

底吹き球形容器内の均一混合時間

小坂 洋介*・井口 学*

Mixing Time in a Spherical Vessel Agitated by Bottom Gas Injection

Yosuke KOSAKA and Manabu IGUCHI

Synopsis : Mixing time of a spherical bath agitated by bottom gas injection was measured in the presence of a swirl motion of the deep water wave type. The mixing time was shorter than that of a cylindrical bath because the so-called dead zone was absent in the spherical bath. An empirical equation was proposed for the mixing time.

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

1. 緒言

鉄鋼精錬プロセスでは、周知のように溶鋼の攪拌手段として多岐にわたるガス吹込み操作が行われており、攪拌の強さを表す尺度として均一混合時間が用いられている¹⁻³⁾。反応容器は転炉や取鍋に代表されるように、円筒形に近いことから、モデル実験に関しては円筒形容器が広く用いられ、種々の条件下における均一混合時間に対する情報が蓄積されている⁴⁻¹⁰⁾。ただし、均一混合時間の測定には大きな誤差が伴い、従来報告されている測定値をすべて精度良く整理できる実験式や数値解析法は、まだ知られていない。均一混合時間の予測に関しては、少なくとも $\pm 50\%$ 以上の偏差を許容しなければならないのが現状である。

著者らは最近、攪拌効率を向上させるための基礎的研究として、均一混合時間に及ぼす円筒容器内の底吹き、上吹き、J字型トップランスを用いたガス吹込み、濡れ性、偏心ガス吹込み、旋回現象などの影響について調べたが、旋回現象の発生が所期の目的を達成するに適しているとの結論に達した¹¹⁻¹³⁾。旋回現象とは、浴中にガスを吹き込んだとき、ある条件下において気泡噴流が容器壁に沿って旋回することをさしている。しかしながら、上述のように多くの研究は円筒形容器に対するもので、円筒形容器とともに最も基本的な形状の球形容器に関する研究はほとんどみられない。現在、反応容器として多く用いられている円筒形容器においては、底部の側壁近傍に死水域に近い領域が存在することが知られている。球形容器では容器底部の形状から判断してこのような領域は存在しないと考えられるため、円筒形よりも均一混合時間が短くなることが予測できる。容器全体の形状としては、液面の振動を抑制すると考えられる球の上半分を取り去った半球形が望ましいと考え

られるが、本研究ではまず、容器底部、側壁部分の形状が均一混合時間に与える影響を調査するため、球形の容器を用いることとする。さらに攪拌効率は旋回が起きている際に顕著に高くなることから、旋回現象を伴う球形容器内の均一混合時間について、円筒形容器と比較しつつ、簡便な予測式を提案する。

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、トレーサーとして 1.0 kmol/m^3 のKCl水溶液をイオン交換水 $1000 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ に対して $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ の割合で添加した。用いた容器は、内径 D が0.160, 0.220, 0.280 mの3種類のガラス製の丸底フラスコである。容器の底部の中心にノズル内径 $d_n = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}$ 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制御して吹き込んだ。ノズルから吹き込まれるガス流量

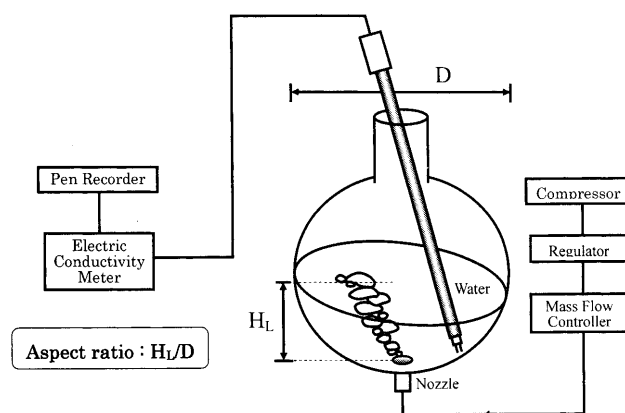


Fig. 1. Experimental apparatus.

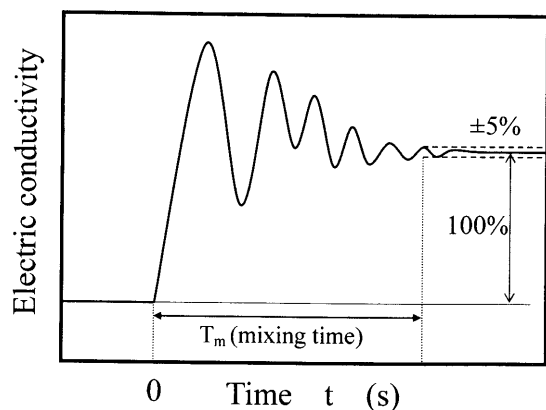


Fig. 2. Definition of mixing time, T_m .

