

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02249

研究課題名（和文）大気-海洋間の運動量・ガス交換機構の統合的モデル化とその地球環境工学的応用

研究課題名（英文）Integrated modeling of air-sea momentum and gas exchange mechanisms and its application to global environmental engineering

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） 12,200,000円

研究成果の概要（和文）：種々のスケールの風洞水槽実験を通して、風波界面の運動量・ガス交換機構を波浪・砕波・乱流の力学的視座から統合的に捉える研究を行った。風波界面の遷移、表面流、波浪、砕波、乱流の特性を低風速から超高風速レンジにわたって様々な手法を用いて系統的に調べ、海面抵抗係数の風速、波浪・砕波依存性を明らかにした。さらに、実験的・理論的検討から得られた知見に基づいて、ガス交換速度のモデル化を行った。波浪・砕波・乱流の統合的な描像に基づくモデルを波浪場の数値シミュレーションの解析に適用することで、実海洋での海面フラックス推定における波浪・砕波の影響を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、海面境界過程の力学的理解とその応用としての海面フラックス、主に海面抵抗係数とガス交換速度の定式化について重要な知見を与えるものである。特に、様々な条件下で行われた大規模風洞水槽実験のデータは極めて有用であり、地球温暖化や台風の予測に関わる局所大気海洋相互作用の物理的理解に寄与する重要な研究資料となる。これまでの海面抵抗係数やガス交換速度は主として海上風速に基づいてモデル化されてきたが、本研究で示した波浪・砕波の効果を取り入れたモデル化の試みは、新たな予測手法を確立する上で意義のある知見を提示するものである。

研究成果の概要（英文）：Through various wind-water tunnel experiments, air-sea momentum and gas exchange mechanisms were investigated from viewpoints of wave motion, breaking wave and turbulence dynamics. Characteristics of the surface transition, surface flow, wave motion, breaking wave, and turbulence at the wind-wave interface were systematically investigated by using a variety of techniques under conditions ranging from low to very high wind speeds, and the dependence of the sea surface drag coefficient on wind speed, wave motion and breaking wave was clarified. In addition, the gas transfer velocity was modeled on the basis of experimental and theoretical findings. By applying the developed model to numerical wave simulation, the influence of wave motion and breaking wave on the sea surface flux estimation in the ocean was investigated.

研究分野：地球環境水理学

キーワード：風波 運動量交換 ガス交換 砕波 地球温暖化

## 1. 研究開始当初の背景

海面の大気側と海洋側には、風波界面によって結合された海面境界層があり、そこでは風波乱流によって運動量やCO<sub>2</sub>が輸送されている。風応力によって大気の運動量は海洋へと輸送され、その運動量は流れと波動へと分配される。海面近傍に発生する表面流は、風波の波動運動に起因するストークスドリフト、オイラー平均流、乱れから構成されており、表面流は風応力の作用を理解する上で重要な物理量となる。風波界面での運動量フラックスをバルク表示した際の輸送係数が海面抵抗係数C<sub>D</sub>である。海面抵抗係数は海面粗度z<sub>0</sub>と力学的に等価な物理量であり、海面粗度を調べることは海面抵抗係数を調べることに同等である。海面粗度z<sub>0</sub>に関しては、これまで多くの先行研究が行われており、無次元粗度gz<sub>0</sub>/u\*<sup>2</sup>と波齢の逆数u\*/c<sub>p</sub>との関係を表した経験式の構築が試みられてきた(u\*: 気流の摩擦速度, g: 重力加速度, c<sub>p</sub>: 風波卓越波の波速, 波齢c<sub>p</sub>/u\*: 風波の発達状態を表す無次元数)。しかしながら、これらのパラメータ空間で記述された経験式は定性的に異なる挙動を示すものも多く、一貫した法則性を見出すことは困難であるように思われる。そのため、海面抵抗係数(海面粗度)の波浪・砕波依存性を解明し、そのモデル化手法を構築することは海面交換過程研究の挑戦的課題となる。

