

論文の内容の要旨

論文題目 チャンネル内気泡流における流動構造の特性

氏 名 蘇 秀 賢

本研究の対象として取り扱う気泡流は、連続した液相に気相が分散した流れ、つまり、液相の中の気相体積割合を示すボイド率が比較的に低い流れであり、日常生活だけでなく様々な産業分野で利用されている。例えば、マイクロバブルを用いた浄化施設での曝気曹、化学プラントでの化学反応器、湖沼の水質を浄化する為の自然循環ポンプ、海岸養殖場、CO₂の海洋固定装置、などが挙げられる。さらに、最近では日本とアメリカを中心として、気泡を用いた船舶航行時の推進抵抗の低減に関する研究が精力的に行われている。

このように、気泡流は産業の様々な分野で利用されているために、古くから多くの研究がなされている。それにもかかわらず、気泡流は複数の非定常現象が多重して流れるため、現象の特性を代表するスケールが複雑に存在し、気泡流の流動構造の特性に対する知見は今でも十分に得られていない。気泡流の流動特性を変化させる要因には、局所ボイド率分布、レイノルズ数、気泡径分布、気泡の合体・分裂・衝突、気泡形状の変形、気泡間の相互作用、などがあげられる。また、気泡挙動が気泡発生時の初期条件や生成方法にも影響されるため、単相流と比較にならないほど実験が困難となる。

そこで、複雑な現象の多岐に渡る支配要因を単純化した上で、よく制御された実験的研究を通して流れ場全体の巨視的乱流構造の詳細を明らかにすることが必要である。従って、本研究では気泡の混入により流れ場を単純化しやすいチャンネル内上昇気泡流を取り上げ、気泡混入による流れ場の流動構造変化を解明することを研究目的として実験的な研究を行う。

実験装置には、流れ方向の高さが 2000mm 長方形のチャンネルを用いる。測定部は気泡発生装置から 1600mm 下流に設置している。測定部の断面は 400(∅)mm×40(2H)mm で、アスペクト比が 10:1 の矩形である。研究の対象となるチャンネル流れはレイノルズ数 4100 と 8200 の十分発達した乱流と、レイノルズ数 1350 の層流であり、混入させる気泡群はほぼ球形である単分散の微小気泡群(平均気泡径が 1mm, 気泡径に対する標準偏差が 15%以下)である。また、重要な実験パラメータである平均ボイド率 (f_g) は 0.3% と 0.6% とした。単分散の微小気泡群を発生させるため、塩化ビニルと 474 本のステンレス中空パイプ(内径 0.07mm)を用いた気泡発生装置を製作し、さらに気泡の合体を抑えるために、界面活性剤である 3

ーペンタノールを微量 (20ppm) 添加した。

平均気泡径および局所ボイド率分布には画像処理法を、気泡流の乱流統計量には二次元 LDV (Laser Doppler Velocimetry) システムを用いて測定した。また、壁面近傍に形成される気泡クラスタの測定には PIV (Particle Image Velocimetry) 法を用いた。

本実験で用いた気泡流の様子は 3-ペンタノールの混入によってマクロ的に大きく変わる。3-ペンタノールを混入していない流れでは、大きい気泡が変形を伴い、チャンネルの壁をジャンプしながら上昇する跳躍運動をする様子が観察された。さらにチャンネル中央部 ($y/H \geq 0.2$) に存在する気泡は、ジグザグ運動あるいは螺旋運動をしながら上昇していくことが観察された。一方、3-ペンタノールを混入した流れでは、非常に小さい気泡が分布し、ほぼ変形がなく、流れのせん断から強い揚力を受け壁近傍 ($0 < y/H < 0.2$) に集積し、そのまま壁をすべるようにまっすぐ上昇していくことが観察された。さらに、3-ペンタノールを混入した流れでは壁近傍に集積した気泡がチャンネル長辺方向に 20~40mm 程度のブーメラン型の気泡クラスタを形成することが確認された。

これらの気泡流に対する局所ボイド率を求めた結果、壁近傍に非常に高いピーク値をもつ分布が得られ、そのピーク値になる位置の壁からの距離が平均気泡径とほぼ一致することを確認した。また、単相流での LDV 測定結果からは本実験の対象になる十分発達した乱流と層流が再現されることや 3-ペンタノールが流動構造に及ぼす影響は無視できる程度であることが確認されている。

気泡流乱流と層流に対する LDV の結果から、気泡の混入によって壁面近傍での液相速度勾配が増加し、チャンネル中央部 ($y/H \geq 0.2$) では流速分布が平坦化することが分かった。これは揚力を受けた気泡が壁近傍に集積し、気泡の浮力により液相が加速されるためである。また、気泡流乱流では変動速度やレイノルズ応力がチャンネル中央部 ($y/H \geq 0.2$) で単相流に比べて減少する乱流抑制現象が観察された。気泡の集積が生じる壁近傍を除いたチャンネル中央部では気泡流の流動構造が単相流での流動条件 (乱流・層流) に関係なく、気泡の混入によりほぼ似たものとなり、この領域に存在する気泡が流動構造の支配的要因であることが明らかになった。以上の気泡流