Q_g は33.9~607 m³/sの範囲に設定した。過去の円筒形容器に関する研究より、このガス流量範囲では、ノズル内径は均一混合時間に影響を与えないことがわかっているので、一種類のノズル内径を用いた¹³⁾。

3. 結果と考察

3.1 均一混合時間

3.1.1 均一混合時間の定義

均一混合時間は、容器内のイオン交換水に対して電解質濃度の異なるトレーサーを投入し、局所的な濃度のむらを電気伝導度の変化として検出する方法を採用した。電気伝導度は電気伝導度計を用いて測定し、その時間変化をペンレコーダーで記録した。Fig. 2に示すようにトレーサーを投入した時刻を $t=0$ とすると、その直後から電気伝導度は上下変動を繰り返し、やがて一定値となる。トレーサー投入直前の電気伝導度から最終値の電気伝導度の差を100%とし、その±5%の範囲内に電気伝導度の値が落ち着くまでの時間を均一混合時間 T_m と定義した。なお、本実験におけるKCl水溶液の濃度範囲においては、KCl水溶液濃度と電気伝導度が比例関係を有し、電気伝導度の±5%は濃度の±5%となる。 T_m は攪拌強度の目安として鉄鋼関連だけでなく化学工学の分野の研究においても広く用いられている。

3.1.2 トレーサー投入位置による均一混合時間の変化

Fig. 3中のA, B, Cはトレーサーの投入位置を示している。プローブは容器中心部から0.07 mの位置に設置している。容器中心をA、また、プローブ近傍の容器壁から 10×10^{-3} mの位置をB、さらにBからAを中心に点対称の位置をCとし、この3箇所にトレーサーを投入し均一混合時間を調べた。容器内径 $D=0.220$ m、アスペクト比 $H_L/D=0.5$ におけるガス流量 $Q_g=207 \times 10^{-6}$ m³/sでのトレーサー投入位置と均一混合時間 T_m との関係をFig. 4に示す。すべての測定結果が±10%以内に含まれていること、ならびに円筒形容器に関する従来の研究から判断して、トレー

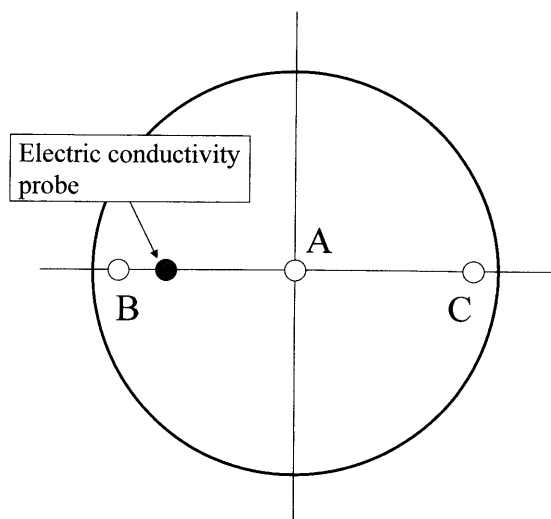


Fig. 3. Tracer charge position.

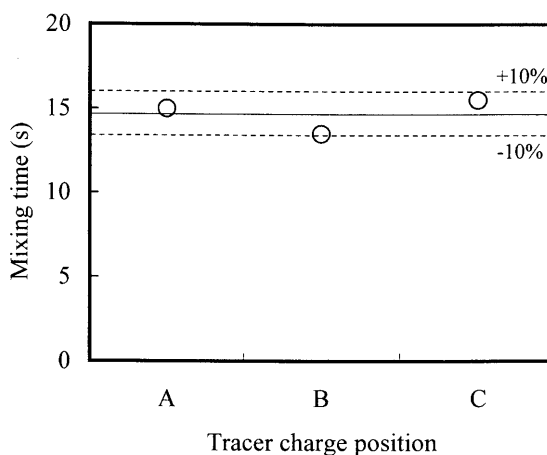


Fig. 4. Relationship between tracer charge position and mixing time ($D=0.220$ m, $Q_g=207 \times 10^{-6}$ m³/s, $H_L/D=0.500$).

