

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 18 日現在

機関番号：82114

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820232

研究課題名(和文) 砕波気液混相乱流の物理機構に基づく沿岸域炭酸ガス輸送モデルの開発

研究課題名(英文) Modeling of CO₂ gas transfer in surf zones on the basis of physical mechanisms of the air-water turbulent flow under breaking waves

研究代表者

大塚 淳一(Otsuka, Junichi)

国立研究開発法人土木研究所・寒地土木研究所・研究員

研究者番号：50540556

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：砕波によって生成される気泡と流体の乱れは大気-海中間の炭酸ガス輸送に寄与し、さらに炭酸ガスの溶解に伴う海域の酸性化は沿岸域の生態系に影響を与える。本研究では、砕波気液混相乱流の物理機構を考慮したガス輸送モデルを構築するため、PIV、LIF、Backlightシステムを用いて砕波帯のガス輸送過程を明らかにした。気泡量が多く、乱れが強い遷移領域では、溶存ガスが瞬時に拡散するためガス濃度の上昇速度は遅い。一方、水深が浅く乱れが小さいボア領域ではガス濃度が容易に上昇し、高濃度化した溶存ガスが戻り流れによって沖側へ輸送される。沿岸域の砕波帯では気泡や乱れに加えて、戻り流れがガス輸送に大きく寄与する。

研究成果の概要(英文)：In a near-shore wave breaking field, turbulent flow with a number of entrained bubbles enhances CO₂ transfer across the air-water interface. In this study, the transport process of dissolved carbon dioxide (DCO₂) in a surf zone were investigated in a wave flume using LIF, PIV and LED backlight systems in order to estimate gas transfer velocity on the basis of the physical process of the air-water turbulent flow under breaking waves. DCO₂ concentration could not totally increase in the transition region since the strong turbulence extensively diffused the DCO₂ in a short time. DCO₂ concentration in the bore region increased with time and reached the high level earlier than the transition region. The high concentrated DCO₂ in the bore region was transported toward offshore region due to the undertow. The undertow effects on the DCO₂ transport process in a whole surf zone in addition to the breaking wave effects, such as the aeration effect and the turbulence flow.

研究分野：海岸工学

キーワード：breaking wave turbulence entrained bubble gas transfer PIV LIF

1. 研究開始当初の背景

沿岸域で生じる波浪の砕波(図-1)は海中に大量の気泡と大規模渦を伴う強い乱れを生成し、それらは大気から海中への炭酸ガス(CO_2)の供給と拡散過程に影響を与えている。水中に炭酸ガスが溶解すると酸性度(pH)が低下するため、近年深刻化する大気中の炭酸ガス濃度の増加に伴い、海域の酸性化と海生生物への影響が懸念されている(例えば, orr et al., 2005)。したがって、砕波によって海中へ輸送される炭酸ガス量を精度良く見積もることは豊富な生態系を有する沿岸域の環境変化を予測するうえで重要であり、そのためには砕波の物理機構とガス輸送との関係を定量的に評価することが必要といえる。しかしながら、砕波下のような気泡と流体が混在する極めて複雑な気液混相乱流場のガス輸送過程を定量的に評価することは困難であり、沿岸域におけるガス輸送に関しては定性的な評価に留まっているのが現状である。

一方、外洋における大気—海洋間のガス輸送に関しては地球規模の気候変動や生態環境の将来予測を目的として古くから研究が進められており、多くのガス輸送モデルが提案されている。外洋では強風時に顕著となる風波砕波に伴う水面の乱れ(Komori et al., 1989; Melville, 1996)や海中への気泡混入(Farmer et al., 1993; Keeling, 1993)がガス輸送に大きく寄与することが指摘されている一方、既往の研究ではこれら風波砕波の影響を海面上10mの風速(U_{10})をパラメータとするバルクモデルでガス輸送量を評価している(例えば, Liss & Merlivat, 1986; Wanninkhof, 1992)。沿岸域では比較的水深が浅く波浪の浅水変形によって砕波が生じ、さらにその発達過程は風波砕波とは全く異なるため、風速をパラメータとする外洋のガス輸送モデルを沿岸域に適用することはできない。したがって、沿岸域におけるガス輸送量を予測するためには、波浪の浅水変形から生じる砕波に伴う気泡の生成・輸送と乱れの発達過程を解明し、これらの物理機構を考慮したガス輸送過程を定量的に評価することが不可欠といえる。

