

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560501
 研究課題名 (和文) 大気-海洋間における二酸化炭素交換速度の推定法に関するフィールド実証研究
 研究課題名 (英文) FIELD STUDY ON EVALUATION OF AIR-SEA CO₂ TRANSFER VELOCITY
 研究代表者
 杉原 裕司 (SUGIHARA YUJI)
 九州大学・総合理工学研究院・准教授
 研究者番号：70243970

研究成果の概要：大気-海洋間における CO₂ 交換速度の波浪依存性を明らかにするためにフィールド観測を実施し、CO₂ 交換速度の推定法に関する検討を行った。CO₂ 交換速度は波の発達状態やうねりの影響を強く受けることを明らかにした。さらに、波齢と風波レイノルズ数のような波のスケールと乱流状態を表す2つの無次元パラメータを用いることで、局所平衡状態の風波波浪場における CO₂ 交換速度の波浪依存性を普遍表示できることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,400,000	0	2,400,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	330,000	3,830,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工水理学

キーワード：海洋物理, 気体交換, 二酸化炭素, 地球温暖化

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化の予測精度を向上させるためには、大気-海洋間における二酸化炭素 (CO₂) の交換フラックスをいかに正確に見積もるかが重要な鍵と考えられている。海洋表面を通して輸送される CO₂ フラックス F は、CO₂ の海水への溶解度 S 、気体交換速度 k_L および大気-海洋間の CO₂ 分圧差 Δp_{CO_2} の積で表される。これらの中で、最も多くの不確定要素を含んでいるのが交換速度 k_L である。これまでに提案されてきた交換速度の推定式の多くは、海上高度 10m の平均風速 U_{10} との関係性を多項式やべき乗式の形で表した単なる

相関式であり、推定式ごとに大きなばらつきが見られる。海上風速が同じでも吹送距離によって風波や海面近傍の乱流境界層の発達具合が大きく異なるため、交換速度を風速のみで表すことはできないはずである。

研究代表者は、これまでに吹送距離を種々変化させた風波気液界面の気体交換速度を測定する実験研究を行っている。その結果、気体交換速度の吹送距離依存性を実験的に見出し、摩擦速度 u_* で規格化された無次元交換速度 k_L/u_* が波齢 c_p/u_* と風波レイノルズ数 R_B ($\equiv u_*^2/\alpha\rho v_a$) の2つの無次元パラメータを用いて普遍表示できることを明らかにし

た. ここで, c_p , ω_p はそれぞれ風波卓越波の位相速度, 角周波数であり, ν_a は空気の動粘性係数を示す. これらの風波特性状を用いて実海洋における CO_2 交換速度が定量化できることを実証する試みは, 水理学・海岸工学の立場から地球環境問題の解決に寄与する基礎研究として重要な意義を持つものと考えられる.

2. 研究の目的

本研究の目的は, 沖合の海洋観測塔でのフィールド観測を通して, 大気-海洋間の CO_2 交換速度が波浪状態に依存してどのように変化するかを実証することである. 特に, 波浪場の発達状態を表す波齢と, 平均風向に対するうねりの伝播方向の相対関係に着目して, 交換速度の波浪依存性を明らかにする. 本研究では, 波浪データを常時観測している海洋観測塔において長期自動観測を実施する. 従って, 荒天時を含めた広範囲の波浪データを備えた CO_2 交換速度のデータセットを取得することができ, 風波特性状に基づく交換速度の推定法の検討が可能となる. 得られた観測データを総合的に整理して, 交換速度の普遍表示について検討を行う. 波齢および風波レイノルズ数 (またはクーリガン数 $Ke \equiv u_*^3/g\nu_a$) に対する CO_2 交換速度の依存性を検証して, これらの風波特性状を用いた CO_2 交換速度の推定法の有効性について検討する. また本研究では, 代表的なフラックス測定法である渦相関法と慣性散逸法の2つの測定法を併用することにより, 精度の高い運動量フラックス (摩擦速度) と CO_2 フラックスのデータセットを構築する方法についても検討を行う.

