

# 偏心巡回液体噴流によって攪拌される 円筒浴内の均一混合時間

井口 大亮\*・吉田 仁\*<sup>2</sup>・井口 学\*<sup>3</sup>

Mixing Time in a Cylindrical Bath Agitated by Off-centered Swirling Liquid Jet

Daisuke IGUCHI, Jin YOSHIDA and Manabu IGUCHI

## 1. 緒言

鉄鋼精錬プロセスにおいて、溶鋼とスラグの攪拌方法として、主に Ar ガス吹き込み、機械式攪拌、電磁攪拌が用いられているが、著者らは前に時間短縮や省エネルギー化、低コスト化を図るために、新たな攪拌方法として巡回液体噴流を利用する方法を提案した<sup>1)</sup>。巡回液体噴流とは、円筒浴および球形浴の底部から液体を吹き込んだときに生じる噴流および浴内の液体の巡回運動であり、特定の浴深および吹き込み流量で発生する。液体噴流は、液体ではなくガスを吹き込んだときに発生する巡回気泡噴流に比べ、巡回に至るまでの時間が極めて短い。そこで著者らの研究室では、円筒容器の底部に吹き込み用の単孔ノズルを設置したときに発生する巡回液体噴流についての詳細な調査を進めてきた<sup>1,2)</sup>。その発展形として今回の実験では、液体を吹き込む単孔ノズルの位置を中心から遠ざけたときに発生する巡回液体噴流が均一混合時間に及ぼす影響を調べた。

以前に行った巡回気泡噴流における均一混合時間の研究において、中心から容器内径  $D$  に対して  $1/6$  倍偏心した位置に設置した場合が最も短くなったことから<sup>3)</sup>、巡回液体噴流の場合も同じ結果が期待できるからである。なお、前報において<sup>2,4)</sup>、偏心した位置に吹き込みのノズルを設置しても液体噴流の巡回運動は発生するが、その領域は中心からノズルの位置を遠ざけるほど狭くなることなどを報告したが、円滑な理解のために再度簡潔に触れたい。

## 2. 実験条件

水モデル実験として、水を溶鋼に模擬し実験を行った。円筒容器には透明なアクリル樹脂性のものを用い、その内径  $D$  を 0.130, 0.200, 0.300 m とした。吹き込みに使用した単孔ノズルは、その内径  $d_{\text{noz}}$  が 5, 10, 13 mm のものを使用し

た。巡回運動の特性の調査は、浴深  $H_L$  をいくつかの値に固定して行うため、Fig. 1 に示すように容器底部4隅に液体引き抜き用のドレインノズルを4つ設置し、ポンプを用いて容器内の液体を循環させることで浴深を一定に保った。吹き込みノズルの設置位置は、容器底部中心から、容器内径  $D$  に対し  $1/10, 1/8, 1/6, 1/4$  倍離れた位置とした。これをノズル位置  $R_E$  で表した。浴内の均一混合時間の測定には KCl 水溶液を用いた。1 mol/L の KCl 水溶液を、巡回運動が定常状態に達したことを確認してから容器の中心に水 1 L に対して  $1 \text{ cm}^3$  の割合で投入し、容器の底部および側面から 10 mm 離れた位置に設置したセンサーで電気伝導度の時間的変化を測定した。

## 3. 実験結果

偏心した位置から液体を噴流状態で吹き込むことで、巡回の基本特性にどのような影響が現われ、均一混合時間とどのような関係があるのかを明らかにする必要がある。そこで、巡回の発生する領域や、巡回の始まるまでの時間、巡回の周期と偏心ノズル位置との関係について短く触れたい。

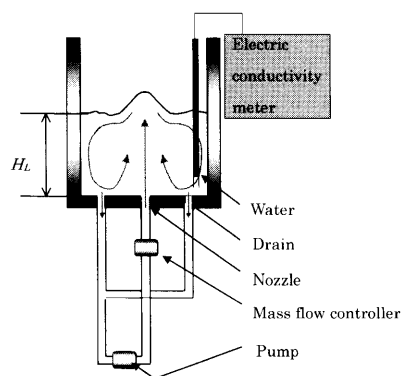


Fig. 1. Experimental apparatus.

