



高粘性液体浴内の旋回気泡噴流発生に関する一考察

井口 学*・玉森 匠*²・設楽 守良*²・井口 大亮*³

Discussion on the Occurrence of Swirl Motion of Bubbling Jet in Highly Viscous Bath

Manabu IGUCHI, Taku TAMAMORI, Moriyoshi SHITARA and Daisuke IGUCHI

1. 緒言

著者らは¹⁾、スラリー等、高粘性汚水の浄化プロセスにおける液の効率的な混合・攪拌を目的として、機械式攪拌の代わりに深水波型の旋回気泡噴流²⁾を用いるプロセスを提案している。前報では³⁾、動粘度の大きく異なるシリコンオイルを用いたモデル実験を行い、円筒浴内で気泡噴流の旋回の生じる条件、旋回周期、振幅、旋回開始時間、旋回終了時間を測定し、実験式を提案した。対象とした実験条件下では、シリコンオイルの動粘度 ν が $0.10 \text{ cm}^2/\text{s}$ よりも小さいとき、気泡噴流の旋回現象の生じる領域は液体の動粘度の影響を受けないが、動粘度の増加につれて狭くなることが分かった。本報告では、発生領域の境界に及ぼす動粘度の影響を調査した結果について述べる。なお、実験装置と方法については前報³⁾に詳しいが、要点を簡潔に述べておく。

実験装置の概要をFig. 1に示す。容器は、内径 D が130, 150, 200 mmの3種類のアクリル樹脂製透明円筒容器である。空気は容器底部中心に設置した内径 d_m が2 mmの単孔ノズルから吹き込まれる。液体には水および $0.10 \text{ cm}^2/\text{s}$, $0.50 \text{ cm}^2/\text{s}$, $1.00 \text{ cm}^2/\text{s}$ と動粘度の異なる3種類のシリコンオイルを用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 旋回発生領域

Fig. 2~4に、3種類の容器における旋回発生領域をアスペクト比 H_L/D とガス流量 Q_g に対して示す。図中の実線と破線は、水の浴中において旋回現象が発生する領域の境界に対して前に提案した実験式である⁴⁾。

(1) 実線

$$\log(H_L/D) = 0.05 - 1.35(X+6)/[\exp(X+5)] \quad (1)$$

$$X = \log We \quad (2)$$

$$We = \rho_L Q_g^2 / (\sigma_L D^3) \quad (3)$$

(2) 破線

$$H_L/D = 0.3 \quad (4)$$

ここで H_L は浴深、 We はウエーバー数、 ρ_L は液体密度、 σ_L は表面張力である。これらの図は、ある一定のガス流量において、アスペクト比を大きくしていくと気泡噴流の旋回現象が現れるが、さらにアスペクト比が大きくなると、旋回現象が起こらなくなることを示している。なお、図中の一点鎖線と二点鎖線は後で導かれる実験式から計算した値を表しており、説明は後節に譲る。

旋回が停止する境界を示すアスペクト比の測定値はある程度ばらついてはいるが、水の浴中を上昇する気泡噴流の旋回現象に対して提案された実験式(1)の周りに分布しており、本実験の範囲では動粘度の影響は無いと判断した。一方、旋回現象の現れる境界に関しては、水とシリコンオイル $0.10 \text{ cm}^2/\text{s}$ の境界は互いにほぼ一致しており、破線で表した実験式(4)によって近似できる。しかしながら、液体の動粘度が大きくなると、この境界は明らかに上方に移動

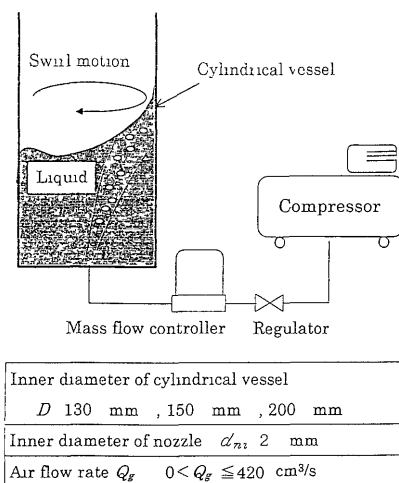


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

平成16年4月21日受付 平成16年10月28日受理 (Received on Apr 21, 2004, Accepted on Oct 28, 2004)

* 北海道大学大学院工学研究科 (Visiting Researcher of Hokkaido University, North 13 West 8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

* 2 (株) ヒューエンス (Huens Co., Ltd.)

