

令和元年6月12日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06514

研究課題名(和文) 風波界面におけるガス交換機構の解明と海面物質移動シミュレータの構築

研究課題名(英文) INVESTIGATING THE MECHANISM OF GAS EXCHANGE AT WIND-WAVE SURFACE AND ITS APPLICATION TO SIMULATION OF OCEAN-SURFACE TRANSPORT PROCESS

研究代表者

杉原 裕司 (SUGIHARA, YUJI)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：70243970

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：風波界面における砕波・乱流過程がガス交換機構に果たす役割を明らかにするために、数値実験、風洞水槽実験、現地観測等を通じた包括的な検討を行った。風応力作用下において生ずる吹送流や風波界面の遷移の諸特性、さらにそれらを記述するために有用なパラメータについて検討した。その結果、砕波・乱流の力学を反映した海面境界過程の定量化やガス交換速度のモデル化に関する有用な知見を得た。さらに、波浪モデルによる波浪推算結果と海上風の情報から評価されたガス交換速度に基づいた海面物質移動シミュレーションの解析手順を検討・構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二酸化炭素は、最も代表的な温室効果ガスであり、その大気-海洋間における交換機構を解明し、適切にモデル化することは、地球温暖化の影響評価において重要である。海洋表面には風波が存在しており、風波界面の遷移・砕波・乱流過程は、乱れや気泡の生成、界面崩壊等を介して環境システムに大きな影響を与えている。そのため、風波界面のガス交換機構の解明とその展開研究は、環境影響評価手法の構築において重要である。

研究成果の概要(英文)：Comprehensive investigations such as numerical and wind-tunnel water tank experiments and field observation have been carried out to reveal the influence of the transition, breaking and turbulence processes at the surface of wind waves on the mechanism of gas exchange across the ocean surface. We examined characteristics of the drift current and the transition of wind-wave surface, and fluid dynamical parameters to express them. Useful findings have been obtained for quantifying the ocean boundary process and modeling of the gas transfer velocity. In addition, the gas transfer velocity at the ocean surface has been estimated on the basis of numerical results using a numerical wave model and wind information, and the simulation procedure for ocean-surface transport process has been provided.

研究分野：地球環境水理学

キーワード：水工水理学 海洋工学 地球環境水理学 界面水理学 地球温暖化

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素は最も代表的な温室効果ガスであり、その大気-海洋間の交換機構を理解し、適切にモデル化することは、地球温暖化問題にアプローチする重要な流体力学的課題である。海面を通しての CO_2 のガス交換フラックスや運動量フラックスは一般にバルク式の形で表現され、それぞれの輸送係数は、ガス交換速度、海面抵抗係数（または海面粗度）と呼ばれる。ガス交換速度については、これまで様々な経験式が提案されているが、その多くが海上高度 10m における平均風速（または海面摩擦速度）を用いて定量化されている。しかし、同一の風速条件下においても、吹送距離や吹送時間が異なれば、風波の発達状態は大きく変化することから、海上風速や海面摩擦速度のみで海面交換過程を定式化することは本来できないと思われる。ガス交換速度の算定の過程において必要な海面摩擦速度を評価するためには、海面抵抗係数または海面粗度が必要であるが、それらに波浪場が及ぼす影響についても十分に解明されていないのが現状である。

海洋表面には海上風と力学的に結合した風波が存在し、風波界面における砕波・乱流過程は乱れや気泡の生成、界面崩壊などの直接的な表面更新を通してガス交換や運動量交換機構を支配している。従って、ガス交換や運動量交換のメカニズムを明らかにするためには、風波界面の遷移・砕波・乱流過程について包括的に検討する必要がある。ガス交換速度などの海面境界過程の物理モデルに波浪効果を適切に取り込むことは局所大気海洋相互作用をより適切にモデル化することを意味する。そのため、大気-海洋間交換過程の予測に実装する交換係数として、波浪場の効果を取り込んだガス交換速度が必要となる。このような背景から、風波界面における遷移・砕波・乱流過程に関する知見に基づいて、風波界面におけるガス交換機構を波浪特性に基づいてモデル化することは、地球環境学的な観点から大きな意義をもつものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、風波界面における砕波・乱流過程がガス交換機構に果たす役割を、数値実験、風洞水槽実験および現地観測等を通して包括的に検討し、砕波・乱流力学に関する知見を反映した波浪依存型のガス交換速度モデルを構築・整備することである。さらに、波浪モデルを利用した波浪推算計算の結果に基づいてガス交換速度を広域海面で評価・可視化し、海面物質移動のシミュレーション手法を構築するために必要な技術的検討を行うものである。

