

気泡プルームを含む開水路流れの乱流構造

TURBULENCE STRUCTURE OF OPEN-CHANNEL FLOWS INCLUDING BUBBLE PLUMES

山上路生¹・瀬津家久²

Michio SANJOU and Iehisa NEZU

¹正会員 博(工) 京都大学大学院助手 社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 社会基盤工学専攻 (同上)

The aim of the present study is to reveal the hydrodynamic properties in open-channel flows including the rising-bubbles. Particularly, when we consider effective control techniques of aeration in actual rivers, turbulence structure of open-channel flows including bubble plumes has to be investigated. However, such a bubbly open-channel flow has very complicated phenomena, and thus there are few previous studies that have been tried by high-accurate measurements and numerical simulations.

Therefore, in this study, PIV measurements using high-speed CCD camera have been conducted, and consequently, the rising-lines of bubble plumes, primary velocity distributions and turbulence structure have been revealed experimentally.

Key Words : Bubble plume, Open-channel flows, Turbulence, PIV measurements

1. はじめに

気泡を含む気液混相流は様々な工学分野で扱われる重要な流れ場である。特に水工学では、気泡プルームによる貯水池のエアレーションや実河川の塩水遡上防止といった様々な応用が試みられており、気泡流の基礎水理特性の解明を目的とした多くの既往研究がある。

例えば、浅枝・Imberger(1989)¹⁾は密度が鉛直方向に線形分布する塩水静水場における気泡噴流の水理実験を行い、成層中の気泡プルームの水理特性やプルームによる成層破壊のエネルギー効率を明らかにした。丹羽ら(1989)²⁾はホットフィルム流速計を用いて路床からの気泡噴入を伴う開水路流れの2次流構造や底面抵抗を計測した。さらに彼らはガラス球とポリスチレン粒子を用いた移動床実験も試み散気量による流砂量の変化を評価した。佐々木ら(1992)³⁾は塩水くさびの遡上防止策として気泡噴流を用いた方法に着目して水理実験を行い、塩水進入速度と散気量の関係を明らかにした。このように水工学において気泡流の研究は精力的に行われてきたが、ホットフィルムやレーザー流速計(LDA)などによる点計測では、気泡運動をラグランジェ的に捉えることが難しいため、微視的な流れ場構造の解明は現段階では不十分な点が多い。

一方で、気泡流れの解明は攪拌や混合プロセスを用いる化学プラント装置や関連技術の向上に大きくつながることから、流体機械工学の分野においても精力的に研究されている。最近では計測技術の改良や進展にともなって気泡流れの特性が画像解析法によって微視スケールまで解明されている。例えば、

村井ら(1999)⁴⁾はPIV計測によって上昇気泡流れに特有の逆エネルギーカスケード現象のメカニズムを考察している。さらに藤原・菱田(2002)⁵⁾は赤外線を用いて管内上昇気泡の形状を正確に画像認識し、気泡の近傍領域における流速を計測している。

しかしながら機械工学分野におけるこれらの研究は静止流体場における鉛直管内の上昇気泡の運動と周囲流体の挙動変化に着目したものであり、流速分布をもつ流れ場、特に開水路流れにおける気泡挙動とそれが流体に及ぼす乱流変調の効果については不明な点が多い。実河川場においてエアレーションやエアカーテンといった気泡技術の効率的なコントロールを実現するには気泡塊を含む開水路流れにおける基礎水理特性を乱れスケールまで解明する必要がある。そこで本研究ではPIVによる画像解析手法を路床からの気泡混入を含む開水路流れに適用し、主に開水路流れにおける気泡運動や乱流構造の変化を実験的に解明する。

2. 実験装置と解析方法

(1) 実験装置

近年、撮影記録装置のデジタル化およびフレームメモリの大容量化にともなって流体の画像解析が様々な流れ場に適用されている。開水路流れにおいても蛇行流⁶⁾、組織乱流⁷⁾、混相流⁸⁾等に適用され、貴重な基礎的知見が得られている。また実河川流の計測も試みられており⁹⁾、¹⁰⁾、その実用性が注目されている。

