

砕波帯における気液混相特性の画像計測

Visualization on Air Bubble Characteristics of the Surf Zone Breaking Waves

加島寛章¹・森 信人²・水谷夏樹³

Hiroaki KASHIMA, Nobuhito MORI and Natsuki MIZUTANI

The two-phase flow measurements using imaging technique for two-dimensional bubble measurements, so called Bubble Tracking Velocimetry (BTV) and PIV were conducted to the surf zone breaking waves. The characteristics of air bubbles in the surf zone such as bubble distributions, bubble size spectra, and turbulent characteristics of fluid velocity were measured with highly temporal and spatial resolutions in the laboratory. The temporal transitions of bubble size spectra were measured and the relationship between the gas and liquid phases were analyzed for the surf zone breaking waves.

1. 緒 言

近年, 沿岸域砕波帯における水面波の砕波, 特に砕波に伴う波高や流速変化の計測とモデル化に関する研究やマイクロバブルに代表される微細気泡を利用した沿岸域の水質改善に関する研究・技術開発が盛んに行われている. このように海岸工学で取り扱う気液混相現象の重要性は年々増しているものの, 計測の困難さから気泡そのものに関する具体的な特性は未解明のままである場合が多い. それゆえこれまで様々な手法により, 水面波の砕波により水中に混入される気泡計測が行われている. 砕波帯におけるボイド率の時空間変化については, Chanson et al. (2002) が室内における模擬実験によりボイド率の変化の時間スケールを, Cox・Shin (2003) が一様斜面上の砕波のボイド率と流速をボイド計とLDVを用いて計測し, 位相平均した時間変動特性について検討を行っている.

ボイド率よりも詳細な気泡そのもの, 例えば気泡径の計測については, 著者らのグループがDual-tip Void Probeを用いてボイド率だけでなく平均気泡径の岸沖分布を明らかにしている(角野ら, 2004; Mori et al., 2007). さらにより直接的な画像計測を用いた気泡計測も古くから行われており, 近年の計測技術の進歩に伴い急速に発展し, Deane・Stokes (2002) がボイド率と乱れ強度の線形関係を明らかにしている.

砕波帯と比較して, 風波砕波における気液混相特性は数多くの研究が行われており, 水中に混入した気泡の特性については幾つかの理論が提案されている(例えばThorpe, 1982). Garrett・Farmer (2000) は, Weber数と乱流気泡分裂の関係から $d^{-10/3}$ 則を提案している.

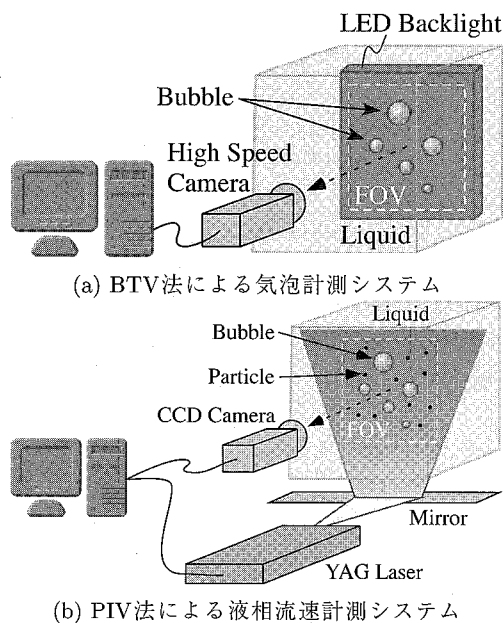


図-1 可視化システムの概略

これ以外にも幾つかの気泡径分布が提案されており, これを裏付ける観測結果も得られているが, 統一的な見解は見られない. これは, 気泡径分布が1つの特徴的な構造を持っておらず, 時空間的, 物性等に依存して複合的に変化するためと推測される. それゆえ, 砕波乱流特性および気泡径分布の詳細な計測データとこれに基づく理論が必要とされている.

本研究では, 気泡の形状とその移動速度の同時推定が可能な画像計測法(以下, BTV法と表記)とPIV法を併用し, 砕波帯内における混入気泡および流速の計測を行い, 砕波帯における混入気泡の気泡径分布特性および液相の乱流特性について明らかにする.

