

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03953

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運動量輸送機構の解明

研究課題名(英文) Momentum transfer mechanisms across high-concentrated foam 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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、気泡層を伴う水面を通しての運動量輸送機構を解明することを目的とする。実験では気流水槽・ポンプ・造波装置・界面活性剤が使用され、様々な状態の風波乱流場において運動量輸送量・波高等が測定された。その結果、高精度な運動量輸送量測定技法を開発することに成功した。また、高速気流場の水面では、気泡同士が連続的にくっついた気泡層に覆われることが観察された。さらに、気泡層は吹送距離の増加に従って増加すること、風波の平衡エネルギーレベルは吹送距離によらず(気泡層厚さによらず)波速および風速により一意にまとまること、気泡層や気液界面を通しての運動量輸送量への液流れの影響は小さい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

本研究では、大型水槽等を使用した複数の室内実験を実施し、気流場と水面波の解析を行う事で、気泡層を伴う水面を通しての運動量輸送機構の一端を明らかにするに至った。さらに、風波の平衡エネルギーレベルについての新たな傾向を明らかにした。これらの学術的知見は、高精度の運動量輸送モデルを確立することに寄与し、ひいては、台風強度の予測精度の向上を実現し社会的価値を生み出すことが期待される。

研究成果の概要(英文)：It is of great importance to predict the development and decay of tropical cyclones accurately in order to minimize loss of life and damage, since tropical cyclones wreak catastrophic damages to a local society. The purpose of this study is to investigate the mechanism of the momentum transfer across the bubbly wavy air-water interface at extreme high wind speed. The results show that; (1) the foam layer is developed on the water interface by high wind shear; (2) the equilibrium range constant of the wind waves depends on the phase velocity and wind speed; and (3) the effects of the liquid current on the foam-layer development and air-water momentum transfer is negligibly small.

研究分野：流体工学

キーワード：運動量輸送 風波 気泡層

### 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。ごく近年、応募者・米国マイアミ大学・ロシア科学アカデミーの三つの研究グループは、高速気流場の海表面を通しての運動量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、図1において実線で表されるモデル曲線が風速 30m/s を境に折れ曲がること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、激しい波しづきが発生し、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。流体力学分野で培われてきた粗面壁上の境界層モデルを考慮すると、このような高風速域における運動量輸送量の風速依存性の顕著な変化は、水面が崩壊し、超高密度の気泡層の生成やそれに伴う界面形状の平滑化による壁面でのスリップ効果により引き起こされているものと考えられる。したがって、台風強度を正確に予測するためには、荒天下における超高密度気泡層の生成機構とその気泡層を通しての運動量輸送機構を解明することが重要であるものの、これらの生成・輸送機構の複雑さ故に、本機構は未だに解明されていない。

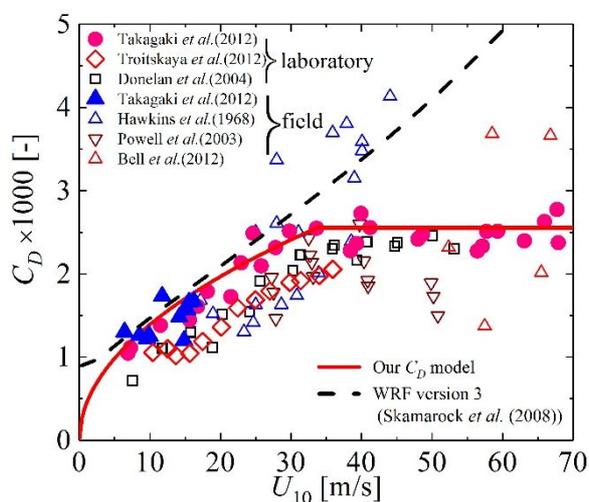


図1：風速  $U_{10}$  と抗力係数  $C_D$  の関係。  $U_{10}$ ：海上 10m の高さの風速。  $C_D$ ：風速の 2 乗で除された運動量輸送量を示す抗力係数。

### 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運動量輸送機構を解明することを目的とする。また、吹送距離の影響・液流の影響についても調査を行う。さらに、界面活性剤を使用した場合の風波乱流場を作成し、気泡層の影響を検証する。

