

水面に突入する円噴流に伴う混入気泡の特性

Characteristics of Air Bubble Entrainment by a Vertical Circular Jet at the Water Surface

森 信人¹・松尾祐典²・加島寛章³

Nobuhito MORI, Yusuke MATSUO and Hiroaki KASHIMA

The characteristics of bubble entrainment process owing to a vertical circular jet at the water surface are discussed. The two-phase flow measurements using imaging technique for two-dimensional bubble measurements, so called Bubble Tracking Velocimetry (BTV) were conducted in the laboratory. The dependence of the air bubble statistics on the Froude number and salinity beneath the water surface is discussed both downward and rising bubbles. The clear dependence of bubble size distributions on the Froude number is obtained through the experiments.

1. 序論

海岸工学で取り扱われる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定性的にも把握されていない場合が多い(例えば Mori, 2008a)。特に砕波ジェットが水面に突入することにより、生成される気泡は、数 μm ~ 数 cm に渡る幅広い径の気泡が存在するが、砕波が間欠的に起こるのに加えて、ジェットが着水時に水面を叩くことによって形成される μm スケールの微細気泡と、水平渦等によって取り込まれ、せん断により分裂する mm スケールの気泡が混在する複雑な現象となっている (Mori, 2007)。

このため、砕波現象のアナロジーとして、水面に噴流などの Jet が突入するときに混入する気泡を調べ、砕波モデルを進めようという研究も見られる (渡部ら, 1999)。Chanson(1996)は、色々な研究成果を取りまとめ、Jet により混入する気体流量が Jet Froude 数

$$Fr = \frac{U_j - U_e}{\sqrt{gD_j}} \dots\dots\dots(1)$$

の関数で表されることを示している (U_j は水面直上の Jet の速度, U_e は水面直下の水の流れ, D_j は水面直上の Jet の代表長さ)。突入 Jet による水面変化の Froude 数依存性については、Oguzら (1995) や Zhu ら (2000) により理論的考察が行われている。一方、Blenkinsoppら (2007) は、実験結果から混入気体総量のような Froude 相似に従う現象とは別に、混入気泡が分裂・浮上する過程では Weber 数など別の相似則が支配的になることを考察している。

上記のように、水面から取り込まれる気泡現象は、不均一性と複数の相似則に加えて、気泡生成過程が着水時とその後の分裂時の 2 つあり、これが現象の理解を難しくしている。さらに、浮上や移流する気泡が混在するこ

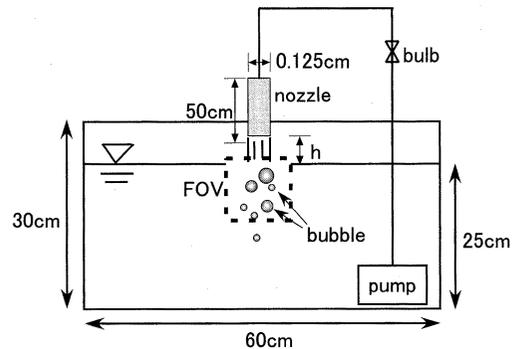


図-1 実験装置の概要

とに加えて、運動量、物性の影響も大きく、それぞれがどの程度の役割を持っているのかを把握することが難しい。

そこで本研究では、噴流が自由表面に突入するときに混入する気泡を対象に実験を行い、特に気泡数や径分布に及ぼす運動量および物性依存性について明らかにする。

2. 実験および計測方法の概要

実験は、横幅 60cm、高さ 35cm、奥行き 20cm の矩形アクリル水槽を用い、水深 25cm、内径 12.5mm、長さ 50 cm の円管を水面上鉛直下向きに設置し、水面に鉛直円噴流を衝突させることにより発生する気泡の形状および速度について 2 次元計測を行った (図-1)。噴流の流量は、 $156.7 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、水温 24°C で一定とし、実験は、管の出口から水面までの距離を変化させて、水面での円噴流の代表流速 U_j を $139 \sim 190 \text{ cm/s}$ で 5 パターン (Jet Froude 数 = $4.0 \sim 5.4$)、人工海水を用いて塩分 C を $0 \sim 3\%$ の範囲で 0.5% ずつ 7 パターン変化させ、合計 35 ケース実施した。

