

# 円筒容器内高粘性液体の気泡噴流による旋回現象

玉森 匠\*・井口 学\*<sup>2</sup>・設楽 守良\*<sup>3</sup>

Swirl Motion of Bubbling Jet in Highly Viscous Liquid Contained in a Cylindrical Vessel

Taku TAMAMORI, Manabu IGUCHI and Moriyoshi SHITARA

**Synopsis :** Investigation was made on an effect of the kinematic viscosity of a liquid on a swirl motion of the liquid in a cylindrical vessel. The swirl motion appeared when the liquid was agitated by bottom gas injection. Water and silicone oil were used as the working fluids. Particular attention was paid to the period,  $T_s$ , amplitude,  $A$ , starting time,  $T_{s,s}$ , and damping time,  $T_{s,d}$ , of the swirl motion. The preferable occurrence condition of the swirl motion was also determined. The occurrence region was expressed in terms of the aspect ratio and gas flow rate. It became narrow as the kinematic viscosity of liquid increased. An empirical equation was newly proposed for the amplitude,  $A$ . Empirical equations proposed previously for the remaining parameters,  $T_s$ ,  $T_{s,s}$ , and  $T_{s,d}$  were applicable under the present experimental conditions.

**Key words :** wastewater, swirl motion, viscosity, bubbling jet, refining, sloshing

## 1. 緒言

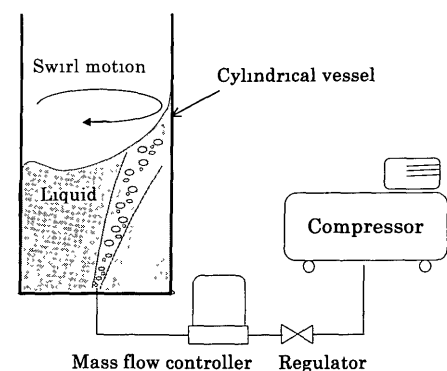
スラリー等、高粘性汚水の浄化プロセスにおける液の混合・攪拌は、現在機械式攪拌が主流となっているが<sup>1-4)</sup>、高粘性汚水中には浮遊物が多く、液中のプロペラ及び主軸への付着による攪拌能力の低下、機械主軸の偏心等の問題が発生する。また槽内の攪拌が不十分なことから死水領域が生じ、有機物の腐敗による有害ガス発生等の問題も起きている。

筆者らは、機械式攪拌の代わりに旋回気泡噴流を用いて高粘性汚水の攪拌を行なうプロセスを提案している<sup>5)</sup>。しかしながらこれまで、円筒容器内高粘性液体の気泡噴流の特性すなわちガスホールドアップ、気泡頻度、気泡上昇速度などについては報告しているが<sup>6)</sup>、旋回現象<sup>7-14)</sup>には言及していない。本研究では、高粘性汚水の新規攪拌プロセスの開発を目的として、粘性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、円筒浴内の気泡噴流による旋回現象について調査した。具体的には、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。

## 2. 実験装置と方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。容器内径  $D$  が 130, 150, 200 mm の 3 種類のアクリル樹脂製透明円筒容器を用いた。容器底部中心にはガスを吹き込む単孔ノズルが設置されて

いる。ノズル内径  $d_n$  は 2 mm である。液体には水および  $10 \text{ mm}^2/\text{s}$  (cSt),  $50 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,  $100 \text{ mm}^2/\text{s}$  と動粘度の異なる 3 種類のシリコンオイルを、気体には空気を用いた。空気流量  $Q_g$  はマスフローコントローラにて  $0 \sim 420 \text{ cm}^3/\text{s}$  の範囲に設定して実験を行い、旋回周期  $T_s$ 、振幅  $A$ 、旋回開始時間  $T_{s,s}$ 、旋回終了時間  $T_{s,d}$  を測定した。旋回周期は 50 周期分の時間を測定して求めた。振幅は側壁における最高水位と最低水位の差の半分と定義して測定した。旋回開始時間はガス吹込みを開始してから旋回の生じるまでの時間として目視で求めたが、電気探針で測定した値によく一致することを前



Inner diameter of cylindrical vessel $D$ : 130 mm, 150 mm, 200 mm
Inner diameter of nozzle $d_n$ : 2 mm
Air flow rate $Q_g$ $0 < Q_g \leq 420 \text{ cm}^3/\text{s}$

Fig. 1. Schematics of experimental apparatus.

