

砕波帯における混入気泡特性の時空間変化

Temporal-Spatial Distributions of Air Bubbles in the Surf Zone

森 信人¹・中川智史²・角野昇八³

Nobuhito MORI, Satoshi NAKAGAWA and Shohachi KAKUNO

The two-phase flow measurements using dual-tip void probe for bubble size and its moving speed measurements were conducted for the surf zone breaking waves. The characteristics of air bubbles in the surf zone as void fraction, bubble number distributions, bubble size spectra, and turbulent characteristics of fluid velocity were measured with highly temporal and spatial resolutions in the wave flume. The horizontal and vertical distributions of void fraction and characteristic bubble size were measured and modeled empirically. The relationship between the void fraction and wave energy dissipation are proposed for the surf zone breaking waves.

1. 序論

沿岸砕波帯において、砕波により水中に取り込まれる気泡は、砕波におけるエネルギー散逸、防波堤など海岸構造物に作用する波圧を考える上で重要である。しかしながら、沿岸砕波帯における気液混相特性に関する研究は最近までそれほど活発に行われてこなかった。

砕波帯のボイド率の時空間変化については、Cox・Shin (2003) が時間と共に指数関数的に減少すること、気泡径については Deane・Stokes (2002) が音響と画像からその非定常性についての計測を行っている。一方、Hoqueら (2005) は、実験計測したボイド率の鉛直分布と局所波高および相対距離から求められる経験式を用いてボイド率の空間分布を提案している。さらに、Mori ら (2007a) は、砕波帯における気泡の鉛直分布および水平分布の特性とスケール効果を明らかにするとともに、ボイド率の岸沖分布と乱流特性の間に相関が見られることを示している。このように砕波帯における気液混相特性は徐々に明らかにされつつあるが、個別の条件下での実験的研究が多く、ボイド率や気泡径など代表量の関係を把握するに段階に至っていない。これに加えて、これまでの研究は規則波を用いた室内実験により得られた結果が殆どであり、不規則波による気泡特性についての知見は非常に少ない。

そこで本研究では、規則波および不規則波の砕波により混入する空気塊 (cm スケール) および気泡 (mm スケール) の計測を行い、砕波帯における混入気泡特性に対する不規則波の影響を検討する。また、混入気泡特性と波の波高変化や流況などの各諸量との関係を検討し、砕波帯における混入気泡推定モデルの構築に向けた考察を行う。

表-1 規則波実験条件

case	Type	T [s]	H_0 [cm]	H_b [cm]	h_b [cm]	X_s [m]	ξ_0
1-reg	spilling	1.6	16.3	19.4	21.7	6.5	0.16
2-reg	spil./plunging	2.0	11.5	13.5	13.0	3.9	0.22

2. 実験の概要

(1) 実験装置および条件

実験は長さ 50m、高さ 1.5m、幅 1.0m の側壁ガラス張り中型 2 次元造波水槽を用いて行った。水槽の岸側に 1/30 勾配の斜面を設置し、水深 $h=0.8$ m の条件下で同様斜面上における砕波の計測を行った。気泡および流速の測定は、Dual-tip Void Probe (DVP) と 3 次元超音波流速計 (ADV) および波高計を水平移動と垂直移動が可能な架台に取りつけて行った。DVP、ADV、波高計のサンプリング周波数はそれぞれ、5kHz、200Hz、100Hz とし、全ての計測装置を TTL 信号で同期して計測を行った。

規則波実験は、表-1 に示す砕波形式の異なる 2 ケースを行った。表中の H_0 、 T は沖波の波高、周期、 H_b 、 h_b 、 X_s は砕波波高、砕波水深、砕波点から汀線までの距離、 ξ_0 は surf similarity parameter である。測定は静水面 ($z=0$) 上を、砕波点付近から汀線までの範囲で水平方向に平行移動して行い、その内の代表的な数点において鉛直方向に 1~2cm 間隔で約 50 点において計測を行った。また各ケース最低 100 波以上を計測し、統計量を算出した。

不規則波実験の波浪条件は、規則波および不規則波のエネルギーが一致するように水面変位の rms 値を合わせて設定した。表-2 に、不規則波実験の実験条件を示す。また不規則波実験では、規則波実験の 1 ケースに対して、Bretschneider-光型および JONSWAP の 2 種類の周波数スペクトル形状を与え、計 4 ケースの実験を行った。測定地点は、規則波実験と同様である。