サー投入位置は均一混合時間にほとんど影響しないと考えられる。このため、以下の実験では、トレーサーを投入位置Cから投入して測定を行うことにした。

3.1.3 電気伝導度計の設置位置による均一混合時間の変化

電気伝導度計のプローブを容器中心と、上方から見て中心から半径方向に0.07 m、側面からみて底から0.03 mの2箇所において測定を行った。容器内径 $D=0.220$ m、アスペクト比 $H_L/D=0.5$ 、ガス流量 $Q_g=207 \times 10^{-6}$ m³/sの条件下で行った結果をFig. 5に示す。すべてのプロットが±10%以内に含まれていることから、均一混合時間は電気伝導度計のプローブ位置によらず一定であることがわかった。

3.2 旋回現象の種類と均一混合時間

3.2.1 旋回現象の分類

Fig. 6に示すように、旋回現象は実験条件によって浅水波型旋回と深水波型旋回に分類されることがわかっている^{14,15)}。横軸 $We (= \rho_L Q_g^2 / \sigma_L D^3)$ はウェーバー数である。こ

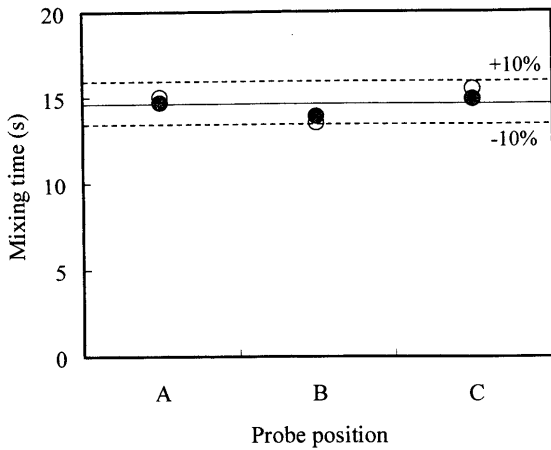


Fig. 5. Relationship between probe position and mixing time ($D=0.220$ m, $Q_g=207 \times 10^{-6}$ m³/s, $H_L/D=0.500$).

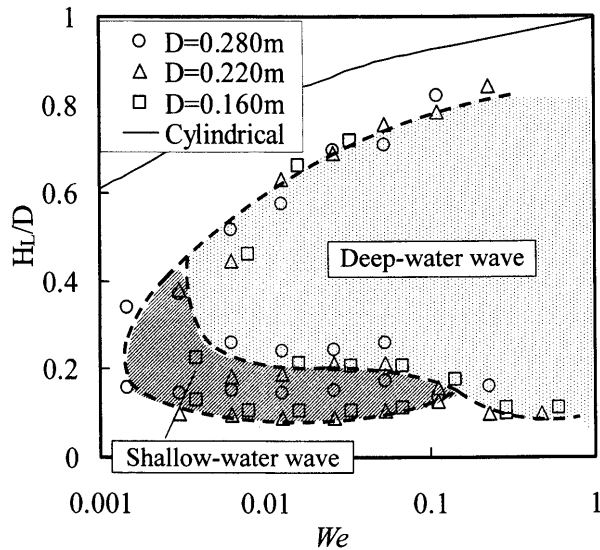
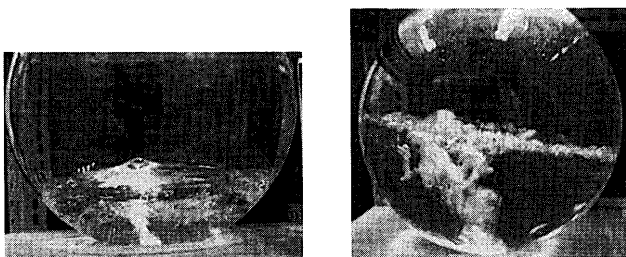


Fig. 6. Relationship between We and critical aspect ratio at which the swirl motion occurs and ceases in water bath.



(a) Shallow

(b) Deep

Fig. 7. Swirl motion of shallow and water wave types.

ここで、 ρ_L は液体の密度、 σ_L は表面張力を表す。図中の実線は円筒容器の旋回の起きるアスペクト比の上限を、破線は球形容器の旋回が起きる範囲を示したものである。浅水波型旋回、深水波型旋回のそれぞれの例をFig. 7に示す。浅水波型旋回は、浴深が小さく、ガス流量が小さい範囲で

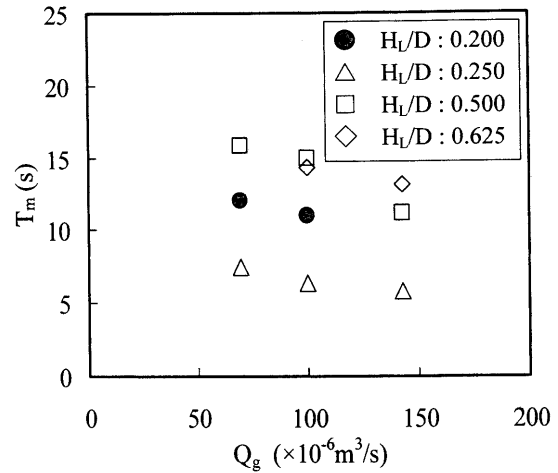


Fig. 8. Relationship between aspect ratio and mixing time ($D=0.160$ m).

