画像計測を用いた砕波帯における混入気泡の岸沖鉛直分布特性の解析

Analysis of Air Bubbles in the Surf Zone Breaking Waves by Imaging Technique

松尾祐典¹·森 信人²·重松孝昌³·角野昇八⁴

Yusuke MATSUO, Nobuhito MORI, Takaaki SHIGEMATSU and Shohachi KAKUNO

The characteristics of bubble entrainment process in the surf zone are discussed. The two-phase flow measurements using two-dimensional imaging technique for bubble measurements, so called Bubble Tracking Velocimetry (BTV) were conducted in the laboratory wave tank. The horizontal and vertical distributions of void fraction and characteristic bubble size were measured and analyzed in detail. 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,海岸構造物に作用する衝撃波圧,大気・海洋間 の物質輸送に関わる重要な現象である. Coxら (2003) は,一様斜面上のボイド率と流速をLDVとボイド計を用 いて計測し,ボイド率と乱れの時間変動特性やボイド率 が乱れエネルギーと相関があることなどを明らかにして いる.また,Hoque (2005)はボイド率の鉛直分布が指 数関数的に減少することを実験により示し,ボイド率の 鉛直分布形状を静水面でのボイド率と波の代表量から求 める実験式を提案している.さらに,Moriら (2007)は 規則波の砕波についてボイド率,気泡径および気泡径の空 間分布,およびボイド率と乱れエネルギーとの間に相関 が見られることを明らかにしている.

以上のように、砕波混入気泡特性については、その特 性が解明されつつあるが、主に測定の制約からバルク的 な取り扱いが多く、気泡の特性を代表する個数や径の分 布についての時空間的な変動特性については明らかにさ れていない、そこで本研究では、上記のことを踏まえて 気泡を直接計測することができる計測手法を用い、造波 水槽を使った規則波砕波実験を行い、気泡のマクロ的な 特性について解析を行う.

2. 実験概要

実験は、1/30勾配の斜面を設置した長さ50m,高さ 1.5m,幅1.0mの側壁ガラス張りの中型二次元造波水槽を 用いて行った.また、このとき可視化のためのバックラ



イトが水面変動の影響を受けないようにするために,水 槽内を2つに仕切り,片側に消波材を設置し,実験を行 った (図-1).水深は0.8mで一定に設定し,砕波形式が 異なる2ケースの規則波の一様斜面上における砕波につ いて計測を行った.表-1に示すように,実験条件は森ら (2008a)のDual-tip Void Probe (DVP)を用いた気泡の点 計測と同じ条件で行い,後述するように相互比較を行っ た.表-1中のT, H_0 は沖側の周期,波高であり, 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, そして ξ_0 d surf similarity parameter である.

水面から取り込まれる気泡の2次元形状および2次元 移動速度は、シャドーグラフ法および3時刻PTV法を組 み合わせたBTV法により計測を行った(森ら、2006). 実験では、高速度カメラ(1.2K×1K pixel)をバックラ イトの光源と対面するように設置し、計測領域を両者の 間に設定した.バックライトにはハロゲンライトを使用 し、被写体と光源の間に乳白色のアクリル板を設置し直 接光を拡散させた.予備実験としてBTV法による計測領 域内の気泡認識率と2値化の閾値γおよび撮影断面から



表-1 実験条件



気泡までの距離との関係を調べた.この結果から,今回 の実験条件下における閾値 y を0.2 (レンジ0-1)を採 用し,これは奥行き方向の計測領域2~3cm程度に相当 する.

