

下向きガス吹き込みによる円筒浴内の均一混合時間

高塚 雄介*・井口 学*2

Mixing Time in a Cylindrical Bath Agitated by Downward Gas Injection

Yusuke TAKATSUKA and Manabu IGUCHI

Synopsis : Mixing time in a cylindrical water bath agitated by downward gas injection through a single-hole nozzle was experimentally investigated as a model study for steel refining processes. Measured values of the mixing time could not be predicted by empirical equations derived previously for bottom gas injection. The reason is that the bubble dispersion pattern caused by downward gas injection is much different from that by upward gas injection. An empirical equation for the mixing time was proposed as a function of the nozzle diameter, bath diameter, bath depth, nozzle position in the bath and gas flow rate. The measured values of the mixing time were approximated by this equation within a scatter of $\pm 40\%$. This equation was also compared with the existing measured values and empirical equations to clarify the difference between upward and downward gas injection processes.

Key words: steelmaking; gas injection; mixing time; bubbling jet; cylindrical vessel; top lance.

1. 緒言

鉄鋼精錬プロセスの反応容器底部に設置したノズルから上向きにガスを吹き込んだときの均一混合時間については、古くから多くの研究が進められており¹⁻⁹⁾、その経過の詳細は、例えばMazumdarらの解説¹⁰⁾に述べられている。ただし、均一混合時間の測定にはどうしても大きな誤差を伴うため、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。

底吹き時の均一混合時間 T_{mb} は一般的に次式で表される^{5,9,10)}。

$$T_{mb} = f(D, H_L, d_{ni}, Q_g, T_L, T_g, p_{Bs}, \rho_L, \rho_g, \sigma, \nu_L, \nu_g, g) \dots \dots \dots (1)$$

ここで D は浴径 (m)、 H_L は浴深 (m)、 d_{ni} はノズル内径 (m)、 Q_g は吹き込みガス流量 (m^3/s)、 T_L と T_g は液体とガスの温度 (K)、 p_{Bs} は浴表面の圧力 (Pa)、 ρ_L と ρ_g は液体とガスの密度 (kg/m^3)、 σ は液体の表面張力 (N/m)、 ν_L と ν_g は液体とガスの動粘度 (m^2/s)、 g は重力加速度 (m/s^2)、添字 b は底吹きを表す。式(1)で T_g と p_{Bs} が考慮されているのは、これらの量が浴内での温度差と静圧差に起因するガスの膨張に関連しているためである。

従来、均一混合時間 T_{mb} は攪拌動力密度 ϵ_m のみの関数であると考えられていたが、たとえ ϵ_m が同じであっても浴内のフローパターンが異なれば T_{mb} は大きく異なることが知られており^{6,11,12)}、最近では浴のアスペクト比や液体の

物性値を考慮した式が提案されつつある^{8,9)}。例えば水とシリコンを用いた著者らのこれまでの研究によれば⁸⁾、円筒浴内の底部中央に設置したノズルを用いて生成した気泡噴流が真上に上昇し、旋回が生じない場合の均一混合時間 T_{mb} は次式で表される。

$$T_{mb} = 1200 Q_g^{-0.47} D^{1.97} H_L^{-1} \nu_L^{0.47} \dots \dots \dots (2)$$

この実験は、浴内の流れ場が主として気泡に働く浮力で支配される条件下で行ったので、ノズル内径 d_{ni} 、ガスの密度 ρ_g 、およびガスの動粘度 ν_g の影響はほとんどない。浴表面の圧力は大気圧、液体とガスの温度が等しいことから p_{Bs} 、 T_L 、 T_g の影響も現れない。表面張力 σ と液体密度 ρ_L も水とシリコンオイルでは互いに近い値をとるため、それらの影響を明確にするには至らなかった。

式(2)を無次元化して書き換えると次の式(3)になる。

$$T_{mb} \left(\frac{H_L}{D} \right) \left(\frac{g}{D} \right)^{1/2} = 4.21 \times 10^3 \text{Re}^{-0.47} \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{Re} = Dv_{sp} / \nu_L \dots \dots \dots (4)$$

$$v_{sp} = \frac{4Q_g}{\pi D^2} \dots \dots \dots (5)$$

ここで Re はレイノルズ数(-)、 v_{sp} は空塔速度 (m/s) を表す。この式(3)の適用範囲は $30 < \text{Re} < 3000$ 、アスペクト比 H_L/D は約0.7~1.5の範囲であり、旋回現象は対象としていない⁶⁾。

平成14年6月24日受付 平成14年9月3日受理 (Received on June 24, 2002; Accepted on Sep. 3, 2002)

* 北海道大学大学院生 (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)

実操業においては、底吹きだけでなくトップランスを用いた下向きガス吹込みも広く行われており、基礎的研究も多い¹³⁻¹⁸⁾。ただし、既存のすべての測定値を系統的に整理できる簡便な実験式は知られていない。この場合には式(1)の変数の他にランス浸漬深さ、すなわち液表面からノズル出口までの距離、 H_m を加えなければならない。また、上向きにガスを吹き込む場合とは異なり、下向きに吹き込む場合にはノズル出口からのガス到達距離 L_v が問題となり、この距離と深い関係にあるノズル内径 d_{ni} の影響を無視できなくなる。