に関する測定結果をまとめ、本研究ではつぎのような気泡流の流動構造モデルを提案した (Fig. 1 参照)。本実験のように単分散の微小気泡群が混入され、流れのせん断から強い揚力を受け、壁近傍に強力に集積すると、集積した気泡は流れ方向に並び、浮力によって壁近傍の液相を引っ張って、液相の速度勾配を増加させる。このような状況になると、壁近傍に集積した気泡は一つのシート (気泡シート) 状になり、浮力によって上昇していく。この気泡シートはチャンネルの両壁近傍に形成され、気泡シートの中の流動はまるで同じ速度で上昇する平板間の流動のようにフラ

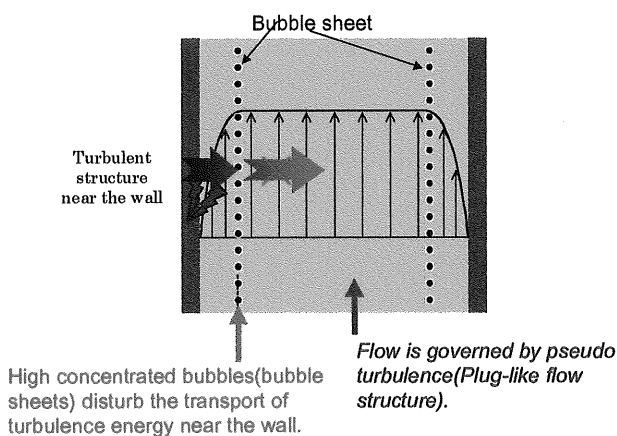


Fig.1 Model of flow structure in a bubbly flow with string bubble accumulation

ットになる状態と同じであると考
えられる。従って、この気泡シート
を境界にしてチャンネル中央部の流
動はフラット流動状態になり、壁近
傍の流動構造とは全く異なる流動
構造をもつ。単相流の場合は壁から
作られる乱流構造がチャンネル中央
部の流動構造を支配するはずであ
るが、本研究の気泡流では、気泡集
積によって作られた気泡シートに
よって壁面近傍とチャンネル中央部
の二つの領域を分けられ、チャンネル
中央部ではフラットな流動構造に
なり、乱流エネルギー生産が減少す
る。従って、この領域における流動
構造はこの領域に存在する気泡が
作る擬似乱れによる影響によって
決められることになる。

最後に、PIV を用いて壁面近傍の
流動構造に大きく影響を与える気
泡クラスタの挙動を調べた結果を
Fig.2 に示す。壁面近傍に生じる気
泡クラスタは、気泡クラスタ内の密
度の差で中央部の上昇速度が両端部
より大きくなることが分かった
(Fig.2(b))。さらに中央部と両端部
の上昇速度差と両端で生じる大きな
回転運動により、クラスタ内の気
泡移動が起き、気泡クラスタ全体
の変形が起きる(Fig.2.(c))。また、気

泡の気泡クラスタへの合流は上昇速度が大きい中央部で、離脱は両端部で生じることが分かった。このような気泡クラスタは、チャンネル長辺方向の長さが壁近傍乱流の長さスケールより大きいことから、壁近傍乱流の準秩序構造が崩壊し、流動構造に変化を与えると考えられる。

以上、チャンネル内気泡流を用いた実験を行い、気泡混入による流動構造の変化に対する新たな知見を得られ、気泡流における流動構造のモデルを提案した。

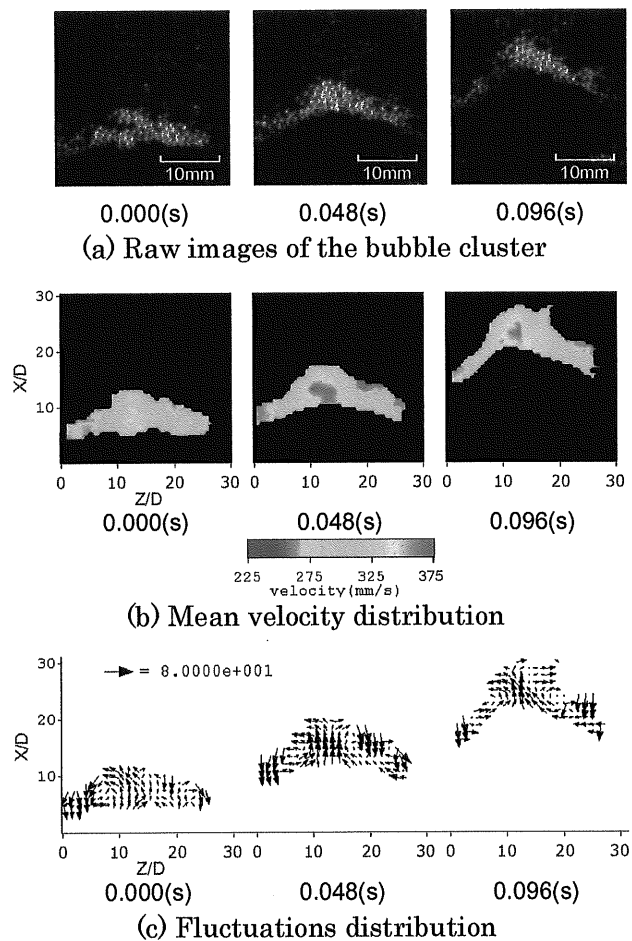


Fig.2 Raw images and velocity field of the bubble cluster