

機関番号：34419
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2008 年度 ～ 2010 年度
 課題番号：20360223
 研究課題名（和文） 風波砕波によるホワイトキャップ現象の高速ビデオカメラによる可視化
 研究課題名（英文） A study on breaking wind waves with white caps by means of
 Visualization with high-speed video cameras
 研究代表者
 竹原 幸生（TAKEHARA KOHSEI）
 近畿大学・理工学部・教授
 研究者番号：50216933

研究成果の概要（和文）：

大気-海洋間の気体輸送現象に対するホワイトキャップの影響を明らかにするため、3台の高速ビデオカメラを用いた画像計測法により、風波界面近傍の流れ場計測技術を開発し、ホワイトキャップが生じている近傍の流れ場を明らかにした。さらに、気流と風波発達の関係も画像計測により明らかにした。また、砕波により生じた気泡の特性を画像計測により明らかにした。さらに、全球規模での大気-海洋間の気体輸送に対する砕波の影響も現地計測データや衛星データを用いて評価した。

研究成果の概要（英文）：

In order to understand the mechanism of gas-transfer at wind waves with whitecaps, a PTV measurement technique was developed to measure flow fields under wind wave. The measurement technique was applied to flow field under white-cap which occurred by wind wave braking. The properties of air flows over wind waves and bubbles which generated by wave breaking were also measured by image processing techniques. In addition, global CO₂ exchange between air-sea by breaking waves was estimated by the field measurement data and satellite data.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2009 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

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：風波，気体輸送，ホワイトキャップ，高速ビデオカメラ，画像計測

1. 研究開始当初の背景

水表面での気体輸送現象は、地球規模の温暖化問題に関連する温室効果ガスの海洋吸収量予測問題から、湖沼等の生態系に関連する DO 分布予測問題等のローカルな問題に至るまでの様々なスケールの環境問題に関連

している。これらの水域では、風、流れ、雨等が複雑に作用しながら水表面を乱しており、大気-水域間の気体輸送現象を規定している。

本研究グループのメンバーの一部は、2回にわたり世界での水表面を通じたガス交換

に関する研究のレビューを行った。大気-海洋間のガス交換に風波砕波による気泡取り込み現象である、ホワイトキャップが大きな影響を及ぼしているという現地観測結果が報告されている。気泡の取り込み現象においては、気泡が破裂により水滴の生成を引き起こし、また水滴が水面に衝突することにより気泡が生成するというように「気泡混入-水滴生成」連鎖過程が生じる。さらに、大気エアロゾルの生成と同時に、大気-海洋間の物質輸送を急激に促進させる。これらの現象は、非常に高速で比較的細かな現象であるため、高速ビデオカメラが非常に強力なツールとなる。

これまでの研究成果、および開発された最新計測技術を統合し、さらに、最新の画像計測に適したものに既存の風洞水槽を改良し、現象解明に向けた集中的な計測および解析を行うことができれば、現象の解明が進むことが期待される。

2. 研究の目的

近年、画像による流速計測法 (Image Velocimetry, IV) が精力的に開発され、実用化されている。研究代表者は、これまでに空間解像力が非常に高い IV である、カルマンフィルターと χ^2 乗検定を用いた粒子追跡速度計測法 (KC 法) を開発した。さらに、開発した KC 法を風波水面近傍の気流および水流の画像計測に成功している。

また、炭酸ガスが風波により水表面を通して水中へ溶入する過程を直接可視化する手法を開発し、世界で初めて炭酸ガスが風波下で水中に輸送される現象を可視化するのに成功した。

本研究では、海域や湖沼等の水域と大気の気体輸送現象の解明を目的に、画像計測を使った微細な現象計測を可能にするために、既存の風洞水槽に改良を加える。特に、本研究グループの特色は、最先端の画像計測技術を用いて気体輸送現象を対象に研究を進めているので、本研究において集中的に計測を行うことにより、その成果は大気-水域間の気体輸送現象に関する研究分野に大きな貢献をすることができる。