大気-海洋間のCO<sub>2</sub>フラックスをバルク表示した際の輸送係数がガス交換速度k<sub>L</sub>である。ガス交換速度には種々の経験的モデル式が提案されているが、海上高度10mでの平均風速U<sub>10</sub>との相関式の形で定式化されているものが多く、その種のモデル式では多様な風波界面でのガス交換を記述するのは困難であると考えられる。風波砕波は、直接的な界面崩壊や気泡生成に加えて、海面近傍の乱流混合を強化することを通してガス交換を著しく促進する。しかし、風波界面での運動量・ガス交換を支配する乱流力学には未解明な点が多く、そのことが運動量交換やガス交換の高度なモデル化を妨げる要因になっている。そのため、波浪・砕波や乱流に支配された風波界面の交換機構の解明は、ガス交換速度のモデル化や海面CO<sub>2</sub>収支を評価する上で重要となる。

## 2. 研究の目的

本研究は、風波界面の波浪、砕波、乱流が大気-海洋間の運動量・ガス交換機構に果たす役割を種々のスケールの系統的な風洞水槽実験(大型風洞水槽, 中型風洞水槽, 小型風洞水槽)を通して解明することを目的とする。風波界面の遷移に伴う表面流、波浪、砕波、乱流の特性を低風速から超高風速レンジにわたって系統的に調べることによって、風波界面の運動量とガス交換を統合した力学的視座から捉え、海面抵抗係数およびガス交換速度(CO<sub>2</sub>)のモデル化を試みる。本研究では、風洞水槽実験において、複数手法による海面抵抗係数の実験結果を比較し、運動量フラックスの高精度測定法に関する知見を収集する。高速カメラを用いた先進的な粒子画像計測法(PIV)による乱流計測手法を活用し、水面近傍の乱流特性量の分布を実験的に把握する。風波乱流場に加え、開水路乱流場、振動格子乱流場についても検討を行う。また、十分に知見が得られていない局所ガス交換速度の計測手法と加速流による局所的な乱れの変化がガス交換速度に及ぼす影響を明らかにする。本研究は、主として実験的立場から風波界面の交換機構について検討を行うが、現象の包括的理解のために数値シミュレーションも実施する。海面画像計測による白波被覆率の深層学習アルゴリズムを構築し、波浪モデル(SWAN)による白波エネルギー散逸率に基づいて数値シミュレーションを介して白波被覆率を推定する手法を提案する。さらに、海面フラックスモデルを実海洋へ適用する手法を検討し、波浪・砕波の影響を評価する。

## 3. 研究の方法

### (1) 海面抵抗係数の風速および波浪・砕波依存性

大型風洞水槽実験では、長さ54m、幅1.2m、高さ2mの風洞水槽(九州大学応用力学研究所所有)を使用した(図1参照: 図は海面抵抗係数の波浪・砕波依存性実験の仕様)。大型風洞水槽では、まず海面抵抗係数の測定手法の検討として、基準風速を種々変化させて、吹送距離20mにおいて運動量収支法(MB法)とプロファイル法の比較・検討を行った。MB法は、間接的に気液界面を通しての運動量フラックスを測定する手法であり、四連水位計を用いて水位測定を実施した。平均風速分布の計測にはピトー管を、水位変動の計測には容量式波高計を用いた。同手法では摩擦速度は式(1)のように表され、空気の密度をρ<sub>a</sub>、水の密度をρ<sub>w</sub>、測定間隔をΔx、風がない場合の平均水位をh̄、水位勾配をs、圧力差をΔPとする。

$$u^* = \sqrt{\frac{1}{\rho_a} \left( \frac{\Delta P}{\Delta x} \bar{h} + \rho_w g s \bar{h} \right)} \quad (1)$$