噴流の突入により、水面から取り込まれる気泡の二次元形状と二次元移動速度は、平面 LED を光源に用いたシャドウグラフ法および 3 時刻 PTV 法を組み合わせ

1 正 会 員 博 (工) 京都大学准教授 防災研究所
2 学生会員 大阪市立大学大学院工学研究科
3 正 会 員 修 (工) (独) 港湾空港技術研究所

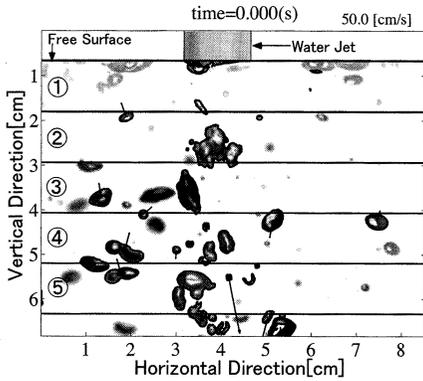


図-2 BTV解析結果と解析セクション(縁取りされた気泡: 解析対象気泡, 矢印: 移動速度)

BTV法(森ら, 2006; Moriら, 2008b)を用いて各ケース3000枚計測した。撮影は高速度カメラ(1.2K×1K pixel)を用いて行い, フレームレート500fps, シャッタースピード1/1000sで実施した。計測領域は, 噴流が突入する水面近傍の水平8.5cm×鉛直6.7cmの領域を対象とし, このときの空間解像度は66.7 μ mであった。図-2に示すのは, その解析例の1例であり, 図中の縁取りしてある気泡が計測レンジ内の気泡, 縁取りされていない気泡が計測レンジの前後に位置するものとして認識から外した気泡である。このように, 計測レンジ内の気泡全てについて, それぞれの気泡形状と移動速度を求めて解析を行った。

以下では, 実験結果をもとに, 気泡数, 気泡径分布および速度分布に及ぼすFr数, 塩分の影響について解析を行う。また, 解析領域を鉛直方向に1cm毎に分けて(Sec.1~5), 鉛直方向の変化についても考察を行う。なお, 以下での気泡径は気泡面積から求めた換算直径を意味する。

3. 結果と考察

(1) 気泡径

a) 気泡径分布におよぼすFr数と塩分の影響

水中に取り込まれた気泡は, 局所的なせん断により分裂を繰り返しながら, 液相運動と浮力に従って移動する。このため, 水面から直接取り込まれた気泡(混入気泡)と移流気泡(以下, 浮上気泡)は, 運動量や物性だけでなく鉛直方向にも変化するために別々に取り扱う必要がある。今回想定している条件では, 鉛直方向に現象が卓越するため, 個々の気泡の鉛直速度の符号から混入・浮上気泡の分離を行い, それぞれの気泡に対する突入流速 U_j (\propto Jet Froude数)および物性依存性について検討した。まず始めに, 今回の条件で特徴的な結果が得られた水面下2cm~3cm(Sec.3)の領域における計測結果につ

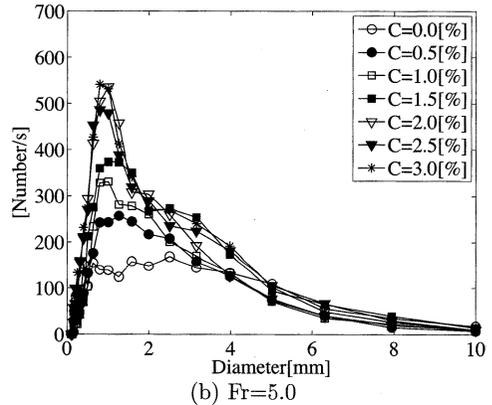
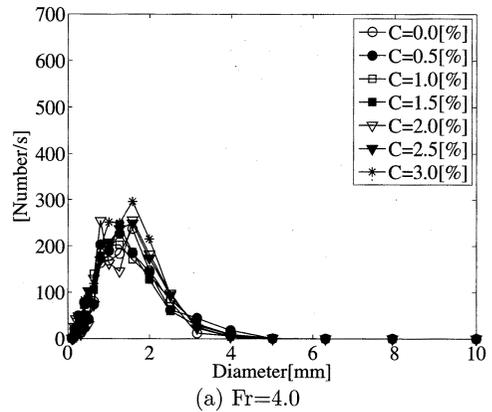
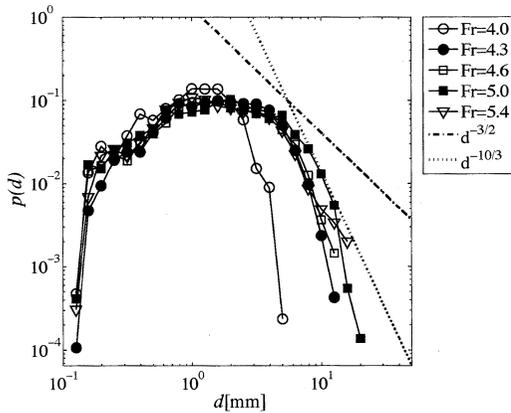