本研究では水と空気を用いて等温ガス吹込みを大気圧下で行う。また、以前の研究では、液体として水の他に動粘度 ν_L の大きく異なるシリコンオイルも用いたので、 ν_L を変数の一つに加えて実験式を導いたが、本研究では水のみを用いたので、 ν_L の影響は考慮しない。したがって、均一混合時間 T_m は次式で表される。

$$T_m = f(D, H_L, H_m, d_{ni}, Q_g) \dots \dots \dots (6)$$

この関数形を式(3)ならびに以前の研究報告を参考にし、導き、均一混合時間 T_m に対する簡便な予測式を提案することが本研究の目的である。

2. 実験装置と測定方法

実験装置の概要をFig. 1に示す。透明アクリル製の円筒容器は、直径 D と高さ H がそれぞれ0.075m×0.400m, 0.200m×0.400m, 0.300m×0.400mの3種類であり、所定の深さまでイオン交換水を満たした。その後、容器の中央の真上から内径 d_{ni} が0.001, 0.002, 0.004mの3種類の単孔ノズルを取り付けたランスを、浴表面からノズル出口までの距離 H_m が0.050, 0.100, 0.150, 0.200, 0.250mとなるように鉛直下向きに浸漬した。ノズル出口から気泡の最下点までの距離、すなわち気泡到達距離 L_v が約0.025, 0.050, 0.100mとなるようにコンプレッサーで供給した空気の流量をマスフローコントローラーを用いて調整した。

ガス流量 Q_g は $120 \times 10^{-6} \sim 680 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ の範囲にある。ガス吹込みを開始し気泡噴流が定常状態に達したあとで、トレーサーとして浴表面から 1 kmol/m^3 のKCl水溶液をイオン交換水 1000 cm^3 に対して 1 cm^3 の割合で用いた。プローブは浴底から20mm、側壁から10mmの位置に設置し、トレーサーはプローブの向かい側にある壁近傍の浴表面から投入した。浴内の均一混合時間は、円筒浴内のイオン交換水中のトレーサー濃度を、電気伝導度の時間的変化を測定することにより求める方法を採用した。具体的にはFig. 2に示すように、ペンレコーダーで電気伝導度の時間変化を記録し、電気伝導度がトレーサー投入直後から、最終値の95%から105%の範囲に収まるまでの時間を求め、この時間を均一混合時間と定義した。この定義は5%基準とし

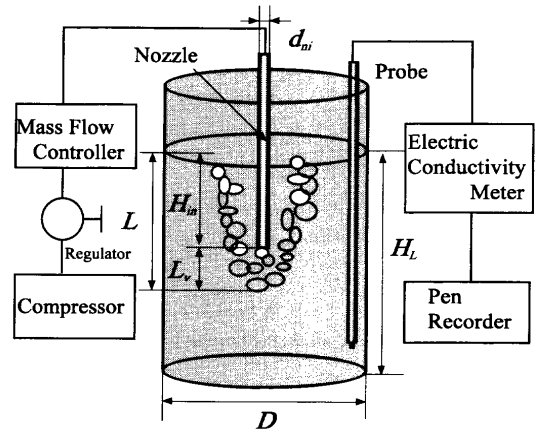


Fig. 1. Experimental apparatus.

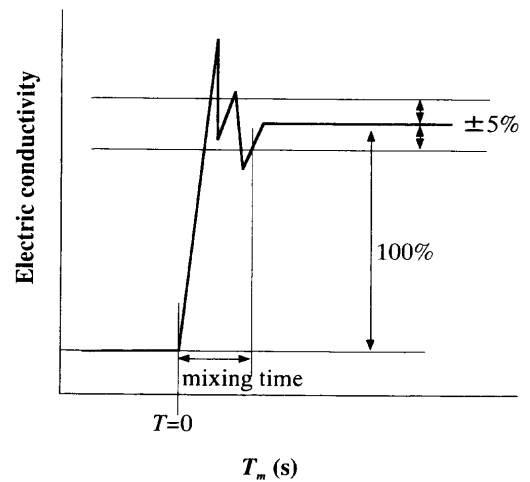


Fig. 2. Definition of mixing time T_m .

て鉄鋼関連の研究でよく用いられている^{2,6,8,19)}。実験は各条件について5回行い、平均値を求めた。なお、プローブの設置位置とトレーサー投入位置は均一混合時間にほとんど影響を及ぼさないことを予備実験で確認している。

3. 実験結果と考察

以下、均一混合時間 T_m と式(6)に示した5個のパラメータの関係を明らかにする。

3.1 ノズル内径と均一混合時間との関係

浴径 $D=0.200 \text{ m}$ 、浴深 $H_L=0.250 \text{ m}$ 、ノズル浸漬深さ $H_m=0.050 \text{ m}$ と一定とし、ノズル内径 d_{ni} を変えたときの均一混合時間の測定値をFig. 3に示す。各ノズル内径において、ガス流量を $Q_g=120 \times 10^{-6} \sim 680 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ の間の3点で実験を行った。いずれのガス流量においてもノズル内径が小さいほど均一混合時間 T_m は短くなり、 d_{ni} のほぼ0.2乗に比例することがわかった。

前述のように、上向きノズルからのガス吹込みでは、均一混合時間はノズル内径 d_{ni} にほとんど依存しないことが知られている。これは、Fig. 4に示すように、浴内に吹き

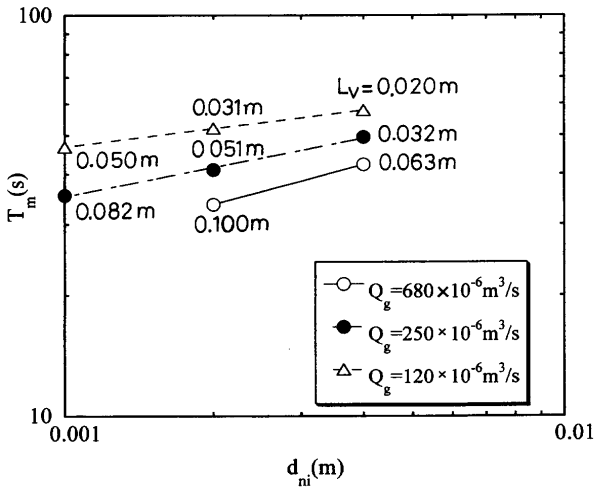


Fig. 3. Relation between T_m and d_{ni} ($D=0.200$ m, $H_L=0.250$ m, $H_{in}=0.050$ m).

