

II-15

ジェット下の混入気泡に関する実験的研究

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

砕波ジェットの水塊が着水する際、数十 μm ～数 cm にわたる非常に幅広いレンジの気泡が大量に混入される。これら混入された気泡による浮力及び抗力は流体運動に大きな影響を与えるだけでなく、大規模渦の影響によって底質を浮遊させることが確認されている。しかしながら、砕波時、特にジェット着水時における気泡生成機構が未解明のため、その生成気泡数及び気泡径を知ることは困難である。また、気泡の速度及び気泡存在時の流速の計測は困難であり、定量的な流体への寄与は未解明である。

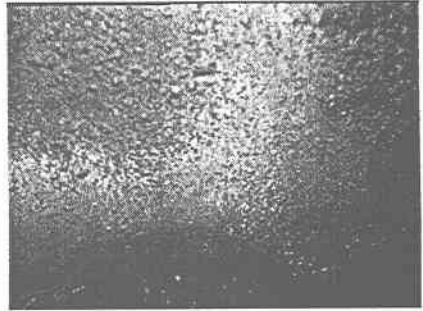


図-1 砕波帯内での気泡の様子

本研究は砕波の着水時の気泡の生成機構及び砕波帯内の混入気泡の影響を解明するための基礎的実験として、空間的流速変動の大きい流速場全体を同一時刻で測定するのに有効なPIVを時空間画素情報を流況に応じて変化させることが可能な動画像処理法によって、自由落水及び落水水塊による気泡生成・運動機構及び気泡存在時の流体運動機構を実験的に解明しようとするものである。

2. 実験装置と実験条件

実験は長さ24m、幅0.6m、深さ1mの二次元水槽(本水槽)で行われた。本水槽上部に固定された貯水水槽に内径(R)16mm,10mm,8mm,4mmのパイプを鉛直下向きに設置しそのパイプから本水槽の自由水面へ水を自由落下させた。本水槽と貯水水槽の水頭差は全ての実験を通して53cmとし、落水による流速を一定に保つようにした。パイプの下端から本水槽の水面までの距離 h_d はパイプを側方から支持するポイントゲージによって自由に変えることが可能である。実験条件は表-1に示される。

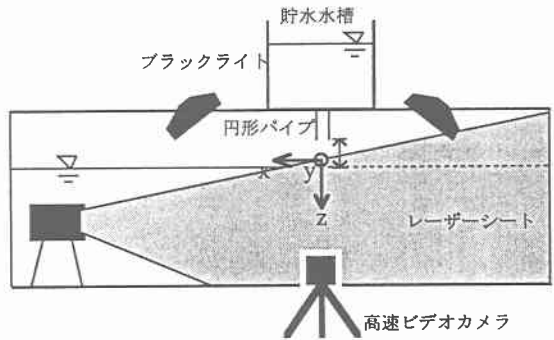


図-2 実験装置

無気泡状態($h_d=0\text{mm}$)の流速は三次元式超音波流速計によって計測されました。気泡の速度及び気泡が存在する時の流速計測では本水槽側方に設置された毎秒250コマ撮影可能な高速ビ

	R(mm)	h_d (mm)		R(mm)	h_d (mm)		R(mm)	h_d (mm)		R(mm)	h_d (mm)
case1	16	52	case5	10	52	case9	8	52	case13	4	52
case2	16	12	case6	10	12	case10	8	12	case14	4	12
case3	16	2	case7	10	2	case11	8	2	case15	4	2
case4	16	0	case8	10	0	case12	8	0	case16	4	0

表-1 実験条件

Experimental study on bubbles entrained by jets
 Junichi Otsuka and Yasunori Watanabe and Hiroshi Saeki

デオカメラで撮影された画像をPIV法によって解析されました。なお気泡が存在する時の流速計測では気泡と水粒子を区別するために貯水水槽内に混合された蛍光塗料で着色した中立粒子（比重1.03, 直径1.5mm）を落水と共に落下させ実験室を十分暗い状態にして本水槽側方及び上部からブラックライトを照射することによって気泡は全く写らずに中立粒子の動きのみをビデオ画像にとらえることができる。

水塊の落下実験は500ccの水が注入された球形のゴム風船を破裂させ、本水槽の水面に水塊として落下させその時生成される気泡の速度を計測した。風船と水面までの距離は貯水水槽の水面から本水槽の水面までの高さと同じ53cm、そして52mm, 12mm, 2mmの4ケースについて行った。

全てのケースにおいて本水槽縦断面中央にレーザーシート光（厚さ約3mm）を照射し気泡の速度及び気泡が存在する状態での水粒子の速度について3次元解析を行った。

3. 画像処理法(PIV)

本研究ではより多くの時空間的なピクセル情報を使用することで流速変動の大きい速度場の動画画像解析を行った。ビデオ画像は320×240ピクセルの256色グレイスケールにデジタル変換され平滑化フィルターがかけられる。さらに前処理として二次元FFTによるハイパスフィルターがかけられバックグラウンドの影響を大幅に削減している。