海面抵抗係数の波浪・砕波依存性実験では、プロファイル法によって風速分布より摩擦速度、海面粗度、海面抵抗係数を推定した。基準風速を種々変化させて、吹送距離10m(EXP1)および25m(EXP2)の位置において、水面上の平均風速の鉛直分布ならびに水位変動の計測を行った。これらの実験結果から、風波スペクトルの高周波エネルギーの波齢依存性に基づいて、波浪・砕波依存型の海面抵抗係数のモデル化を行った。また、風波界面上でのフロート移流実験によって表

面流速を測定し、さらにストークスドリフト流速を推定した。

## (2) 乱流場および局所ガス交換速度の特性

長さ 16m、幅 0.4m、高さ 0.5m の小型風洞水槽実験において、2 台の高速カメラを水路側方に設置し、それぞれ水流の PIV 計測および水位変動計測を実施した。図 2 にその計測システムの概略図を示す。2 つのカメラを同じパルスジェネレータに接続することで、撮影のタイミングを同期させて同時計測を行った。トレーサ粒子 (100 $\mu$ m) を流れ場に懸濁させ、高出力レーザーによるレーザー光シート (LLS) によって可視化された粒子群を高速カメラで連続撮影した。また、風波界面下の乱流特性を考察するために、瞬間流速の時系列データを波動成分と乱れ成分に分離する手法を構築した。さらに、開水路乱流場を対象として、加速領域を有する水路内において、微小酸素プローブを用いて溶存ガス濃度の濃度境界層を測定し、ガス交換速度を評価した。また、PIV による乱流計測の結果を用いて、ガス交換速度と乱れ特性の関係について検討した。

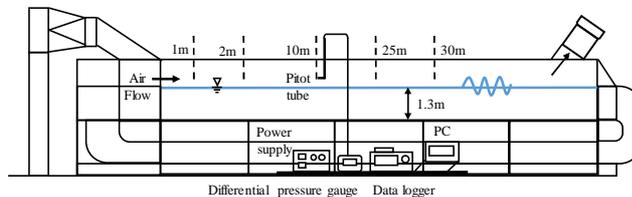


図 1 大型風洞水槽実験の概略図

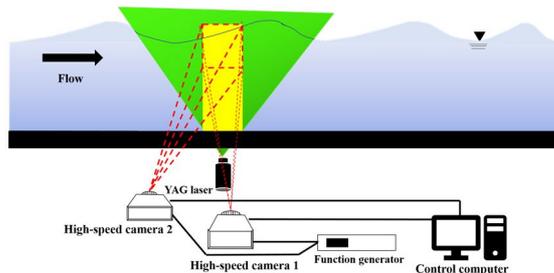


図 2 小型風洞水槽実験の概略図

中型風洞水槽においても PIV による流速計測実験を行った。中型風洞水槽として、長さ 17m、幅 0.6m、高さ 0.8m の矩形断面を有する風洞水槽 (九州大学応用力学研究所所有) を使用した。トレーサ粒子 (100 $\mu$ m) を懸濁させ、水槽底部から LLS を入射した。基準風速を変化させて、吹送距離 10m の位置においてトレーサ粒子の動きを高速カメラによって撮影した。得られた画像を解析し、主流方向と鉛直方向における瞬間流速値の評価を行い、乱流特性量の解析を行った。

## (3) 白波被覆率とガス交換速度のモデル化および海面フラックスの適用

波浪・碎波依存性は主として高周波エネルギーに含まれるとした海面抵抗係数のモデル化の概念を適用し、先行研究や本研究の見解に基づいてガス交換速度のモデル化を行った。さらに、海面の碎波画像を深層学習することによって白波被覆率を算定する新たな画像解析アルゴリズムを構築した。また、波浪モデル (SWAN) を用いて白波エネルギー散逸率を算定し、散逸率と白波被覆率の関係を経験的にモデル化することによって、SWAN が出力する白波エネルギー散逸率から白波被覆率を推定する手法を開発した。さらに、SWAN による波浪場のシミュレーション結果と海上風速データに基づいて、本研究と先行研究の実験結果および見解に基づいて、海面フラックスモデルを実海洋に適用する方法を検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 海面抵抗係数の風速および波浪・碎波依存性