撮影条件は、125fps、シャッタースピード1/1000sで実施し、1回の撮影枚数はそれぞれ3072枚、各測点で2回ずつ繰り返し実施した.計測は岸沖方向鉛直断面水平 11.5cm×鉛直9.3cmを対象とし(空間解像度は90.1 μ m)、 各測点毎に静水面(z=0cm)を中心にした計測面(upper) とこの直下(lower、中心位置:z=-5.75cm)の2領域に ついて砕波帯を岸沖方向にトラバースした.撮影地点と 波高分布の関係は、図-2に示す通りであり、沖から岸に 向かってSt.1→4と表記する.なお、以下での気泡径は 推定した2次元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) 混入気泡の鉛直分布特性

図-3は、ボイド率 a の鉛直分布を示したものであり、 実線はHoqueら (2005)、破線は森ら (2008a)の方法で 近似したものである.また、白抜きのプロットはトラフ レベル以上のボイド率であり、手法の制約上トラフレベ ルを境に精度の信頼性が異なるために区別している.図-3から、静水面以下のボイド率はHoqueら (2005)が示 したように、指数関数的に減少していることがわかる. 減衰係数については、森ら (2008a)は、岸沖方向で変



 図-3 ボイド率の鉛直分布(実線: Hoqueら (2005),破線: 森ら (2008a),白抜き:トラフレベル以上)

化するとしているが,静水面下に着目すると岸沖方向に 一定とするHoqueら(2005)の方法でも,ボイド率の鉛 直分布を表現できると考えられる.

図-4は、平均気泡径の鉛直分布を示し、図中の実線は ボイド率と同様に平均気泡径が指数関数的に減少すると して、式(1)でフィッティングを行った結果である.

$$d_m(x, z) = d_0 \exp(k_0(x)/H_m z)$$
(1)

ここで d_m は平均直径、 d_0 は静水面における平均直径、 k_o は拡散係数、 H_m は平均波高である。図より、平均気泡 径の鉛直分布は、砕波形式および岸沖方向の地点に関係 なく、水深が深くなるほど立ち上がりが急になる傾向が あり、またそのピーク値は岸沖方向に関係なく3mm程度 である。静水面以上の数cmはピーク値(d_p =3mm)を保 っており、静水面以下気泡径は単調減少となっている。 このことから、空気塊の供給源である水面付近では、ま



 図-4 平均気泡径d_mの鉛直分布(白抜き:トラフレベル以上, 実線:式(1))

だ分裂していない気泡が多く存在しており、これがピー ク径*d*,を規定していると考えられる.

(2) 混入気泡の岸沖分布特性

それでは、混入する代表径は何で決まるのであろうか. 図-5に示すのは、時間平均した気泡径分布を示したもの であり、図の横軸は気泡径d、縦軸は単位計測断面積あ たりの気泡数密度である.(a)と(b)共に岸沖方向で 同様の分布傾向を示しており、気泡径が0.3mm b 3mmの 2点でピークを持つ.Caselでは、 $d \le 1$ mmの気泡数は岸 沖方向でほぼ一定であるが、 $d \ge 1$ mmの気泡数は、St.1 からSt.2にかけては波の崩れが徐々に大きくなることに よって増加し、その後汀線方向に向かってJetの着水によ る運動量が小さくなるため、気泡の供給と分裂が抑制さ れ、1mm以上の気泡数が減少している.また、Case2で はSt.2からSt.3で全体的に気泡数が増加、特に $d \ge 1$ mm の気泡数が大幅に増加している.これは、水面からの混 入に加えて第一着水点であるSt.2で混入した大量の空気



塊が分裂しながら移流してきたためであると考えられ る.また、図から気泡径分布は2つのべき乗則に従って いることがわかる.気泡径分布のべき乗則が何に従うの かは、気体の体積を換算する際に重要となる。 今回の実 験結果を見ると、Case1および2ともにHinzeスケール以 下の気泡は、ほぼ-3/2乗則に従っている.一方、Hinze スケール以上の気泡は, - 10/3 乗則を示すのは Case1 の みであり、Case2はより広い範囲が-3/2乗則に従ってい る. これは、Case2はCase1よりも大規模なJetが突入す るため液相のせん断が強く,気泡の分裂が促進され, d=1mm近傍の気泡の割合が多くなるためであると考えら れる.このことから、少なくとも今回の条件における全 空気混入量を推定する際には、Hinzeスケール以下の気 泡が重要であることがわかる. またChanson (1992) に 従い,砕波に対して,Jetの厚さを波高Hに係数をかけて 換算したJet Fr数を求めると(係数を0.05とした),本実 験における Jet Fr数は4.6~5.1となる. 図-5の中の◇は、 鉛直円噴流実験のJet Fr=4.9 (森ら, 2008b)の確率密度