3. 研究の方法

(1) フィールド観測

本研究の観測は, 和歌山県西牟婁郡白浜町田辺湾沖合 2 km に位置する田辺中島高潮観測塔において行われた. 超音波風速温度計と Open path 型非分散赤外線ガス分析計 (NDIR) を用いて, 風速変動, 温度変動, 水蒸気濃度変動, CO_2 濃度変動を測定し, Webb 補正を施した渦相関法 (Eddy Correlation Method: ECM) から大気-海洋間のトータル CO_2 フラックスを評価した. また, 超音波波高計 (WAVEADCP) を観測塔から約 20m 離れた海底に設置して波浪計測を実施した. 図 1 に, 本研究で使用した海洋観測塔と計測システムの概略図を示す.

本研究において製作した海水中の溶存 CO_2 濃度の測定システムの概略図を図 2 に示す. これは, 中空糸膜モジュールから成る気液平衡器を用いて溶存濃度の平衡気体を作成し, 非分散赤外線ガス分析計でその濃度を測定することで海水中の CO_2 濃度を計測する装置

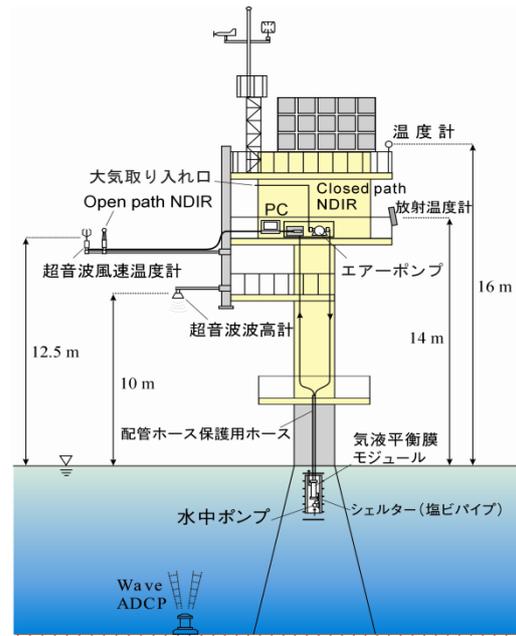


図 1 海洋観測塔と計測システム

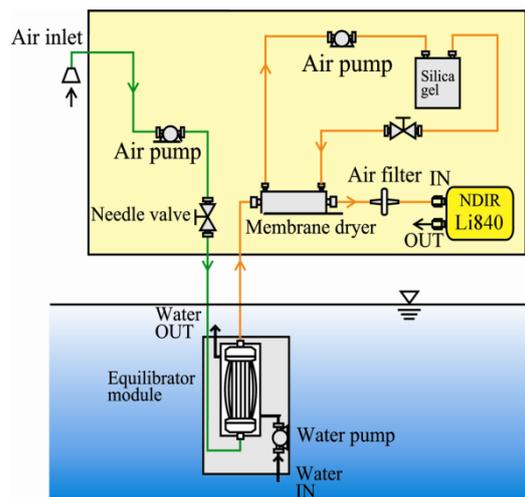


図 2 海水中の CO_2 濃度測定システム

である. 長期間に渡って溶存 CO_2 濃度の自動測定を行うことを考慮して低電力型のシステムとしており, 中空糸膜モジュールの代わりに多孔質透過膜チューブをコイル状に巻いた気液平衡器の使用も試みた. また, 観測塔において撮影された海面デジタル画像を解析して白波被覆率を評価した.

