

低ウェーバー数領域における底吹き球形容器内 気泡噴流の旋回現象

小坂 洋介*・井口 学*

The Swirl Motion of Vertical Bubbling Jet in a Spherical Vessel at Low Weber Numbers

Yousuke KOSAKA and Manabu IGUCHI

Synopsis : A spherical bath agitated by bottom gas injection showed two types of swirl motions, shallow and deep water wave types, under certain blowing conditions. The swirl motions were very similar to those observed for a cylindrical bath. The conditions under which the swirl motions appeared were experimentally determined. Empirical equations were proposed for the period, amplitude, starting time, and damping time of the swirl motions.

Key words : steelmaking; refining; swirl motion; spherical vessel; gas injection.

1. 緒言

液体を満たした円筒形容器底部に設置した単孔ノズルからガスを吹き込むと、ノズル出口でのみかけのマッハ数が1よりも小さいとき、ノズルの上方に気泡噴流が形成される¹⁾。この気泡噴流が周囲の液体の運動を誘起することにより、浴内に循環流が生じ、液体は強く攪拌される。転炉や取鍋ではこのようなガス吹込み操作が行われているが、いずれも気泡噴流が浴内を真上に上昇する場合を対象としている。ところが、ある条件下においては、気泡噴流は旋回現象を呈することがある²⁻⁶⁾。このような旋回現象を利用することにより簡便な操作で、より高い攪拌効果が期待できる。従来、旋回現象が現れるとスロッピング、スプラッシュ、スピittingなどが激しくなり、安定な操作ができないことからその利用は避けられてきたが、省資源、省エネルギー化が叫ばれている現在、旋回現象を積極的に利用する時期にきているのではないかと考えられる。

円筒形容器内の旋回現象に関しては多くのモデル実験が行われている。著者らは⁴⁻⁷⁾、旋回の始まる浴深、旋回の終わる浴深、旋回周期 T_s 、旋回の振幅 A 、ガスを吹き込んでから旋回が始まるまでの時間 $T_{s,s}$ 、ガス吹込みを止めてから旋回が停止するまでの時間 $T_{s,d}$ だけでなく、偏心ガス吹込みの影響などを明らかにしている。しかしながら、実際の転炉や取鍋は純粋な円筒形ではなく、底面が滑らかな曲線を描いて側面へ続いている⁸⁾。円筒形容器においては、上昇する気泡噴流の影響をほとんど受けない死水域に近い状態を示す領域が底面と側面の接続部近傍に存在することから、底部の形状を球形へ近づけることによって、より高

い攪拌効率が期待できるが、この点に関する詳細な情報は得られていない。

本研究では、円筒とともに最も基本的な容器でありながら、気泡噴流の挙動については未解明の点が多い球形容器について⁹⁾、底部中央に設けた単孔ノズルから浴内にガスを吹き込んだときに形成される上昇気泡噴流の旋回現象に着目し、水モデル実験を行った。円筒容器の場合と同様に、旋回の始まる浴深 $(H_L/D)_{LC}$ 、旋回の停止する浴深 $(H_L/D)_{UC}$ 、旋回周期 T_s 、旋回中の振幅 A 、旋回開始時間 $T_{s,s}$ 、旋回減衰時間 $T_{s,d}$ について調査し、円筒形容器の結果と比較しつつ、実験式を導いた。

2. 実験方法

実験装置の概要をFig. 1に示す。液体としてイオン交換水を用い、容器には、内径 D が0.160 m, 0.220 m, 0.280 mの3種類のガラス製容器を用いた。容器底部の中心に内径 d_{ni} が 2.0×10^{-3} mの上向きノズルを設置し、コンプレッサーからの空気をマスフローコントローラーにより流量を制御して吹き込んだ。ガス流量 Q_g は $33.9 \sim 870 \times 10^{-6}$ m³/sの範囲とした。なお、ノズル近傍の流れ場がノズルから吹き出すガスの慣性力によって主に支配される場合には、ノズルの内径は旋回現象にほとんど影響を与えないことがわかっているため1種類のノズルを用いた⁴⁾。

旋回する様子を容器上方、側面から目視により観察し、旋回開始から旋回停止までの浴深を求めた。また周期 T_s については容器上方より、振幅 A 、開始時間 $T_{s,s}$ 、減衰時間 $T_{s,d}$ については容器上方および側面から観察、測定を行っ

た。実験は各条件について、最低5回以上行い、平均値を求めた。

3. 結果と考察

3.1 旋回現象の分類

3.1.1 浅水波型旋回と深水波型旋回

本実験条件下の旋回現象はFig. 2, Fig. 3に示すように、発生機構により2種類に分類される。一つは浅水波型旋回(Fig. 2)と呼ばれ⁴⁾、浴深が小さく、ガス流量が小さい範囲で起こり、気泡噴流の半径方向変位は小さく、気泡噴流はノズル出口近傍で旋回する。もう一つは深水波型旋回(Fig. 3)と呼ばれ、浴深が大きく、ガス流量もある程度大きい範囲で起こり、気泡噴流の半径方向変位は大きくなって、気泡は容器側壁近くまで接近し、旋回周期は浅水波型旋回よ