### 3. 研究の方法

本研究では、長さ・幅・最高風速などが大きく異なる 4 つの高速気流水槽および 1 つの低速気流水槽を使用した。高速気流水槽はそれぞれ京都大学・九州大学・近畿大学・Institute of Applied Physics, Russian Academy of Science (IAPRAS) の 4 つの研究機関に設置されており、京都大学の水槽は、総ガラス製で長さは 15m、幅 0.8m、風洞高さ 0.8m、水深 0.8m であり、最高風速は 68m/s であった。九州大学の水槽は、長さは 54m、幅 1.5m、風洞高さ 0.7m、水深 1.3m であり、最高風速は 37m/s であった。近畿大学の水槽は、長さは 6.5m、幅 0.3m、高さ 0.3m、水深 0.5m であり、最高風速は 37m/s であった。低速気流水槽は新たに兵庫県立大学に設置したものであり、長さ 1m であり、風速約 5m/s の条件で実験を実施した。また、京大水槽では、フェッチを人工的に伸ばし気泡厚さを変化させるロングフェッチ法が使用された。兵庫大・京大水槽では、同じフェッチ位置において人工的に気泡層厚さを厚くするために界面活性剤が使用された。近大水槽では、人工的に液流流速を変化させるためにポンプが使用された。なお、過去に京大水槽にて採取されたデータが使用された。気流は、主にピトー管・熱線流速計で測定された。波高は、主に電極式波高計により測定された。気液界面を通しての運動量輸送量は、主に新たに開発された対数後流プロファイル法および運動量収支法により測定された。なお、界面活性剤を使用しない場合には、気泡層の厚みは 0 - 10cm の間で変化することを確認した。また、界面活性剤を使用する場合には京大水槽では水槽全体が気泡層となることを確認し、兵庫大水槽では厚さ 1cm の気泡層を作成している(図2は九大水槽および兵庫大水槽での様子)。



図 2 : (左) 九大水槽および (右) 兵県大水槽における風波と気泡層の様子 .

#### 4 . 研究成果

九大および近大の高速気流水槽を使用し、気液界面を通しての運動量輸送量を測定するための運動量収支法および対数後流プロファイル法が開発された。運動量収支法では、4 本の水位計を使用し水槽の 2 点における平均水位および平均圧力の測定が行われた。図 3 左に 4 本の水位計中の平均水位の風速依存性を示す。なお、 $h_{w1}$ 、 $h_{w2}$  はそれぞれ水槽上流における平均水位、水槽下流における平均水位であり、 $h_{w12}$ 、 $h_{w22}$  はそれぞれ水槽上流における平均水位、水槽下流における平均水位であるが、水位計気側を大気開放した場合の水位である。図より、 $h_{w1} < h_{w2}$  より、水槽中は順圧力勾配であること、 $h_{w1} < h_{w12}$  より、水槽中は加圧状態であることがわかる。これらの 4 つの平均水位の値のみから、運動量収支法を用いて水面にかかる応力（摩擦速度）を推定した。図 3 右に、本運動量収支法により測定された摩擦速度を上向き三角で示す。また、同様の手法で九大水槽にて測定された摩擦速度を下向き三角で示す。図より、近大水槽にて測定された値は、中高風速 ( $7\text{m/s} < U_\infty$ ) にて過去の実験曲線 (Takagaki et al., 2012) と概ね一致することがわかる。一方、近大水槽の低風速の値や九大水槽での摩擦速度は発散が激しく、十分な測定精度を確保することができなかった。これは、アンサンブル数不足に由来すると考えられる。また、運動量収支法とは全く異なる測定手法である対数後流プロファイル法を確立した。本手法は Troitskaya et al. (2012) が風波気液界面を通しての運動量輸送量測定法として提案したものであり、本研究で扱うような超高風速域では界面近傍の対数領域が観察できない点を克服している。具体的には、低風速では対数領域とその上方に存在する後流領域の両方の領域が観察可能である点を利用し、高風速域では気流分布の相似則が成り立つ点を仮定して、界面にかかる応力を推定する手法である。本手法により、近大および九大水槽にて測定された摩擦速度をそれぞれ丸および四角プロットにて表す (図 3 右図)。図より、近大および九大水槽における値はよく一致することがわかる。以上より、気液界面を通しての運動量輸送量が気泡層の厚さによらない可能性が確認された。なお、図 3 右図をより詳細に観察すると、京大水槽と近大水槽において運動量収支法により測定された摩擦速度は同じ一様風速  $U_\infty$  に対して最大で 2 割程度異なる。この差異が測定誤差によるものか気泡層の生成の違いによるものかは新たな課題である。また、気泡層の厚さを人工的に厚くする界面活性剤実験を兵県大水槽で実施した。その結果、界面活性剤を使用した場合には使用しない場合に比べて界面近傍の風速が抑制されることを確認した。これは、気泡層が水面に重畳することにより気液間運動量輸送が促進されたためと考えられる。