3. 研究の方法

(1) 数値実験に基づいた風応力によって駆動される吹送流とスカラー輸送機構の検討

水表面に作用する風応力は、風波界面近傍の乱流構造を規定する重要な因子であり、その知見はガス交換速度のモデル化において重要である。本研究の数値実験では、水表面を有する最も単純な流れ系の一つである側方境界のない開水路乱流場を対象とした。高精度な流体解析手法の一つである直接数値シミュレーション（Direct Numerical Simulation: DNS）を実施し、水表面に作用する風応力を系統的に変化させることによって、乱流場が無次元せん断応力 $\tau_s \equiv \rho u_{ts}^2 / \rho u_{\tau b}^2$ の変化に対してどのように応答するのかについて詳細な検討を行った。ここで、 τ_b は底面せん断応力に対する水表面せん断応力の比を意味している。本研究では、さらに温度成層効果や水表面上での水平流速の発散（界面発散）に着目した検討を実施し、界面乱流のスケリング則が風応力にどのように依存するのかについても調べた。

(2) 風洞水槽実験による吹送流と風波界面の遷移に関する検討

海上風によって駆動される風波界面をシミュレートするための風洞水槽実験を行った。風洞水槽は、水槽部の全長 14m、幅 40cm、高さ 50cm であり、水槽上流端のファンを回転させることによって水槽内に送風する。また、水槽の下に下流端と上流端を繋ぐ円形パイプが取り付けられており、風によって駆動される吹送流は水槽内に逆流を発生することなく円形パイプを通して循環する。従って、下部パイプ内の流量を測定することによって上部の水槽内を流れる流量（吹送流量）を評価することができる。本研究では、この吹送流量に着目することによって、風波界面の遷移過程に関する検討を行った。水表面に作用する気流による摩擦速度 u^* を算定するために、水表面上において平均風速の鉛直分布を測定した。また、風速条件ごとに水位変動を測定し、そのデータから風波特性量を算定した。さらに、風波界面の遷移と吹送流の形成との関係を正確に検討するために、粒子画像流速計（Particle Image Velocimetry: PIV）による風波界面下の水側流速計測を行った。以上のような精緻な風洞水槽実験に基づいて、風波界面における遷移過程、特に砕波の発生の記述に有用な風波パラメータを見出すための検討を実施した。

(3) ガス交換速度モデルと海面物質移動シミュレーション技術の検討

風波界面におけるガス交換速度を、乱流による寄与と砕波による寄与に分離してモデル化する先行研究のハイブリッドモデルの手法に着目し、波浪特性を組み込んだガス交換速度モデルについて再検討を行った。また、海洋観測塔において得られた現地観測データに基づいて、モデル化したガス交換速度の特性について検討した。さらに、第 3 世代波浪推算モデルである SWAN (Simulating Waves Nearshore) による波浪場の推算計算を実施し、これらのシミュ

レーション結果に基づいて、波浪依存型のガス交換速度を海面上に展開する方法の精密化を行った。波浪モデル SWAN による波浪推算結果と海上風速値から GIS (Geographic Information System) を用いてガス交換速度を評価・可視化し、海面物質移動シミュレーションの解析手順を検討した。

