

# 水平チャンネル内マイクロバブル流の摩擦圧力損失特性 —マイクロバブル水の物理化学的特性—

新海藍菜\* 安田貴央\* 和田徳幸\*\* 鈴木隆起\*\*\* 赤対秀明\*\*\*\*

## Frictional Pressure Drop of Microbubble Flow in a Horizontal Channel -Physicochemical Properties of the Microbubble Water-

Aina SHINKAI\* Takahisa YASUDA\* Noriyuki WADA\*\*  
Takayuki SUZUKI\*\*\* Hideaki SHAKUTSUI\*\*\*\*

### ABSTRACT

Bubbles of micro-order diameter are called microbubbles, and they have particular physicochemical characteristics. One of the characteristics is reduction of frictional pressure drop. Previous studies have reported that the frictional pressure drop can be decreased by microbubble and it depends on the microbubble size or generators. However, the mechanism has not been clarified. In the present study, we focused on the physicochemical characteristics and investigated the influence to frictional pressure drop. In the experiment, the physicochemical characteristics such as DO, density, surface tension and kinetic viscosity are measured. And the pressure drop of microbubble water is also measured in the horizontal channel. The microbubble is generated by swirling flow method, pressurized dissolution method, loop flow method and H type, which is developed by Ariake National College of Technology. As the results, the reduction of frictional pressure drop is confirmed by swirling flow method. Measured physicochemical characteristics are different in each generator. Density and viscosity are nearly-constant in all generators. Therefore frictional pressure drop don't have relationship to density and viscosity.

*Keywords:* microbubble, physicochemical property, frictional pressure drop

### 1. 緒言

マイクロバブル(以下, MB と記す)は, 発生時において十～数十 $\mu\text{m}$ の気泡径を有する気泡のことを指し, 気泡径が極めて小さいことから数 mm 程度の気泡では見られない様々な物理化学的特性を有している。

MB に関する研究は, 1990 年代後半から盛んに行われるようになり, 現在では幅広い分野に拡大している。その中でも工業的な分野においては, MB を用いた船舶推進時の摩擦圧力損失低減効果についての研究が進められている。上入佐ら<sup>(1)</sup>は, 船舶推進時に船舶前方の船底から MB を吹き込むことによって MB を発生させるために必要なエネルギーを考慮した正味のエネルギー削減率が数%得られることを報告している。MB による摩擦圧力損失低減効果に関する研究では, 円管

や矩形管内において MB を流動させることでその基本特性が研究され, 十～数十%の低減効果が報告されている。一方, 摩擦圧力損失低減のメカニズムは乱流変動成分の抑制に起因するせん断応力の低減と関係づけられているものの, その詳細は明らかにされていない。本一連の研究においても, 円管内の MB 流に対して, 気泡径や乱流変動成分の測定を行い, 乱流変動成分とせん断応力を関連付けて, 摩擦圧力損失低減に関する検討が行われている<sup>(2)</sup>。しかし, これらの摩擦圧力損失に関する研究の中では, 物理化学的特性の影響は考慮されておらず(変化しないとされている), 特に粘度や密度が MB によって変化する場合, 摩擦圧力損失に関して大きな影響をもつ可能性がある。

MB 水の物理化学的特性に関しては, これまで pH, DO(溶存酸素量), 表面張力は時間ごとに変化するという報告や, 変化しないという報告, また気泡径については発生方式に依存し, 物理化学的特性が気泡径によって異なるという報告があり, 物理化学的特性は発生

\* 専攻科 機械システム工学専攻

\*\* 機械工学科

\*\*\* 機械工学科 講師

\*\*\*\* 機械工学科 教授

方式や環境などの様々な要因に依存する可能性がある。

そこで本研究では4種類のMB発生装置を用い、同一環境下においてMBの気泡径やMB水のDO、密度、表面張力、動粘度の物理化学的特性を測定し、それらのバブリング時間に対する変化特性を調べる。さらに、各発生装置による摩擦圧力損失の特性を測定するとともに、星野ら<sup>(3)</sup>が提案しているMBにおける摩擦圧力損失低減メカニズムの提案式から粘度および密度の変化に着目し、摩擦圧力損失への影響について検討する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 MB発生装置 本研究では、超高速旋回方式(ナノプラネット研究所製, M2-LM), 加圧溶解方式(三相電機社製, baboonMBT-2011), ループ流方式(OKエンジニアリング社製, OKE-MATRIX-MB01), H型方式(有明高専開発)<sup>(4)</sup>の4種類のMB発生装置を用いた。