図 3 に風速  $U_{10}$  と海面抵抗係数  $C_D$  の関係を示す。高風速域では、MB法・プロファイル法ともに推定値の差は小さく、抵抗係数が一定値となる傾向が観察された。一方で、低風速域では手法により推定値に差がみられた。特に MB法では既往研究の値よりも高い値を取った。プロファイル法では、推定法の自由度が高くより信頼性の高い技法が望まれる。MB法では、手法の特性から低風速における推定精度が悪い。一方で、高風速域ではプロファイル法による任意性が低いこと、MB法による測定精度が高いことから、手法によらず既往研究と類似の傾向を取ることが明らかとなった。本研究より、Iwano et al. (2013) において提案された運動量輸送モデルと物質輸送モデル間の定性的な物理イメージを描くことができる。つまり、高風速域特有の特殊な碎波が起り、高風速域では通常風速域よりもはるかに物質輸送量が大きくなる。本現象は水槽の大きさに依存せず、波打つ水面上で普遍的に発生していると推測される。

以降の考察はプロファイル法による摩擦速度の評価に基づいており、計測手法検討を目的に行った (1) の摩擦速度とは実験値が異なることに注意する。図 4 に無次元粗度  $gz_0/u_*^2$  と波齢の逆数  $u_*/c_p = \omega_p u_*/g$  との関係を示す。図中における三角のプロットが EXP1、丸が EXP2 のデータを示す。図中に先行研究の経験式として、直線 (Masuda and

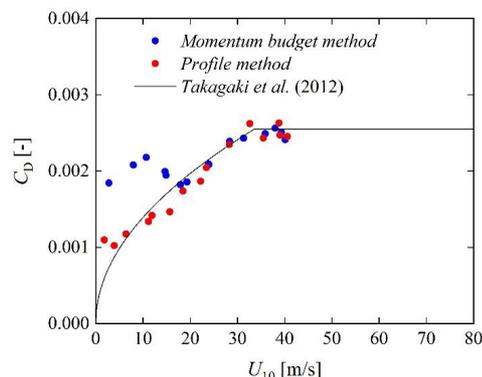


図 3 海面抵抗係数と風速の関係

Kusaba(1987)), 点線(Charnock(1955))および破線(Toba(1979))を併せてプロットした。この図より, 気泡と飛沫を伴う激しい砕波が発生する臨界条件付近に相当する  $U_{10}=25\text{m/s}$  においてデータの挙動が変化することがわかる。無次元粗度  $gz_0/u_*^2$  が次の無次元数に支配されるものと仮定する。

$$gz_0/u_*^2 = f\left(\omega_p u_*/g, \nu u_*/\gamma, gE_h^{1/2}/u_*^2; \text{spectral structure}\right) \quad (2)$$

$gE_h^{1/2}/u_*^2$  は風波の高周波領域の無次元エネルギーを示し,  $E_h$  は以下のように定義される。

$$E_h = \int_{\omega_r=3\omega_p}^{\omega_{max}} \Phi(\omega) d\omega \quad (3)$$

この量は砕波に起因した高周波領域の変動を定量化するために導入したものである。本研究では純粋な風波データのみを使用したため, スペクトル形の因子 spectral structure をある条件に固定したものとみなし, また物性値と定数値のみの無次元数の影響は経験係数に含まれるとした。従って, 無次元粗度  $gz_0/u_*^2$  を規定する実質的な無次元数は,  $\omega_p u_*/g, \nu u_*/\gamma, gE_h^{1/2}/u_*^2$  の3つである。図5に  $\nu u_*/\gamma$  および  $gE_h^{1/2}/u_*^2$  で再規格化した無次元粗度  $gz_0/u_*^2$  と  $\omega_p u_*/g$  の関係を示す。最小二乗近似の式を算出すると  $\omega_p u_*/g$  の指数は0.94となり, ほぼ1乗に比例する。得られた経験式は

$$gz_0/u_*^2 = \alpha(\omega_p u_*/g)^{0.94} (\nu u_*/\gamma)^1 \left(gE_h^{1/2}/u_*^2\right)^1 \quad (4)$$

