

# 水平矩形管内における マイクロバブルによる摩擦圧力損失に関する研究

安田貴央\* 橋田昌明\*\* 鈴木隆起\*\*\* 赤対秀明\*\*\*\*

## Frictional Pressure Drop of Microbubble Flow in a Horizontal Channel

Takahisa YASUDA\* Masaaki HASHIDA\*\* Takayuki SUZUKI\*\*\* Hideaki SHAKUTSUI\*\*\*\*

### ABSTRACT

One of the characteristics of the microbubble is reduction of frictional pressure drop. However, the mechanism has not been clarified. In the present study, in order to clarify the mechanisms, the mean velocity distribution, turbulent components, and bubble diameter in the microbubble flow were measured and the relationship with the frictional pressure drop was investigated. In the experiment, the microbubble was generated by swirling flow method, pressurized dissolution method and loop flow method, while the Reynolds number was varied from 8000 to 40000 at 10, 20, 30 degree of water temperature. As the result, in the case of swirling flow method, the frictional pressure drop decreases by about 3 to 7 %. In the case of pressurized dissolution method, the frictional drop increases or does not change. The change of the turbulent components to main flow direction corresponds to the increase and decrease of the frictional pressure drop for both of the generation methods.

*Keywords* : microbubble, frictional pressure drop, turbulence, shear stress

### 1. 諸言

マイクロバブルは、気泡径が数 $\mu\text{m}$ から数百 $\mu\text{m}$ と極めて小さいため、気泡径が数 mm 程度の気泡には見られない様々な物理化学特性を有している。そのため水産養殖、医療分野、工業的利用など、非常に幅広く利用されている。その工業的利用のひとつに、マイクロバブルによる摩擦圧力損失低減効果があり、船舶推進時における消費エネルギー削減などに応用されている<sup>(1)</sup>。

これまでに、マイクロバブルによる摩擦圧力損失低減効果は、マイクロバブルの気泡径や、発生方式、化学的特性に依存するとされており、特に気泡径に対する影響が明らかにされている。気泡径が 100  $\mu\text{m}$  から 1 mm 程度のマイクロバブルの場合、矩形管内において十から数十%の低減効果が確認されている。その中で、その低減メカニズムは壁面近傍のマイクロバブルの存在による水の密度と乱流

変動に伴うレイノルズ応力の減少によることが報告されている<sup>(1)</sup>。

一方、気泡径が 50  $\mu\text{m}$  以下のマイクロバブル流においては、摩擦抵抗低減効果はより増加することが報告されている<sup>(2)</sup>ものの、その低減メカニズムは、未だ明らかにされていない。その中で、星野ら<sup>(3)</sup>は水平円管内において、マイクロバブル流中(気泡径 30~200  $\mu\text{m}$ )の乱流成分を LDV によって測定し、乱流変動成分が減少することを確認している。また、佐藤ら<sup>(4)</sup>が提案した気液二相気泡流に対するせん断応力の関係式と結びつけることで、摩擦圧力損失の低減メカニズムを提案している。しかし、比較的大きい気泡流に関する関係式をマイクロバブル流に用いて良いかは不明であり、また、せん断応力も直接測定されていないため、摩擦圧力損失との直接的な関係は不明である。この関係を明らかにするために、水平矩形管内に MB を流動させ、壁面せん断応力、および主流方向乱流変動成分  $u'$  を測定することで、摩擦圧力損失との関係性を検討している。その結果、摩擦圧力損失と壁面せん断応力の間には直接的な関係性が見られるものの、主流方向乱流変動成分  $u'$  との間には整合性は確認できず、垂直方向乱流変動成分  $v'$

\* 専攻科 機械システム工学専攻

\*\* 本科 機械工学科

\*\*\* 機械工学科 講師

\*\*\*\* 機械工学科 教授

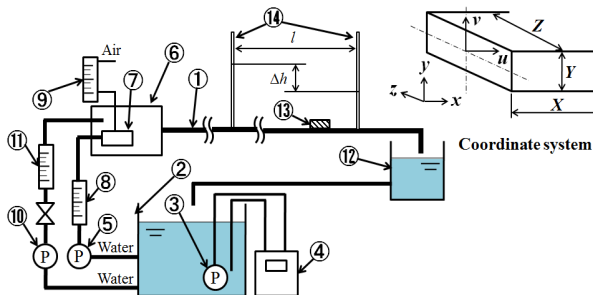
についても考慮する必要があると結論づけている<sup>5)</sup>。

そこで本研究では、水平矩形管内に 2 種類の発生方式でマイクロバブルを流動させ、摩擦圧力損失を測定し、水単相流との比較を行う。また、主流方向、垂直方向の乱流変動成分、および気泡径を測定し、これらの関係性を明らかにするとともに、発生方式による違いが生じるか明らかにすることを目的とする。

