

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01968

研究課題名（和文）海洋表層における波・流れ相互作用：力学の新展開と混合特性のグローバル評価

研究課題名（英文）Wave-current interaction in the ocean surface layer; New perspective in its dynamics and global evaluation of resultant mixing

研究代表者

吉川 裕 (Yoshikawa, Yutaka)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：40346854

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,700,000 円

研究成果の概要（和文）：海面の波による乱流混合は、気候モデルにおける大きな誤差要因の一つと考えられている。本研究では、この波による乱流混合の機構と特性を明らかにするために、独自に開発した数値モデルを用いて数値実験を行なった。実験の結果、無風の場合でも、波は砕波せずとも混合を引き起こすことが明らかになった。混合を担う渦の生成機構を、流れ場の渦度の伸縮と傾斜をもとに評価した結果、無風で砕波しない波による混合も、風が吹く場合と同様に、指向性のある渦度伸縮・傾斜により引き起こされることを明らかにした。また、波の波長や振幅に対する依存性を定量的に評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海面の波による乱流混合の影響を正しく表現することは、現状の気候モデルの精度向上に大きく貢献すると期待されている。これまで二つの説で別々に説明されていた波による混合の機構を、波による指向性のある渦の伸縮と傾斜として統一したことにより、今後行われるべき混合の定式化に道筋をつける結果となった。また、波の波長や振幅を変えた実験の結果は、定式化を構築する際の基盤となる資料として有用である。今後の波による混合の定式化と、それを組み込んだ気候モデルの予測・再現精度向上が期待される。

研究成果の概要（英文）：Wave-induced turbulence in the ocean surface layer, one of major sources of prediction errors in recent climate simulations, was investigated using the wave-resolving numerical model. In this model, waves and turbulence can be resolved simultaneously without parameterization. Simulations show that the non-breaking surface waves induce mixing even without surface wind. Mechanics and properties of the mixing observed in the simulations were quantified. Vorticity budget analysis reveals that the non-breaking wave-induced mixing without surface wind is caused by secondary circulations generated by rectified vorticity stretching/shrinking/tilting by the waves, as the non-breaking wave-induced mixing with surface waves is. Eddy diffusivity due to the surface waves was also quantified as a function of wave length and amplitude.

研究分野：海洋力学

キーワード：波と流れの相互作用 海洋表層混合 波解像数値実験

## 1. 研究開始当初の背景

海洋表層の波(風波)は、流れと相互作用することで強い混合を引き起こす(Thorpe 2007)。この混合は、多くの海域で風が単独で引き起こす混合よりも強く(Belcher et al. 2012)、とりわけ海面が加熱される春~夏季においては、海洋や気候システムに大きな影響を与えていると考えられている。しかし、現状ではその混合の機構や特性に不明な点が多く、海洋大循環模型で適切に再現できていないという問題がある。例えば、第5次結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP5)で用いられた大気海洋結合大循環模型では、南大洋の混合層深度が観測値よりも大幅に過小評価となり(Meijers 2014)、同海域の夏季海面水温が3度も過大評価される結果、海水の分布や気圧場が歪められているとの指摘がある。大循環模型における誤差要因は多岐にわたるが、南大洋での混合層深度の過小評価は南大洋で発達する波と流れが相互に作用して生じる混合の影響を、大循環模型が適切に表現していないことが主因と考えられている(Belcher et al. 2012; Huang et al. 2014)。したがって、波と流れが相互作用することで生じる混合の機構と特性を解明し、その効果が大循環模型で適切に表現するための定式化を構築することが求められている。

