

II-30

落水による気泡混入のメカニズム

北海道大学工学部 ○学生員 大塚 淳一
 北海道大学工学研究科 正 員 渡部 靖憲
 北海道大学工学研究科 フェロー 佐伯 浩

1. はじめに

砕波時においてジェットの着水によって大量の気泡が流体内に混入される。特に巻き波砕波では、スプラッシュの度に同時に生成される大規模渦に巻き込まれ複雑に相互干渉しながら運動する。混入された気泡はその浮力により流体運動に大きく寄与するだけでなく大規模渦の影響も受け底質を浮遊させることが現地観測により確認されている（灘岡ら，1987）。しかしながら気泡の砕波時の流体運動に与える影響が指摘されていながら混入気泡量，気泡径，気泡速度など基本的な気泡生成メカニズムに関する報告はほとんどない。本研究はこうした問題を解明する基礎研究として，静水中に円形パイプから定常流を流下させ生成される気泡の物理特性及び運動特性を明らかにしようとするものである。気泡速度を調べることは，現象が二相流となるため非常に難しい問題であるが，渡部ら（1996）の動画像処理法をさらに高精度に拡張し，ビデオ画像から算定した。また，同様なビデオ解析から気泡生成メカニズム，ボイド率特性を評価している。

2. 実験装置と実験条件

実験は図-1に示すように延長2.4m幅60cmの二次元水槽で行われた。二次元水槽上部に水位変化のない円形パイプを接続したタンクを設置し水頭差を一定に保つことにより落水による流速を一定に保つようにした。本実験では水頭差5.3cmの単一条件とした。側方に設置した毎秒250コマ撮影可能な高速ビデオカメラにより落水地点に見られるくさび形状，及び落水により発生した気泡の状態の撮影を行った。このビデオ画像を320×240画素の256色グレイスケールにデジタル化し平滑フィルターを前処理として解析を行った。また気泡を混入しない状態での流速の測定には3次元超音波流速計を使用した。

気泡の混入しない状態での流速の測定では，流速計のprobeの性質上深さ方向(z)については静水面から4cmの地点から計測を始め，タンクに接続された円形パイプは内径が1.0mmのものを使用した。円形パイプを水槽中央(側壁から30cm)に設置しそこを原点として，深さ方向(z)は4cm間隔で測定し，x方向，y方向については流速変化の大きい原点から2cmの距離までは0.5cm間隔と細かく測定し，原点から2cm～5cmは1cm間隔，5cm～2.9cmまでは4cm間隔，それ以降は8cm間隔とし，x方向については原点から8.5cmまで測定した。くさび形状及び気泡の撮影においては円形パイプを内径が4mm，8mm，1.0mmの3ケース用意し，更にそれぞれ二次元水槽静水面から円形パイプ出口までの距離を0cm，1cm，5cmの3段階に変えて高速ビデオカメラを使用し毎秒250コマで撮影を行った。

ここで得られた画像から気泡の速度を決定する画像処理方法は以下の通りである。各画素の濃度fを使って相関関数Cを計算する。

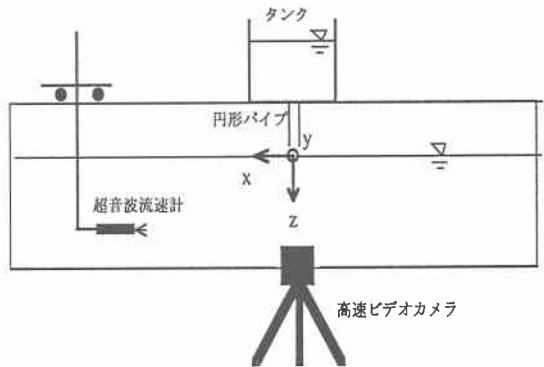


図-1 実験装置

Mechanism of the entrained air bubbles and contributions to fluid motion

by Junichi Otsuka Yasunori Watanabe Hiroshi Saeki

$$C(x+x', t+t') = \frac{\int f(x, t) f(x+x', t+t') dt}{\sqrt{\int \{f(x, t)\}^2 dt \int \{f(x+x', t+t')\}^2 dt}}$$

離散化すると

$$C(i+l, j+m, t+n) = \frac{\sum_{s=t-a}^{s=t+a} f(i, j, s) f(i+l, j+m, s+n)}{\sqrt{\sum_{s=t-a}^{s=t+a} f(i, j, s)^2 \sum_{s=t-a}^{s=t+a} f(i+l, j+m, s+n)^2}}$$