平成 16 年 11 月 1 日受付 平成 16 年 12 月 17 日受理 (Received on Nov. 1, 2004; Accepted on Dec. 17, 2004)

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

\*<sup>2</sup> 科学技術振興機構研究成果活用プラザ北海道 (Innovation Plaza Hokkaido, Japan Science and Technology Agency)

\*<sup>3</sup> 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)

### 3.1 旋回発生領域

Fig. 2に、容器内径 $D=0.130\text{ m}$ のときの各ノズル位置における旋回発生領域を示す。なお、各々のプロットで囲まれた内側で旋回が発生した。ノズルの設置位置が中心から遠ざかるほど旋回の発生する領域が狭くなるのがわかる。ここで整理に用いられている $Ro_m$ は修正ロスビー数であり、次式で表される。容器内径やノズル内径が異なっても修正ロスビー数による整理法で、旋回発生領域を記述できることが分かっている<sup>2)</sup>。

$$Ro_m = Q_L^2 / (gd_{nen}^2 D^3) \dots \dots \dots (1)$$

ここで $Q_L$ は液流量、 $g$ は重力加速度である。なお、この無次元数はフルード数の1種とみなすこともできる。

### 3.2 旋回開始時間

旋回開始時間 $T_{S,S}$ は、噴流を発生させてから旋回が定常状態に達するまでの時間と定義した。なお、旋回発生領域の境界のすぐ外側では旋回運動と往復運動が交互に起こる。著者らは前に中心に吹き込みノズルを設置したときに発生した旋回液体噴流の旋回開始時間の実験データから実験式(2)を作成している<sup>1)</sup>。ここで循環時間 $T_C$ を用いているが、これは吹き込みノズルで発生した噴流中の液体が容器内を循環し、再度ノズル近傍に戻ってくるまでの時間のことで、容器内液体積 $V_L$ と噴流連行液流量 $Q_{LS}$ の比で表される。旋回開始時間 $T_{S,S}$ と循環時間 $T_C$ を無次元化した結果、 $T_{S,S}$ の測定値は実験式(2)の $\pm 50\%$ の偏差で近似できることが分かっている<sup>1)</sup>。

$$T_{S,S}(g/D)^{0.5} = 0.253 [T_C(g/D)^{0.5}]^{1.75} \dots \dots \dots (2)$$

$$T_C = V_L / Q_{LS} = \pi D^2 d_{nen} / (1.2 Q_L) \dots \dots \dots (3)$$

$$V_L = \pi D^2 H_L / 4 \dots \dots \dots (4)$$

$$Q_{LS} = 0.3 Q_L H_L / d_{nen} \dots \dots \dots (5)$$

実験式と比較を行うため、容器内径 $D$ が $0.130\text{ m}$ のときの各ノズル位置 $R_e$ における旋回開始時間 $T_{S,S}$ の実験データをFig. 3に示す。ノズルを偏心させた位置に設置しても、旋回開始時間にほとんど影響を及ぼしていないことがわかる。ここには示していないが、各容器内径の実験データを無次元化したところ、同様な結果となった。

### 3.3 旋回周期

著者らの以前の研究で、円筒容器を外部から加振した際に発生する回転スロッシングの振動周期と、旋回液体噴流の旋回周期は一致するという結果を得た<sup>5-7)</sup>。Fig. 4に示されている実線は、回転スロッシングの振動周期、つまり容器を加振したときの旋回液体噴流の理論式である<sup>7)</sup>。どのノズル位置における旋回周期の実験データも理論式でよく近似ができています。容器内径を換えた場合でも同様の結果

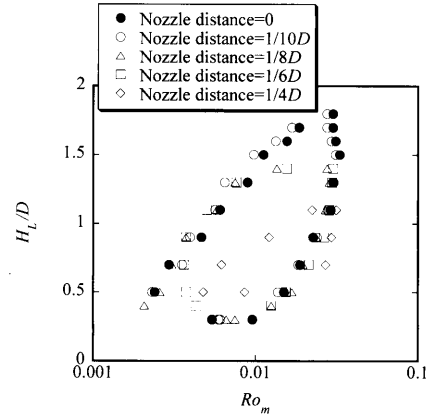


Fig. 2. Boundary of occurrence region of swirl motion [ $D=0.130\text{ m}$ ,  $d_{nen}=13\text{ mm}$ ].

