

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：14501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20385

研究課題名（和文）波浪を介した大気海洋間運動量輸送の数値的研究

研究課題名（英文）Numerical study of atmosphere-ocean momentum flux mediated by surface waves

研究代表者

藤原 泰 (Yasushi, Fujiwara)

神戸大学・海事科学研究科・助教

研究者番号：60963569

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：波が大気と海洋の相互作用に及ぼす影響を明らかにするため、空気と水の高精度な数値シミュレーションを可能にするプログラム（数値モデル）を設計・開発した。精度が高いことにより、現象の理解を妨げる計算誤差を低減することができる。この数値モデルの性能を活かして減衰する波がどれだけ海表面をかき混ぜるかという問題に取り組み、空気との接触によってそのかき混ぜが強まることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動に対する適切な対応を立案するためには、気候予測における不確実性の低減が不可欠である。波浪を介した大気・海洋相互作用は現状理解が不十分で、予測の不確実性の一因である。本研究で開発した数値モデルはその理解を進めるための研究を行う基盤ツールである。この数値モデルは波の運動と風や水の流れを一度に高精度に解くことができるよう設計され、さまざまな試験を通してその性能を有していることを確かめた。今後この数値モデルを用いて波を介した大気海洋相互作用の研究を展開してゆく。

研究成果の概要（英文）：To elucidate the effects of waves on the interaction between the atmosphere and ocean, we designed and developed a computer program ("numerical model") that enables highly accurate numerical simulations of air and water. The high accuracy reduces the computational errors that hinder our understanding of the phenomena. The performance of the numerical model was exploited to address the question of how much a decaying wave stirs the ocean surface, and it was demonstrated that the stirring is enhanced due to contact with the air.

研究分野：海洋物理学

キーワード：波浪 風・波相互作用 数値シミュレーション 大気海洋相互作用

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

大気と海洋の境界面には波浪が遍在する。波浪の状態によって運動量のやり取りなどの大気・海洋間相互作用が変化することがわかっているが、その理解は不十分で不確実性が大きいことから現行の気候シミュレーションにおいては波況に依存しないパラメタリゼーションが広く用いられている。これは、時々刻々水面の形状が変化する状況で気側・液側乱流の3次元構造を精緻に測定したり、界面ごく近傍における圧力や応力を計測したりすることが極めて難しいことに起因している。

波を介した大気海洋相互作用の解明にあたり、波と流れを精密に解析することでその素過程を理解することが重要である。実海域では多次的・高精度な測定が困難であることから、現場観測や室内実験を補うアプローチとして波の直接数値シミュレーション（波解像数値計算）が期待されている。波解像数値計算では複雑に変化する海面形状を陽に表現して気流・水流を直接計算し、解析的な扱いが困難な乱流の振る舞いを系統的に調べられるという利点がある。しかし、オープンに使えるその様な目的に適した特性をもつ数値モデルがなかったり、問題の性質に応じた計算精度の設計・解析フレームワークの構築が困難であったりしたことから波解像数値計算を自在に行える研究グループは世界的にごく僅かだった。

### 2. 研究の目的

研究代表者は、陽に表現された波浪上の気流の直接数値計算を駆使して波況に依存した大気海洋相互作用のパラメタリゼーション精度向上に資する素過程研究を展開していくことを企図している。

そのために、本研究では先進的な枠組みである気液結合波解像数値計算の基盤を構築する。数値モデル自体を自ら設計・開発し、他のグループが実現できていないような実験設定や解析を自由に行える環境を構築する。新開発した数値モデルの性能評価の一環として、気液間界面重力波と気側・水側流れの相互作用のシンプルな問題を直接数値計算する。

### 3. 研究の方法

本研究は以下の2つの段階からなる。

まず、気液結合波解像数値モデルを設計・構築する。研究代表者は過去に液側のみの波解像自由表面数値モデルを開発した経験があり [Fujiwara et al. (2020), “Wave-resolving simulations of viscous wave attenuation effects on Langmuir circulation”, *Ocean Modelling*]、その設計を拡張する方針でアルゴリズムを設計する。

つづいて完成したモデルを用いて、気液2相間の波を介した運動量・エネルギーの授受過程を解析する。極めて多彩な状況が想定される中で、本研究では減衰する波（うねり）によって生じる乱流生成の理想化数値計算に問題に絞ることとした。初期条件として波の軌道運動を与え、自由伝播させることで水側に乱流を生じさせてその力学解析を行なった。

### 4. 研究成果

初めに、気液結合波解像数値モデルの開発に取り組んだ。密度の異なる2つの非圧縮粘性流体が重なった状態を考え、その界面は水平・時間座標の一価関数である（砕波はしない）と想定する。その仮定のもと気相・液相に鉛直座標変換を施し、界面追従座標のもとで支配方程式を導出した。水平方向には擬スペクトル法、鉛直方向には2次精度差分法を用いて差分化したが、その際圧力変数の格子上配置と自由度の数に工夫を施して、非圧縮性のみならず界面の連続性も要求できるように設計した。また、予報変数を層厚み付け速度とすることによって運動量方程式の全ての項をフラックス型で表現し、運動量や質量の局所保存性を高精度で達成できるようにした。時間方向には4次精度 Adams-Bashforth 法を用い、陽的に求めることができない圧力分布は各格子の非圧縮性と界面連続性を満たすよう反復解法を用いて求めた。また、本研究課題以降にも波を介した大気海洋相互作用の研究を多角的に行えるよう、水面形状を波浪スペクトルなどから外的に与えて気側だけを解くという設定の計算も行えるよう設計した。

上記の設計のもとコーディングを行うにあたってアルゴリズムの有効性を検証するために、コーディングの容易なインタプリタ言語を用いてプロトタイプモデルを構築し、その性能を評価してからコンパイラ言語で本番モデルの構築に取り組むという開発方式を採用した。これは代