1 正会員 修(工) (独)港湾空港技術研究所
2 正会員 博(工) 大阪市立大学大学院講師 工学研究科
3 正会員 博(工) 大阪産業大学准教授

2. 可視化システムの概要

砕波帯内における混入気泡および流速計測を行うため、気泡や空気塊など気相についてはBTV法、液相流速についてはPIV法により計測を行った。以下に、気相・液相の可視化システムについて述べる。

(1) 気泡計測システム

図-1(a)に気泡の形状とその移動速度を同時に推定するBTV法(森・加島, 2006; Kashima et al., 2006)による気泡計測システムの概略図を示す。本システムでは、高速度カメラ(1.3 Mega Pixel, 最大 1000 frame/s)とバックライトの光源である平面LED(長さ、高さ: 130 mm, Blue 光源: 最大出力 10 W)を、両者が対面するように設置し、計測領域(図中のFOV)を両者の間に設定した。また、バックライトを液体内に設置したため、バックライトの存在による液相の乱れの影響を考慮し、可能な限り計測領域をバックライトから離れた場所に設定した。

(2) 液相流速計測システム

図-1(b)にPIVによる液相流速計測システムの概略図を示す。液相内に投入されたトレーサ粒子(アルミニウム粒子、粒径: 10 ~ 60 μm)に鏡を用いて鉛直下方からレーザーシート光を照射し、照射された領域(図中のFOV)を側方からCCDカメラ(1.0 Mega Pixel, 15 frame/s)で撮影し、鉛直2次元断面内の液相流速の計測を行った。レーザーはダブルパルスレーザー(Nd: YAG レーザー, 150 mJ)を使用し、シリンダカルレンズを用いてシート状に広げた。また、測定断面内に気泡が存在する場合、気泡界面におけるレーザー光の1次ないし2次反射が生じるため、トレーサ粒子と気泡の大きさの違いを利用し、メディアンフィルターを用いて気相と液相の分離を行った。

3. 実験の概要

本実験では、図-2 上部に示すような1/30の勾配を持つ斜面を設置した長さ50 m、高さ1.5 m、幅1.0 mの片面ガラス張りの2次元造波水槽内に波を造波させ、砕波帯内の混入気泡および液相流速の画像計測を行った。水深は0.8 mと一定に設定し、周期 $T=1.6$ s、入射波波高 $H_0=16.7$ cmの規則波を造波し、崩れ波砕波(砕波点の波高 $H_b=20.5$ cm, 砕波水深 $h_b=18.3$ cm)を対象に実験を行った。水面付近の混入気泡に着目し、沿岸方向にトラバースして砕波帯の気相と液相それぞれの可視化計測を行った。図-2 下部に示すのは、気相・液相における計測位置と水槽内の波高分布である。図の横軸は砕波水深で表した砕波点からの距離(x_b)、縦軸は波高(H)である。図中の●は波高データ、実線および破線で表された矩形はそれぞれ気相、液相側の計測領域である。

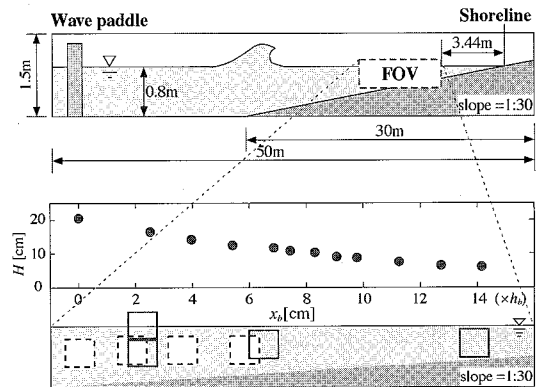


図-2 計測位置と水槽内の波高分布 (●: 波高データ, □: 実線/気相側の計測位置, 破線/液相側の計測位置)

液相側の流体場の計測はダブルパルスレーザーを用いたPIVにより行った。レーザーライトシート厚は約2 mmであった。計測位置は砕波帯内の液相流速を岸沖方向に詳細に計測するため、計測位置における波高が砕波波高の1 ~ 1/2 倍になるように砕波点およびそれより1.8, 3.6, 5.9 h_b 岸側の合計4地点とした(図-2の破線部)。計測条件としてCCDカメラの撮影間隔は15 frame/s, シャッタースピードは1/1500 s, 最小空間解像度は94.5 ~ 97.6 μm である。各計測における波の位相は、容量式波高計を各計測位置端部に設置し、ダブルパルスレーザーの出力を波高計と同期を取ることで調整した。