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1 実験装置

図 1 に実験装置の概略を示す。試験流路①は全長 6 m、断面積が 50 mm×20 mm の矩形管であり、給水タンク②より水を供給し、試験流路直前に設置した混合部⑥でマイクロバブルを発生させ、試験流路内にマイクロバブル水を流動させる。マノメータ⑭により摩擦圧力損失を測定するとともに、LDV 装置により、速度分布および主流方向乱流変動成分  $u'$ 、垂直方向乱流変動成分  $v'$ 、画像処理により気泡径を測定する。なお、水温  $T=10, 20, 30$  °C、レイノルズ数  $Re=8000\sim 35000$  の範囲で実験を行った。



- ① Test flow channel      ② Water tank      ③ Pump
- ④ Temperature controller   ⑤ Pump      ⑥ Mixing section
- ⑦ Micro bubble generator   ⑧ Water flow meter   ⑨ Air flow meter
- ⑩ Pump      ⑪ Water flow meter   ⑫ Drain water tank
- ⑬ Shear stress meter      ⑭ Manometer

図 1 実験装置概略

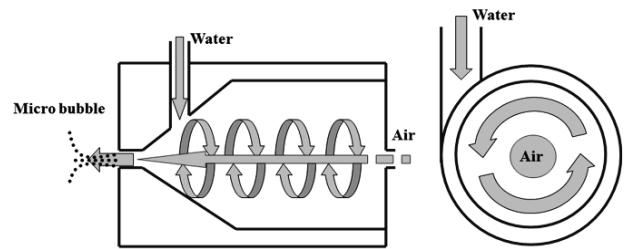
### 2.2 マイクロバブル発生装置

本研究では、マイクロバブルの発生に旋回流方式発生装置(ナノプラネット製, M2-LM), 加圧溶解方式発生装置(三相電機製, マイクロバブル L-2011)を用いた。

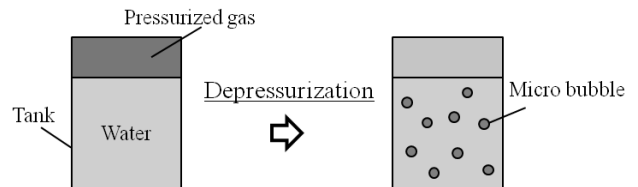
図 2 (a)に旋回流方式発生装置の概略を示す。旋回流方式は気液二相流体を高速旋回させることによって、装置内で液体と気体の遠心分離作用を利用し、装置中心部に形成された旋回空洞部を装置出口前後における旋回速度差で切断、粉碎することでマイクロバブルを発生させる方式である。本研究で用いた発生装置では、マイクロバブル発生装置に供給する水流量と空気流量を調節することができる。本研究では、水供給量  $Q_L=17$  l/min, 空気供給量  $Q_G=0, 40, 80$  ml/min の 3 つの発生条件でマイクロバブルを発生させ、各実験を行った。

図 2 (b)に加圧溶解方式の概略図を示す。加圧溶解方式とは、液体中に溶解する気体の量が気体の圧力に比

例して増加する特性を利用したマイクロバブル発生方式である。ある程度の高圧で十分な量の気体を液中に溶解させた後、その圧力を開放し、減圧すると、液体は過飽和状態になる。過飽和状態では液中に溶解していた気体が蒸発し、結果として液中に大量の気泡を発生させることができる。本研究では、この原理を用いた加圧溶解方式の発生装置でマイクロバブル発生させ、各実験を行った。



(a) 旋回流方式



(b) 加圧溶解方式

図 2 マイクロバブル発生装置

### 2.3 気泡径の測定

気泡径の測定方法の概略を図 3 に示す。気泡径の測定は、水を満たした水槽内にマイクロバブルを発生させ、その気泡を水槽後方からライトで照らしながら、高速度ビデオカメラ(フォトロン製, 倍率 150 倍, フレームレート 4000 fps)で撮影し、焦点のあったマイクロバブルの直径を水槽内に設置した 300  $\mu\text{m}$  のワイヤーと比較することで測定する。なお、サンプリング数は 500 個である。