ピクセル座標値(i,j)におけるピクセル濃度の時系列f(i,j,t)を用いた時空間相関は

$$C(i+l, j+m, t+n) = \frac{\sum_{s=l-a}^{s+l+a} f(i, j, s) f(i+l, j+m, s+n)}{\sqrt{\sum_{s=l-a}^{s+l+a} f(i, j, s)^2 \sum_{s=l-a}^{s+l+a} f(i+l, j+m, s+n)^2}} \quad (1)$$

と書くことができる。

(i = Δx, 2Δx ···, j = Δy, 2Δy ···, t = Δt, 2Δt ···)

ここでaは非定常問題において局所定常性を仮定する時間。式(1)により(i,j)と(i+l,j+m)間のそれぞれの離散時刻t+nにおける濃度相関が得られる。この濃度相関は時刻に対して滑らかに分布する関数と仮定できるので、各時刻の離散相関値を3次スプライン関数で補間し、相関が最大となる時刻t+t'を計算する。画像ピクセルが離散値であるため次のような補正をする。真の速度(u,v)とピクセル間隔(l,m)及びt'間には次の関係がある。

$$t' = \alpha l + \beta m \quad (2)$$

ここで

$$\alpha = \frac{u}{u^2 + v^2}, \quad \beta = \frac{v}{u^2 + v^2} \quad (3)$$

式(2)をα,βについてピクセル間隔 -L ≤ l ≤ L, -M ≤ m ≤ M にわたって最小二乗法を適用すれば次の関係が得られる (L及びMは速度勾配の大きな速度場に対して大きな値を設定すると、より多くの情報が得られる)

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{l,m} m^2 \sum_{l,m} l'^2 - \sum_{l,m} l m \sum_{l,m} l' m \\ -\sum_{l,m} l m \sum_{l,m} l'^2 + \sum_{l,m} l^2 \sum_{l,m} l' m \end{pmatrix} / \left(\sum_{l,m} l^2 \sum_{l,m} m^2 - \left(\sum_{l,m} l m \right)^2 \right) \quad (4)$$

式(4)によって式(2)から流速を評価することができる。なお、式(4)には相関がしきい値(本計算では0.7)以上のデータのみが与えられる。局所定常時間a及び計算点からの最大相対空間座標(L, M)を問題に応じて設定することで種々の流れ場に適した解析が行われる。得られた速度は明らかにノイズの影響と考えられるu < -100cm/s, u > 200cm/sのデータは除去され周囲のデータから補完され平滑フィルターがかけられる。

4.1 レーザーシートを用いた気泡速度計測

レーザーシートを用いて碎波帯のような気泡混入流体場を可視化する方法は、気泡の重なるの影響を低減するのに非常に有効な方法である。今回の実験のようにパイプからの落水実験におけるジェット着水軸近傍をレーザーシートで断面を切らずに本水槽側方から撮影した場合、鉛直下向きに流下する気泡とジェットの流体抵抗と釣り合った後上昇する気泡とを同時に捉えてしまう。著者らは(1999)このような気泡速度場及び速度場

を時空間画素情報を流況に応じて変化させることが可能なPIV法を用いて気泡の重なるの影響を低減することによって、その流速の計測が可能であることを示した。

図-3はCASE6におけるレーザーシートにより断面を取らない場合の気泡速度計測結果である。ジェット着水軸では鉛直下方に気泡が流下しその側方で浮力により上昇する気泡の様子がはっきりと示されている。図-4と定性的に似た分布をしており生成された気泡が拡散しながら下方に移流されている様子が表されているが、明確着水軸側方の気泡の上昇運動が見られない。レーザー光及び白熱灯の気泡からの反射の特性の違いからこの計測結果の違いが現れている可能性があり今後調べる必要がある。また、レーザーシートで断面を切った場合、シート内を通過する気泡の数はレーザーシートを用いずに撮影された場合よりもかなり少なくなる。このため多くの粒子を必要とするPIV法ではやはり高い相関が得られなかったためこのような結果となった可能性も考えられる。

図-5は気泡数が少なくなった画像を解析して得られた気泡速度の結果の一例である(CASE7)。

このケースでは $h_0=2\text{mm}$ という条件のため生成される気泡径、気泡数は他の同径パイプと比べて圧倒的に小さく、この流体場をレーザーシートで断面を切った場合は明らかに十分な相関が得られないため欠測データの多い結果となった。気泡数が少ない場合でも気泡がシートの上を常に移動すれば十分結果が得られるはずであるが、不安定な気泡の動きのためシート断面をよぎる運動をしている可能性があり、3次元的な気泡運動を捉える手法が必要であることを示唆している可能性もある。

4.2 混入気泡の面積計測

気泡が流体へ与える影響を調べる上で気泡数、気泡径、ボイド率を調べることは非常に重要なことである。しかし、これらの値を調べるには個々の気泡について計測される必要があり、著者ら(1999)が行っ