3. 研究の方法

本研究では、風波砕波によるホワイトキャップの気体輸送現象への影響を調べるため、ホワイトキャップ発生時の流れ場、発生した気泡の特性、風速場の特性、および全球規模での砕波による影響を調べた。

風波界面近傍の流速場に関する実験では風洞水槽 (長さ 16m, 高さ 0.5m, 幅 0.5m) を用いた。送風装置によって風を吹かせ、人工的に風波を発生させることができる。砕波を発生させるため造波装置を設置した。平均風

速は $U=14.0\text{m/sec}$ であった。予備実験により、造波装置の周波数 46Hz (造波周期 0.62sec)、水深 30cm の条件のとき良好に風波砕波が生じたので、今回はこの条件に固定して実験を行った。

照明として、イエナオプティック社製 8W 高出力 YAG レーザーの連続光を使用した。レーザー光は、2次元の撮影断面を照射するため、シリンドリカルレンズを用いて、シート状に広げて照射した。トレーサーとしてナイロン 12 粒子 (平均粒径 80 μm , 比重 1.02) を用いた。また、高速ビデオカメラは TM リサーチ社製を使用した。解像度は、640 \times 480 pixel で 250fps まで撮影が可能である。今回の計測では 250 fps, シャッタースピード 1/500 sec の条件で撮影を行った。撮影した画像は白黒デジタル画像 (8bit) としてコンピュータに記録される。

風波は、波高に比べて波長が長いので、横長に広く計測する必要がある。2台の高速ビデオカメラを波の進行方向に水平に並べ、水面近傍を拡大して計測を行った。水面を決定するためにもう1台の高速ビデオカメラを使用した。3台の高速ビデオカメラは完全に同期が取られている。水面位置の決定には、砕波時の混入気泡についての実験は、1/30 勾配の斜面を設置した長さ 50m, 高さ 1.5m, 幅 1.0m の側壁ガラス張りの中型二次元造波水槽を用いて行った。

水面から取り込まれる気泡の2次元形状および2次元移動速度は、シャドウグラフ法および3時刻 PTV 法を組み合わせた BTV 法により計測を行った (森ら, 2006)。実験では、高速度カメラ (1.2K \times 1K pixel) をバックライトの光源と対面するように設置し、計測領域を両者の間に設定した。

気流の剥離に関する実験は、全長 8m, 幅 0.2m, 水深 0.45m, 気流部の高さ 0.25m の風洞付き実験水槽を用いて行った。平均風速の鉛直分布を熱変換タイプの風速計にて、水面変位を容量式波高計にて、気流の剥離を PIV によってそれぞれ計測を行った。気流の剥離については、画像中央において剥離域を目視にてカウントした。

また、全球的な CO₂ の収支について砕波による影響を調べるため、以下の2つのデータ解析を行った。

(1) 大気-海洋間 CO₂ 収支積算に及ぼす風速変動の影響

大気・海洋間 CO₂ 収支 F は、

$$F = k_L S (\Delta p \text{CO}_2) \quad (1)$$

で求められる (k_L : CO₂ 輸送速度, S : 海水での CO₂ 溶解度, $\Delta p \text{CO}_2$: 大気・海洋間 CO₂ 分圧差)。また CO₂ 輸送速度 k_L には、Wanninkhof (1992) によって提供された風速

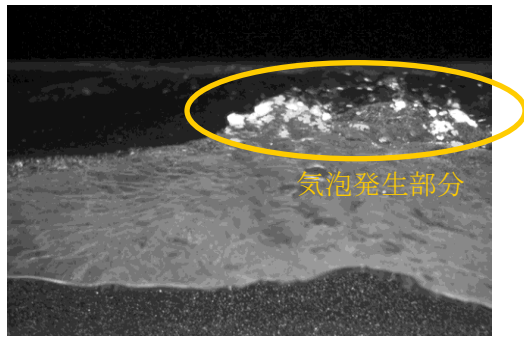


図1 気泡発生時の撮影画像

の関数で表された式を使用した。

使用データとして、 U_{10} には NCEP 再解析データ(格子 $1.875^\circ \times 1.904^\circ$)の 6 時間毎、日平均データ、QuickSCAT(人工衛星: 格子 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)の日平均データ、J-OFURO(人工衛星: 格子 $1^\circ \times 1^\circ$)の日平均データ、ECMWF 再解析データ(格子 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$)の 6 時間毎データ、IFREMER(人工衛星: 格子 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$)の日平均データを使用して比較を行った。また、海表面温度には NCEP 再解析データ、 ΔpCO_2 は takahashi et al(2009)を使用した。