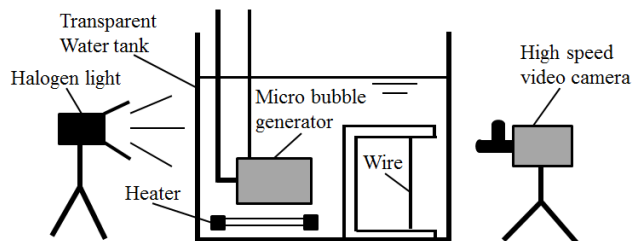


図 3 気泡径の測定

### 2.4 摩擦圧力損失の測定

矩形管内の摩擦圧力損失は流路入口から 2.5 m および 5.5 m の位置に設けた静圧測定孔より、マノメータ⑭を用いて液面差  $\Delta h$  を測定し、式(1), (2)より摩擦圧力損失  $\Delta P_f$  および、管摩擦係数  $\lambda$  を算出する。ここで、 $u$  は平均流速、 $P_1$

は上流の静圧,  $P_2$  は下流の静圧,  $\rho_L$  は水の密度,  $g$  は重力加速度,  $l$  は試験区間長(=3 m)である.

$$\Delta P_f = P_1 - P_2 = \rho_L g \Delta h \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{d}{l} \frac{2g}{u^2} \Delta h \quad (2)$$

### 2.5 主流および乱流変動成分とせん断応力の関係性

一般的な気液二相流におけるせん断応力の関係式は次式で示される<sup>(4)</sup>.

$$\tau = (1 - \alpha_G) \left( \mu_m \frac{du}{dy} - \rho_m \overline{u'v'} - \rho_m \overline{u''v''} \right) \quad (3)$$

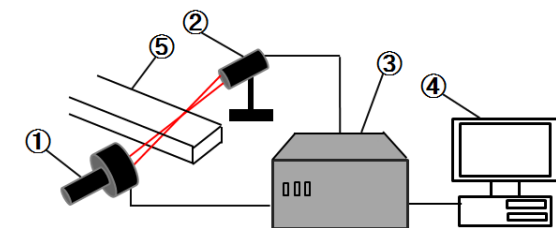
ここで,  $\alpha_G$  は気相体積率,  $\mu_m$  は気液二相流体の平均粘度,  $\rho_m$  は気液二相流体の平均密度,  $du/dy$  は速度勾配,  $u'$  は主流方向変動成分,  $v'$  は垂直方向乱流変動成分,  $u''$ ,  $v''$  は気泡のかく乱による変動成分である. なお,  $u, v$  は  $x, y$  方向成分を示す.  $\rho_m \overline{u'v'}$  は乱流の速度変動による応力,  $\rho_m \overline{u''v''}$  はウェイクによる気泡誘起乱れによる応力である. 星野ら<sup>(3)</sup>は式(3)において, マイクロバブルが十分小さく, 流れに対して影響しないと仮定, すなわち  $\alpha_G \approx 0$ ,  $u''v'' \approx 0$  とし,  $\alpha_G \approx 0$  であることで  $\mu_m, \rho_m$  を水の粘度  $\mu_L$ , 水の密度  $\rho_L$  とすることで, せん断応力が式(4)で近似できると仮定している.

$$\tau = \mu_L \frac{du}{dy} - \rho_L \overline{u'v'} \quad (4)$$

本研究では, 式(4)の妥当性を検討するために, レーザードップラー流速計 LDV による主流方向および垂直方向乱流変動成分の測定を行う.

### 2.6 平均速度分布および乱れ度の測定

図 4 に LDV 装置(DANTEC 製, MODEL3230H-PC)の概略を示す. まず, レーザー発振器①(He-Ne レーザー, 波長 632.8 nm, 同軸径連続発振レーザー 10 mW 直線偏光)と散乱光受光器②を測定区間に設置し, 流速分析器③(FVA, 58N80), パーソナルコンピュータ④(PC, ソフトウェア BSA Flow Software)を起動させた. 試験流路内に水単相流および, MB 流を流動させ, レーザーの交差点を測定位置に移動させ, 散乱光受光器の焦点を交差点の中心と合わせ, レーザーがマイクロバブルに当たった散乱光を受光することで, 焦点位置の速度を測定する.