気相計測は2次元空間に射影した気泡形状と移動速度を同時に測定するBTV法により行った。計測位置は砕波帯内の混入気泡特性を計測するため、着水点近傍($x_b=2.1 h_b$)、ボア領域($x_b=13.8 h_b$)、両者の中間地点($x_b=6.5 h_b$)の合計3地点とした(図-2の実線部)。着水点近傍では水中深くまで混入する気泡や静水面より上方に存在する気泡の計測が可能となるように鉛直方向に2箇所を設定した。計測条件として高速度カメラの撮影間隔は500 frame/s, シャッタースピードは1/1000 s, 最小空間解像度は67.9 ~ 69.3 μm であり、撮影深度は約1 cmである。このため、液相と気相で沿岸方向の計測幅が異なることに留意する必要がある。

4. 実験結果

(1) 砕波着水点近傍の空気混入過程

図-3に示すのは、計測された砕波着水点近傍($x_b=2.1 h_b$)の空気混入過程のBTV解析画像である。図-3(a)は着水後、(b)および(c)はそれより0.07秒後および0.186秒後の解析結果である。図中の鉛直座標 $Z=2.7$ cmが静水面に相当する。砕波直後の着水点近傍では、Jetが水面を叩いた後、水平渦が生成され、水

平渦は波峰と共に伝播方向に進む。その後図-3(a)のように水平渦が崩れながら3次元性を持つ。水平渦は、空気塊および気泡群を巻き込みながら鉛直渦を形成し、その後分散していく(図-3(b))。最後に小さな径を持つ気泡が受動的に水中に漂う(図-3(c))。

以下では、これらの過程について液相および気相側の測定結果をもとに分析した。

(2) 液相の乱流特性

PIV法により液相流速を推定し、流速に関わる代表統計量について求めた。図-4に示すのは碎波点近傍($x_b=0$)における平均流速、乱れエネルギーおよび長さである。ここで瞬時流速 u は平均流速 u_m および乱れ u' に分離可能とし、以下のように定義する。

$$u = u_m + u' \dots\dots\dots (1)$$

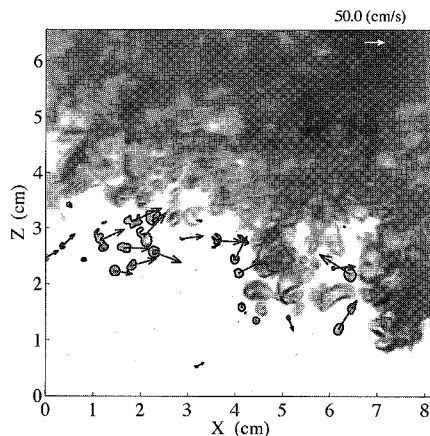
また、図中の乱れエネルギー(TKE)は

$$TKE = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2) \dots\dots\dots (2)$$

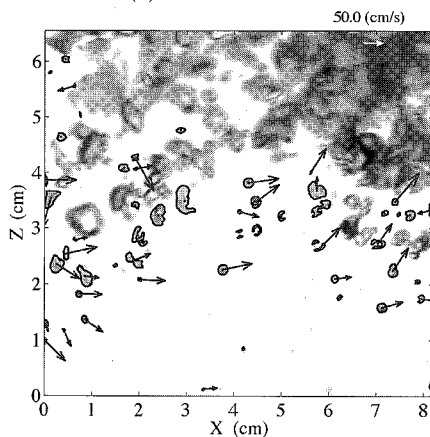
で与えられ、 λ および L はTaylorのMicro scaleおよび積分特性長であり、変動量の空間相関から計算した。TaylorのMicro scaleと積分特性長は u 、 v 成分それぞれについて求めた。図-4よりわかるように、鉛直方向の時間平均流速が負の方向、つまり鉛直下向きに卓越するとTKEが増加し、TaylorのMicro scaleおよび積分特性長も長くなることがわかる。紙面の都合上示すことができないが、この傾向は $x_b=0$ で顕著であり、 $x_b=1.8h_b$ 、 $5.9h_b$ と計測地点が岸側に移ると不明瞭となっていた。また、積分特性長は最大で3mmであり、水平渦の大きさが振幅程度(数cm)であることを考えると、碎波に伴う微細渦スケールは水平渦スケールより1オーダー小さいことがわかる。