(2) 大気-海洋間 CO_2 収支積算に及ぼす砕波の影響

砕波を考慮したモデルとして、Monahan and Spillane(1984)によって提供された白波の面積比を用いた関係式を使用した。白波の面積比を求める式として、Blanchard(1963), Monahan(1971), Tang(1974), Monahan and Omuircheartaigh(1980), Wu(1981), Katsaros and Smith (1987), Wu(1988a), Sugimori and Zhao(1996), Frouin(1996), Hanson and Phillips(1999), Asher(2002)を用いた。

使用したデータは、(1)で用いた NCEP 再解析データから海上高度 10m の風速データと海表面温度データ (6 時間毎)、 ΔpCO_2 データを用いた。

期間は(1)、(2)ともにエルニーニョ・ラニーニャ期を含まない 2001 年を対象年として計算を行った。

4. 研究成果

まず、風波砕波により生じるホワイトキャップ近傍の流れ場計測の結果について述べる。図 1(写真)に風波砕波の状況を示す。実線で囲んだ領域に気泡を含んだ砕波が生じているのが分かる。図 2 には PTV により計測された同時刻の流速分布を示す。写真 1 の実線で囲んだ部分には砕波による気泡が多数含まれており、PTV による流速計測が困難であるため、流速ベクトルの数が少なくなっている。その他の領域では、詳細に流速が計

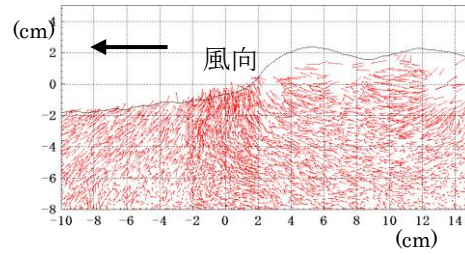


図2 風波砕波発生時流速分布図

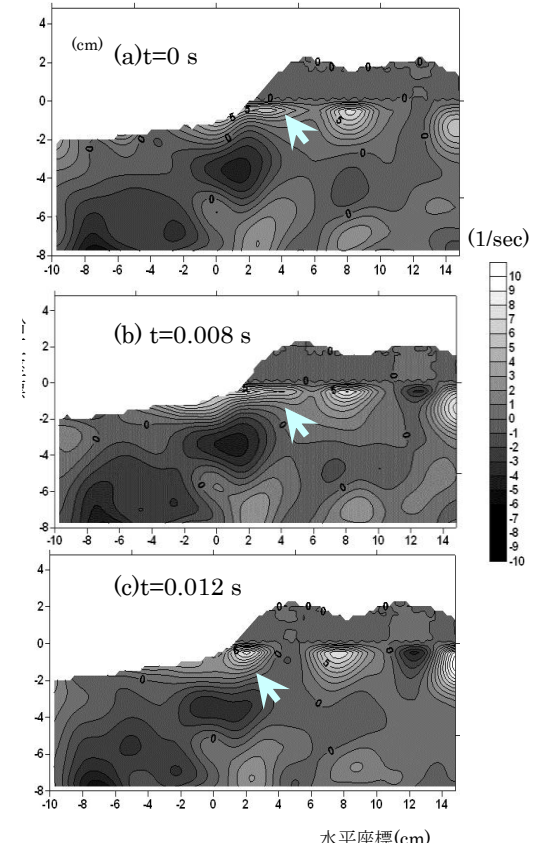


図3 風波砕波発生時渦度分布

測されている。

本研究では、風波砕波により生じる水表面近傍での渦構造を明らかにすることを目的に、高速ビデオカメラを用いて PTV 計測を行った。また、PTV により得られた流速分布図から MLS による渦度推定法を用いることにより、風波砕波近傍の渦構造を明らかにすることを試みた。

