

気液二相噴流による円筒容器内の旋回現象の特性

設楽 守良*・井口 学*²・玉森 匠*³・高野 敬二*³

The Characteristics of Swirl Motion in a Cylindrical Vessel Induced by a Gas-Liquid Two-phase Jet

Moriyoshi SHITARA, Manabu IGUCHI, Taku TAMAMORI and Keiji TAKANO

Synopsis : A cylindrical bath was agitated by a bottom blowing gas-liquid two-phase jet. A swirl motion of the bath appeared under certain blowing conditions. The bath was highly agitated in the presence of the swirl motion. Therefore the swirl motion is beneficial for the promotion of bath mixing. The starting time, the period and the amplitude of the swirl motion were measured. These quantities fell between their respective values for baths agitated by a bubbling jet and a liquid jet. The gas flow rate ratio was defined as the ratio of gas flow rate to the total flow rate of gas and liquid. This ratio was found to be useful for predicting the three quantities.

Key words : steelmaking; refining; swirl motion; jet; mixing; two-phase flow.

1. 緒言

気液二相噴流の旋回現象は、鉄鋼分野や環境分野における省エネルギー型新規攪拌プロセスとして極めて広範囲に適用可能であると考えられるが¹⁾、プロセスの設計を行うためには、その基本特性等を調査する必要がある。しかしながら、これまで円筒容器内における旋回気泡噴流および旋回液体噴流については、旋回挙動の基本特性や、旋回が浴内の流動特性、混合特性などに及ぼす影響が調査、報告されているが²⁻¹¹⁾、気液二相噴流の場合についてはほとんど知られていない¹²⁾。

前報では¹²⁾、円筒容器内の水浴中に水と空気を同時に吹き込んだ場合、すなわち噴流が水と空気からなる気液二相噴流の場合の旋回現象に着目して実験を行い、旋回現象の発生条件は、気体の流量割合 ϵ' の関数¹³⁾として整理できることを明らかにした。本研究では、円筒容器内の気液二相噴流に誘起される旋回現象の開始時間、周期および振幅について調べた。

2. 実験装置と測定方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。実験に供する円筒容器には3種類の亚克力樹脂製の透明容器を使用した。容器内径 D は 130, 200, 309 mm, 容器高さ H はそれぞれ 400, 500, 700 mm である。容器内には、所定のアスペクト比 (H_L/D) となるように水を満たした。ここで H_L は初期の浴深である。実験は主として $H_L/D=0.500$ の場合について行った。

液体には水 (密度 $\rho_L=997 \text{ kg/m}^3$, 動粘度 $\nu_L=0.891 \text{ mm}^2/\text{s}$, 表面張力 $\sigma=72.7 \text{ mN/m}$) を、吹き込む気体には空気 (密度 $\rho_g=1.18 \text{ kg/m}^3$, 動粘度 $\nu_g=15.6 \text{ mm}^2/\text{s}$) を用いた。

吹き込む空気はコンプレッサーから供給し、マスフローコントローラにより流量制御を行い、流量 Q_g を $0\sim 400 \text{ cm}^3/\text{s}$ の範囲に設定した。吹き込む水に関してはポンプ吐出流量をインバーターにより制御し、カルマン渦流量計により流量の測定と監視を行い、水流量 Q_L を $0\sim 400 \text{ cm}^3/\text{s}$ の範囲に設定した。

空気の吹き込み用ノズルは外径 3 mm, 内径 $d_{\text{nen},g}=2 \text{ mm}$ のパイプであり、Fig. 2 に示すように円筒容器底部中心に設

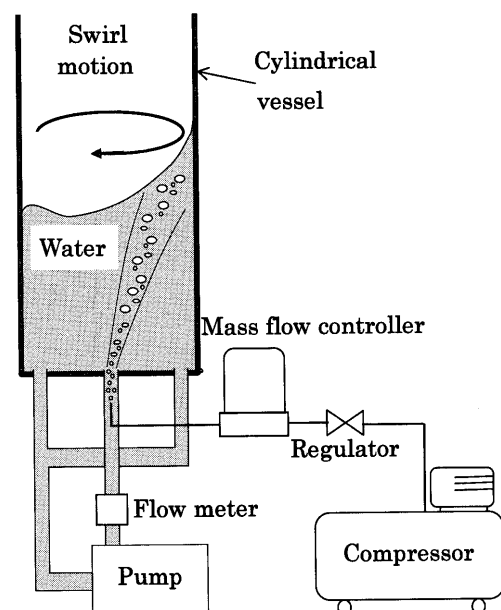


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

平成 15 年 10 月 1 日 受付 平成 16 年 1 月 7 日 受理 (Received on Oct. 1, 2003; Accepted on Jan. 7, 2004)