2式が最大となるラグタイム n を使い

$$u = \frac{\Delta x}{n}$$

として流速を評価する。

それぞれの Δt 間の値はスプライン関数によって補間し最適の $\Delta t'$ を使い

$$u = \frac{\Delta x}{t'_{\max}}$$

により計算する。

今回の処理では近隣の多くの画素に対する相関をとりその時の t'_{\max} と Δx を情報として出来るだけ多くとり最小二乗法により気泡の速度が決定される。

3. 結果

3. 1 無気泡状態の流速分布

本実験を行った水槽は二次元造波水路であり縦横比が異なることから、水槽特性を調べるために準備的に無気泡状態の流速分布を調べる必要がある。流速測定は水頭差 5.3 cm、内径 10 mm のパイプの先端を静水位と一致させ気泡の生成されない条件で縦横方向に流速を計測した。図-2 は鉛直流速 (w) と側壁へ向かう流速 (v) の水槽横断方向流速分布を示したものである。水面下 4 cm におけるパイプ直下の流速は約 195 cm/s であり、ベルヌイ式から求めた静水位における流速 228 cm/s と比べ流体抵抗を考えればほぼ妥当な値といえる。流入した運動量は水槽底部にぶつかり軸対称に底層部を側壁方向に進み側壁を伝って水表面近傍まで上昇しプルーム位置に戻るという循環流が発生しているのがわかる。一方縦横分布は同様にプルーム直下の底部で軸方向流速が発生するが上昇流及びプルーム位置に戻る方向の流速が明確ではないが、この循環流自体流速 7 cm 以下の鉛直流速と比べて非常に小さなものであり、鉛直流速はほぼ同様な分布が得られた。これより、ほぼ軸対称のプルーム下の実験として議論を進めていく。

3. 2 気泡の到達深と気泡分布

落下する水流と水表面とにおいて混入する気泡は様々な大きさをもっており、混入時の気泡の大きさに依って運動特性は大きく異なる。本実験条件における気泡径 r 、気泡数 N は以下のパラメータで決定されていると考えられる。

$$(r, N) = f(U, k, R, c)$$

ここで U ; 流入時の水流表層流速, k ; 乱れエネルギー, R ; 流入水流の断面積, c ; 表面張力
初期気泡径の大きなものはある位置においてプルームによる抗力より浮力が大きくなり上昇するが、微小気泡は上昇するための抗力より十分大きい浮力がないためいつまでも浮上できない。この限界値を知ることが気泡運動の一特性を示すものと考えられる。図-3は、上昇する気泡の到達深とパイプの先端と水面の距離 $h d$ との関係を表したものの一例である。(パイプ内径 8 mm) $h d$ は U, k, R を変化させること

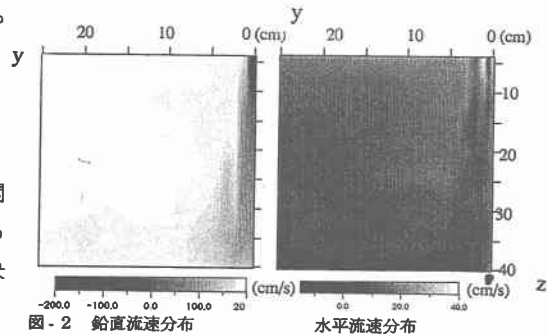


図-2 鉛直流速分布 水平流速分布

に対応する。h dがある程度大きくなると気泡の到達深は減少し、ある一定の到達深でほぼ変化がなくなる。他のケースでは到達深の変化率は異なるが定性的には同様の傾向を示した。h dを大きくすることによって気泡径が増大するが、ある程度の大きさ以上の気泡は表面張力との関係で安定してその大きさを維持できないため到達深の変化がなくなると考えられる。