図-3 気泡の個体数分布におよぼす塩分CとFr数の影響(Sec.3)

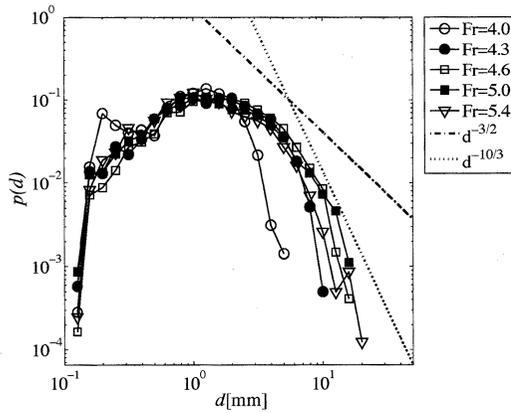
いて議論を行う。

図-3に示すのは, 気泡個体数と気泡径の関係であり, 浮上気泡と混入気泡の区別を行っていない全計測気泡を対象としている。淡水の場合, Fr数が大きくなると大きな径の気泡の混入量が増加し, 相対的に混入気泡分布が広がっていることが分かる。このときの1mm~4mmの気泡が卓越しており, 比較的フラットな気泡径分布を持っている。一方, 塩分の増加に伴い, 主に2mm以下の気泡数が大幅に増加し, 淡水に比べて塩水では1mm前後の気泡数が最大で2倍程度増加することがわかる。また, 塩分が1%以上の濃度になると混入気泡の個数には塩分による差が余り見られなくなる。後で示すが, 塩分の濃さは水面近傍で計測される混入気泡には顕著な影響を与えないが, 浮上気泡の個数は塩分が上昇すると大きく増加する。このことから, 塩分は水面で生成される気泡の個数にあまり影響はないが, 気泡がせん断力により分裂するときその影響を与え, 観測される全気泡の個数が増加することがわかった。

一方, 気泡径分布がどのようなべき則に従っているのかについては古くから議論が行われている。砕波帯の気泡径分布については, Deane・Stokes(2002)が室内実験



(a) C=0.0%



(b) C=3.0%

図-4 混入気泡の径分布におよぼす Fr 数と塩分の影響 (Sec.3)

により、気泡径分布が2つのべき乗則に従うことを明らかにしている。本研究では、全気泡、混入および浮上気泡についてその径分布形状を調べ、これまでの提案式と比較を行った。図-4は、混入気泡径の確率密度分布の Fr 数依存性について示したものである。図より、Fr=4.0は他の条件に比べて分布形状が極端に狭い。Fr数が4.3より大きくなると気泡径分布の幅は徐々に広くなり、mmスケールの大きな気泡が増加する。Chanson (1996)が示しているように、Fr数がある閾値を超えると混入気体量が急激に増加するが、図からわかるように分布形状も大幅に変わることがわかる。また、 $d > 4\text{mm}$ の分布形状はGarrettの提案した $d^{-10/3}$ にほぼ従っており、Fr数にも殆ど依存していない。この時の限界 Weber 数を3、代表速度の20%が気泡分裂に寄与すると仮定するとHinzeスケールはFr=4.0のケースで5.0mm、Fr=5.4のケースで2.7mmとそれほど大きく変化しない。逆に、図-4の分布形状からHinzeスケールが4mm前後であることが示されており、このことから気泡スケールのせん断力が代表流速の15%程度であることが推定される。