超高速旋回方式では、水流量  $Q_L=17$  L/min, 空気流量  $Q_G=0, 40, 80$  mL/minとした。ループ流方式では、この発生器において最大流量である  $Q_L=8$  L/minを用い、 $Q_G=0, 150\sim 400$  mL/minとした。空気流量に幅があるのは自吸時に脈動していたため、これは目視によりMBが多く確認できた流量である。H型方式では、超高速旋回方式と合わせ  $Q_L=17$  L/min,  $Q_G=40$  mL/minとした。なお、それぞれでMBの発生量は異なると思われるが、まずはその発生器での特性を調べる。

2.2 MB水の物理化学的特性 4種類のMB発生装置において、気泡径の測定とDO、密度、表面張力、動粘度の物理化学的特性の測定を行う。各物理化学的特性は、作動流体である水道水を水槽(容量35L)に給水し、最大9時間のバブリング時間に対して3時間ごとに試料を採取した。同一の試料に対して3回の測定を行い、その平均値を用いた。なお、3回のデータのばらつきは $\pm 1\%$ 以内であった。水温は冷却器(ゼンスイ製, ZE-1300E)によって温度  $T=20^\circ\text{C}$ 一定( $\pm 0.6^\circ\text{C}$ )に保たれ、測定は3日間異なる日時で実施した。

気泡径の測定には、高速度ビデオカメラ(キーエンス製, VW9000, 倍率300倍, フレームレート4000fps)を用いた。焦点のあったMBの直径を測定し、500個のデータを採取した。DOはDO計(東亜電波工業製, DO-11P, 測定精度0.2%未満)、密度は標準比重計(安藤計器製工所製, JIS-B 7525 19本組標準比重計, 測定精度0.2%未満)、表面張力はデュヌイ表面張力試験器(伊藤製作所製, 測定精度0.2%未満)、動粘度は、毛細管粘度計(Ubbelohde型, 測定精度0.01%未満)を用いて測定した。なお、粘度については、密度と動粘度から算出する。

2.3 摩擦圧力損失 星野ら<sup>(3)</sup>は一般的な気液二相流におけるせん断応力の関係式<sup>(5)</sup>をもとに、気泡が十分小さく流れに対して影響しない、物性値は一定と仮定することでMB流におけるせん断応力を提案している。

$$\tau = \mu_L \frac{du}{dy} - \rho_L \overline{u'v'} \tag{1}$$

ここで、 $\tau$ は壁面せん断応力、 $\mu_L$ は液相の粘度、 $\rho_L$ は液相の密度、 $du/dy$ は速度勾配、 $u', v'$ は液相速度の変動成分( $u, v$ は主流および垂直方向成分)、 $\rho_L \overline{u'v'}$ は乱流の速度変動による応力である。

これまでの研究では、粘度および密度を一定とし、壁面せん断応力の検討が行われているが、粘度や密度は発生方式によって変わるという報告<sup>(4)</sup>もある。そこで、本研究では、各MB発生装置において摩擦圧力損失低減効果を確認するとともに、粘度や密度の変化の割合が式(1)における壁面せん断応力 $\tau$ におよぼす影響について評価する。

Fig.1に実験装置の概略を示す。試験流路①は全長  $L=6$  mの矩形管(幅  $W=50$  mm×高さ  $H=20$  mm)である。給水タンク②から供給される作動流体は、混合部⑥、試験流路①、排水タンク⑫を経由し、給水タンク②へと循環する。水温は冷却器④により温度  $T=20^\circ\text{C}$ は一定( $\pm 0.5^\circ\text{C}$ )に保たれた。試験流路内の摩擦圧力損失は、流路入口( $x=0$  m)から  $x=2.5$  mおよび  $x=5.5$  mの位置に設けた静圧測定孔よりマノメータを用いて測定した。

レイノルズ数  $Re(=ud/\nu)$ は8000~65000の範囲で測定を行った。なお、作動流体は水道水を用い、水の動粘度 $\nu$ は  $1.004 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s(温度  $20^\circ\text{C}$ )、等価直径  $d$ は28.6 mm、試験区間長  $l$ は3 m、主流方向の平均流速  $u$ は0.28~1.83 m/sである。