今回の実験により、風波砕波先端部から時計回りの渦が生じていることが確認された。これは砕波によって気泡を含んだ水塊が滑るように進み、下部の水塊との間に強いせん断が生じ、渦が発生しているものである。また、その渦はその場にとどまり、気泡を多く含んだ水塊を下方に取り込む役割を果たしていることを目視により観察した。この現象は、砕波により取り込まれる気泡の粒径や滞留時間に影響を及ぼすものであり、大気-海

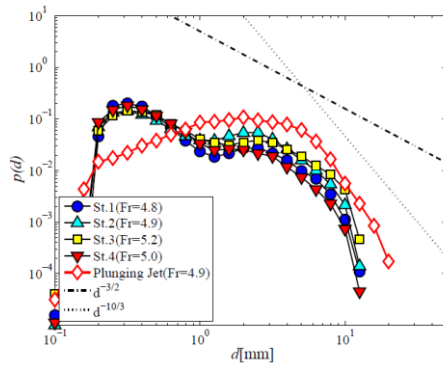


図4 時間平均気泡径分布

洋間の気体輸送に大きく影響を及ぼすものと考えられる。

次に、砕波により生じた気泡の特性について述べる。図4に示すのは、時間平均した気泡径分布を示したものであり、図の横軸は気泡径 d 、縦軸は単位計測断面あたりの気泡数密度である。図より、気泡径が 0.3mm と 3mm の2点でピークを持つことがわかる。気泡数は岸沖方向でほぼ一定であるが、 $d > 1\text{mm}$ の気泡数は、St.1 (沖) から St.2 (岸) にかけては波の崩れが徐々に大きくなることによって増加し、その後汀線方向に向かって Jet の着水による運動量が小さくなるため、気泡の供給と分裂が抑制され、 1mm 以上の気泡数が減少している。また、図から気泡径分布は2つのべき乗則に従っていることがわかる。気泡径分布のべき乗則が何に従うのかは、気体の体積を換算する際に重要となる。気泡径分布から体積を推定する場合、径に対するべき指数が -3 以下であると径毎の体積は単調減少となり、逆に、べき指数が -3 以上であると体積は単調増加となる。今回の実験結果を見ると、Hinze スケール以下の気泡は、ほぼ $-3/2$ 乗則に従っている。一方、Hinze スケール以上の気泡は、 $-10/3$ 乗則を示しているが、他のケースではより広い範囲が $-3/2$ 乗則に従っていた。Hinze スケール以上の気泡径スペクトル形状は Jet が突入するため液相のせん断に依存するためであることが推測される。

さらに Chanson(1992)に従い、砕波に対して、Jet の厚さを波高 H に係数をかけて換算した Jet Fr 数を求めると (係数を 0.05 とした)、本実験における Jet Fr 数は $4.6 \sim 5.1$ となる。図4の中での◇は、鉛直円噴流実験の Jet Fr=4.9 (森ら, 2008b) の確率密度分布を示したものであり、図の凡例付近の $200\mu\text{m}$ 以下のデータは、測定範囲外のデータである。鉛直円噴流実験と砕波実験での気泡径分布の形状を比較すると、 $d > 1\text{mm}$ の形状に大きな違いは見られず、鉛直円噴流実験の方がやや気泡径の幅が広い程度である。鉛直円噴流実験の径分布の幅が広いのは、計測領域が水面

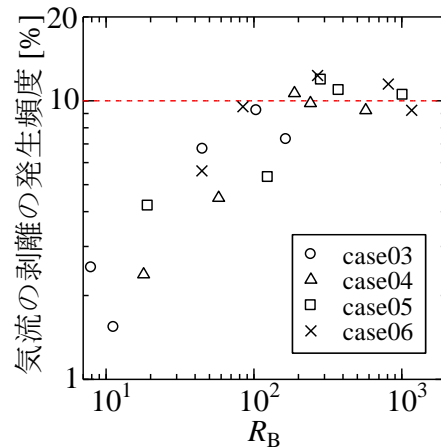


図5 気流の剥離の発生頻度と風波レイノルズ数 R_B の関係

近傍であり、分裂途中の気泡が計測されていることが影響していると考えられる。砕波実験では、 0.3mm 付近と 3mm 付近でピークが2つ存在し、森ら(2008b)の実験に比べ、より広い範囲が $-3/2$ 則に従うような形状であるのに加え、 $d < 1\text{mm}$ の気泡数の割合が多い。