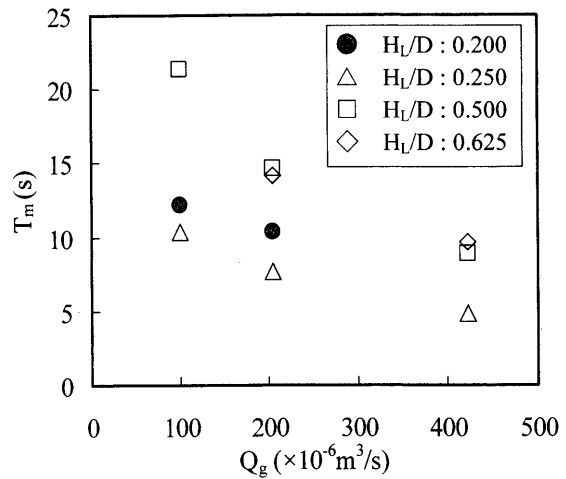


Fig. 9. Relationship between aspect ratio and mixing time ($D=0.220$ m).

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。一方、深水波型旋回は、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。

3.2.2 旋回型と均一混合時間の関係

Fig. 8~10は各容器内径、各アスペクト比におけるガス流量と均一混合時間の関係を示している。アスペクト比0.200では浅水波型旋回が、それ以外のアスペクト比では深水波型旋回が起きている。これらの結果からわかるように、浅水波型旋回はアスペクト比が最も小さい、すなわち、水の量が最も少ないにも関わらず、アスペクト比が0.250の深水波型旋回よりも均一混合時間が長いことがわかる。このことより、深水波型旋回のほうが攪拌効率がよいと考えられる。なお、 $H_L/D=0.500$ と0.625の場合の均一混合時

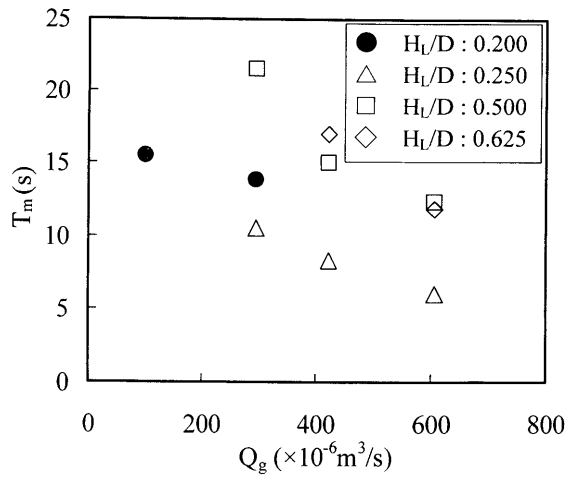


Fig. 10. Relationship between aspect ratio and mixing time ($D=0.280$ m).

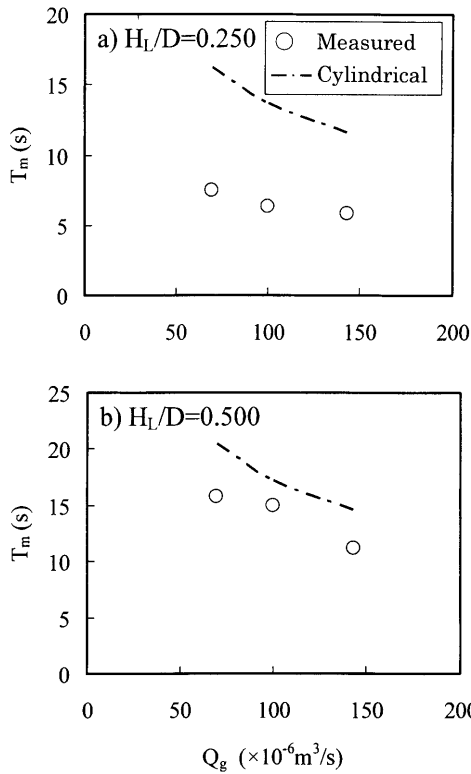


Fig. 11. Relationship between gas flow rate and mixing time ($D=0.160$ m).