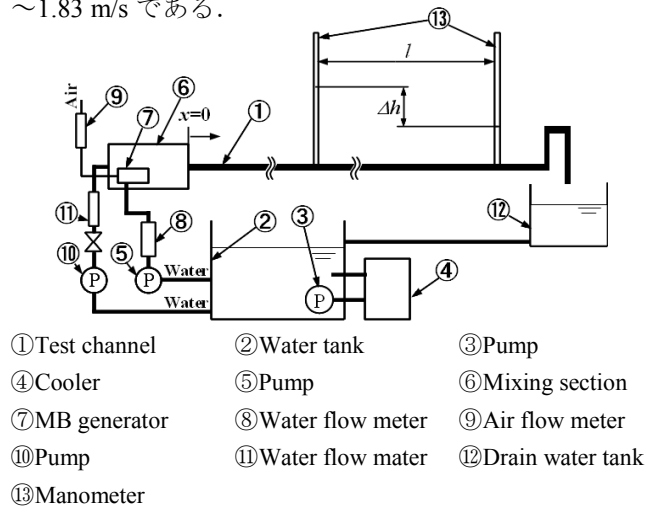


Fig. 1 Experimental equipment for measurement

3. 実験結果および考察

3.1 気泡径 Table 1にピーク位置、ピーク高さ、平均気泡径、最小気泡径、最大気泡径を示す。Fig. 2に4種類のMB発生装置に対する気泡径分布を示す。発生装置によってピーク位置が異なることが確認できる。超高速旋回方式では、各空気流量でピーク高さは異なるものの、ピーク位置は同じ  $20\mu\text{m}$ である。加圧溶解方式では、 $30\mu\text{m}$ にピーク位置があり、ピーク高さは最も高い45%になっている。ループ流方式では、空気流

Table 1 Characteristics of bubble diameter

Microbubble generator		Peak position [ $\mu\text{m}$ ]	Peak value [%]	Average [ $\mu\text{m}$ ]	Minimum [ $\mu\text{m}$ ]	Maximum [ $\mu\text{m}$ ]
Swirling flow method	$Q_G=0$ mL/min	20	23.0	39.4	6.7	155.8
	$Q_G=40$ mL/min	20	23.3	41.0	6.7	246.7
	$Q_G=80$ mL/min	20	19.2	44.4	6.1	223.0
Pressurized dissolution method		30	45.0	34.3	6.1	78.8
Loop flow method	$Q_G=0$ mL/min	10	36.2	26.6	6.1	84.8
	$Q_G=150$ mL/min	40	20.0	62.8	9.2	466.7
H type	$Q_G=40$ mL/min	30	25.2	46.1	6.5	313.0

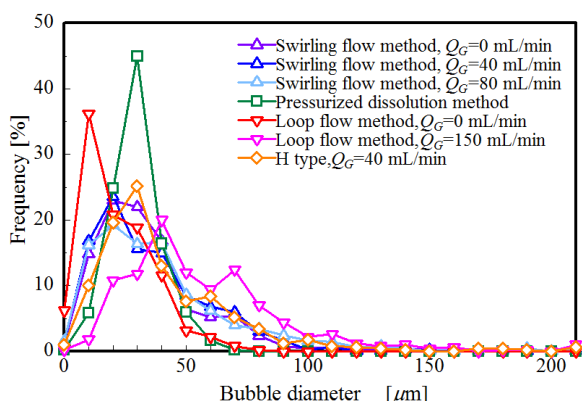


Fig. 2 Distribution of bubble diameter

量によって、ピーク位置、ピーク高さが異なる。空気流量  $Q_G=0$  mL/min では、 $10\mu\text{m}$  で 36.2 %、 $Q_G=150$  mL/min では、 $40\mu\text{m}$  で 20 % であった。H 型方式についても、ピーク位置は  $30\mu\text{m}$ 、ピーク高さは 25.2 % である。平均気泡径はループ流方式において  $Q_G=0$  mL/min のとき最小となり、 $Q_G=150$  mL/min のとき最大となった。またそれぞれのピーク位置も最小、最大となっている。最大気泡径は、ループ流方式の  $Q_G=150$  mL/min の  $466.7\mu\text{m}$  であり、最少気泡径は、測定の限界であった  $6\mu\text{m}$  あたりに集中している。超高速旋回方式とループ流方式では、空気流量が多くなるにつれ気泡径も大きくなっている。

### 3.2 MB 水の物理化学的特性

**3.2.1 DO** Fig. 3 にバブリング時間に対する 4 種類の発生装置による MB 水の DO の変化率を示す。このとき、測定開始時の値(0 時間)を 1.00(破線)とする。超高速旋回方式では、空気流量  $Q_G=40, 80$  mL/min のほとんどの場合において約 5 % 増加し、 $Q_G=0$  mL/min では最大約 10 % 減少している。 $Q_G=0$  mL/min は空気を供給していないため、キャビテーションによって MB が発生している。そのため、MB が水面から抜けることで DO も減少していると考えられる。ループ流方式では、1 つを除いて減少しており、空気を供給している  $Q_G=150$  mL/min でも減少している。 $Q_G=0$  mL/min については超高速旋回方式と同様に水面から抜けると考えられ、 $Q_G=150$  mL/min についても気泡径が他の発生装置に比べ大きいことから、水面から抜けやすいのではないかと考えられる。また、加圧溶解方式と H 型方式