これは、Hinze スケール以上の気泡とそれ以下の気泡の生成機構の違いに起因していると考えられる。Hinze スケール以上の気泡は、主に空気塊や大きな気泡が液相のせん断によって分裂することで生成され、これ以下の気泡は、主に Jet が瞬間的に水面を叩く際に生じ、このため、落水実験のように定常的に Jet が突入するような条件では、Hinze スケール以下の気泡が生成されにくく、気泡径分布に図4のような違いが見られるようになると考えられる。

次に、風波上の気流特性に関する実験結果について述べる。計測した風波については、Toba の $3/2$ 乗則(Toba, 1972)に概ね従っており、小規模水槽においても検討対象と成りうる風波が発生していることが確認できた。しかしながら、風洞の入口および出口に最も近い測線と低風速を与えた2ケースについては $3/2$ 乗則から大きく外れたため本研究の対象外とした。

波面上の気流について見てみると、気流が波頂部を超えると波面から剥離して一部が波の振幅程度のスケールを持つ渦を形成していた。波頂部より上層を流れる気流速度に比べれば剥離域の波面近くはほとんど気流が流れておらず、当然、水面に作用するせん断力は減少し、形状抵抗の値にも影響が生じることは容易に推察できる。そこで本研究ではこの気流の剥離現象をマクロ的に捉え、各ケースの計測点において気流の剥離が発生する頻度を目視によりカウントした。図5に気流の剥離の発生頻度と風波レイノルズ数、 R_B (Toba ら, 1986)の関係を示す。剥離の発

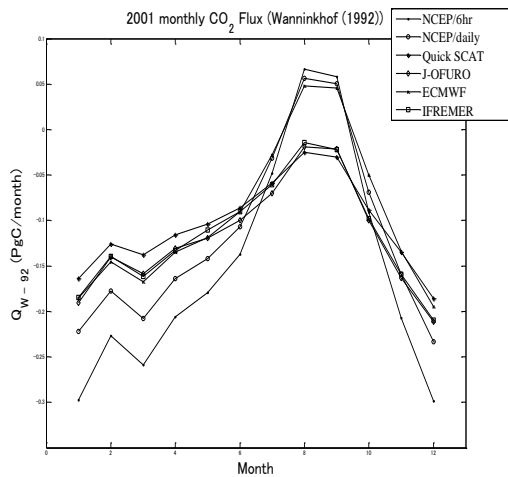


図 6 大気・海洋間 CO₂ フラックスの月ごとトータル量

生頻度は R_B の増加とともに上昇し、概ね $R_B=200$ 以上でどの風速のケースも 10% 程度に収束している。Toba ら(2006)では、 $R_B=200 \sim 1000$ において碎波が発生し始め、風波の乱流境界層への遷移が起こると解釈されており、結果として水面の抵抗係数 C_b が増大しないと述べている。そこで水面の抵抗係数 C_b と R_B の関係について調べてみた。 R_B に対する C_b の増加は、ばらつきはあるものの、やはり $R_B=200$ 以上で一定値に収束しており、剥離の発生頻度の変動と対応している。風波の自己調整機能は気流と水面下の乱流が風波を通じて結合した結果と考えられており、その中でも碎波によるエネルギーの各成分への再分配機構は大きいと考えられている。

最後に、全球規模での碎波による気体輸送現象に関する現地計測データによる評価結果を述べる。碎波を伴わない風波の自己調整機能には、碎波によるエネルギーの再分配ではなく、気流の剥離が運動量輸送量そのものを調整して波の発達に重要な役割を果たしていることを明らかにした。