波が流れと相互作用することで生じる混合には、ラングミュア混合(e.g., McWilliams et al. 1997)と非砕波混合(e.g., Qiao et al. 2004; Babanin 2006)と呼ばれる二つの力学機構が、別々に提唱されている。ラングミュア混合は風が作る流れと波との相互作用(具体的には波による指向性のある渦度伸縮・傾斜、Fujiwara et al. (2018))が成因となる2次循環(ラングミュア循環)によるもので、波が風下方向に伝播すると生じる。CL理論(Craik and Leibovich 1976)と呼ばれる波と流れの相互作用に関する理論に裏付けられているが、この理論では波に及ぼす粘性の影響を排除しており、この理論に基づいた多くの先行研究では、非砕波混合の要因である粘性の影響を考慮できないという問題がある。一方、非砕波混合は、波に伴う運動(軌道運動)が分子粘性を通じて乱れを引き起こし、その乱れと波が相互作用することで生じると想定されている(Qiao et al. 2004; Babanin 2006)。風を必ずしも必要としないという点で、ラングミュア混合とは区別されるが、生成機構の理論的根拠が乏しく、また実測もされていないという問題が存在する。このように、ラングミュア混合と非砕波混合という二つの混合機構が提唱されているものの、両者の関係が不明であるため、別々に定式化すべきか否かについてさえも明らかとなっていない。

## 2. 研究の目的

海面水温を通じて大気場や気候場にも影響を与える波と流れの相互作用に伴う混合は、ラングミュア混合と非砕波混合という別々の機構が提案されているが、両者の関係が不明であるという問題があった。また後者に至ってはその物理機構も不明瞭である。そこで本研究では、独自に開発した波解像数値模型を用いて、波と流れの相互作用に伴う混合の直接数値実験に取り組む。両混合過程を同時に扱うことが可能な渦度の収支解析を行い、不明であった非砕波混合の生成機構を明らかにし、ラングミュア循環の生成機構との共通点や相違点を明らかにする。パラメータ実験を通じて混合特性を明らかにすると同時に、現場観測や室内実験を通じて、数値実験の検証も行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 数値実験

独自に開発した波解像数値模型を用いて、水面の波と流れの相互作用、そしてそれが引き起こす乱流混合を再現する。支配方程式は非圧縮、ブシネスク近似を施した運動方程式(ナビエ-ストークス方程式)と水位の時間発展の式、トレーサー濃度の移流拡散方程式であり、成層を考慮する場合には水温(実際には水温に比例する浮力加速度)の移流拡散方程式も支配方程式に加える。CL理論に基づいた数値模型とは異なり、この模型では水面波と流れを同時に扱うことができるため、波と流れ、そしてそれらの相互作用を直接的に再現できるという利点がある。さらに、格子幅を1mm程度にまで小さくすれば、乱流をも同時に再現することができ(直接数値計算)、混合の評価を精確に行うことが可能である。水槽実験により非砕波混合を定量評価したDai et al. (2010)を参考に、波長30cm、振幅1cmの波が引き起こす非砕波混合の再現実験を実施し、その結果の解析を集中的に行う。また、波長や振幅を変えた実験も行い、非砕波混合の特性(深さや強度)がどのように変化するかを明らかにする。

### (2) 現場観測と室内実験

数値実験の検証を目的として、現場観測と室内実験を行う。現場観測は、和歌山県白浜沖に設置された京都大学防災研究所の海洋観測塔を活用する。観測塔周辺の海底に、音響ドップラー流速計(Sentinel V20)を設置し、海洋中の乱流を計測する。観測塔で取得する気象データ一式と、波高データ、さらに新たに設置する水温計による水温データを解析し、混合を引き起こす要因(風、熱、波)と、混合を担う海中の乱流、そして混合の結果である水温分布を同時に調べ、現場海洋での非砕波混合の評価を行う。

室内実験は九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽で行う。造波器で作られた規則的な水面波が作る混合を解析対象とする。水面付近に散布したマイクロバブルにレーザーを照射し水の運動を可視化し、非砕波混合をもたらす乱流運動の構造を確認する。また、先行研究の室内実験 (Dai et al. 2010) と同様に、水温の時間変化を計測し、混合の結果を観察する。これらの結果を数値実験の結果と比較する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 数値実験