(2) CO_2 交換速度の波浪依存性と普遍表示

WAVEADCP の波浪データに基づいて波の方向スペクトルを算定し, フラックス観測時の波浪場がどのような風波成分波とうねり成分波から構成されていたのかを評価した. 本研究では, 波齢 c_p/u_* および平均風向に対するうねりの伝播方向の相対関係に着目した. 平均風向に対するうねりの相対関係を, (a) Pure windsea, (b) Swell-dominated sea,

(c)Cross swell, (d)Following swell, (e)Counter swell の5つのケースに分類した. ここで, Pure windsea は風波が卓越する波浪場を, Swell-dominated sea はうねりが卓越する波浪場を示している. また, 風向とうねりの伝播方向の偏角が $\pm 135^\circ \sim 180^\circ$ の場合を Counter swell, $\pm 45^\circ \sim 135^\circ$ の場合を Cross swell, $0^\circ \sim \pm 45^\circ$ の場合を Following swell と定義している. CO_2 交換速度に及ぼす波齢やうねりの影響を正しく見るためには, 一方のパラメータの値を固定して調べる必要がある. 本研究では, その点に着目して CO_2 交換速度の波浪依存性について検討を行っている.

観測データから得られた CO_2 交換速度と風波特性量の関係を調べることで, 交換速度の推定式がどのような無次元パラメータで表示されるべきであるかについて検討した. 本研究では, 無次元パラメータとして, 波のスケールを表す波齢 (その逆数は波風径数: 風波の非線形度を表す) と, 風波乱流場の乱流強度を表す風波レイノルズ数 R_B およびクーリガン数 Ke ($\equiv u_*^3/gv_a$) を検討対象とした.

Woolf (2005) は, k_L を (低風速領域において効く) 非砕波による寄与 k_0 と (高風速領域において効く) 砕波による寄与 k_b に分けて評価する手法を用いて, k_L に対する砕波の効果を定量化することを試みた. このように k_0 と k_b を組み合わせたモデルは Hybrid model と呼ばれている. Woolf の試みの興味深い点は, 砕波の効果 (白波被覆率 W_c でパラメータ化) を介して, 交換速度の波浪依存性を表現しようとしている点である. しかし, Woolf は波浪状況に依存する交換速度のモデルを提案してはいるが, k_0 の波浪依存性を考慮していない. また, 彼のモデルは, 無次元表示しておらず, 観測データとの比較も行われていない. 本研究では, Hybrid model が示す波浪依存性が観測データの挙動と整合するか否かについて検討した. また, Hybrid model を基に, モデルの無次元表示を行い, より妥当と思われる交換速度の普遍表示を試みた.

(3) 渦相関-慣性散逸併用法によるフラックスの評価

測定方法に起因した誤差の小さなデータセットを取得する手法として, 代表的なフラックス算定法である渦相関法 (ECM) と慣性散逸法 (Inertial Dissipation Method: IDM) の同時併用法について検討した. 理想的な接水大気境界層においては両手法の測定値は一致することが期待される. 従って, 両者の適合度の高いデータは, 良好な観測条件において得られた精度の高いデータであると考えられる. また, どのような波浪状態において両者の適合性が変化するかを調べることで, 海面境界過程に及ぼす波浪場の力学

的な作用について検討することができるであろう. これらの観点から, 渦相関-慣性散逸併用法によるフラックスのデータ選別法と, 波浪場が海面境界過程に及ぼす影響について検討した.

4. 研究成果

(1) CO_2 交換速度の波浪依存性と普遍表示

うねりの条件を指標として CO_2 交換速度 k_L と中立換算された平均風速 U_{10N} の関係を調べた結果, うねりを含むデータは Pure windsea と比較して相対的にばらつきが大きくなり, うねりの存在が海面 CO_2 交換において強い力学的コンタミネーションとして作用することがわかった. 特に Cross swell の状態が交換速度に及ぼす影響が最も大きかった. k_L と U_{10N} の関係においては, 波齢が大きいほど k_L は相対的に大きくなる傾向を示すことがわかった. これは, 摩擦速度 u_* が同じであれば, 波のスケールが大きいほど気体交換が促進することを意味する. このような傾向は, 海面抵抗係数の場合とは逆であり, 気体交換と運動量交換が異なるメカニズムに支配されていることを示唆している.