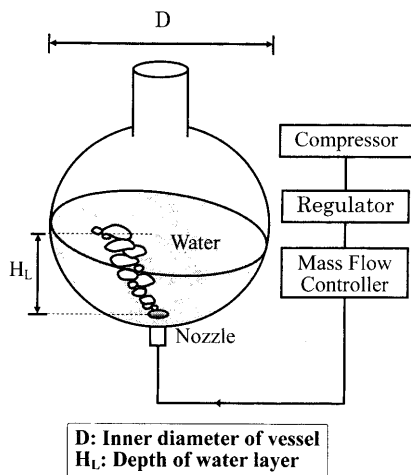


Fig. 1. Experimental apparatus.

りも2倍ほど長くなる。すなわち、浅水波型旋回は浴面の波動が容器底の影響を強く受ける旋回、深水波型旋回は容器底の影響をほとんど受けない旋回である。

3.1.2 浅水波型、深水波型旋回の起こる領域

円筒容器内において浅水波型と深水波型の旋回現象が現れる範囲はアスペクト比 H_L/D と、次式に示すウェーバー数 We を用いて整理できることが知られている⁴⁾。

$$We = \rho_L Q_g^2 / \sigma_L D^3 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ_L は液体の密度、 σ_L は表面張力を表す。文献4)の We の範囲では、旋回の起こる領域の境界はノズル内径 d_n の影響をほとんど受けない。これは前述のように、ノズル出口近傍の流れ場が気泡の持つ慣性力によって主に支配されるときに成立し、ノズル出口でのガスの慣性力が小さくなって、ノズル近傍の流れ場が浮力支配となれば、適用できない。

球形容器内の旋回現象の起こる領域の境界をFig. 4に示す。破線は境界を表す測定値を滑らかに結んだ線である。浅水波型の旋回の起こる範囲は円筒形容器の場合とあまり異ならないが、深水波型旋回の上限臨界値は球形容器のほうが小さいことがわかった。なお、円筒容器において浅水波型旋回の起こる範囲の境界は、繁雑さを避けるために描いていない。

円筒形容器の上限臨界値に対する実験式は繁雑であるが、ウェーバー数 We の関数として次式で与えられる⁴⁾。

$$\log(H_L/D)_{UC} = 0.05 - 1.35(X+6) / [\exp(X+5)] \dots\dots\dots (2)$$

$$X = \log(We) \dots\dots\dots (3)$$

$(10^{-4} \leq We \leq 1)$

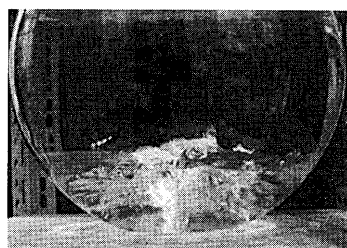


Fig. 2. Swirl motion of shallow water wave type.

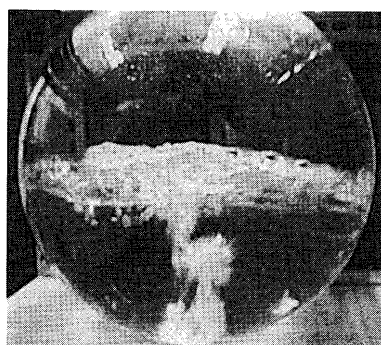
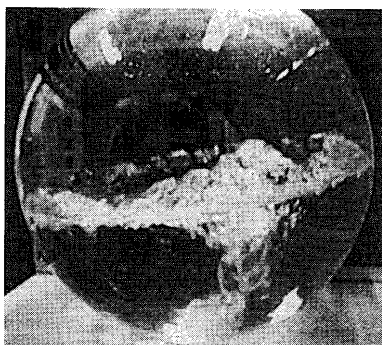


Fig. 3. Swirl motion of deep water wave type.

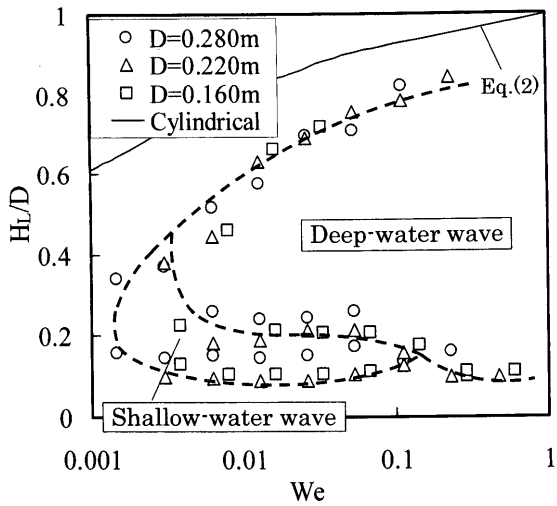


Fig. 4. Relationship between We and critical aspect ratio at which the swirl motion occurs and ceases in water bath.