* (株) ヒューエンス (現: 北海道大学大学院生) (HUENS Co., Ltd., now Graduate Student, Hokkaido University)

*² 北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University, North 13 West 8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

*³ (株) ヒューエンス (HUENS Co., Ltd.)

置した水の吹込み用ノズル（内径 $d_{nen}=13\text{ mm}$ ）内の中心軸上に挿入した。これによって、水と空気を同時に吹き込んだ場合は、 $d_{nen}=13\text{ mm}$ のノズル出口での噴流は気液二相噴流となっている。ノズルから吹き込まれた水は、円筒容器底部の側壁近傍に設けた内径 13 mm の4箇所のドレインからポンプに吸い込まれ、再びノズルから吹き込まれて装置内を循環している。

本実験では水流量 Q_L と空気流量 Q_g の割合を変化させ

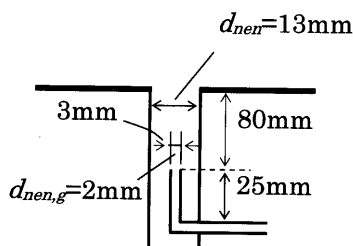


Fig. 2. Nozzle configuration.

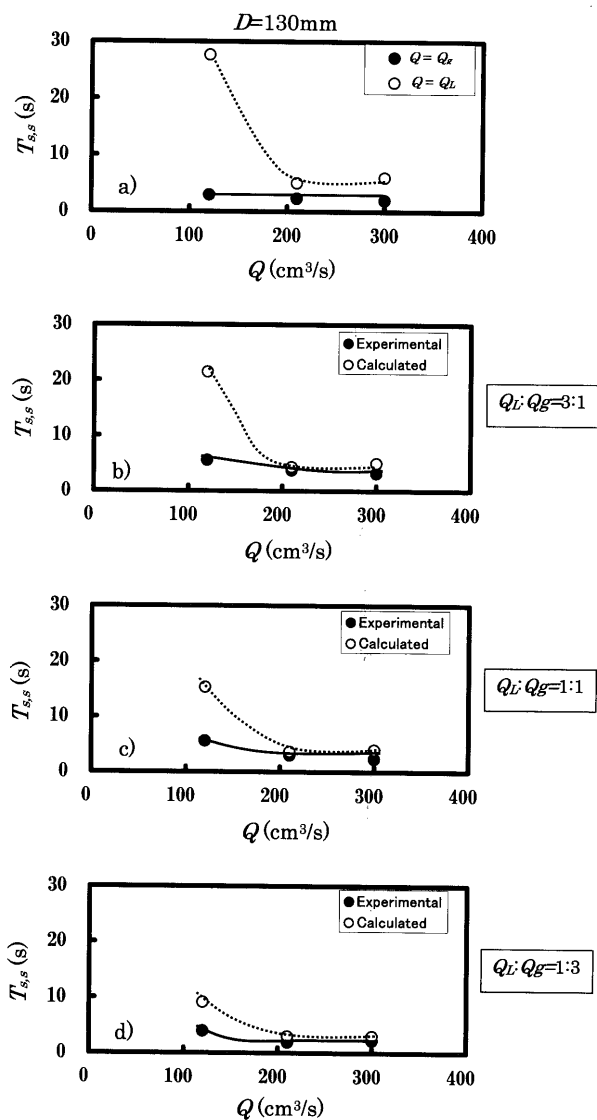


Fig. 3. Comparison between experimental and calculated starting times of swirl motion ($D=130\text{ mm}$, $H_L/D=0.500$, $d_{nen}=13\text{ mm}$).