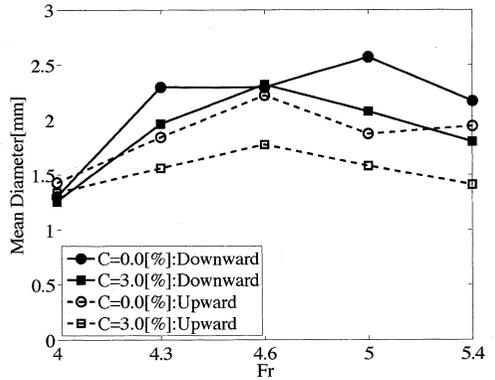


図-5 代表気泡径におよぼす Fr 数の影響 (Sec.3)

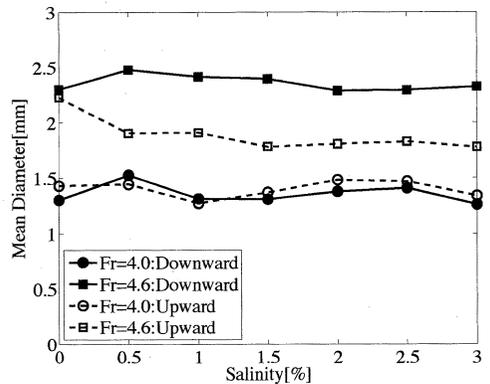


図-6 代表気泡径におよぼす塩分の影響 (Sec.3)

一方、図-4の(a)と(b)の比較からわかるように、塩分が増加すると $d < 3.0\text{mm}$ の気泡径分布のピークが盛り上がり、気泡数密度が増加している。また、このときFr=4.0から4.3への径分布の幅の変化が小さくなっている。これは、Oguzらの理論などFroude相似に基づく気泡混入機構から、Garrettらの提案したWeber相似ないしこれ以外の気泡発生機構に遷移しているためと考えられる。

上述したように、気泡径分布の形状は、Fr数および塩分により大きく変化する。一般に計測・議論されるのは、分布形状そのものよりも平均径やピーク径の代表量であるため、以下では、平均径とFr数および塩分の関係について議論を行う。図-5は、代表気泡径におよぼすFr数の影響を示したものである。図-3に示したように、Fr数が増加すると1mm前後の混入気泡数は全体的に増加する傾向にある。しかし、気泡径分布が全体が変化するため、このとき平均径は若干増加する傾向が見られる。また、塩水は淡水より平均径が増加する割合が小さく、径の小さい気泡が混入する。このことは、平均径のみでの議論では混入気泡の特性を把握できないことを示唆している。

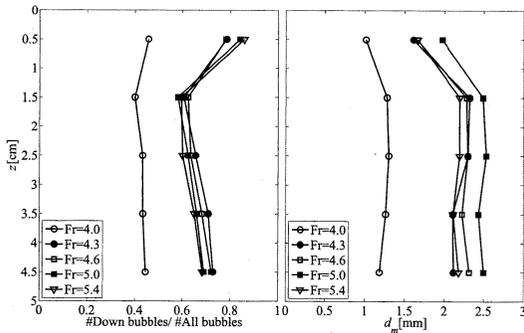


図-7 混入気泡の鉛直分布におよぼす Fr 数の影響: $C=0.0\%$
(左: 混入気泡と全気泡個体数の比, 右: 平均混入気泡径)

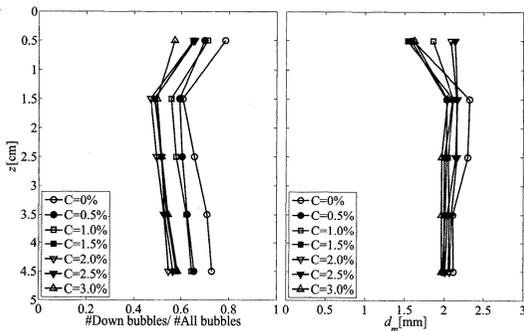


図-8 混入気泡の鉛直分布におよぼす塩分の影響: $Fr=4.3\%$
(左: 混入気泡と全気泡個体数の比, 右: 平均混入気泡径)