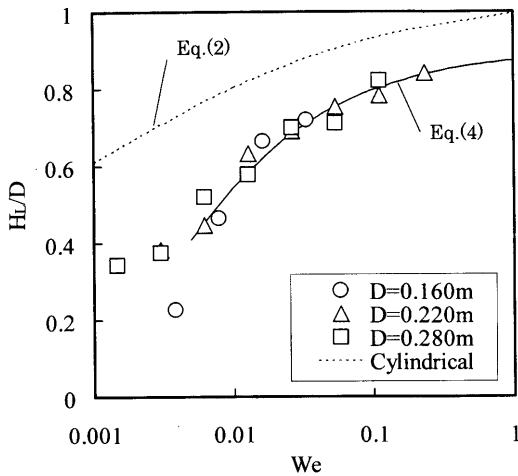


Fig. 5. Critical aspect ratio at which the swirl motion occurs and ceases in water bath.

球形容器の上限臨界値に対しても次の実験式を導いた。

$$(H_L/D)_{UC} = 0.90 \tanh[0.70 \log(1000We)] \dots\dots\dots(4)$$

$$(0.005 \leq We \leq 1)$$

実験式を測定値と比較して Fig. 5 に示す。0.005 ≤ We ≤ 1 の範囲で、式(4)は測定値をよく近似できている。球形容器の上限臨界値は、円筒容器の上限臨界値よりかなり小さいことがわかる。これは球形容器の H_L/D が 0.5 を超えると、容器側壁の形状が Fig. 6(b) のようになっていることから、旋回運動によって上下運動する水と容器壁との接触面積が円筒容器の場合よりも大きくなるとともに、波頭がくずれやすくなって水面の振動(Fig. 6(a))を抑制する力が大きくなるためであると考えられる。溶鋼の密度(7000 kg/m³)、表面張力(1700 mN/m)、実機のガス流量(50~100 m³/s)¹⁰⁾、容器径(5~10m)から算出すると、実機におけるウェーバー数の上限値は約 10⁵ となる。Fig. 4 において、

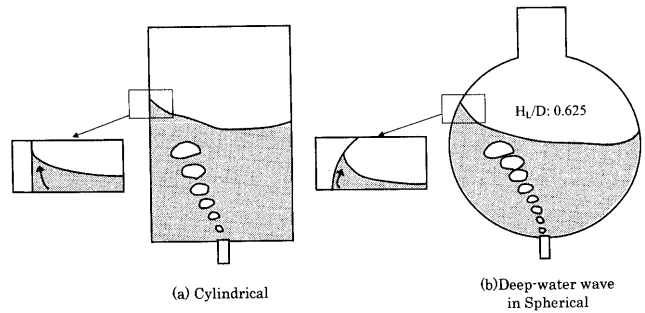


Fig. 6. Effect of side wall on liquid surface oscillation in cylindrical and spherical vessels.

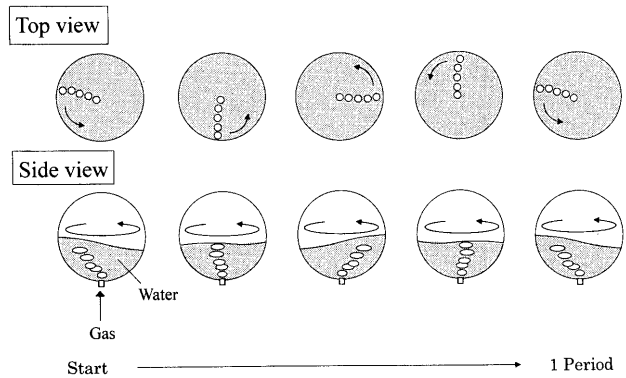


Fig. 7. Period of swirl motion.

ウェーバー数の上限値は 1 未満であるが、このグラフの延長を考えると、深水波型旋回はウェーバー数が大きくなっても起こると予想でき、本実験結果は実機へ適用できるものと考えられる。しかしながら、実際は濡れ性の問題も関連している。このことについては、熔融金属を用いることや、さらに実機に近いスケールのモデルを用いて実験を行い、確認していきたい。

3.2 旋回周期

Fig. 7 に旋回の様子を模式的に示す。旋回周期の測定はガス吹込み後、旋回が定常状態になってから、100回転するまでの時間をストップウォッチによって5回計測して平均をとり、1回転あたりの時間を求め、それを旋回周期とした。

球形容器の回転スロッシング(容器加振)の周期¹¹⁾と比較したものを Fig. 8 に示す。

$$T_s = \frac{2\pi}{\omega} \dots\dots\dots(5)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2g\lambda}{D}} \dots\dots\dots(6)$$

$$\sqrt{\lambda} = 1 - 0.116 \frac{H_L}{D} + 3.488 \left(\frac{H_L}{D}\right)^2 - 7.2 \left(\frac{H_L}{D}\right)^3 + 5.376 \left(\frac{H_L}{D}\right)^4 \dots\dots\dots(7)$$