平成 16 年 4 月 20 日受付 平成 16 年 10 月 28 日受理 (Received on Apr 20, 2004, Accepted on Oct 28, 2004)

\* (株) ヒューエンス (Huens Co., Ltd., East 2 South 17 Obihiro 080-0802)

\* 2 北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

\* 3 北海道大学大学院生 (Graduate Student, Hokkaido University)

Table 1 Physical properties of fluids at 298K

	Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Kinematic viscosity $\nu$ (mm <sup>2</sup> /s)	Surface tension $\sigma$ (mN/m)
Air	1.18	15.6	
Water	997	0.891	72.7
Silicone oil 10cSt	935	10	20.1
Silicone oil 50cSt	960	50	20.8
Silicone oil 100cSt	965	100	20.9

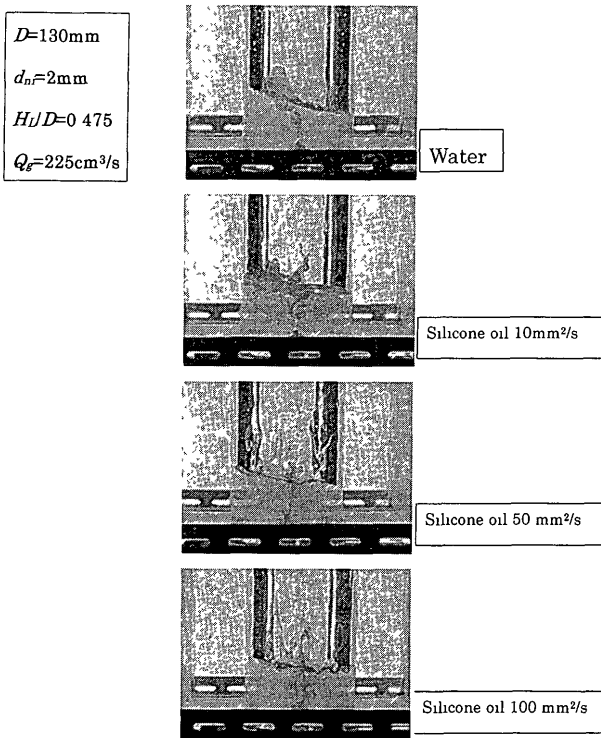


Fig. 2. Photographs of the swirl motion of bubbling jets

に報告している<sup>8)</sup>。旋回終了時間はガス吹込みを止めてから、旋回振幅が小さくなって0.5mmになるまでの時間である。物性値はTable 1を参照されたい。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 液体の動粘度変化に伴う旋回現象の変化

Fig. 2に旋回現象の写真を示す。液体の動粘度が大きくなるにつれて旋回の振幅が小さくなり、スピittingが激しくなっていることが明らかにみとれる。

#### 3.2 旋回発生領域

Fig. 3は、容器内径 $D$ が130mm、吹き込む空気の流量 $Q_g$ が0~300cm<sup>3</sup>/s、Fig. 4は、容器内径 $D$ が150mm、吹き込む空気の流量 $Q_g$ が0~360cm<sup>3</sup>/s、Fig. 5は、容器内径 $D$ が200mm、吹き込む空気の流量 $Q_g$ が0~420cm<sup>3</sup>/sに設定し、

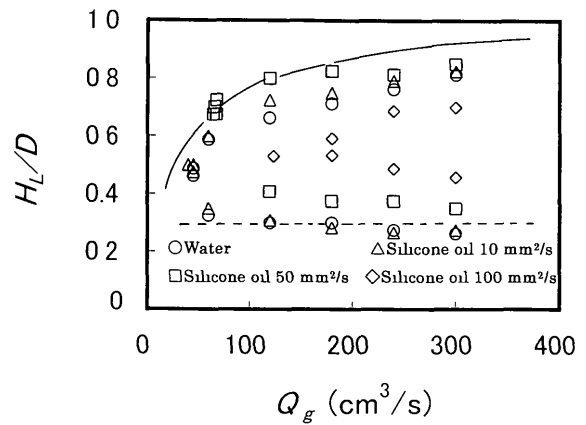


Fig. 3 The occurrence region of swirl motion for  $D=130\text{mm}$  and  $d_n=2\text{mm}$ .

