

平成 30 年 4 月 27 日現在

機関番号：24506

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18015

研究課題名(和文) 高速気流による気液界面崩壊に伴う界面抗力減少機構の解明

研究課題名(英文) Mechanisms of drag reduction over breaking air-water interface at extremely high wind speeds

研究代表者

高垣 直尚 (Takagaki, Naohisa)

兵庫県立大学・工学研究科・助教

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)：台風の強度を正確に予測するためには、激しい砕波を伴う気液界面を通しての運動量輸送量を明らかにすることが必要不可欠である。そこで本研究では、複数の風波水槽を用いた室内実験手法により、また直接数値計算法を援用して、高風速時の激しい砕波を伴う気液界面を通しての運動量輸送機構を解明し、新たな運動量輸送モデルを構築することを目的とした。その結果、高風速時には風波の発達機構が通常の高風速域とは異なること、風波の発達に及ぼす境界層外の乱流の影響は無視できるほど小さいこと、数値シミュレーションを用いて砕波現象を再現可能であること、を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：It is of great importance to investigate the mechanisms of momentum transfer across strongly-breaking air-sea interface in order to predict the development and decay of tropical cyclones accurately. The purpose of this study is, by applying laboratory experiments with wind-wave tanks along with numerical simulations, to investigate the mechanisms of momentum transfer across strongly-breaking air-sea interface and to develop a momentum transfer model. The results show that; (1) the development of wind waves at normal wind speeds is different from that at extremely high wind speeds; (2) the effects of air-side freestream turbulence on the development of wind waves is negligibly small; and (3) the numerical simulation with Level-set/VOF method is applicable to the development of wind waves.

研究分野：流体工学

キーワード：環境流体力学 微粒化 風波 砕波 台風

### 1. 研究開始当初の背景

近年、大型化する台風等の熱帯低気圧は強風・大雨・高潮などを引き起こし、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（つまり最大風速および風速分布）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運動量および熱の輸送量に大きく支配され、その予測およびモデル化が難しいためである。ごく近年、応募者らのグループおよび米国・マイアミ大学のグループは、台風下の海洋表面を通じた運動量輸送量の風速依存性が、風速30メートル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、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、水面が崩壊し、それに伴う界面形状の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てい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気液界面を通しての運動量輸送量を明らかにすることが必要不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究では、室内実験手法を用いて、また直接数値計算法を援用して、高風速時の激しい砕波を伴う気液界面を通しての運動量輸送機構を解明し、新たな運動量輸送モデルを構築することを目的とする。具体的には、3つの実験・計算研究を実施し、(1)高風速下の砕波を伴う風波の特性量が砕波によりいかに変化するか、(2)高風速下のフィールド観測結果と室内実験結果の比較のために境界層外乱流がいかに影響を及ぼすか、(3)砕波の数値シミュレーション技術の確立、の3点の検証を行った。

### 3. 研究の方法

#### (1) 大型風波水槽でのループ法実験：

本実験では、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に備え付けてある大型風波水槽（図1）を使用した。この大型風波水槽のテストセクションは、長さ54m、幅1.5m、高さ2mである。気流は軸流ファンにより生成された。テストセクション端部には、本研究で自作した消波装置を設置した。風波実験では、平均風速をピトー管および差圧計を用いて、また波高および波長を複数台の抵抗式波高計を使用して測定した。さらに、これらの気流および波高デー

タより、砕波した気液界面にかかる抗力係数、および、砕波を特徴付ける特性量（風波スペクトルの平衡レンジ定数およびピーク拡張係数）の推定を行った。

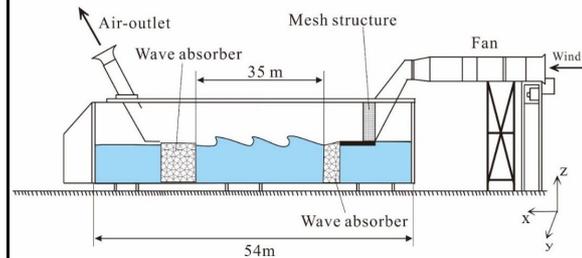


図1：大型風波水槽の概要。

#### (2) 小型風波水槽での格子乱流実験：

本実験では、近畿大学に設置した小型風波水槽（全長12.5m）を使用した。テストセクションは長さ6.5m、幅0.3m、高さ0.8mである。その他の点は九州大学の大型風波水槽と同じである。境界層外に異なる乱流変動を起こすために、二種類の格子（フラクタル格子およびレギュラ格子）を3Dプリンタなどを利用して製作し、これらの格子を小型風波水槽の入り口に設置した。格子乱流実験では、速度変動を粒子画像流速計および後方散乱型レーザー Doppler 流速計を用いて、また波高および波長を複数台の抵抗式波高計を使用して測定した。さらに、これらの気流および波高データより、砕波した風波のスペクトルの推定を行った。