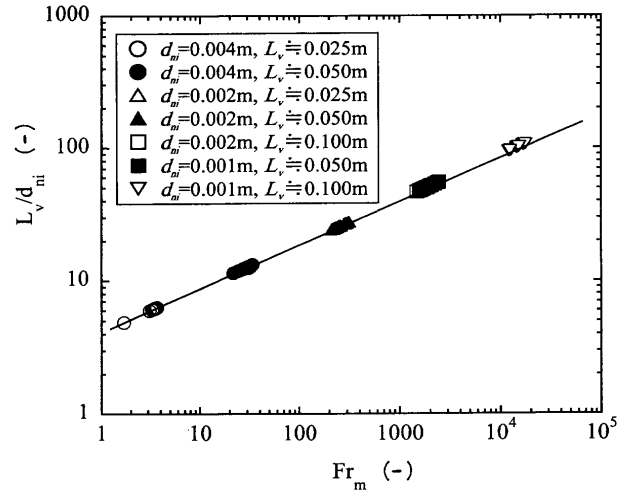


Fig. 5. Relation between L_v/d_{ni} and modified Froude number Fr_m .

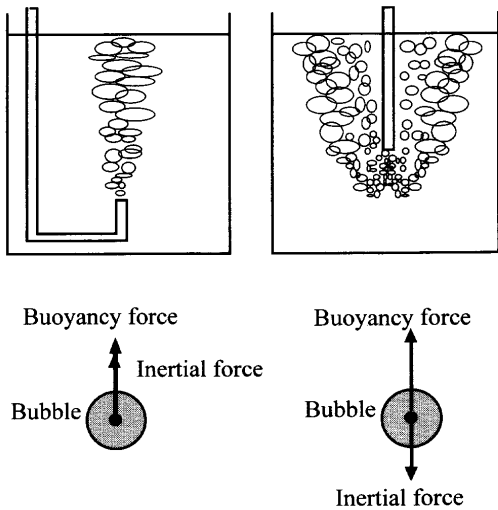


Fig. 4. Bubble dispersion pattern.

込まれたガスの慣性力と気泡に働く浮力が同一方向上向きに働き、通常、ガスの慣性力は浮力に比べて小さいためである¹⁴⁾。しかしながら下向きノズルにおいては、浮力は上向きに働くものの、慣性力は下向きに働くために、ノズルより下方へのガスの到達距離 L_v がノズル内径の影響を大きく受けることから、均一混合時間にもノズル内径の影響が出たものと考えられる¹⁴⁾。なお、ガス流量 Q_g が大きくなるほど慣性力は大きくなって、気泡は広く分散し、攪拌が強化されたと考えられる。また、ノズル内径 d_{ni} を小さくすると慣性力が大きくなるために同様な効果が得られ、均一混合時間が短くなったと推察される。河原らは、 H_2O_2 水溶液に SO_2 を吹き込んだときの、 SO_2 の吸収率の測定を行っているが、 Q_g と d_{ni} に関して本実験と同じ傾向が彼らの吸収率の結果にも見られる²⁰⁾。

ノズル出口から下方向への気泡の到達距離 L_v は、ノズル出口でガスの持っている慣性力と浮力の比を表す無次元数である修正フルード数 Fr_m の関数となることが報告され

ており²¹⁻²³⁾、以下の式で表される²³⁾。

$$L_v = 4.1 d_{ni} Fr_m^{1/3} \dots\dots\dots (7)$$

$$Fr_m = \frac{\rho_g Q_g^2}{\rho_L g d_{ni}^5} \dots\dots\dots (8)$$

ここで ρ_g はガスの密度 (1.2 kg/m^3)、 ρ_L は液体の密度 (997 kg/m^3) である。

本実験で得られた L_v と修正フルード数 Fr_m との関係を図 5 に示す。測定値は式 (7) により精度よく近似できることがわかる。ガスを下向きに吹き込む場合、 L_v は炉底の溶損などに関連して非常に重要な量となる。実験は Fr_m に関して 5 つのグループに分けて行っているが、これは後で均一混合時間 T_m の実験式を導く際に役立つように配慮したためである。

3.2 浴径と均一混合時間との関係

3 つの異なる直径の容器を用いて、浴深 H_L を 0.250 m、ノズル浸漬深さを $H_{in}=0.100$ m と一定にし、ノズル出口からの気泡到達距離が $L_v=0.050$ m となるように各ノズル内径においてガス流量 Q_g を調節したときの浴径 D と均一混合時間 T_m との関係を図 6 に示す。ノズル内径 d_{ni} が大きくなるほど傾きはやや小さくなるように見受けられ、他のデータも含めて判断すると、均一混合時間 T_m は浴径 D のおよそ 0.25 乗に依存しているとみなすことができる。これは容器が大きくなると液体の単位質量あたりの投入エネルギー ϵ_m が小さくなるためであるが、 D への依存性は式 (2) とは顕著に異なっている。