円筒容器の場合と同様に、容器内径0.220, 0.280mにおける深水波型旋回の測定値は式(7)により±7%の偏差でよく近似できることがわかる。ただし、本測定値は容器内径0.160mでは、式(7)よりも25%程度上方にずれている。これは、回転スロッシングと違い、ガスを吹き込んでいるため見かけの液体積が増加し、あたかも浴深が大きくなったかのような様相を呈したためであると考えられる。なお、浅水波型旋回の周期も破線で示した回転スロッシングの式に一致しているが、この式については参考文献⁹⁾を参照されたい。

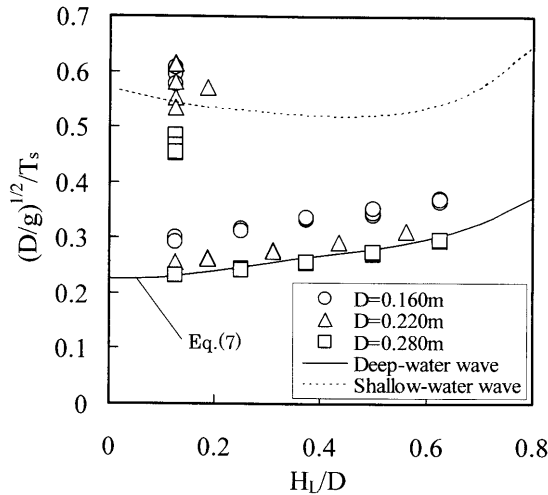


Fig. 8. Comparison of the period of sloshing with the period of swirl motion in spherical vessel in water bath.

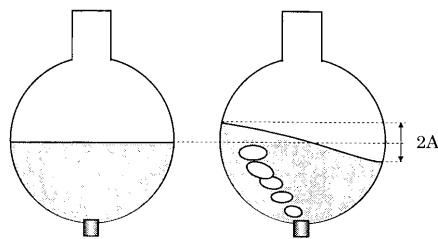


Fig. 9. Definition of amplitude.

れたい。

3.3 旋回中の液面変動の振幅

3.3.1 振幅の定義

ガスを吹き込んでいないときとガスを吹き込んで旋回が起きている液面の状態をそれぞれFig. 9に示す。旋回が起きているときの液面の最低位置と最高位置の距離の差の1/2を振幅Aとした。液面の振幅は、容器横方向からビデオカメラで旋回運動を撮影し、時間をおいてよみとって5周期分の振幅の平均値をとった。

3.3.2 振幅とアスペクト比

Fig.10は容器内径D=0.160mにおいて、ガス流量を固定した状態におけるアスペクト比と振幅の関係を示す。点線は円筒形容器に対する実験式⁹⁾から推算した値である。実線は、球形容器に対して、ここで提案したものであり、以下の実験式によって与えられる。なお、 $(H_L/D)_{UC}$ 、 $(H_L/D)_{LC}$ はそれぞれ旋回の上限臨界アスペクト比、下限臨界アスペクト比を表しており、 $(H_L/D)_{UC}$ は式(4)を用いて計算し、 $(H_L/D)_{LC}$ はFig. 4の破線の示す値を読み取った。

$$A = 0.740 \left[\frac{(Q_g - Q_{gc})^2}{g} \right]^{1/5} \left[1 - \left\{ \frac{2}{(H_L/D)_{UC} - (H_L/D)_{LC}} \right\}^2 \times \left\{ H_L/D - \left(\frac{(H_L/D)_{UC} + (H_L/D)_{LC}}{2} \right) \right\}^2 \right] \dots\dots\dots (8)$$

$$Q_{gc} = 0.0707 [\sigma_L D^3 / \rho_L]^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

いずれのガス流量においても、測定値と実験式(8)との一致は比較的よい。球形容器の振幅は円筒容器内の振幅よりもかなり小さいことがわかる。

3.3.3 振幅とガス流量

Fig.11はD=0.160mの容器において、アスペクト比を固

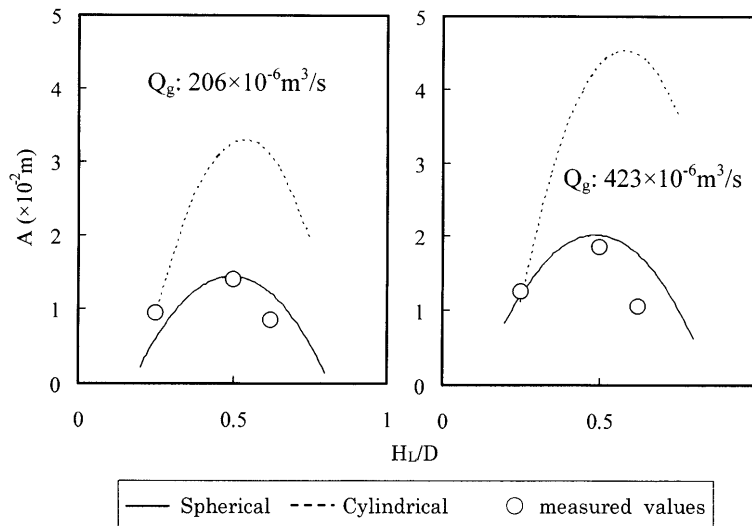


Fig. 10. Relationship between aspect ratio and amplitude (D=0.160m).