(1) 各データの全球での年間の大気・海洋間 CO₂ 収支は、NCEP/6 時間毎: -1.83[PgC/yr], NCEP/日平均: -1.41[PgC/yr], QuickSCAT: -1.26[PgC/yr], J-OFURO: -1.42[PgC/yr], ECMWF: -1.14[PgC/yr], IFREMER: -1.36[PgC/yr] となり、一般的に良く用いられている NCEP/6 時間毎を基準として比較を行うと、各差は 23%, 31%, 22%, 38%, 26% となった。全球での月毎の大気・海洋間 CO₂ 収支を図 1 に示す。図 6 より、NCEP/6 時間毎の変動が最も大きい結果となった。また、大気から海洋への吸収の多い 1~3 月、11, 12 月はそれぞれ値が大きく異なっており、海洋から大気への放出の多い 8, 9 月は再解析データと人工衛星データの値には差はあるが再解析、人工衛星というデータ種では値に相違は小さかった。

また、時空間解像度の低いデータは大気・海

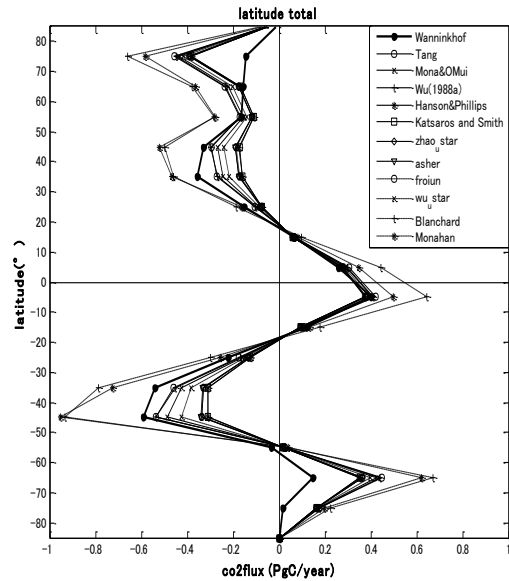


図 7 緯度 10° ごとの年間 CO₂ フラックストータル量

洋間 CO₂ フラックスの海洋への吸収量が減少、空間解像度の高いデータは南半球で大気・海洋間 CO₂ フラックスが小さい値を示すことがわかった。

(2) 風速のみのモデル(Wanninkhof)を基準に碎波を考慮したモデルを比較した。その結果、全球における年間 CO₂ フラックスは、Wanninkhof が吸収 -2.97, 放出 1.56, 総量 -1.42 で、碎波モデルは吸収 -2.13 ~ -5.25, 放出 1.69 ~ 3.27, 総量 -0.460 ~ -2.08(PgC/year) となり、Wanninkhof との誤差はそれぞれ、吸収 -28.5 ~ 76.4, 放出 6.99 ~ 110, 総量 -67.5 ~ 46.8(%) となった。緯度 10° 毎の CO₂ フラックス年トータル量を図 7 に示す。北半球の高緯度において碎波を考慮したモデルの方が、吸収で約 2.5 ~ 4.8 倍値が大きく、南半球の高緯度においては放出で約 1.3 ~ 3.7 倍大きい値を示した。

本研究によって大気・海洋間 CO₂ 収支積算における全球データセットの時空間解像度の相違による風速変動の影響が示された。また、現在では一般的に CO₂ 輸送速度は風速のみの関数で表されているが、碎波による影響も大きいことより大気・海洋間 CO₂ 収支積算における碎波の重要性が示された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① K. Takehara, Y. Takano and T.G. Etoh, Study of Vortices near Wind Wave Surfaces Using High-speed Video Camera and MLS, Proc. The 6th International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces, 査読有, 2011, to be published
- ② 竹原幸生, 江藤剛治, 風波碎波下におけ

