

令和元年6月11日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H04043

研究課題名(和文) 暴風下に発達する大気-海洋気液混合層内の海面抵抗と熱輸送の変調

研究課題名(英文) Modifications of drag force and heat transfer across air-water mixing surface layers developed in a violent wave state

研究代表者

渡部 靖憲 (Yasunori, Watanabe)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：20292055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,100,000円

研究成果の概要(和文)：強風時の海面素過程を決定し得るパラメータである海中混入気泡及び気中放出飛沫群による境界混合層への運動学的、熱力学的寄与の実験的特定、熱力学的非平衡気液界面をもつ砕波面、飛沫、気泡からのフラックス輸送計算、気液混合の組織性の解明と地域的特徴の抽出、これらのパラメタリゼーションを通じた局所パラメータのメソスケール気象、海象、流れ場への寄与を求めた。波峰背後に形成される3次元組織渦は強風下においても維持され続け、圧力抵抗は有意に低下しない一方、砕波に伴う大量の飛沫群が組織渦を崩壊させ小スケール乱れへと遷移させ、トータルの運動量並びに熱輸送を変化させることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の個々のタスクが対象とする強風下の風波の局所応答、気液混合層の発達に伴う海面抵抗並びに熱水分輸送変調機構解明、実海域への適用の際にインプットパラメータとして必要となる砕波率に関する砕波分布の組織性と飛沫放出の統計的記述のそれぞれが極めて高い学術的価値をもつだけでなく、統合して評価される強風時の運動量・熱・水分輸送並びに海面抵抗の変調に対するバルクパラメータの修正は現行気候変動予測を一変させる可能性を持つ国際的に極めて注目されている問題であり、高い社会的意義を持つ。将来、複雑化、複合化する地球環境評価にかかわる問題に対して、当該研究分野のプレゼンスを拡張する実効性の高い研究である。

研究成果の概要(英文)：We found fundamental features of heat and gas transport in aerated ocean surface layers and modifications of surface drag in violent wave field through experimental parameterization of effects of sea sprays and bubbles entrained by wind wave breaking, computational identifications of heat and gas transfer owing to surface replacement under breaking waves, variable features of surface drag depending on transitions of three-dimensional vortex structures over ocean waves. As sea sprays dispersed in wind boundary layers disrupt the organization of the vortices formed over the breaking waves, causing transitions to fully developed turbulent boundary layer and modifications of surface drag. This process also changes the total momentum and heat fluxes between atmosphere and ocean.

研究分野：海岸工学

キーワード：海岸工学 海洋工学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

IPCC 第 5 次評価報告書を前後して、国際的な気候変動予測・適応策策定へ向けて国内外多数の大規模プロジェクトが動いている。プロジェクトの焦点は、これまでの全球気候変動から地域スケール予測・影響評価へと向かいつつある。地域スケールの気候変動の影響評価では、モデルの高精度化、高解像化が不可欠であるが、従来モデルの不確実性あるいは不適応性が明らかになりつつある。特に、Powell ら (Nature 2003) が指摘したハリケーン暴風下において海面抵抗が風速に対して減少するとする結論は、従来モデルとは全く逆のアウトプットを与えるものであり、現行モデルによる予測の不完全性と、これに基づく影響評価・適応策の危険性が危惧されている。この海面抵抗のリダクションの原因について、Powell が指摘した 2 つの予測：「波浪の砕波に起因する莫大な気泡、飛沫が存在する混合層の形成に起因する運動量輸送の変化」と「暴風が波谷上を通過せず境界層が波峰から剥離することによる海面粗度、海面摩擦の従来の定義からの逸脱」を中心に強風下の海面素過程の解明と現行モデルの修正に特化したプロジェクトが既に立ち上がっている一方、台風の影響を顕著に受ける我が国において、こうした極端現象の解明が最重要課題にも関わらず相当するプロジェクト発足の動向はない。

### 2. 研究の目的

本研究は、そのメカニズムの解明が緊急の国際課題としてフォーカスされている暴風下の海面抵抗リダクションの問題に対して、台風下の海洋の応答と砕波による気液二相化及び海面を挟む気液境界層の乱流による崩壊に伴う抵抗及び熱輸送の変調を風洞水槽実験、数値実験を通じた微視スケールから領域スケールに至る複合スケールのパラメタリゼーションを推し進めると同時に、それぞれのスケールを支配する流体運動を矛盾なく統合し、高度な予測体系を確立することを最終目標とするものである。混相流計測、微視流体解析、広域海象そして気象海象モデリングに特化した海外研究機関と連携し本申請グループを中心とするコンソーシアム型フレームワークの中で複合スケール間のパラメータの寄与を明らかにすると同時に総合的なモデル評価を推し進めるものである。