局所平衡状態にある風波波浪場の観測データのみを対象として CO_2 交換速度と風波特性量との関係について検討した. その結果, 無次元化された交換速度 k_L/u_* は, 波齢 c_p/u_* と風波レイノルズ数 R_B (またはクーリガン数 Ke) の2つの無次元パラメータに依存することを明らかにした. このことは, 海上風速 (もしくは摩擦速度) のみで表示されている従来の経験式の多くが多様な波浪条件下での CO_2 フラックスを推定する上で問題があることを意味している. 本研究では, 局所平衡下にあるデータ (Pure windsea) を用いているため, 風波レイノルズ数 R_B , クーリガン数 Ke および有義波高 H_s によるレイノルズ数 R_H ($\equiv u_* H_s / v_a$) は吹送距離則により相互変換が可能であることから, 波齢と R_H の組み合わせによっても k_L/u_* の挙動を表すことが可能であることに注意する.

CO_2 交換速度の Hybrid model に基づいて, 風波特性量を用いた普遍表示について検討を行った. Woolf の Hybrid model における k_b は白波被覆率 W_c に基づいて定量化されている. 従って, W_c を普遍表示できる風波特性量が, 高風速領域の砕波による CO_2 交換の寄与を表すパラメータと考えることができる. 本研究の観測サイト以外で取得された観測データを含めてプロットした W_c と R_B の関係を図3に示す. この図より, R_B は様々な条件下の観測データがある程度の精度で普遍的に記述できているように見える. 従って, R_B は砕波の効果を表すのに有効なパラメータであると思われる. Woolf は k_b が W_c に比例

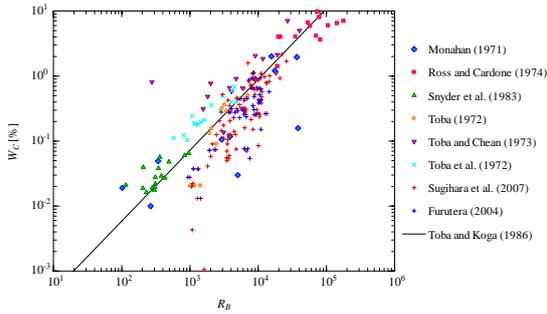


図3 W_c と R_B の関係

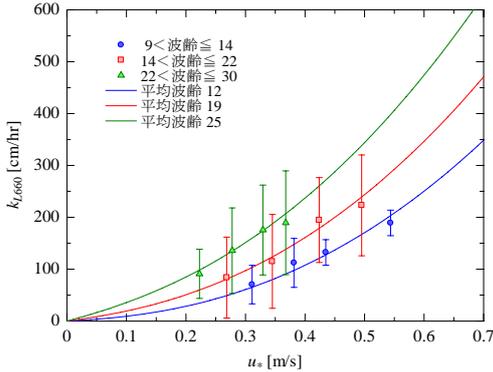


図4 波齢を指標とした k_{L660} と u_* の関係

するものと仮定してモデル化しているが、これでは交換速度の推定式が無次元表示されない。本研究では、 k_b/u_* が W_c の関数であるとして、無次元表示された定式化を試みた。

図4に、波齢を指標とした Pure windsea における k_{L660} と u_* の関係を示す (k_{L660} は CO_2 のシュミット数 $Sc=660$ に対する k_L)。この図より、波齢が大きいほど交換速度は相対的に大きくなる傾向にあることがわかる。このような挙動は、Woolf の Hybrid model のものと定性的に一致している。図中に示された実線は、Hybrid model に基づいて定式化された交換速度の推定式の値を示している。ただし、Woolf のモデルとは異なり、無次元表示されており、 k_0 の波齢依存性も考慮されている。また、オリジナルのモデル定数では我々の観測データに適合しなかったため、定数値を調整している。本研究で得られた推定式 (普遍表示) は次式ようになる。

$$\frac{k_{L660}}{u_*} = 1.0 \times 10^{-7} \left(\frac{c_p}{u_*} \right)^{2.7} + 2.0 \times 10^{-5} R_B^{0.4}$$