て、液体噴流($Q_g=0$)、気液二相噴流（総流量は Q_g+Q_L ）、気泡噴流($Q_L=0$)における旋回現象を観察し、旋回開始時間 $T_{s,s}$ 、旋回周期 T_s 、および旋回の振幅 A を測定した。

旋回開始時間は空気、水、あるいは空気と水（同時）の吹込みを開始してから、深水波型旋回が起きるまでの時間と定義した。深水波型旋回とは、浴表面の波動が容器底部の影響を受けない旋回現象である³⁾。吹込みを止めてから、円筒浴内における水の円周方向の回転運動が止まるまでの時間として定義される旋回終了時間も重要な量であるが、今回は測定していない。今後データを蓄積し、改めて報告したい。

3. 実験結果と考察

3.1 気液二相噴流の旋回開始時間

Fig. 3~5の(a)に液体噴流ならびに気泡噴流における旋回

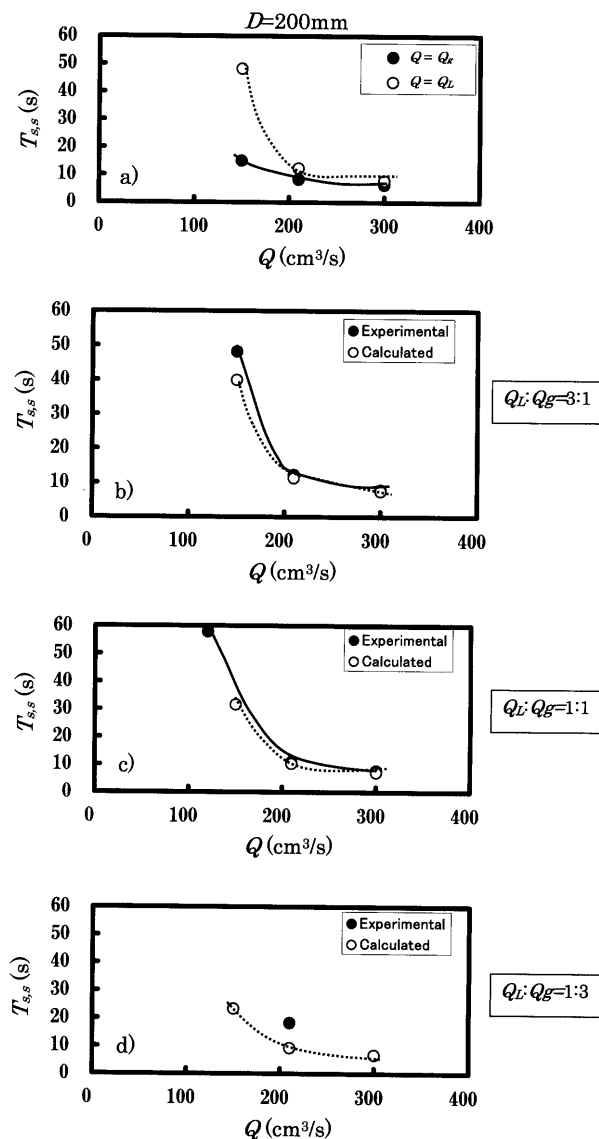


Fig. 4. Comparison between experimental and calculated starting times of swirl motion ($D=200\text{ mm}$, $H_L/D=0.500$, $d_{nen}=13\text{ mm}$).