2. 研究の目的

本研究では、沿岸域におけるガス輸送量を評価・予測するための基礎研究として、斜面を設置した造波水槽内の砕波帯で炭酸ガス濃度、流速、混入気泡の画像計測を行い、砕波下の気液混相乱流場におけるガス輸送過程を明らかにする。

3. 研究の方法

実験は長さ8.1 m、幅0.3 m、高さ0.6 mの二次元造波水槽で行われた。実験では淡水を使用し、造波水深を24 cmとした。水槽内には勾配1:20.8の斜面が設置されており、入射波(規則波)は造波板の前面から3.5 mの位

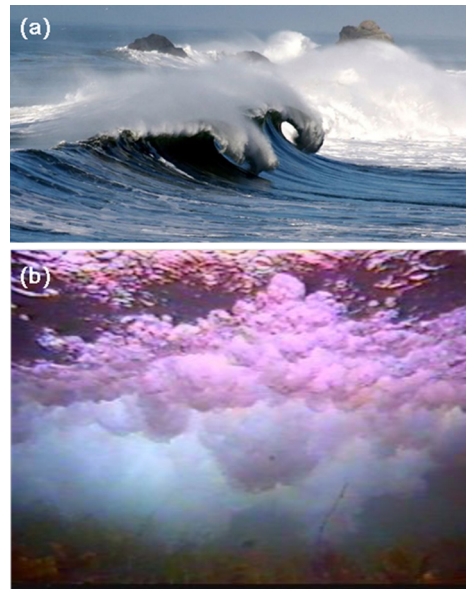


図-1 沿岸域の砕波の様子 (a: 砕波ジェット着水時, b: 海中に混入する気泡群)

置で砕波する。入射波の周期は1.5 s、砕波波高は13.0 cm、砕波水深は13.9 cm、砕波形式はSpillingとPlungingの中間形式であった。座標系は砕波点を原点として、岸方向を x 、水路側壁の一端から水路横断方向を y 、静水面から鉛直上向きを z と定義した。

溶存炭酸ガス濃度、流速、混入気泡の画像計測では、それぞれLaser Induced Fluorescence (LIF)、Particle Image Velocimetry (PIV)、Backlight法を適用し、全ての画像計測は高速度ビデオカメラ(8 bit, フレームレート: 250 fps, 解像度: 1,000×1,000 pixels)を用いて行われた。撮影範囲は水平方向20 cm×鉛直方向20 cmであり、この撮影範囲を砕波点から x 方向に20 cmずつ12回移動して $x = 0 \sim 240$ cm(水深: 13.9 cm~2.1 cm)の区間を21.8秒間撮影した。以下に、各画像計測方法の詳細を示す。

(1) LIFによる溶存炭酸ガス濃度の計測

溶存ガス濃度の計測では、図-2に示すように水槽の上面にカバーを設置し、カバー上に設置したバルブから水槽の気相に炭酸ガスを供給した状態で造波した(気相ガス濃度: $6 \pm 1\%$)。液相には蛍光試薬ウラニン(FNa)溶液を使用した。水槽底面の外側から $y = 8$ cmの撮影範囲に対してレーザーシート(YAGレーザー、波長: 532 nm)を照射し、FNa溶液の蛍光輝度を撮影した。

炭酸ガス(H_2CO_3)が水中に溶解すると HCO_3^- イオンと H^+ イオンに電離するためpHが低下する。また、FNa溶液の蛍光輝度はpH4~8の範囲で HCO_3^- イオン量と比例するため、キャリブレーションによって蛍光輝度とpHの関係およびpHと炭酸ガス濃度との関係を得ることにより、蛍光輝度を撮影した画像から面的に液相ガス濃度を求めることができ