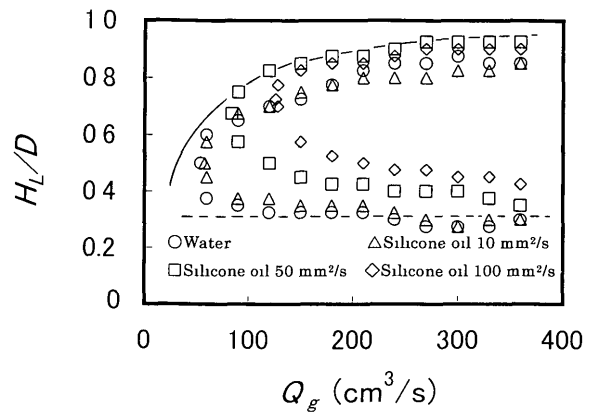


Fig. 4. The occurrence region of swirl motion for  $D=150\text{mm}$  and  $d_n=2\text{mm}$

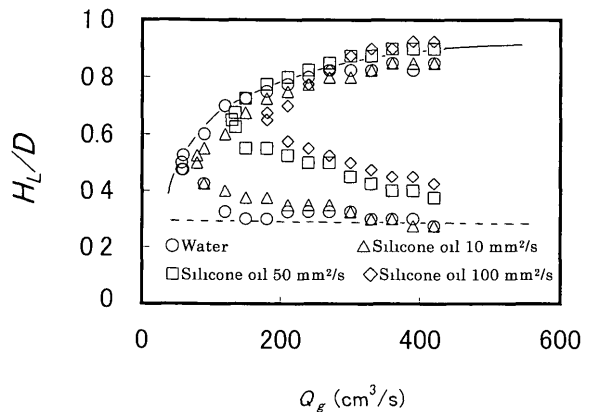


Fig. 5. The occurrence region of swirl motion for  $D=200\text{mm}$  and  $d_n=2\text{mm}$

旋回発生領域について調べた実験結果を示す。液体には水および10mm<sup>2</sup>/s、50mm<sup>2</sup>/s、100mm<sup>2</sup>/sの3種類のシリコンオイルを用いている。Fig. 3~5ともに旋回の発生領域は、シリコンオイルの動粘度が10mm<sup>2</sup>/sまでは水の場合の領域にほぼ一致したが、シリコンオイルの動粘度が大きくなるにつれて狭まった。図中の実線と破線は以前に提案した、水の場合の旋回発生領域の境界に対する実験式であり、次

式で与えられる<sup>7)</sup>。

(1) 実線

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

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

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

(2) 破線

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

水とシリコンオイル 10 mm<sup>2</sup>/s の境界はこれらの式によって近似できる。液体の動粘度が大きくなると、ノズル出口で生成する気泡の形状は回転だ円体がくずれたような形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、動粘度が 100 mm<sup>2</sup>/s 程度になると、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<sup>6)</sup>。チャネリングが生じると、あたかもパイプの中を気泡が次々と上昇するような状況になり、気泡に連行されて上方に向かって動く液体の量は少なくなる。すなわち、動粘度が大きくなるにつれて気泡に働く浮力の影響が浴内の液体に伝わりにくくなり、旋回の発生領域が狭まったと考えられる。