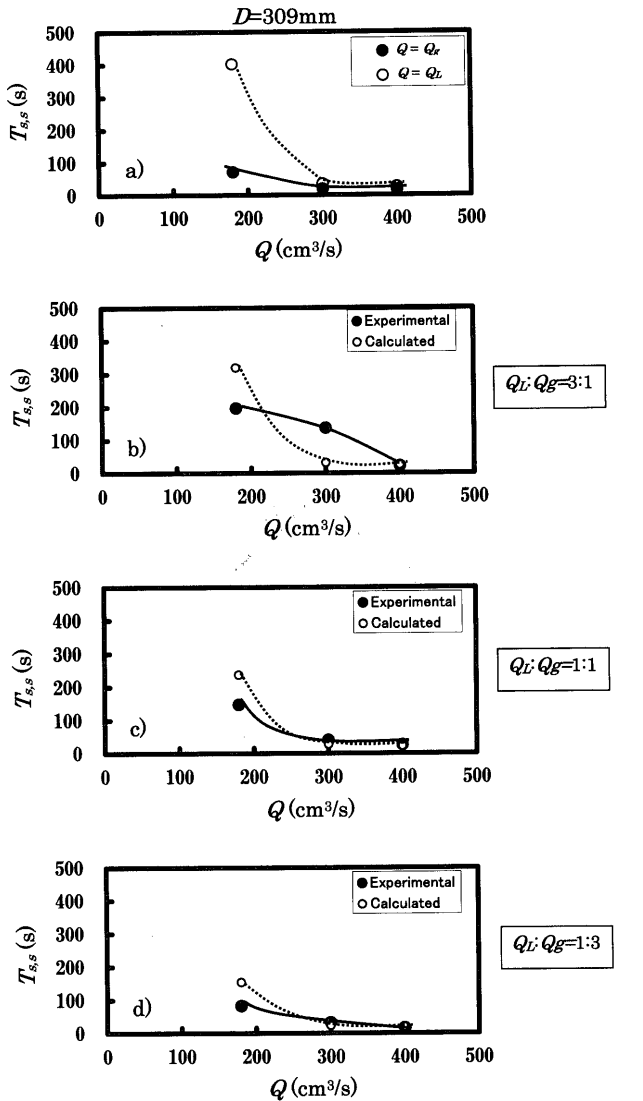


Fig. 5. Comparison between experimental and calculated starting times of swirl motion ($D=309$ mm, $H_L/D=0.500$, $d_{nen}=13$ mm).

開始時間の測定結果を示す。容器内径 D は 130, 200, 309 mm の 3 種類、アスペクト比 H_L/D はいずれも 0.500 である。このアスペクト比は、気泡噴流の旋回現象の現れる領域の境界近傍にあるため、旋回現象が時々停止することがあるが¹⁴⁾、以下に示す測定結果はすべて旋回現象が現れた場合の結果を示しており、特に問題はない。なお、 H_L は初期の浴深であり、ガスホールドアップによる浴深の増加は考慮していない。

Fig. 3~5 の (b)~(d) には、水と空気の気液二相噴流における旋回開始時間 $T_{s,s}$ の測定値と後ほど示す式 (2) による計算値とを比較している。横軸 Q は、ノズル出口における空気と水の総流量を表しており、

$$Q = Q_L + Q_g \dots \dots \dots (1)$$

である。

前報¹²⁾ に示した結果によれば、円筒容器内の気液二相噴

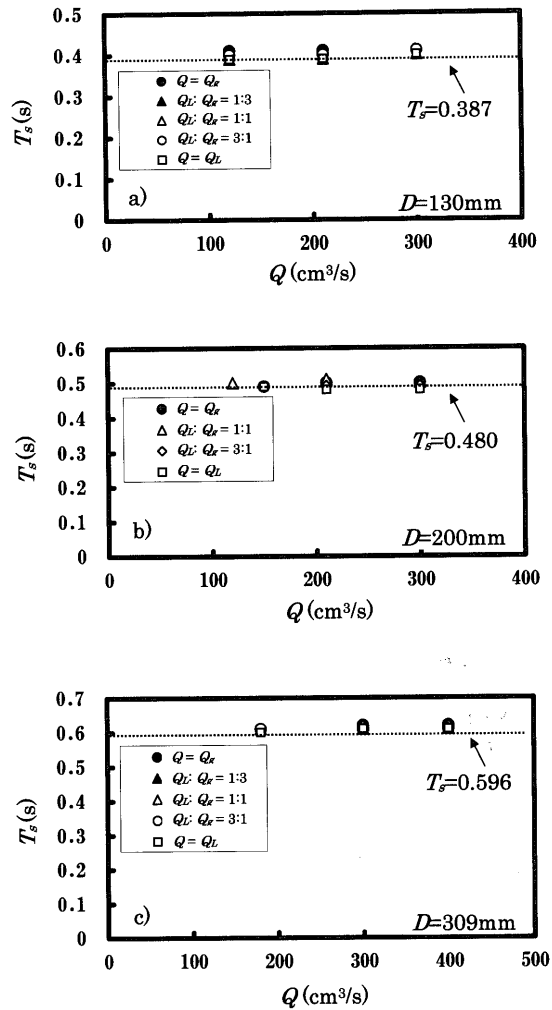


Fig. 6. Comparison between experimental and calculated periods of swirl motion ($D=130, 200, 309$ mm, $H_L/D=0.500$, $d_{nen}=13$ mm).