間はほぼ等しい値をとっている。

3・2・3 球形容器と円筒形容器の均一混合時間の比較

Fig.11~13は、各容器内径、各アスペクト比におけるガス流量と均一混合時間の関係を示している。また、一点鎖線は式(1)によって表される円筒形容器に用いられている均一混合時間の実験式を表している¹²⁾。

$$T_m = 15.4g^{-0.28} Q_g^{-0.47} D^{1.27} H_L^{0.33} \nu_L^{0.03} \dots \dots \dots (1)$$

ここで g は重力加速度、 ν_L は液体の動粘度である。これらの結果から均一混合時間はガス流量が大きくなるほど、また容器内径が小さくなるほど短くなった。アスペクト比

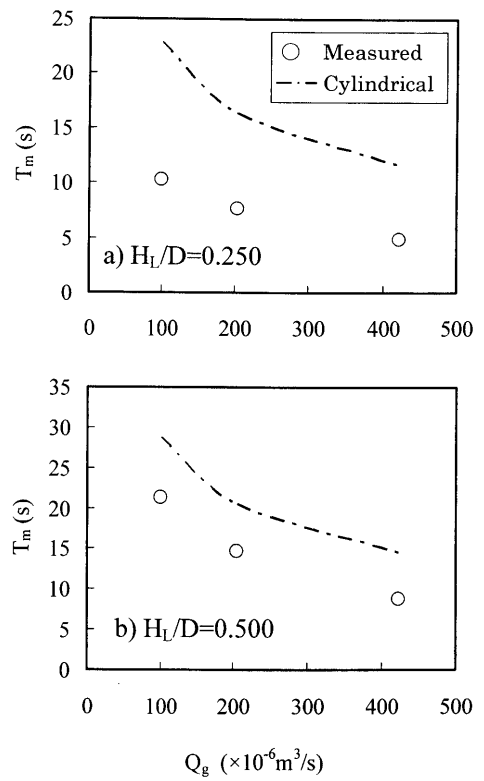


Fig. 12. Relationship between gas flow rate and mixing time ($D=0.220$ m).

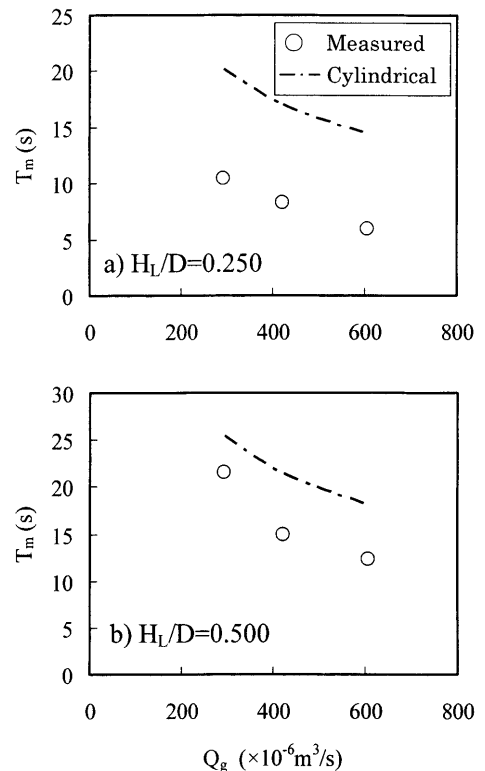


Fig. 13. Relationship between gas flow rate and mixing time ($D=0.280$ m).

0.250では平均で約50%、アスペクト比0.500では平均約30%均一混合時間が短縮された。均一混合時間 T_m のガス流量依存性は円筒容器と球形容器で同じであるとみなして

よい。

またFig.14~16は、球形容器と同アスペクト比において同体積になるように円筒形容器の容器内径を変化させたものを比較の対象として示したもので、アスペクト比0.250