(3) 混入気泡の気泡径分布特性

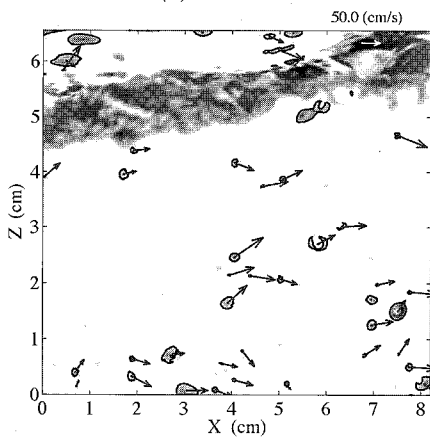
BTV法により気泡径および気泡移動速度を推定し、気泡径分布特性および混入気泡に関わる代表統計量について求めた。図-5に示すのは着水点近傍、ボア領域、およびその中間地点で計測された瞬時の気泡径分布の時間変化である。図の横軸は気泡径(d)、縦軸は時間(t)であり、濃淡は気泡数密度(単位: $1/\text{mm}^2$)を表している。図-5よりわかるように、着水点近傍では気泡が大量に混入している時刻($t=0.2\text{s}$)において分布のピークが2つある。ミリスケールの気泡の存在時間は短く0.1s以下であり、マイクロスケールの気泡についてみても0.5s(1/3周期)と着水時の気泡の滞留時間は短い。着水点とボア領域の中間領域($x_b=6.5h_b$)では、気泡数密度が減少し、沖から移流してきたミリスケールの気泡と水中に滞留しているマイクロスケールに大きく2分類されている。さらにボア領域の気泡径分布の時間



(a) 着水 0.042秒後



(b) 0.07秒後



(c) 0.186秒後

図-3 着水点近傍($x_b=2.1h_b$)の気泡計測結果(白色: 液相, グレー: 気相, 縁取りされた気泡: レーザ照射面に存在する気泡の輪郭, 気泡内の点: 気泡輪郭より推定された重心, 矢印: 気泡の移動速度ベクトル)

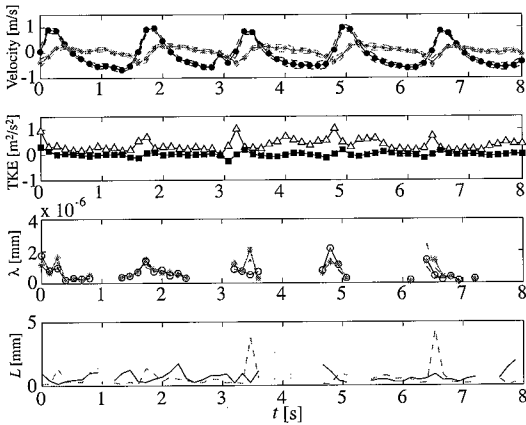
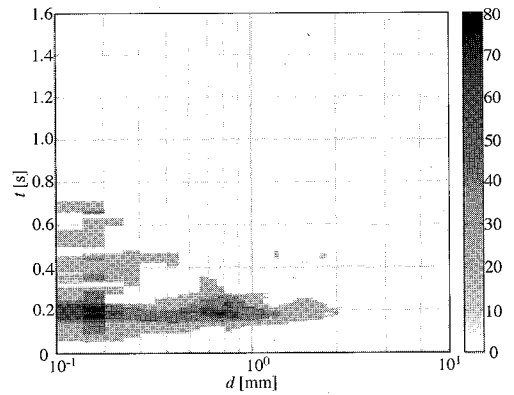


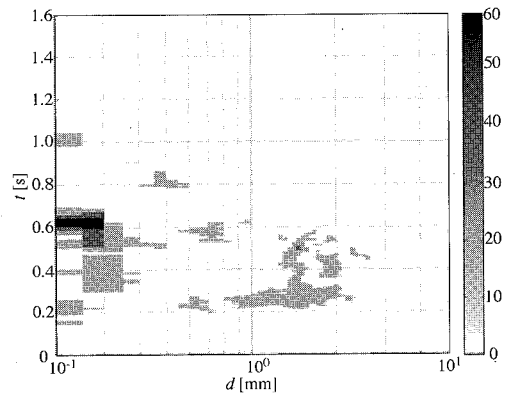
図-4 碎波点近傍 ($x_b=0$) における液相側の平均流速 (●: u , * : v), 乱れエネルギー (△: TKE, ■: $-d(TKE)/dt$), λ (実線: u , 点線: v , * : 縦の Taylor 長, ○: 横の Taylor 長) および L (実線: u , 点線: v) の関係

変化を見ると, 他の計測地点と比較して両スケールの気泡はスペクトルとしても時間的にも広く分布しており, 特に $300\ \mu\text{m}$ 以下の気泡の数は相当多いことがわかる. これは着水時に大きなせん断力が気泡に加わり, それにより気泡が分裂し, 移流の影響を受け, ポア領域において径の小さい気泡の数が急増したと考えられる. このように, 碎波帯内の気泡の混入量や気泡の大きさ別の混入時期は空間的に異なり, 変化している. 気泡の混入ソースとしての扱いとモデル化は, より系統的な計測と解析が必要になると思われる.