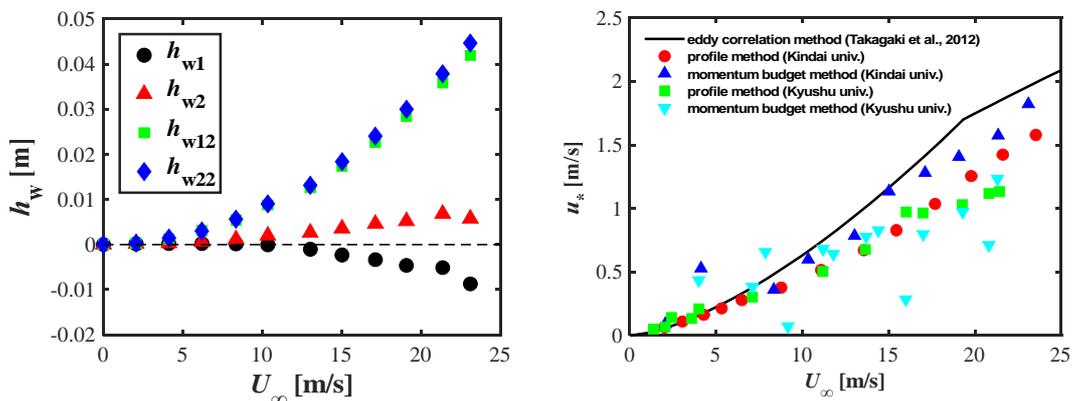


図 3 : (左) 一様風速  $U_{1\infty}$  と平均水位の関係 . (右) 一様風速  $U_{1\infty}$  と摩擦速度  $u^*$  の関係 . ここで、摩擦速度は密度で除され 0.5 乗とされた運動量輸送量を示す .

波や気泡層の生成・発達に及ぼす吹送距離の影響を検討するために、九大水槽を用いて吹送距離が 6.5m、20m、35m の地点において、風速・波高・運動量輸送量の測定を行い、吹送距離が 6.5m での京大水槽を使用した測定結果との比較を行った。その結果、気泡層は吹送距離の増加に従って増加すること、風波の平衡エネルギーレベルは吹送距離によらず (気泡層厚さによらず)

波速および風速により一意にまとまることを明らかにした。さらに、気泡層の生成と運動量輸送量の変化に及ぼす液流れの影響を検討するために、水槽大きさが風洞大きさよりも非常に大きい IAP RAS 水槽を用いて、風速・波高・運動量輸送量の測定を行い、水槽大きさが風洞の大きさと同じ京大水槽を使用した測定結果との比較を行った。つまり、IAPRAS 水槽は開放水槽のため、気液界面近傍の液流および液バルク流れは共に気流により引きずられ順方向流れを形成するが、京大水槽では閉鎖水槽のため、液バルク流れは順方向の液界面流れを補償するため逆方向流れとなる性質があり、これらの液流れの影響についての検証を行った。その結果、気泡層や気液界面を通しての運動量輸送量への液流れの影響は小さいことを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 1件）

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Takagaki Naohisa, Takane Keita, Kumamaru Hiroshige, Suzuki Naoya, Komori Satoru                        | 4. 巻<br>84            |
| 2. 論文標題<br>Laboratory measurements of an equilibrium-range constant for wind waves at extremely high wind speeds | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>Dynamics of Atmospheres and Oceans   | 6. 最初と最後の頁<br>22 ~ 32 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1016/j.dynatmoce.2018.08.003   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|   |                   |
|---|-------------------|
| 1. 著者名<br>Takagaki Naohisa, Suzuki Naoya, Takahata Shunsaku, Kumamaru Hiroshige                     | 4. 巻<br>61        |
| 2. 論文標題<br>Effects of air-side freestream turbulence on the development of air-liquid surface waves | 5. 発行年<br>2020年   |
| 3. 雑誌名<br>Experiments in Fluids   | 6. 最初と最後の頁<br>136 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1007/s00348-020-02977-9   | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>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<br>-         |

|   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Takagaki Naohisa, Suzuki Naoya, Troitskaya Yuliya, Tanaka Chiaki, Kandaurov Alexander, Vdovin Maxim | 4. 巻<br>16                |
| 2. 論文標題<br>Effects of current on wind waves in strong winds   | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>Ocean Science   | 6. 最初と最後の頁<br>1033 ~ 1045 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.5194/os-16-1033-2020  | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 2件／うち国際学会 3件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>上村友祐、高垣直尚、鈴木直弥                                     |
| 2. 発表標題<br>風波水槽での吹送距離延長のための気流ループ法の確立 - 気流・波ハイブリットループの確立に向けて - |
| 3. 学会等名<br>海洋理工学会春季大会   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>高垣直尚                    |
| 2. 発表標題<br>台風下の海水面を通しての運動量・スカラ輸送現象 |
| 3. 学会等名<br>第2回先進的ながれ研究会（招待講演）      |
| 4. 発表年<br>2019年                    |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>田中千晶、鈴木直弥、高垣直尚、根田昌典                    |
| 2. 発表標題<br>風波水槽での大気・海洋間運動量輸送における表層流の影響の検討に向けた初期実験 |
| 3. 学会等名<br>海洋理工学会秋季大会                             |
| 4. 発表年<br>2019年                                   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>高垣直尚、鳥居元彰、高見健大朗             |
| 2. 発表標題<br>台風の強度予測技術の開発                |
| 3. 学会等名<br>企業・大学・学生マッチングin Himeji 2019 |
| 4. 発表年<br>2019年                        |