(2) 計測方法の概要

ボイド率および気泡弦長 (以下、気泡径と表記) の測

1 正 会 員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所
2 修(工) 五洋建設株式会社
3 フェロー 工博 大阪市立大学教授 大学院工学研究科

表-2 不規則波実験条件

case	spectrum	$T_{1/3}$ [s]	$H_{1/3}$ [cm]	η_{rms} [cm]	f_p [1/s]
1-irrB	Bretschneider-Mitsuyasu	1.6	23.1	5.76	0.63
1-irrJ	JONSWAP	1.6	23.1	5.76	0.63
2-irrB	Bretschneider-Mitsuyasu	2.0	16.3	4.07	0.50
2-irrJ	JONSWAP	2.0	16.3	4.07	0.50

定には DVP を用いた。岸沖 x 、鉛直 z 方向に計測を行ったため、ボイド率は (x, z, t) の関数である。以下では、時間変化を考えない限り、ボイド率は計測時間で平均化した時間平均ボイド率 $\alpha(x, z)$ 、特に静水面上のボイド率を $\alpha_0(x)$ と表記する。プローブの幾何学的特性より、今回用いた DVP の原理的計測可能な最小気泡径は約 0.3mm である。気泡に起因するノイズ除去は、データ処理 (Mori ら, 2007b) により除去し、水位データをもとに計測点が水中に位置する時間帯のみを解析対象とした。

3. 混入気泡特性の解析

(1) 混入気泡の岸沖分布特性

まず静水面上における時間平均ボイド率 α_0 の岸沖分布を図-1(b)に示す。規則波(i)のボイド率は、砕波点付近では低い値を示し、汀線方向にその値は増加し、その後緩やかに減少する。一方、図-1-(b)に示すように、不規則波のボイド率は沖側から岸に向かって緩やかに増加し、規則波と違い顕著なピークが現れず、そのボイド率の絶対値は規則波に比べて小さい値を示す。また、図は示さないが周波数スペクトルによる違いは顕著に現れず、同様の分布形状を示した。規則波の砕波では、ほぼ決まった砕波点から岸側のジェット着水点で空気が混入するため、ボイド率のピークが顕著に現れる。これに対して、不規則波における砕波は、波の不規則性によって気泡の水中への取り込み位置および時間が共に幅広く分散するため、ボイド率の分布形状が緩やかに変化する。また図-1(c)に示す 1 波当たりの気泡数 N の岸沖分布は、規則波および不規則波のそれぞれのボイド率の岸沖分布と同様の分布形状を持つ。一方、図-1(d)に示す平均気泡径 d_m の岸沖分布は、規則波・不規則波および岸沖位置で大きな変化はなく、 $d_m = 0.5 \sim 0.6 \text{ cm}$ であった。さらに図-2に示す気泡径の確率密度の岸沖変化を見ても、岸沖方向で同様の気泡径分布を示すことから、岸沖方向で気泡総量が変化しても、気泡径分布自体は変化しないことがわかった。

(2) 混入気泡の鉛直分布特性

図-3(a)に示す時間平均ボイド率の鉛直分布は、規則波、不規則波共に、指数関数的に鉛直下向きに減少する傾向が見られた。そこで、Hoque ら (2005) の方法に習い、次式を用いて図-3(a)に示すように近似を行った。