3.3 浴深と均一混合時間との関係

ノズル内径を $d_{ni}=0.002$ m、ノズル浸漬深さを $H_{in}=0.050$ m、ガス流量を $Q_g=250 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ と一定にしたときの各浴径 D における、浴深 H_L と均一混合時間 T_m の関係を図 7 に示す。このとき、ノズル出口からの気泡到達距離は

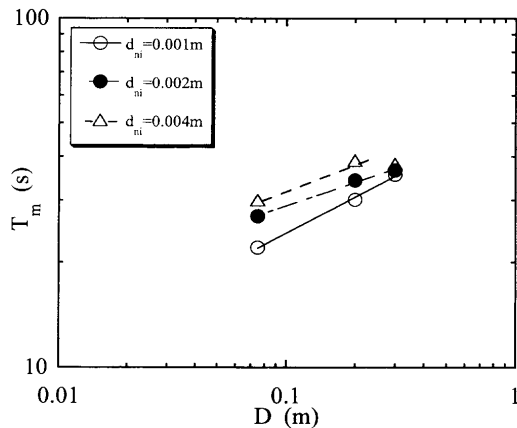


Fig. 6. Relation between T_m and D ($H_L=0.250$ m, $H_{in}=0.100$ m, $L_v=0.050$ m).

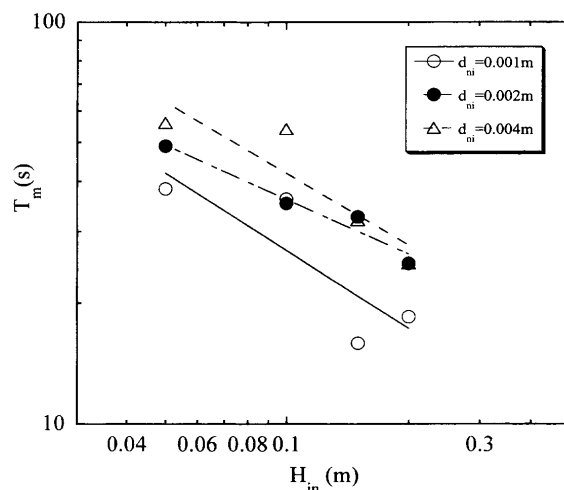


Fig. 8. Relation between T_m and H_{in} ($D=0.300$ m, $H_L=0.300$ m, $L_v=0.050$ m).

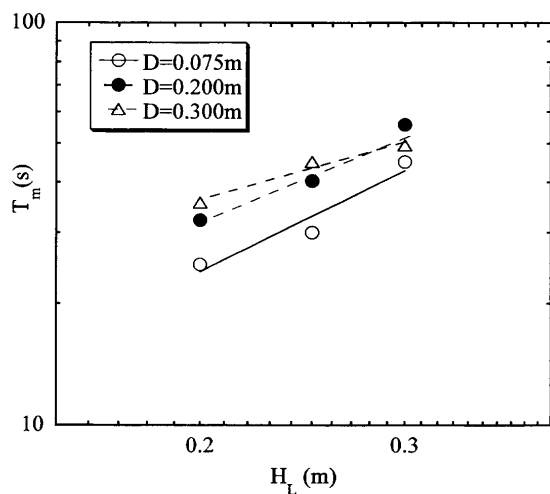


Fig. 7. Relation between T_m and H_L ($d_{ni}=0.002$ m, $H_{in}=0.050$ m, $Q_g=250 \times 10^{-6}$ m³/s).

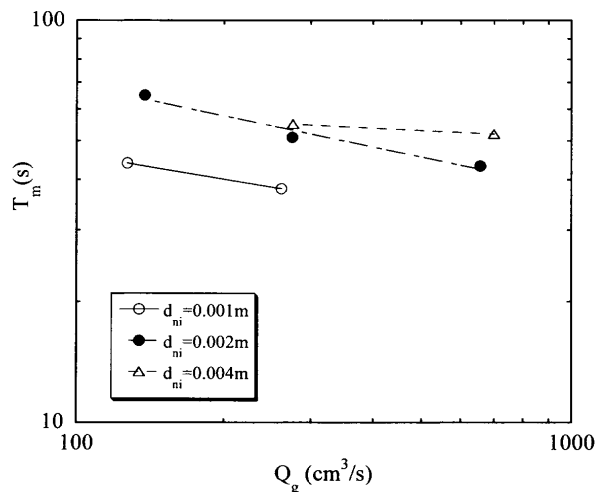


Fig. 9. Relation between T_m and Q_g ($D=0.300$ m, $H_L=0.300$ m, $H_{in}=0.050$ m).