* 3 北海道大学大学院研究生 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

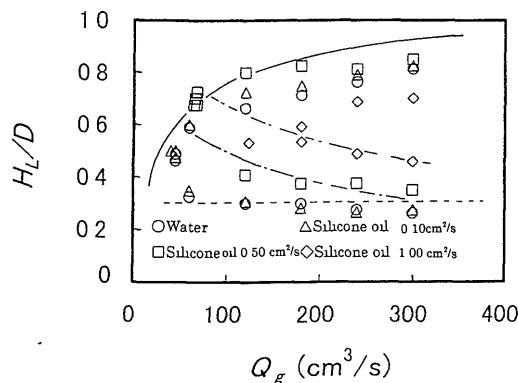


Fig. 2. The occurrence region of swirl motion for $D=130$ mm and $d_{ni}=2$ mm.

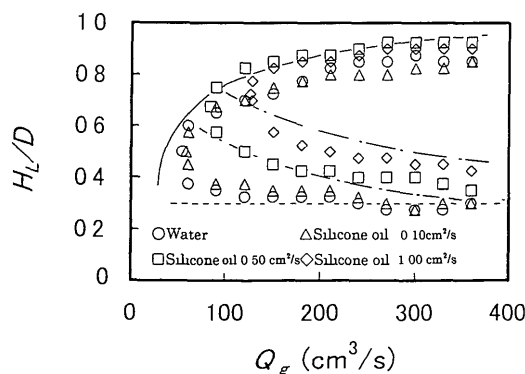


Fig. 3. The occurrence region of swirl motion for $D=150$ mm and $d_{ni}=2$ mm.

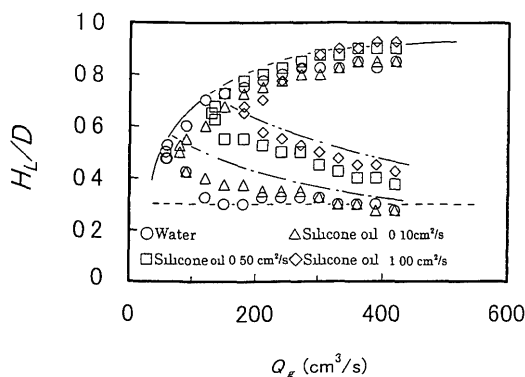


Fig. 4. The occurrence region of swirl motion for $D=200$ mm and $d_{ni}=2$ mm.

している。これは、前報でも述べたように³⁾、ノズル出口で生成する気泡の形状が回転だ円体がくずれたような形 (Wobbling) から弾丸状の形となり、しかも気泡の半径方向への分散が小さくなって、いわゆるチャネリングが生じ、気泡の上昇領域は浴の中心軸近傍に局在化するためである⁵⁾。以下、この境界の予測法について述べる。

3.2 旋回発生領域の境界の予測

著者らは前に、水の浴中で気泡噴流が旋回する領域の境界に対する予測法を提案した⁶⁾。その論文で、アスペクト比 H_L/D が 0.3 近傍における旋回現象の発生は、気泡噴流が浴表面に達したときに持ち上げられる浴表面の高さ、

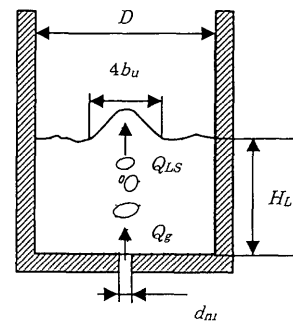


Fig. 5 Schematic illustration of elevated bath surface.