となり, ここで定数 $\alpha$ は1.10である。海面粗度の経験式である式(4)を用いて, 海面抵抗係数の経験式を構築した。本研究では, 物性値である $\nu$ と $\gamma$ を近似的に一定とみなし, 高度10mにおける平均風速 $U_{10}$ に基づく海面抵抗係数 $C_{D10}$ の経験的モデルとして次式を提案した。

$$C_{D10}/\kappa^2 = -0.1904y^2 + 0.106y + 0.0039 \quad y = 0.02(E_h^{1/2} \omega_p)^{1/2} U_{10} \quad (5)$$

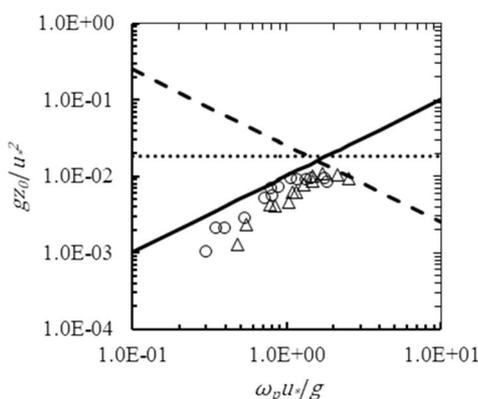


図4 無次元粗度と波齢の逆数の関係

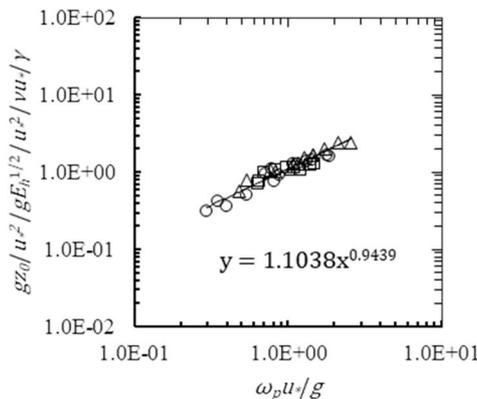


図5 規格化した無次元粗度と波齢の逆数の関係

本研究で得られた海面抵抗係数は砕波によるエネルギー散逸を考慮したモデルとなっており,  $U_{10}$  だけではなく  $\omega_p, E_h$  に依存する。 $E_h$  については波齢  $g/(u_* \omega_p)$  または  $g/(U_{10} \omega_p)$  を用いて評価した。

図6に大型風洞水槽のフロート移流実験によって得られた表面流速, オイラー平均流速, ストークスドリフト流速の摩擦速度依存性を示す。図中の破線はWu(1983)の経験式, 青色の実線は風波の微小振幅波理論に基づくストークスドリフト流速の近似式を示す。これより摩擦速度の増加と共に, 表面流速の増加率が低下し, 線形関係から変化して飽和挙動を示すことがわかる。これは平均流に注入された運動量が砕波乱流エネルギーへと転化したことを示唆する。

#### (2) 乱流場および局所ガス交換速度の特性

図7は波と乱れの分離後に, 水面摩擦速度 $u_{*s}$ で無次元化したレイノルズ応力の鉛直分布を示す。乱れによるレイノルズ応力 $-\overline{u_t v_t}$ は風速と水流速の流速差が大きい場合, 底面付近まで非常に小さな値となる。この場合, 逆勾配区間の影響が強いため, 乱れの生成が抑制される可能性がある。一方で水面付近では全ケースで大きな正値を取る。これは風速が大きくなることで気流側から水側への乱流エネルギーの輸送が促進されるためである。波によるレイノルズ応力 $-\overline{u_w v_w}$ は, 水流の断面平均流速が同一のケース間では風速が大きくなるほど水面付近で大きな値を示し, 乱れの応力とは逆に負値をとる。これは, 波高の増