$$\alpha(x, z) = \alpha_0(x) \exp(k_0 z / H_0) \quad (1)$$

ここで、 H_0 は局所波高、 k_0 は α_0 の鉛直方向の減衰

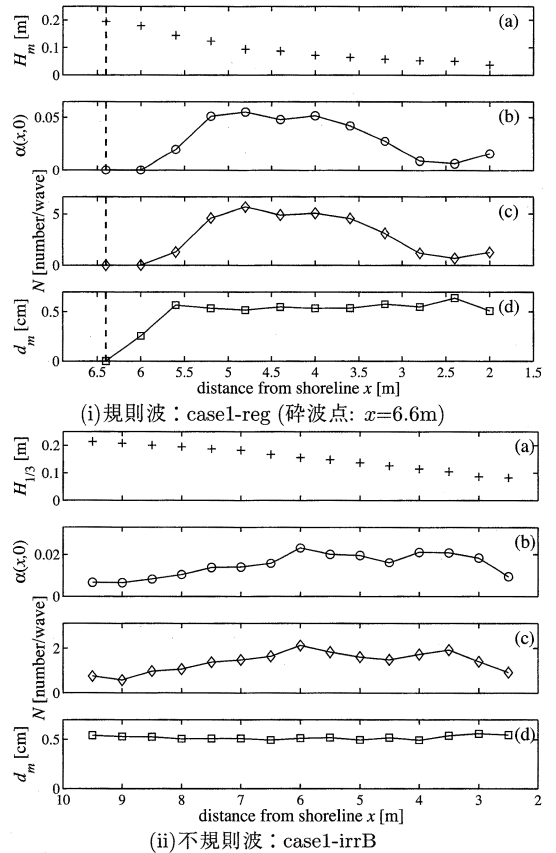


図-1 静水面上における混入気泡特性の岸沖分布 ((a)波高 H_m 、有義波高 $H_{1/3}$, (b)ボイド率 α_0 , (c)一波当たりの気泡数 N , (d)平均気泡径 d_m)

係数である。図-4に示すように求めた係数 α_0 、 k_0 の関係を見ると、 α_0 の値が大きいと、 k_0 の値は小さくなり、やや弱いながらも負の相関の関係が見られた (相関係数: -0.69)。このことから、静水面上のボイド率が高ければ、より水中深くまで気泡が混入することがわかる。

一方、図-3(b)に示す気泡数 N の鉛直分布は、ボイド率の鉛直分布の分布形状と異なり、波峰付近では気泡数は少なくなる傾向が見られる。これは、波の通過時間 (空間長さ) が鉛直位置で異なり、波峰付近では見かけ上一波当たりの気泡数が少なくなるためである。さらに、その鉛直変化を見る限り、鉛直方向に分布形状に違いはあまり見られないが、図-3(c)に示す平均気泡径 d_m は、波峰付近で気泡径が大きくなる傾向が見られる。これは、波峰付近は空気塊のソースとして供給が盛んに行われると共に、その空気塊を分裂させ気泡を生成する過程を担い、比較的大きい径の気泡が分布するためと考えられる。

(3) 混入気泡の時間変化特性

ボイド率 $\alpha(x, z, t)$ の時間変化は、波の前面付近でボイド率のピークを向かえ、その後指数関数的に急激に減衰

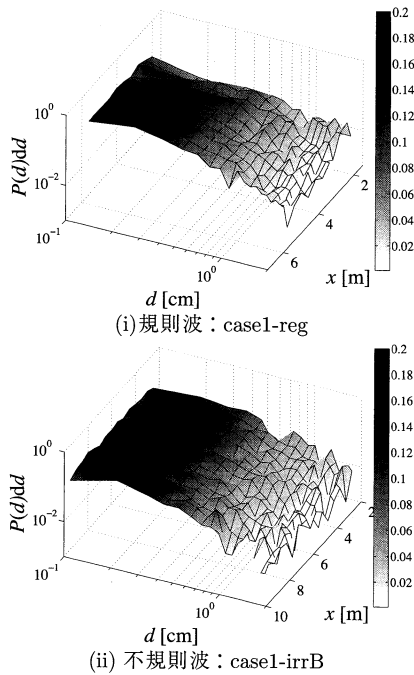


図-2 静水面における気泡径の確率密度分布の岸沖変化

する。時間変化ボイド率はどの計測位置でも同様の傾向を示したが、ピークを迎えてから減衰する過程で、減衰の早さが計測点によって異なった。そこで、その時間変化を式(2)に近似し、係数 A 、 B 、 k_t の内、ボイド率の時間減衰係数 k_t を用いて考察を行う。

$$\frac{\alpha(x, z, t)}{\alpha(x, z)} = A \left(\frac{t}{T} + B \right) \exp \left[-k_t \left(\frac{t}{T} + B \right) \right] \quad (2)$$

図-5は静水面における時間平均ボイド率 α_0 の時間減衰係数 k_t の関係である。図-5より、時間平均ボイド率が大きいと係数 k_t の値は小さくなる逆相関の傾向が見られる。これは、時間平均ボイド率が大きいと、時間変化勾配が緩やかになり、時間が経過しても気泡が多く存在し、その減衰は時間平均ボイド率から推定可能であることを示唆している。

