結果は、波向きと風向きの不一致に起因することが強く示唆され、この不一致を考慮することがラングミュア乱流の評価に重要であることが明らかとなった。

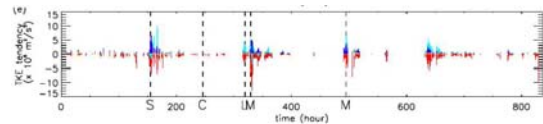


図5：乱流運動エネルギーの生成率 (正值) と散逸率 (負値) の時間変化 (1 時間平均値)。横軸は観測開始からの時間 (時)。青が風強制に起因する生成率 (シアー生成率)、水色が波強制に起因する生成率 (ストークス生成率)、赤が散逸率。

(2) 数値実験 初めに、冬季対馬海峡で観測された流動変動 (Yoshikawa and Masuda 2009) に対するラングミュア循環の影響を明らかにするため、対馬海峡を想定した LES を行った。冬季対馬海峡では、吹送流速の風速に対する比 (風力係数) は風速によらず一定であったが、(多くの先行研究が想定している) 波向きと風向きを同一としてラングミュア循環を再現させる実験を行ったところ、風力係数は風速とともに減少する結果となった。しかし、白浜沖の観測でその影響の大きさが示された波向きと風向きの違いを考慮し、風向きと波向きを変えて実験を行うと、風力係数の風速依存性は大きく変化すること、対馬海峡で想定されるように波向きと風向きが直交する場合には、風力係数が風速依らずほぼ一定になる場合があることを確認した。この結果から、冬季対馬海峡においてもラングミュア循環は卓越しているが波向きと風向きが異なっているため混合の様子が波向きと風向きが同じ場合とは異なること、対馬海峡にかぎらず海面付近の境界層流には波向きと風向きが重要なパラメータであることが明らかになった。

また人工衛星の可視画像で捉えられた漂流物 (瓦礫) のストリーク構造に着目し、再解析データセットから求めた当該時刻 (2011 年 3 月) および海域 (東北沖) における風応力、熱フラックス、波浪場を外力として、漂流物を想定した仮想粒子を追跡するモジュールを組み込んだ LES を行った。その結果、衛星画像が取得された時刻において観測結果と定性的に一致するストリーク構造がラングミュア循環により生成されていることを確認した。この結果から、ラングミュア循環が漂流物の攪拌過程に重要な役割を果たすことが示された。

最後に様々な緯度帯における、風応力と熱フラックスに対する混合の達する深さ (混合層深度) を数値実験で調べたところ、海面加熱時はラングミュア循環の効果が無くても観測結果を概ね再現することが全球規模で

確認され、海面加熱が強いときには混合層深度に対するラングミュア循環の効果は限定的である可能性が高いことが示唆された。ただし表層流速に対するラングミュア循環の影響は大きく、波向きと風向きの角度依存性も考慮したパラメタリゼーションが必要であることが確認できた。

<引用文献>

Kubota, M., A mechanism for accumulation of floating marine debris north of Hawaii, *Journal of Physical Oceanography*, vol. 24, 1994, pp. 1059-1064

Skyllingstad, E. D. and D. W. Denbo, An ocean large-eddy simulation of Langmuir circulations and convection in the surface mixed layer, *Journal of Geophysical Research*, vol. 100, 1995, pp/8501-8522

McWilliams, J. C., P. P. Sullivan and C. -H. Moeng, Lngmuir turbulence in the ocean, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 334, 1997, pp. 1-30

D' Asaro, E. A., Trbulent vertical kinetic energy in the ocean mixed layer, *Journal of Physical Oceanography*, vol. 31, 2001, pp. 3530-3537.

Li, M., C. Garrett and E. Skyllingstad, A regime diagram for classifying turbulent large eddies in the upper ocean, *Deep-Sea Research*, vol. 52, 2005, pp. 259-278

Yoshikawa, Y. and A. Masuda, Seasonal variations in the speed factor and deflection angle of the wind-driven surface flow in the Tsushima strait, *Journal of Geophysical Research*, vol. 114, 2009, C12022

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

① Yutaka Yoshikawa, Scaling surface mixing/mixed depth under stabilizing buoyancy flux, *Journal of Physical Oceanography*, vol. 45, 2015, pp. 247-258, DOI:10.1175/JPO-D-13-0190.1, 査読有

② Yoshihiko Ide and Yutaka Yoshikawa, Effects of diurnal cycle of surface heat flux on wind-driven flow, *Journal of Oceanography*, vol. 72, 2016, pp. 263-280, DOI:10.1007/s10872-015-0328-y, 査読有

③ 吉川 裕、遠藤 貴洋、海洋表層混合層における乱流混合に関する研究、海の研究、印刷中、査読有

④ John Philip Matthews, Lev Ostrovsky, Yutaka Yoshikawa, Satoru Komori and Hitoshi Tamura, Dynamics and early post-tsunami evolution of floating marine debris near Fukushima Daiichi, *Nature Geoscience*, 印刷中、査読有

[学会発表] (計 9 件)

① 吉川 裕・馬場 康之・水谷 英朗・久保 輝広、ラングミュア乱流の観測、平成28年度京都大学防災研究所研究発表講演会、2017年2月22日、京都大学防災研究所

② 吉川 裕、対馬海峡における鉛直混合過程、研究集会「宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム」、2016年6月30日、北海道大学低温科学研究所

③ 井手 善彦・吉川 裕、熱フラックスの日変化と海面吹送流速の風速依存性、2016年度日本海洋学会春季大会、2016年3月15日、東京大学本郷キャンパス

④ 吉川 裕・油布 圭・鬼塚 剛・馬場 康之・木元 克則、表層境界層における流動構造の観測、2015年度日本海洋学会秋季大会、2015年9月28日、愛媛大学城北キャンパス

⑤ Yutaka Yoshikawa, Competing roles of surface heating and Earth rotation in scaling wind-induced mixing layer depth, Joint Assembly IAHS-IAPSO-IAPSEI, 2013年7月25日, Gothenburg Convention Center, Gothenburg, Sweden

⑥ 吉川 裕、乱流混合パラメタリゼーションの現状と課題、2013年度日本海洋学会秋季大会シンポジウム、2013年9月17日、北海道大学札幌キャンパス

⑦ 吉川 裕、海面加熱時の風成流・風成乱流のスケーリング則、2013年度日本海洋学会秋季大会、2013年9月19日、北海道大学札幌キャンパス

⑧ 吉川 裕・油布 圭・鬼塚 剛・紫加田知幸・木元 克則、海洋表層境界層における流動場の水平構造の観測、日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会、2013年12月20日、九州大学応用力学研究所

⑨ Yutaka Yoshikawa, Competing roles of surface stabilizing buoyancy flux and Earth rotation in scaling wind-driven mixing, 2014年2月26日, Hawaii Convention Center, Honolulu, Hawaii, U. S. A.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉川 裕 (Yoshikawa Yutaka)

京都大学大学院理学研究科・准教授

研究者番号：40336854

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

馬場 康之 (Baba Yasuyuki)

京都大学防災研究所・准教授

研究者番号：30283675

水谷 英朗 (Mizutani Hideaki)

京都大学防災研究所・助手

研究者番号：00636756

(4) 研究協力者

油布 圭 (Yufu Kei)

九州大学応用力学研究所・技術職員

牛島 悠介 (Ushijima Yusuke)

京都大学大学院理学研究科・修士二年

藤原 泰 (Fujiwara Yasushi)

京都大学大学院理学研究科・修士二年

萬年 隆裕 (Mannen Takahiro)

京都大学大学院理学研究科・修士一年