画像計測はレーザー流速計(LDA)やホットフィルムなどの点計測と異なって、空間上の多点を同時に

表-1 実験条件

case	U_m (cm/s)	h (cm)	Re	Fr	T_b (s)	n_d (mm)
A	10.0	6.0	6000	0.13		2.0
B005	10.0	6.0	6000	0.13	0.05	2.0
B03	10.0	6.0	6000	0.13	0.3	2.0

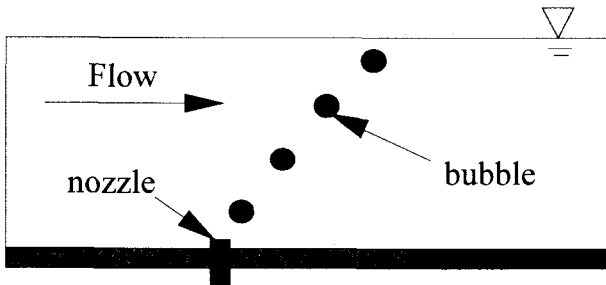


図-1 開水路気泡流れ

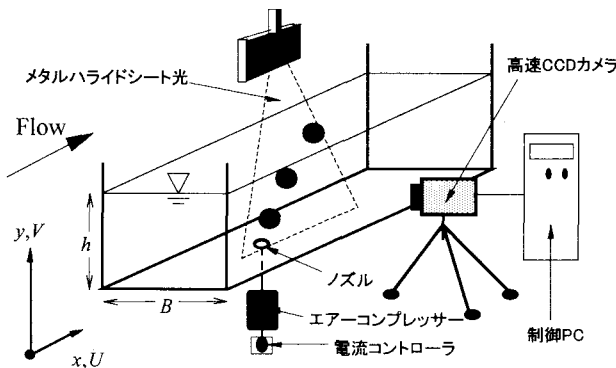


図-2 実験装置

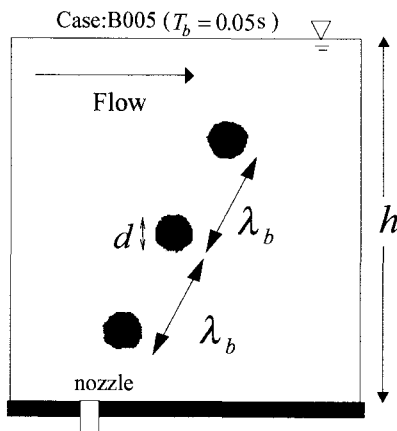


図-3 気泡スケールと位置間隔

時系列計測できる特徴を有しており、組織渦構造や流れの時間空間的特性を解明する上では非常に有用な方法である。

そこで本研究でも画像解析法を、図-1に示す路床から一定の周期で気泡が噴入する気液混相開水路流れに適用した。

図-2に実験装置図を示す。水路は全長9m、全幅30cmの可変勾配型であり、上流から6mの計測領域の側壁はガラス製である。水路床には高さ2cmの亚克力板を敷き、路床部にノズルを埋め込んだ。気泡はエアコンプレッサーで発生させ電流調整器によって発生周期を制御した。またノズルとコンプレッサーの間に逆流防止弁を設けた。光源にはメタルハライド（住田光学製）を用いシリンダリカルレンズによってシート光を水路上方から照射した。水路側壁には高速CCDカメラ（Dalsa製）を設置しシート面上の流れを各ケース100Hzで40秒撮影した。CCDカメラの制御には2GBメモリ搭載のコンピュータ（Dell製）を用いた。撮影画像は一時的にこのコンピュータのメモリに格納された後に画像データとしてハードディスクに保存される。

(2)解析方法

本研究のような気液混相流を画像解析する場合に液相（水）と気相（気泡）を適切に分離する必要がある。気泡形状や輝度分布を考慮してトレーサ粒子と気泡を分離することが可能であるが、本研究では取得画像を2値化して気泡径スケールの明輝度領域を気泡として分離した。本計測ケースにおいては気泡径がトレーサに比べて十分大きく、さらにそのばらつきも小さかったので適切に処理できた。各時刻の気泡位置をその重心で代表させラグランジュ的に追跡することで気泡位置の時間変化を解析した。流速解析は取得画像から気泡部を除いた255階調のモノクロ画像を濃度相関法¹¹⁾によって行った。