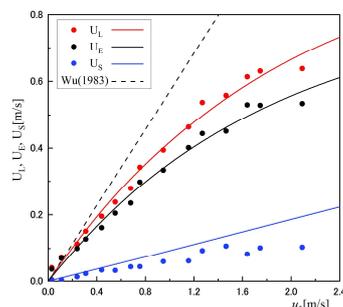


図6 表面流速の摩擦速度依存性

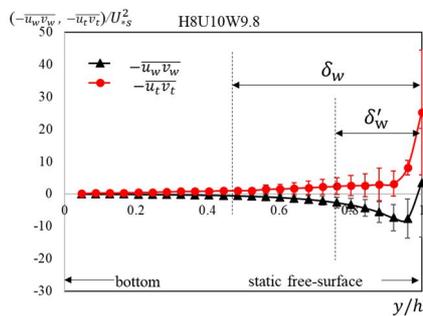


図7 レイノルズ応力の鉛直分布

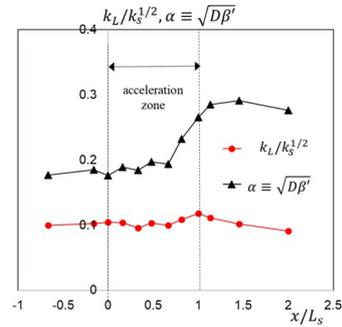


図8 加速領域での局所ガス交換速度の変化

加が影響しているためと考えられる。

図8は気液界面を有する加速領域をもつ開水路乱流場において行った局所的なガス交換速度の測定結果を示す。図は界面の乱れエネルギー $k_s$ で無次元化したガス交換速度 $k_L/k_s^{1/2}$ の主流方向変化を示す。平坦床に比べて、加速領域において、およそ1.5倍の大きさとなり、このことは平均流が加速するとガス交換が促進することを意味する。このことは波面での加速・減速が局所的なガス交換に影響を及ぼすことを示唆する。また図中には代表的なガス交換速度モデルである界面発散モデル $k_L = \alpha \sqrt{D \beta'}$ の比例係数 $\alpha$ の変化を示している。 $\alpha$ は吹送流や風波を含む様々な水理条件で0.1~0.7程度の範囲にあるが、本実験では加速領域においてもこの範囲内で増加することが明らかである。また、局所的な乱れ速度 $k_s^{1/2}$ で無次元化した局所ガス交換速度 $k_L/k_s^{1/2}$ は加速領域を含めてほぼ0.1の一定値を保っており、流れの加速に関係なく、局所的な乱れ速度に規定されることを示唆している。

### (3) 白波被覆率とガス交換速度のモデル化および海面フラックスの適用

本研究では、深層学習による海面画像解析から求めた白波被覆率 $W_c$  [%]と波浪モデルSWANによる白波エネルギー散逸率 $\varepsilon_t$  [W/m<sup>2</sup>]の関係を経験的に次式のように表した。

$$W_c [\%] = 6.37 \times 10^{-1} \varepsilon_t^{1.72} \quad (6)$$

この経験式を用いることで、波浪モデルから白波被覆率を算定することが可能となった。

海面抵抗係数における砕波の作用は高周波エネルギーによって特徴づけられることを明らかにした。そこで、無次元高周波エネルギーを波齢 $A_w$ により普遍表示(ロジスティック関数)し、その依存性を導入することでガス交換速度のモデル化を行った。

$$k_L [\text{cm/hr}] = (A u_* + B) / (1 + \alpha \exp(-\beta A_w)) (1 - W) + 1035 W \quad (7)$$

$$A_w = g / (u_* \omega_p), A = 91.4, B = 27.0, \alpha = 14.3, \beta = 2.21, W: \text{fractional whitecap coverage}$$