### 3. 研究の方法

本研究は、Powell の 2 つの予測に対する流体力学的回答の取得を旨とすると同時に、強風時の海面素過程を決定し得るパラメータである海中混入気泡及び空中放出飛沫群による境界混合層への運動学的、熱力学的寄与の実験的特定(タスク 1)、熱力学的非平衡気液界面をもつ砕波面、飛沫、気泡からのフラックス輸送計算(タスク 2)、気液混合の組織性の解明と地域的特徴の抽出(タスク 3)、これらのパラメタリゼーションを通じ、台風下の気象海象同時観測結果の分析から局所パラメータのメソスケール気象、海象、流れ場への寄与を陽的に明らかにするものである(タスク 4)。

**タスク 1 強風波浪下の気液混相流の運動学的、熱力学的局所相互作用のパラメタリゼーション**

風洞実験により、風と波浪内部の速度分布を光学的選択動画計測及び風に駆動される飛沫と流体内に混入される気泡群に対して動画計測を行い、おそらく同時に発生している Powell の 2 つ予想の寄与率を見積もると同時に、飛沫及び気泡群のそれぞれ気液相流れへの抗力と海面せん断抵抗との寄与率と風波 Reynolds 数との関係を明らかにする。さらに、これら気液相の運動学的情報により海面熱境界層の局所変位及び崩壊を推定し、同時に高速計測される放射熱分布との関係から陽的に熱フラックスの輸送機構を決定する。

**タスク 2 熱力学的非平衡気液界面をもつ砕波面、飛沫、気泡からのフラックス輸送のプリミティブシミュレーション**

現行のバルクモデルだけでなく、気液界面を解像する微視的混相流計算においても、力学的、熱力学的平衡状態が仮定されてきたものが殆どであった。このタスクでは、熱力学的非平衡界面に対して気液体の自由エネルギー、表面エネルギーを拡散界面中の状態量によって近似し、複雑に作用する界面不安定を経た飛沫、気泡生成と分裂に伴う運動量変化を従来のバルク物性値を使うことなくプリミティブに解析可能な拡散界面モデルを既に開発済みである気液乱流砕波シミュレータへ導入する。

**タスク 3 広域多方向不規則砕波分布と飛沫生成の組織性の解析**

台風の通過時には一般に方向分散をもつ不規則波浪場が形成され、強風場では短波峰長を有し局在する高波を中心に砕波過程が進行する。低波高波浪場は一様な粗度として海面抵抗を決定する一方、有意な高波が点在する場合、風の場合は離散的な強い抵抗を受け平面的な組織性が発生し、有意に砕波過程に影響を与える。従来、砕波の影響は砕波率 (Toba & Koga 1988) としてパラメータ化されてきた一方、三次元的組織性をもたない 2 次元風洞水槽による砕波及び飛沫生成過程は、台風下の大気海洋境界面粗過程を十分説明できない可能性がある。本タスクでは、既に開発済みである数値風洞水槽によって強風下の多方向不規則波動場を再現し、砕波過程及び流れの組織性を決定するパラメータを決定する。これら地域的な風波砕波の組織性と風速風向依存性との関係を明らかにする。

**タスク 4 海面抵抗、熱輸送変化を決定するパラメータの寄与率の決定**

タスク 1~3 により得られた成果を基に強風下に発生する海面抵抗のリダクション並びに熱輸送形態の変調を支配するパラメータの寄与率について気風下の気象海象同時観測結果の分析か