①Laser ②Photo multiplier ③FVA  
④PC ⑤Test flow channel

図 4 LDV の構成

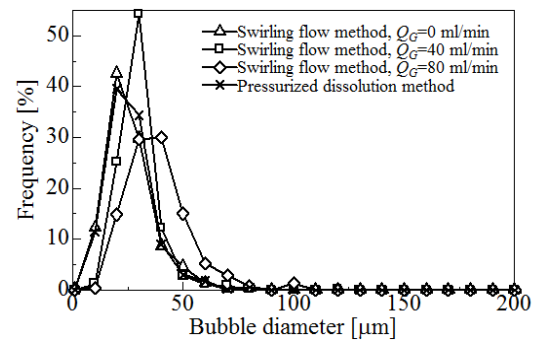
## 3. 実験結果および考察

### 3.1 気泡径

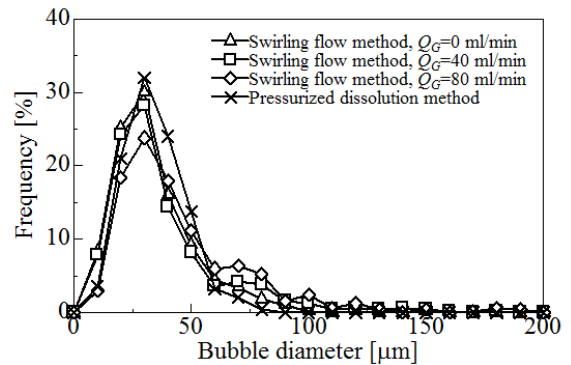
図 5 に測定を行った水温  $T=10, 20, 30$  °C における気泡径分布を示す. また, 図 6 に各発生方式の平均気泡径を示す.

発生方式および水温に関わらず, どの条件においても  $30 \mu\text{m}$  付近にピークをもつ気泡径分布が得られた. 旋回流方式については, 空気供給量  $Q_G$  の増加に伴い, 気泡径が  $60 \mu\text{m}$  以上の比較的大きな気泡が増加する傾向がある. 一方, 加圧溶解方式については, 気泡径が  $60 \mu\text{m}$  以上の気泡が他の発生方式に比べ極めて少ない.

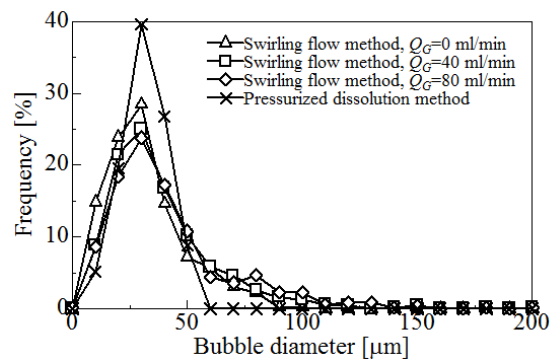
平均気泡径は, 旋回流方式よりも加圧溶解方式の気泡径が小さい. また, いずれも水温  $20$  °C の場合に最も大きく,  $10$  °C か  $30$  °C で最小となる. 旋流方式においては, 空気流量  $Q_G$  によって気泡径の大きさは変化し,  $Q_G$  が小さいほど, 気泡径は小さくなるのが分かる.