4. 研究成果

(1) 数値実験に基づいた風応力によって駆動される吹送流とスカラー輸送機構の検討

DNSの数値計算手法を用いて、風応力の作用方向や大きさが、水面下に形成される吹送流や乱流構造、さらに水表面のスカラー輸送に及ぼす影響について検討を行った。風応力がある程度大きくなると、吹送流速と水面摩擦速度の関係は線形になることを確認した。これは、実験結果の関係とも定性的に一致しており、水面摩擦速度を用いて吹送流速を定量化することの妥当性が数値実験から支持された。ただし、この結果は、背景主流を有する開水路乱流で得られた結果であることに注意する。また、全ての摩擦速度のレンジでそのような関係が成立するわけではなく、その定量化には注意が必要である。

水表面に風応力が作用する場合、風応力の正負の符号によって、界面発散とスカラーフラックスの定量的関係が変化する（負の場合にフラックスが減少）ことを明らかにした。さらに、温度成層と水表面の風応力の両方の効果を取り込んだDNSを実行し、それらの効果が水表面のスカラー輸送にどのような影響を及ぼすかについて検討した。温度成層と風応力の作用によって生じる水表面近傍の高速ストリーク構造と熱フラックスの空間構造の関係を調べた結果、水表面での流速場の発散（界面発散）は、風応力作用下の熱輸送においても重要な物理量となるが、その影響は風応力と成層効果の相対的な大きさによって変化することがわかった。

(2) 風洞水槽実験による吹送流と風波界面の遷移に関する検討

回流式風洞水槽による風洞水槽実験を実施し、風速を種々変化させた条件下において、風波界面の画像撮影および風速、波浪、吹送流の測定を行った。さらに、風波界面における遷移過程と風波パラメータの関係について検討し、どのようなパラメータが砕波発生の同定に有用であるかについて調べた。

図1に、風洞水槽実験で再現された風波界面の一例を示す。ここで、 U_r は基準風速である。本実験では、風応力の作用によって水側に生じる吹送流量が風波界面の運動量輸送を記述する重要な物理量であるとの仮説のもと、吹送流量と風波パラメータの関係について検討した。図2に、吹送流量 Q と気流側摩擦速度 u_* との関係を示す。この図より、おおよそ $u_* = 0.1 \text{ m/s}$ 付近を境に、その前後で実験データの傾きが異なることがわかる。なお、この勾配変化点は、おおよそ微小砕波の発生する摩擦速度に対応することを見出した。風応力は、風波を発生させ、水中に吹送

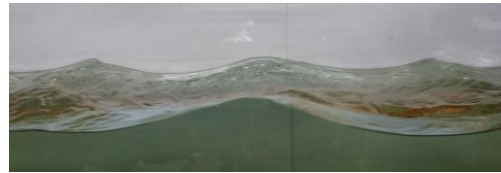


図1 風洞水槽内の風波界面の一例 ($U_r = 6.31 \text{ m/s}$: 砕波の発生/波面の粗面化)