$L_v=0.050$ mとなる。この図から、均一混合時間は浴深 H_L のほぼ0.8乗に比例して長くなることがわかる。一方、底吹きの上向きノズルに対する式(2)では浴深が大きいほど均一混合時間は短くなる。この相違は、上向きノズルと下向きノズルによって形成される気泡噴流の特性がFig. 4に模式的に示すように異なり、それに伴って液体の循環流も異なっていることに起因している。すなわち、底吹きの上向きノズルでは、浴が深くなるとともに気泡噴流を取り巻く循環流がより強くなって、均一混合時間 T_m が短くなるのに対し、下向きノズルの場合には、気泡の到達位置よりも下側の領域は、いわゆる死水領域的な状態となり、したがって T_m は浴深 H_L とともに長くなる。

3.4 ノズルの浸漬深さと均一混合時間との関係

浴径 $D=0.300$ m, 浴深 $H_L=0.300$ mと一定にし、ノズル出口からの気泡到達距離が $L_v=0.050$ mとなるように、各ノズル径においてガス流量 Q_g を調節したときのノズル浸漬深さ H_{in} と均一混合時間 T_m の関係をFig. 8に示す。均一混合時間 T_m は H_{in} のおよそ-0.5乗に比例して短くなっている。

3.5 ガス流量と均一混合時間の関係

各ノズル内径に対して、浴径 $D=0.300$ m, 浴深 $H_L=0.300$ m, ノズル浸漬深さ $H_{in}=0.050$ mとしたときのガス流量 Q_g と均一混合時間 T_m との関係をFig. 9に示す。均一混合時間 T_m は Q_g のおよそ-0.1乗に比例して短くなっている。

3.6 均一混合時間に対する実験式の導出

上に示した d_{ni} , D , H_L , H_{in} , Q_g と T_m との関係を参考にし、実験式を導く。

円筒容器の浴深と浴径との比をアスペクト比 H_L/D で表す。上向きガス吹込みの場合には、浴内の流動特性はアスペクト比に強く依存する。すなわちアスペクト比によって浴内に2種類の旋回現象が起き^{24,25)}、旋回現象が均一混合時間を早めることがわかっている^{5,6,25)}。アスペクト比が0~0.3の間では、流れ場が浅水波領域に属するために、液体は浴側壁と浴底の影響を受けて動きにくくなり、攪拌効果は小さくなる。また1.0~2.0の間では浴底の影響はほとんどなくなるが、それ以上に浴側壁の影響が大きくなり、

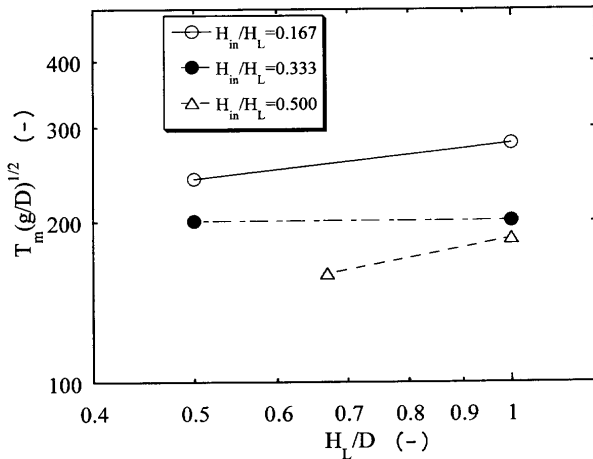


Fig. 10 Relation between nondimensionalized mixing time and H_L/D ($D=0.300$ m, $d_{ni}=0.002$ m, $Q_g=250 \times 10^{-6}$ m³/s).

この範囲でも攪拌効果は小さくなる。しかし、その間のアスペクト比0.3~1.0の範囲内においては、浴底の影響はほとんどなく、しかも浴側壁の影響はそれほど大きくないため液体が揺動するのに適したアスペクト比となり、旋回現象が生じて攪拌効率は大きくなる。本研究では $D=0.075$ mのとき $1 < H_L/D < 4$, $D=0.200$ mのとき $0.5 < H_L/D < 2.0$, $D=0.300$ mのとき $0.5 < H_L/D < 1.0$ の範囲に着目し、浴の旋回が起きない条件下で実験を行っている。

Fig.10は、浴径 $D=0.300$ m, ノズル内径 $d_{ni}=0.002$ m, ノズル出口からの気泡到達距離 $L_v=0.050$ mと一定にしたときのアスペクト比 H_L/D と前報⁸⁾を参考にして無次元化した均一混合時間 $T_m(g/D)^{1/2}$ との関係を示している。ガス流量は $Q_g=250 \times 10^{-6}$ m³/sである。浴深 H_L を大きくすると液体量が増えるため均一混合時間は長くなるが、浴表面からの気泡到達距離が大きくなるほど浴内の攪拌が盛んに行われるため、均一混合時間は短くなった。他の2種類の浴径でも同じ結果を得た。Fig.10の各 H_{in}/H_L について、 $T_m(g/D)^{1/2}$ の H_L/D への依存性はほぼ同じであると考えられるため、式(3)を参考にして以下のような式を考えた。

$$T_m \left(\frac{g}{D} \right)^{1/2} = a \left(\frac{H_L}{D} \right)^{0.293} \dots\dots\dots(9)$$

係数 a は H_{in}/H_L に依存する量であり、Fig.11に示すようになる。なお、図中の煩雑さを避けるため、Fig.10にはすべての H_{in}/H_L に対する測定値を示していない。これより次式を導くことができる。

$$a = 114(H_{in}/H_L)^{-0.673} \dots\dots\dots(10)$$

式(9), (10)よりノズル内径 $d_{ni}=0.002$ m, 浴径 $D=0.300$ mでガス流量を $Q_g=250 \times 10^{-6}$ m³/sとしたときの均一混合時間の実験式は次式で表される。

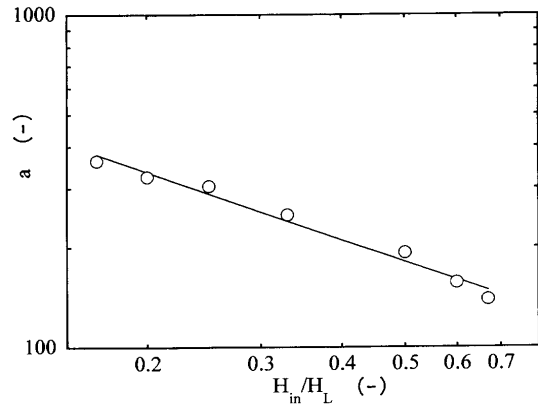


Fig. 11. Relation between a and H_{in}/H_L .