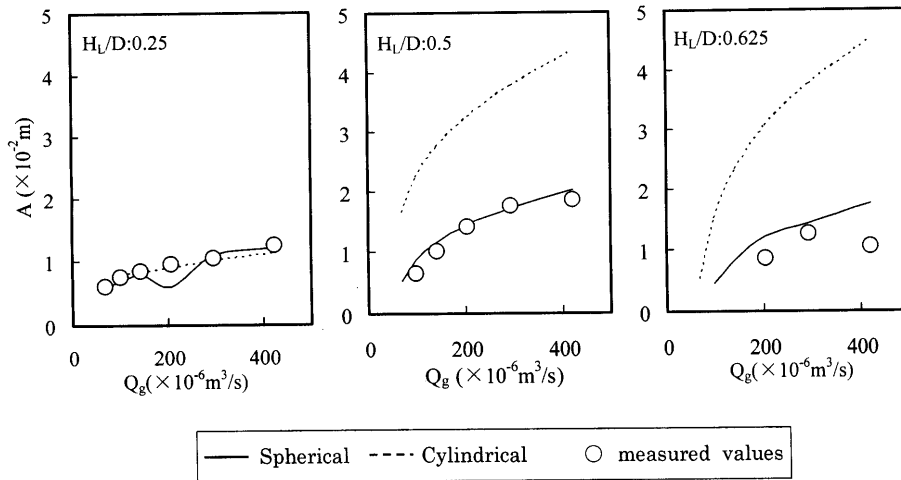


Fig. 11. Relationship between gas flow rate and amplitude ($D=0.160$ m).

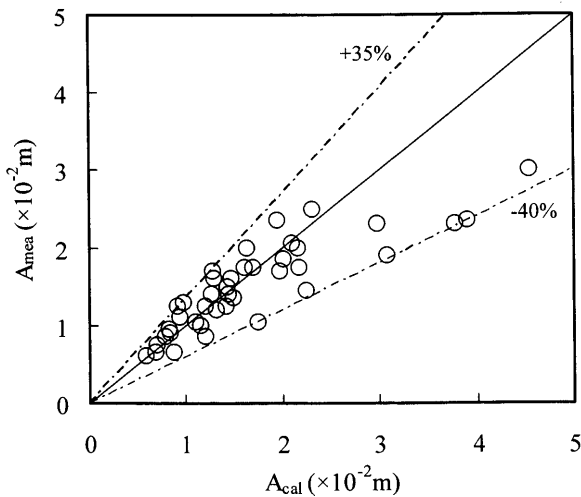


Fig. 12. Comparison of measured amplitude values with Eq. (8).

定した状態におけるガス流量と振幅の関係を示す。点線と実線はそれぞれ円筒形容器と球形容器における振幅の実験式を表している。ガス流量の増加とともに振幅は大きくなるが、実験式(8)との一致は比較的良好。

3.3.4 振幅の測定値と実験式(8)との比較

Fig.12に振幅の測定値を実験式(8)と比較して示す。測定値は式(8)によって、-40%~+35%の偏差で近似できる。この種の実験においては、この程度の偏差は十分許容できる範囲内にある。

3.4 旋回開始時間

3.4.1 旋回開始時間の定義

旋回開始時間 $T_{s,s}$ は、ガス吹込み開始後、浴全体が一定周期、一定振幅の振動を開始するまでに要する時間と定義し、測定回数は一条件につき最低5回とした。旋回現象が現れるかどうかの判定は主に目視により行い、ガス吹込み後10min以上経過しても旋回現象が観察されない場合は旋回が起こらないものと判断した。

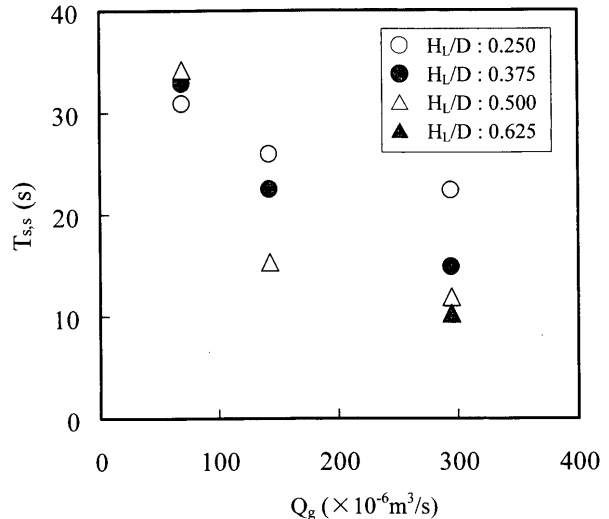


Fig. 13. Relationship between gas flow rate and starting time of swirl motion ($D=0.160$ m).

