マイクロバブルチャネル乱流における気泡径の壁面摩擦低減現象に及ぼす影響

Effects of Bubble Size on the Skin Friction Reduction
in the Microbubble - Laden Turbulent Channel Flow.

○ 鈴木 佳那子 (慶大学) 学 青木 一司 (慶大院) 正 菱田 公一 (慶大) 正 児玉良明 (海技研)

Kanako Suzuki, Kazushi Aoki and Koichi Hishida, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Japan.

Yoshiaki Kodama, National Maritime Research Institute, 6-38-1, Sinkawa, Mitaka, Tokyo, Japan.

The phenomenon of skin friction reduction with micro bubble has been studied experimentally. We reveal the relation between drag reduction and the bubble size, using two different types of bubble. One is large bubble of millimeter order by porous plate; and the other is small bubble of micrometer order made by mixing air and water under high pressure. Bubble diameter is calculated from images captured by high speed camera and the shear stress is measured by shear stress sensor. The experiments have been carried out for large bubble flow conditions with Reynolds number ranging from 10,000 to 50,000; void fraction up to 0.04 and small bubble flow with Reynolds number ranging from 30,000 to 50,000; void fraction less than 0.01. In the case of large bubble flow for $Re > 30,000$, drag has been reduced up to 10%. In contrast, small bubbles hardly contribute to reduce shear stress due to dispersion of bubbles in turbulent channel flow.

Key Words: Skin friction reduction, Micro bubble, bubble diameter

1. 緒言

チャネル乱流において、微小気泡を乱流境界層内に混入すると壁面近傍の乱流構造が変化し、摩擦抵抗低減効果が得られることがわかっているが⁽¹⁾、そのメカニズムはいまだ不明な点が存在する。最近の研究では、電気分解により生じる微小気泡を用いた抵抗低減に関する研究がLuらによってなされており⁽²⁾、少ない空気量で、多くの抵抗低減効果が得られることが確認され、気泡径が抵抗低減において重要な要素であることが示された。本研究では発生手法の異なる2種類の気泡を混入した場合の気泡径分布と壁面せん断摩擦力を計測し、気泡径の変化と壁面摩擦低減効果への影響を評価する。

2. 実験装置

2.1 実験流路

図1に実験流路を示す。流路はアクリル製2次元矩形チャネルで、インバーターによって制御されたポンプ、電磁流量計、整流タンク、矩形チャネル部、貯水タンクを水が循環する実験流路とした。チャネルは全長1300mm、アスペクト比は3:20で、テストセクションへの助走区間は1250mmとした。表1に実験条件を示す。

2.2 微小気泡発生法

微小気泡の混入は2種類の方法で行った。

i) ポーラス板

気泡発生装置の概要を図2(a)に示す。テストセクションの500mm上流の上壁に設置された公称直径 $2\mu\text{m}$ のポーラス板を通して流路に気泡を混入した。空気流量は、流量計を用いて制御した。ポーラス板によって発生させた気泡を以下、大気泡とする。

ii) 微小気泡発生装置

微小気泡発生装置(ニクニ, M25NP15F04HD)の構造を図2(b)に示す。渦流ポンプに空気と水の吸引混合移送を行い、圧力をかけて水中に空気を溶解させて、急減圧することで、気泡を発生させる仕組みである。空気流量は渦流ポンプに給水される水量の約8%で一定にするため、ボイド率の調整はせず、吸気量は $0.12\text{ m}^3/\text{h}$ で一定とした。発生装置は整流タンクに接続し、流路内へ気泡を含む水を混入した。この手法で発生させた気泡を以下、微小気泡とする。

3. 計測手法

3.1 気泡の可視化

壁面極近傍の微小領域の可視化として、テストセクション下部からLED群($\lambda = 607\text{nm}$)を照射し、チャネル上部に設

置した高速度CMOSカメラ(Vision research, Phantom V7.1)を用いて、フレームレートを100Hz、画像サイズを 800×600 pixelsとして $Re = 10,000 - 50,000$ におけるミリバブルと、マイクロバブルの気泡画像取得を行った。平均気泡直径は画像の輝度値から二値化処理をし、気泡像をラベリングして、各気泡像の面積より等価直径を求めた。

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2 Schematic diagram of large bubble generator (a) and small bubble generator (b)

Table 1 Experimental conditions

Working fluid	Water
Channel size	1300 mm $\times$ 15 mm $\times$ 100 mm
Channel half height	$h = 7.5$ [mm]
Temperature of fluid	$T = 23.0 - 25.0$ [deg.]
Mean velocity	$U_m = 1.22 - 6.11$ [m/s]
Reynolds number	$Re = h U_m / \nu = 10,000 - 50,000$ [-]
Bulk void fraction	Milli bubble $\alpha_m = 0.01 - 0.04$ Micro bubble $\alpha_m = \text{less than } 0.01$
Dynamic viscosity of fluid	$\nu = 0.91 \times 10^{-6}$ [m ² /s]