#### (3) 数値計算による微粒化現象の再現：

本計算で用いる支配方程式は、非圧縮性流体の連続の式、Navier-Stokes 方程式であり、また界面追跡のために VOF 関数の移流方程式を解いている。また LEVEL-SET 関数は VOF 関数より毎ステップ計算され、表面張力項の計算のために使用される。本風波計算においては、計算領域は主流方向、スパン方向、鉛直方向に 140mm × 20mm × 40mm とした。計算格子点数はそれぞれ 280 点 × 40 点 × 80 点である。格子間隔は 500μm である。また初期流動場として、気側および液側の領域にそれぞれ異なる一様流速を与えた。本計算は、地球シミュレーションセンタ（NEC、SX-ACE）を使用して行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 大型風波水槽でのループ法実験：

研究(1)では、京都大学の高速風波水槽（全長15m）でループ法・不規則造波装置を使用して生成された大型の風波の特性量と、九州大学の大型風波水槽（全長64m）を使用して、不規則造波装置を使用せずに風のシアのみにより生成された風波の特性量を比較し、短い水槽内においても大きく長吹送距離の風波の作成が可能であるかどうかの検証

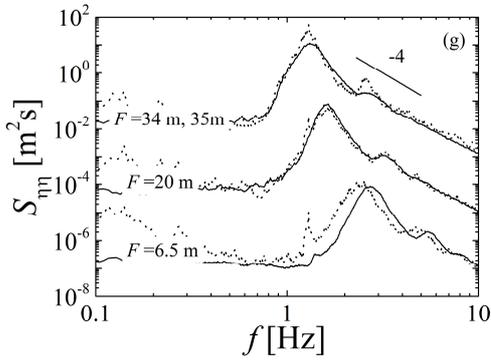


図2：風波のスペクトル( Takagaki et al., JTEC, 2017). 風速は概ね 20m/s であり, 見やすさのための各曲線はオフセットされている.

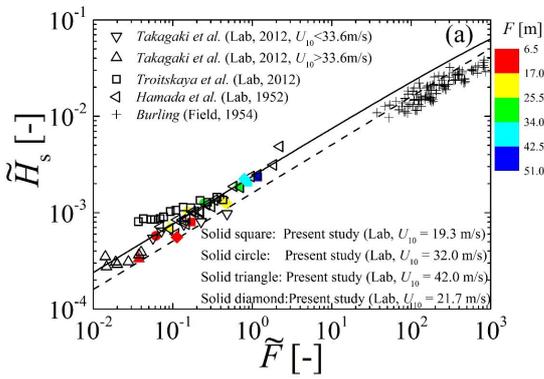


図3：風波の波高と吹送距離との関係 ( Takagaki et al., JTEC, 2017).

を行った．ここで，吹送距離とは風が吹き始めてからの風波の距離をあらわし，またループ法とは不規則造波装置を使用して大きく長吹送距離の風波を作成する方法である．

図2に風波のスペクトルを示す．図中の実線は京都大学の高速風洞水槽でループ法を使用して測定された風波のスペクトルを，点線は九州大学の大型風波水槽でループ法を使用せずに測定された風波のスペクトルである．図より，ループ法により作成された風波は1つのピークからなるスペクトル形状を示し，その形状はループ法を使用しない場合と比較してほぼ一致していることが分かる．さらに，ループ法では，造波装置の性能限界のために 3.5Hz 以上の高周波数の波は一切作成していないにもかかわらず 3.5Hz 以上の高周波数領域においてもスペクトルの傾向や強度が，ループ法を使用しないときと比べてよく一致することが分かる．以上より，本ループ法を使用して吹送距離が水槽の主流方向長さよりも長い状態での風波を作成可能である．具体的には，主流方向長さが 15m の水槽において吹送距離が 34m の地点の風波を作成することに成功した．