(a)  $T=10$  °C



(b)  $T=20$  °C



(c)  $T=30$  °C

図 5 気泡径分布

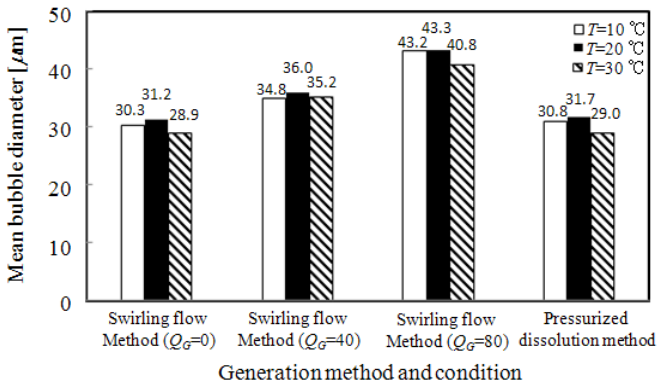


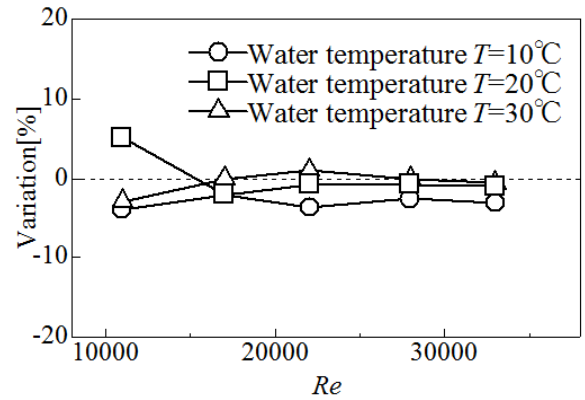
図6 気泡径

### 3.2 摩擦圧力損失

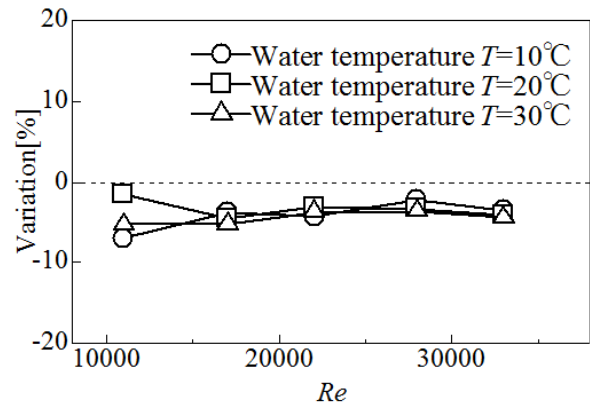
図7に旋回流方式, 加圧溶解方式の場合の  $Re$  数に対する管摩擦係数  $\lambda$  を, 水単相流を基準とした増減率で示す。なお, 旋回流方式の空気流量  $Q_G$  は 0, 40, 80 ml/min の3種類である。旋回流方式において  $Q_G=40$  ml/min でもっとも低減効果は高く,  $Re$  数全域で 3~7 %低減している。また, 水温に対しては, 10 °C の場合, 比較的低減範囲や割合が大きくなることを確認できる。20, 30 °C においては,  $Q_G=40$  ml/min でのみ低減効果が確認でき,  $Q_G=0, 80$  ml/min では水単相流と変化が見られなかった。一方, 加圧溶解方式は, 測定を行った全温度においておおよそ  $Re$  数全域で水単相流に比べ  $\lambda$  が増加し, 特に  $T=30$  °C の場合には,  $\lambda$  が十数%増加している。

これまで, 摩擦圧力損失の低減効果は, 気泡径が小さくなるほど大きくなることが知られている。旋回流方式において, 気泡径の大きさは  $Q_G=40$  と 80 ml/min では, 40 ml/min の方が小さい。しかし,  $Q_G=0$  ml/min および加圧溶解方式に関しては, 気泡径は前述の2条件より小さいものの, 摩擦圧力損失が低減されていない。この2つの条件に関しては, 発生方式が圧力変化によるものであり,  $Q_G=40$  や 80 ml/min のように, 強制的な外力によるものとは異なる。同空気流量において, 温度を変化させ気泡径を小さくしても, 低減率は大きくなっていない。これらの結果から, 気泡径の大きさと低減率の整合が取れていないことが分かる。そのため, 摩擦圧力損失低減効果は, 気泡径の大きさのみには依存しないと考えられる。

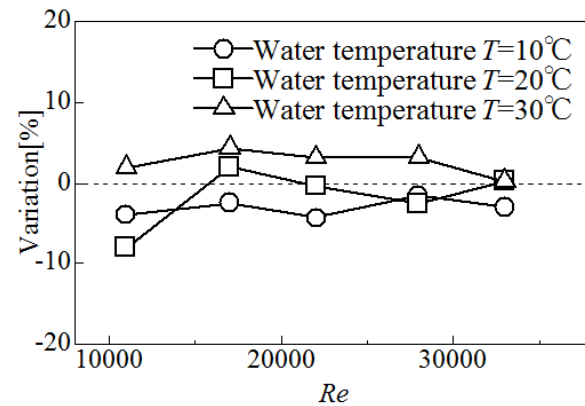
図8に村井ら<sup>(6)</sup>が提案した摩擦抵抗低減メカニズム遷移線図を示す。この摩擦抵抗低減メカニズム遷移線図は, 過去の多数の論文とデータが整理されたもので, 各領域内に記されている  $G$  という値は抵抗低減ゲインという量で, 境界層内にボイド率 1 %の空気を注入すると, 抵抗低減が  $G\%$  得られるという定義によるものである。 $G > 100$ ,  $G=1$ , 1.6, 3.5 である白い領域は, 壁面摩擦, つまり摩擦圧力損失が低減する領域である。一方,  $G \leq -1$  である遷移線図の中央に広がる黒い帯の部分には逆効果の谷といい, 壁面摩擦を増大, つまり摩擦圧力損失が増加する範囲である。