ら明らかにする。

#### 4. 研究成果

タスク 1 新たに購入した可視化風洞水槽において、風波の発達過程における風速、水面変動及び流速分布の変化を計測し、非平衡下の大気-海洋間の運動量輸送過程を調査した。初期波において毛管波の重畳と重力波のクレストへの集中が顕著な渦生成を誘発し、大気境界層と同等の運動量境界層の形成を通して運動量、エネルギーを深い位置まで輸送する。フェッチの増大と共に、吹送流による波-流れ相互作用は重力波前面を先行して伝播する毛管波を減衰させ、渦供給の減少、運動量境界層の減衰を引き起こし、吹送流が主体となるせん断流が流れ場を支配し、マイクロ砕波に起因する渦混合が海中への運動量輸送に大きく係ることが明らかになった。巻き波砕波による気泡生成の主因となるエアチューブの崩壊過程を水平回転円筒中の水面形状可視化実験によって模擬し、エアチューブの側方分裂が回転流体の不安定性から生じることを明らかにした。砕波過程において生じるエアチューブの軸方向分裂に関して、回転数、円筒幾何形状、封入水体積率に応じて変化するエアチューブの分裂現象を発見し、パラメータ化を通して、その分裂メカニズムを明らかにした。回転流体中の遠心力に加え、表面張力、浮力（重力）そして抗力が非一様な流れを形成することで発生する流れの不安定が分裂過程を決定することが証明された。エアチューブの分裂形態のおおよその特徴は Froude 数で与えられ、軸方向に様な水層が気体セルへの分裂の開始は限界 Froude 数及び限界 Weber 数で決定できる。タスク 2 熱力学的非平衡界面に対して気体液体の自由エネルギー、表面エネルギーを拡散界面中の状態量によって近似し蒸発、凝結過程だけでなく、複雑に作用する界面不安定を経た飛沫、気泡生成と分裂に伴う運動量変化を従来のバルク物性値を使うことなくプリミティブに解析可能な拡散界面モデルを開発し、飛沫の着水過程における表面更新メカニズムを明らかにした。フルード数に依存して着水後に発生する渦輪の自己誘導が水面を急速に海中へ輸送し、現行の輸送速度とはオーダーが異なる速度に熱及び気体が輸送されるメカニズムを発見した。タスク 3 砕波分布、白波被覆率、そして砕波に伴う熱輸送のパラメタリゼーションを目指し、他の気象、海象現象と共に海表面の可視並びに赤外線画像の集中観測を白浜海象観測塔において行った。ノイズ除去技術、白波抽出技術の開発を行い、観測結果の評価手法を確立した。台風イベント発生時の気象海象集中観測データをもとに、フェッチ制限のある海域における砕波に伴う白波生成過程と海面表層の海水温変化、飛沫、気泡生成に関するエアレーションの効果について分析し、砕波被覆率と海面温度分布との関係、海洋性エアロゾルのフェッチ依存性、そして台風イベントを通じた熱収支におけるこれらの寄与を明らかにした。実海域において、カメラ観測可能な白波だけではなく不可視の砕波、所謂 micro-breaking が風況に応じて顕著に観測された。これは強風時のみならず、白波が生じる風場では広域に分布するため、トータルの運動量並びに熱輸送への有意な寄与をもつ。タスク 4 波面上の乱流境界層流れを数値的に解き、海面抵抗が波面上に形成される渦構造に強く影響を受け、従来のパラメタリゼーションでは実際に生じている海面抵抗を記述しない可能性を明らかにした。また波浪形状だけでなく波浪表面流速も海面抵抗の変動に大きく係ることが明らかになった。即ち、波峰背後に形成される 3 次元組織渦は強風下においても維持され続け、圧力抵抗は有意に低下しない新たな結論に対して、砕波に伴う大量の飛沫群が組織渦を崩壊させ小スケール乱れへと遷移させる。海面粗度は暴風イベント中の大気境界層流れだけでなく将来気候予測結果にも有意に影響することが Global Climate Model 波浪結合モデルによる試算において判明した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 15 件)

Otsuka Junichi, Saruwatari Ayumi, Watanabe Yasunori, Vortex-induced suspension of sediment in the surf zone, *Advances in Water Resources*, 査読有, 110, 2017, 59~76, doi: 10.1016/j.advwatres.2017.08.021

渡部靖憲, 杉村一直, 風波発達過程における水面せん断層の発達と運動量輸送, 査読有, 木学会論文集 B2(海岸工学), 73(2), 73-78 (2017)

渡部靖憲, 鈴木敦貴, エアチューブ周りの流れの不安定, 査読有, 木学会論文集 B2(海岸工学), 73(2), 91-96 (2017)

Shimura, T., N. Mori, T. Takemi and R. Mizuta, Long term impacts of ocean wave-dependent roughness on global climate systems, *Journal Geophysical Research*, 査読有, Ocean, 122, pp.1995–2011. doi: 10.1002/2016JC012621 (2017)

Mizuta, R., N. Mori (6 番目)他 29 名, Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models, *The Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS)*, 査読有, 1383–1398, doi: 10.1175/BAMS-D-16-0099.1 (2017)

Nguyen-Le, D., T. J. Yamada, D. Tran-Anh, Classification and forecast of heavy rainfall in northern Kyushu during Baiu season by weather pattern recognition, *Atmospheric Science Letters*, 査読有, 18, 324-329 (2017) 10.1002/asl.759

Pokhrel, Y. N., T. J. Yamada, F. Felfelani, S. Shin, and Y. Satoh: Modeling large-scale

human alternation of land surface hydrology and climate, Geoscience Letters, 査読有, 4 (1), 10 (2017)