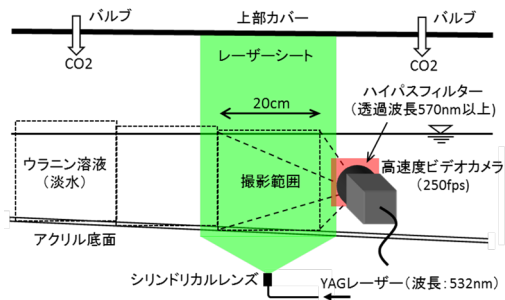


図-2 LIF計測の概略図

る。本実験では、蛍光輝度とガス濃度との関係を得るため、造波前に異なるpH・溶存炭酸ガス濃度の蛍光輝度画像を各撮影範囲で十数枚撮影した。この作業を行う際には、撮影範囲の液相に炭酸ガスを直接供給し、空間的に濃度が一樣になるように攪拌した後、撮影を行った。また、撮影後すぐにFNa溶液を採取してpHと溶存ガス濃度（全炭酸濃度）を計測した。得られた画像、pH、ガス濃度をもとに、各画素の蛍光輝度とガス濃度との関係式を以下の式から求めた。

$$C = \alpha I^\beta + \gamma$$

ここで、 C はガス濃度、 I は蛍光輝度、 α 、 β 、 γ は最小二乗法で決定される各画素固有の係数である。造波後の溶存ガス濃度は各画素の蛍光輝度の値と各係数を上式に代入することで求められる。

造波中、気泡界面からのレーザー反射光（波長：532 nm）を捉えずに、FNa溶液のレーザー励起光（波長：580 nm以上）のみを撮影するため、カメラレンズ前面に透過波長570 nm以上の光学フィルターを設置した。

計測はキャリブレーション時を含めて気温16.0～17.5℃、水温13.0～14.5℃の条件で行われた。また、造波を始める前に液相のエアレーションを行い、液相ガス濃度を20 mg/L以下に低下させた状態で造波を開始した。

(2) PIVによる碎波乱流計測

PIVによる流速の計測では、撮影領域、レーザーシート照射位置、高速度ビデオカメラの設定はLIF計測と同一とした。水槽液相に赤色蛍光塗料で着色した比重1.02の中立粒子を散布して、レーザーシート内の赤色励起光（波長：630 nm以上）を撮影した。カメラレンズ前面にはLIF計測で使用した光学フィルターを設置することにより、中立水粒子からのレーザー励起光のみを撮影した。撮影後、FFT相関法によるPIV解析を行い、空間分解能3.2 mmの流速分布を求めた。撮影は1地点で16回繰り返しを行い、アンサンブル平均ベースの流速と乱れエネルギーを求めた。なお、PIV計測では、碎波点から10 cm間隔で容量式波高計を設置して、画像撮影と同時に水位変動も記録した。