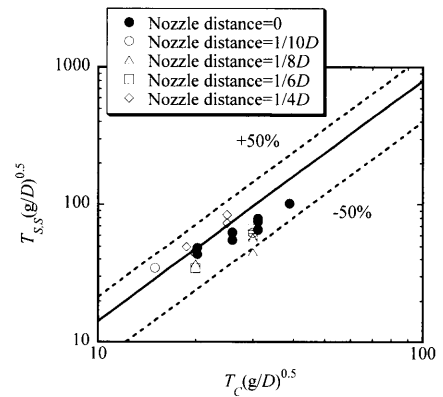


Fig. 3. Starting time of swirl motion,  $T_{S,S}$  [ $D=0.130\text{ m}$ ].

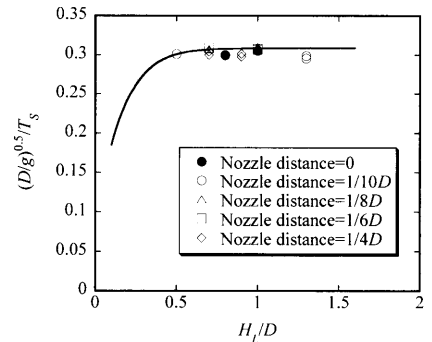


Fig. 4. Period of swirl motion,  $T_S$  [ $D=0.130\text{ m}$ ].

が得られた。

以上のことから、ノズル位置を中心から遠ざけることで旋回現象が発生する領域は狭くなっていくが、旋回開始時間や旋回周期といった時間的な基本特性にはほとんど影響を及ぼさないことがわかる。

### 3.4 均一混合時間

浴内の均一混合時間を測定するにあたり、最も重要になってくるのは浴内、配管内をあわせた総液体積である。噴流によって旋回が生じている浴内では強い攪拌が行われているが、ポンプによる循環が行われている配管内では攪拌効果は得られない。すなわち総液体積に対し、浴内の液

Table 1. Volumes of the bath,  $V_L$ , and pipe,  $V_{pipe}$ .

Volume $D$ (m)	$V_L$ (cm <sup>3</sup> ) ( $H_L/D=1.0$ )	$V_{pipe}$ (cm <sup>3</sup> )
	0.130	1700
0.200	6300	1800
0.300	21200	2100

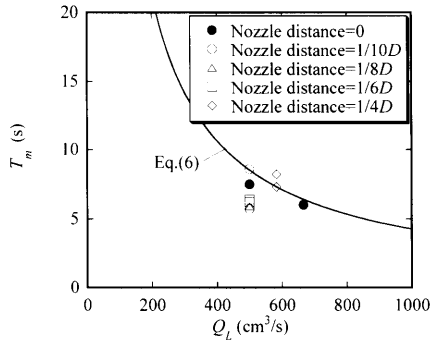


Fig. 5. Mixing time,  $T_m$  [ $D=0.300$  m,  $H_L/D=0.7$ ].