初めに、粘性係数を水の分子粘性係数より大きく（格子幅を大きく）設定し、（乱流は現実海洋より弱い）粘性の影響を受けた波と流れの相互作用を再現するような実験を行った。その結果、粘性の効果により波が減衰する結果、仮想波応力を通じて水面近傍にシア一流が形成され、このシア一流と波が相互作用（波による指向性のある渦度伸縮・傾斜）し、波の進行方向に軸を持つ二次循環が形成されることが明らかとなった (Fujiwara et al. 2020)。この二次循環の形成機構はラングミュア循環と同様であり、異なる点は水面付近のシア一流の生成要因（ラングミュア循環は風応力、非砕波混合は仮想波応力）であると整理することができた。また、波の非線形性が強い場合、波が非一様となり流れを変形させる結果、波と流れの相互作用が一様な場合と比べて増大するという結果も得た (Fujiwara and Yoshikawa 2020)。

次に乱流混合を定量的に評価するため、粘性係数を水の分子粘性係数 ( $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) として（格子幅を 1mm 程度にまで小さくして）、乱流をも直接的に再現する実験を行った。この実験では、初期条件として波長 30cm、振幅 1cm の 3 次のストークス波を与え、自由に伝播させた。約 70 周期（約 30 秒）後には、波の伝播方向に伸びる二次循環が発生し、さらに時間がたつと、二次循環は形状を変化させながら、幅を広げつつ深まってゆく様子が観察された（図 1）。混合強度の指標である渦拡散係数を評価したところ、二次循環の成長とともに増大かつ深化していた。560 周期（約 4 分）後における拡散係数は、水面近傍で  $2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  程度であり、深度 5cm 程度までおよそ指数関数的に減衰していた（図 2 左）。水温の時間変化の様子は、Dai et al. (2010) の水槽実験と定性的には似たものであった。これらの結果から、先行研究で指摘されている非砕波混合は、波の伝播方向に伸びる二次循環に起因するという結果を得た。また、Qiao et al. (2004) や Dai et al. (2010) の想定とは異なり、拡散係数が大きく時間変化しているという事実は、非砕波混合が波の軌道運動流速によって引き起こされるものではないことを強く示唆する結果であった。

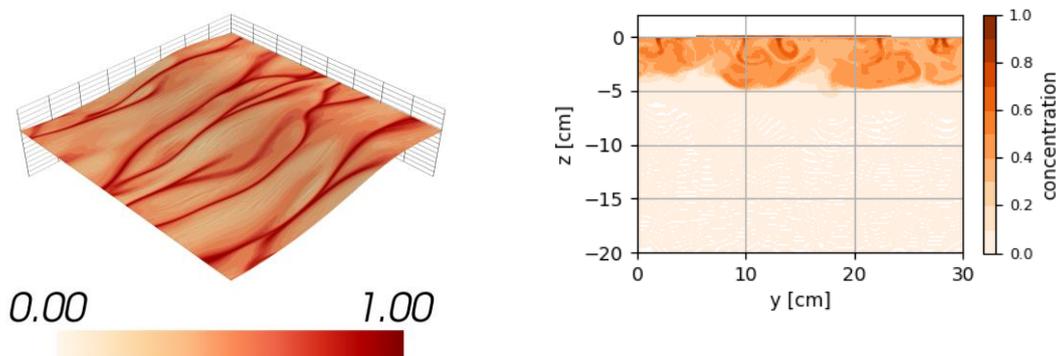


図 1 波解像数値実験の結果（560 周期後）。水面で一様に与えたトレーサー（色水）濃度の分布を示す。（左図）水面直下におけるトレーサー濃度の分布。色の濃いところが水面から下降してきた水、薄いところが下方から上昇してきた水を表す。（右図）波の伝播方向と直交する鉛直断面でのトレーサー濃度の分布。