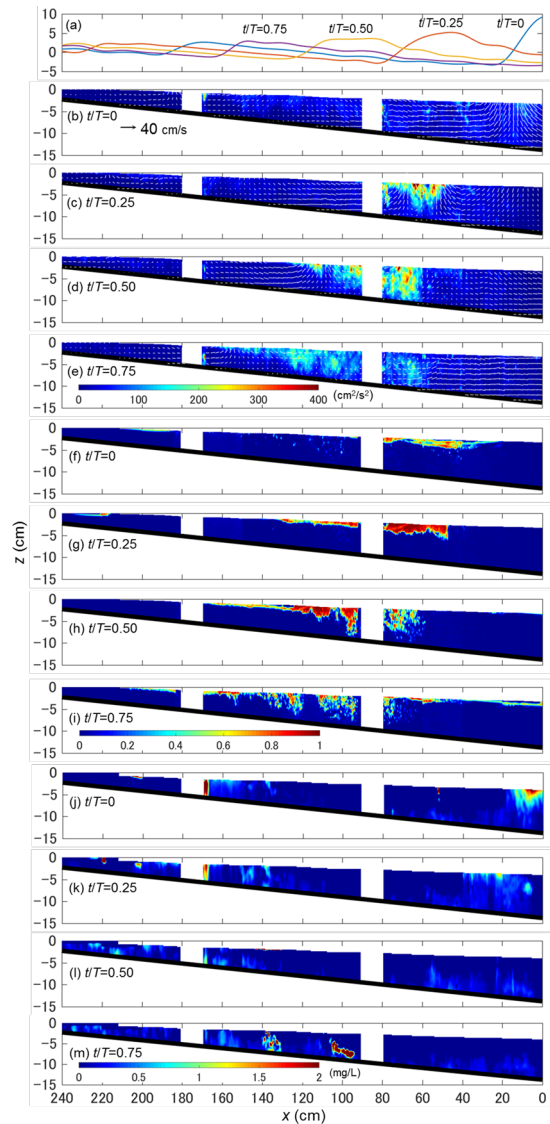


図-3 波浪の通過に伴い変化する(a)水位、トラフレベル以下の(b)(c)(d)(e)流速と乱れエネルギー、(f)(g)(h)(i)気泡混入指標、(j)(k)(l)(m)液相ガス濃度

(3) Backlight法による気泡の可視化計測

Backlight法による混入気泡の可視化計測では、水槽側壁の外側に赤色LEDパネルを設置して、両側壁間を通過する混入気泡のバックライトイメージを撮影した。カメラの設定はLIF、PIV計測と同一であり、 $y = 8$ cmの鉛直平面に焦点を合わせた。バックライトイメージでは気泡が存在する領域の画像輝度が気泡通過前よりも低下するため、造波前に撮影した画像の輝度を基準として輝度の低下率から気泡混入量の目安となる値（以下、気泡混入指標と称す）を求めた。

4. 研究成果

(1) 碎波帯における流速、気泡混入指標、液相ガス濃度の時空間変動特性

図-3は波浪の通過に伴って変化する水位、トラフレベル以下の流速、乱れエネルギー、気泡混入指標、液相ガス濃度を示している。

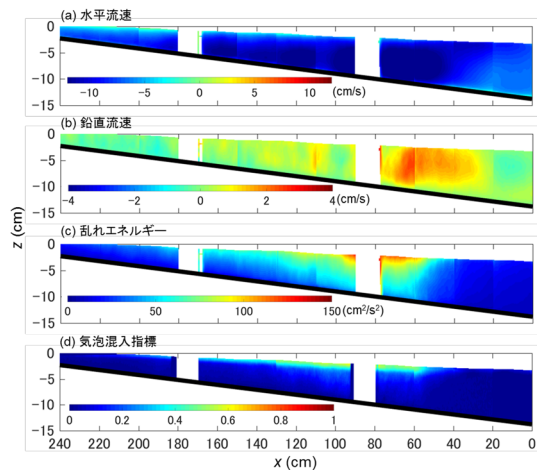


図-4 (a)水平流速, (b)鉛直流速, (c)乱れエネルギー, (d) 気泡混入指標の時間平均値 (10波の時間平均値)

砕波後, 砕波ジェットが $x = 40$ cm付近に着水する様子が確認された. その後, 砕波ジェットの着水を繰り返しながら波浪は進行し, その過程において, $x = 60 \sim 140$ cm付近 (遷移領域) で比較的強い乱れが生成され, $x = 140 \sim 240$ cm付近 (ボア領域) では乱れが十分に発達する様子が確認された.

遷移領域では, 波峰通過後に強い乱れエネルギーと多くの気泡が水面から底面方向に輸送される. 底面方向に輸送される気泡や乱れは気相から液相深部への直接的なガス輸送に寄与しており, 図-3(m), $x = 100$ cmと 140 cm付近ではその様子が明確に捉えられている. このような液相深部へのガス輸送は遷移領域においてほぼ全ての波浪来襲時に確認された. 液相に供給されたガスは強い乱れの影響を受けて瞬時に拡散し, その一部は波峰通過後に発達する戻り流れによって沖側へ輸送される. そのため, 気泡や乱れによる直接的なガス輸送をほとんど期待できない砕波点から砕波ジェット着水点付近の深部においてもガス濃度が増加する.