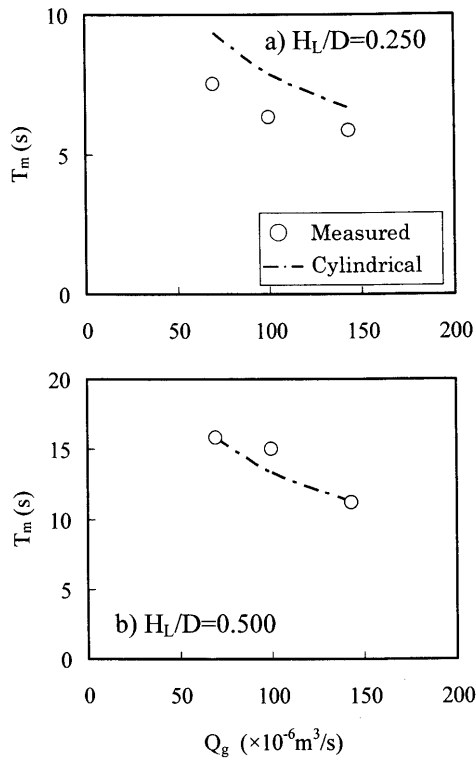


Fig. 14. Relationship between gas flow rate and mixing time for the same liquid volume ($D=0.160 \text{ m}$).

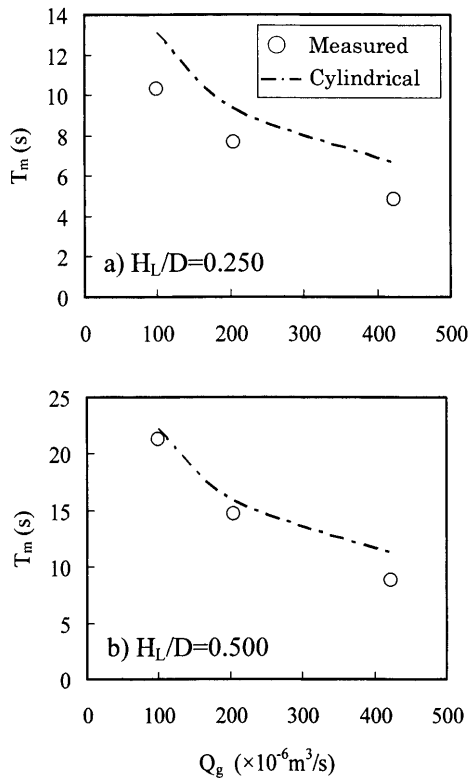


Fig. 15. Relationship between gas flow rate and mixing time for the same liquid volume ($D=0.220 \text{ m}$).

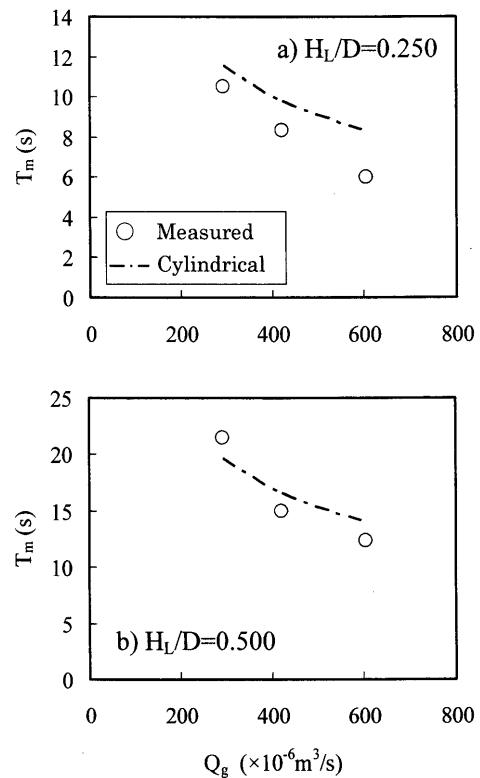


Fig. 16. Relationship between gas flow rate and mixing time for the same liquid volume ($D=0.280 \text{ m}$).

では平均で約15%均一混合時間が短縮され、アスペクト比0.500では円筒形容器とほぼ同じ値をとった。

3.3 深水波型旋回を伴う球形容器の均一混合時間に対する実験式の導出

旋回現象を伴わない底吹き円筒形容器の均一混合時間 T_{mB} は、式(2)のように表される¹³⁾。

$$T_{mB}(H_L/D)(g/D)^{1/2} = 4.21 \times 10^3 Re^{-0.47} \dots \dots \dots (2)$$

$$Re = Dv_{sp}/\nu_L \dots \dots \dots (3)$$

$$v_{sp} = 4Q_g/(\pi D^2) \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 Re は気体の空塔速度 v_{sp} に基づくレイノルズ数である。式(2)は球形容器における旋回現象を伴う均一混合時間の測定値を整理するために選択した。比較の対象として、旋回を伴う円筒容器の均一混合時間の実験式ではなく、旋回を伴わない円筒容器の均一混合時間の実験式を用いたのは次の理由による。旋回のない円筒容器の均一混合時間は Q_g, H_L, D, ν_L の関数であることが知られている。旋回が生じた場合は旋回周期 T_s も変数に加わるが、 T_s は D によって一意的に決定されるため、この場合の均一混合時間も Q_g, H_L, D, ν_L の関数となる。旋回のある球形容器内均一混合時間 T_m も円筒容器と同じ関数形で整理できると考えられる。したがって本実験で得られた旋回のある場合の球形容器の均一混合時間 T_m の測定値を旋回のある円筒容器内の T_m に対する実験式と比較して、その相違を明らかにしようとするのは妥当ではない。そこで、円筒容器内の均