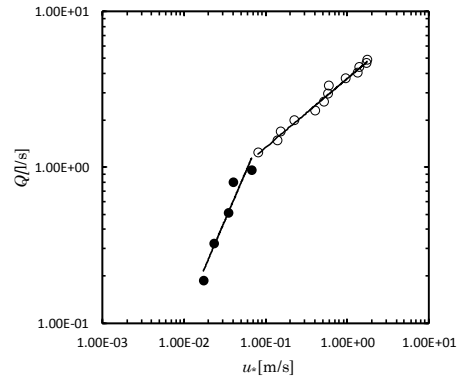


図2 Q と u_* との関係

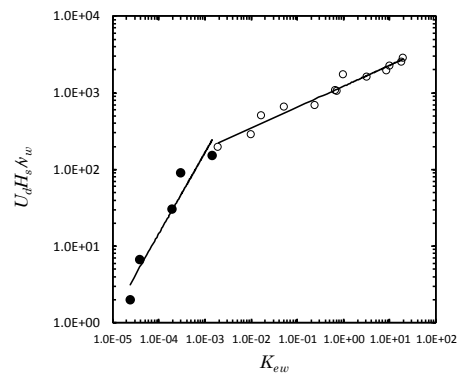


図3 $U_a H_s / v_w$ と K_{ew} との関係

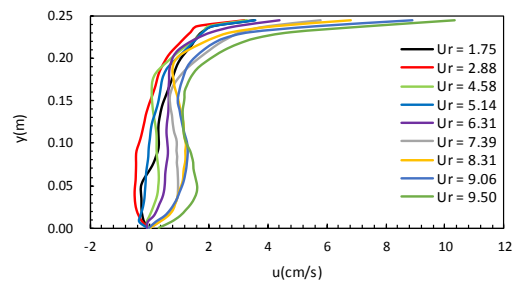


図4 PIVで計測された吹送流速の鉛直分布

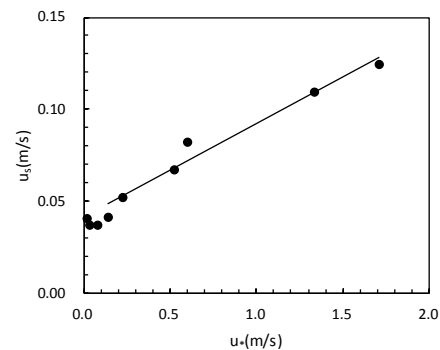


図5 吹送流速と水面摩擦速度との関係

流を駆動するが、比較的低風速下では、風からの運動量は主として摩擦の形で吹送流に注入される。そして風速の増加と共に、水表面は不安定化し、運動量は形状抵抗の形で風波に注入されることになる。従って、微小碎波の発生前後において、摩擦速度に対する吹送流量 Q の傾きが減少するのは、風からの運動量が波動の発達に使用されるためであると解釈することができる。このように、吹送流量が碎波の臨界条件を境に変化することは、流体力学的にも極めて興味深い知見である。また図 3 は、断面平均吹送流速 U_d を有義波高 H_s と水側動粘性係数 ν_w で無次元化した量を風波クーリガン数 K_{ew} に対してプロットした図である。ここで K_{ew} は、気流側摩擦速度 u_{*w} に基づいて次式のように定義されている。

$$K_{ew} \equiv \frac{u_{*w}^3}{g\nu_w} = \frac{(\rho_a/\rho_w)^{3/2} u_*^3}{g\nu_w} \quad (1)$$

ここで、 ρ_a 、 ρ_w はそれぞれ空気および水の密度である。これより、 $u_* = 0.1 \text{ m/s}$ に対応する風波クーリガン数を境として、その前後の挙動が明瞭に異なることが明らかである。このように、本実験では、風波クーリガン数また風波レイノルズ数が風波界面の遷移過程を記述する上で有効なパラメータになりうることを確認した。摩擦速度 $u_* = 1.0 \text{ m/s}$ における風波クーリガン数の値 (K_{ewcr}) は風波界面の遷移を表す臨界条件に相当すると考えられる。

図 4 は、PIV を用いた流速計測によって得られた、風波界面下の吹送流速の鉛直分布を示している。これより、基準風速の増加とともに、水表面付近の吹送流の流速が顕著に増大することが明らかである。図 5 は、水表面位置での吹送流速と摩擦速度の関係を示しており、図中の実線は、 $u_* = 1.0 \text{ m/s}$ 以上のデータに対する最小自乗曲線を示している。これより、この範囲の吹送流は摩擦速度と概ね線形関係にあることがわかる。

さらに、吹送流速と風波のストークスドリフト流速の流速2乗比に基づく海面境界過程のパラメタリゼーションの可能性についても検討した。その結果、ストークスドリフト流速を用いた定量化手法は、風波界面の物理現象を普遍的に記述する上で有用であることが示唆された。このアプローチの妥当性については今後さらに検討が必要であると考ええる。