(3)実験ケース

表-1に実験ケースを示す。実験は同一のレイノルズ数の下で気泡の発生周期を変えて全3ケース行った。ケースAは気泡を含まない清水流であり、断面平均流速 U_m は10cm/s、水深は6cmである。一方、ケースBはケースAの流れに気泡を混入させた流れである。 T_b は発生周期で、ここでは0.05sおよび0.3sの2通りを設定した。またいずれのケースにおいてもノズル内径は $n_d = 2$ mmとした。図-3はケースB005におけるある時刻の気泡画像を例示したものである。この図に示すように発生間隔の短いケースB005では気泡間の平均距離 λ_b が約1.8cmであるが、気泡の発生間隔が長いケースB03では複数の上昇気泡が同時に存在することはなく、単一気泡の流れ場である。なお気泡の変形はほとんどなく平均等価球形 $\bar{d}$ はいずれのケースにおいて約6mmであった。

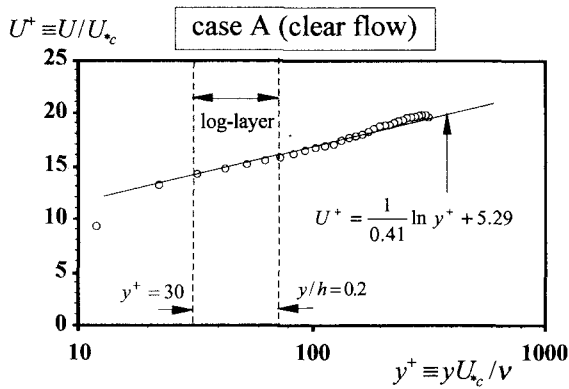


図-4 流速分布（清水）

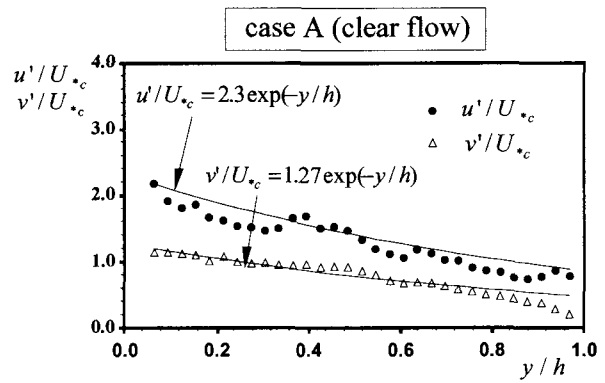


図-5 乱れ強度分布（清水）

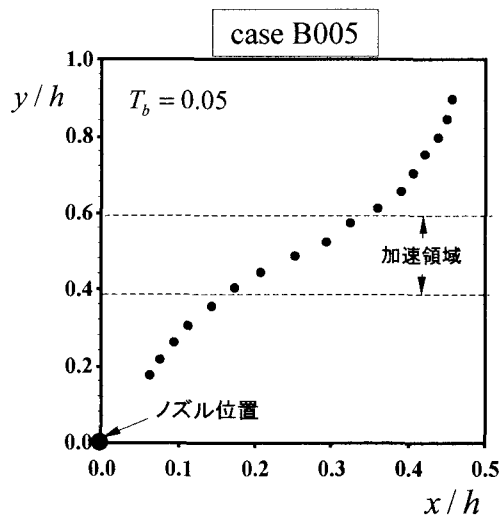


図-6 気泡の上昇軌道

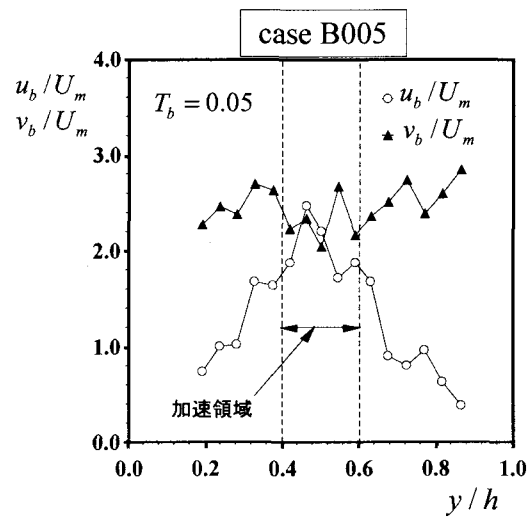


図-7 気泡の移動速度

3. 実験結果と考察

(1) 本計測システムの精度検証

以下の考察のはじめに本PIVシステム計測精度の検証を行う。表-1に示す清水流であるケースAを対象として平均流速と乱れ成分の分布の精度評価を行う。図-4は摩擦速度 U_* で内部変数表示した平均主流速 U/U_* の鉛直分布を示したものである。ここで $U_* = 0.057 \text{ cm}$ であった。図中には対数則も併示した。計測値は対数層 ($y^+ \equiv yU_*/v \geq 30$, $y/h < 0.2$) で対数則と良好に一致することがわかる。一方、図-5は主流方向と鉛直方向の無次元乱れ強度分布を示したものである。図には比較のため以下で表される楠津の普遍関数¹²⁾も記載した。