ここでは、先行研究のCO<sub>2</sub>に関するガス交換速度の実験結果(津守(2005))を用いてモデル式を構築した。なお、モデル係数の値については今後修正する余地があることに注意する。砕波項(右辺第2項)には、便宜的にSuzki et al.(2015)が提案したモデル式を採用した。図9に波浪モデルSWANによるシミュレーション結果を用いて解析された結果の一例を示す。ここで、(a)白波エネルギー散逸率 $\varepsilon_t$ 、(b)白波被覆率 $W_c$ 、比較のために(c)Wanninkhof(1992)のガス交換速度モデル( $k_L [\text{cm/hr}] = 0.31 U_{10}^2$ )による結果、(d)本研究で構築されたガス交換速度モデルの結果を示す。なお摩擦速度の抵抗係数として図3のTakagaki et al.(2012)の経験式を用いた。ただし波浪場自体はこの抵抗係数を適用した結果ではなく、SWANに基本実装された抵抗係数を用いて計算されていることに注意する。これより、海上風速のみで表現されたWanninkhofのモデルの結果と、波齢と白波砕波の影響を組み込んだ本モデルの結果では、ガス交換速度の分布の特徴が定量的に大きく異なることがわかる。これより、海上風速型モデルではガス交換における砕波の影響を適切に表現することができないことが明らかである。白波被覆率に対して先行研究のような風速のべき乗モデルを用いた場合、やはり風速依存の分布しか算定できない。本研究のように、波浪シミュレーションを介して海面フラックスを評価することは実海洋への適用方法として極めて有用である。

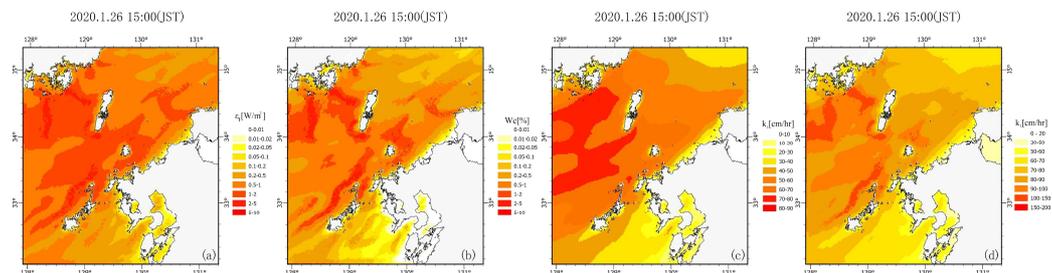


図9 波浪シミュレーションによる解析結果 ((a)白波エネルギー散逸率, (b)白波被覆率, (c)ガス交換速度 (Wanninkhof(1992)), (d)ガス交換速度 (本モデル))

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Michio Sanjou, Kyohei Kato, Wataru Aizawa, Takaaki Okamoto	4. 巻 22
2. 論文標題 Development of drone-type float for surface-velocity measurement in rivers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Environmental Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 955-969
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10652-022-09874-1	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 Michio Sanjou, Yuji Sugihara	4. 巻 35
2. 論文標題 Experimental study on characteristics of turbulence and sediment transport produced by wind-induced water waves	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 22111
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0138538	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 Michio Sanjou, Asuka Shigeta, Kyohei Kato, Wataru Aizawa	4. 巻 80
2. 論文標題 Portable unmanned surface vehicle that automatically measures flow velocity and direction in rivers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Flow Measurement and Instrumentation	6. 最初と最後の頁 101964
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.flowmeasinst.2021.101964	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 Sung Jin Kim, Yuji Sugihara, Osama Eljamal	4. 巻 77(2)
2. 論文標題 Numerical simulation of turbulent open-channel flow driven by surface shear stress and thermal stratification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_967-I_972
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejhe.77.2_I_967	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 Naohisa Takagaki, Santa Sasaki, Naoya Suzuki, Soichiro Goda, Yuliya Troitskaya, Satoru Komori	4. 巻 27(1)
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 63-72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14928/amstec.27.1_63	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 該当する