流の旋回発生条件は、気体の流量割合 ϵ' の関数として整理できたので、水と空気の気液二相噴流における旋回開始時間 $T_{s,s}$ についても、気体の流量割合 ϵ' の関数として整理できると仮定した。

$$T_{s,s} = (T_{s,s})_{\text{bubbling}} + [(T_{s,s})_{\text{water}} - (T_{s,s})_{\text{bubbling}}](1 - \epsilon') \dots \dots \dots (2)$$

$$\epsilon' = Q_g / Q = Q_g / (Q_g + Q_L) \dots \dots \dots (3)$$

ここで $(T_{s,s})_{\text{bubbling}}$ と $(T_{s,s})_{\text{water}}$ はそれぞれ気泡噴流と液体噴流の旋回開始時間を表している。図中の (b)~(d) の ϵ' はそれぞれ 0.25, 0.50, 0.75 である。いずれの容器内径、流量割合においても、総流量 Q が大きくなるにつれて、測定値と式 (2) の計算値は一致するようになることが確認された。

3・2 気液二相噴流の旋回周期

Fig. 6 の (a)~(c) に、容器内径 D が 130, 200, 309 mm の各場合における水-空気系気液二相噴流の旋回周期 T_s の測定結果を示す。アスペクト比 H_L/D は 0.500 である。どの場合においても、総流量 Q は気液二相噴流の旋回周期 T_s にほとんど影響を及ぼさなかった。同様の結果が気液二相噴流の総流量 Q に占める空気流量 Q_g の割合 ϵ' を変えても得られた。

図中の破線は式(4), (5)で表される回転スロッシングの基本モードの巡回周期 T_s の計算値である^{15,16}。

$$T_s = 2\pi/\omega_1 \dots\dots\dots(4)$$

$$\omega_1 = [(2g\lambda_1/D) \cdot \tanh(2\lambda_1 H_L/D)]^{1/2} \dots\dots\dots(5)$$

ここで回転スロッシングとは、円筒容器を外部から上下、あるいは水平方向に振動させたときに現れる浴の巡回現象のことであり、 ω_1 は基本モードの角速度、 g は重力加速度、 λ_1 は1.8412である。

本研究で対象とした流量範囲において、測定値と計算値はよく一致した。また、アスペクト比(H_L/D)を変化させて気液二相噴流における巡回周期 T_s の測定を行ったが、Fig. 7に示すように、巡回周期 T_s に対するアスペクト比の影響は大きくなく、式(4), (5)で精度良く近似できた。したがって、水と空気の気液二相噴流における巡回周期 T_s は、

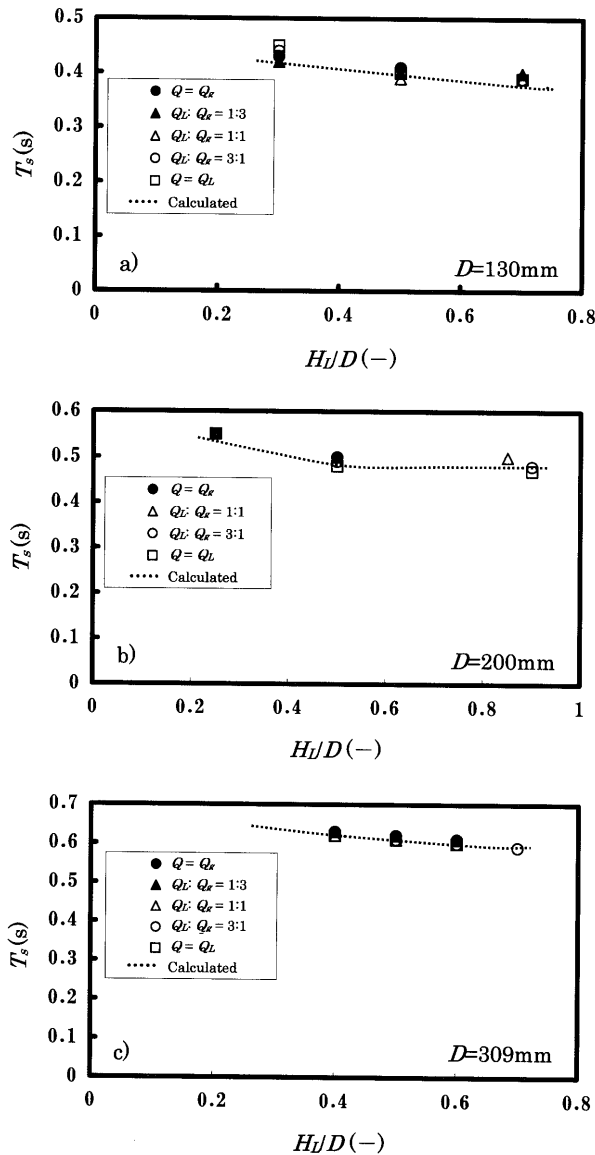


Fig. 7. Correlation of the period of swirl motion ($D=130, 200, 309$ mm, $Q=300$ cm³/s, $d_{nen}=13$ mm).

