

令和 6 年 6 月 15 日現在

機関番号：24506

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2019～2023

課題番号：19KK0087

研究課題名（和文）強烈な台風下の海面を通しての熱・運動量輸送機構の解明とそのモデル化

研究課題名（英文）Investigation and modelling of air-sea heat and momentum transfer under strong hurricane

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） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：台風など暴風下における海面を通しての熱・運動量輸送機構を明らかにし、信頼性の高い輸送モデルを構築することは、台風の強度を正確に見積もるうえで極めて重要である。そこで本研究では、世界に数台しかない台風シミュレーション水槽を保有するロシアの海外共同研究者と協力し、台風下の強烈な砕波を伴う海面を通しての熱・運動量輸送モデルを新たに構築することを目的とした。複数の室内実験の結果、気側バルク乱流・液側流れ・吹送距離が気液界面を通しての運動量輸送機構を解明し、これらの影響をも加味した輸送モデルを確立した。さらに水面形状変化が気液界面を通しての熱輸送におよぼす影響を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回の国際共同研究プロジェクトを通して、台風強度の推定精度を向上させるために必要な気液間運動量・熱輸送モデルを開発し、複数の査読付き英語論文で発表を行うに至ったことから、その社会的意義は大きい。さらに、本科研費プロジェクトは、国際共同研究グループばかりでなく国内の共同研究グループの関係性を強化し、新しい複数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、本国際共同研究プロジェクトは、学術論文および無形の形で大きな成果を出しており、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 extremely important to clarify the heat and momentum transport mechanism through the sea surface during stormy winds such as typhoons, and to construct a reliable transport model in order to accurately estimate the intensity of typhoons. Therefore, in this study, we collaborate with overseas collaborators in Russia, to construct a new model for heat and momentum transport through the sea surface. As a result of multiple laboratory experiments, we clarified the momentum transport mechanism through the gas-liquid interface due to air-side bulk turbulence, liquid-side flow, and blowing distance (fetch), and established a transport model that takes these effects into account. Furthermore, we verified the effect of changes in water surface shape on heat transport through the gas-liquid interface.

研究分野：流体工学

キーワード：台風 風波 運動量輸送 熱輸送 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限に抑えるためには、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、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ものの、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運動量および熱の輸送量などに大きく支配され、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、本共同研究グループ（日本）、海外共同研究者グループ（ロシア）そして米国マイアミ大学のグループは、台風下の海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ことを明らかにしている。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、海面が激しく崩壊し、それに伴う海面変形および波しぶきと気泡の巻き込み現象によって引き起こされるものと考えられる。したがって、台風等の強度を正確に予測するためには、荒天下の激しい波しぶきや気泡の巻き込みを伴う波の砕波機構を解明し、砕波強度と海面を通しての熱・運動量輸送量の関係を明らかにすることが必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究課題では、主として（1）気流の乱れおよび液流流れが水面を通しての運動量輸送におよぼす影響を調査し、（2）水面波の形状と水面を通しての熱輸送量との関係を明らかにし、さらに、（3）高風速域における吹送距離の違いが運動量輸送におよぼす影響を調査することを目的とする。風速 30m/s 以上を達成可能な台風シミュレーション水槽（図 1）を使用する室内実験手法を主たる研究手法として選択した。