渦度の収支解析を行い、二次循環の生成機構を調べた。渦度の二乗であるエンストロフィーの収支を調べたところ、二次循環に対応する波数帯では、ラングミュア循環と同様に、波による指向性のある渦度の伸縮・傾斜が二次循環の形成要因であること、時間が経過し二次循環が複雑に変化するようになっても継続して指向性のある渦度伸縮・傾斜が混合要因であること、などが明らかとなった。また波長や振幅を変えて実験を行ったが、いずれも上記と同様の結果が得られた。これらの結果から、ラングミュア混合と非砕波混合はともに波と流れの相互作用（具体的には波による指向性のある渦度伸縮・傾斜作用）により形成される二次循環によるものであることが、定量的にも明らかになった。したがって、ラングミュア混合と非砕波混合は、シアーを生む海面応力を外部パラメータとすることで、統一的に扱うことが可能である。

また、成層強度や波の振幅と波長を変えた実験を行った。成層の有無は、波と流れの相互作用による二次循環の生成と混合に本質的な影響を与えないこと、波長が大きく、振幅と波長の比（波形勾配）が大きいほど混合は深くまで達し、渦拡散係数が大きくなること、などが明らかとなった（図 2 右）。この成果は、波による混合を大循環モデルで表現するのに必要な定式化を構築

する上で有用である。しかし、計算機資源の制約により、現実海洋で生起する波の波長にまで対象を広げて実験を行うことはできなかった。

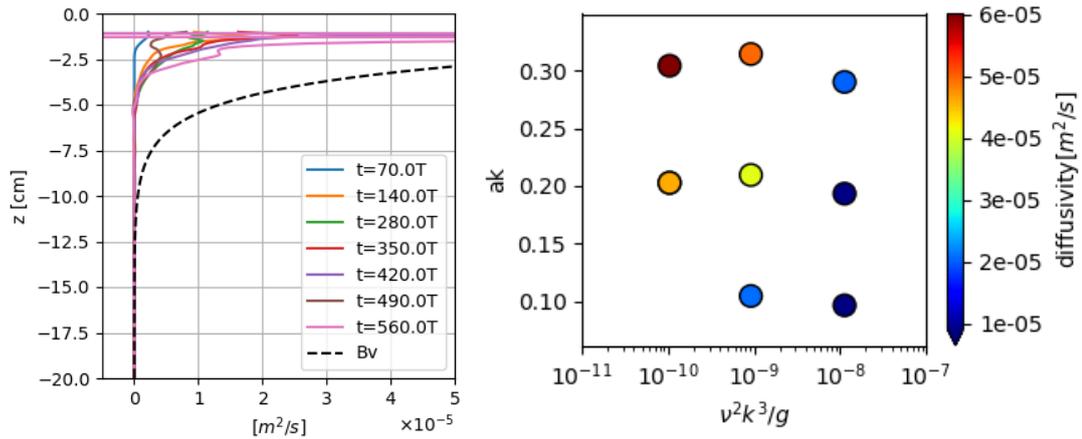


図2 波解像数値実験で見積もった鉛直拡散係数。(左図) 鉛直分布。色は時間の違いを示す。黒破線は Dai et al. (2010) が想定した分布。(右図) 鉛直拡散係数のパラメーター依存性。横軸は波数、縦軸は振幅をそれぞれ規格化したものを示す。

## (2) 現場観測と室内実験

音響ドップラー流速計で得た海中の乱流データと、海洋観測塔で得た気象・波高データおよび水温データとを合わせて解析を行った。風は弱い波は高い事例を抽出し、その時刻における乱流運動エネルギー散逸率を評価したところ、風速と対数則から導き出される風による乱流運動エネルギー散逸率よりもはるかに大きい乱流運動エネルギー散逸率が得られ、波が単独で引き起こす混合が現実海洋でも生じている可能性を強く示唆する結果を得た。ただし、風は弱い波が高いという事例が本観測海域では少なく(10例以下)、データの信頼性については今後さらなる検討が必要であった。そのため、混合の評価を全球的に行うにはさらなる検討を重ねることが判明した。