流量割合 ϵ' に影響されることなく、容器内径 D と浴深 H_L のみに依存している。

3.3 気液二相噴流の振幅

Fig. 8~10の(a)には、容器内径 D が130, 200, 309 mmの各場合における、液体噴流ならびに気泡噴流における振幅の測定結果を示す。アスペクト比 H_L/D は0.500である。振幅 A は、円筒容器の側壁における最も高い水位と、最も低い水位との差を2で除したものと定義している。Fig. 8~10の(b)~(d)には、水と空気の気液二相噴流における振幅 A の測定値と次式(6)により導かれた計算値とを比較した結果を示す。

$$A = A_{\text{bubbling}} + (A_{\text{water}} - A_{\text{bubbling}})(1 - \epsilon') \dots\dots\dots(6)$$

ここで A_{bubbling} と A_{water} はそれぞれ気泡噴流と液体噴流の振幅を表している。容器内径 D が130, 200, 309 mmのいずれの場合においても、気液二相噴流の流量割合にかかわらず、

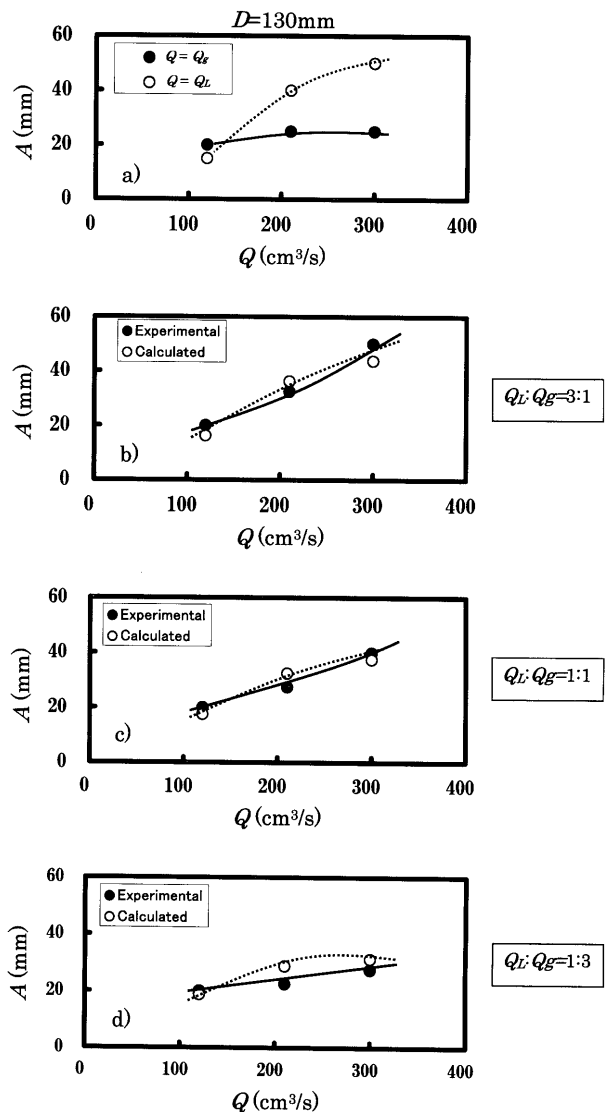


Fig. 8. Comparison between experimental and calculated amplitudes of swirl motion ($D=130$ mm, $H_L/D=0.500$, $d_{nen}=13$ mm).