3.3 旋回周期

Fig. 6 は、容器内径  $D$  が 130 mm, 150 mm, 200 mm, 液体が水及び 10 mm<sup>2</sup>/s, 50 mm<sup>2</sup>/s, 100 mm<sup>2</sup>/s の 3 種類の動粘度を有するシリコンオイルに対する旋回周期  $T_s$  を示している。 $D=130$  mm, 150 mm, 200 mm に対するアスペクト比  $H_L/D$  はそれぞれ 0.475, 0.525, 0.600 である。Fig. 3~5 に示した旋回発生領域をみると、水の場合に最も小さなガス流量で旋回が発生するアスペクト比  $H_L/D$ , すなわち旋回が最も発生しやすいアスペクト比は、 $D=130$  mm, 150 mm, 200 mm に対してそれぞれ 0.475, 0.525, 0.600 となっている。これが容器毎に異なるアスペクト比を選んだ理由である。旋回周期  $T_s$  は動粘度の影響を受けなかった。またガス

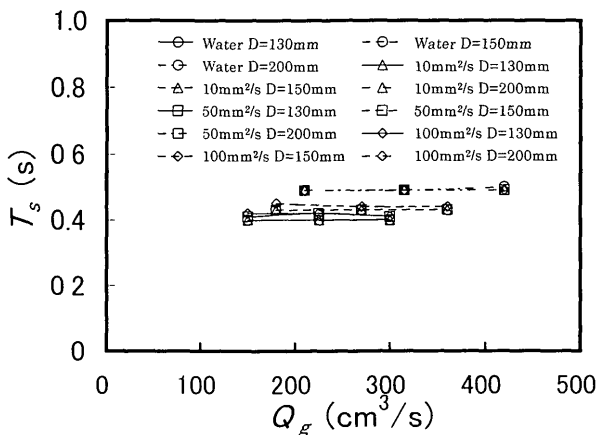


Fig. 6 Periods of swirl motion.

流量  $Q_g$  による変化も無いが、容器内径  $D$  が大きくなると長くなる。旋回周期  $T_s$  を無次元化し、プロットした結果を Fig. 7 に示す。旋回周期  $T_s$  は以前に提案されている回転スロッシングの基本モードの式(5)に一致した。ここで  $\epsilon_1$  はベッセル関数  $J_1$  の 1 番目の零点であり、 $\omega_1$  は角速度である<sup>14)</sup>。

$$T_s = 2\pi / \omega_1 \dots\dots\dots(5)$$

$$\omega_1 = [(2g\epsilon_1/D) \tanh(2\epsilon_1 H_L/D)]^{1/2} \dots\dots\dots(6)$$

$$\epsilon_1 = 1.84 \dots\dots\dots(7)$$

3.4 振幅

Fig. 8 に振幅  $A$  の測定値を示す。各容器に対するアスペクト比は Fig. 6 の場合と同じである。振幅は液体の動粘度が大きくなると小さくなり、ガス流量  $Q_g$  が大きくなると大きくなり、容器内径  $D$  にはほとんど影響されなかった。振幅  $A$  を無次元化して整理し、Fig. 9 に示す。測定値は、今回提案した式(8)におおむね一致した。なお、この図中の横軸の量はもともと液体の粘度ではなく、容器内径を変

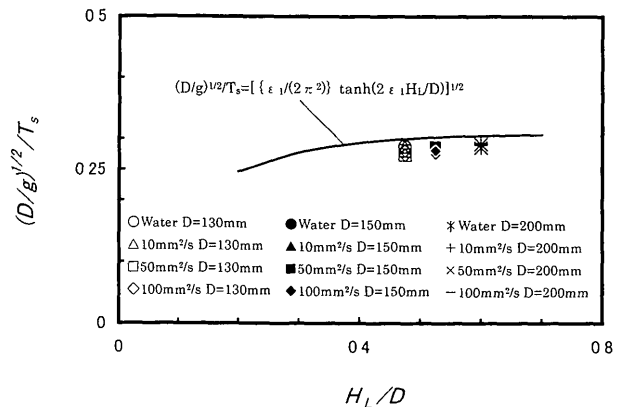


Fig. 7. Comparison of Eq. (5) with measured values of swirl period.