$$u'/U_* = 2.3 \exp(-y/h) \quad (1)$$

$$v'/U_* = 1.27 \exp(-y/h) \quad (2)$$

実験値はこれらの普遍関数と同様の分布傾向を示している。すなわち乱れは壁面近傍では卓越し、自由

水面に向かって減少する特性が本実験結果からも確認できる。以上のことから本PIVシステムによる乱流計測の有用性が確認できた。

(2) 気泡の挙動

ここでは気泡の上昇軌道を考察する。各気泡の位置は重心に代表させた。すなわち各気泡位置は気泡を構成する画素成分の座標を算術平均して求めた。

図-6はケースB005において任意に抽出した上昇気泡の軌道を示したものである。静水場特有の気泡の躍動現象はみられないが、主流速の存在により気泡は次のような特徴的な運動を行うことがわかった。すなわちノズルから噴出した気泡は主流速の影響で斜め方向に上昇するが、ある鉛直高さから主流方向の移動量が大きくなり、さらに上昇すると主流方向への移動は小さくなる。その結果、気泡の上昇軌道は図に示すように2つの変曲点をもつ。この場合は $y/h = 0.4$ および 0.6 付近に変曲点が存在し、これらの間では気泡の主流方向への移動が卓越する加速領域がみられる。なお単一気泡ケースであるB03においても同様の傾向が観察されており、ボイド率がこのような軌道特性に与える影響は小さいと考えられる。

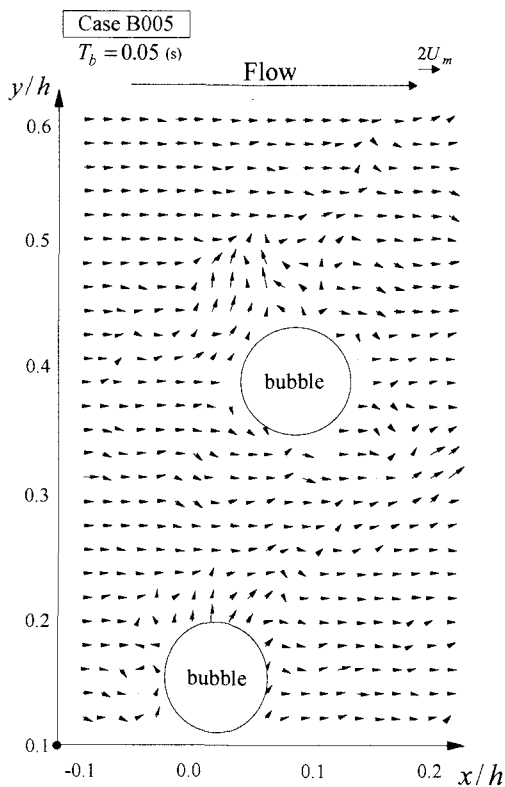


図-8 瞬間ベクトル分布

図-7はこの気泡の鉛直速度 v_b と流下速度 u_b の鉛直方向分布を示したものである。この結果から v_b の変化は u_b の変化に比べて小さいが、 u_b は図-7で示した加速領域で値が増加している。このことから上昇軌道の変曲特性は u_b の影響を受けることがわかる。この u_b の特性は気泡近傍の主流速構造と大きな関係があると思われるが、今後、計測ケースを増やして系統的な考察を行って明らかにしたい。