3.4.2 旋回開始時間の評価

Fig.13~15は、容器内径ごとの旋回開始時間 $T_{s,s}$ とガス流量の関係をアスペクト比 H_l/D をパラメータに取って示す。容器内径が小さいほど、またガス流量が大きいほど $T_{s,s}$ は短くなっている。なお、Fig.14中の測定値の減少割合が他の容器内径のものに比べて、やや小さいようであるが、その理由についてはよくわからない。

Fig.16において、まず円筒形容器に対して導かれている以下の実験式⁶⁾を本実験値と比較してみた。

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

ここで、 $Re = [(Q_g^2/g)^{2/5}(g/D)^{1/2}/\nu_L]$ は気泡の半径方向への広がりの尺度である $(Q_g^2/g)^{1/5}$ を代表長さ、 $(Q_g^2/g)^{1/5}(g/D)^{1/2}$ を代表速度とするレイノルズ数であり、気泡噴流に連れられて旋回している液体の運動を記述する無次元数である。なお、 $(D/g)^{1/2}$ は旋回周期の尺度、 g は重力加速度、 ν_L は液体の動粘度である。 $H_l Q_g / D^{7/2} g^{1/2}$ は気泡噴流部を除く液体の運動

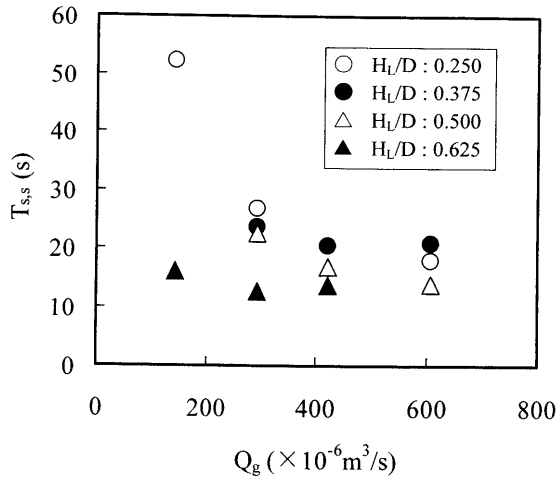


Fig. 14. Relationship between gas flow rate and starting time of swirl motion ($D=0.220 \text{ m}$).

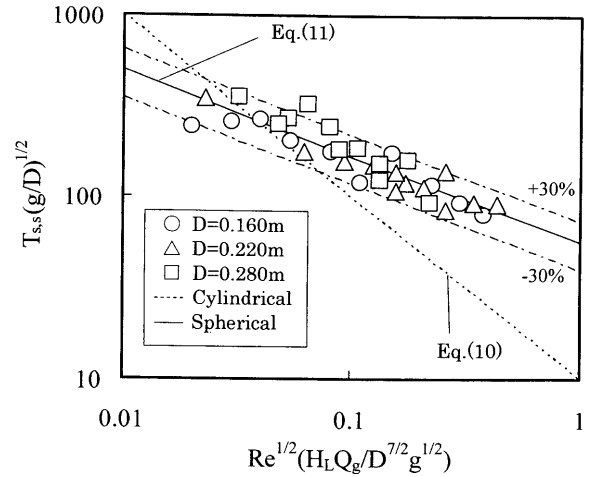


Fig. 16. Comparison of Eq. (11) with measured values of the starting time.

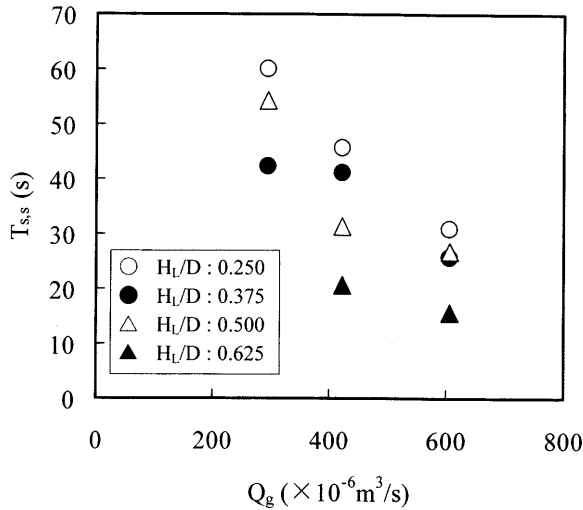


Fig. 15. Relationship between gas flow rate and starting time of swirl motion ($D=0.280 \text{ m}$).