3.2 セン断応力センサ

壁面せん断応力の計測には、水用せん断応力計(SSK, S10W-2S, 定格容量 19.6mN, 応答周波数 10Hz)を用いた。せん断応力センサは、直径 10mm の円盤型浮動片を持ち、浮動片に働くせん断応力が平板ばね構造を介して感圧素子に伝えられることで、壁面せん断応力を計測する仕組みとなっている。浮動片の中心がテストセクション中心、かつ、壁面と同一平面になるよう設置して、2種類の気泡を混入した際の壁面せん断応力をそれぞれ計測した。センサから得られた信号は動ひずみ測定器(共和電業, DPM-713B)により増幅され、AD コンバーター(Data translation, DT9804)を介し PC によりサンプリング (20Hz)を行った。

4. 結果および考察

4.1 気泡径分布

レイノルズ数 30,000 ($\alpha = 0.04$)における大径気泡、および微小気泡の気泡画像を図 3(a),(b)に、気泡径の確率密度関数(pdf)を図 4(a),(b)に示す。気泡画像を比較すると、気泡径と形状が大きく異なっていることがわかる。気泡径の確率密度関数の結果をみると、大径気泡の場合、レイノルズ数の増大に伴って、平均気泡直径が約 1 - 2mm 小さくなり、微小気泡の場合、流速に伴う気泡径の変化はみられずどの条件下においても平均気泡直径は 10 - 20 μ m となった。

4.2 壁面せん断応力

レイノルズ数 10,000 - 50,000 の条件下で大径気泡を混入した場合と、レイノルズ数 30,000 - 50,000 の条件下で微小気泡を混入した場合の抵抗低減効果とボイド率の結果を図 5 に示す。図には、Merkle ら⁽³⁾による経験式(1)も併記した。

$$\frac{C_f}{C_{f0}} = 0.8e^{-4\alpha} + 0.2 \quad (1)$$

(C_{f0} : 単相時の摩擦係数, C_f : 各条件における摩擦係数) レイノルズ数 10,000 および 20,000 の条件ではボイド率の増加に伴って、壁面摩擦が増加することが確認された。レイノルズ数 30,000 以上の条件では、ボイド率の増加に伴い、壁面摩擦が減少する傾向が見られ、気泡径分布の結果から、抵抗低減効果の得られる条件では、気泡径が小さくなることを確認された。図 6 に抵抗低減効果の見られたレイノルズ数 30,000 における、壁面近傍流れ方向の平均流速と平均流速の RMS を PTV により計測した結果を示す⁽⁴⁾。結果から、ボイド率の増加に伴い、平均流速の減速、および乱流強度の低減が示され、壁面近傍の速度勾配が小さくなり、流動構造の変化が確認された。

微小気泡を混入した場合、図 5 に示すように、レイノルズ数 30,000 - 50,000 の条件において壁面摩擦が低減する傾向は見られなかった。Lu ら⁽²⁾の研究では、電気分解による水素気泡の混入により、抵抗低減効果が最大約 20%得られる結果が示されたが、気泡発生原理や流れへの混入手法が本研究と異なり、流路内で気泡発生を行っている。これに対し本研究では、微小気泡を流路上流の整流タンクより流入させているため、チャンネル内の気泡が流路全域に拡散し、壁面近傍の局所ボイド率が低下して、抵抗低減効果を確認できなかったと考えられる。

Fig. 3 The example of captured image

Fig. 4 (a) Large bubble diameter (b) Small bubble diameter

Fig. 5 Relation between void fraction and skin friction

Fig. 6 (a) Mean velocity profile (b) Turbulence intensity

5. 結言

チャンネル乱流に発生手法の異なる2種類の気泡を混入し、気泡径分布と壁面せん断摩力の変化を、高速度カメラによる画像取得と壁面せん断応力センサにより計測した結果から以下の知見を得た。

- ・ ポーラス板を用いて発生させた大径気泡は、レイノルズ数の増大に伴い、平均気泡直径が約 1 - 2mm 小さくなることがわかった。さらにレイノルズ数 30,000 以上の条件では、ボイド率の増加とともに抵抗低減効果が最大約 10%見られ、この時、壁面近傍における速度勾配が減少し、流動構造の変化が確認された。
- ・ 加圧溶解によって発生させた微小気泡は流速によらず、平均気泡直径が 10 - 20 μ m であることが確認されたが、大径気泡混入時に抵抗低減効果の得られたレイノルズ数 30,000 以上の条件で、壁面せん断応力の低減は確認されなかった。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金, 平成 17 年度基盤研究(B)「超高速域におけるマイクロバブルによる摩擦抵抗低減に関する研究」(No. 17364023, H17-H19)の補助を受けた。

参考文献

- (1)大石義彦ら, 機論 (B 編), 71- 706 (2005), 42-49.
- (2)Xinlin Lu, Masato Hamada, and Hiroharu Kato, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, (2005), 509.
- (3)Merkle C. and Deutsch S., Progress in Astronautics and Aeronautics, 123 AIAA, (1990), 351-411.
- (4)青木一司ら, 日本流体力学会年会 2006 講演アブストラクト集, (2006), 95.