(4) 混入気泡の代表スケール

碎波により水中に取り込まれる空気は、碎波初期に生成される不定型の大きなスケールの気泡塊と楕円もしくは球形の気泡群に大別して考えることができる。そのため、時間平均ボイド率 α は気泡群ボイド率 α_0 と気泡塊ボイド率 β から $\alpha = \alpha_0 + \beta$ と定義されるべきである。

図-6および7(a)は、時間平均ボイド率 α 、気泡群ボイド率 α_0 、気泡塊ボイド率 β の岸沖および鉛直分布である。

図-6および7(a)より、気泡群ボイド率 α_0 および気泡塊ボイド率 β の分布形状は、時間平均ボイド率 α と同形状であることがわかる。さらに気泡群と気泡塊の割合を調べ

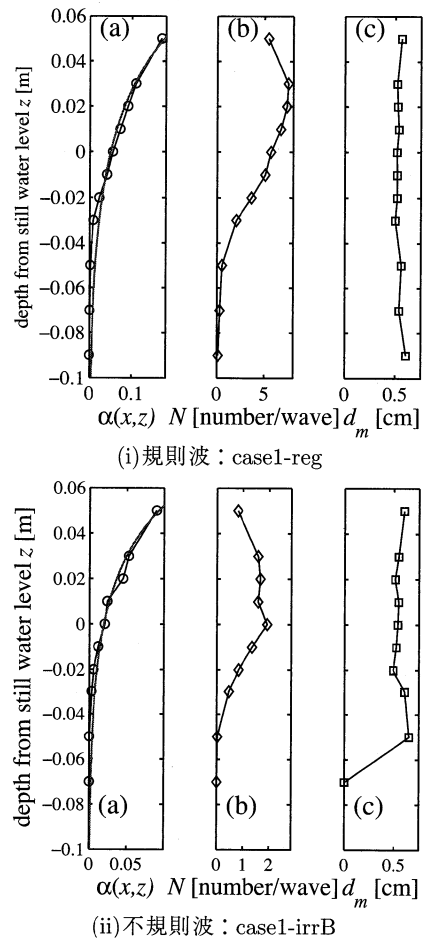


図-3 混入気泡特性の鉛直分布 ((a)ボイド率 $\alpha(x, z)$, (b)一波当たりの気泡数 N , (c)平均気泡径 d_m)

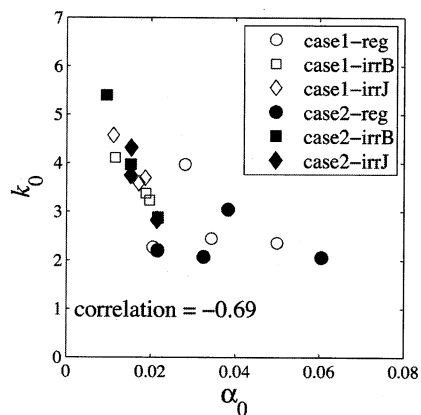
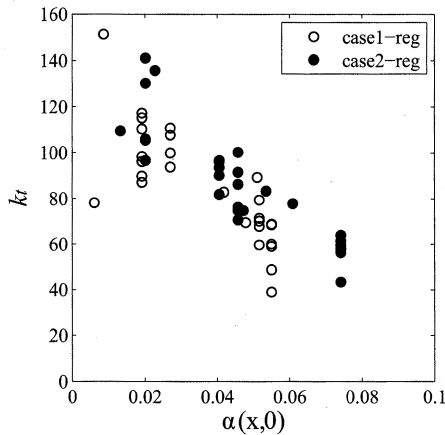
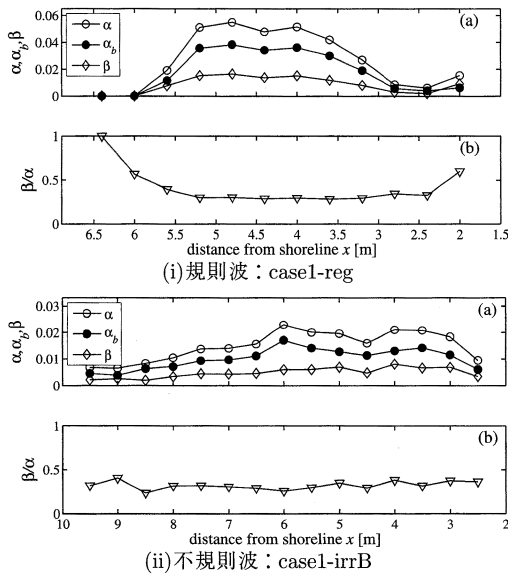


