

令和 6 年 6 月 16 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03881

研究課題名（和文）高速気流により水面に生成される超高密度気泡層を通しての熱輸送機構の解明

研究課題名（英文）Heat transfer mechanisms across high-concentrated form layer generated by strong wind shear above water surface

研究代表者

高垣 直尚（Takagaki, Naohisa）

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00554221

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：高速気流場における波立つ水面では、気泡同士が連続的にくっついて層を成す、いわゆる気泡層が形成されることが知られている。そのため、気泡層に覆われた風波気液界面を通じた熱輸送機構を明らかにし、信頼性の高い気液間熱輸送モデルを構築することは重要である。そこで本研究では、実験および数値計算手法を使用して、さまざまな濃度の気泡層を作成し、気泡層の気液間熱輸送におよぼす影響について検証することを目的とした。その結果、気泡層が気液界面を通しての運動量および熱輸送に影響を及ぼすことを明らかとした。さらに、気泡層の濃度が変化した場合に、高風速時には波高が変化する可能性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回の科研費研究を通じて、台風強度の推定精度を向上させるために必要な気液間熱輸送モデルの検証が進展し、その成果の一部は査読付き英語論文などにて発表されたことから、社会的意義は大きい。さらに、本科研費プロジェクトは、新しい大型の科学研究プロジェクトへとつながりを発生させた。以上より、本科研費プロジェクトの学術的・社会的に大きな意義を持つといえる。

研究成果の概要（英文）：It is known that a bubble layer is formed on the sea surface in a high-speed wind field. It is, therefore, important to clarify the heat transport mechanism through the wind-wave gas-liquid interface covered by the bubble layer and to construct a reliable air-water heat transport model. The purpose of this study was to create bubble layers of various concentrations using experiments and numerical calculation methods, and to verify the effects of the bubble layers on air-water heat transport. The results revealed that the bubble layer affects momentum and heat transport across the air-water interface. Furthermore, we found that the wave height may change at high wind speeds by the bubble layer.

研究分野：流体工学

キーワード：熱輸送 気泡層 乱流輸送

1 . 研究開始当初の背景

近年、大型化および頻発化する台風・ハリケーン等の熱帯低気圧は強風・大雨・高潮などを引き起こし、洋の東西を問わず世界各国の人・社会・経済に甚大な被害を与えている。これらの被害を最小に抑えるためには、台風を含む気象予測モデルを用いて台風の進路および強度(つまり最大風速)を正確に予測する必要がある。しかしながら、ここ 20 年間、台風の進路予測はかなりの精度で予測可能になりつつあるが、台風の強度予測の精度は全く改善されていない。これは、周辺の気圧配置や偏西風により決まる台風の進路の予測が容易であるのに対し、台風の強度は台風下の海洋表面を通しての熱および運動量の輸送量に大きく支配され、その予測およびモデル化が非常に難しいためである。ごく近年、研究代表者ら・ロシア科学アカデミーの二つの研究グループは、高速気流場の海表面を通しての熱輸送量の風速依存性が、風速 30m/s 以下の通常の風速域における依存性と全く異なる、つまり、室内実験モデル曲線が風速 30m/s を境に折れ曲がるという新事実を明らかにしている。さらに、風速 30m/s 以上の高速気流場の海表面では、激しい波しぶきが発生し、気泡同士が連続的にくっついて層を成す、いわゆる気泡層に完全に覆われることが観察されている。このような輸送機構を説明する一つのモデルとして、海洋物理分野では空気と水の間隔的な物性をもつ気泡層モデルが提案されている。このモデルでは、単なる気液界面を通過する場合に比べ、気泡層の存在により、熱に関する界面抵抗が見かけ上減少し、そのために気泡層の存在する気液界面を通しての熱輸送量が大きくなると、説明される。しかしながら、本気泡層モデルは単なる一説であり実験的検証は一切なされていない。また、気液界面に分厚い気泡層が存在する場合は、発泡飲料などの水面を除き一般に見かける機会はなく、流体工学的な検証も十分ではない。

2 . 研究の目的

本研究では、高速気流による超高密度気泡層の生成機構、およびその気泡層を通しての熱輸送機構を、実験的手法および計算的手法を用いて解明することを目的とする。具体的には、(1 , 2) 気泡層が気液界面を通しての熱輸送におよぼす影響を実験的および計算的に検証し、さらに、(3) 高速気流場において砕波による超高密度気泡層の生成機構を実験的に明らかにすることを目的とする。