室内実験では、波の発生とともに生じる2次循環をマイクロバブルにより可視化することに成功した(図3左)。二次循環の幅を計測したところ、時間と共に増大する傾向が捉えられ(図3右)、さらにその変化は数値実験や理論と整合的であることも確認された。水温の時間変化は波の発生後間もない頃には数値実験と同様の变化を示したが、長時間経過すると数値実験の結果以上に水温が低下することが分かり、室内実験特有の要因により引き起こされていることが強く示唆された。

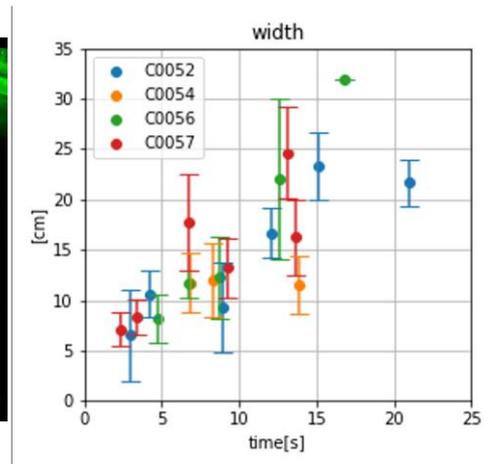
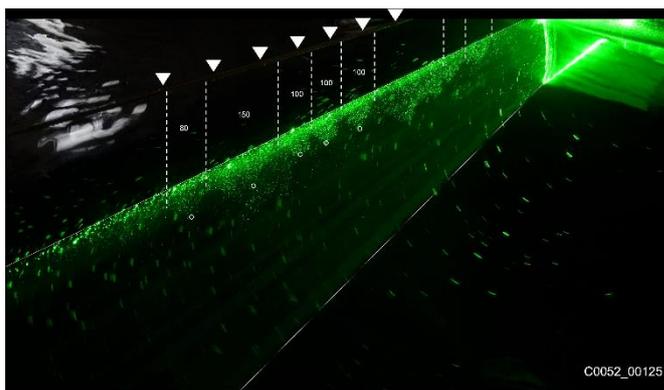


図3 室内実験の結果。(左図) 水中に漂うマイクロバブルにグリーンレーザーを照射して可視化した水の動き。二次循環が発生し、水面付近の水が沈降する結果、マイクロバブルが下に凸の分布となっている。二次循環の間隔は湧昇域(▽印の箇所)の間隔から読み取った。(右図) 二次循環の間隔(▽印の間隔)の時間変化。横軸が時間、縦軸が間隔。

以上、本研究事業で得た成果は以下の四つにまとめられる。①碎波しない波が単独で混合を引き起こすことを波と乱流を直接的に解像する数値実験で確認した。②混合は波によって生成された二次循環により生じ、その二次循環の発生機構はラングミュア循環と同様に、波による指向性のある渦度伸縮・傾斜であることを確認した。これにより、これまで別々と考えられていたラングミュア混合と非碎波混合を統一して扱うことが可能となった。③非碎波混合は波長が長い