H_{LeB} (Fig. 5 参照) がある臨界値を超えたときに生じると仮定すれば説明できることを示した。

$$H_{LeB}/D \geq k'_1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$H_{LeB} = [Q_{LS}/(\pi D^2/4)]^2/(2g) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$Q_{LS} = 3.6u_{L,cl}b_u^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$u_{L,cl} = k_{12}(g^2Q_g)^{1/5} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$b_u = 0.14H_L \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで k'_1 と k_{12} は定数、 Q_{LS} は気泡噴流に誘起されて上昇する液体の浴表面での流量^{7,8)}、 $u_{L,cl}$ は液体の浴中心軸上速度、 g は重力加速度、 b_u は液体流れの半径方向速度分布の半値半幅である。なお、 H_{LeB} は仮想的な量であり、図示できない。この条件式を基にしてアスペクト比の臨界値に対する表示式を導き、測定結果と比較して、定数 k'_1 と k_{12} を組み合わせ得られる定数を決定すると次式が得られる⁶⁾。

$$H_L/D = 0.19Fr_{mD}^{-1/20} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$Fr_{mD} = Q_g^2/(gD^5) \quad \dots\dots\dots (11)$$

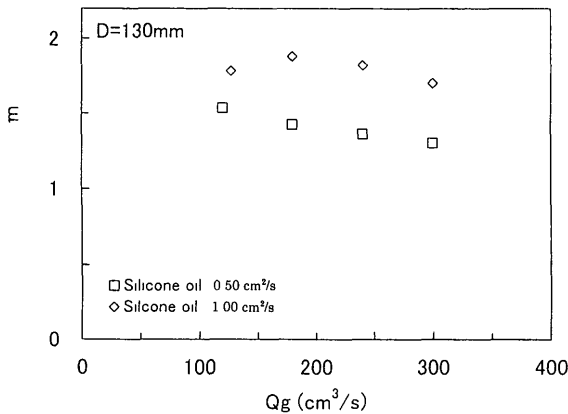
ここで Fr_{mD} は修正フルード数である。この実験式は Fig. 2~4 中に破線で示した式 (4) よりも精度良く境界値を近似できることが分かっている。

動粘度の大きい浴中を上昇する気泡噴流に関する以前の実験結果によれば⁵⁾、気泡上昇速度 u_B はチャネリングが生じて動粘度の影響をほとんど受けないことから、液体の中心速度 $u_{L,cl}$ も動粘度の影響を受けないと考えられる。しかしながら、上述のように半値半幅 b_u は動粘度の増加につれて小さくなる。そこで、式 (9) を次式で置き換える。

$$b_u = 0.14nH_L \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで n は新たに導入したフィッティングパラメーターであり、1 に等しいか、それよりも小さい値をとる。

式 (9) の代わりに式 (12) を式 (7) に代入し、定数 k'_1 と k_{12} は水の浴の場合と同じであると仮定すれば次式が得られる。

Fig. 6. Relationship between m and gas flow rate

$$H_L/D = 0.19 Fr_{mD}^{-1/20} \dots\dots\dots (13)$$

$$m = 1/n \dots\dots\dots (14)$$

Fig. 2~4において、シリコンオイル0.10 cm²/sでは、すべての条件下で $m=1$ とおける。 $D=130$ mmの容器における動粘度が0.50 cm²/sと1.00 cm²/sの臨界アスペクト比の測定値を水の場合の臨界値で除した値、すなわち m の値をFig 6に示す。 m はガス流量の増加につれて減少する。

前報の結果によれば⁵⁾、気泡噴流の特性に液体の動粘度の影響が現れる臨界値は次式で与えられる。

$$Re_{cr} = d_B u_B / \nu_{cr} = 400 \dots\dots\dots (15)$$

$$d_B = 0.54 (Q_g d_m^{0.5})^{0.289} \dots\dots\dots (16)$$

$$u_B = 1.7 (Q_g g^2)^{1/5} \dots\dots\dots (17)$$

ここで Re_{cr} は臨界気泡レイノルズ数、 d_B は平均気泡径、 d_m はノズル内径である。式(15)~(17)中の d_B 、 u_B 、 d_m 、 Q_g 、 g 、 ν_{cr} の単位はcm、cm/s、cm、cm³/s、cm/s²、cm²/sである。本実験では、ノズル内径 d_m は0.2 cmであり、これを式(16)に代入して整理すると、動粘度の臨界値 ν_{cr} とガス流量 Q_g の関係式として次式が得られる。