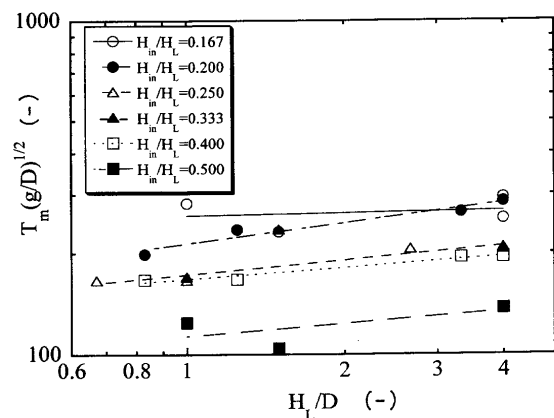


Fig. 12. Relation between nondimensionalized mixing time and H_L/D ($d_{ni}=0.002$ m, $Q_g=680 \times 10^{-6}$ m³/s).

$$T_m(g/D)^{1/2} = 114(H_{in}/H_L)^{-0.673}(H_L/D)^{0.293} \dots\dots\dots(11)$$

この方法を用いて、他のガス流量での均一混合時間との関係を調べた。Fig.12はノズル内径 $d_{ni}=0.002$ m, ガス流量 $Q_g=680 \times 10^{-6}$ m³/s, ノズル出口からの気泡到達距離 $L_v=0.100$ mのときの $T_m(g/D)^{1/2}$ と H_L/D の関係を示している。均一混合時間の実験式は以下のようなになる。

$$T_m \left(\frac{g}{D} \right)^{1/2} = 110 \left(\frac{H_{in}}{H_L} \right)^{-0.557} \left(\frac{H_L}{D} \right)^{0.247} \dots\dots\dots(12)$$

他のガス流量においても同様な式が得られたので、 (H_{in}/H_L) の指数の平均値と (H_L/D) の指数の平均値を求め、以下のように表した。

$$T_m \left(\frac{g}{D} \right)^{1/2} = b \left(\frac{H_{in}}{H_L} \right)^{-0.554} \left(\frac{H_L}{D} \right)^{0.261} \dots\dots\dots(13)$$

この時点で T_m は D の0.239乗, H_L の0.815乗, H_{in} の-0.554乗に比例しているが、これらの指数の値は前に示した0.25乗, 0.8乗, -0.5乗にほぼ一致している。した

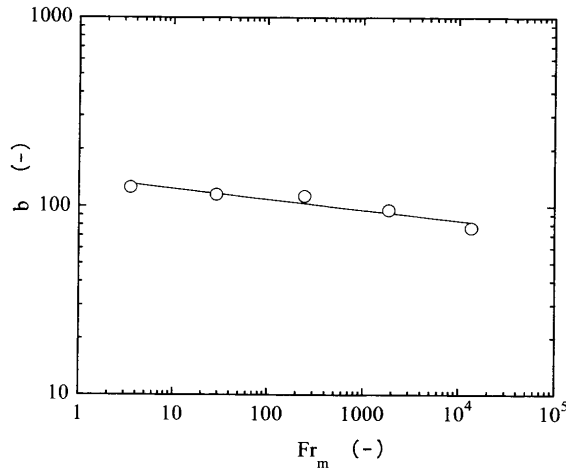


Fig. 13. Relation between b and modified Froude number Fr_m .

がって、ここで採用した無次元数 $T_m(g/D)^{1/2}$, H_{in}/H_L , H_L/D の選択の正しいことが明らかとなった。

Fig. 3 と Fig. 9 から考えて、係数 b はガス流量 Q_g と、ノズル内径 d_{ni} の関数であると仮定する。ガス流量 Q_g とノズル内径 d_{ni} を含む無次元数はいくつか考えられるが、それらのなかで気泡噴流の特性ととくに深い関係を有する修正フルード数を第1候補に選び、検討してみた。修正フルード数 Fr_m と係数 b の関係を Fig. 13 に示す。これより係数 b について次式が得られる。

$$b = 148 Fr_m^{-0.054} \dots\dots\dots (14)$$

式(14)を式(13)に代入すると、均一混合時間の実験式は以下ようになる。

$$T_m \left(\frac{g}{D} \right)^{1/2} = 148 Fr_m^{-0.054} \left(\frac{H_{in}}{H_L} \right)^{-0.554} \left(\frac{H_L}{D} \right)^{0.261} \dots\dots\dots (15)$$

$$1 < Fr_m < 10^5, (H_{in} + L_v)/H_L < 0.8, 0.5 < H_L/D < 4$$

この式はノズルから出た気泡が浴底に届かず、旋回も生じない条件下で成立する。気泡が浴底まで届くと、均一混合時間は式(15)の値よりもほぼ2倍以上長くなる。

この式において、 T_m は d_{ni} の 0.270 乗、 Q_g の -0.108 乗に比例するが、これらの指数は前に示した 0.2 乗と -0.1 乗にほぼ一致しており、したがって修正フルード数 Fr_m の導入の正しいことが実証された。