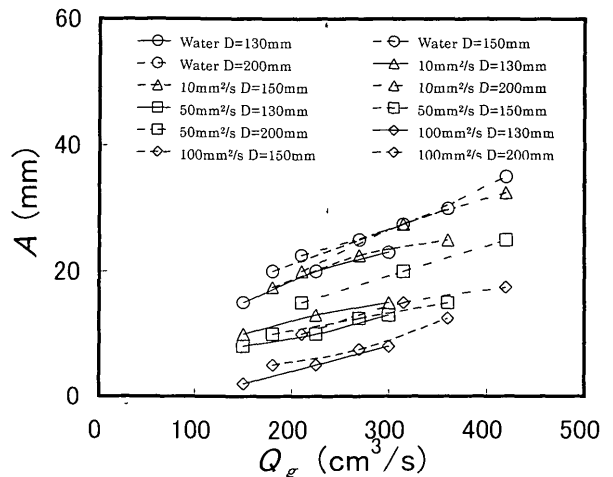


Fig. 8 Amplitude of swirl motion.

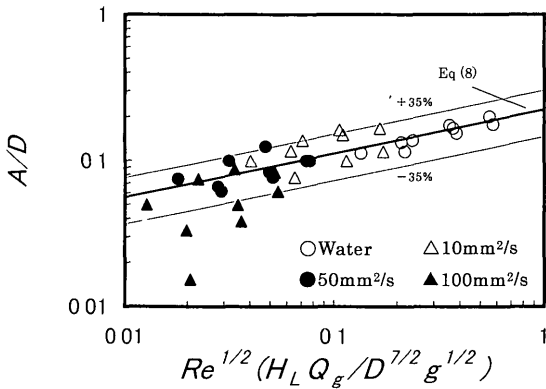


Fig. 9 Comparison of Eq. (8) with measured values of amplitude

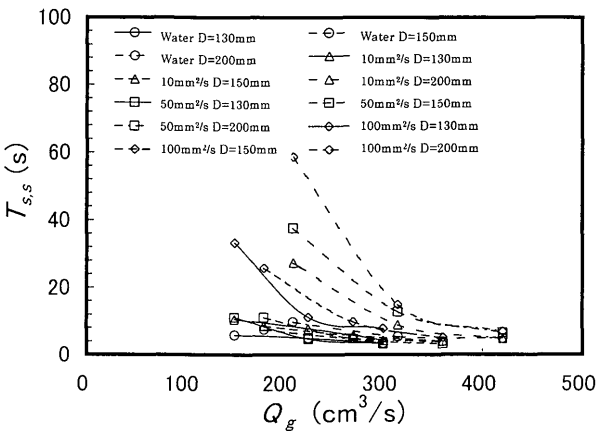


Fig. 10 Starting time of swirl motion.

化させたときの旋回開始時間と旋回終了時間を整理するために以前に導いたものである<sup>8,9)</sup>。

$$A/D = 0.224 [Re^{1/2} (H_L Q_g / D^{7/2} g^{1/2})]^{0.30} \dots \dots \dots (8)$$

$$Re = (Q_g^2 / g)^{2/5} (g/D)^{1/2} / \nu \dots \dots \dots (9)$$

ここで  $Re$  はレイノルズ数である。

3.5 旋回開始時間

Fig. 10 に旋回開始時間  $T_{s,s}$  の測定値を示す。各容器に対するアスペクト比は Fig. 6 の場合と同じである。旋回開始時間は、動粘度が大きくなると長くなり、ガス流量  $Q_g$  が大きくなると短くなり、容器内径  $D$  が大きくなると長くなった。旋回開始時間を無次元化して Fig. 11 に示す。以前に提案した式(10)によって比較的精度よく近似できた<sup>8)</sup>。

$$T_{s,s} (g/D)^{1/2} = 36 [Re^{1/2} (H_L Q_g / D^{7/2} g^{1/2})]^{-1/2} \dots \dots \dots (10)$$

3.6 旋回終了時間

Fig. 12 に旋回終了時間  $T_{s,d}$  の測定値を示す。各容器に対するアスペクト比は Fig. 6 の場合と同じである。旋回終了時間は、動粘度が大きくなると短くなり、ガス流量  $Q_g$  が大きくなるとやや長くなり、容器内径  $D$  が大きくなるとやや長くなった。旋回終了時間を無次元化して Fig. 13 に示す。