ボア領域では, 波峰通過後にトラフレベル以下のほぼ全ての水深でガス濃度が上昇する. 気泡混入強度と乱れエネルギーの値は小さいけれども, 水深が浅く, さらに乱れによる拡散が生じにくいいため, ガス濃度が容易に上昇する.

(2) 流速, 気泡混入指標, 液相ガス濃度の時間平均値

図-4は水平流速, 鉛直流速, 乱れエネルギー, 気泡混入指標の時間平均値 (10波分) を示している. また, 図-5は液相ガス濃度の1波ごとの時間平均値を示している. ガス濃度は時間の経過に伴い, 底面付近から徐々に増加し, とくに, ボア領域では他の領域よりも速く濃度が増加する. ボア領域から遷移領域の底面付近では 10 cm/s以上の比較的強い負の流速 (戻り流れ) が生じる. 図-3では, 遷移領域において気相から液相に供給された

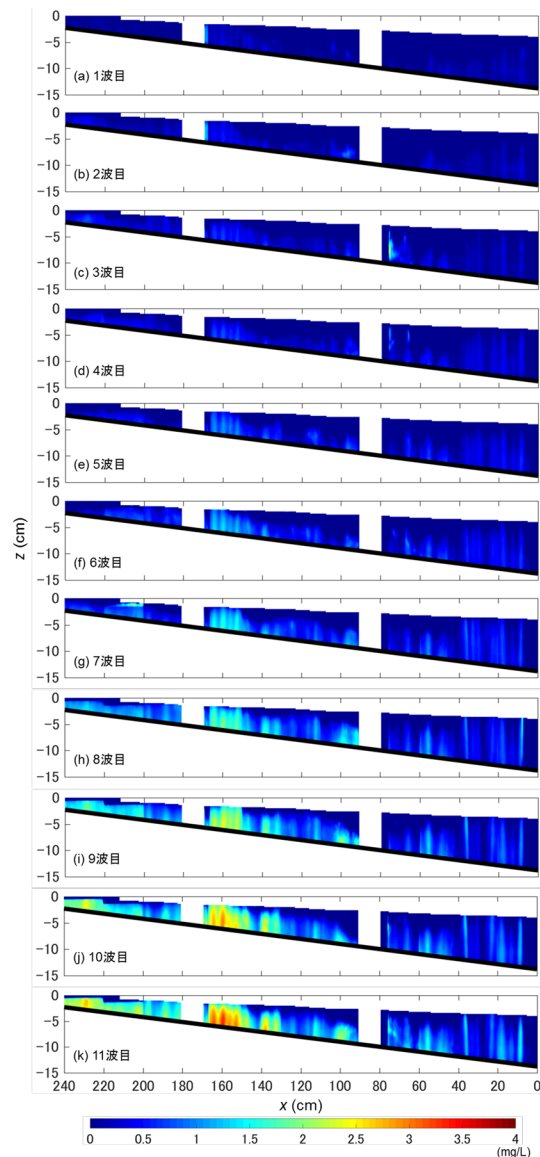


図-5 液相ガス濃度の時間平均値

ガスが沖側深部へ輸送されていることを示したが, 戻り流れの強さと分布を考慮すると, ボア領域で高濃度化した溶存ガスも沖側深部のガス濃度の増加に寄与していると考えられる. また, 遷移領域よりも沖側では 1 cm/s程度の鉛直流速が生じる. 岸側から底面付近を経由して沖側深部に到達したガスはこの鉛直流速により時間をかけて水面方向へと輸送されると考えられる. これまで示した結果より, 砕波帯全体のガス輸送を評価・予測する際には, 気泡や流体の乱れによる気相から液相への直接的なガス輸送に加えて, 底面付近で発達する戻り流れのガス輸送への寄与を評価することが重要であることを明らかにした.