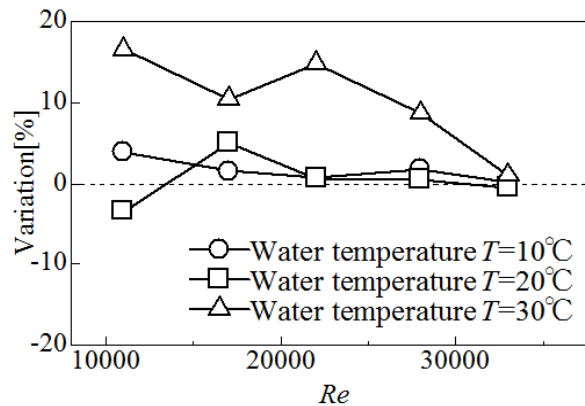
(a) Swirling flow method ( $Q_G=0$  ml/min)



(b) Swirling flow method ( $Q_G=40$  ml/min)



(c) Swirling flow method ( $Q_G=80$  ml/min)



(d) Pressurized dissolution method

図7  $\lambda$  と  $Re$  の関係性

本実験範囲を図8に破線で示す。さらに、拡大し実験結果から得られた摩擦圧力損失の増減の傾向を重ね合わせたものを図9に示す。本研究における実験範囲は、逆効果の谷の境界にあることがわかる。壁面摩擦が、大きく減少する範囲、わずかに減少する範囲および増加する範囲の交点に、本研究における実験範囲があることにより、摩擦圧力損失が増加、低減および変化しないという現象が入り組んで点在している。この摩擦抵抗低減メカニズム遷移線図の境界については研究段階で、不確定であることから境界付近ではどのような現象が起こるか予測することは難しい。本実験において、旋回流方式では摩擦圧力損失低減が得られたが、旋回流方式よりも気泡径が小さい加圧溶解方式では増加した。これは摩擦抵抗低減メカニズム遷移線図の境界が入り組んでいることに起因する<sup>(7)</sup>と考えられる。

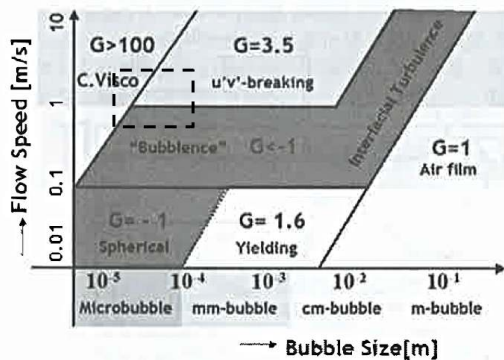


図8 摩擦抵抗低減メカニズム遷移線図<sup>(6)</sup>

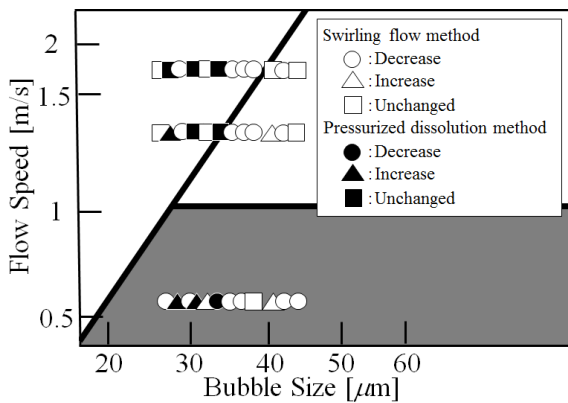


図9 実験結果との照合

### 3.3 速度分布

図10に旋回流方式および加圧溶解方式における、水温  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  の場合の主流方向の流速  $u$  の  $y$  方向の速度分布の測定結果を示す。水単相流と各発生方式によるMB流の速度分布に変化はなく、本実験範囲において、ほぼ等しくなることが確認できた。  $T=20, 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  の場合も、同様の結果が得られた。しかし、特に摩擦圧力損失に大きく影響を及ぼす壁面近傍における速度分布が、計測装置の構造上測定できない。そのため、本研究の測定範囲内において、MBは速度分布に影響を与えていないので、壁面近傍においても影響は与えないと仮定する。よって、式(4)に