(3) ガス交換速度モデルと海面物質移動シミュレーション技術の検討

ハイブリッドタイプの波浪依存型ガス交換速度モデルの改良とその特性について整理・検討を進めた。ハイブリッドモデルは、次式のように、ガス交換速度 k_L を、乱流の寄与 k_t と碎波の寄与 k_b に分離・評価するモデル化手法である。

$$k_L = k_t + k_b \quad (2)$$

ハイブリッドモデルの代表的なものとして、次式の Woolf(2005) のモデルがある：

$$k_t = 1.57 \times 10^{-4} u_* (600/Sc)^{1/2} \quad k_b = 850 W_c / (3.6 \times 10^5) = 1.63 \times 10^{-9} R_{Hw} \quad (3)$$

ここで、 Sc はシュミット数、 W_c は白波被覆率、 R_{Hw} は水側の摩擦速度 u_{*w} と動粘性係数 ν_w 、有義波高 H_s で定義されたレイノルズ数である。本研究では、宮崎他(2012)のモデルに着目して、そのモデル表現をさらに簡便化して、モデル定数の再定義を行った。その結果、簡便かつガス交換速度の挙動が比較的滑らかな下記のモデルを提示した。

$$k_t = 0.8 \left[\left(\frac{u_{*w}^4}{10\kappa\nu_w (1 + K_{ew}/K_{ewcr})^2} + 30 \frac{(K_{ew}/K_{ewcr})^{3/2} u_{*w}^3}{(1 + K_{ew}/K_{ewcr})^{3/2} H_s} \right) \nu_w Sc^{-2} \right]^{1/4} \quad (4)$$

$$k_b = 2.9 \times 10^{-4} \left(\frac{K_{ew}/K_{ewcr}}{1 + K_{ew}/K_{ewcr}} \right)^{1/2} u_{*w} R_{Hw}^{0.3} \quad (5)$$

ただし、上記モデルに含まれる臨界クーリガン数 K_{ewcr} は、前述の風洞水槽実験において得られた知見に基づいて定義されたものを採用した。本研究では、このモデルが、他のガス交換速度モデルと定量的に整合することを基盤としながら、試行錯誤的にモデルの簡略化とモデル定数のチューニングを行っており、それらはデータとの比較・検証を進めながら、今後さらにブラッシュアップされていくべきものであると考える。

海洋観測塔(京都大学防災研究所所有：田辺中島高潮観測塔)での現地観測において測定された摩擦速度および大気中 CO_2 濃度の測定結果に基づいて、簡易評価したフラックスへの本改良モデルの適用性について検討した。なお、観測中において有義波高が取得できなかったため、吹送距離(固定値)と風速から便宜的に有義波高を算定する経験式を用いた。また、海水中の溶存 CO_2 濃度については、観測開始当初の海水サンプルの吸光度分析の結果および以前に行った同時期の観測結果等に基づいて与えた。そのため、観測データおよびガス交換速度モデルから算定した各フラックスをそれぞれの平均値等で規格化した無次元フラックス同士を比較した。本研究の

改良モデルは、宮崎他のモデルに比べて風速変動への応答が良好であることを確認した。

波浪モデルSWANによって波浪場のシミュレーションを実施し、得られた波浪推算の結果から、種々のガス交換速度モデルの算定値を求めて比較した。ただし、SWANによる波浪解析では、精度の高いシミュレーションを行うために5つの計算領域 (domain1からdomain5) によるネスティング計算を実施した、また、海上風データとして、気象庁のGPVデータを使用した。摩擦速度を算定するにあたっては、Yelland and Taylor(1996)の海面抵抗係数の経験式を使用した。ただし、SWANの波浪推算では別の海面抵抗係数が使用されており、そのため波浪場はYelland and Taylorの抵抗係数でシミュレートされたものではないことに注意する。また、より先進的なシミュレーションでは、海面抵抗係モデルの選択も検討要素として重要であり、そのための実装実験を行う必要がある。図6はネスティング計算で2番目に大きな計算領域(domain2)においてGISにより可視化された、摩擦速度 u^* および有義波高 H_s の海面分布である (対象日：2004年2月23日10:00)。図7および図8は、それぞれ本モデルとWoolfの波浪依存型ガス交換速度モデル (ハイブリッドモデル) k_L および海上風型モデルによって評価・算定されたガス交換速度 k_L の海面分布を可視化した結果を示している。これらの結果から、同時刻のスナップショットにおいては、ガス交換速度の空間パターンが比較的類似していることがわかる。これは高波浪領域と高風速領域の空間パターンが類似していることによる。ただし、コンター値は全ての図で統一されていないため、各モデルによるガス交換速度は定量的にはかなり異なっている。また、波浪特性を取り込んだハイブリッドモデルと海上風型モデルの時空間変動の挙動は一般に変化する。