(3) 開水路気泡流れの主流速構造

本節では上昇気泡が平均主流速に与える影響を考察する。図-8は気泡周辺の領域のある時刻における瞬間ベクトル分布を示したものである。上方からの光シート照射であるが、光源が十分に明るいので気泡下部の水流の速度ベクトルも計測できており、特に水は気泡を障害物としてその周囲を回りこんで流下することがわかる。したがって気泡の軌道近くでは流速分布が大きく変化するとともに激しい乱れが生成されることが予想される。

図-9は無次元主流速 U/U_{*c} の空間分布を示したものである。ここで摩擦速度は清水ケースAの値 U_{*c}

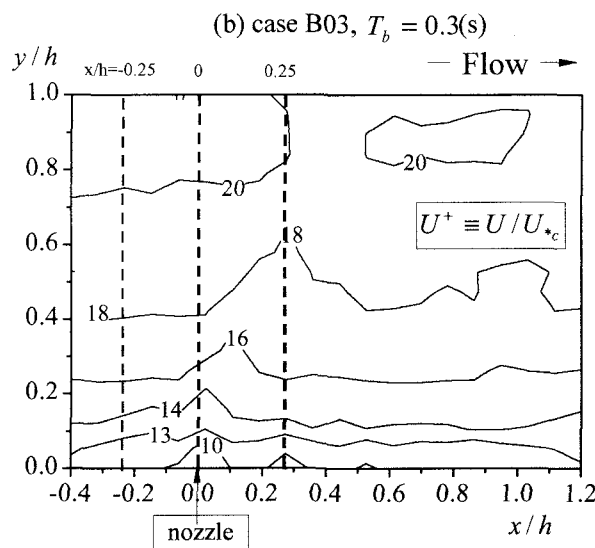
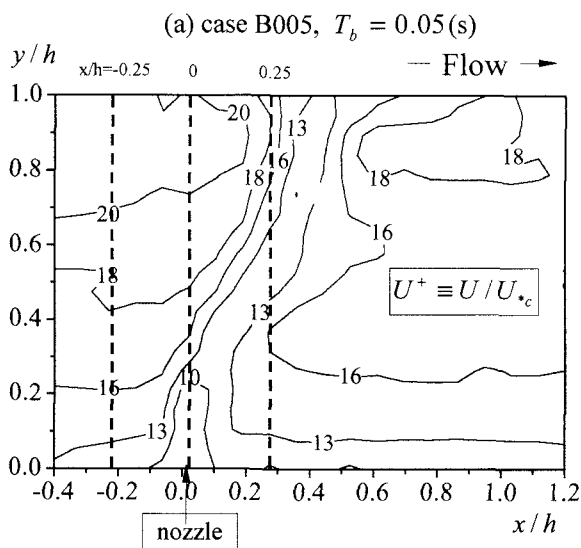


図-9 時間平均主流速の空間分布

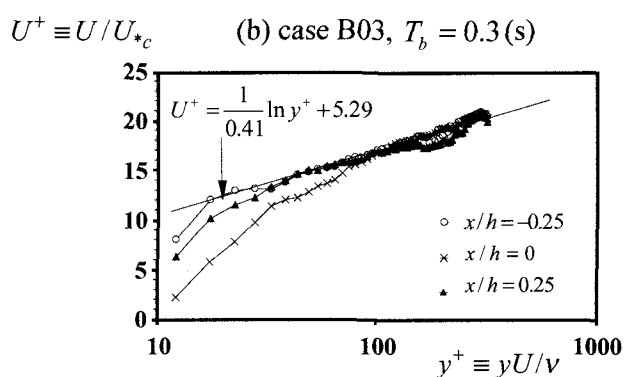
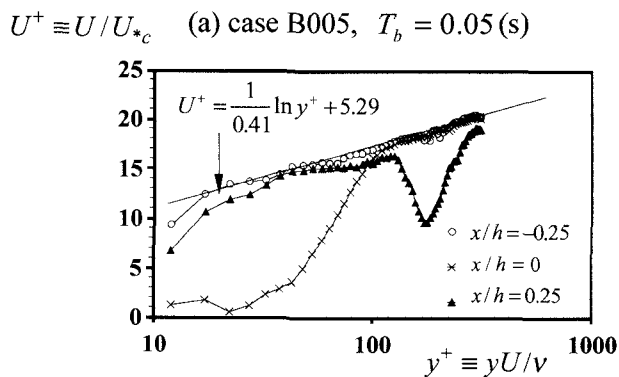