ほど、波形勾配が大きいほど強く深いことが明らかとなった。④これらの結果とおよそ整合する結果を、現場観測、室内実験において得られた。

<引用文献>

- Babanin, 2006: On a wave-induced turbulence and a wave-mixed upper ocean layer, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33, L20605, doi:10.1029/2006GL027308
- Belcher et al., 2012: A global perspective on Langmuir turbulence in the ocean surface boundary layer, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 39, L18605, doi:10.1029/2012GL052932
- Craik and Leibovich, 1976: A rational model for Langmuir circulations, *J. Fluid Mech.*, vol. 73, part 3, pp. 401-426
- Dai et al., 2010: An experiment on the nonbreaking surface-wave-induced vertical mixing, *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 40, no. 9, pp. 2180-2188, doi: 10.1175/2010JPO4378.1
- Fujiwara et al., 2018: A wave-resolving simulation of Langmuir circulations with a nonhydrostatic free-surface model: Comparison with Craik-Leibovich theory and an alternative Eulerian view of the driving mechanism, *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 48, no. 8, pp. 1691-1708, doi: 10.1175/JPO-D-17-0199.1
- Fujiwara et al., 2020: Wave-resolving simulations of viscous wave attenuation effects on Langmuir circulation, *Ocean Modelling*, vol. 154, 101679, doi: 10.1016/j.ocemod.2020.101679
- Fujiwara and Yoshikawa, 2020: Mutual interaction between surface waves and Langmuir circulations observed in wave-resolving numerical simulations, *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 50, no. 8, pp. 2323-2339, doi: 10.1175/JPO-D-19-0288.1
- Huang et al., 2014: Evaluating CMIP5 simulations of mixed layer depth during summer, *J. Geophys. Res. Oceans*, vol. 119, doi:10.1002/2013JC009535.
- McWilliams et al., 1997: Langmuir turbulence in the ocean, *J. Fluid Mech.*, vol. 334, pp. 1-30
- Meijers, 2014: The Southern ocean in the coupled model intercomparison project phase 5, *Phil. Trans. R. Soc. A* 372:20130296, doi: 10.1098/rsta.2013.0296
- Qiao et al., 2004: Wave-induced mixing in the upper ocean: Distribution and application to a global ocean circulation model, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 31, L11303, doi: 10.1029/2004GL019824
- Thorpe, 2007: Langmuir circulation, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 36, pp. 55-79, doi: 10.1146/annurev.fluid.36.052203.071431

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yasushi Fujiwara, Yutaka Yoshikawa, Yoshimasa Matsumura	4. 巻 154
2. 論文標題 Wave-resolving simulations of viscous wave attenuation effects on Langmuir circulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ocean Modelling	6. 最初と最後の頁 101679
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ocemod.2020.101679	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yasushi Fujiwara, Yutaka Yoshikawa	4. 巻 50
2. 論文標題 Mutual Interaction between Surface Waves and Langmuir Circulations Observed in Wave-Resolving Numerical Simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physical Oceanography	6. 最初と最後の頁 2323-2329
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/jpo-d-19-0288.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 吉川 裕	4. 巻 39
2. 論文標題 波と流れの相互作用と海洋表層での乱流混合	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 280-287
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 吉川 裕	4. 巻 51
2. 論文標題 外洋で観測されるラングミュア循環とCL理論	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 月刊海洋	6. 最初と最後の頁 387-392
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 今村 春香, 吉川 裕
2. 発表標題 水面波による混合の波のパラメータ依存性についての数値実験
3. 学会等名 海洋波および大気海洋相互作用に関するワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今村 春香, 吉川 裕
2. 発表標題 水面波による混合の強度とメカニズムに関する数値実験
3. 学会等名 地球流体におけるさまざまな流れとその基本過程の力学
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Haruka Imamura, Yutaka Yoshikawa, Yasushi Fujiwara
2. 発表標題 Direct numerical simulation of vertical mixing due to the nonbreaking surface wave: Eddy diffusivity estimation and enstrophy analysis
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今村春香, 吉川裕
2. 発表標題 砕波しない波による乱れの生成機構のエンストロフィー解析に基づく解明
3. 学会等名 海洋乱流の観測およびモデリングに関する研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今村春香, 吉川裕
2. 発表標題 砕波しない波による乱れについての波解像数値実験と水槽実験
3. 学会等名 「微細規模から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模間相互作用の研究」研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今村春香, 吉川裕, 藤原泰
2. 発表標題 砕波しない波単独による混合についての波解像数値実験
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今村春香, 吉川裕, 藤原泰
2. 発表標題 波解像数値実験を用いた波による乱れの生成機構について
3. 学会等名 2021年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yutaka Yoshikawa, Yasushi Fujiwara, Yoshimasa Matsumura
2. 発表標題 A Wave Resolving Simulation for Upper Ocean Turbulence Driven by Wave-Current Interaction
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2019年大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	馬場 康之  (Baba Yasuyuki)  (30283675)	京都大学・防災研究所・准教授    (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------