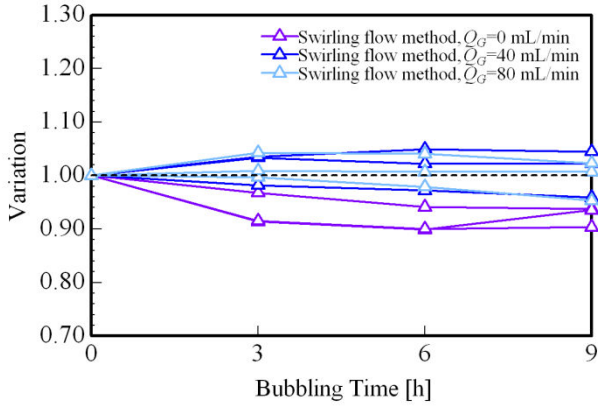
では、3 時間後に加圧溶解方式で約 12~19 %、H 型方式で約 8~11 % と、他の発生方式に比べ大きく増加することが確認できる。なお、3 時間以降はほぼ一定である。

**3.2.2 密度** Fig. 4 にバブリング時間に対する 4 種類の発生装置による MB 水の密度の変化率を示す。全発生装置について、 $\pm 0.5$  % 以内の変化であるため、ほぼ一定であるとみなすことができる。

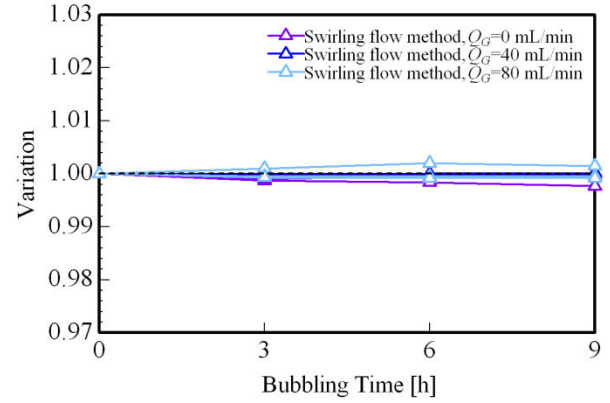
**3.2.3 表面張力** Fig. 5 にバブリング時間に対する 4 種類の発生装置による MB 水の表面張力の変化率を示す。超高速旋回方式において、3 時間後に、空気流量  $Q_G=0$  mL/min では約 3~8 %、 $Q_G=40$  mL/min では約 2~4 % 減少した。加圧溶解方式では、3 時間後に約 4~7 % 減少したが、その後の変動は日によって異なる。ループ流方式でも、3 時間後に約 6~12 % の増加と約 3~7 % の減少に分かれ、その後の変動は、ばらついている。これはコンタミネーションによる影響ではないかと考えられる。H 型方式では、9 時間後に約 16~23 % 減少している。氷室らによる研究<sup>(4)</sup>では、6 時間で約 2 % 減少している。しかし、今回は最小でも約 16 % 減少しており、氷室らよりも大きな減少が見られた。これは、発生装置の大きさやポンプなどの実験装置が異なることによる違いであると考えられる。

**3.2.4 動粘度** Fig. 6 にバブリング時間に対する 4 種類の発生装置による MB 水の動粘度の変化率を示す。超高速旋回方式は、空気流量  $Q_G=0$  mL/min の 1 つを除いて、 $\pm 1$  % 以内の変化であるため、ほぼ一定であるとみなすことができる。加圧溶解方式、ループ流方式では、9 時間後には  $-1$  % 以内の変化に収まっているため、ほぼ一定であるとみなすことができる。H 型方式においては、ほぼ一定である。氷室らによる研究<sup>(4)</sup>では、6 時間で約 5 % 減少することから、この結果は一致しない。これについても、発生装置の大きさやポンプなどの実験状況が異なることによる違いであると考えられる。また、超高速旋回方式、ループ流方式では、空気流量による変化はあまり見られなかった。