図-10 平均主流速の鉛直分布

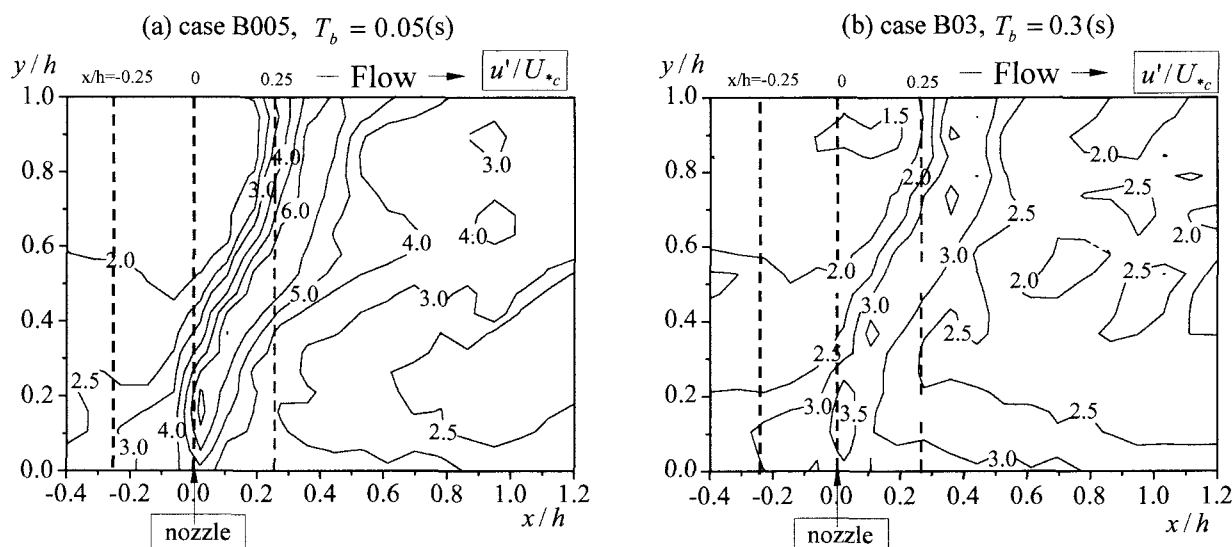


図-11 主流方向乱れ強度分布の空間分布

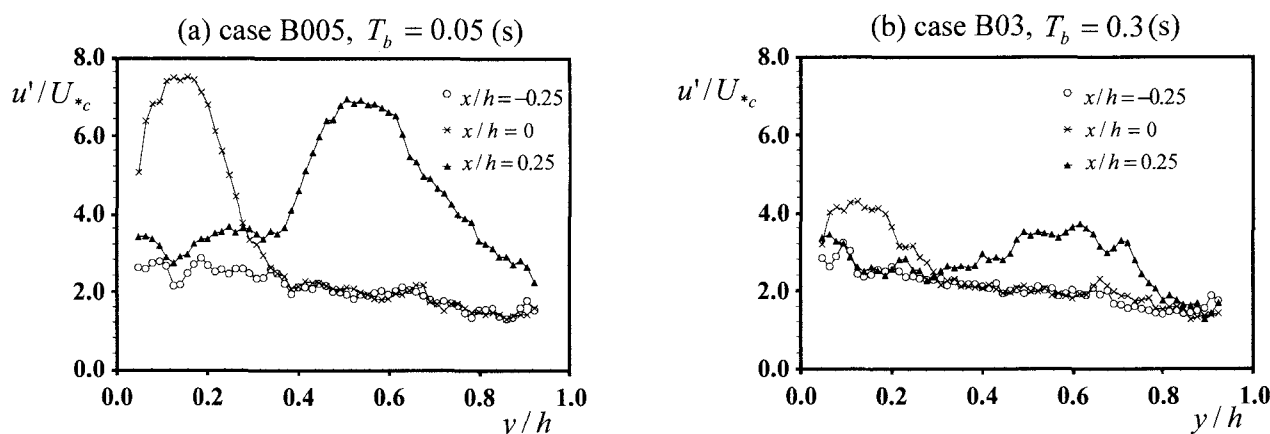


図-12 主流方向乱れ強度分布の鉛直分布

を用いた。図-6とこの結果から、気泡の上昇軌道に沿って流速が局所的に落ち込むことがわかる。これは気泡によって水流が減速されるためであり、特に気泡ボイド率の大きいケースB005ではこの特性が顕著である。一方、ボイド率の小さいケースB03においても同様の傾向がみられるが、B005ほど顕著ではなく主流速分布は気泡ボイド率の影響を大きく受ける。