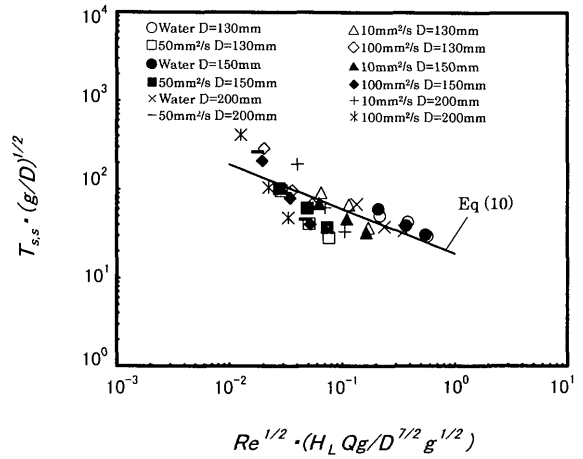


Fig. 11. Comparison of Eq. (10) with measured values of starting time

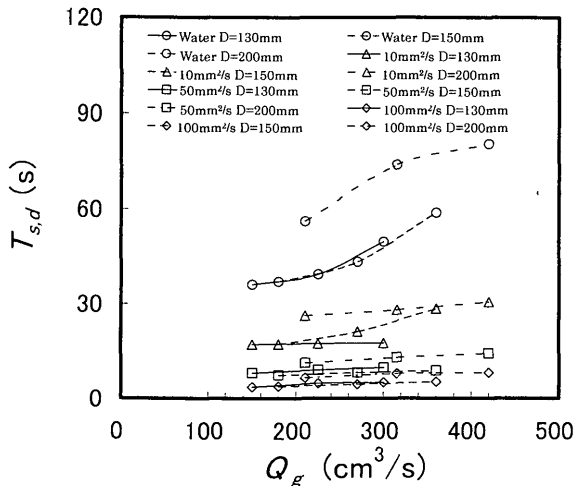


Fig. 12 Damping time of swirl motion

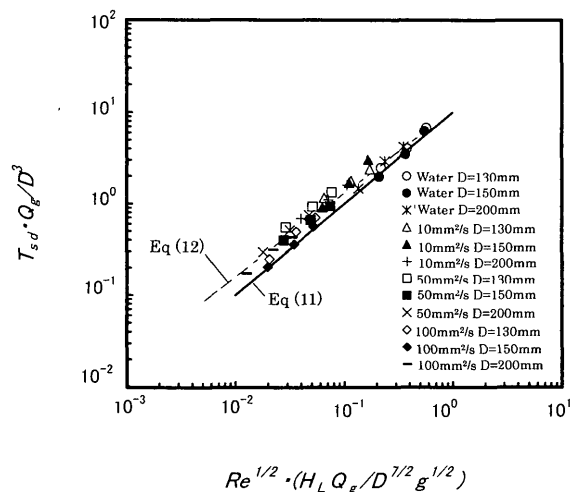


Fig. 13 Comparison of Eqs. (11) and (12) with measured values of damping time.

測定値は以前に水のみを用いて行った実験結果に基づいて提案した実線の式(11)に比較的よく一致した<sup>8,9)</sup>。

$$T_{s,d} Q_g / D^3 = 11 Re^{1/2} (H_L Q_g / D^{7/2} g^{1/2}) \dots \dots \dots (11)$$

しかしながら、液体の動粘度が大きくなるにつれて、すなわち横軸の値が小さくなるにつれて、測定値は式(11)よりも系統的に大きくなっている。そこで、式(11)を修正した次式を提案し、図中に破線で示している。

$$T_{s,d}Q_g/D^3=11[Re^{1/2}(H_LQ_g/D^{7/2}g^{1/2})]^{0.91} \dots\dots\dots(12)$$