体積が大きいほど旋回液体噴流による攪拌効果は大きいと考えられる。Table 1に、アスペクト比 $H_L/D$ を1としたときの、今回の実験で使用した各容器における容器内液体積 $V_L$ と配管内液体積 $V_{pipe}$ を示す。容器内径が一番大きい $D=0.300$  mのものが最も $V_L/(V_L+V_{pipe})$ の比率が大きい。したがって、 $D=0.300$  mにおける実験データを基準に、中心ノズルに対する実験式との比較を行った。ここで、以前の实验では均一混合時間にノズル内径は影響を及ぼさなかったことから、ノズル内径 $d_{nen}$ は13 mmに固定して行っている。

Fig. 5に、各ノズル位置のアスペクト比 $H_L/D=0.7$ における均一混合時間の実験データを示す。図中の実線は、中心にノズルを設置した時の均一混合時間の実験式(6)である<sup>8)</sup>。

$$T_m = 12[(V_L + V_{pipe})/Q_L](v_L^2/D^3g)^{0.15}(H_L/D)^{0.27} \times [(V_L + V_{pipe})/V_L]^{1.6} \dots \dots \dots (6)$$

ここで $v_L$ は使用している液体の動粘度である。この結果から、気泡噴流の場合と同様に<sup>3)</sup>、 $R_E$ が $1/6D$ 程度偏心した位置にノズルを設置したほうが均一混合時間は短くなるのがわかった。さらに理解を深めるために、測定値と実験式から求められる計算値との比と、ノズル位置の関係をFig. 6に示す。 $R_E/(D/2)$ は偏心率と呼ばれる無次元数である。この結果から、中心からノズル位置を遠ざけるほど均一混合時間は短くなるが、 $R_E=1/6D$ をこえると逆に長くなるということがわかった。これは、容器内径を0.130, 0.200 mにとったときにもみられた。

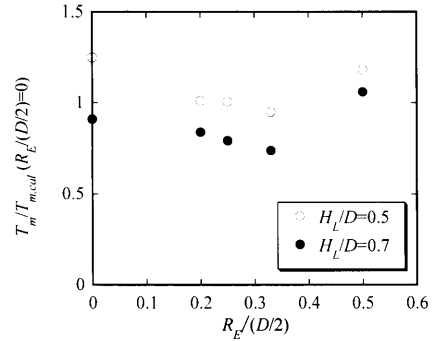


Fig. 6. Relationship between  $T_m/T_{m,cal}$  ( $R_E/(D/2)=0$ ) and  $R_E/(D/2)$  [ $D=0.300$  m].

### 4. 結論

ノズル位置は、旋回開始時間や旋回周期といった時間的な基本特性にほとんど影響を及ぼさない。しかし、中心から遠ざかるほど旋回が発生する領域は狭くなる、つまり旋回は起こりにくくなる。それに対し、均一混合時間はノズル位置を容器内径の $1/6$ 程度偏心させたときが、最も短くなった。この結果は旋回気泡噴流の場合とよく一致している。

### 記号

- $D$  : 容器内径
- $d_{nen}$  : 水吹き込みノズルの内径
- $g$  : 重力加速度
- $H_L$  : 浴深
- $Q_L$  : 吹き込み水流量
- $Q_{Ls}$  : 噴流によって浴内で誘起される液体の上向き流量の浴表面での値
- $R_E$  : ノズル位置
- $Ro_m$  : 修正ロスビー数
- $T_C$  : 循環時間
- $T_{S,S}$  : 旋回開始時間
- $T_S$  : 旋回周期
- $T_m$  : 均一混合時間
- $V_L, V_{pipe}$  : 浴内と配管内の液体積
- $v_L$  : 動粘度

### 文献

- 1) D.Iguchi, J.Yoshida and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), No. 6, 357.
- 2) D.Iguchi, M.Iguchi, Y.Sasaki and S.Yokoya: *ISIJ Int.*, **44** (2004), 1451.
- 3) M.Iguchi, H.Ihira, Y.Takatsuka and S.Hosohara: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 1108.
- 4) D.Iguchi and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), 230.
- 5) M.Iguchi, Y.Eguchi, A.Kawasaki, S.Kitamura and K.Naito: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 767.
- 6) M.Iguchi, D.Iguchi, J.Yoshida: *Mater. Trans.*, **45** (2004), No. 5, 1764.
- 7) A.Kimura and H.Ohashi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **44** (1978), 3024.
- 8) J.Yoshida, D.Iguchi and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), No. 6, 371.