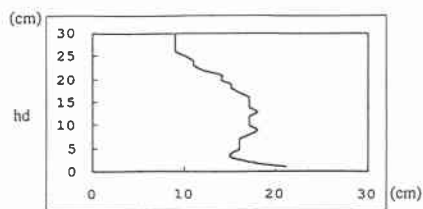


図-3 気泡到達深と h d の関数

図-4 は、前図と同一パイプを用いた h d = 1 c m のケースにおける 2 値化されたビデオ画像から気泡中心座標を読みとり、30 フレームに渡って平均をとった 1 c m² メッシュ内の (a) 気泡数、(b) ボイド率 (c) 平均断面積の一例を示している。気泡数は水表面付近で最も多く下降するに従って現象する。ボイド率に関しては水表面近傍以外に約 20 c m 前後の位置において高い値を示している。これは前図の気泡到達深に対応する

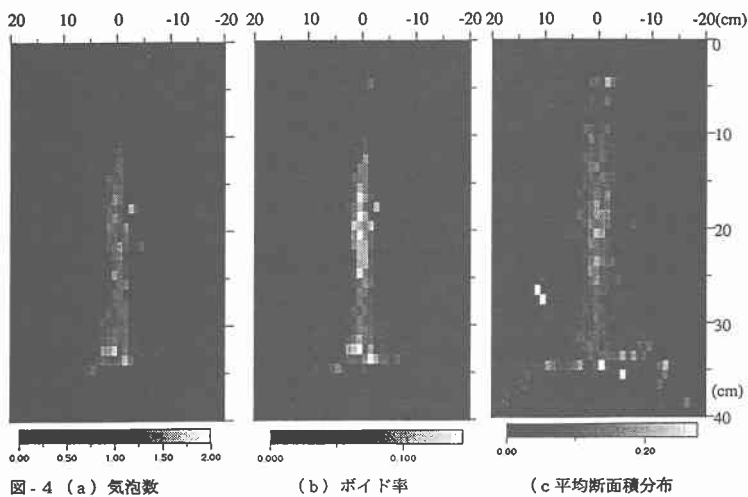


図-4 (a) 気泡数

(b) ボイド率

(c) 平均断面積分布

値であり、比較的大きな径の気泡が低速で通過するからと考えられる。またこの位置における平均気泡径は約 0.225 c m であった。単純に球形気泡を仮定して抗力 $F = \frac{\rho}{2} C_D D U^2 - V(U - V)$ と浮力が釣り合うとすると流速 $U = 137.8$ c m / s となり本実験とは適合しない。この結果は気泡形状及び気泡量が流体運動に大きく影響していることを意味する。

3.3 気泡生成機構

前述したように気泡量、気泡径は流体運動に大きな影響を与えるためその評価は重要である。まずは気泡の生成メカニズムを解明する必要がある。図-5 は水 flowing 着水点の拡大画像を示す。この時のパイプ内径は 10 m m, h d = 5 c m である。着水点と水表面間にくさび状のくぼみが存在していることが確認できる。この点において流入運動量、それによって変化した圧力そして表面張力でバランスし、流入水流とくぼみの極小さな隙間における水表面の不安定さあるいは水流の乱れから間隔が微妙に振動し気泡を生成していることがわかる。

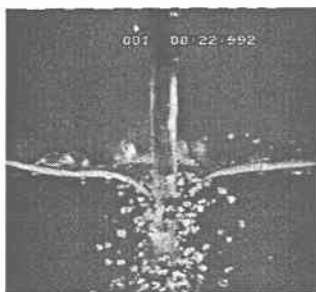


図-5 気泡生成の様子(r=10mm,hd=5cm)

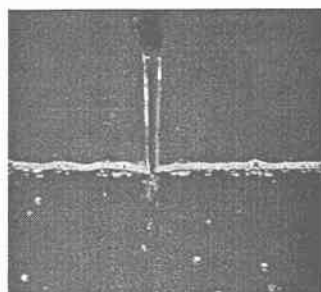


図-6 気泡生成の様子(r=8mm,hd=5cm)

図-6 は内径 8 m m のパイプ、h d = 5 c m の条件における同様な図である。小規模ながら同様なくぼみが生成されている。また、このケースでは画像からわかるように生成される気泡径が前図と比べて小さい。流体内に界面活性剤を混入させるとくぼみが十分に発達せず気泡が全く生成されない、あるいは微細な気泡が発生するという結果も得ている。このくさび形状が気泡量、気泡径を決定しているという

ことができる.表1は各ケースに対応する実測したくさび形状を示す.

3.4 気泡速度

現実的に大量に混入する気泡速度を物理的手法により測定することは困難であるため気泡速度計測のため動画像処理を適用した.画像ノイズのため定量的値を得ることは困難であるがサンプルデータを可能なだけ集め処理する本処理法によりかなり信頼できる計測が可能になった.

