

超微細気泡を含むミルク状気泡流の流動特性

Fluid Characteristics of Milky Bubble Flow with Micro Bubbles

乾智彦 (京大院) 芹澤昭示 (京大) 八尋俊彦 (オーラテック)

INUI Tomohiko, SERIZAWA Akimi, YAHIRO Toshihiko

Abstract Our current understanding of turbulent structure in bubbly two-phase flow is limited to the case where the size of bubbles in the flow generally stands between the integrated turbulent scale and micro turbulent scale. It is therefore anticipated that the bubbles whose diameter is much smaller than the micro turbulent scale may exhibit different behaviors from those shown by the ordinary sized bubbles and thus the two-phase flow structures may be changed. We carried out measurement of cross-sectional void fraction and frictional pressure drop in a vertically upward air-water milky bubbly flow in a 20mm i.d. circular pipe containing micro bubbles of the order more or less 50 microns. The result indicated that the void fraction is well correlated by $\alpha = 0.702\beta$. Another very important new finding is that micro bubble injection induced a very strong laminarization of the flow. Laminar-to-turbulent transitions occurred at the Re numbers between 10^4 and 3×10^4 for void fraction of 0.3~0.5%.

Keywords: Micro bubbles, Milky bubbly flow, Void fraction, Pressure drop, Laminarization

1. はじめに

気泡径が数 10μ 程度以下の超微細気泡は通常径気泡に比べ、対体積表面積が大きく、液体中の滞留時間も長い。ため気液界面での物質輸送や化学反応、物理的・化学的特性を利用した様々な応用が期待されている。また、学術的には、従来の気泡流の概念では気泡直径が数 mm から 10mm 程度までの気泡を含む流れを対象としたものであり、このような流れでは一般に(乱流のミクロスケール) < (気泡径) < (乱流のマクロスケール)である。それに対して、超微細気泡流れでは(気泡径) < (乱流のミクロスケール)となる。

周知の通り、気泡流の流動特性を特徴付けているのは流れの中に分散している気泡の形状や大きさ、即ち、形状効果を含む気泡径分布と流体の乱流構造であり、乱流渦と気泡の流体力学的相互干渉が両者で全く異なることが予想される。また、筆者等による超微細気泡挙動に関する実験及び数値シミュレーション結果[1]から、超微細気泡は剛体球と同様に気泡同士の衝突や乱流渦との相互作用の際にも変形や合体がなく、気泡間には近距離力、遠距離力が作用することが予測された。このようなことから、超微細気泡を多量に含みミルク状に白濁した気泡流は通常の気泡流と異なる流体力学的構造を持つと共に、特異な特性を発現する可能性があり、機能性流体としての将来性が展望される。

本報では、平均気泡径 $40 \mu\text{m}$ 程度の微細気泡を含むミルク状気泡流の流動特性を明らかにすることを目的とし、内径 20mmの垂直円管内上昇流におけるボイド率及び圧力損失を測定した結果について報告する。特に、超微細気泡による流れの著しい層流化現象が観察された。

2. 実験装置及び実験方法

Fig. 1 は本研究で用いた実験装置の概略である。ストレージタンクからのイオン交換水はポンプ 1 の吸込み側で吸引された空気 (流量調整) を加圧溶解した後、キャピテーションノズルから放出され、超微細気泡を含むミルク状気泡流を形成する。水単相流実験にはポンプ 2 の配管系を利用する。試験部を流れる流体の流量はバイパス流を利用して調整する。試験部は内径 20mm、長さ 4mの透明アクリル円管で、圧力損失はバイパス分岐点から約 1.5m 下流の位

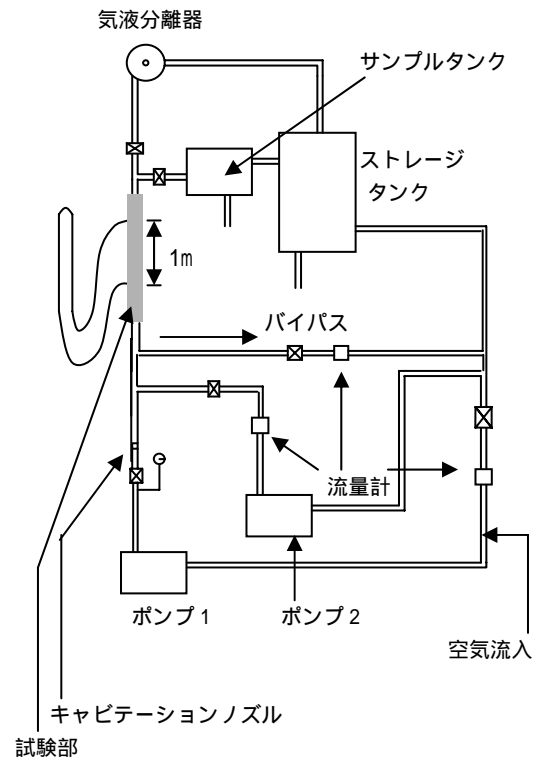


Fig.1 Schematic of Air-Water Loop

置から 1m の区間で測定した。ボイド率 はサンプルタンクに気泡流を流し、500cc の容器にサンプルを採り、精度 10mg の電子天秤で計量して求めた。なお、超微細気泡を含む気泡流の気液分離には特別な工夫を凝らして作製した気液分離器を使用した。

一般に、近年、マイクロバブル発生器が多くの関心を持っているが、容器内で多量のマイクロバブルを作製するのは容易であっても、流路に流してミルク状に白濁した気泡流を実現するのは至難の業である。Fig.2 は文献[2]に基づいて既存の気泡発生器性能により得られるボイド率の上限値を示したものである。気泡径 20μ 、気泡数密度 $10^6/\text{cc}$

