

砕波連行気泡運動の画像計測

森 信人¹・加島寛章²

混相乱流場の気相を計測するため、平面 LED を光源に用いたバックライト法、気泡認識法および 2 時刻 PTV を組み合わせ、断面 2 次元空間に投影した気泡形状と速度を同時に計測する手法 (BTV) を開発した。開発した手法を矩形水槽のエアレーションと 2 次元造波水路内の砕波帯に適用し、多くの気泡を含む混相乱流場における気泡形状および気泡移動速度の同時面計測を行った。実験データの解析結果より、気泡径分布および気泡移動速度を求め、砕波帯における気泡特性を明らかにした。

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。

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 ら (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。さらに Hoque・Aoki (2005) は、ボイド率の鉛直分布に着目し、その分布形状を拡散係数の形で表現する方法を提案している。ボイド率よりも詳細な気泡そのものの計測については、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 ら, 2006)。音響を用いた気泡計測は、Deane・Stokes (2002) が有名であり、室内実験結果より気泡径分布の短時間変化を明らかにしている。さらに気泡の画像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。一方、Ryu ら (2005) は高密度の気泡群をトレーサーとして連行気泡内の流速の計測に成功しているが、いずれの研究も気泡そのものや気泡周辺流体運動の計測については発展段階と言える。

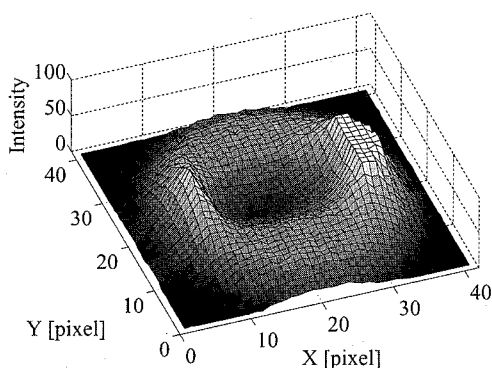


図-1 気泡周りの輝度分布

そこで本研究では、砕波帯内の気泡径分布など微細な気液混合特性の計測を可能とするため、バックライト法と PTV 法を元に、気液混相乱流場における気泡の形状および速度を推定する可視化手法を開発し、砕波帯を模擬したエアレーション実験と一様斜面上の砕波の気泡計測を行い、その妥当性について検討を行う。

2. 可視化計測方法の概略

混相乱流場の気相を計測するため、2 次元空間に投影された気泡形状と運動を同時に計測する簡便な可視化計測法 (以下、BTV と表記) を開発した。BTV の概略は以下のとおりである。まず始めに、平面 LED を光源に用いたバックライト法により、鮮明な気泡の輪郭を撮影する。バックライト法では光源とカメラの間に存在する気泡界面とその内側で透過光が減少し、鮮明な気泡画像が得られる特徴がある。

図-1 はバックライト法で撮影された気泡周りの輝度分布のサンプルである。図からわかるように、投影された気泡の輪郭に添って高輝度のエリアが連続しており、これをトレースすることで気泡の 2 次元投影形状が得られる。バックライト法で撮影された画像内の図-1 のような輝度分布を持つ鮮明な気泡を二値化することにより気泡の輪郭を検出する。輝度のピークは、屈折の影響に

1 正会員 博(工) 大阪市立大学講師 大学院工学研究科
2 学生会員 大阪市立大学大学院工学研究科

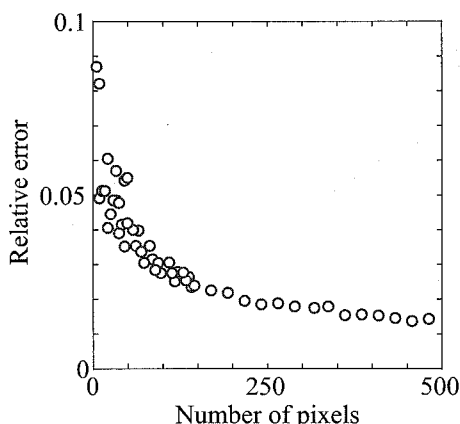


図-2 気泡認識の精度と解像度の関係

より現れるもので実際の輪郭より数ピクセル内側になるがここでは無視することにする。ついで投影された気泡画像をラベリングした後に楕円近似を行い、長径と短径および角度を計算し、気泡形状と重心位置を推定する。