3 . 研究の方法

主たる 3 つの研究、(1 , 2) 気液間熱輸送におよぼす気泡層の影響の実験・計算的検証、(3) 高速気流場における気泡層生成実験、の方法について説明する。

(1) 気液間熱輸送におよぼす気泡層の影響の実験的検証

本研究では、近畿大学に備え付けてある風波水槽を使用した。本水槽のテストセクションは長さ 5 m、幅 0.3 m、高さ 0.3 m であり、水深を 0.5 m としている。なお、テストセクション入口部にはスロープを取り付けることで、入口部エッジと静止水面の高さを完全に一致させた。テストセクション末端には波の反射を防ぐために消波材を設置している。テストセクションは総ガラス製であり、上面はアクリル製である。気流の生成は軸流ファンを用いてテストセクション内に気流を流入させることによって行った。テストセクション内に濾過装置を通した水道水を貯め、高速の空気をテストセクション上部に流すことにより気液界面上に風波を発生させた。波高測定は、電極式波高計を用いてなされた。風速測定はピトー管を用いてなされた。

(2) 気液間熱輸送におよぼす気泡層の影響の計算的検証

本計算では、水および空気で構成される風波乱流場に関して、水中に初期に気泡を含む場合と含まない場合との計 2 ケースの流動場に関しての計算を実施した。混相流の計算モデルには VOF 法を用いた。数値解法には非定常計算に適した PISO 法、離散化において時間は有界二次精度陰解法、圧力は PRESTO!、運動量、乱流運動エネルギー、比散逸速度は QUICK、体積分率には Compressive を用いた。計算領域は主流方向×高さ方向×スパン方向を 100×50×48mm とした。計算領域における格子には、主に直交六面体格子を用い、一部に四面体格子を用いた。格子数は合計で約 65 万点とした。高さ方向の中間部分より上側に空気、下側に水を満たしたケースと水中に気泡を 30 個含んだケースを設定し、壁面はスリップ境界条件を設定した。この計算領域内の高さ方向の中間部分より上側片方から主流方向へ風速 1.0m/s の空気を流し込んだ。時間刻みは 0.4 ミリ秒とし、合計 4 秒間の計算を行った。

(3) 高速気流場における気泡層生成実験

本研究では、九州大学・応用力学研究所に備え付けてある台風シミュレーション水槽が使用された。本水槽は、超大型の吹き出し式風波水槽であり、上流側から送風機、テストセクション、液滴除去装置から構成され全長 64 m である。気流・液滴速度差を利用

した液滴除去装置により大型の液滴を除去した。その他の構造や実験における測定技法は、(1)で説明した近畿大学の風波水槽と類似である。

4. 研究成果

主たる3つの研究, 主たる3つの研究, (1, 2)気液間熱輸送におよぼす気泡層の影響の実験・計算的検証, (3)高速気流場における気泡層生成実験, の結果について説明する。

(1) 気液間熱輸送におよぼす気泡層の影響の実験的検証

本研究では、気泡層の濃度を任意に変化させた場合の気液間輸送量測定技法の開発を目的とする。具体的には、風波水槽の液側界面近傍に取り外し可能な固体壁を設置した。固体壁が設置された場合には、それらが設置されない場合に比べて、風波は減衰し、波高は最大風速の場合の1/10となることが確認された。これは、粗面壁上の乱流境界層に関する流体力学的知見を考慮すると、粗度要素高さが1/10となったことから粗度長さも1/10程度になることが推察される。さらに、水面下への固体壁設置により波高発達が抑制されると同時に水面における気泡層の発達も抑制される傾向が観察された。通常風速域においては、障害物を設置する深さを深くすると、熱輸送係数と抗力係数との比が上昇した。これは、熱輸送係数が水面形状に依存しないものの、抗力係数は水面形状に依存するためである。一方で、高風速域においては、設置深さを深くすると、熱輸送係数と抗力係数との比が減少した。これは、気液界面を通しての運動量輸送と熱輸送の機構が、通常風速域と高風速域では大きく異なることを示している。