おいて速度勾配はせん断応力、つまり摩擦圧力損失に影響しないと考える。

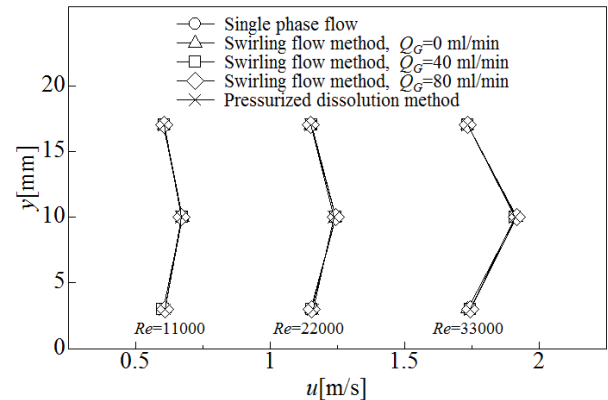


図10 平均速度  $u$  の分布 ( $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

### 3.4 主流方向および垂直方向乱流変動成分

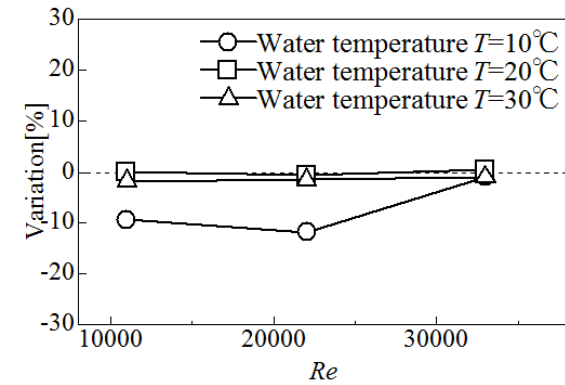
図11に、水単相流とマイクロバブル流における乱流変動成分  $u'$ ,  $v'$  の関係を確認するために、旋回流方式と加圧溶解方式の場合、水単相流の  $(\overline{u'v'})_{sp}$  を基準とした場合の各温度における  $\overline{u'v'}$  の増減率を示す。なお、本来  $-\overline{u'v'}$  は  $u'$  と  $v'$  を同時に測定し、その積の平均から得られる。しかし、本実験装置では、同時測定ができないため乱流変動成分の時間的平均である  $u'$ ,  $v'$  をそれぞれ測定し、その積である  $\overline{u'v'}$  を  $-\overline{u'v'}$  と等しいとみなした。

旋回流方式で発生させたマイクロバブル流の場合、水温  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  では全空気流量においておおよそ  $Re$  数全域で  $\overline{u'v'}$  が減少していることが分かる。水温  $T=20, 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  では、 $Q_G=40\text{ ml/min}$  のみ  $\overline{u'v'}$  の減少が確認でき、 $Q_G=0, 80\text{ ml/min}$  では水単相流とあまり変化はない。一方、加圧溶解方式の場合、 $\overline{u'v'}$  が水単相流と比べ変化がない、もしくは増加しており、特に  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  で最も増加していることが確認できる。

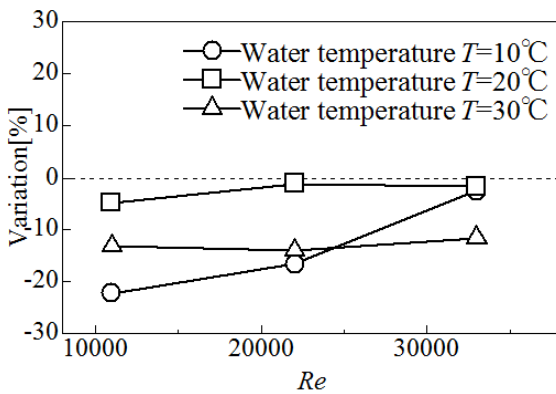
以上より、3.2で示した管摩擦係数  $\lambda$  の増減の傾向と、乱流変動成分  $\overline{u'v'}$  の増減の傾向は、旋回方式によるMB流の場合は低減、加圧溶解方式によるMB流の場合は増加という点で一致しており、せん断応力  $\tau$  つまり摩擦圧力損失は乱流変動成分  $u'$ ,  $v'$  に起因すると考えられる。

### 3.5 摩擦圧力損失と乱流変動成分の関係性

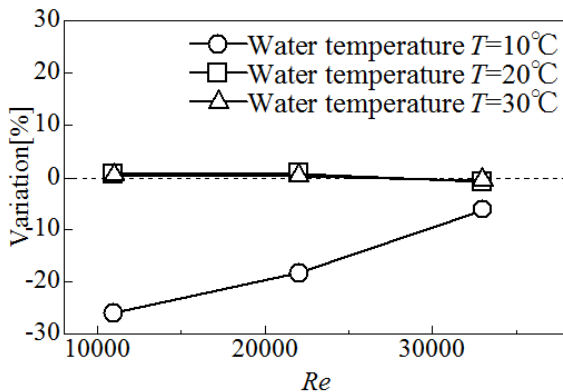
表1に本実験で行った全ての条件に対する、摩擦圧力損失と乱流変動成分の関係性を示す。なお、この表の  $\overline{u'v'}$  は、 $u'$  と  $v'$  に負の相関関係があることから、式(4)における  $-\overline{u'v'}$  と等しいとみなしている。このことから、 $\overline{u'v'}$  の減少は式(4)における  $-\overline{u'v'}$  が減少することになり、せん断応力つまり、摩擦圧力損失も減少する。表を見て分かるように、3.2節で示した管摩擦係数  $\lambda$  の増減の傾向と、3.3節で示した乱流変動成分  $\overline{u'v'}$  の増減の傾向は、あまり変化しない場合を除くと旋回流方式によるマイクロバブル流の場合は低減し、加圧溶解方式によるマイクロバブル流の場合は増加するという点で一致している。式(4)において変数である速度分布、乱流変動成分のうち、マイ