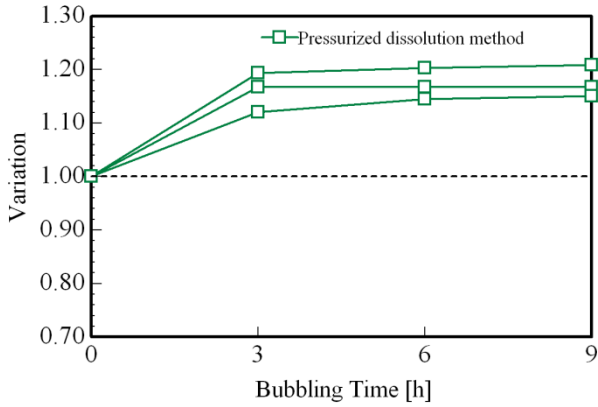
これらの結果より、本実験装置および発生環境では、発生方式によって MB 水の物理化学的特性は異なるといえる。また、動粘度と密度がほぼ一定であることから、粘度についてもほぼ一定であると考えられる。



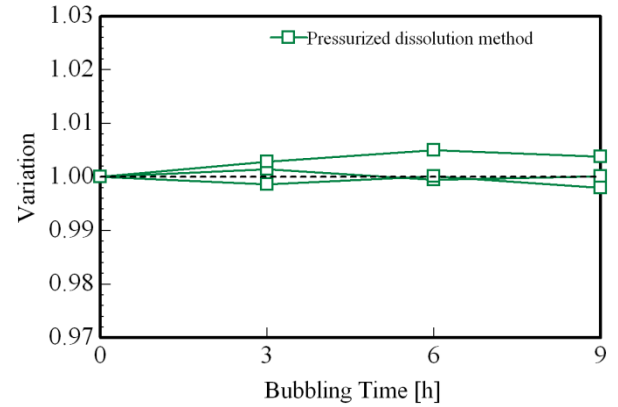
(a) Swirling flow method



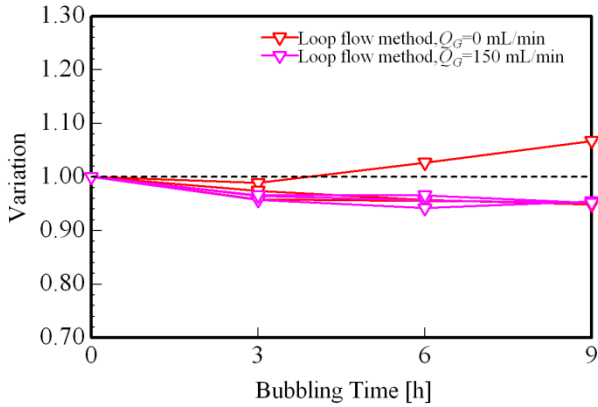
(a) Swirling flow method



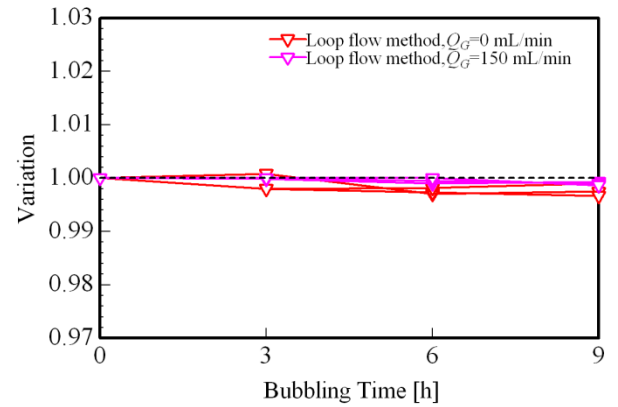
(b) Pressurized dissolution method



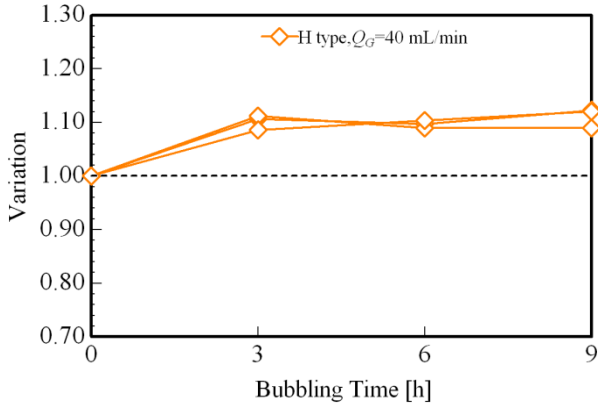
(b) Pressurized dissolution method



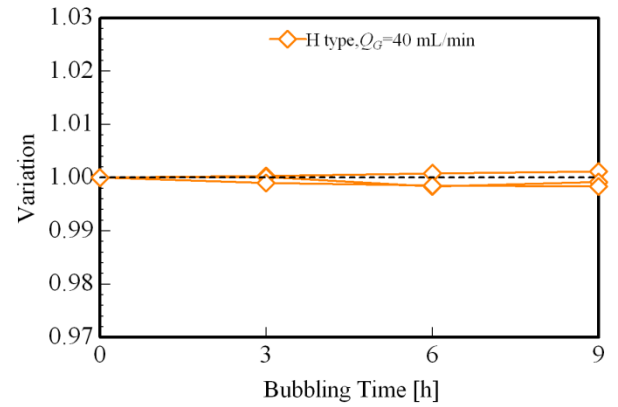
(c) Loop flow method



(c) Loop flow method



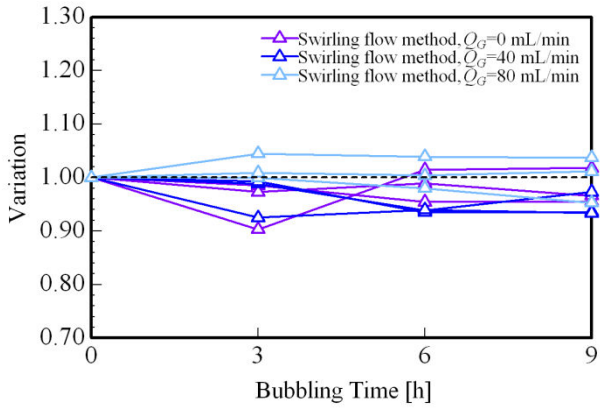
(d) H type



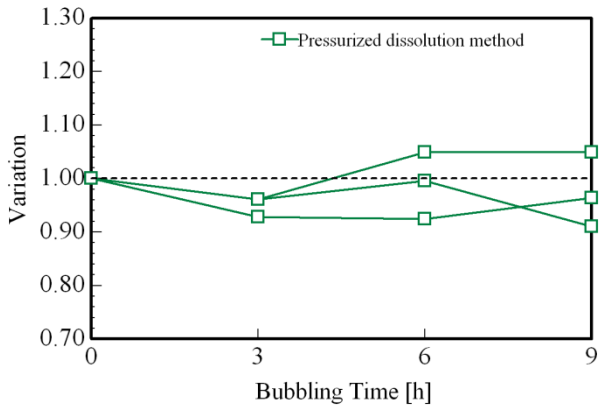
(d) H type

Fig. 3 Variation of dissolved oxygen