図-4 α_0 および k_0 の関係

るため、図-6および7(b)に、気泡塊ボイド率/時間平均ボイド率 β/α の空間分布を示す。静水面における岸沖変化は、規則波では碎波点付近ではやや気泡塊の割合が高


 図-5 時間平均ボイド率 α_0 と時間減衰係数 k_t の関係

 図-6 静水面における気泡群および気泡塊ボイド率の岸沖分布 (a)○: 時間平均ボイド率 α , ●: 気泡群ボイド率 α_b , ◇: 気泡塊ボイド率 β , (b) 気泡塊ボイド率/時間平均ボイド率 β/α)

く、その後は一定の割合に収まるのに対し、不規則波では、明瞭な傾向が見られない。これは、規則波では碎波点付近の着水点においてまだ気泡分裂前段階もしくは遷移状態の空気塊が存在するが、不規則波では碎波点が定点に存在しないためである。一方、気泡塊ボイド率/時間平均ボイド率 β/α の鉛直分布は、あまり変化が見られなかった。

4. 混入気泡特性の推定

(1) 混入気泡特性と流速の関係

碎波時のジェットの入力により混入する空気塊は、乱

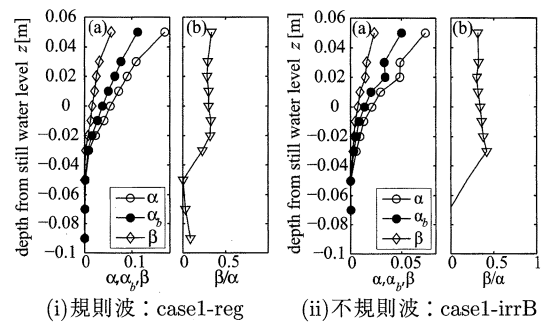
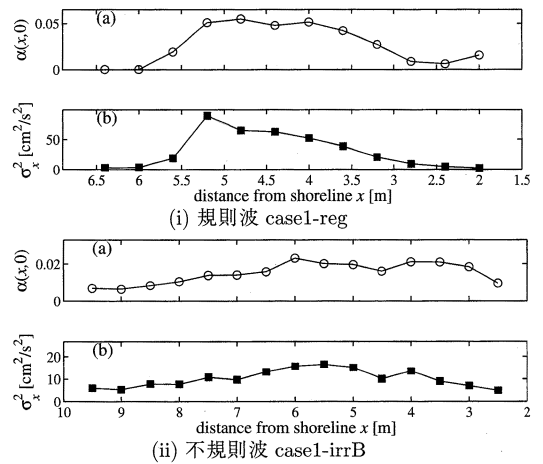


図-7 気泡群および気泡塊ボイド率の鉛直分布 (記号は図-6と同じ)


 図-8 静水面におけるボイド率 α_0 と岸沖成分 x の乱流強度 σ_x^2 の岸沖分布

れによるせん断の影響で分裂し、気泡が生成される。一方、混入した気泡の滞留や浮上により液相の乱れが増大する。このように液相の乱れと気泡の間には密接な関係を持つことから、気泡特徴量と流速データから求めた乱れの関係を考察する。図-8および9に示すのは、ボイド率 α と流速の岸沖成分の乱流強度 σ_x^2 の岸沖・鉛直分布である。図-8および9よりボイド率と乱流強度の空間分布は同様の分布形状を示すことがわかる。さらに図-10に示す各計測点毎のボイド率 α と無次元化乱流強度 $\sqrt{\sigma_x^2/gh}$ の関係を見ると、相関係数が0.92であり、非常に高い相関が見られた。気泡の存在により乱れが強化されるが、両者は相互干渉するため、乱れからボイド率を推定するモデルとしてを考えることは現実には難しい。