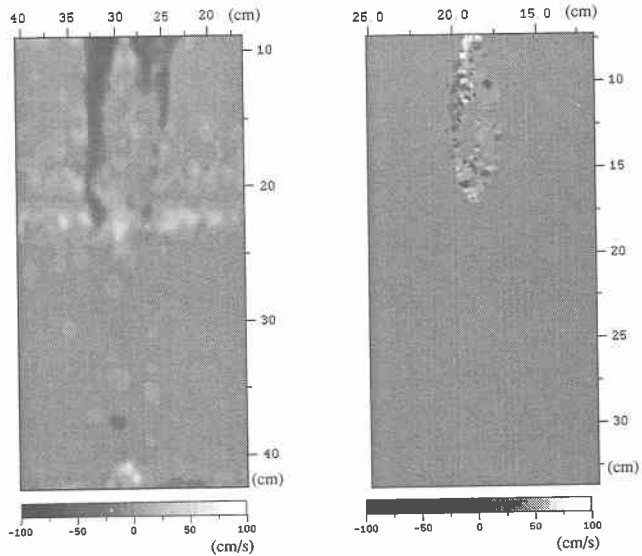


図-3 CASE6におけるレーザーシートを用いない時の鉛直気泡速度分布

図-4 CASE6におけるレーザーシートを用いた時の鉛直気泡速度分布

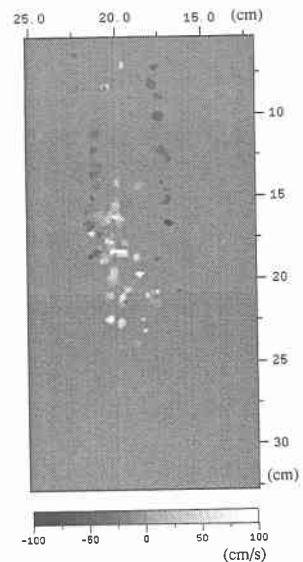


図-5 CASE7におけるレーザーシートを用いた時の鉛直気泡速度分布

た方法では気泡の重なりの影響のため精度が十分であるとは言えない。本研究ではレーザーシートを用いて気泡の重なりの影響がほとんど無い状態で実験を行った。

図-6はCASE10における混入気泡の面積を計測した際の画像の一枚である。このような画像30フレームから求めた面積の平均は31.839 cm²であった。このケースでは、ジェット着水軸付近では個々の気泡を区別することができなかつたため全体の面積しか計測できなかった。これは、気泡径に依存してレーザー光の散乱が異なることに起因していると考えられる。更なる実験方法の確立が必要である。

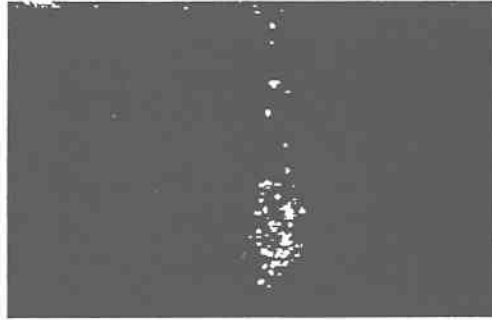


図-6 CASE10における混入気泡の面積計測で用いた画像の一例

4.3 水塊の落下実験

砕波ジェットの突入のような非正常な水塊の落下に伴う気泡の生成機構の特性を調べるため、ゴム風船に500ccの水を入れそれを高さ53cmの位置(貯水水槽と本水槽の水頭差)で破裂させ自由水面に落下させたときの鉛直気泡速度である。水塊はほぼその大きさを保ちながら突入している様子が分かる。気泡の到達深と速い気泡上昇速度から考えると比較的大きな径の気泡が存在していると考えられる。今後更に詳細な調査をする予定である。

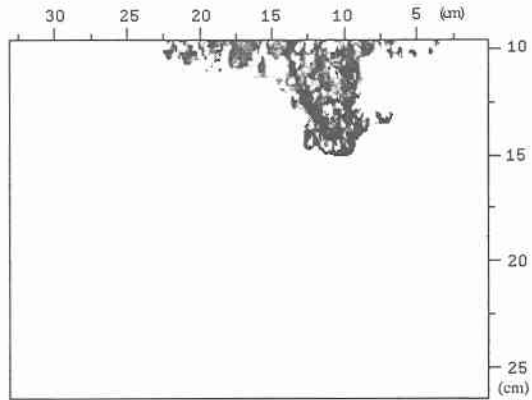


図-7 水塊落下実験による鉛直気泡速度分布

5. 結論

気泡混入帯をレーザーシートを用いることによって気泡の重なりが少ない状態での気泡速度、気泡面積を求めた。PIVでは多くの粒子を必要とするためパイプ内径、 h_0 が小さく気泡数

が少ない条件では高い相関が得られず良い結果が得られなかった。水塊の落下実験では水塊は突入後それほど大きさを変えず、また生成される気泡は比較的大きなものが多いと考えられる。気泡径とレーザー光の関係及び気泡運動の3次元性を含め、気泡速度及び流速の計測手法を確立する必要がある。