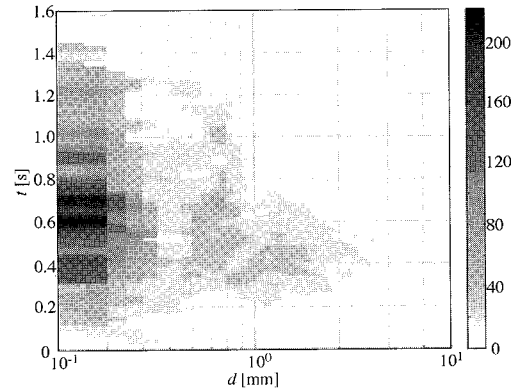
図-6 に示すのは, 着水点とこれより碎波水深の 13.8 倍 ($13.8h_b$) 岸側の計測点における時間平均した気泡径スペクトルである. 図の横軸は気泡径 (d), 縦軸は単位計測断面あたり気泡数密度である. 図中の実線, 一点破線はそれぞれ着水点近傍 ($x_b=2.1h_b$), それより $13.8h_b$ 岸側の計測地点における時間平均気泡径スペクトル, 破線, 点線の直線はそれぞれ $d^{-3/2}$, $d^{-10/3}$ のべき乗則を表している. 図-6 より気泡径分布は場所により変化すること, 2つの特徴的なべき乗則が見られることがわかる. 規則波の碎波であるため, Hinze スケールは約 $2\ \text{mm}$ と空間的には変化していない. 今回行った実験を, Battjes・Janssen (1978) のモデルに当てはめると時間平均エネルギー散逸率は $\bar{\varepsilon} \approx 0.254\ \text{W/kg}$ であり, Battjes・Janssen 理論に従うと, Hinze スケールは $d_h = 2.01\ \text{mm}$ である, この値は計測された図-6 とほぼ一致する. 一方, Svendsen (1987) が行ったモデルでは, 特性長を $l=h/5$, k を $0.05 \sim 0.15\ \text{m}^2/\text{s}^2$ とするとエネルギー散逸率は $0.05 \sim 0.26\ \text{W/kg}$ と推定される. 図-4 に示した TKE からするとこの値はやや過小であると言える. 代表気泡径と TKE およびエネルギー散逸率の議



(a) 着水点近傍 ($x_b=2.1h_b$)



(b) $x_b=6.5h_b$



(c) ポア領域 ($x_b=13.8h_b$)

図-5 瞬時の気泡径分布の時間変化

論をつめるにはもう少し詳細に現象を理解する必要があるため, ここではこれ以上行わない.

図-7 に示すのは碎波点より $6.5h_b$ 岸側において計測された気泡に関する代表統計量の時間変化である. 図中の α はボイド率, N は気泡数密度, d_m は平均気泡径, R_{axis} は

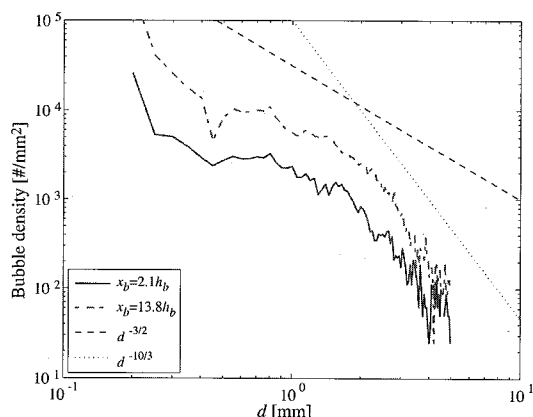


図-6 時間平均気泡径スペクトル (実線: 着水点近傍, 一点破線: それより 13.8 h_b 岸側)

短軸長軸比, u_m は平均気泡移動速度である。まずボイド率と気泡数密度は時間遅れがあるものの対応が相関がある。また, 平均気泡径はボイド率と連動しており, ボイド率が高いと平均気泡径も大きくなる傾向があることがわかる。その変動幅は 2 倍以上あり, 優位なものとなっている。一方, 気泡の平均移動速度も平均気泡径と逆相関が見られる。物理的に見ると, ボイド率と気泡数密度は連動することは容易に理解できるが, 平均気泡径は気泡分裂と関連しているため, 気泡移動速度および周辺の液相のせん断力に依存するはずである。後者については同時計測していないため評価できないが, 平均気泡径と気泡移動速度が逆相関がみられるのは自然な結果である。