図-2に示すのは、短径長径比を2/3とした仮想気泡の短径の大きさを2~100 pixelまで変化させ自動認識させた場合の代表気泡長さ($\propto \sqrt{\text{面積}}$)と気泡の認識誤差の関係である。これより、気泡の認識誤差は画素数に対して単調減少し、十分な数の画素があればその精度は2%前後であることがわかる。BTVでは気泡そのものをトレーサーとして用い、重心位置情報より2時刻PTV法を用いて個々の気泡の移動速度を推定する。BTVでは、原理的に液相と気相の運動が完全に分離可能であり、また2次元計測ではあるが碎波帯のような非常に多くの気泡を含む流れ場について計測が可能であるのが特徴である。しかしながら、気泡数密度が高い場合、気泡移動速度を推定する場合の誤認識が高くなるため、PIVで先に流速場の予測を行い、そのあと気泡重心位置の関係よりPTVにより気泡移動速度を推定する。本研究では、個別の気泡形状が認識可能な領域のみを解析対象とし、気泡数密度の高い領域の結果は解析対象から外している。

3. 実験の概略

まず始めに計測手法の特性を検討するため、矩形水槽内(W 20 cm×H 20 cm×D 20 cm)内に設置した多孔質体より人工的に微細気泡を発生させ、気泡形状および移動速度の計測を行った(図-3)。図に示すように、計測領域を光源とカメラの間に設定し、画像による気泡の計測レンジを広げるために計測領域をハーフミラーを用いて2分割し、2台の高速度カメラ(1.3 Mega Pixel, 最大2000 f/s)を用いて計測を行った。この時の最小解像度は47 μm であった。さらに、気泡の奥行き方向の

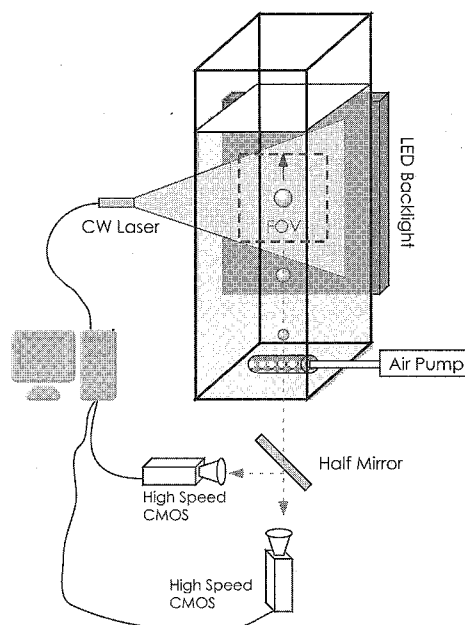


図-3 BTVを用いた気泡計測の概略図(曝気水槽の場合)

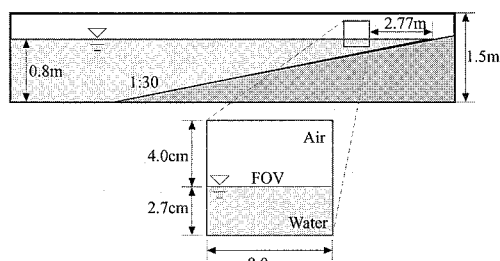


図-4 BTVを用いた碎波帯の混入気泡計測の概略図

位置を特定するため、側面から連続光レーザー(532 nm, 5 W)を用いたライトシートを計測エリアに照射している。矩形水槽実験では、水の塩分濃度を0~3%まで変化させて実験を行い、気泡に対する塩分濃度の影響についても調べた。矩形水槽内で発生させる気泡はエアポンプより空気を多孔質体に送り発生させ、気泡を発生させる多孔質体を2種類用いて実験を行い、結果の比較を行った。