|                                |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名<br>鳥居元彰、高垣直尚、河南 治、本田逸郎 |
| 2. 発表標題<br>気液自由界面の微粒化の観察       |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会関西支部学生発表会     |
| 4. 発表年<br>2020年                |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>高見健大朗、高垣直尚              |
| 2. 発表標題<br>高風速下の気液界面を通しての運動量輸送量の測定 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会関西支部学生発表会         |
| 4. 発表年<br>2020年                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>N. Takagaki   |
| 2. 発表標題<br>Imaging techniques in field of fluid mechanics and applications                 |
| 3. 学会等名<br>7th International conference on informatics, electronics & vision (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>高垣直尚、高根慧太、高畑俊作、岩野耕治、鈴木直弥、小森悟 |
| 2. 発表標題<br>強風速下における抗力係数と風波スペクトルの評価      |
| 3. 学会等名<br>日本流体力学会 年会2018               |
| 4. 発表年<br>2018年                         |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>磯川橘花、高根慧太、高垣直尚          |
| 2. 発表標題<br>高風速時の気液界面を通しての運動量輸送量の測定 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会関西支部学生発表会         |
| 4. 発表年<br>2019年                    |

|                              |
|------------------------------|
| 1. 発表者名<br>清水悠平、高垣直尚         |
| 2. 発表標題<br>風波水槽における気流ループ法の開発 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会関西支部学生発表会   |
| 4. 発表年<br>2019年              |

|                              |
|------------------------------|
| 1. 発表者名<br>高根慧太、高垣直尚         |
| 2. 発表標題<br>界面活性剤の混入による波高減衰実験 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会関西支部総会      |
| 4. 発表年<br>2019年              |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Temma Onishi, Naoya Suzuki, Naohisa Takagaki  |
| 2. 発表標題<br>Measurement method of the wind stress at high wind speeds in laboratory experiments |
| 3. 学会等名<br>2020 Ocean Sciences Meeting (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Chiaki Tanaka, Naoya Suzuki, Naohisa Takagaki, Yuliya Troitskaya, Satoru Komori, Alexander Kandaurov, Maxim Vdovin, Masanori Konda |
| 2. 発表標題<br>Effects of the sea surface current on the growth of wind wave in laboratory experiment   |
| 3. 学会等名<br>2020 Ocean Sciences Meeting (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>合田総一郎、高垣直尚、鈴木直弥、松田景吾、小森悟、Yuliya Troitskaya |
| 2. 発表標題<br>強烈な砕波を伴う気液界面における運動量輸送量の測定手法の構築             |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会 2020年度年次大会                          |
| 4. 発表年<br>2020年                                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>合田総一郎、高垣直尚、鈴木直弥、松田景吾、小森悟、Yuliya Troitskaya |
| 2. 発表標題<br>風波水槽での高風速時の砕波を伴う大気・海洋間運動量輸送の評価             |
| 3. 学会等名<br>日本海洋理工学会 2020年度秋季大会                        |
| 4. 発表年<br>2020年                                       |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>佐々木燦汰、高垣直尚、鈴木直弥          |
| 2. 発表標題<br>強風時の大気・海洋間運動量輸送に及ぼす浅瀬の影響 |
| 3. 学会等名<br>日本海洋理工学会 2020年度秋季大会      |
| 4. 発表年<br>2020年                     |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>佐々木燦汰、高垣直尚、鈴木直弥                 |
| 2. 発表標題<br>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の構築 |
| 3. 学会等名<br>波浪研究会                           |
| 4. 発表年<br>2021年                            |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>三浦徹馬、高垣直尚                      |
| 2. 発表標題<br>高風速下における水面を通しての運動量輸送量の測定       |
| 3. 学会等名<br>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<br>2021年                           |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

|  |
|--|
| 兵庫県立大学 研究者データベース『高垣直尚』<br><a href="http://kyoin.u-hyogo.ac.jp/staff/eng/takagaki/">http://kyoin.u-hyogo.ac.jp/staff/eng/takagaki/</a><br>兵庫県立大学 研究者データベース『高垣直尚』<br><a href="http://kyoin.u-hyogo.ac.jp/staff/eng/takagaki/">http://kyoin.u-hyogo.ac.jp/staff/eng/takagaki/</a> |
|--|

|                           |                       |    |
|---------------------------|-----------------------|----|
| 6. 研究組織                   |                       |    |
| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|