(2) 気液間熱輸送におよぼす気泡層の影響の計算的検証

本研究では、気液界面を通しての運動量・熱輸送機構の解明の基礎研究として、風シアにより発達する荒れた水面挙動を再現可能な混相流に関する数値計算コードの開発に成功した。水中の気泡の有無が風波乱流場へ及ぼす影響を調査するため、気泡を含むケースと気泡を30個含むケースにおいて主流方向に対する速度(左図)および温度(右図)の分布を可視化した。次に、気泡の有無による風波表面を通しての運動量輸送量および顕熱輸送量を定量的に評価するため、運動量輸送量は高さ方向に対するレイノルズ応力分布、顕熱輸送量は高さ方向に対する乱流熱流束分布を算出して評価した。レイノルズ応力分布と乱流熱流束分布をそれぞれ算出した結果、気泡を含むケースは気泡を含まないケースと比較して高さ方向のレイノルズ応力および乱流熱流束の勾配が緩やかとなった。以上の解析の結果、気泡の有無は風波表面を通しての運動量輸送量および顕熱輸送量に影響を与えることが明らかとなった。

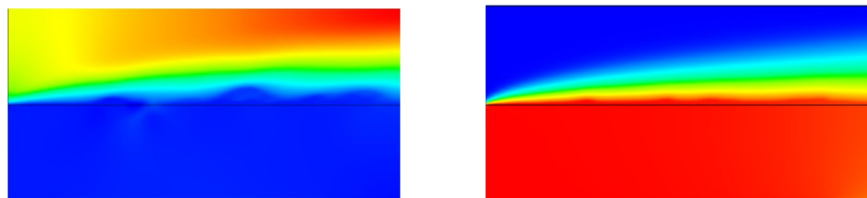


図. (左) 気泡を含まない風波乱流場における主流方向流速のコンター図。横軸は主流方向、縦軸は高さ方向を示し、左から右へと流れる。計算開始から1.2秒後の分布である。赤・青色はそれぞれ高速・低速を表す。(右) 気泡を30個含む風波乱流場における主流方向に対する温度のコンター図。計算開始から3.4秒後の分布を示している。赤・青色はそれぞれ高温・低温を表す。

(3) 高速気流場における気泡層生成実験

本研究では、高風速の風シアにより水面波が形成される風波乱流場において、異なる濃度の気泡層を生成する技法の開発に取り組んだ。具体的には、九州大学・台風シミュレーション水槽を使用して、希薄な界面活性剤溶液もしくは界面活性剤を含まないフィルタ水を用い、その水面に風速20m/s程度の風を吹かせる気泡層生成実験を実施した。濁度計を用いて、液中に形成される気泡の濃度の指標となる濁度を測定したところ、わずかな界面活性剤の混入により濁度が数十倍となることを明らかとした。これは、界面活性剤混入と強い風シアの影響により、界面活性剤溶液の場合には多くの気泡が生成され、気泡層の濃度を任意に調整可能であることを示している。さらに、このような気泡層の濃度を变化した場合に、高風速時には波高が変化する可能性を確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Naohisa Takagaki, Santa Sasaki, Naoya Suzuki, Soichiro Goda, Yuliya Troitskaya, Satoru Komori	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of wind wave suppression method for air-water momentum transport at extremely high wind speeds	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Marine Science and Technology Society	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Naoki Kurihara, Naohisa Takagaki
2. 発表標題 Calculation of layer containing bubbles
3. 学会等名 The 3rd Joint Symposium on Advanced Mechanical Science and Technology（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西野光、高垣 直尚
2. 発表標題 多数の気泡の存在する水面を通しての熱輸送の直接数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会2023年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 吉村怜、高垣 直尚
2. 発表標題 数値計算による風シアにより発達する荒れた水面の再現
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会2022年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西海和希, 林凌大, 佐々木燦汰, 西谷幸祐, 高垣直尚, 鈴木直弥
2. 発表標題 高風速域での砕波を伴う大気・海洋間運動量輸送量の測定手法
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 西海和希, 高垣直尚
2. 発表標題 微粒化を伴う気液界面を通しての運動量輸送機構の解明
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会2021年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

兵庫県立大学大学院工学研究科機械工学専攻流体工学研究室ホームページ https://www.eng.u-hyogo.ac.jp/faculty/takagaki/index.html
--

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