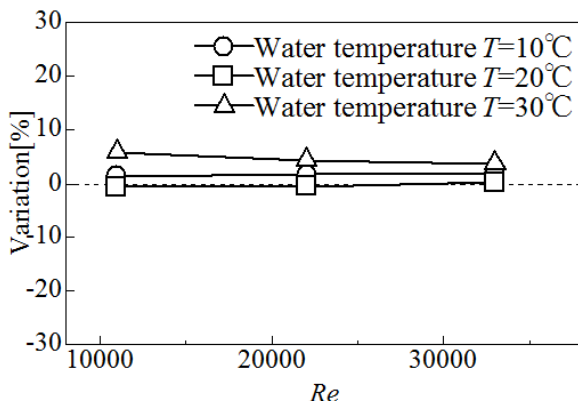
(a)  $Q_G=0$  ml/min



(b)  $Q_G=40$  ml/min



(c)  $Q_G=80$  ml/min



(d) Pressurized dissolution method

図 11  $\overline{u \cdot v}$  の増減率

表 1 摩擦圧力損失と乱流変動成分の関係性

		10°C		20°C		30°C	
		$\lambda$	$\overline{u \cdot v}$	$\lambda$	$\overline{u \cdot v}$	$\lambda$	$\overline{u \cdot v}$
旋回流 方式	$Q_G=0$	減	減	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし
	$Q_G=40$	減	減	減	減	減	減
	$Q_G=80$	減	減	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし
加圧溶解方式		増	増	変化なし	変化なし	増	増

クロバブルが速度分布に影響を与えないことは 3.3 節で述べた。よって、せん断応力  $\tau$ 、つまり摩擦圧力損失の増減は、マイクロバブルによる主流方向乱流変動成分  $u'$  に加え、垂直乱流変動成分  $v'$  にも依存し、その積である  $\overline{u \cdot v}$  の増減によるものであると定性的に明らかとなった<sup>(7)</sup>。

#### 4. 結言

水平矩形管内にマイクロバブルを流動させ、摩擦圧力損失および主流方向、垂直方向乱流変動成分を測定した。その結果、以下の結論<sup>(7)</sup>を得た。

- (1) 旋回流方式の場合、摩擦圧力損失の低減率は空気量や温度に依存するものの、約 3~7% 低減する。ただし、 $T=20^\circ\text{C}$  では低減効果は小さくなる。
- (2) 加圧溶解方式の場合、マイクロバブルによって摩擦圧力損失は増加、もしくは変化しない。
- (3) マイクロバブルは測定範囲内で流体中の速度分布に影響を与えない。
- (4) 乱流変動成分  $\overline{u \cdot v}$  と管摩擦係数  $\lambda$  の増減の傾向は一致する。

#### 参考文献

- (1) 川島ほか:「マイクロバブルによる摩擦抵抗低減に関する実験的研究」, ながれ 25, pp.209-217, 2006.
- (2) Murai, Y. *et al.*: "Turbulent shear flow profile in a horizontal bubbly channel flow", 6th Symp. on Smart Control of Turbulence, pp.289-295, 2005.
- (3) 星野ほか:「水平管内マイクロバブル乱流の摩擦圧力損失特性」, 混相流学会年会講演会, pp.224-227, 2009.
- (4) 佐藤ほか:「気泡流の液速度分布に関する研究」, 機論, 3215 巻 3223 号, pp.41-351, 1975.
- (5) 前田ほか:「マイクロバブルによる摩擦圧力損失低減に関する研究」, 混相流学会年会講演会, pp.246-247, 2011.
- (6) 村井祐一:「マイクロバブルが乱流渦の成長を選択的に鎮圧する現象」, 混相流学会年会講演会, pp.244-245, 2011.
- (7) 安田ほか:「水平矩形管内におけるマイクロバブルによる摩擦圧力損失に関する研究」, 混相流学会年会講演会, pp.186-187, 2012.