学生会員	山田	麗徳
学生会員	金子	公久
学生会員	坂入	信之
正会員	京藤	敏達
	学生会員 学生会員 学生会員 正会員	学生会員山田学生会員金子学生会員坂入正会員京藤

1.はじめに

水環境の改善において、マイクロバブルの果たす 役割は重要である。マイクロバブルとは、発生時に おいて気泡径が10~数10 [µm]である微細気泡のこ とであり、湖沼、河川あるいは内湾等の閉鎖水域に おける水質浄化、船舶の抵抗低減、水産養殖などの 幅広い分野で非常に期待される物質である。

本研究では、旋回流を利用したマイクロバブル生 成法を流体力学的に解明することを目的とした。そ の結果、マイクロバブルの生成には渦崩壊と気泡の ソーティングという2つの主要な機構が必要である ことが判明した。ここでは、数値計算により気泡の ソーティング機構の再現を試みた。また、これらの 現象を定性的に把握する流体力学モデルについて考 察した。

### 2.数值解析手法



図1 マイクロバブル発生装置 図1は気泡のソーティング機構を示したものであ る。左方から集中した旋回流が流入し、回転軸中心 には送入した空気が渦となり集積する。右方は流出 ロで、生成されたマイクロバブルが排出される。こ のうち特に楕円で囲まれた領域を解析するために、 計算モデルとして図2に示すような円柱形の閉じた 容器を考える。内部は水で満たされており、z=0に おいて壁面が角速度 で剛体回転している。また、 その他の周囲の壁面は固定されている。



# 図2 計算モデル

#### 基礎方程式は軸対象・非圧縮の渦度方程式

1	$\partial^2 \Psi$	$\partial$ (1	$\partial \Psi$	- <i>m</i> (	1)
r	$\partial z^2$	$\partial r \langle r$	$\partial r$	- w	-,

$$\frac{D\Gamma}{Dt} = \frac{1}{\text{Re}} \left[ r \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial\Gamma}{\partial r} \right\} + \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial z^2} \right]$$
(2)

$$\frac{D\omega}{Dt} = \frac{1}{r^3} \frac{\partial (\Gamma^2)}{\partial z} + \frac{u\omega}{r} + \frac{1}{\text{Re}} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\omega) \right\} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right]$$
(3)

ただし、 
$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial r} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

と、気泡の亚進運動万程式  

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{2} V(u_b - u) \right] - \frac{V}{2r} v_b(v_b - v) = -V \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{\pi}{8} C_D \left( \frac{\operatorname{Re}_p}{\operatorname{Re}} \right)$$
(4)

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{2} V(v_b - v) \right] - \frac{V}{2r} v_b (u_b - u) = -\frac{V}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} - \frac{\pi}{8} C_D \left( \frac{\mathrm{Re}_p}{\mathrm{Re}} \right)$$
(5)

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{1}{2}V(w_b - w)\right] = -V\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\pi}{8}C_D\left(\frac{\mathrm{Re}_p}{\mathrm{Re}}\right)$$
(6)

ただし、
$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_b \frac{\partial}{\partial r} + w_b \frac{\partial}{\partial z}$$
である。用いた記号を以下に示す。

キーワード:旋回流、マイクロバブル、渦崩壊 連絡先:〒305-8577 つくば市天王台 1-1-1 筑波大学 工学システム学類 E-mail:<u>yamada@surface.kz.tsukuba.ac.jp</u> : 渦度、 : 流れ関数、 : 循環(=rv)
Re: レイノルズ数(=r<sup>2</sup> / )
Re<sub>p</sub>: 粒子レイノルズ数(=d(Ū<sub>b</sub> - Ū)/ )
Ū : 速度ベクトル、 : 動粘性係数
R: 容器の半径、P: 圧力
d: 気泡の直径、V: 気泡の体積、C<sub>D</sub>: 抵抗係数
添え字 b: 気泡
式(1) - (3)により流れ関数を求め、それにより流速・
圧力勾配を求める。得られた流速・圧力勾配と式(4)

- (6)により気泡の加速度(*dU*<sup>*b*</sup>/*dt*)を求める。

軸対称流であることより、計算領域は図 2 に示し た領域とした。計算条件は = 0.01[cm<sup>2</sup>/s]、Re = 2000、 R = 2 [cm]、アスペクト比を 2.6 とした。初期条件は 静止状態、壁面における境界条件は粘着条件を基本 とした。すなわち、壁面において $\vec{U} = 0$ 、 = 0 であ る。また、気泡運動の解析ではストークス流れを仮 定し  $C_D = 24 / Re_p$ とした。計算結果よりこの条件下 において、 $|Re_p| < 1$ が常に成り立つことを確認した。

# 3.計算結果





図5 気泡の加速度(d=600[µm])

図 3 は式(1) - (3)を定常流に収束するまで計算し た流速ベクトルである。

図4,5はそれぞれ直径が200、600[µm]の気泡の 加速度を示したものである。これは定常流中で初速 度0の気泡に働く加速度を式(4)-(6)より計算したも のである。

図3、4より、d=200[µm]において気泡は流れの 方向に力が働く。一方図5より、d=600[µm]におい て式(4)-(6)第3項が卓越するため回転軸中心方向 に力が働く。

# 4.おわりに

今回のシミュレーションにより、レイノルズ数 2000の流れにおける気泡の運動は、気泡径が600[µ m]以上であれば回転軸中心に集積する傾向があり、 200[µm]以下であれば流れにのって外側にかたよ る傾向があることが明らかとなった。したがって、 図1のような装置を用いてマイクロバブルを生成す ると比較的大きな気泡は回転軸中心に集積し、マイ クロバブル等の小さな気泡は管路の外側にかたよる と考えられる。これは、実験により観測された現象 と一致する。

## 参考文献

1)D. Darmofal, Comparisons of experimental and numerical results for axisymmetric vortex breakdown in pipes, Computers & Fluids, Vol. 25, No4, pp. 353-371, 1996.

2)J. N. Sørensen and E. A. Christensen, Direct numerical simulation of rotating fluid flow in a closed cylinder, Phys. Fluids, Vol. 7, No. 4, pp. 764-778, 1995.