としても、得られるポイド率は0.4%程度である。本実験では最大0.8%まで実現できた。なお、Fig.3は本研究で使ったキャビテーションノズルとそれを用いて実現したミルク状気泡流の写真である。

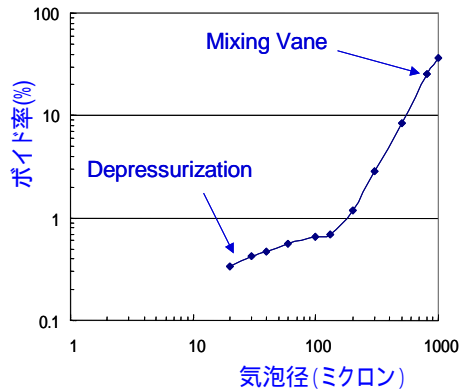


Fig.2 Maximum attainable void fraction by various bubble generation devices



Fig.3 Cavitation nozzle and milky bubbly flow

3. 実験結果及び考察

3.1 ポイド率

Fig.4は液の見掛け速度 j_l をパラメータにして求めた流路断面平均ポイド率と気相である空気の体積流量比との関係を示したものである。ポイド率の測定は試験部最上部にあるサンプリング用タンク内で採集した気液混合流体の気相体積割合として求めた5回の操作の平均値である。なお、本実験条件下では、流れ方向 (elevation) による流れの状態変化は殆ど観察されなかった。超微細気泡の終

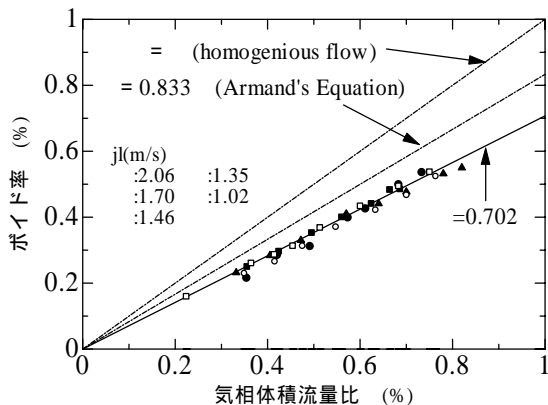


Fig.4 Cross-sectional average void fraction

端速度は極めて小さく、ポイド率としては均質流モデルで予測できるものとの予断を覆し、ほぼスリップ比=1.4に相当する

$$\alpha = 0.702\beta$$

となった。測定結果の再現性もよく、また、結果のばらつきも少なかった。現在、物理機構について検討中である。

3.2 圧力損失

Fig.5に摩擦圧力損失の測定結果を示す。通常、気液二相流の摩擦圧力損失は単相流の圧力損失との比、即ち、二相流圧力損失倍率とLockhart-Martinelliパラメータで示されることが多い。しかし、本実験のように平均ポイド率が1%に満たない条件下では、従来の表示法が大きな意味を持たない。また、二相レイノルズ数も有意でないことから、ここでは、単相流の場合と同様に、管摩擦係数 f と液レイノルズ数 Re で結果を整理した。ここに、

$$\Delta p = f \left(\frac{\rho j_l^2}{2gD} \right) \Delta L, \quad Re = \frac{\rho j_l D}{\mu}$$

層流式: $f = 64 / Re$

乱流式: $f = 0.3164 Re^{-1/4}$

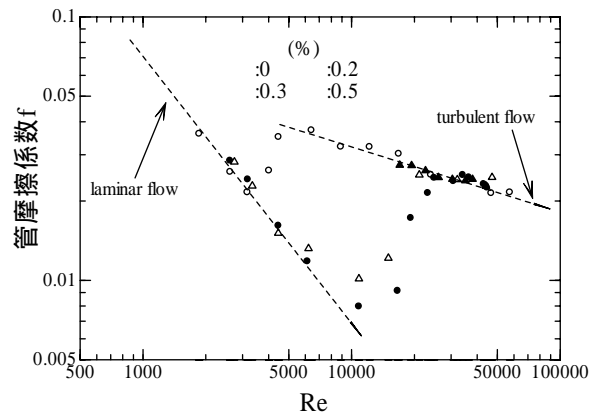


Fig.5 Two-phase friction factor vs. Reynolds number

水単相流は Re 数が 2000 ~ 3000 程度で層流から乱流に移行しているが、ポイド率が 0.3%、0.5% の場合には、層流乱流遷移が遅れ、 Re 数が約 10000 ~ 20000 で乱流へ移行しているのが明確に観察された。即ち、層流化現象が顕著に見出された。従来、物質添加による顕著な層流化はポリマーや繊維質、界面活性剤等によってもたらされることはよく知られているが[3]、気泡混入による顕著な層流化の報告例は見当たらない。Marie[4]の解析では、加圧溶解等で作成される超微細気泡により境界層の構造が変化するため、skin friction が減少するとされている。今後、超微細気泡による層流化現象の機構を更に追究すると共に、機能性流体としてのミルク状気泡流の応用を展開したい。

4. 結言

直径 40 ~ 50 μ 程度の超微細気泡を含むミルク状気泡流による顕著な層流化現象を見出した。

5. 参考文献

- [1]Matsumoto,Y. et al, ICMF-2001, Paper 332, [2] 和泉電気(株)技術資料, [3]稲葉英男,機論(B),61-589(1995) 3304-3310, [4]Marie, M., Int.J. Multiphase Flow