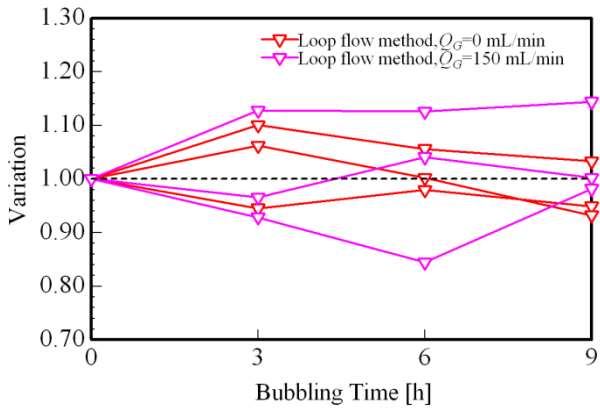
Fig. 4 Variation of density



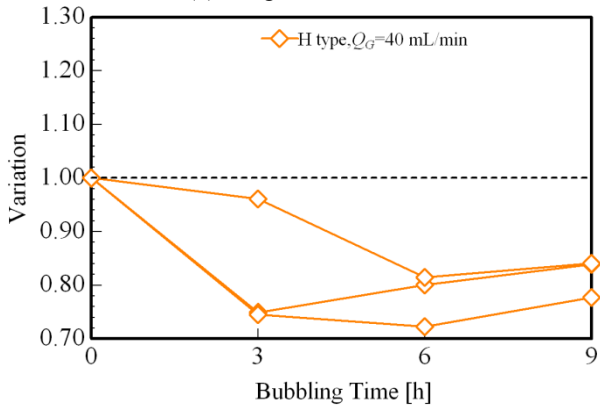
(a) Swirling flow method



(b) Pressurized dissolution method

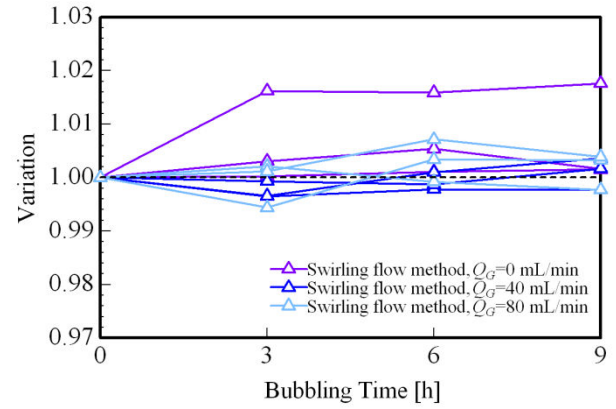


(c) Loop flow method

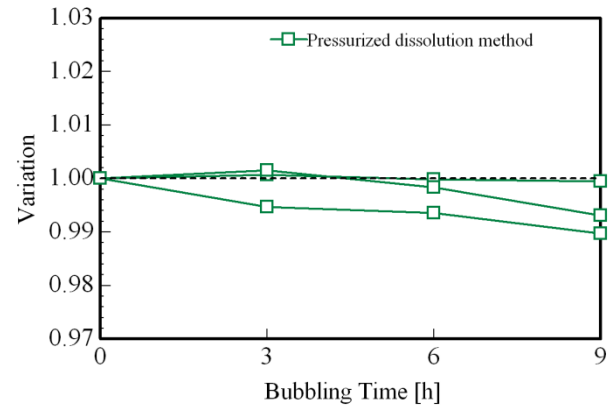


(d) H type

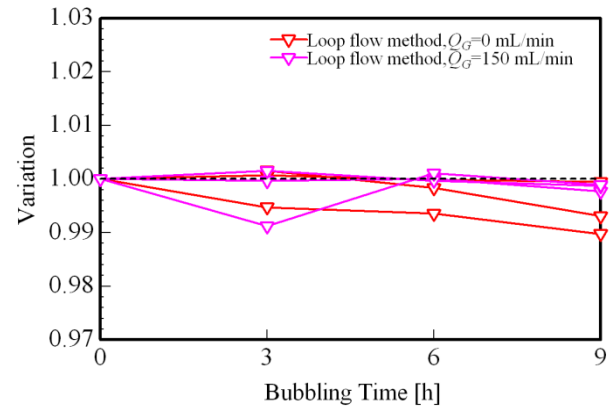
Fig. 5 Variation of surface tension



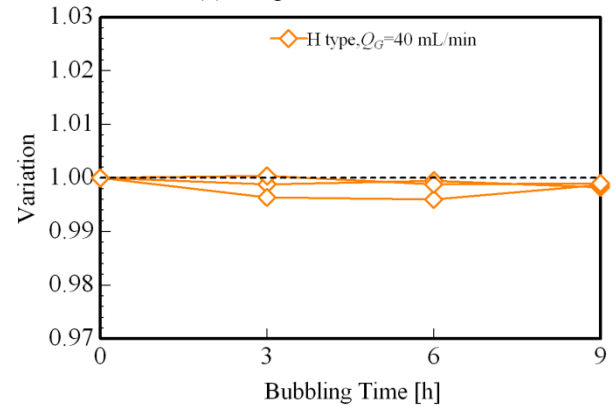
(a) Swirling flow method



(b) Pressurized dissolution method



(c) Loop flow method



(d) H type

Fig. 6 Variation of kinetic viscosity

**3.3 摩擦圧力損失** Fig. 7 に水単相流を 1.00 (破線) とした場合のMB流のレイノルズ数  $Re$  に対する管摩擦係数  $\lambda$  の変化率を示す. なお, バブリング時間は 1 時間である. 