分布を示したものであり、図の凡例付近の200µm以下の データは、測定範囲外のデータである.鉛直円噴流実験 と砕波実験での気泡径分布の形状を比較すると、d> 1mmの形状に大きな違いは見られず,鉛直円噴流実験の 方がやや気泡径の幅が広い程度である.鉛直円噴流実験 の径分布の幅が広いのは、計測領域が水面近傍であり、 分裂途中の気泡が計測されていることが影響していると 考えられる.砕波実験では、0.3mm付近と3mm付近でピ ークが2つ存在し,森ら(2008b)の実験に比べ,より広 い範囲が-3/2則に従うような形状であるのに加え、d≤ 1mmの気泡数の割合が多い.これは、Hinzeスケール以 上の気泡とそれ以下の気泡の生成機構の違いに起因して いると考えられる. Hinze スケール以上の気泡は、主に 空気塊や大きな気泡が液相のせん断によって分裂するこ とで生成され、これ以下の気泡は、主にJetが瞬間的に水 面を叩く際に生じ,このため,落水実験のように定常的 にJetが突入するような条件では、Hinzeスケール以下の 気泡が生成されにくく、気泡径分布に図-5のような違い が見られるようになると考えられる.

図-6に示すのは、Case 2-St.4で計測された気泡径分布 の時間変化である. 横軸は無次元時刻 t/T, 縦軸は気泡径 dであり、濃淡は気泡数#の密度(単位:#/mm²,実線 は平均気泡径を表している.図より、mmスケールの気 泡は、波峰前面でピークを示すことが多く、遅れて um スケールの気泡がピークを示しており、その存在時間も 長い、これは、波の前面に水面から取り込まれた気泡や 沖から移流してくるmmスケールの気泡が多数存在して いるためであり, mmスケールの気泡が岸側に向かって 移流した後は、大きな気泡塊や水面から分裂したµmス ケールの気泡が長時間滞留するため、ピークに時間差が 生じると考えられる.このような微細気泡は、単位体積 当たりの界面積が広く,存在時間が長いことから気体の 溶解を考える上で重要な役割を果たす. upper領域では, mmスケールの気泡は、波の周期の前半でピークを示し、 これより遅れてµmスケールの気泡がピークを示す.こ れは、波の前面に水面から取り込まれた空気塊や分裂し ていない気泡が多数存在しており、その後、Jetの突入に よって生成された渦に捕捉されたµmスケールの気泡が 水面や沖から移流してくるためであると考えられる.図-5で述べたように、Hinzeスケール以下の微細気泡は水面 で生成されるが、本実験では計測方法の制限から微細気 泡の生成過程を捉えることは出来ていない. 一方, lower 領域では1mm以下の気泡数が多く、浮力が小さいために その存在時間が長く、ほぼ一周期に渡り存在している. 塩類が増加するとd≤1mmの微細気泡が増加するため、 この部分の評価は難しい. 図には示さないが, 砕波形式 による違いについては、Caselでは大規模なJetの突入が 無く,除々に気泡が混入するため,lower領域まで混入す るmmスケールの気泡は間欠的に深く混入し、長時間滞 在していた、一方で、Case2では第一着水点において Case 1より大規模なJetの着水があり、これによりmmス ケールの気泡が一気に水中深くまで混入するため、Case 1よりはっきりとピークを持つ.以上のように砕波帯に おける気泡径は時間変動し、場所によっては2倍程度の 増減することがわかった.