図-10は図-9に点線で示した $x/h = -0.25, 0$ (ノズル位置) および 0.25 における無次元主流速の鉛直方向分布をプロットしたものである。両ケースにおいてノズルよりも上流側の $x/h = -0.25$ ではほぼ対数則に従い清水流の分布との差異はほとんどなく、気泡の影響は小さいと考えられる。一方でノズル位置では壁面近傍で分布が激しく落ち込み、そこから水面に向かって急激に増加する。また下流側の $x/h = 0.25$ では落ち込み位置が気泡の上昇軌道と対応して水面側にシフトする。

(4) 開水路気泡流れの乱れ構造

図-11は主流方向の無次元乱れ強度 u'/U_{*c} の空間

分布を示したものである。ここで無次元化には静水流ケースAの値 U_{*c} を用いた。この結果から気泡軌道付近で乱れが卓越しており、気泡運動に伴って大きな乱れが発生することがわかる。特にケースB005ではこの特性が顕著であり、同一水理条件では気泡のボイド率が乱れ強度の増加に大きく影響すると考えられる。また乱れが下流に輸送されるために軌道ラインから下流側では上流側に比べて乱れが増加する。

図-12は、図-10と同様の3つの鉛直ライン ($x/h = -0.25, 0, 0.25$) における主流方向の無次元乱れ強度の分布をプロットしたものである。この図からノズル位置 ($x/h = 0$) では壁面近くで、 $x/h = 0.25$ では半水深 ($y/h = 0.5 \sim 0.6$) 近くでそれぞれ乱れは大きくなる。またB005における乱れの最大値はB03の2倍近くになることがわかる。