超高速旋回方式において,  $Re < 30000$  では空気流量によって異なった変動を示したが  $30000 < Re < 50000$  では各空気流量において約 2 %の低減が確認できた. 加圧溶解方式では水単相流に比べ, ほぼ  $Re$  全域で  $\lambda$  の変化は見られなかった. ループ流方式では, 各空気流量において  $Re$  全域で増加した.  $Re$  が増加するごとに増加率も増加し, 空気流量  $Q_G=0$  mL/min では最大約 7 %,  $Q_G=150$  mL/min では最大 8 %増加した. H 型方式でも最大 8 %増加した.

これまで, 加圧や減圧などの圧力効果によって発生させたMBと強制外力によってMBを発生させたものでは摩擦圧力損失効果が異なり, 後者ではMBの気泡径が小さいほど摩擦圧力損失低減効果が增大するという報告がある<sup>(2)</sup>. 加圧溶解方式とループ流方式の  $Q_G=0$  mL/min では, 圧力効果によってMBを発生させているため, 平均気泡径が小さいにもかかわらず(Table 1 参照), 摩擦圧力損失低減効果は得られなかった. これらにより, MBによる摩擦圧力損失低減率は気泡径のみに依存するのではなく, MBの発生原理に起因すると考えられる. また, 3.2 節より粘度と密度はほぼ一定であることから, 2.3 節の式(1)において粘度と密度を一定として扱うことは妥当である. そのため, 摩擦圧力損失低減効果を評価するためには, 乱流の速度変動による応力や速度勾配が重要であると考えられる.