図-6の約1mmを境に見られた異なる振る舞いはHinze スケールと関連していることが考えられる(Garrettら, 2000).そこでBattjesら(1978)の砕波帯におけるエネ ルギー散逸率の鉛直平均値を用いてHinzeスケールを考 えてみる.図-7は、この方法で求めたエネルギー散逸率 (ε)とトラフレベルでの平均気泡径の関係を示したもの であり、図からエネルギー散逸率と平均気泡径は、相関 関係があることがわかる.このことから、波高および海 底地形からエネルギー散逸率を通して気泡径の分布勾配 やボイド率を推定することが可能であると考えられる.

これまでの研究は (Coxら, 2003;森ら, 2008a), 砕





 図-8 気泡速度および気泡の乱れエネルギーの岸沖分布
(○:水平速度µ_m[m/s],□:鉛直速度ω_m[m/s],△: 乱れエネルギー*TKE*[m²/s²])

波帯における液相の乱れとボイド率との間には相関が見 られることを示しており、気泡特性と気泡周辺の流況が 密接に関係していることを明らかにしている.図-8に示 すのは、乱れエネルギー $TKE[m^2/s^2]$ と時間平均した水 平速度 $\mu_m[m/s]$ と鉛直速度 $\omega_m[m/s]$ の岸沖分布を示した ものである.ここで、気泡速度は静水面上1cmから静水 面下1cmの範囲の速度を用い、乱れエネルギーTKEは、 波動成分を取り除いた変動成分の2乗和として定義する.

図に示すように、気泡の乱れエネルギーは砕波形式に より分布が異なる.砕波形式がspillingであるCaselは、 沖から除々に水平方向の気泡速度と共に乱れが減少して いる.一方、Case2では着水点であるSt.2で乱れが急激に 増加し、その後岸に向かって乱れが単調減少している. 特に、気泡の鉛直速度の標準偏差が増加していることか ら、Jetの突入によって鉛直方向の乱れが増大しているこ とがわかる.静水面付近の浮上気泡は、鉛直方向にほぼ 一定の速度で浮上するため、鉛直方向の乱れが減少し、 乱れエネルギーはピークを示した後、岸に近づくにつれ て減少する傾向を持つと考えられる.

4. 結論

本研究では、砕波帯における気泡の特性を把握するた め、造波水槽を用いた可視化実験を行い、砕波帯におけ る混入気泡特性について検討を行った。得られた結果は 以下の通りである.

- (1)時間平均した気泡径分布の形状は岸沖方向で変化せず、2つのべき乗則に従い、Hinze scaleを境にそれぞれ ピークを持つ.
- (2) ボイド率および平均気泡径は,鉛直方向に指数関数 的に減少する.
- (3) 波高減衰から求めたエネルギー散逸率と平均気泡径 との間には相関が見られる.

謝辞:本研究の成果の一部は,科学研究費補助金によるものである.

参考文献

- 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.
- 森 信人・中川智史・角野昇八(2008a):砕波帯における混 入気泡特性の時空間変化,海岸工学論文集,第55巻,pp. 66-70.
- 森 信人・松尾祐典・加島寛章(2008b):水面に突入する円 噴流に伴う混入気泡の特性,海岸工学論文集,第55巻, pp. 71-75.
- Battjes, J.A. and J. Janssen (1978): Energy loss and setup due to breaking of rartdom waves, Proc. 16th Int. Coastal Engineering Conf., pp.569-578.
- Chanson, H. (1996): Air bubble entrainment in free-surface urbulent shear flows, Academic Press, 200p.
- 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. and M.D. Stokes (2002): Scale dependence of bubble creation mechanisms in breaking waves, Nature, Vol. 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, Vol.30, pp.2163-2171.
- 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., 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 (2008): Aeration and bubbles in the surf zone, in Hand book of Coastal and Ocean Engineering, Ed. Young C. Kim, World Scientific Pub. Co., 20p. (in press)