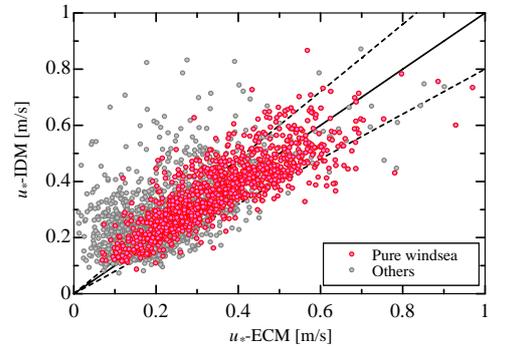
上式の右辺第1項は Hybrid model の k_0 に、第2項は k_b に対応している。

以上のように、波齢と風波レイノルズ数のような波のスケールと乱流状態を表す2つのパラメータを用いることで、局所平衡状態にある風波波浪場における交換速度の波浪依存性を普遍表示できることがわかった。

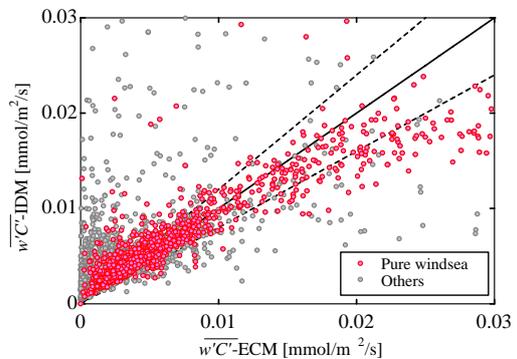
(2) 渦相関—慣性散逸併用法によるフラックスの評価

ECM と IDM の同時併用法について検討した結果、運動量フラックス、水蒸気濃度フラックス、 CO_2 フラックスについては、ECM と IDM の適合性の高いデータを抽出することによって、バラツキの少ない良質なデータセットを取得できることを示した。また、Webb 補正に基づくトータル CO_2 フラックスの評価に対しても同時併用法が有効であることを確認した。ECM と IDM の適合度は、海象条件に強く依存しており、風波が卓越する波浪場 (Pure windsea) においてより適合度が高くなることを明らかにした (図5参照)。また、波齢が大きくなる (波が発達する) につれて両者の適合度が低下することがわかった。

ECM と IDM の併用法から得られたデータセットに基づいて、中立換算された海面抵抗係数 C_{D10N} を算定し、その波浪依存性について検討した結果、波齢が小さいほど、 C_{D10N} はより大きな値を示すことを検証した。このことは、 C_{D10N} は波のスケールではなく、微細な海面形状の起伏に規定されることを意味している。また、うねりが C_{D10N} に及ぼす影響について検討した結果、うねりへの依存性は波齢のそれに比べて相対的に弱いかまたは非常に複雑であることがわかった。これらのことは、海面抵抗が波の低周波スペクトル構造には明瞭に依存しないことを示唆する。



(a) 摩擦速度



(b) CO_2 フラックス

図5 ECM と IDM によるフラックスの比較

(3)本研究の意義

これまでの大気-海洋間のCO₂交換速度の推定式の多くが海上風速や摩擦速度のみによる経験式であった。風波特性量に着目した研究例も幾つかあるが、それらのほとんどは波浪データが備わっておらず、強引に風波特性量を間接評価して交換速度をまとめようとしたものである。また、それらの推定式自体が普遍表示されていない。従って、これらの推定式は、その精度に問題があるばかりか、幅広い波浪条件の交換速度を推定することはできないものと思われる。本研究の結果から、交換速度は風速だけでは正確に表現することはできず、波齢と風波レイノルズ数を用いて表示しなければならないことが検証された。このことは、広範囲の気象・海象条件に適用可能な、より普遍的なCO₂交換速度の評価法を確立する上で重要な知見を与えるものと考えられる。

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12件)