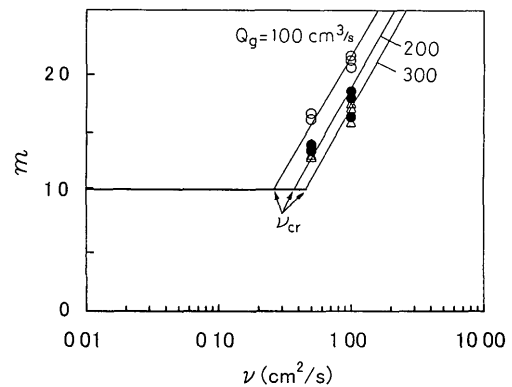
$$\nu_{cr} = 0.0285 Q_g^{0.489} \dots\dots\dots (18)$$

ガス流量 $Q_g=100, 200, 300$ cm³/sに対して ν_{cr} の値を求めると、それぞれ0.271, 0.380, 0.463 cm²/sとなる。3種類の円筒容器について、これらのガス流量における m の値を求め、動粘度 ν に対してプロットするとFig 7が得られる。動粘度が0.50 cm²/sと1.00 cm²/sにおける m の測定値、ならびに上記動粘度の臨界値における m の値が1であることに着目して引いたのが、図中の3本の直線である。これらの直線の傾きはほぼ等しいので、 m を次式で近似した。

$$m = 2 \log(\nu / \nu_{cr}) + 1 \quad (\nu \geq \nu_{cr}) \dots\dots\dots (19a)$$

$$= 1 \quad (\nu < \nu_{cr}) \dots\dots\dots (19b)$$

式(13)と式(19a), (19b)から次式が得られる。

Fig. 7. Relationship between m and kinematic viscosity of liquid

$$H_L/D = 0.19 [2 \log(\nu / \nu_{cr}) + 1] Fr_{mD}^{-1/20} \quad (\nu \geq \nu_{cr}) \dots\dots\dots (20a)$$

$$H_L/D = 0.19 Fr_{mD}^{-1/20} \quad (\nu < \nu_{cr}) \dots\dots\dots (20b)$$

Fig 2~4に示すように、シリコンオイル0.50 cm²/sと1.00 cm²/sの場合に旋回の起こる境界は一点鎖線と二点鎖線で表した式(20)によって比較的精度良く近似できる。

4. 結言

本実験条件下では、動粘度の大きな液体中の気泡噴流が旋回を始めるアスペクト比は式(20)によって記述できる。旋回が止まるアスペクト比は動粘度の影響を受けない。

記 号

D	: 容器径
d_B	: 気泡径
d_m	: ノズル内径
Fr_{mD}	: 修正フルード数
g	: 重力加速度
H_L	: 浴深
Q_g	: ガス流量
Re_{cr}	: 臨界気泡レイノルズ数
We	: ウェーバー数
ρ_L	: 液体密度
σ_L	: 表面張力
ν_{cr}	: 動粘度の臨界値

文 献

- 1) M Shitara, M Iguchi, K Takano, T Tamamori, H Shitara and T Maruyama *Mater Trans*, **44** (2003), No 12, 2456
- 2) A Kimura and H Ohashi *Trans Jpn Soc Mech Eng*, Part 1, **44** (1978), 3024, 3446
- 3) T Tamamori, M Iguchi and M Shitara *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), 236
- 4) M Iguchi, S Hosohara, T Koga, R Yamaguchi and Z Morita *ISIJ Int*, **33** (1993), 1037
- 5) M Iguchi, A Kawajiri, H Tomida and Z Morita *ISIJ Int*, **33** (1993), 361
- 6) M Iguchi, D Iguchi, Y Sasaki, T Kumagai and S Yokoya *ISIJ Int*, **44** (2004), 1623
- 7) M Iguchi, D Iguchi and J Yoshida *Mater Trans*, **45** (2004), 1764
- 8) D Iguchi, J Yoshida and M Iguchi *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 363