- る渦運動の PTV 計測, ながれ, 査読有, 第 29 卷, 2011, 437-439
- ③ 江藤剛治, 1600 万枚/秒の裏面照射撮像素子, 映像情報メディア学会誌, 査読有, Vol. 65, No.3, 2011, 349-353
- ④ N. Mori and S. Nakagawa, Laboratory measurements of air bubbles in the surf zone, Proc. The 6th International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces, 査読有, 2011, to be published
- ⑤ T. Suzuki, S. Shin, D. T. Cox and N. Mori, Spatio-temporal characteristics of near-bed pressure gradients on a barred beach, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 査読有, Vol.136, Issue 6, 2011, 327-336.
- ⑥ S. T. Thoroddsen, K. Takehara, and T. G. Etoh, Bubble entrapment through topological change, Physics of Fluids, Vol. 22, 2010, 051701-1~4.
- ⑦ 竹原幸生, 江藤剛治, MLS を導入した PTV による渦度推定法の提案と風波流速場への適用, 土木学会論文集 B, 査読有, Vol. 65, No. 3, 2009, 151-165
- ⑧ 水谷夏樹, Edwin A. Cowen, 宮島昌弘, 風波上の気流の剥離の発生頻度とその要因について, 海岸工学論文集, 査読有, 第 56 卷, 2009, 76-80
- ⑨ 松尾祐典, 森 信人, 重松孝昌, 角野昇八, 画像計測を用いた砕波帯における混入気泡の岸沖鉛直分布特性の解析, 海岸工学論文集, 査読有, 第 56 卷, 2009, 96-100
- ⑩ 高野保英, 竹原幸生, 江藤剛治, 雨滴の超高速動画撮影による落下速度・形状の計測, 土木学会論文集 B, 査読有, Vol. 65, No. 4, 2009, 332-340.

[学会発表] (計 8 件)

- ① T. Goji Etoh, A 16 Mfps 165kpixel Backside-Illuminated CCD, 2011 IISW, 2011 年 3 月 22 日, San Francisco, USA
- ② 竹原幸生, 風波砕波下における渦運動の PTV 計測, 日本流体力学会年会, 2010 年 9 月 10 日, 北海道大学
- ③ Naoya Suzuki, The effect of wind variability on the air-sea CO₂ gas flux estimation, The 6th Int'l Symp. on Gas Transfer at Water Surfaces, 2010 年 5 月 21 日, 京都
- ④ Nobuhito Mori, Laboratory measurements of air bubbles in the surf zone, The 6th Int'l Symp. on Gas Transfer at Water Surfaces, 2010 年 5 月 18 日, 京都
- ⑤ Natsuki Mizutani, The relationship between occurrence frequency of air

flow separation over wind waves and statistic values of wind waves, The 6th Int'l Symp. on Gas Transfer at Water Surfaces, 2010 年 5 月 19 日, 京都

- ⑥ Naoya Suzuki, Improved expression of the drag coefficient with special reference to the windsea Reynolds number -Conditions with counter, cross and following swell-, 2010 AGU Ocean Sciences Meeting, 2010 年 2 月 22 日, Portland, Oregon, USA.
- ⑦ 竹原幸生, 風波界面近傍における乱れの画像計測, 日本流体力学会年会 2009, 2009 年 9 月 4 日, 東洋大学
- ⑧ 竹原幸生, 風波界面近傍に発生する渦の時空間挙動, 日本流体力学会年会 2008, 2008 年 9 月 6 日, 神戸大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹原 幸生 (TAKEHARA KOHSEI)
近畿大学・理工学部・教授
研究者番号: 50216933

(2) 研究分担者

江藤 剛治 (ETOH TAKEHARU)
近畿大学・理工学部・教授
研究者番号: 20088412
鈴木 直弥 (SUZUKI NAOYA)
近畿大学・理工学部・講師
研究者番号: 40422985
高野 保英 (TAKANO YASUhide)
近畿大学・理工学部・講師
研究者番号: 80330231
森 信人 (MORI NOBUHITO)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号: 90371476
水谷 夏樹 (MIZUTANI NATSUKI)
大阪産業大学・工学部・教授
研究者番号: 50356036

(3) 研究協力者

Sigurdur T. Thoroddsen
King Abdullah University of Science & Technology・教授