- ① 杉原裕司, 安東卓哉, 桜木幸司, 芹澤重厚, 吉岡洋, 渦相関-慣性散逸併用法に基づく海面運動量伝達の変動性に関する研究, 海岸工学論文集, 55 巻, 46-50, 2008, 査読有
- ② 前原新時, 杉原裕司, 芹澤重厚, 吉岡洋, 海面CO₂交換速度に関するハイブリッドモデルの波浪依存性について, 日本流体力学会年会 2008 講演論文集 CD-ROM, 1-3, 2008, 査読無
- ③ 水野雄介, 杉原裕司, 津守博通, 芹澤重厚, 吉岡洋, 海面画像計測による白波砕波の定量化に関する研究, 日本流体力学会年会 2008 講演論文集 CD-ROM, 1-3, 2008, 査読無
- ④ 杉原裕司, 河津那由他, 桜木幸司, 斜面上の波動場における組織渦構造と気体交換機構, 応用力学論文集, 11 巻, 817-824, 2008, 査読有
- ⑤ 桜木幸司, 杉原裕司, 安東卓哉, 芹澤重厚, 吉岡洋, 渦相関-慣性散逸併用法に基づく海面風応力の変動特性に関する研究, 九州大学大学院総合理工学報告, 29 巻・4 号, 392-398, 2008, 査読無
- ⑥ 桜木幸司, 杉原裕司, 芹澤重厚, 吉岡洋, 渦相関法と慣性散逸法の併用による海洋上での運動量およびCO₂フラックスの評価, 水工学論文集, 第52巻, 295-300, 2008, 査読有
- ⑦ 志賀慧, 桜木幸司, 杉原裕司, 津守博通, 芹澤重厚, 吉岡洋, うねりの存在がCO₂

交換速度に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第54巻, 46-50, 2007, 査読有

- ⑧ 桜木幸司, 杉原裕司, 芹澤重厚, 吉岡洋, 大気-海洋間における二酸化炭素フラックスの評価法に関する研究, 日本流体力学会年会 2007 講演論文集 CD-ROM, 1-5, 2007, 査読無
- ⑨ 杉原裕司, 三木達也, 桜木幸司, 竹原幸生, 気液界面での気体交換を支配する乱流長さスケールについて, 日本流体力学会年会 2007 講演論文集 CD-ROM, 1-5, 2007, 査読無
- ⑩ H. Tsumori and Y. Sugihara, Lengthscales of motions that control air-water gas transfer in grid-stirred turbulence, Journal of Marine Systems, Vol. 66, 6-18, 2007, 査読有
- ⑪ 津守博通, 志賀慧, 畠山文香, 杉原裕司, 芹澤重厚, 吉岡洋, 大気-海洋間におけるCO₂交換速度の波浪条件依存性, 海岸工学論文集, 第53巻, 51-55, 2006, 査読有
- ⑫ 志賀慧, 杉原裕司, 津守博通, 畠山文香, 芹澤重厚, 吉岡洋, 大気-海洋間におけるCO₂交換速度の砕波パラメータ依存性, 日本流体力学会年会 2006 講演論文集 CD-ROM, 1-4, 2006, 査読無

[学会発表] (計19件)

- ① 杉原裕司, 安東卓哉, 桜木幸司, 芹澤重厚, 吉岡洋, 渦相関-慣性散逸併用法に基づく海面運動量伝達の変動性に関する研究, 第55回海岸工学講演会, 2008年11月12日, 富山国際会議場
- ② 杉原裕司, 河津那由他, 桜木幸司, 斜面上の波動場における組織渦構造と気体交換機構, 第11回応用力学シンポジウム, 2008年9月9日, 東北大学青葉山キャンパス
- ③ 三谷修太郎, 杉原裕司, 渦セルモデルを用いた気液界面における気体交換機構の解析, 日本流体力学会年会 2008, 2008年9月6日, 神戸大学六甲台キャンパス
- ④ 前原新時, 杉原裕司, 芹澤重厚, 吉岡洋, 海面CO₂交換速度に関するハイブリッドモデルの波浪依存性について, 日本流体力学会年会 2008, 2008年9月6日, 神戸大学六甲台キャンパス
- ⑤ 水野雄介, 杉原裕司, 津守博通, 芹澤重厚, 吉岡洋, 海面画像計測による白波砕波の定量化に関する研究, 日本流体力学会年会 2008, 2008年9月6日, 神戸大学六甲台キャンパス
- ⑥ 安東卓哉, 杉原裕司, 桜木幸司, 芹澤重厚, 吉岡洋, 海面風応力の波浪依