**4. 結言**

本研究では, 以下の結論を得た.

- (1)発生方式によって気泡径分布および物理化学的特性のバブリング時間に対する様相が異なった.
- (2)密度と動粘度は, 各発生装置において, ほぼ一定である. DOは, 加圧溶解方式とH型方式では大きく増加, 表面張力は,H型方式のみで大きく減少した.
- (3)摩擦圧力損失は発生方式に依存する. また, 気泡径の大きさも発生方式に依存するが, 摩擦圧力損失の低減とは整合性がなく, 気泡径のみに依存しない.
- (4)MB流における摩擦圧力損失低減メカニズムの提案式について, 粘度と密度を一定として扱うことは妥当である.

**参考文献**

- (1)上入佐ら:「マイクロバブルによる船舶抵抗軽減」, 第2回マイクロ・ナノバブル技術シンポジウム, pp. 7-12, 2007.
- (2)前田ら:「マイクロバブルによる摩擦圧力損失低減に関する研究」, 日本混相流学会年会講演会講演論文集, pp. 246-247, 2011.
- (3)星野ら:「水平管内マイクロバブル乱流の摩擦圧力損

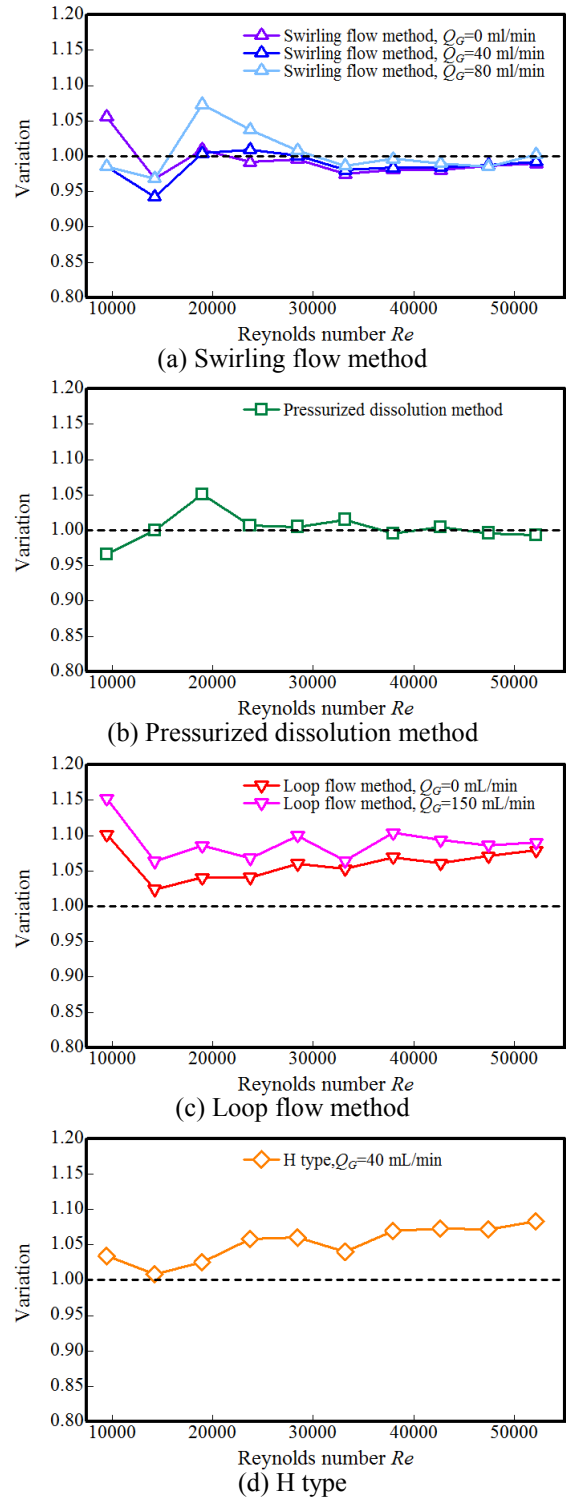


Fig. 7 Variation of  $\lambda$

- 失特性」, 日本混相流学会年会講演会講演論文集, pp. 224-227, 2009.
- (4)氷室:「マイクロ・ナノバブルの物理化学的性質と機能性」, 建設コンサルタントのためのマイクロ・ナノバブル技術フォーラム講演論文集, pp. 11-21, 2005.
- (5)佐藤ら:「気泡流の液速度分布に関する研究」, 機械学会論文集, 41 巻 351 号, pp. 3215-3223, 1975.