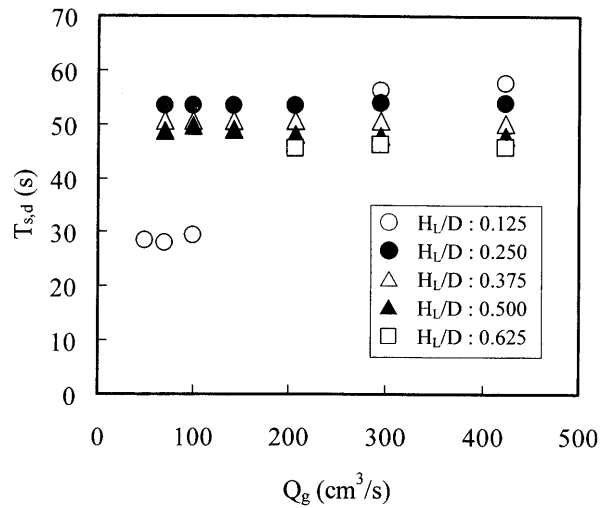


Fig. 17. Relationship between gas flow rate and damping time of swirl motion ($D=0.160 \text{ m}$).

を記述する無次元数である。本実験値は、式(10)では近似できないので、式(10)を参考にして以下の実験式を提案した。旋回開始時間 $T_{s,s}$ は式(11)により $\pm 30\%$ の偏差で整理できた。

$$T_{s,s}(\text{g}/D)^{1/2} = 56.2 [Re^{1/2}(H_L Q_g / D^{7/2} g^{1/2})]^{-0.474} \dots\dots\dots (11)$$

球形容器の旋回開始時間は円筒容器のそれよりも一般に長い。これは容器壁の拘束力が大きいためであると考えられるが、証明については今後の課題としたい。

3.5 旋回減衰時間

3.5.1 旋回減衰時間の定義

旋回の減衰時間 $T_{s,d}$ は、旋回現象が定常状態に達したのちガス吹込みを停止してから、浴全体の振動が観察されなくなるまでの時間と定義した。容器横方向からビデオカメラを用いて撮影し、振動の振幅が 0.5 mm になった時間を測定した。測定一条件につき最低5回行った。

3.5.2 旋回減衰時間の評価

Fig.17~19に $T_{s,d}$ の測定結果をガス流量に対して示す。アスペクト比が 0.625 以外のとき、旋回の減衰時間はガス流量が大きいにほど長くなっている。しかし、アスペクト比 0.625 ではいずれの容器内径においても、ガス流量を大きくしたからといって減衰時間が長くなっているわけではない。これは、容器側壁によって液面振動が強く抑制されるためである。また、Fig.17において、他の容器内径と異なり、ガス流量依存性があまりみられない。この場合、容器内径が小さいので、浴深 H_L が小さくなり、ガス流量が小さい場合でもガスの吹き抜けが起き、ガス流量の影響が小さくなったためであると考えられる。

減衰時間についても横軸に開始時間と同じ無次元数 $Re^{1/2}(H_L Q_g / D^{7/2} g^{1/2})$ 、縦軸に $T_{s,d} Q_g / D^3$ なる無次元数をとって整理した結果を Fig.20に示す⁶⁾。ここで、 $T_{s,d} Q_g / D^3$ は空塔速度を代表速度とするストローハル数の逆数となっている。円筒形容器では以下の実験式が用いられていた⁶⁾。

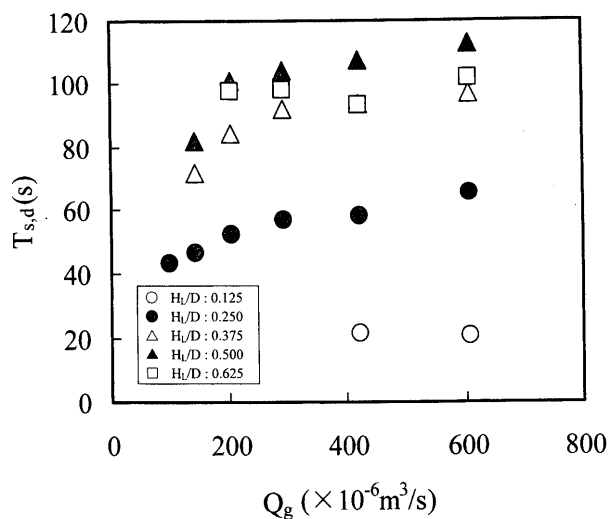


Fig. 18. Relationship between gas flow rate and damping time of swirl motion ($D=0.220 \text{ m}$).

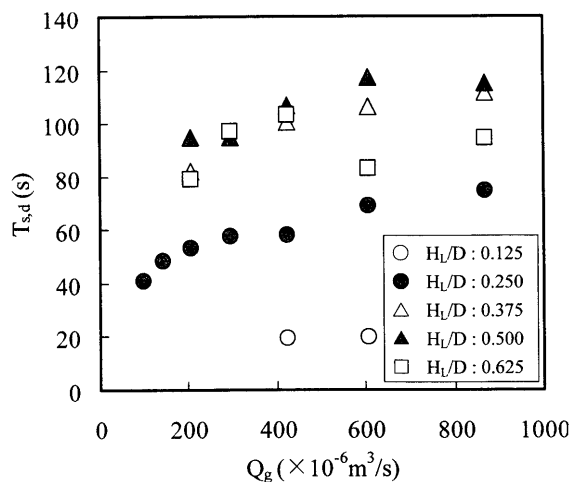


Fig. 19. Relationship between gas flow rate and damping time of swirl motion ($D=0.280 \text{ m}$).