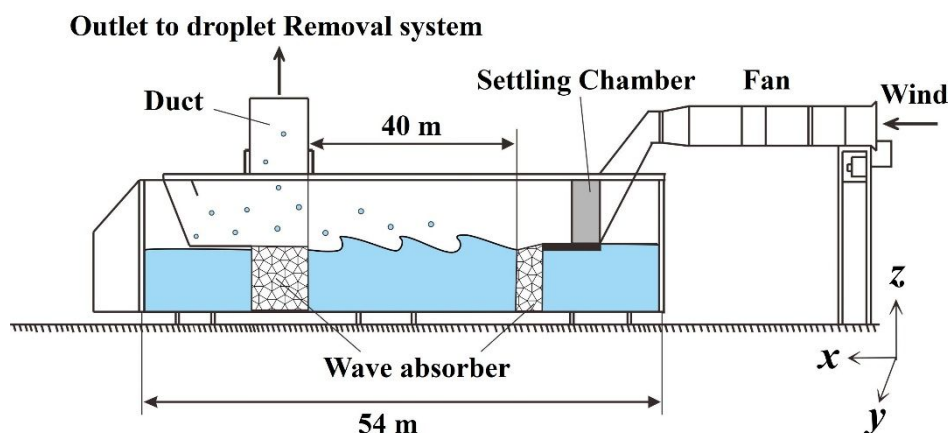


図 1：台風シミュレーション水槽

3. 研究の方法

本研究では、主に九州大学・応用力学研究所・海洋環境シミュレーション実験棟(Wind-wave Research Laboratory, Research Institute of Applied Mechanics, Kyusyu University)に備え付けてある台風シミュレーション水槽、海外共同研究者であるロシア学術アカデミー・応用物理研究所の Troitskaya 教授の所有するシミュレーション水槽、近畿大学に設置された小型風波水槽が使用された。九州大学の台風シミュレーション水槽は、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。テストセクション入口部は幅 1.5 m、高さ 0.7 m である。テストセクションは長さ 54 m、幅 1.5 m、高さ 2 m であり、気流部高さは 0.74 m、水深を 1.26 m とした。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。テストセクションの片側側面は透明のガラス製であり、上面は木製、その他の側面および底面は金属製である。気流の生成は軸流ファンを 45 kw のインバータ方式 3 相モータにより駆動させることで、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圧力式急速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。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。応用物理研究所の台風シミュレーション水槽は、大型水槽に半水没型の吹き出し式風波水槽である。テストセクションは長さ 10 m、幅 0.4 m、高さ 0.4 m である。近畿大学の小型風波水槽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. 波高測定は, すべての水槽において電極式波高計を用いてなされた. 風速測定は, 粒子画像測定機(いわゆる PIV) やピトー管や熱線流速計を用いてなされた. 液流速測定では, 電磁流速計が使用された. 運動量輸送量の測定では, プロファイル法や運動量収支法が使用された.

4. 研究成果

4 つの主たる研究成果, つまり, (1) 気側乱流が風波の発達におよぼす影響, (2) 液側のバルク流れが気液界面を通しての運動量輸送におよぼす影響, (3) 水面形状の変化が気液界面を通しての熱輸送におよぼす影響, (4) 高風速域における吹送距離の違いが運動量輸送におよぼす影響, について以下の通り報告する.

(1) 気側乱流が風波の発達におよぼす影響

気側乱流の程度を変化させるために, 風洞上流部に格子を取り付け, いわゆる格子乱流を伴う風波場を形成した. 使用した格子としては, 五目状に格子が配置された規則格子とフラクタル構造を保有するフラクタル格子の 2 ケースとした. 実験では, 格子なしの場合, 規則格子の場合, フラクタル格子の場合の合計 3 ケースについて, 風速および水位変動が測定された. 風速に関しては PIV 測定され, 乱流変動およびレイノルズ応力が観察された. 渦相関法により, 水面を通しての運動量輸送量も推定された. その結果, 規則格子およびフラクタル格子により異なる風速変動を持つ乱流格子気流を生成することが可能であることが分かった. また, 規則格子およびフラクタル格子により生成された乱流は異なる風スペクトルを持つが, 格子を用いた場合の全ての水位変動スペクトルは格子を用いない, 風によって生じる純粋な風波の水位変動スペクトルと一致した. さらに, ピーク周波数よりも高い周波数では, 格子の有無に関わらず, これらの水位変動スペクトルは周波数に対し-4 の乗法則に従うことが分かった. さらに, 格子の有無に関わらず, 風波の特性, フェッチ法, 分散関係や鳥羽の $3/2$ 乗則を含むすべてのケースにおいて, 波の発達には摩擦速度が重要であることが分かり, 対して, 境界層外の気側風速変動のスペクトルの差異は波の発達には重要ではないことが分かった. したがってこれらの結果から, 一様流領域の乱流成分は波の発達には影響を与えないことが示された.