表者が過去の数値モデル開発で用いた方式の踏襲であり、試行錯誤のサイクルを早くしたり誤差の検証をより細かく行えたりするというメリットがある。限られた研究期間で確実にモデルを完成させる必要があった今回においても有効な手法であった。

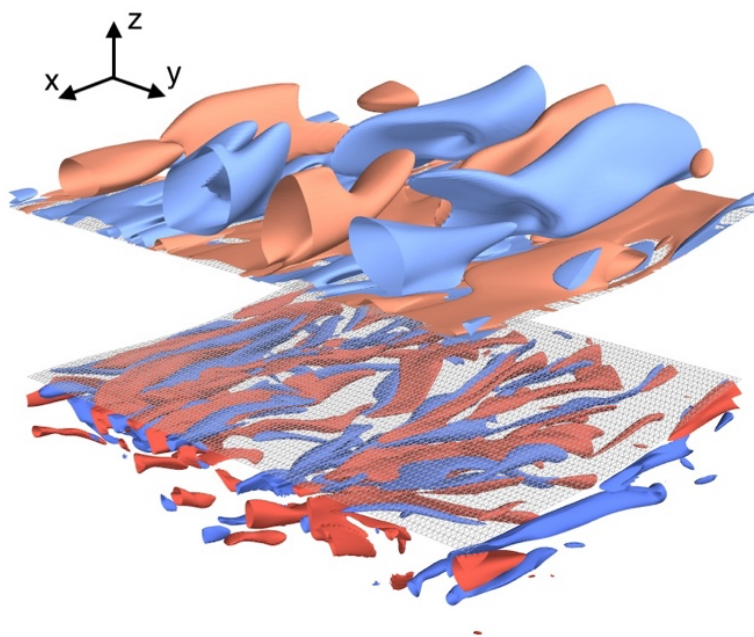
完成した数値モデルの精度を評価するため、2相界面重力波の分散関係、Kelvin-Helmholtz 不安定の発達率、Miles 機構による風波の発達、波上境界上のクエット流に伴う圧力・応力分布といった、解析的な振る舞いがわかっている問題について精度検証を行った。その結果、モデルは目論見通りの高い精度を示すことが確かめられた。

波を介した気液間運動量・エネルギー輸送といっても、想定される状況は極めて多彩にわたる。残る研究期間で取り組める問題として、多彩にわたる気液間エネルギー・運動量輸送の問題の中でも非碎波乱流生成の機構解明の問題にターゲットを絞って数値計算を行なった。この問題は造波水槽で風がなくても波が活発に水をかき混ぜたという実験事実で端を発し、一部の地球システムモデルにおいてもこの考えに基づいた乱流混合パラメタリゼーションが用いられていて、現象理解が不足しているとして批判が起こっている状況である。近年は液側のみを表現した自由表面数値モデルを用いて波解像直接数値計算を通してこの現象の再現数値計算が試みられているが、気側との接触状態（現実の水面波も同様の状態にある）における現象の解析は行われていない。

気液結合モデルで波を生じさせたところ、確かに水側に乱流が発生した（下図）。エネルギー収支解析の結果、水側の内部領域に加えて気側のストークス境界層でエネルギーの粘性散逸が生じて波がその形を保てなくなり、一方で残された水平運動量は気液界面境界層で渦ありシア流に姿を変え、これが波運動と相互作用することでラングミュア循環に似た乱流を生じさせていると明らかになった。このメカニズム自体は近年の液側波解像数値計算から提唱されていたものだが、本研究はこれを気液結合系で計算することによって、気側境界層での強いエネルギー散逸の重要性を新たに指摘した。

現実的な大気・波浪・海洋相互作用はこれよりもはるかに複雑で、風と波のエネルギー授受があったり、単色ではなく広帯域にわたる波構造が相互作用に影響していると考えられる。そのような状況を計算していくにあたり、気液間エネルギー・運動量輸送に寄与する個々の過程を理解しておくのは重要である。本研究の成果は今後行う予定の複雑な状況の直接数値計算で現れる基礎過程のひとつを解明したと位置付けられる。

上記の成果は論文としてまとめ、流体力学系の国際誌にフルペーパーとして投稿された。第1回の査読の評価は概ねよく、本報告の時点で修正稿の準備中である。



図：波解像数値計算の結果生じた乱流の概要図。水平の曲面は気液界面を表し、見やすさのために気側と液側を離して描いている。波は  $x$  の正方向に伝播している。赤色・青色の曲面は  $x$  成分渦度の等値面を表している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 藤原泰
2. 発表標題 大気海洋結合境界層数値モデルの開発
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 2022年

1. 発表者名 藤原泰
2. 発表標題 波浪境界層の直接計算のための気液非静力学モデルの開発
3. 学会等名 海洋の統合的理解に向けた新時代の力学理論の構築 研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤原泰
2. 発表標題 界面追従座標に基づく気液結合境界層数値モデルの開発
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 2023年

1. 発表者名 Fujiwara, Y., Waseda, T., Kodaira, T., Nose, T., Katsuno, T., Sato, K.
2. 発表標題 Laboratory experiment of ice group formation under waves.
3. 学会等名 7th International Symposium on Arctic Research (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤原泰
2. 発表標題 ミクروسケール大気海洋相互作用の研究のための波解像二相数値モデルの開発
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fujiwara, Y.
2. 発表標題 A numerical model for the direct simulation of wind-wave interaction
3. 学会等名 The 6th International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤原泰
2. 発表標題 減衰するつねりに伴う気液間運動量・エネルギー輸送の解析
3. 学会等名 名古屋大学宇宙地球環境研究所共同利用研究集会「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 2024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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------