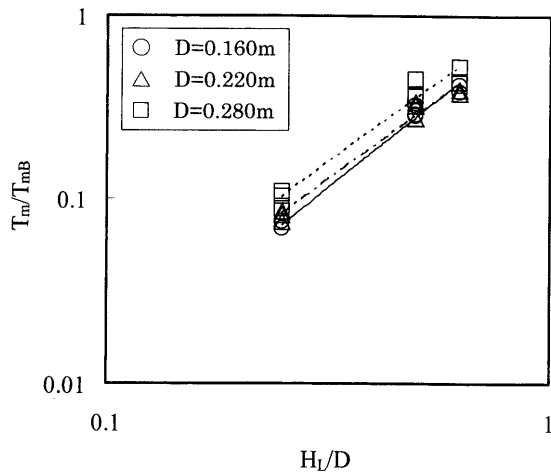


Fig. 17. Relationship between nondimensionalized mixing time and aspect ratio.

一混合時間 T_m に及ぼす旋回現象の影響を明らかにした過程をそのまま踏襲し、旋回のない円筒容器の T_m に対する実験式を比較の対照として選び Q_g, H_L, D, v_L の関数形を決定した次第である。

すべての測定値を Fig.17 に示すように、横軸に H_L/D 、縦軸に T_m/T_{mB} をとったグラフにプロットした。各容器内径に対して、一定の傾向があり測定値は直線近似できた。これらの直線の傾きはほぼ 1.85 であった。これは均一混合時間が次式に表されるように、 (H_L/D) の 1.85 乗に比例することを示している。

$$T_m = a_k (H_L/D)^{1.85} T_{mB} \dots\dots\dots (5)$$

Fig.17 に示すように、定数 a_k は容器内径の影響を示す。

ストークスの第一問題および第二問題を参考にして¹²⁾、次の代表長さ L を導入する。

$$L = (v_L T_s)^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

$$T_s = k(D/g)^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

T_s は旋回現象の周期を表し、 k は約 0.25 の定数である。代表長さ L は、旋回している気泡噴流が 1 回転する間に周囲の液体と運動量交換する距離を表す。簡便のため、 k を 1 とし式 (7) を式 (6) に代入すると次式が得られる。

$$L = (v_L^2 D/g)^{1/4} \dots\dots\dots (8)$$

Fig.17 から a_k の値を読み取り、次式で表される D/L に対してプロットすると Fig.18 のようになる。

$$D/L = (D^3 g/v_L^2)^{1/4} \dots\dots\dots (9)$$

係数 a_k の測定値は次式で近似できる。

$$a_k = 0.047 [(D^3 g/v_L^2)^{1/4}]^{0.50} \dots\dots\dots (10)$$

式 (2), (5), (10) を組み合わせることにより、次式を得る。

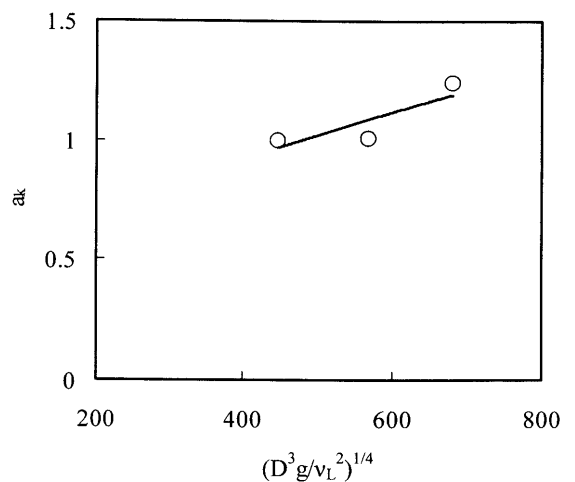


Fig. 18. Coefficient a_k as a function of $(D^3g/v_L^2)^{1/4}$.