海面物質移動シミュレーションの解析手順は次のようである：(1)気象庁GPVデータを入力値とする海面抵抗係数の海面分布評価を行う (摩擦速度の海面分布評価)、(2)(1)のデータに基づいた波浪推算シミュレーションを実行して波浪分布評価を行う、(3)GISによるガス交換速度の海面分布評価を行う。これに(4)大気-海洋間 CO_2 分圧差の空間データを組み合わせることにより、 CO_2 フラックスの海面分布評価が可能となる。GISの活用は、様々な環境情報の統合化を容易にするため、本研究で検討したシミュレーション手法の高度化においては、海洋GIS (Marine GIS) の活用・展開が有用であると考えられる。

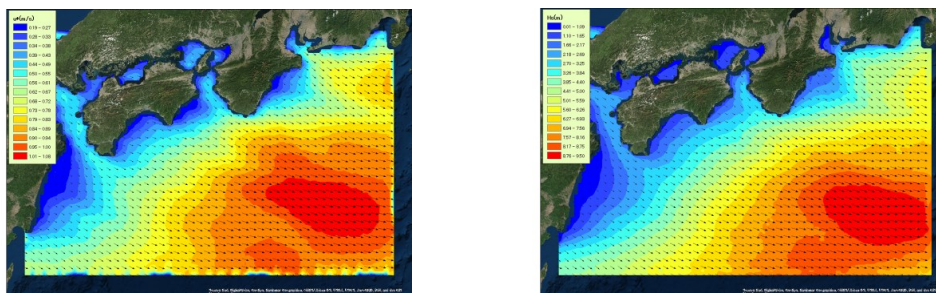


図6 摩擦速度 (左) および有義波高 (右) の海面分布

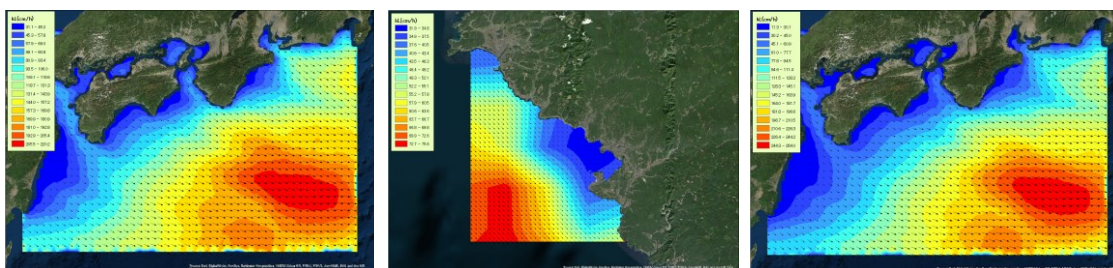


図7 波浪依存型ガス交換速度モデルの結果 (左：本改良モデル，中：本改良モデルdomain5，右：Woolf(2005))

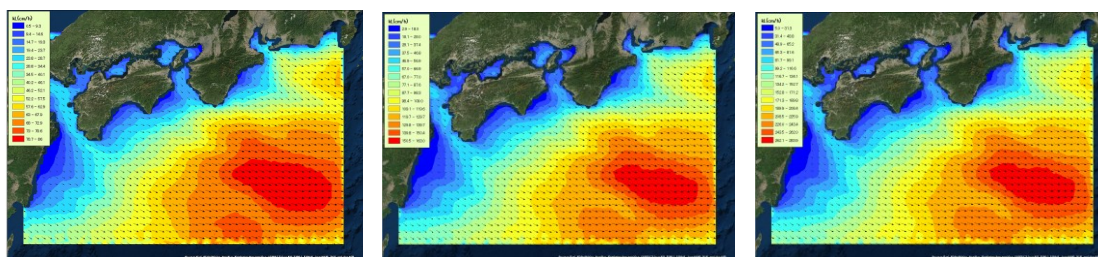


図8 海上風型ガス交換速度モデルの結果 (左：Liss and Merlivat(1986)，中：Wanninkhof (1982) 右：Jacobs et al.(1999))