猿渡亜由未, 武江寿大, 渡部靖憲, 冬期の温帯低気圧による高潮の統計的リスク評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, 72, 2016, 247-252

大塚淳一, 渡部靖憲, 砕波乱流下における炭酸ガス濃度の時空間変動特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, 72, 2016, 97-102

小柳津遥陽, 渡部靖憲, 高体積率微細気泡流の力学モデリング, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, 72, 2016, 103-108

Yasunori Watanabe, David Mark Ingram, Size distributions of sprays produced by violent wave impacts on vertical sea walls, Proceedings of Royal Society A, 査読有, 472, 2016, 20160423, 10.1098/rspa.2016.0423

Yasunori Watanabe, David Mark Ingram, Transverse instabilities of ascending planar jets formed by wave impacts on vertical walls, 査読有, Proceedings of Royal Society A, 471, 2015, 20150397, 10.1098/rspa.2015.0397

Nelson J.M., Watanabe Y. (17 番目) 他 15 名, The international river interface cooperative: public domain flow and morphodynamics software for education and applications, Advances in Water Resources, 査読有, 93, 62-74, DOI:10.1016/j.advwaters.2015.09.017 (2015)

Saruwatari A., Lima A. C., Kato M., Nikawa O., Watanabe Y., Report on the 2014 winter cyclone storm surge in Nemuro, Japan, Coastal Engineering Journal, 査読有, 57(2), DOI: 10.1142/S0578856341550014X (2015)

Junichi Otsuka, Yasunori Watanabe, Characteristic time, length and velocity scales of transverse flows in the surf zone, 査読有, Coastal Engineering Journal, 2015, 1550006, 10.1142/S05788563415500060

[学会発表] (計 9 件)

渡部靖憲, 杉村一直, 風波発達過程における水面せん断層の発達と運動量輸送, 海岸工学講演会, 2017. 10. 25--2017. 10. 27, 札幌市

渡部靖憲, 鈴木敦貴, エアチューブ周りの流れの不安定, 海岸工学講演会, 2017. 10. 25--2017. 10. 27, 札幌市

渡部靖憲, 高体積率微細気泡流の力学モデリング, 海岸工学講演会, 2016. 11. 16--2016. 11. 18, 大阪大学 (大阪市)

猿渡亜由未, 冬期の温帯低気圧による高潮の統計的リスク評価, 海岸工学講演会, 2016. 11. 16--2016. 11. 18, 大阪大学 (大阪市)

大塚淳一, 砕波乱流下における炭酸ガス濃度の時空間変動特性, 海岸工学講演会, 2016. 11. 16--2016. 11. 18, 大阪大学 (大阪市)

Junichi Otsuka, Laboratory observation of turbulent flow and sediment transport under regular breaking waves, THESIS 2016, 2016.9.12--2016.9.14, 中央大学 (東京都),

Watanabe Y., Yamashita K, Sasaki R, Modification of turbulence due to suspended particles over wavy beds, THESIS 2016, 2016.9.12--2016.9.14, 中央大学 (東京都)

Oshima Y., Oyaizu H., Watanabe Y., Surface forms and local flows of run-up waves, The 9<sup>th</sup> Int. Symp. On Measurement techniques for Multiphase Flow, 2015.9.23--2015.9.25, 北海道大学 (札幌市)

Oyaizu H., Oshima Y., Watanabe Y., Size and velocity distributions of electrolytically-generated bubbles, The 9<sup>th</sup> Int. Symp. On Measurement techniques for Multiphase Flow, 2015.9.23--2015.9.25, 北海道大学 (札幌市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：森 信人  
ローマ字氏名：MORI, Nobuhito  
所属研究機関名：京都大学  
部局名：防災研究所  
職名：教授  
研究者番号（8桁）：90371476

研究分担者氏名：山田 朋人  
ローマ字氏名：YAMADA, Tomothito  
所属研究機関名：北海道大学  
部局名：工学研究院  
職名：准教授  
研究者番号（8桁）：10554959

研究分担者氏名：大塚 淳一  
ローマ字氏名：OTUKA, Junichi  
所属研究機関名：独立行政法人土木研究所  
部局名：寒地水圏グループ  
職名：研究員  
研究者番号（8桁）：50540556

研究分担者氏名：猿渡 亜由未  
ローマ字氏名：SARUWATARI, Ayumi  
所属研究機関名：北海道大学  
部局名：工学研究院  
職名：助教  
研究者番号（8桁）：00563876

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。