1. 著者名 Yukun Wang, Ryo Ohnishi, Yuji Sugihara, Yoshihiro Nakamura, Osama Eljamal	4. 巻 -
2. 論文標題 Characteristics of whitecaps estimated from image processing of the ocean surface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 22nd IAHR-APD Congress 2020	6. 最初と最後の頁 2-4-6
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 Shoko Sugimoto, Ko Shirakawa, Yuji Sugihara, Michio Sanjou, Takaaki Okamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Simulating the effect of wind-driven shear stress on turbulent open-channel flow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 22nd IAHR-APD Congress 2020	6. 最初と最後の頁 3-3-3
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 Michio Sanjou	4. 巻 32
2. 論文標題 Local gas transfer rate through the free surface in spatially accelerated open-channel turbulence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 105103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0021098	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 Yukun Wang, Yuji Sugihara, Xianting Zhao, Haruki Nakashima, Osama Eljamal	4. 巻 76(2)
2. 論文標題 Deep learning-based image processing for whitecaps on the ocean surface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_163-I_168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.76.2_I_163	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 Yukun Wang, Yuji Sugihara, Yoshihiro Nakamura, Osama Eljamal	4. 巻 76(2)
2. 論文標題 Experimental investigation on the wind-driven surface flow associated with breaking waves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_169-I_174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.76.2_I_169	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 杉本尚子, 白川耕, 杉原裕司, 山上路生, 岡本隆明	4. 巻 75(2)
2. 論文標題 自由表面に付加されたせん断応力に対する開水路乱流場の応答数値実験	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集 B1 (水工学)	6. 最初と最後の頁 I.481-I.486
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.75.2_I_481	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 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 小場琢史, 杉原裕司, エルジャマル オサマ
2. 発表標題 水表面の流速発散に基づくガス交換速度のモデリング
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大植祐輝, 久保颯人, 杉原裕司, エルジャマル オサマ
2. 発表標題 風波界面における水面粗度に関する実験的検討
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022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 Sung Jin Kim, Yuji Sugihara, Osama Eljamal
2. 発表標題 Numerical simulation of turbulent open-channel flow driven by surface shear stress and thermal stratification
3. 学会等名 第66回水工学講演会
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 Yukun Wang, Ryo Ohnishi, Yuji Sugihara, Yoshihiro Nakamura, Osama Eljamal
2. 発表標題 Characteristics of whitecaps estimated from image processing of the ocean surface
3. 学会等名 22nd IAHR-APD Congress in Sapporo (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shoko Sugimoto, Ko Shirakawa, Yuji Sugihara, Michio Sanjou, Takaaki Okamoto
2. 発表標題 Simulating the effect of wind-driven shear stress on turbulent open-channel flow
3. 学会等名 22nd IAHR-APD Congress in Sapporo (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yukun Wang, Yuji Sugihara, Xianting Zhao, Haruki Nakashima, Osama EljamaI
2. 発表標題 Deep learning-based image processing for whitecaps on the ocean surface
3. 学会等名 第67回海岸工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yukun Wang, Yuji Sugihara, Yoshihiro Nakamura, Osama EljamaI
2. 発表標題 Experimental investigation on the wind-driven surface flow associated with breaking waves
3. 学会等名 第67回海岸工学講演会
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 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 海洋理工学会 2020年度秋季大会
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2020年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本尚子, 白川耕, 杉原裕司, 山上路生, 岡本隆明
2. 発表標題 自由表面に付加されたせん断応力に対する開水路乱流場の応答数値実験
3. 学会等名 第64回水工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高垣直尚
2. 発表標題 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 第2回先進的ながれ研究会(招待講演)
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 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 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	山上 路生  (Sanjou Michio)  (80362458)	京都大学・工学研究科・准教授   (14301)	
研究分担者	高垣 直尚  (Takagaki Naohisa)  (00554221)	兵庫県立大学・工学研究科・准教授   (24506)	
研究分担者	E l j a m a l O s a m a  (EljamaI Osama)  (40600052)	九州大学・総合理工学研究院・准教授   (17102)	

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
---------	---------