ついで、代表径に与える Fr 数の影響と同様に、水の塩分を $0 \sim 3\%$ と変化させた場合の代表径の変化について検討を行った(図-6)。図に示すように、Fr 数が 4.0 の場合は、混入気泡(downward)、浮上気泡(upward)ともに、塩分を変化させても平均気泡径に変化は見られない。Fr > 4.3 の場合、混入気泡の平均径には塩分による変化は殆ど見られないが、浮上気泡の平均径は塩類が付加されると $2 \sim 3$ 割小さくなる。この傾向は塩分の濃度には依存していない。このことから、気泡の分裂には図-5 に示した Fr 数依存性に加えて、塩分の有無の寄与があることがわかる。但しこの場合、塩分の濃度の影響は殆ど見られず、塩類の有無が重要となっている。つまり、水面で生成される気泡は Froude 相似に大きく依存して物性に余り影響を受けないのに対し、取り込まれた気泡がせん断等で分裂するとき物性の影響が効くようである。しかしこの物性による気泡分裂過程の変化については、水面近傍的を絞った今回の計測では捉えることができず、はっきりした結論を得ることは出来ない。

b) 鉛直分布

上記の議論は、主に Sec.3 (水面下 2cm~3cm) の領域における計測結果をもとに行ってきた。水面極近傍と

これ以深では、気泡に働くメカニズムが異なることが予想されるため、気泡径の鉛直方向の変化について解析を行う。図-7 は、混入気泡径および混入気泡と全気泡数比の鉛直変化を示したものである。図より、Fr 数が 4.0 を超えると平均気泡径、混入気泡数比共に大きく増加することがわかる。Fr > 4.3 以上では、水面から下向きに取り込まれる混入気泡は 6 割を越えており、上昇気泡は、溶解ないし計測範囲外に移流していることがわかる。特に、他の計測セクションと比較して水面近傍は個数比が極端に高く、このことが平均径が小さくなる大きな要因である。また、混入気泡個数比は Sec.2 以深(水面下 1cm)で増加している。これは、気泡が液相のせん断力により分裂するためであり、混入気泡の平均径が鉛直方向に減少していることがこれを裏付けている。

ついで、代表径に与える Fr 数の影響と同様に、水の塩分を $0 \sim 3\%$ と変化させた場合の代表径の変化について検討を行った(図-8)。Fr 数一定の条件下では、水面近傍の平均気泡径は塩分が増加すると淡水に比べて小さくなる。しかしその差は淡水か塩水かの違いで顕著であり、塩分の濃度は殆ど関係ない。図-3 に示した Sec.3 の気泡径分布からわかるように、水面から数 cm 深くなると塩分の違いによる差は見られなくなる。一方で、塩分が増加すると混入気泡の占める割合は減少し、深い位置になるほど、全気泡数に対して混入気泡が占める割合が増加する。この塩分による割合の差は、鉛直方向に多く変化せずほぼ一定である。これは、塩分が増加すると浮上気泡数が増えるためであり、相対的に混入気泡の数が減少していることになる。図-7 に示したように、Fr 数が平均径に影響を与えるのに対し、塩分の影響は個数にあらわれ、両者の影響は分離して考える必要があることがわかる。

(2) 非定常性と速度分布

ついで、円噴流が水面に突入するときに混入する気泡の非定常性について検討を行った。図-9 はその結果であり、(a)が混入気泡数(濃度は単位時間当たりの個数)、(b)は浮上気泡数の時系列変化の一例である。これより、噴流突入に伴って水中に取り込まれる気泡は間欠的であり、比較的大きな気泡が混入した後に、順次小さなスケールの気泡が続いて混入していることがわかる。つまり、表面でトリガーとなるような擾乱が発生した後、連続的にダウンスケールしつつ気泡が取り込まれることがわかった。これに対して、浮上気泡は定常性が強く、決まった径の気泡が連続的に浮上している。このことから、混入気泡と浮上気泡の特性は大きく異なり、両者を分けて考える必要がある。