本研究で得られた成果を以下にまとめる.

①気泡混入量が多く, 強い乱れエネルギーが生じる遷移領域では, 気相から液相へのガス輸送が活発であると同時に乱れによる拡散

が瞬時に行われるため、ガス濃度は容易に上昇しない。

②ガス濃度が顕著に上昇するのは水深が浅く乱れエネルギーが比較的小さいボア領域である。

③ボア領域から遷移領域の底面付近では比較的強い戻り流れが発達し、ボア領域で高濃度化した溶存ガスと遷移領域で液相に供給されたガスはこの戻り流れによって沖側へと輸送される。さらに、沖側砕波点付近に到達したガスは緩やかな上昇流によって水面方向へ運ばれる。

④砕波帯全体のガス輸送を評価・予測する際には、気泡や流体の乱れによる気相から液相への直接的なガス輸送に加えて、底面付近で発達する戻り流れのガス輸送への寄与を評価することが重要といえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件) 全て査読有

- ① 大塚淳一, 渡部靖憲, 田代晃基, 大山高弘, 猿渡亜由未, 山田朋人: 風波砕波下の飛沫と気泡の同時画像計測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, I_41-I_45, 2014
- ② 渡部靖憲, 田代晃基, 大塚淳一, 大山高弘, 山田朋人: 風波下の高速表面水温計測による波面を通じた熱輸送の変調の解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, I_56-I_60, 2014
- ③ 内山雄介, 松川大佑, 神吉亮佑, 馬場康之, 森信人, 水谷英朗, 渡部靖憲, 大塚淳一, 山田朋人, 猿渡亜由未, 二宮順一: 紀伊半島田辺湾湾口部における海水交換特性に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, I_446-I_450, 2014
- ④ 馬場康之, 水谷英朗, 久保輝広, 内山雄介, 森信人, 渡部靖憲, 大塚淳一, 山田朋人, 猿渡亜由未, 二宮順一: 台風通過に伴う田辺湾湾口部における海水温変化について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, I_476-I_480, 2014
- ⑤ 小窪一毅, 中山恵介, 新谷哲也, 大塚淳一, 渡部靖憲, 柿沼太郎, 駒井克昭, 清水健司: 異なる斜面勾配における内部ケルビン波の砕波により誘起される流れ, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.70, No.2, I_193-I_198, 2014
- ⑥ Otsuka, J. and Watanabe, Y.: Characteristic time, length and velocity scales of transverse flows in the surf zone, Coastal Engineering Journal, Vol.57, pp.1-22, DOI: 10.1142/S0578563415500060, 2015
- ⑦ 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), Vol.72, No.2, 2016

〔学会発表〕(計6件)

- ① 大塚淳一, 風波砕波下の飛沫と気泡の同時画像計測, 第61回海岸工学講演会, 2014年11月, 愛知県名古屋市
- ② 田代晃基 (大塚淳一), 風波下の高速表面水温計測による波面を通じた熱輸送の変調の解析, 第61回海岸工学講演会, 2014年11月, 愛知県名古屋市
- ③ 松川大佑 (大塚淳一), 伊半島田辺湾湾口部における海水交換特性に関する研究, 第61回海岸工学講演会, 2014年11月, 愛知県名古屋市
- ④ 馬場康之 (大塚淳一), 台風通過に伴う田辺湾湾口部における海水温変化について, 第61回海岸工学講演会, 2014年11月, 愛知県名古屋市
- ⑤ 小窪一毅 (大塚淳一), 伊半島田辺湾湾口部における海水交換特性に関する研究, 第39回海岸工学講演会, 2014年6月, 新潟県新潟市
- ⑤ 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, 第63回海岸工学講演会, 2016年11月, 大阪府大阪市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚 淳一 (OTSUKA JUNICHI)

国立研究開発法人土木研究所・寒地土木研究所・研究員

研究者番号: 50540556