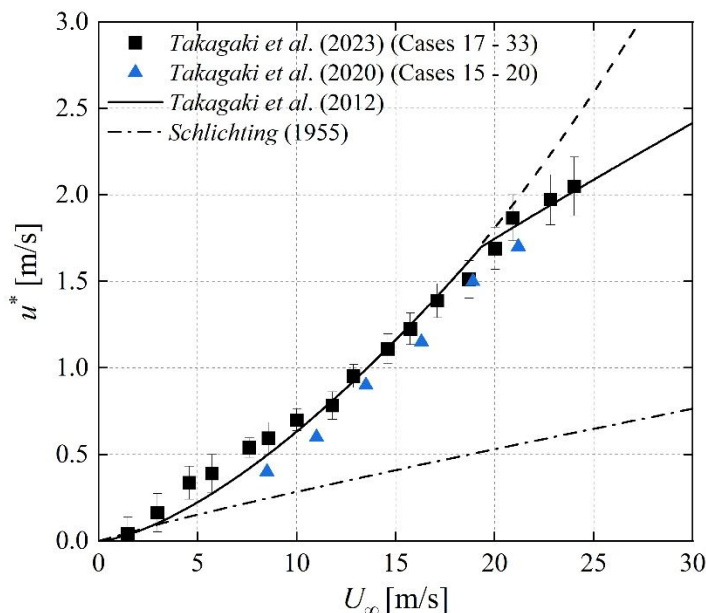


図 2: 風洞内の一様風速 U_∞ と界面にかかる摩擦速度 u^* との関係

(2) 液側のバルク流れが気液界面を通しての運動量輸送におよぼす影響

一般に通常の風速域において, 水面波により液側界面近傍には吹送流が発生する. さらに, 液側バルク流れの影響も含めて水面波はドップラーシフトすることが知られている. しかし, これらの影響は高風速域では検証されていない. そこで, 風速 30 m/s 以上の高風速域において波の発達および気液界面を通しての運動量輸送(図 2) が液側バルク流れの影響をいかに受けるか, について検証を行った. 30 m/s 以下の通常風速域では, 波の周波数, 波長や位相速度は風速および吹送距離に依存し, 一般的な風速においてドップラーシフトの影響が確認された. すなわち, 有義波は海流によって加速される. また, 位相速度は液流速と位相速度との和で表すことができ, それは深水波の分散関係によって推定されることが確認された. 次に, 30 m/s 以上の高風速域においても, 30 m/s 以下の通常風速域と同様に, ドップラーシフトが観察された. これは, 通常風速域だけで

なく、高風速域における砕波を伴う風波も海流によって加速され、ドップラーシフトにより説明されることを示している。

(3) 水面形状の変化が気液界面を通しての熱輸送におよぼす影響

水面形状および水面近傍に気泡層が存在するかどうかは、気液界面を通しての運動量・熱輸送に大きな影響を与える可能性がある。そこで本研究では、水面形状および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またはネットを設置した。固体壁またはネット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、ネット設置深さを深くすると、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、ネット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。さらに、高風速域では熱輸送係数は水面形状に強く依存しており、高風速域で発生する砕波現象によって増加することを示唆している。

(4) 高風速域における吹送距離の違いが運動量輸送におよぼす影響

本研究では、高風速域において運動量収支法を用いて摩擦速度を測定した。運動量輸送量については、四連水位計実験装置を使用した本測定結果と他の手法を用いた既往研究の結果の間で良い関係が確認された。長い吹送距離における抗力係数（吹送距離 20m）は短吹送距離（4.5 m や 6.5 m）の場合と同様に風速の増加に従い徐々に増加していき、極めて高い風速域では一定値をとる傾向（Takagaki et al., 2012 と同様のレジームシフト）が確認された（図 2）。また、非常に弱い関係ではあるが、抗力係数が吹送距離に依存しない関係をもつ可能性も確認された。今後は、標準的な風速域における海洋観測値は多く確認されている一方で、極めて高い風速域での測定結果は限られていることから、本関係を実海洋に適用するため、将来的には本水槽実験の最大吹送距離は 20m 以上のより長い吹送距離での海洋観測が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Naohisa Takagaki, Naoya Suzuki, Koji Iwano, Kazuki Nishiumi, Ryota Hayashi, Naoki Kurihara, Kosuke Nishitani, Takumi Hamaguchi | 4. 巻 66(1) |
| 2. 論文標題 Fetch effects on air-sea momentum transport at very high wind speeds | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal | 6. 最初と最後の頁 139-152 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/21664250.2023.2244751 | 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 - |

| | |
|---|-----------------|
| 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 |