最後に、気泡の移動速度に対する Fr 数と塩分の影響について検討を行った。図-10 は、Fr = 5.0 のケース、

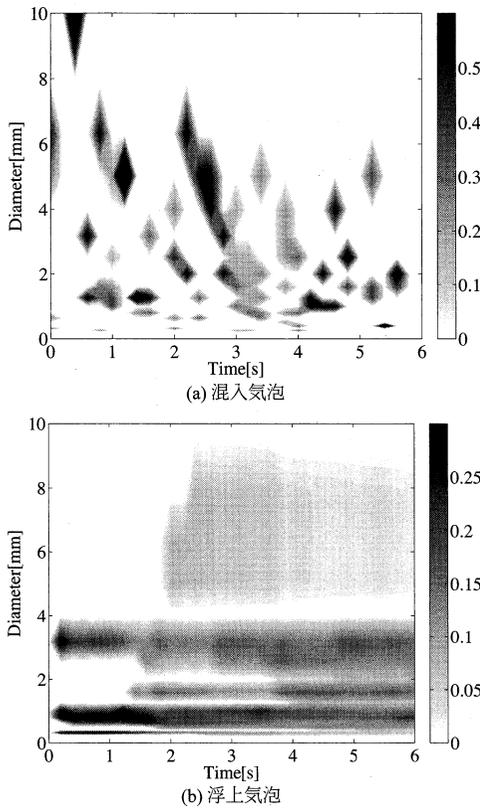


図-9 混入気泡の時系列変化: Sec.3 (C=0.0%, Fr=4.3)

Sec.3 における浮上気泡の上昇速度と clean および dirty な気泡の浮上速度の理論を示したものである。図より、計測された気泡径毎の平均上昇速度は、clean な気泡と dirty な気泡の上昇速度の理論値の間を通過しており、下降流の影響を殆ど受けていない。紙面の関係上図を省くが、最大気泡上昇速度は、塩分および Fr 数によらず 20cm/s とほぼ等しくなっており、塩分および Fr 数の違いによる移動速度への影響は見られないことがわかった。

4. 結論

本研究では、噴流が水面に突入するときに取り込まれる気泡について可視化実験を行い、その特性について解析を行った。得られた結果は以下の通りである。

1. Fr がある値を超えると急激に気泡径分布の幅が広がり、1mm スケールの気泡数が増加する。
2. 水面で生成される気泡は物性の影響を受けず、Fr 数依存する。一方、取り込まれた気泡が剪断等で分裂するときに塩類の影響を受ける。
3. 上昇気泡の速度は塩分および Jet Froude 数の影響を殆ど受けない。

今後は、Jet 着水時におけるミクロ的な気泡取り込み

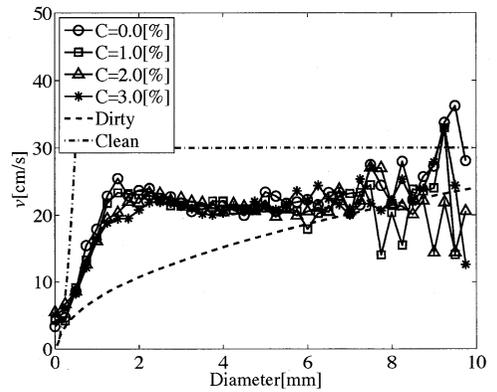


図-10 気泡の平均上昇速度に及ぼす塩分の影響

メカニズムの解明および碎波への拡張を進める予定である。

謝辞：本研究を行う上で、大阪市立大学重松孝昌准教授には多大なご支援を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。また成果の一部は、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。

参考文献

- 森 信人・加島寛章 (2006): 碎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.
- 渡部靖憲・大塚淳一・佐伯 浩 (1999): 自由落下水塊に伴う気泡の生成・運動機構, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.116-120.
- Blenkinsopp, C. and Chaplin (2007): Void fraction measurements in breaking waves, *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, 463, pp. 3151-3170.
- Chanson, H. (1996): Air bubble entrainment in free-surface turbulent shear flows, Academic Press, 200p.
- 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 and energy dissipation rates in the upper ocean, *JPO*, 30, pp.2163-2171.
- Mori, N., T. Suzuki and S. Kakuno (2007): Experimental study of air bubbles and turbulence characteristics in the surf zone, *JGR*, Vol.112, C05014, doi: 10.1029/2006JC003647.
- Mori, N., S. Kakuno and D.T. Cox (2008a): Aeration and bubbles in the surf zone, in *Hand book of Coastal and Ocean Engineering*, World Sci. Pub. Co., 20p., in press.
- Mori, N. and S. Kakuno (2008b) Aeration and bubble measurements of coastal breaking waves, *Fluid Dynamics Research*, 40, 7-8, pp.616-626.
- Oguz, H., A. Prosperetti and A. Kolaini (1995): Air entrapment by a falling water mass, *JFM*, 294, pp.181-207.
- Zhu, Y., H. Oguz and A. Prosperetti (2000): On the mechanism of air entrainment by liquid jets as a free surface, *JFM*, 404, pp.151-177.