ついで、同じ可視化システムを長さ50 m、水深0.8 m、斜面勾配1/30の2次元造波水路に設置し、沖波波高12.2 cm、周期3.8 sの規則波を造波し、計測画像領域を岸沖方向にトラバースして碎波帯内における気泡形状と移動速度の可視化計測を行った(図-4参照)。可視化計測とともに波高計、超音波流速計およびボイド計を用いて岸沖方向の気液両相について点計測を行った。また、碎波帯計測における画像の範囲は80 mm×67 mm、

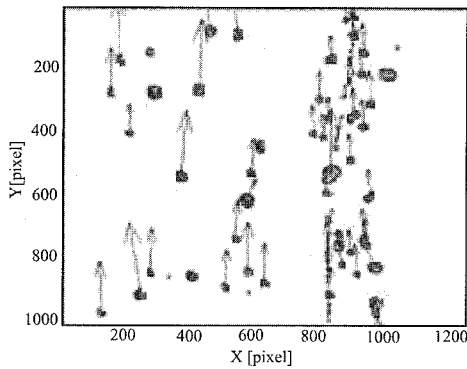


図-5 推定された気泡形状と移動速度

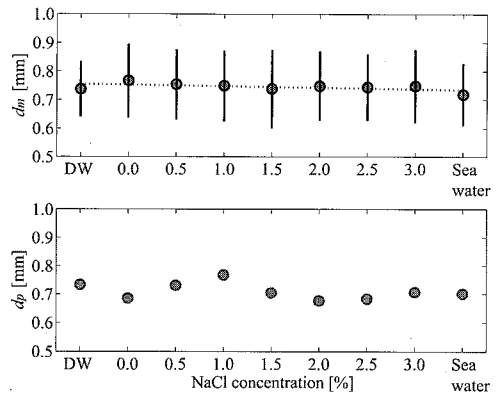
解像度は約 $65\ \mu\text{m}$ であり、水面付近の混入気泡に着目し、静水面位置は図-4 に示すように画面の上から $4\ \text{cm}$ となるように設置して計測を行った。

4. 結果と考察

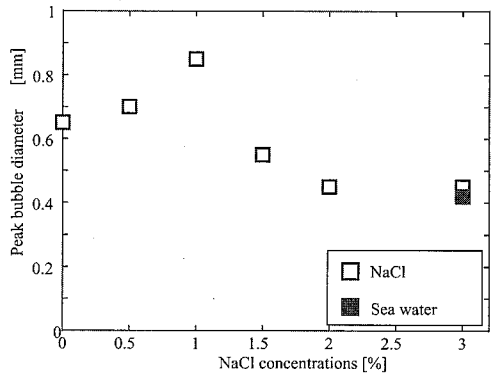
(1) 静水中を上昇する気泡群

碎波帯における混入気泡を計測する前に、矩形水槽を用いて多孔質体を用いたエアレーション中の気泡計測を行った。矩形水槽実験では、2種類の多孔質体を用いて $500\ \mu\text{m} \sim 1,500\ \mu\text{m}$ の大きさの気泡を水底より放出し、静水中を上昇する気泡径分布、気泡形状および気泡の断面2次元速度を計測した。水道水および蒸留水を用いた実験を行うとともに塩分濃度を変化させ、気泡特性に及ぼす塩分濃度の影響についても検討を行った。ボイド率を抑えて実験を行ったため、今回の実験条件では気泡径は鉛直方向に顕著な変化は見られず、また合体や分裂も殆ど観察されなかった。図-5 に示すのは、推定された気泡形状と移動速度のスナップショットである。図中の縁取りしてある気泡がレーザーライトシート面に位置した気泡であり、縁取りされていない気泡がレーザーライトシート面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。また、図中の矢印は気泡の移動速度を示す。このように、BTV では約 $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$ 面内の気泡径、角度そして速度の同時計測が行われる。