5. 結 論

本研究では, BTV 法と PIV 法により砕波帯内の混入気泡および液相流速の計測を行い, 砕波帯における混入気泡の気泡径分布特性および液相の乱流特性について明らかにした。以下に得られた結果を示す。

1. 着水時の混入気泡の滞留時間 (0.1 ~ 0.5 s) は波の周期に対して短く, ボア領域の気泡はスペクトルとしても時間的にも広く分布し, 砕波帯内の気泡の混入量や気泡の大きさ別の混入時期は空間的に異なる。
2. 時間平均した気泡径スペクトルは着水点近傍, ボア領域など場所により異なり, 2 つの特徴的なべき乗則 ($d^{-3/2}$, $d^{-10/3}$) に従う。
3. ボイド率と気泡数密度, 平均気泡径とボイド率の対応にはそれぞれ相関があり, ボイド率が高いと平均気泡径も大きくなる傾向がある。

このように, 気泡径分布の時間的変動とボイド率, 平均気泡径の非定常性およびこれら気相・液相統計量の関係について新たな知見を得た。

最後に本研究の成果は科学研究費補助金 (代表者:

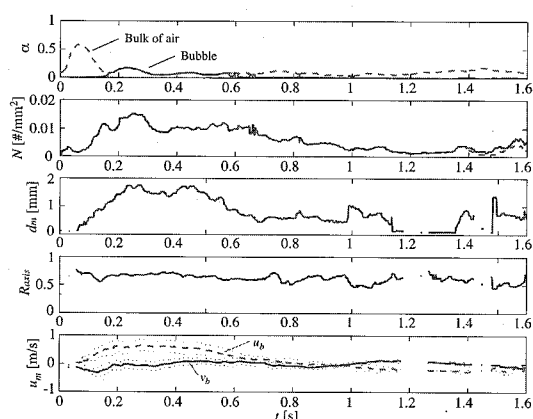


図-7 気泡に関する統計量の時間変化 (砕波点より 6.5 h_b 岸側, α : ボイド率, N : 気泡数密度, d_m : 平均気泡径, R_{axi} 短軸長軸比, u_m : 平均気泡移動速度)

森) および住友財団環境研究助成 (代表者: 森) によるものであることを付記する。

参 考 文 献

- Battjes, J. and J. Janssen (1978): Energy loss and set-up due to breaking wave, Proc., 16th Int. Conf. on Coastal Eng., Volume 1, ASCE, pp. 596-587.
- Chanson, H., S. Aoki, M. Maruyama (2002): Unsteady air bubble entrainment and detrainment at plunging breaker: Dominant time scales and similarity of water level variation, Coastal Engineering, No. 46, pp. 139-157.
- Cox, D.T. and S. Shin (2003): Laboratory measurements of void fraction and turbulence in the bore region of surf zone waves, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 129, No. 10, pp. 1197-1205.
- Deane, G.B., M.D. Stokes (2002): Scale dependence of bubble creation mechanisms in breaking waves, Nature, 418, pp. 839-844.
- Garrett, C., M. Li and D. Farmer (2000): The connection between bubble size spectra and energy dissipation rate in the upper ocean, JPO, 30, pp. 2163-2171.
- Kashima, H., N. Mori, and S. Kakuno (2006): Temporal-spatial relationship between air bubbles and turbulence in the surf zone, Proc. of the 24th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE.
- Mori, N., T. Suzuki, and S. Kakuno (2007): Experimental study of air bubbles and turbulence characteristics in the surf zone, Journal of Geophysical Research 112, C05014, doi:10.1029/2006JC003647.
- Svendsen, I. (1987): Analysis of surf zone turbulence, JGR, 92 (C5), pp. 5115-5124.
- Thorpe, S. (1982): On the clouds of bubbles formed by breaking wind waves in deep water, and their role in air-sea gas transfer, Phil. Trans. R. Soc. London A304, pp. 155-210.
- 角野昇八・鈴木琢磨・大西祥久・日引 俊 (2004): 現地小砕波の連行気泡特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 91-95.
- 森 信人・加島寛章 (2006): 砕波混入気泡運動の画像計測, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 61-65.