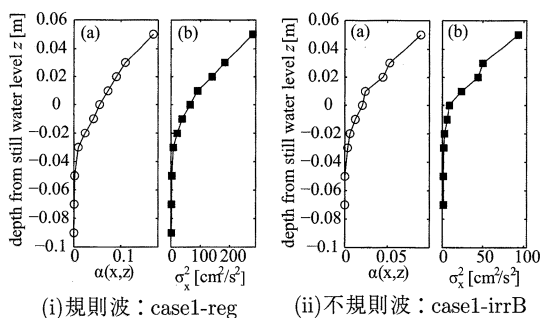


図-9 ボイド率 α と岸沖成分 x の乱流強度 σ_x^2 の鉛直分布

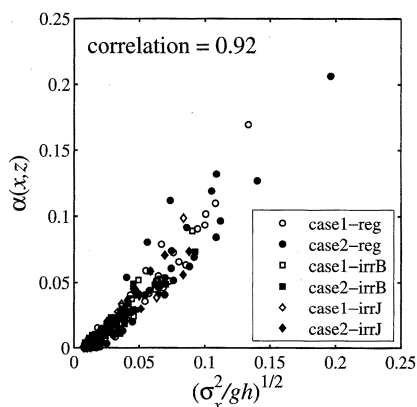


図-10 ボイド率 α と岸沖成分 x の無次元乱流強度 σ_x^2 の関係

(2) 混入気泡特性と波高、エネルギー散逸の関係

碎波による混入気泡は、ジェットに着水に巻き込まれる空気塊の混入が主であり、これらには碎波波高等の水変位の代表スケールとローカルなエネルギー散逸の両者が関連している。また Garrett ら (2000) が示しているように、気泡径分布には液相のエネルギー散逸率が深く関わる。そこで、簡易的に Guza のエネルギー散逸モデルを用い、波高減衰から求めらるエネルギー散逸率と気泡分布特性との関係について考察する。

図は示さないが、図-1に示した波高の岸沖変化から求めた波高のエネルギー散逸率 ε の岸沖分布は、規則波ではボイド率 α の岸沖変化と同様に碎波点から汀線方向に向かって値が増加し、その後減少する凸型の分布形状を持つ。しかし、そのピーク値の出現位置はボイド率より沖側にあり、両者の岸沖分布には空間的なずれが見られる。これは、碎波直後には空気塊が水中に混入する位置と波高減衰の始まる位置の差である。一方、不規則波のエネルギー散逸率 ε の岸沖変化は、分布形状が単調減少であることからずれの有無を判断することは難しい。図-11に示すのは、分布形状の空間的なずれを補正したエネルギー散逸率 ε とボイド率 α_0 の関係である(相関係数

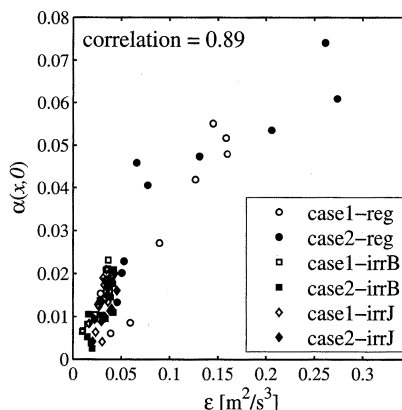


図-11 静水面におけるボイド率 $\alpha_0(x)$ とエネルギー散逸率 ε の関係

0.89)。これより、エネルギー散逸率 ε と静水面におけるボイド率 α_0 の間には高い相関があることがわかる。以上の結果、位相の補正を行えば、波の散逸率から平均的な場のボイド率の推定が可能であることがわかった。

5. 結論

碎波帯におけるボイド率および気泡の特徴量についての実験およびデータ解析を行った。その結果規則波・不規則波を問わずボイド率の鉛直および時間変化は静水面におけるボイド率から推定可能であり、また岸沖変化は乱流強度もしくは波のエネルギー散逸率から推定できることを明らかにした。

最後に本研究の成果は科学研究費補助金(No.19560516, 代表: 森; No.20360223, 代表: 竹原)によるものであることを付記する。

参考文献

- Cox, D.T. and S. Shin (2003): Laboratory measurements of void fraction and turbulence in the bore region of surf zone waves, J. Eng. Mech., Vol.129, No.10, pp.1197-1205.
- Deane, G.B. and 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 rates in the upper ocean, JPO, Vol.30, pp.2163-2171.
- Hoque, A. and S. Aoki (2005): Distributions of void fraction under breaking waves in the surf zone, Ocean Eng., Vol.32, pp.1829-1840.
- Mori, N., T. Suzuki and S. Kakuno (2007a): Experimental study of air bubbles and turbulence characteristics in the surf zone, JGR, Vol.112, C05014, doi:10.1029/2006JC003647.
- Mori, N., T. Suzuki and S. Kakuno (2007b): Noise of acoustic Doppler velocimeter in bubbly flow, J. Eng. Mech., Vol.133, No.1, pp.122-125.