図-6 に示すのは、矩形水槽実験における平均気泡径およびピーク気泡径と塩分濃度の関係を表したものである。図-6(a) は比較的均質な孔を持つ多孔質体を用いた場合(ケース 1)、(b) はケース 1 より放出される気泡径のばらつきが大きい多孔質体を用いた場合(ケース 2)の計測結果である。図-6(a) のケース 1 では、ピーク気泡径 d_p が 1.0% 濃度でやや大きくなるもののその変化は 10% 程度でありそれほど顕著ではない。平均気泡径 d_m で見ると $700\text{--}750\ \mu\text{m}$ であり、塩分濃度による変化は見られない。一方、図-6(b) に示すケース 2 のピーク気泡



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-6 矩形水槽実験における平均気泡径と塩分濃度の関係

径 d_p はケース 1 同様に塩分濃度 1% で最大値を持ち、 1.5% を超えると平均気泡径が大きく低下する。ケース 1 と 2 の違いはエアレーションに使用した多孔質体の材質のみであり、ケース 1 の方が均質な気泡を発生させることができる。この結果より、静水中を上昇する気泡径は、塩分濃度の増加とともに減少する傾向があるものの初期に生成する気泡の条件に左右される点が大きく、定量的に評価することは難しいことがわかった。

ついで、矩形水槽内のエアレーションにおける気泡の上昇速度と気泡径の関係について調べた。図-7 に示すのは、計測された全ての気泡についてまとめた結果であり、気泡径毎の平均上昇速度を単一気泡の上昇理論 (Batchelor, 1967) と比較したものである。図中の実線と波線は clean bubble および dirty bubble の理論値であり、その他の記号が塩分濃度を変化させて行った実験結果である。BTV で計測された気泡の平均上昇速度は、clean bubble と dirty bubble の上昇速度のほぼ中間を通っており、これはこれまでに行われたカラム実験結果と定性的に一致している (例えば Mori, 2003)。また図からわかるように、塩分濃度が気泡の平均上昇速度におよ

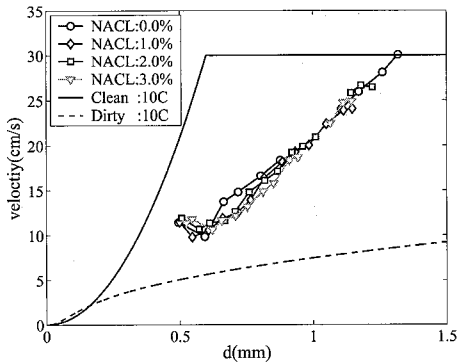


図-7 矩形水槽実験における気泡の上昇速度におよぼす塩分濃度の影響 (実線・点線：理論値，記号：計測結果)

ばす影響は殆ど見られなかった。

(2) 碎波帯内の混入気泡

図-8に示すのは、碎波帯におけるBTV計測結果の一例である。計測地点は碎波点より0.95 m (波長の1/4) 岸側の着水後の地点であり、図-8(a)は着水直後、(b)および(c)はそれより7/125秒後および14/125秒後の解析結果である。図中の鉛直座標2.7 cmが静水面に相当し、図中の白色の領域は液相，グレーの領域が気相を表し、縁取された気泡がBTVの解析対象となった気泡であり、気泡内の点が気泡の重心，矢印が気泡の移動速度である。一般に碎波帯の気泡はボイド計などを用いて平均水面以下を対象に点計測されることが多い，点計測では時空間的に非定常に変化する碎波帯内の気泡運動を計測することは難しい。BTVによる画像計測では，着水直後の空気塊が分裂し，気泡群となって一旦平均水面以下に押し込められた後，液相の流れに移流されつつ分散し，徐々に上昇していく様子が計測可能である。図-8を細かく見ると，着水後では水面近傍に高密度な気泡群が存在し，気泡が個別に認識可能である領域は限られ，その後位相が進行するのに従い気泡群が分散していくことがわかる。