実験式(15)とすべての測定値との比較を Fig. 14 に示す。測定値は式(15)によって $\pm 40\%$ の偏差で近似できる。

3.7 従来の実験式の検討

下向きノズルを用いたときの均一混合時間の実験がこれまでにいくつか報告されており、実験式も導かれている¹³⁻¹⁸⁾。

Murthy ら¹⁴⁾は次式を提案した。

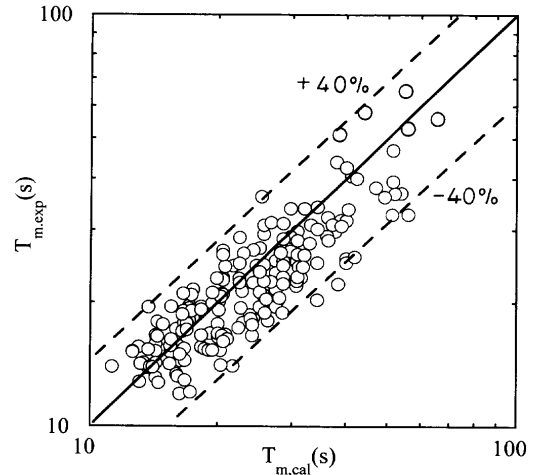


Fig. 14. Comparison of measured with calculated values of mixing time.

$$T_m = c_1 t_c \dots\dots\dots (16)$$

$$t_c = 83.1 \epsilon_v^{-0.664} d_{ni}^{-0.071} \dots\dots\dots (17)$$

$$\epsilon_v = 4 Q_g P_{atm} T_L / (298.2 \pi D^2 H_L^2) \cdot \ln(1 + \rho_g g L / P_{atm}) + 8 \kappa \rho_g Q_g^3 / (\pi^2 d_{ni}^4 V_L) \dots\dots\dots (18)$$

$$L = H_{in} + L_v \dots\dots\dots (19)$$

ここで c_1 はガス流量やノズル浸漬深さなどによる係数であり、 $D=0.480$ m, $d_{ni}=0.010$ m に対しては文献¹⁴⁾にその値が表で与えられている。 ϵ_v は単位体積あたりの投入エネルギー (W/m^3)、 T_L は液体温度 (K)、 P_{atm} は大気圧 (Pa)、 V_L は液体の体積 (m^3) を表す。また、 κ はアスペクト比 H_L/D の関数である。

Murthy ら¹⁴⁾の式を著者らの実験結果と比較するには c_1 の値が必要となるが、その値は上記文献には掲載されていない。また、 T_m の測定基準が異なっているので直接比較できない。

Lehrer は¹³⁾攪拌動力の関数として均一混合時間の実験式を導いているが、アスペクト比 H_L/D 、無次元浸漬深さ H_{in}/H_L だけでなく、ノズル内径 d_{ni} の影響も考慮されていないので、本実験結果との比較は無理である。

Chatterjee ら¹⁵⁾の実験式にも H_L/D と H_{in}/H_L は考慮されていない。なお、Mazumdar らも下向きガス吹込みを行っているが、取鍋精錬炉をモデル化した円筒が浴表面に設置されている。また、拝田ら¹⁷⁾はトピード脱硫における攪拌強度の影響を見るためにモデル実験を行っているが、容器形状が異なるので、本実験結果と比較できない。

3.8 本実験式と従来の実験結果との比較

著者らの実験式と他の研究者の実験結果¹³⁻¹⁶⁾との比較を Fig. 15 に示す。Lehrer¹³⁾は 0.2% 基準、Murthy ら¹⁴⁾は 0.5% 基準、Chatterjee ら¹⁵⁾は 2.5% 基準を採用している。このように、従来の実験結果は均一混合時間の基準が著者らの採用した 5% 基準とは違うため著者らの式による推測値よりも

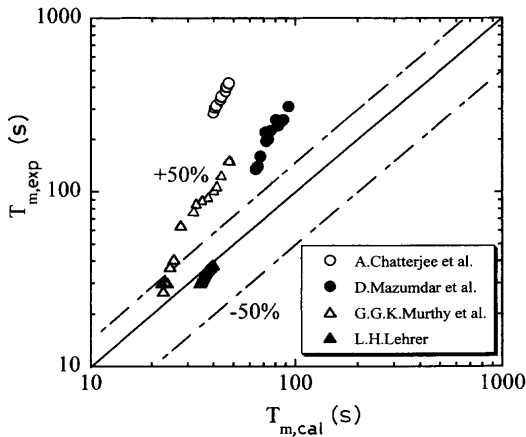


Fig. 15. Comparison of existing measured values of mixing time with calculated values from presently proposed equation.

やや大きくなっているが、それらは本実験式に沿う状態で分布しているので、本実験式における妥当性の一つの証拠にはなる。Mazumdarら¹⁶⁾は5%基準を用いているが、浴表面に接触させた円筒によって流れが拘束され、均一混合時間がかかなり長くなったと考えられる。

3.9 本実験式(15)と底吹きの実験式との比較

本実験で求めた下向きノズルの均一混合時間に対する実験式(15)において、 H_{in} を便宜上浴表面からの気泡到達距離 $H_{in}+L_v$ で置き換え、底吹きのとときと同条件にして、実験式(2)と比較する。式(15)の H_{in} に $H_{in}+L_v$ を代入して変形すると式(20)のようになる。

$$T_m = 76.8 Q_g^{-0.108} d_{ni}^{0.270} H_L^{0.815} (H_{in} + L_v)^{-0.554} D^{0.239} \dots\dots\dots (20)$$