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Daisuke Miyazaki, Yuji Sugihara, Yoshihiro Nakamura, Michio Sanjou, Takaaki Okamoto: Laboratory Experiments on the Transition of Wind-Driven Water Surface, Engineering Sciences Reports, Kyushu University, 40(1), pp.1-6, 2018.
- ② 白川耕, 金晟眞, 杉原裕司, Eljamal Osama, 山口創一: 水表面にせん断応力が作用する開水路乱流場の直接数値シミュレーション, 日本流体力学会年会 2018 講演論文集, pp.1-2, 2018.
- ③ 中村嘉宏, 宮崎大輔, 杉原裕司, 山上路生, 岡本隆明: 風波界面の遷移に関する実験的研究, 日本流体力学会年会 2018 講演論文集, pp.1-2, 2018.
- ④ 金晟眞, 杉原裕司, Eljamal Osama: 気液界面におけるガス交換速度の規格化について, 日本流体力学会年会 2018 講演論文集, pp.1-2, 2018.
- ⑤ 金 晟眞, 杉原裕司, 梶原鉄矢, Eljamal Osama, 山口創一: 成層効果を伴う乱流場の界面物質移動機構の解析, 日本流体力学会年会 2017 講演論文集, pp.1-3, 2017.

[学会発表] (計 7 件)

- ① 白川耕, 金晟眞, 杉原裕司, Eljamal Osama, 山口創一: 水表面にせん断応力が作用する開水路乱流場の直接数値シミュレーション, 日本流体力学会年会 2018, 2018 年 9 月 5 日, 大阪大学 (大阪市)
- ② 中村嘉宏, 宮崎大輔, 杉原裕司, 山上路生, 岡本隆明: 風波界面の遷移に関する実験的研究, 日本流体力学会年会 2018, 2018 年 9 月 5 日, 大阪大学 (大阪市)
- ③ 金晟眞, 杉原裕司, Eljamal Osama: 気液界面におけるガス交換速度の規格化について, 日本流体力学会年会 2018, 2018 年 9 月 5 日, 大阪大学 (大阪市)
- ④ 金 晟眞, 杉原裕司, 梶原鉄矢, Eljamal Osama, 山口創一: 成層効果を伴う乱流場の界面物質移動機構の解析, 日本流体力学会年会 2017, 2017 年 8 月 31 日, 東京理科大学 (東京都)
- ⑤ Sung Jin Kim, Yuji Sugihara, Tetsuya Kajiwara, Osama Eljamal, Soichi Yamaguchi: Numerical Investigation on the Effects of Thermal Stratification and Surface Shear Stress on Open-Channel Flows, The 3rd International Conference on Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (ICIMECE 2017) (国際学会), 2017 年 9 月 13 日, Surakarta (Indonesia)
- ⑥ 杉原裕司: 大気-海洋間の運動量・ガス交換機構のモデル化, 第 1 回先進的ながれ研究会 (招待講演), 2017 年 12 月 2 日, 北海道大学 (札幌市)
- ⑦ Yuji Sugihara, Tetsuya Kajiwara, Sung Jin Kim, Takuya Nakagawa, Osama Eljamal: Numerical Simulation of Open-Channel Turbulence including the Effects of Thermal Stratification and Wind Stress, 第 20 回応用力学シンポジウム, 2017 年 5 月 21 日, 京都大学 (京都市)

[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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉原 裕司 (SUGIHARA YUJI)
九州大学・総合理工学研究院・教授
研究者番号: 70243970

(2) 研究分担者

なし

(3) 研究協力者

なし