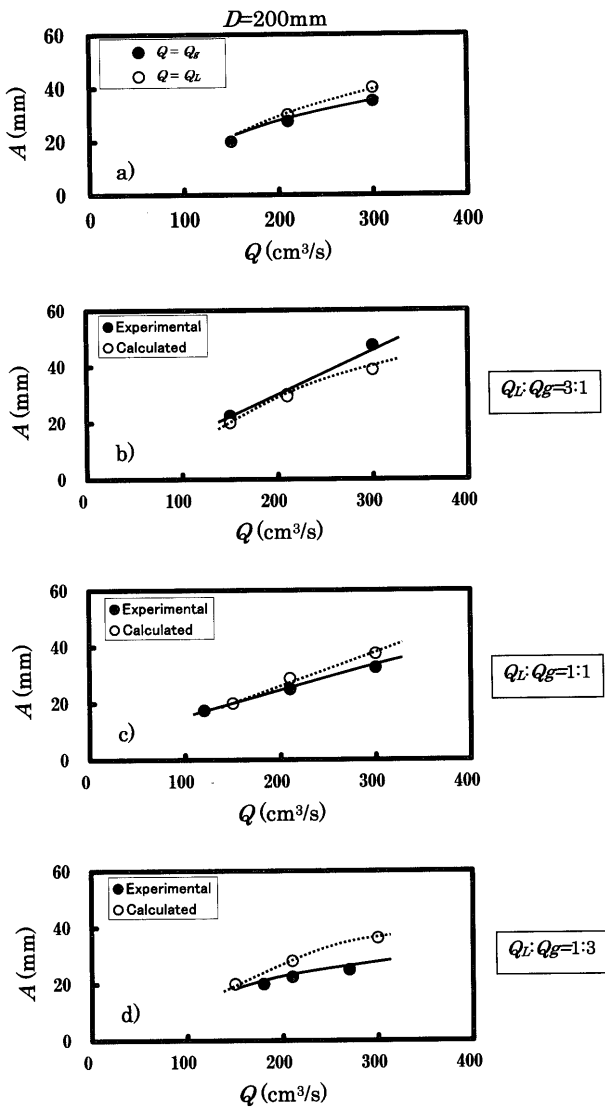


Fig. 9. Comparison between experimental and calculated amplitudes of swirl motion ($D=200$ mm, $H_L/D=0.500$, $d_{\text{nen}}=13$ mm).

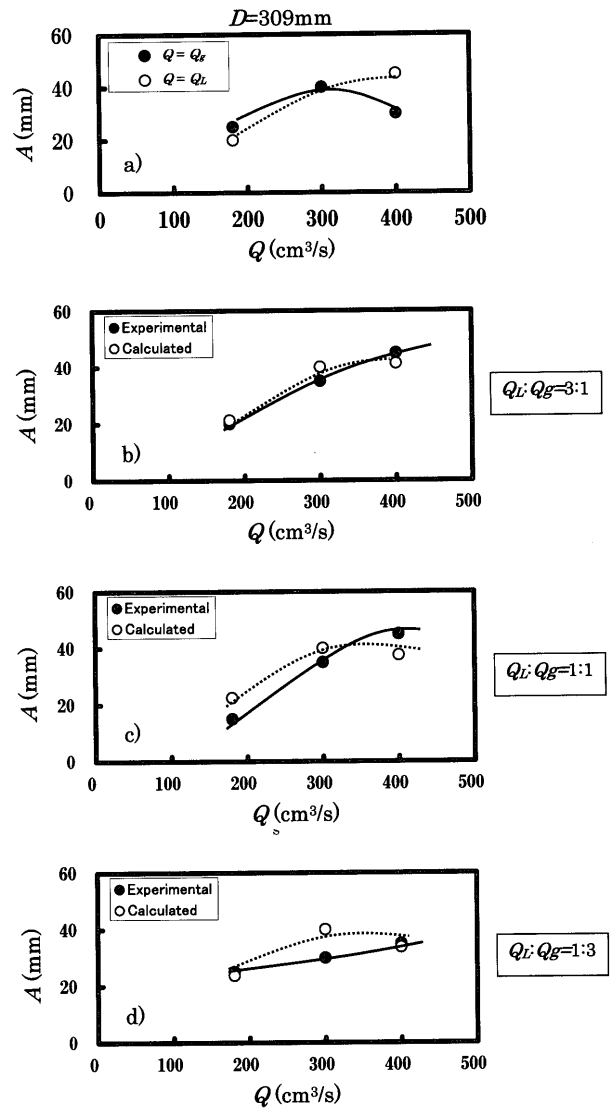


Fig. 10. Comparison between experimental and calculated amplitudes of swirl motion ($D=309$ mm, $H_L/D=0.500$, $d_{\text{nen}}=13$ mm).