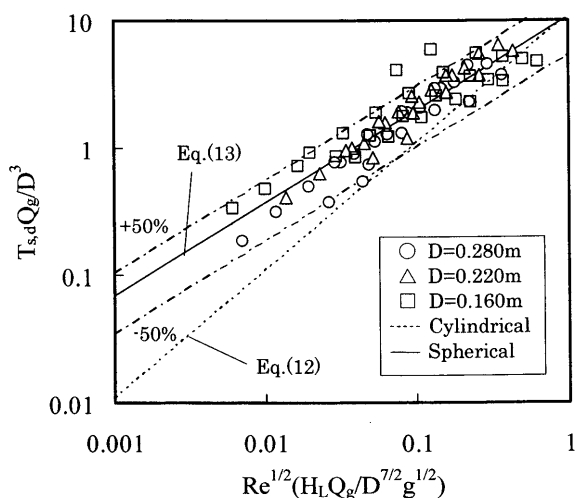


Fig. 20. Comparison of Eq. (13) with measured values of the damping time.

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

式(12)は吹込みガス流量すなわち投入エネルギーが大きくて液体の運動が激しいほど $T_{s,d}$ が大きいことを示している。しかし、本実験の球形容器における実験値は式(12)では近似できないため、上記の式を以下のように補正した。本測定値は式(13)によって $\pm 50\%$ の偏差で整理できた。振幅や旋回開始時間と同様に、この程度の偏差は許容できる。

$$T_{s,d} Q_g / D^3 = 10.6 Re^{1/2} (H_L Q_g / D^{7/2} g^{1/2})^{0.730} \dots \dots \dots (13)$$

4. 結言

4.1 浅水波型旋回と深水波型旋回

本実験条件下の旋回現象は Fig. 2, Fig. 3 に示すように、発生機構により2種類に大別され、比較的浴深が浅い範囲で起きるものを浅水波型旋回、浴深が比較的深い範囲で観察されるものを深水波型旋回と名付けた。球形容器の深水波型旋回では円筒形容器の深水波型旋回よりも気泡噴流の半径方向変位が大きい。

4.2 旋回の現れる領域

旋回の現れる領域はアスペクト比 H_L/D とウェーバー数 We を用いて Fig. 4 で表される。

4.3 旋回の周期

旋回の周期 T_s は容器内径が 0.220 m , 0.280 m のときは同じ球形容器のスロッシングの近似式(5)~(7)により $\pm 7\%$ の偏差で近似できるが、容器内径 0.160 m では見かけの液体積増加分の影響で $+25\%$ 程度の偏差が生じる。

4.4 旋回の振幅

振幅は式(8)によって $-40\% \sim +35\%$ の偏差で近似できる。

4.5 旋回開始時間

開始時間は式(11)により $\pm 30\%$ の偏差で近似できる。

4.6 旋回減衰時間

減衰時間は式(13)により $\pm 50\%$ の偏差で近似できる。

記号

- A : 振幅
- D : 容器内径
- 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 : 旋回周期
- $T_{s,d}$: 旋回の減衰時間
- $T_{s,s}$: 旋回の開始時間
- We : ウェーバー数
- ν_L : 液体の動粘度
- ρ_L : 液体の密度
- σ_L : 表面張力
- ω : 気泡噴流の旋回の角速度

文 献

- 1) K.Mori and M.Sano: *Tetsu-to-Hagané*, **67** (1981), 672.
- 2) Y.Kato, K.Nakanishi, T.Nozaki, K.Suzuki and T.Emi: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 1604.
- 3) S.Kojima, M.Yoshida, A.Iwatani and H.Take: *Kawasaki Steel Tech. Rep.*, **19** (1987), 1.
- 4) M.Iguchi, S.Hosohara, T.Koda, R.Yamaguchi and Z.Morita: *ISIJ Int.*, **33** (1993), 1037.
- 5) M.Iguchi, Y.Itoh and Z.Morita: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 189.
- 6) M.Iguchi, Y.Eguchi, A.Kawasaki, S.Kitamura and K.Naito: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 767.
- 7) M.Iguchi, H.Ihira, Y.Takatsuka and S.Hosohara: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 1115.
- 8) 第100・101回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, 東京, (1984).
- 9) H.Madaram: *Kikai-no-Kenkyu*, **23** (1971) 8, 45.
- 10) 野崎 努: 底吹き転炉法, 日本鉄鋼協会, 東京, (2000), 39.
- 11) H.Sakota and T.Sakai: *Pressure Technology*, **16** (1978) 3, 143.