(5) 気泡と周囲流体の追従性

最後に単一気泡ケースB03における瞬間主流速 u/U_{*c} の時間変化について考察する。図-13(a)に考察点を示す。理解しやすいようにケースB03におけ

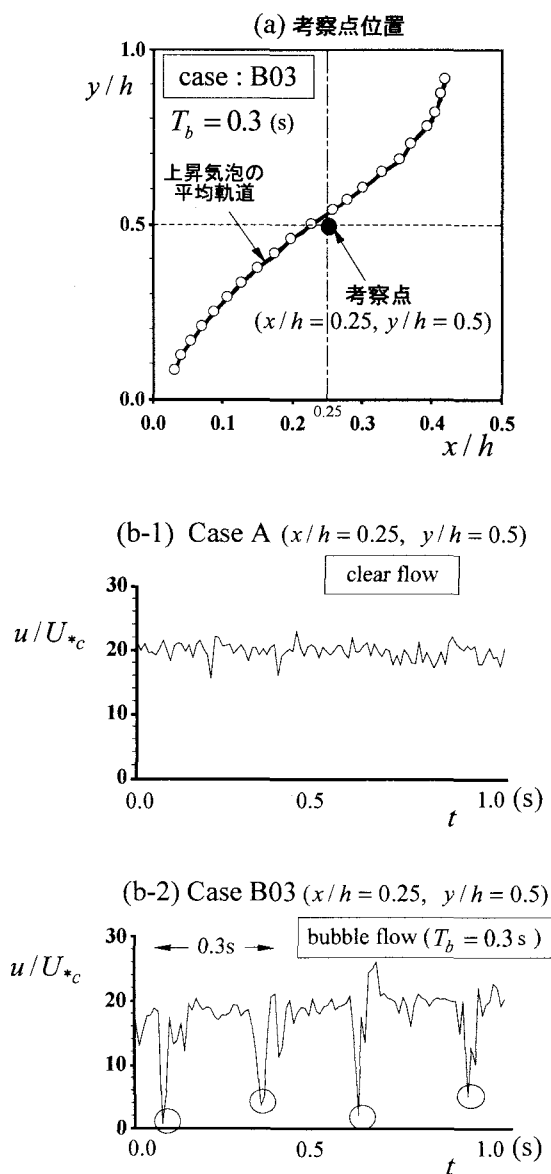


図-13 瞬間主流速 u の時間変化

る上昇気泡の平均軌道も示した。考察点は軌道近傍の点 ($x/h = 0.25, y/h = 0.5$) とした。図(b-1)および(b-2)にそれぞれ清水ケースAおよび気泡流ケースB03における1秒間の瞬間主流速 u を時系列に示した。(b-2)の気泡ケースB03では○印で示す個所で主流速の落込みがみられる。これは清水ケースAにはみられない気泡流れ特有の現象である。さらにこの主流速の落込みは気泡の出現周期0.3sとほぼ同じ周期で現れる。このことから、気泡運動の周期性が流速変動に伝達されており気泡が水流の乱れを直接誘起していることがわかる。

4. 結論

本研究は上昇気泡ブルームを含む開水路流れを対象に高速CCDカメラを用いたPIV計測を行い、その乱流構造を含む基礎水理特性の解明を試みたもので

ある。以下にここで得られた結果を整理して示す。

- 1) 気泡ブルームは2つの変曲点をもつ曲線的な軌道上を上昇する。この上昇特性はボイド率の影響をほとんど受けない。
- 2) 主流速は気泡の上昇軌道の周辺で減少する。この特性は気泡の発生周期が短いボイド率の高いケースほど顕著である。
- 3) 流速の乱れ成分は上昇軌道の周辺で促進され、流下方向に輸送される。特にこの現象はボイド率が高いほど顕著であり、気泡が乱流構造に大きな影響を与えることが明らかにされた。
- 4) 上昇軌道周辺の瞬間主流速の値は周期的に大きく減少する。この周期は気泡の発生周期とほぼ同じであり、この事実から気泡が水流の乱れを直接誘起していることが確認できる。

参考文献

- 1) 浅枝隆・Imberger, J., 連続成層中のBubble Plumeの挙動について, 土木学会論文集, No.411/II-12, pp.55-62, 1989.
- 2) 丹羽克彦・関根正人・吉川秀夫, 気泡流を伴う開水路流れの水理特性に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.411/II-12, pp.117-125, 1989.
- 3) 佐々木威之・浅枝隆・藤野毅, 気泡噴流による2層流の混合について, 土木学会年次学術講演会講演概要集第2部Vol.47, p.398-399, 1992.
- 4) 村井祐一・宋向群・高木崇・石川正明・山本富士夫・太田淳一, 気泡流中の乱れの逆エネルギーカスケード構造, 機械学会論文集, Vol.65, 632号, pp.1339-pp.1354, 1999.
- 5) 藤原暁子・菱田公一, 管内気液二相流の微細乱流構造, 機械学会論文集, Vol.68, 668号, pp.1143-pp.1150, 2002.
- 6) 石垣泰輔・今本博健, 可視化法による複断面開水路流れの3次元構造に関する研究, 土木学会論文集, No.515/II-31, pp.89-98, 1995.
- 7) Wells, J.C.・岸田圭史, 開水路流における壁面乱流構造のステレオPIVによる計測, 水工学論文集, 第46巻, pp.529-534, 2002.
- 8) 瀬津家久・東良慶・鬼束幸樹, スプリングモデルによるPTV法を用いた滑面開水路流れの固体粒子と流体の同時計測, 水工学論文集, 第46巻, pp.565-570, 2002.
- 9) 藤田一郎, トレーサーを利用した実河川水制周辺流れのビデオ画像解析, 水工学論文集, 第42巻, pp.505-510, 1998.
- 10) 綾史郎・露口肇・柿木理史・室田有紀・藤田一郎, 淀川流下部におけるPIVを用いた洪水時の流速観測, 水工学論文集, 第44巻, pp.455-460, 2000.
- 11) 木村一郎・植村知正・奥野武俊, 可視化情報計測, 近代科学社, 2001.
- 12) 瀬津家久, 開水路乱流の乱れ強度に関する研究, 土木学会論文集, 第261号, pp.67-76, 1977.

(2003.9.30受付)