測定値と計算値はほぼ一致した。

以上のことから、気泡噴流と液体噴流の旋回開始時間、旋回周期、振幅に関する情報があれば、それらと気体の流量割合 ϵ' を用いて任意の ϵ' における気液二相噴流の旋回現象の特性を予測できることが明らかになった。現在のところ、気泡噴流については、ノズル内径が大きく、したがって気泡噴流が気泡に働く浮力のみによって駆動されるとき旋回現象の特性についてはよく分かっていない。また、液体噴流の旋回現象についても、その研究は緒についたところであり、今後いっそうの研究が望まれる。

4. 結言

本研究では、円筒容器内の気液二相噴流の旋回現象における旋回開始時間 $T_{s,s}$ 、旋回周期 T_s および振幅 A を調査した結果、以下のことが明らかになった。

(1) 本研究で対象とした流量範囲において、水と空気気液二相噴流における旋回開始時間 $T_{s,s}$ および振幅 A は、気体の流量割合 ϵ' ならびに、気泡噴流と液体噴流の旋回開始時間および振幅に関するデータを用いて予測することができる。

(2) 水と空気気液二相噴流における旋回周期 T_s は、本研究で対象とした流量範囲において、容器を外部から加振したときに現れる回転スロッシングの基本モードの旋回周期によく一致した。すなわち、旋回周期 T_s は気体と液体の流量割合 ϵ' に関係なく、容器内径 D と浴深 H_L から予測可能である。

記号

$T_{s,s}$: 旋回開始時間	[s]
T_s	: 旋回周期	[s]
A	: 振幅	[mm]
D	: 容器内径	[mm]

d_{nen}	: ノズル内径	[mm]
$d_{\text{nen.g}}$: 空気吹込み用ノズルの内径	[mm]
Q	: 水と空気の総流量 ($=Q_g+Q_L$)	[cm ³ /s]
Q_L	: 水流量	[cm ³ /s]
Q_g	: 空気流量	[cm ³ /s]
H	: 容器高さ	[mm]
H_L	: 浴深	[mm]
H_L/D	: アスペクト比	[-]
ε'	: 空気の流量割合 ($=Q_g/Q$)	[-]
ρ_L	: 水の密度	[kg/m ³]
ρ_g	: 空気の密度	[kg/m ³]
σ	: 表面張力	[mN/m]
ν_L	: 水の動粘度	[mm ² /s]
ν_g	: 空気の動粘度	[mm ² /s]

文 献

- 1) M.Shitara, M.Iguchi, K.Takano, T.Tamamori, H.Shitara and T.Maruyama: *Mater. Trans.*, **44** (2003), 2456.
- 2) Y.Kato, K.Nakanishi, T.Nozaki, K.Suzuki and T.Emi: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 1604.
- 3) M.Iguchi, S.Hosohara, T.Koga, R.Yamaguchi and Z.Morita: *ISIJ Int.*, **33** (1993), 1037.
- 4) Y.Xie and F.Oeters: *Steel Res.*, **63** (1992), 227.
- 5) M.P.Schwartz: *Chem. Eng. Sci.*, **45** (1990), 1765.
- 6) M.Iguchi, Y.Itoh and Z.Morita: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 189.
- 7) G.G.K.Murthy, S.P.Mehrorra and A.Ghosh: *Metall. Trans. B*, **19** (1988), 839.
- 8) M.Iguchi, Y.Eguchi, A.Kawasaki, S.Kitamura and K.Naito: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 767.
- 9) J.Yoshida, D.Iguchi, M.Shitara and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 1890.
- 10) D.Iguchi, J.Yoshida and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 357.
- 11) D.Iguchi, J.Yoshida and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 363.
- 12) M.Shitara, M.Iguchi, T.Tamamori, J.Yoshida and D.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 345.
- 13) M.Iguchi, K.Okita, T.Nakatani and N.Kasai: *Int. J. Multiphase Flow*, **23** (1997), 249.
- 14) H.Ihira and M.Iguchi: *J. Jpn. Soc. Multiphase Flow*, **17** (2003), 403.
- 15) A.Kimura and H.Ohashi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **44** (1978), 3024.
- 16) A.Kimura and H.Ohashi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **44** (1978), 3446.