碎波帯における混入気泡のより具体的な特徴を見るため，計測された気泡の形状と速度について解析を行った。図-9に示すのは，着水点近傍で計測された気泡径の確率密度分布である。図中の破線は円形に近い気泡 (長径短径比が1.1以内)，1点鎖線は楕円気泡，そして実線は両者をまとめた場合の気泡径分布である。最小解像度が65 μm であるため，計測可能な最小気泡径はおおよそ500 μm である。碎波帯で計測された気泡は，全体の85%が楕円形状を持ち，平均気泡径は1,290 μm ，ピーク径は620 μm であった。また，円形気泡は碎波の silent phase (Deane・Stokes, 2002) に多く見られ，

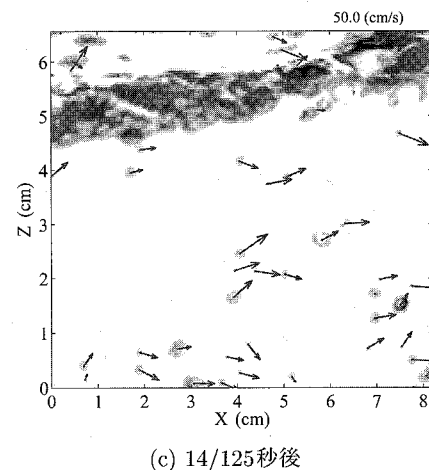
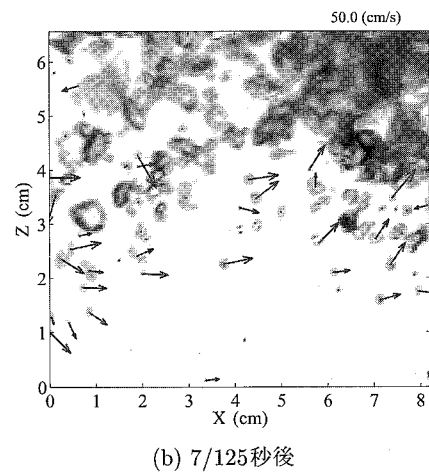
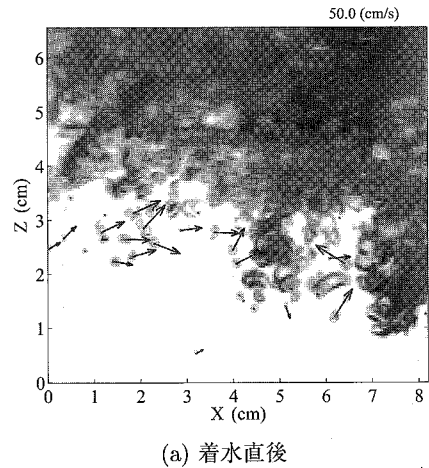


図-8 着水点近傍の気泡計測結果 (白色：液相，グレー：気相，縁取された気泡：レーザーライト照射面に存在する気泡の輪郭，気泡内の点：気泡輪郭より推定された重心)

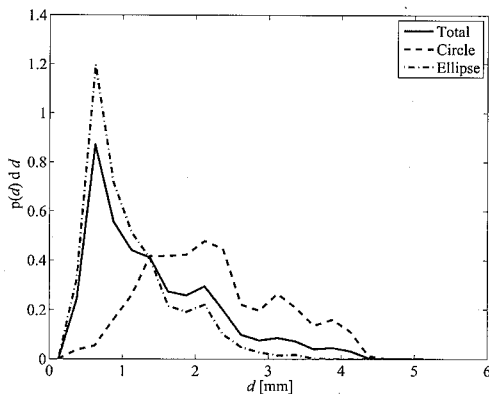


図-9 第1着水点近傍における気泡径分布 (実線：全気泡, 破線：円形気泡, 1点鎖線：楕円気泡)