式(2)に水の動粘度 ν_L の値を代入して整理すると次式が得られる。

$$T_{mb} = 1.73 Q_g^{-0.47} H_L^{-1} D^{1.97} \dots\dots\dots (21)$$

式(20), (21)を比較すると、下向きノズルを用いたときの均一混合時間はノズル内径 d_{ni} の影響を受けるだけでなく、浴径 D , 浴深 H_L , ガス流量 Q_g への依存性が底吹きの場合と顕著に異なっていることに気付く。底吹きのとときの気泡噴流は円錐状の形を保ちながら上昇して行くが、下向きノズルで生成した気泡噴流はFig. 4から推察されるように、横方向に広がり上昇することが、このような相違をもたらした主な原因であると考えられる。

Murthyらは¹⁴⁾、ガス流量がある臨界よりも大きくなると T_m は底吹きの場合の値よりも短くなると述べているが、式(20)と(21)では式(20)の方が Q_g への依存性が弱いことから、本実験結果に関してはその傾向が逆になっている。この点に関しては更なる検討を要する。また、Murthyらは、低ガス流量のとき、 H_{in} が大きくなると T_m は短くなることを報告しているが、本実験式(15)からも同じことが言える。

4. 結言

下向きノズルに対する均一混合時間 T_m の実験式として、次式を提案した。

$$T_m \left(\frac{g}{D} \right)^{1/2} = 148 Fr_m^{-0.054} \left(\frac{H_{in}}{H_L} \right)^{-0.554} \left(\frac{H_L}{D} \right)^{0.261}$$

$$1 < Fr_m < 10^5, (H_{in} + L_v) / H_L < 0.8, 0.5 < H_L / D < 4$$

この式は測定値を±40%の偏差で近似できる。均一混合時間のガス流量 Q_g , 浴径 D , 浴深 H_L への依存性は底吹きノズルの場合と顕著に異なっている。これは浴内への気泡の分散状況が2種類のノズルで大きく異なることに起因している。

記号

- D : 円筒容器の直径 (m)
- H_L : 浴の深さ (m)
- H_{in} : ノズル浸漬深さ (m)
- L_v : ノズルからの気泡到達距離 (m)
- L : 浴表面からの気泡到達距離 (m) = $L_v + H_{in}$
- Q_g : ガス流量 (m³/s)
- d_{ni} : ノズル内径 (m)
- g : 重力加速度 (m/s²)
- T_m : 均一混合時間 (s)
- Fr_m : 修正フルード数 (-)

文献

- 1) 川名昌志 : 第100・101回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, 東京, (1984), 1.
- 2) K.Nakanishi, Y.Katoh, T.Nozaiki and T.Emi: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), 1307.
- 3) S.Asai, T.Okamoto, J.-C.He and I.Muchi: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 426.
- 4) M.Sano and K.Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 2451.
- 5) G.G.K.Murthy, S.P.Mehrotra and A.Ghosh: *Metall. Mater. Trans. B*, **19B** (1988), 839.
- 6) M.Iguchi, S.Hosohara, T.Kondoh, Y.Itoh and Z.Morita: *ISIJ Int.*, **34** (1994), 330.
- 7) D.Mazumdar, S.Das and S.Bajpayee: *ISIJ Int.*, **37** (1997), 194.
- 8) M.Iguchi, K.Nakamura and R.Tsujino: *Metall. Mater. Trans. B*, **29B** (1998), 569.
- 9) K.Mandal and D.Mazumdar: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 1150.
- 10) D.Mazumdar and R.I.L.Guthrie: *ISIJ Int.*, **35** (1995), 1.
- 11) Y.Katoh, K.Nakanishi, T.Nozaiki, K.Suzuki, T.Emi and K.Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 1604.
- 12) M.Iguchi, R.Tsujino, K.Nakajima and M.Sano: *Metall. Mater. Trans. B*, **30B** (1999), 631.
- 13) L.H.Lehrer: *I&EC Process Design and Development*, **7** (1968), 226.
- 14) G.G.K.Murthy and J.F.Elliott: 72nd Steelmaking Conf. Proc., ISS, Warrendale, PA, (1989), 529.
- 15) A.Chatterjee, R.Dutta and P.K.Mukhopadhyay: *Can. Metall. Q.*, **33** (1994), 185.
- 16) D.Mazumdar and R.I.L.Guthrie: *Ironmaking Steelmaking*, **12** (1985), 256.
- 17) O.Haida, T.Emi, S.Yamada and F.Sudo: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), S253.
- 18) U.P.Sinha and M.J.Mcnallan: *Metall. Trans. B*, **16B** (1985), 850.
- 19) J.Mietz and F.Oeters: *Can. Metall. Q.*, **28** (1989), 19.
- 20) M.Kawahara, Y.Hase and Y.Shirane: *J. Min. Metall. Inst. Jpn.*, **100** (1984), 1080.
- 21) B.U.N.Igwe, S.Ramachandran and J.C.Fulton: *Metall. Trans.*, **4**

- (1973), 1887.
- 22) M.Ishibashi, M.Shiroishi, S.Yamamoto and M.Shimada: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1975), 111.
- 23) M.Iguchi, T.Uemura, H.Yamaguchi, T.Kuranaga and Z.Morita: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 18.
- 24) M.Iguchi, S.Hosohara, T.Koga, R.Yamaguchi and Z.Morita: *ISIJ Int.*, **33** (1993), 1037.
- 25) Y.Takatsuka and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **41** (2001), 124.