| | |
|---|-------------------|
| 1. 著者名 Takagaki Naohisa, Suzuki Naoya, Takahata Shunsaku, Kumamaru Hiroshige | 4. 巻 61 |
| 2. 論文標題 Effects of air-side freestream turbulence on the development of air-liquid surface waves | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Experiments in Fluids | 6. 最初と最後の頁 136 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00348-020-02977-9 | 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 Takagaki Naohisa, Suzuki Naoya, Troitskaya Yuliya, Tanaka Chiaki, Kandaurov Alexander, Vdovin Maxim | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Effects of current on wind waves in strong winds | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Ocean Science | 6. 最初と最後の頁 1033 ~ 1045 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/os-16-1033-2020 | 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22件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kazuki Nishiumi, Naohisa Takagaki, Naoya Suzuki, Ryota Hayashi, Naoki Kurihara, Kosuke Nishitani, Takumi Hamaguchi |
| 2. 発表標題 Development of measurement method for momentum transport through air-water surface |
| 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 西海和希、高垣直尚、鈴木直弥、林凌大、栗原直希、西谷幸祐、濱口拓海 |
| 2. 発表標題 砕波を伴う風波気液界面を通しての運動量輸送量の高精度測定法の開発 |
| 3. 学会等名 第30回海洋工学シンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 林凌大、高垣直尚、鈴木直弥、西海和希、西谷幸祐、栗原直希、濱口拓海 |
| 2. 発表標題 高風速時における風波の平衡領域定数およびピーク拡張係数 |
| 3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第101期定時総会講演会 |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 鈴木直弥、高垣直尚、西谷幸祐、濱口拓海、西海和希、林凌大、栗原直希 |
| 2. 発表標題 高風速時の海洋波表面を通しての運動量輸送量の測定 |
| 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 栗原直希、西海和希、林凌大、高垣 直尚、鈴木直弥 |
| 2. 発表標題 高風速下における運動量フラックスの測定および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 高垣直尚 |
| 2. 発表標題 新型コロナウイルス対策と実験流体工学—マスク周りの呼吸流れを見る— |
| 3. 学会等名 本混相流学会第47回レクチャーシリーズ（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 高垣直尚 |
| 2. 発表標題 海面を通しての運動量・スカラ輸送機構に関する研究 |
| 3. 学会等名 第3回先進的ながれ研究会 |
| 4. 発表年 2021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 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 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 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 日本機械学会 2020年度年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 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 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 日本海洋理工学会 2020年度秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 佐々木燦汰, 高垣直尚, 鈴木直弥 |
| 2. 発表標題 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 日本海洋理工学会 2020年度秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 佐々木燦汰, 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の構築 |
| 3. 学会等名 波浪研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 三浦徹馬, 高垣直尚 |
| 2. 発表標題 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 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 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Uemura Yusuke, Naosisa Takagaki, Naoya Suzuki |
| 2. 発表標題 Development of the loop method on long-fetch conditions in wind wave tank |
| 3. 学会等名 2020 Ocean Sciences Meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Rikuya Maekawa, Naoya Suzuki, Naosisa Takagaki, |
| 2. 発表標題 Initial approach on the effect of component waves on drag coefficient in laboratory experiments |
| 3. 学会等名 2020 Ocean Sciences Meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

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

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

| |
|---|
| 1. 発表者名 田中千晶、鈴木直弥、高垣直尚、根田昌典 |
| 2. 発表標題 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 海洋理工学会秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

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

| |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名 鳥居元彰、高垣直尚、河南 治、本田逸郎 |
| 2. 発表標題 気液自由界面の微粒化の観察 |
| 3. 学会等名 日本機械学会関西支部学生発表会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 高見健大朗、高垣直尚 |
| 2. 発表標題 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 日本機械学会関西支部学生発表会 |
| 4. 発表年 2019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 |
|-------|---|-------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 鈴木 直弥 (Suzuki Naoya) (40422985) | 近畿大学・理工学部・教授 (34419) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 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 | 松田 景吾 (Matsuda Keigo) (50633880) | 国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門 (地球情報科学技術センター)・副主任研究員 (82706) | |
| 研究分担者 | 大西 領 (Onishi Ryo) (30414361) | 東京工業大学・学術国際情報センター・准教授 (12608) | |
| 研究分担者 | 小森 悟 (Komori Satoru) (60127082) | 同志社大学・研究開発推進機構・嘱託研究員 (34310) | |

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 |
|---------|---------|
| | |