図-7は球形白色粘土を水中に落下させたときの速度分布を示したものである.粘土の軌道に沿ってそれぞれ水平,鉛直速度が示されている.これに対して図-8はビデオ画像から粘土の中心座標をプロットしたものであり,両図は対応している.図-9は横軸をz座標にした時の水平,鉛直流速を示している.鉛直流速の平均値は約42.36 cm/sであり,ほぼ画像処理結果の値と妥当であるといえる.

図-10は内径10mmのパイプでhd≒0の動画像処理結果を示したものである.このケースでは細かな気泡が水槽底部まで到達するが,中心軸に沿って気泡が流下し底部にぶつかり軸対称に広がり上昇の様子が確認できる.

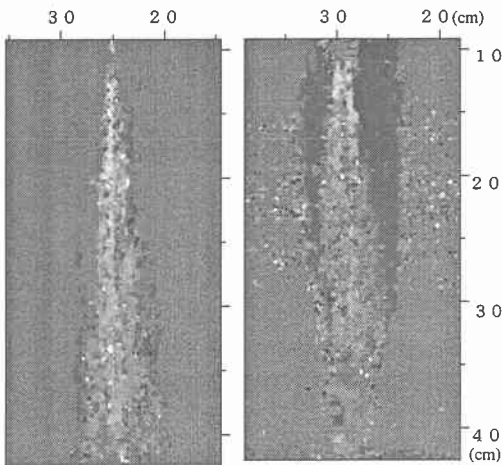


図-10 鉛直気泡速度分布
(r=10mm,hd=0)

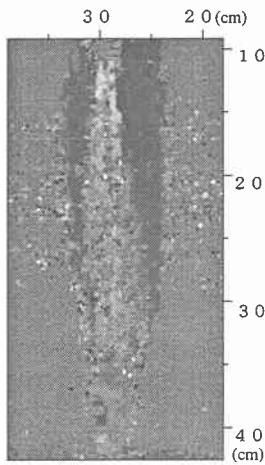


図-11 鉛直気泡速度分布
(r=10mm,hd=1cm)

表-1 くさび形状

内径 (mm)	hd (cm)	γ (cm)	δ (cm)
10	5	2.579	1.071
10	1	2.579	0.973
10	0	1.314	0.584
8	5	1.066	0.305
8	1	0.609	0.254

(γ :くさび半径 δ :くさび深さ)

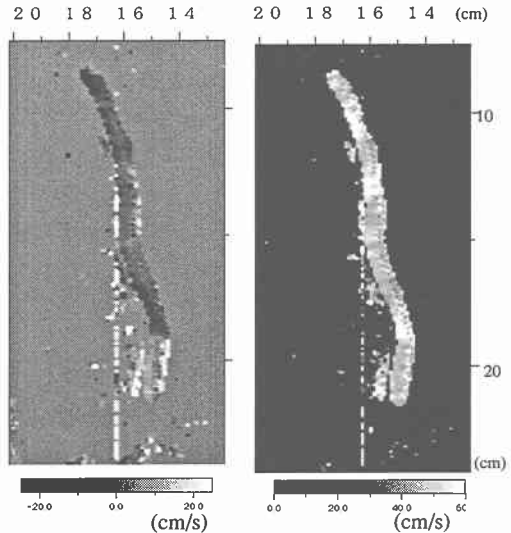


図-7 動画像処理による (左) 水平速度 (右) 鉛直速度

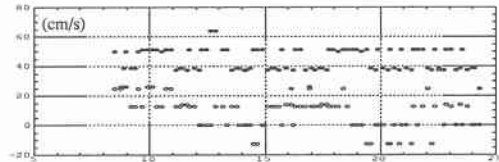


図-9 z軸に対する粘土の速度 (cm)

図-11は内径10mmのパイプでhd=1cmの結果である.気泡径が大きくなり浮力が增大するため浮上する水深が浅くなり上昇速度も前図と比べてかなり速くなる.

今後気泡量,気泡径と乱れの関係,流体運動への寄与を詳細に調べる予定である.

4. 結論

静水中に混入する気泡の生成メカニズム,気泡径,気泡量の特性を調べた.動画像処理により種々の気泡条件における気泡速度特性を明らかにした.