- 存性に関するフィールド実験, 日本流体力学会年会 2008, 2008 年 9 月 6 日, 神戸大学六甲台キャンパス
- ⑦ 安東卓哉, 杉原裕司, 桜木幸司, 芹澤重厚, 吉岡洋, 渦相関-慣性散逸併用法による海面風応力の評価, 第 57 回理論応用力学講演会, 2008 年 6 月 11 日, 日本学術会議
- ⑧ 三谷修太郎, 杉原裕司, 振動格子乱流場における気液界面での気体交換のスケーリング, 第 57 回理論応用力学講演会, 2008 年 6 月 10 日, 日本学術会議
- ⑨ 桜木幸司, 杉原裕司, 芹澤重厚, 吉岡洋, 渦相関法と慣性散逸法の併用による海洋上での運動量および CO₂ フラックスの評価, 第 52 回水工学講演会, 2008 年 3 月 7 日, 広島大学東広島キャンパス
- ⑩ 杉原裕司, 芹澤重厚, 吉岡洋, 津守博通, 桜木幸司, 海面風応力の変動特性に関するフィールド観測研究, 平成 19 年度京都大学防災研究所・研究発表講演会, 2008 年 2 月 29 日, 京都テルサ
- ⑪ 杉原裕司, 気液界面での気体交換を支配する乱流過程, 京大数理研究集会『乱流研究の展望: ブレークスルーを求めて』(招待講演), 2008 年 1 月 17 日, 京都大学数理解析研究所
- ⑫ 志賀慧, 桜木幸司, 杉原裕司, 津守博通, 芹澤重厚, 吉岡洋, うねりの存在が CO₂ 交換速度に及ぼす影響, 第 54 回海岸工学講演会, 2007 年 11 月 7 日, 宮崎観光ホテル
- ⑬ 桜木幸司, 杉原裕司, 芹澤重厚, 吉岡洋, 大気-海洋間における二酸化炭素フラックスの評価法に関する研究, 日本流体力学会年会 2007, 2007 年 8 月 6 日, 東京大学駒場キャンパス
- ⑭ 杉原裕司, 三木達也, 桜木幸司, 竹原幸生, 気液界面での気体交換を支配する乱流長さスケールについて, 日本流体力学会年会 2007, 2007 年 8 月 6 日, 東京大学駒場キャンパス
- ⑮ 津守博通, 志賀慧, 畠山文香, 杉原裕司, 芹澤重厚, 吉岡洋, 大気-海洋間における CO₂ 交換速度の波浪条件依存性, 第 53 回海岸工学講演会, 2006 年 11 月 15 日, 阿南市文化会館
- ⑯ 三木達也, 杉原裕司, 津守博通, 水表面近傍における溶存気体濃度境界層厚さのスケーリング, 平成 18 年度土木学会全国大会・第 61 回年次学術講演会, 2006 年 9 月 22 日, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス

- ⑰ 志賀慧, 杉原裕司, 津守博通, 畠山文香, 芹澤重厚, 吉岡洋, 大気-海洋間における CO₂ 交換速度の碎波パラメータ依存性, 日本流体力学会年会 2006, 2006 年 9 月 15 日, 九州大学筑紫キャンパス
- ⑱ 河津那由他, 杉原裕司, 津守博通, 三木達也, 波動場の気液界面における気体交換機構に関する実験的研究, 日本流体力学会年会 2006, 2006 年 9 月 15 日, 九州大学筑紫キャンパス
- ⑲ 三木達也, 杉原裕司, 津守博通, 河津那由他, 気液界面における溶存濃度境界層の定量可視化, 日本流体力学会年会 2006, 2006 年 9 月 15 日, 九州大学筑紫キャンパス

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・准教授
研究者番号: 70243970

(2) 研究協力者

芹澤 重厚 (SERIZAWA SHIGEATSU)
京都大学・防災研究所・助教
研究者番号: 70301249
吉岡 洋 (YOSHIOKA HIROSHI)
愛知県立大学・情報科学部・教授
研究者番号: 10027287