図3に，風波の特性量のひとつとして風波の波高を取り上げ，波高と吹送距離との関係

を示す．図中の色のついたプロットが本研究で測定された値を示している．カラーコンタは吹送距離を表している．また，実線および破線はそれぞれ，既往のフィールド研究で得られた2つの実験相関式( Wilson の第4公式および JONSWAP モデル)である．図より，本研究のプロットは従来の実験相関式とよく一致していることが分かる．これは，九州大学の大型風波水槽で作成された風波も，京都大学の高速風洞水槽およびループ法を使用して作成された風波も，ともに，実際の海洋の波と同じ傾向を持っていることを示している．さらに高風速域のプロット( ; Takagaki et al., 2012; ; Troitskaya et al., 2012)に着目すると，それぞれ高風速時(図の左側)において，プロットは従来の実験相関式から離れる傾向を示す．これは，高風速域においては，激しい砕波が起こるため，風波の特性量が変化している可能性を示唆している．

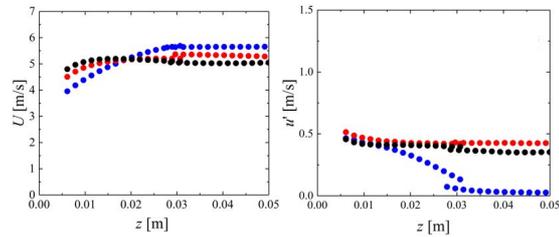


図4：主流方向平均流速(左図)および主流方向速度変動(右図)の鉛直方向分布．青丸：格子なし，赤丸：レギュラ格子，黒丸：フラクタル格子．

#### (2) 小型風波水槽での格子乱流実験：

図4に  $x=0m$  で測定された主流方向平均流速および速度変動の鉛直方向分布を示す．図中の色の違いは，格子の有無・種類を表している．図より，格子の有無・種類によらず平均流速は概ね一致するものの，速度変動は格子により一様流領域において非常に強いことが分かる．また，図は省略するが，格子の違いにより乱流スペクトルが異なること， $x=4.4m$  の地点においても境界層外の乱流は衰えていないことを確認した．図5に  $x=4.4m$  の地点における風波スペクトルを示す．図より風波スペクトルは格子の有無・種類によらず同じ形状となることが分かる．これは風波の発達に及ぼす境界層外乱流の影響は無視できるほど小さいことを示唆している．一般に，高風速時には，大気乱流は高レイノルズ数で海面近傍の境界層の外側の流れも強い乱れを含む．しかし，本知見はこれらの影響は風波の発達に影響を及ぼさないことを示唆しており，実際のフィールド観測結果と風波水槽を使用した室内実験結果の比較・検証の上で有益である．

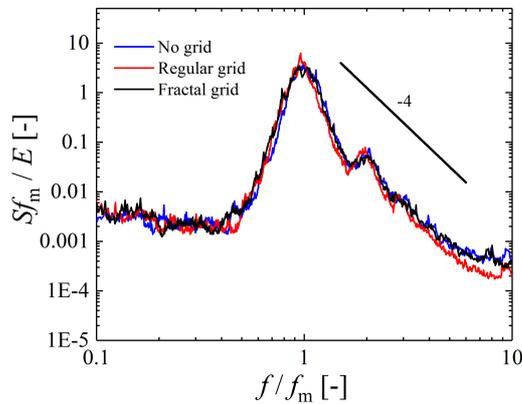


図5：風波スペクトル．ただし縦軸と横軸は風波のエネルギー $E$ および卓越周波数 $f_m$ で規格化されている．青丸：格子なし，赤丸：レギュラ格子，黒丸：フラクタル格子．

(3) 数値計算による微粒化現象の再現：

本研究では，Level-set/VOF法を使用した直接数値計算コードの適用可能性の検証を行った．計算初期には静止した気側と液側に分離しているものの，気側に気流を発生させた結果，時間経過とともに，水面にかかるせん断力の影響によって，水面は波立ち，水面から液滴が飛散するいわゆる砕波現象が引き起こされる様が観察された．以上より，風波気液界面からの微粒化現象を再現可能であることを確認した．

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

1. N. Takagaki, S. Komori, N. Suzuki, K. Iwano, R. Kurose (2016), Mechanism of drag coefficient saturation at strong wind speeds, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi: 10.1002/2016GL070666.
2. N. Takagaki, R. Kurose, A. Kimura, S. Komori (2016), Effect of Schmidt number on mass transfer across a sheared gas-liquid interface in a wind-driven turbulence, *Sci. Rep.*, 6, 37059; doi: 10.1038/srep37059
3. N. Takagaki, S. Komori, M. Ishida, K. Iwano, R. Kurose, N. Suzuki (2017), Loop-type wave-generation method for generating wind waves under long-fetch conditions, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34, pp2129-2139, DOI: 10.1175/JTECH-D-17-0043.1
4. N. Takagaki, K. Iwano, E. Ilyasov, S. Komori, and Y. Shirakawa (2018), Development of an optical imaging technique for particle number density, *Journal of Fluid Science and Technology*, 13(1), DOI:

10.1299/jfst.2018jfst0001

5. S. Komori, K. Iwano, N. Takagaki, R. Onishi, R. Kurose, K. Takahashi and N. Suzuki (2018), Laboratory Measurements of Heat Transfer and Drag Coefficients at Extremely High Wind Speeds, *Journal of Physical Oceanography*, DOI: 10.1175/JPO-D-17-0243.1

[学会発表](計14件)

1. 高垣直尚, 篠田 淳, 辻本悠哉, 黒瀬良一, 小森 悟, 熊丸博滋, 液面微粒化の直接数値シミュレーション, 兵庫県立大学 知の交流シンポジウム 2016, 姫路, 姫路商工会議所, 2016年9月26日.
2. 高垣直尚, 黒瀬良一, 小森 悟, 鈴木直弥, 台風予測精度向上のための実験研究, 兵庫県立大学 知の交流シンポジウム 2016, 姫路, 姫路商工会議所, 2016年9月26日.
3. 高垣直尚, 台風強度の高精度予測, 第15回STクラブ, 姫路, じばさんびる 401会議室, 2016年9月28日.
4. 高垣直尚, 高風速下かつ長吹送距離における風波気液界面を通しての運動量輸送機構, 波浪研究集会, 名古屋, 名古屋大学・東山キャンパス, 2017年3月7日.
5. アズィム, 高垣直尚, 鈴木直弥, 道岡武信, 小森 悟, 熊丸博滋, 圧電効果を用いた流体エネルギー採取, 日本機械学会関西支部学生発表会, 大阪, 大阪大学, 2017年3月11日.
6. 高根慧太, 高垣直尚, 熊丸博滋, 大型風波装置を用いた風波の測定, 日本機械学会関西支部学生発表会, 大阪, 大阪大学, 2017年3月11日.
7. 篠田 淳, 高垣直尚, 黒瀬良一, 小森 悟, 熊丸博滋, 水面微粒化の直接数値シミュレーション, 日本機械学会関西支部学生発表会, 大阪, 大阪大学, 2017年3月11日.
8. N. Takagaki, S. Komori, K. Iwano, N. Suzuki, H. Kumamaru, Fetch effects on the momentum transfer across the air-water interface at high wind speeds, IUTAM Symposium wind waves, University of Cambridge London, London, UK, 4-8 Sep 2017.
9. 高垣直尚, 風波実験水槽設計にみる工学系と理学系の視点の違いとその応用例, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 幕張メッセ, 千葉, 2017年5月24日, 招待講演.
10. 高垣直尚, 風波気液界面を通してのCO<sub>2</sub>輸送に及ぼす海中での巻き込み気泡の影響, 日本海水学会第68年会シンポジウム「関西の海水研究の今とこれから」, 京都, 同志社大学, 2017年6月2日, 招待講演.

- 1 1 . 高垣直尚, 高風速下かつ長吹送距離における風波気液界面を通しての運動量および熱輸送量の評価, 日本伝熱学会関西支部第24期第2回講演討論会, 神戸大学梅田インテリジェントラボラトリ, 大阪, 2017年7月26日.
- 1 2 . 高垣直尚, 海表面を通しての物質輸送 - 高ウインドシア・吹送距離・雨滴衝突の影響 -, 海洋地球科学における乱流拡散制御ワークショップ, JAMSTEC, 横浜, 2017年10月19日, 招待講演.
- 1 3 . 高垣直尚, 高風速下かつ長吹送距離における風波気液界面を通しての熱輸送機構, 波浪研究集会, 名古屋, 名古屋大学・東山キャンパス, 2018年3月5日.
- 1 4 . 高畑俊作, 高垣直尚, 鈴木直弥, 小森悟, 熊丸博滋, 風波発達に及ぼす境界層外部の乱流の影響, 日本機械学会 関西学生会 2017年度学生員卒業研究発表講演会, 大阪, 摂南大学, 2018年3月10日.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://kyoin.u-hyogo.ac.jp/staff/eng/takagaki/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

高垣 直尚 (TAKAGAKI NAOHISA)  
兵庫県立大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：00554221