4. 結言

(1) 旋回の発生領域は、液体の動粘度が10 mm<sup>2</sup>/sの場合は水の場合と同じであるが、動粘度がさらに大きくなると狭くなることがわかった。

(2) 旋回周期 $T_s$ は動粘度とガス流量 $Q_g$ の影響は受けないが、容器内径 $D$ が大きくなると長くなることがわかった。周期を無次元化し整理したところ、以前に提案されている回転スロッシングの次式と一致した。

$$T_s=2\pi/[(2g\epsilon_1/D) \cdot \tanh(2\epsilon_1H_L/D)]^{1/2}$$

(3) 振幅 $A$ は、動粘度が大きくなると小さくなり、ガス流量 $Q_g$ が大きくなると大きくなり、容器内径 $D$ にはほとんど依存しなかった。振幅 $A$ の測定値は、今回提案した次式で近似できた。

$$A/D=0.224[Re^{1/2}(H_LQ_g/D^{7/2}g^{1/2})]^{0.30}$$

(4) 旋回開始時間 $T_{s,s}$ は、動粘度が大きくなると長くなり、ガス流量 $Q_g$ が大きくなると短くなり、容器内径 $D$ が大きくなると長くなる。旋回開始時間 $T_{s,s}$ の測定値は、以前に提案した次式で比較的精度よく近似できた。

$$T_{s,s}(g/D)^{1/2}=36[Re^{1/2}(H_LQ_g/D^{7/2}g^{1/2})]^{-1/2}$$

(5) 旋回終了時間 $T_{s,d}$ は、動粘度が大きくなると短くなり、ガス流量 $Q_g$ が大きくなると長くなり、容器内径 $D$ が大きくなるとやや長くなる。旋回終了時間 $T_{s,d}$ の測定値は、今回提案した次式でよく近似できた。

$$T_{s,d}Q_g/D^3=11[Re^{1/2}(H_LQ_g/D^{7/2}g^{1/2})]^{0.91}$$

記号

- $A$  : 旋回振幅
- $D$  : 容器径
- $d_n$  : ノズル内径
- $g$  : 重力加速度
- $H_L$  : 浴深
- $Q_g$  : ガス流量
- $Re$  : レイノルズ数
- $T_s$  : 周期
- $T_{s,d}$  : 旋回終了時間
- $T_{s,s}$  : 旋回開始時間
- $We$  : ウェーバー数
- $\epsilon_1$  : ヘッセル関数 $J_1$ の1番目の零点
- $\rho$  : 液体密度
- $\sigma$  : 表面張力
- $\omega$  : 角速度

文献

- 1) S N P Nisha *Chem Age India*, **38** (1987), No 11, 609
- 2) T Tsubamoto and Y Kasubuchi *Sangyo Kikai*, **537** (1995), 20
- 3) S Okumura, K Yamamoto, K Tsumura and N Kuwabara *J Waste-water Soc*, **36** (199), No 4, 35, 96
- 4) S M Ratuzeni, J A D Rodrigues, E F M Camargo, W Borzani and M Zaai *Water Sci Technol*, **44** (2001), No 4, 305
- 5) M Shitara, M Iguchi, K Takano, T Tamamori, H Shitara and T Maruyama *Mater Trans*, **44** (2003), No 12, 2456
- 6) M Iguchi, A Kawajiri, H Tomida and Z Morita *ISIJ Int*, **33** (1993), No 3, 361
- 7) M Iguchi, S Hosohara, T Koga, R Yamaguchi and Z Morita *ISIJ Int*, **33** (1993), No 10, 1037
- 8) M Iguchi, Y Itoh and Z Morita *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), No 3, 189
- 9) M Iguchi, Y Eguchi, A Kawasaki, S Kitamura and Z Morita *ISIJ Int*, **39** (1999), No 8, 767
- 10) Y Kato, K Nakanishi, T Nozaki, K Suzuki and T Emi *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 1604
- 11) Y Xie and F Oeters *Steel Res*, **63** (1992), 227
- 12) M P Schwartz *Chem Eng Sci*, **45** (1990), 1765
- 13) G G K Murthy, S P Mehrotra and A Ghosh *Metall Trans B*, **19B** (1988), 839
- 14) A Kimura and H Ohashi *Trans Jpn Soc Mech Eng*, Part 1, **44** (1978), 3024, 3446