2~3 mm のスケールで最も多く存在することがわかった。さらに図-10に示すのは、着水点近傍における気泡移動速度の確率密度分布である。図中の●は気泡の岸沖方向速度, ▲は鉛直方向速度を示し, 岸沖方向速度は計測のダイナミックレンジの 50 cm/s までを表示している。岸沖方向の移動速度は非常に速く, 殆どが岸方向(正)に向い, 50 cm/s を超えるものも数多く見られた。これに対し, 気泡の鉛直方向速度の分布は平均値 0 の正規分布に近く, ほぼ対称形状である。また, 気泡の鉛直方向速度の標準偏差は 18.4 cm/s と水平方向速度の平均値 30.0 cm/s に比べてかなり大きく, かなりの揺らぎを持ちながら水平方向に移流されており, 碎波帯内の混相流をボイド計等で点計測することは困難さを伴うことがわかる。ADV で計測した乱れエネルギーは 100~400 cm²/s²であり, これは碎波点から岸向き方向に一様に分布していた。水平方向に比べて鉛直方向の乱れエネルギーは 1/9 程度であったが, この液相の乱れが気泡運動の揺らぎを生じさせていると思われる。

本条件の規則波の波速が約 0.96 m/s ($=\sqrt{gh}$, h : 局所水深)であることから, 碎波帯における混入気泡は平均的に波速のほぼ 3 分の 1 の速度で岸方向に移動している。また, ADV により点計測された水平, 鉛直方向の平均流速はそれぞれ 20 cm/s, 0 cm/s であり, 図-10に示すような気泡の移動速度と流体の速度はほぼ一致しており, 今回計測した碎波帯における混入気泡は流体運動にパッシブに従っていることが言える。

5. 結 語

本研究では, 混相乱流場の気相を計測するため, 平面 LED を光源に用いたバックライト法と PTV を組み合わせ, 断面 2 次元空間に投影した気泡形状と速度を同時に計測する手法 (BTV) を開発した。得られた手法を矩

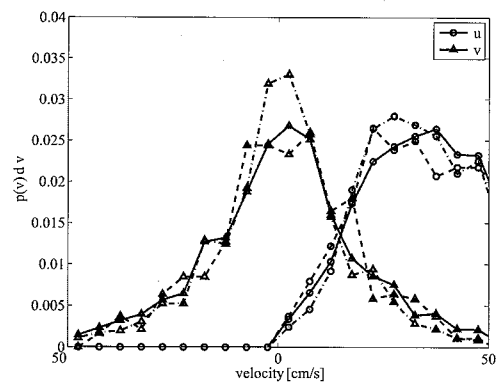


図-10 第1着水点近傍における気泡移動速度 (実線：全気泡, 破線：円形気泡, 1点鎖線：楕円気泡, ●：水平方向速度, ▲：鉛直方向速度)

形水槽と碎波帯に適用し, 碎波帯のような非常に多くの気泡を含む流れ場の気泡形状と移動速度の計測が可能であることがわかった。

今後, より詳細な碎波帯内の計測, 液相流速との同時計測そして 3 次元計測と展開していきたい。

最後に本研究の成果は科学研究費補助金 (17760409, 代表者: 森) および住友財団環境研究助成 (053493, 代表者: 森) によるものであることを付記する。

参 考 文 献

- 角野昇八・鈴木琢磨・大西祥久・日引 俊 (2004) : 現地小碎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・今村正裕 (2003) : 風波碎波の気泡分布特性について, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 111-115.
- Batchelor, G.K. (1967) : An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge University Press, 615p.
- 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.
- Hoque, A. and S. Aoki (2005) : Distributions of void fraction under breaking waves in the surf zone, Ocean Engineering, Vol.32, pp. 1829-1840.
- Mori, N. (2003) : Experimental study of air bubble distributions induced by wind wave breaking, Proceedings of Second Asia Pacific Coasts, in CD-ROM.
- Mori, N., S. Kakuno, T. Suzuki (2006) : Experimental study of air bubbles and turbulence characteristics in the surf zone, Journal of Geophysical Research, 投稿中.
- Ryu, Y., K.A. Chang and H.J. Lim (2005) : Use of bubble image velocimetry for measurement of plunging wave impinging on structure and associated greenwater, Measurement Science and Technology, Vol.16, pp. 1945-1953.