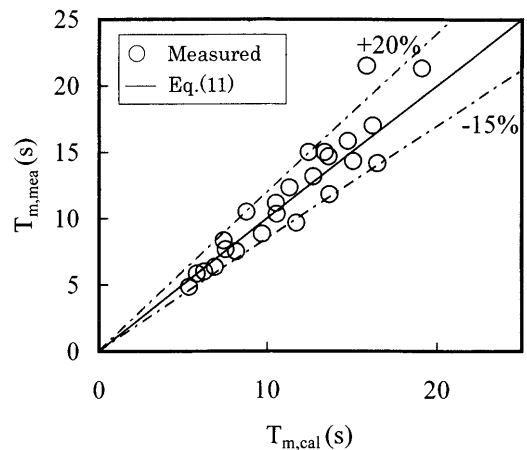


Fig. 19. Comparison of measured mixing time values with Eq. (11).

$$T_m = 177g^{-0.38} Q_g^{-0.47} D^{0.49} H_L^{0.85} v_L^{0.22} \dots\dots\dots (11)$$

球形容器における深水波型旋回を伴う均一混合時間のすべての測定値を式(11)と比較して Fig.19 に示す。実験式は測定値を -15%~+20% の偏差で近似できた。

4. 結言

4.1 球形容器と円筒容器の均一混合時間の比較

球形容器の均一混合時間は、同じ容器径の円筒容器の実験式の値に比べて、平均で約 40% 短くなった。また、同浴深、同体積で比較したところ、平均で約 10% 短くなった。これは、球の下半分では死水域に近い領域が存在しないことに起因している。しかしながら、ガス流量を大きくするとスロッピング、スプラッシュ、スピittingなどが激しくなり、容器外へ液体が飛び出す挙動が観察された。そこで、死水域に近い領域をなくし、かつ、液体が外部へ飛び出さないようにするには、半球の下半分の上に円筒を接続した形が実用的であると思われる。

4・2 深水波型旋回を伴う球形容器の均一混合時間の実験式

旋回を伴う底吹き球形容器の均一混合時間は、次の実験式により-15%~+20%の偏差で近似できた。

$$T_m = 177g^{-0.38} Q_g^{-0.47} D^{0.49} H_L^{0.85} v_L^{0.22} \dots\dots\dots(11)$$

4・3 実機への適用

本実験の水モデルでの均一混合を基に、実際の溶鋼系での均一混合を予測する場合には、気泡膨張、液体と壁の濡れなどの影響を考慮する必要がある。これらの点については今後の研究課題としたい。

記 号

D : 容器内径 (m)
 d_n : ノズル内径 (m)
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 H_L : 浴深 (m)
 L : 代表長さ (m)
 Q_g : ガス流量 (m^3/s)
 Re : レイノルズ数 (-)
 T_s : 旋回周期 (s)
 T_{mB} : 旋回を伴わない円筒形容器の均一混合時間 (s)
 T_m : 均一混合時間 (s)

v_{sp} : 空塔速度 (m/s)
 We : ウェーバー数 (-)
 v_L : 液体の動粘度 (m^2/s)

文 献

- 1) K.Mori and M.Sano: *Tetsu-to-Hagané*, **67** (1981), 672.
- 2) 第100・101回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1984).
- 3) D.Mazumdar and R.I.L.Guthrie: *ISIJ Int.*, **35** (1995), 1.
- 4) M.Sano and K.Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 2451.
- 5) S.Asai, T.Okamoto, J.C.He and I.Muchi: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 426.
- 6) K.Nakanishi, Y.Katoh, T.Nozaki and T.Emi: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), 1307.
- 7) M.Iguchi, S.Hosohara, T.Kondoh, Y.Itoh and Z.Morita: *ISIJ Int.*, **34** (1994), 330.
- 8) D.Mazumdar, S.Das and S.Bajpayee: *ISIJ Int.*, **37** (1997), 194.
- 9) K.Mandal and D.Mazumdar: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 1150.
- 10) G.G.K.Murthy, S.P.Meheotra and A.Ghosh: *Metall. Mater. Trans. B*, **19B** (1998), 330.
- 11) Y.Takatsuka and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 815.
- 12) Y.Takatsuka and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **41** (2001), 124.
- 13) M.Iguchi, K.Nakamura and R.Tsujino: *Metall. Mater. Trans. B*, **29B** (1998), 569.
- 14) M.Iguchi, S.Hosohara, T.Koga, R.Yamaguchi and Z.Morita: *ISIJ Int.*, **33** (1993), 1037.
- 15) Y.Kosaka and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 379.