

円筒浴内の旋回液体噴流に及ぼす偏心ノズル位置の影響

井口 大亮*・井口 学*²

Effect of Off-centered Nozzle Position on Swirling Liquid Jet in a Cylindrical Bath

Daisuke IGUCHI and Manabu IGUCHI

Synopsis : Investigation was carried out on a swirl motion of a cylindrical bath agitated by a bottom blown liquid jet. The nozzle was placed at an off-centered position. Particular attention was paid to the boundary of the region in which the swirl motion appears, the period of the swirl motion, the transient period from the start of water injection to the occurrence of the swirl motion, and the transient period from the stoppage of water injection to the annihilation of the swirl motion. The nozzle position affected only the occurrence region of the swirl motion. Empirical equations proposed for a centered nozzle were applicable to the other quantities for the off-centered nozzle.

Key words : Mixing, swirl motion, off-centered nozzle, liquid jet, swirl period, waste water treatment, refining

1. 緒言

鉄鋼精錬プロセスにおける溶鋼とスラグの攪拌時間の短縮は、生産効率の向上に直結する。現在用いられている攪拌方法として、トップランスを利用した上吹きもしくは底部に設置されたノズルからの底吹きでガスを溶鋼内に吹き込むガス吹き込み攪拌、電磁力を利用した電磁攪拌が広く用いられている¹⁻⁴⁾。しかしながら、Arなどの吹き込み用ガスは高価であることから、新規攪拌方法を開発し、省エネルギー化を図ることが望まれている^{5,6)}。著者らは、連続精錬プロセスを採用し、攪拌方式を従来の気泡吹き込みから液体吹き込みとすることを提案している⁷⁾。円筒形容器内の浴中に、底部に設置したノズルから液体の吹き込みを行うと、特定の条件下で旋回現象が発生するが、気泡よりも液体を吹き込んだほうが発生に至る時間は極めて短く、また攪拌力も大きい。溶鋼では実用上難しいが、液体が水の場合には、浴内の液体をポンプを用いて循環させながら吹き込み、液体噴流を発生させて攪拌することが可能である。したがって本攪拌方式は現在解決が急がれている排水や汚水処理にとって非常に有効であると考えられる。

著者らは今まで、容器の底部中心に設置したノズルから吹き込まれる液体噴流の旋回現象に着目し、旋回発生領域、旋回開始時間、旋回終了時間、旋回周期、および振幅について研究を行ってきた⁷⁾。ところが、浴内に気泡を吹き込んだ際に発生する旋回気泡噴流を伴う浴内の均一混合時間は、底部に設置したノズルの位置が中心から約 $(1/6)D$ 離れている場合が最も短いという結果が得られている⁸⁾。そこで本実験では、偏心ノズルからの液体吹き込み時に発生す

る旋回液体噴流の特性に関する実験の第一段階として中心ノズルの場合と同様に⁹⁻¹⁵⁾、旋回の発生する領域、旋回の基本特性である旋回開始時間 $T_{s,s}$ 、旋回終了時間 $T_{s,d}$ 、旋回周期 T_s について調査した。なお、振幅については、その値は容器の周方向に異なるので、今のところ適切な整理法がみつからない。今後の課題としたい。

2. 実験

Fig. 1は実験装置の模式図、Fig. 2はノズル位置である。容器内径 D が0.13, 0.20, 0.30mの亚克力製の円筒容器を使用した。動粘度が溶鋼によく似た水を用いて実験を行った。円筒容器底部に設置した単孔ノズルより水を吹き込み、液体噴流を発生させた。ノズル内径 d_{nen} は5, 10, 13mmである。浴深を一定に保つために、円筒容器底部に設置した4箇所のドレインからポンプを用いて水を排出

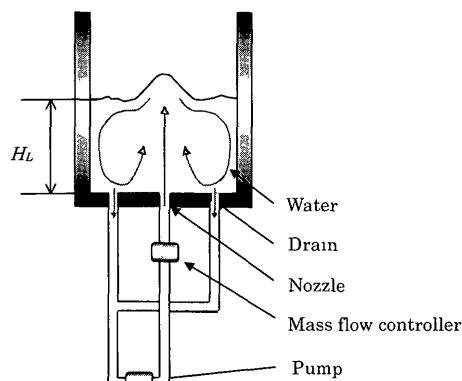


Fig. 1. Experimental apparatus

平成 16 年 4 月 16 日受付 平成 16 年 6 月 25 日受理 (Received on Apr. 16, 2004, Accepted on June 25, 2004)

* 北海道大学大学院研究生 (Visiting Researcher of Hokkaido University, North 13 West 8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

* 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)

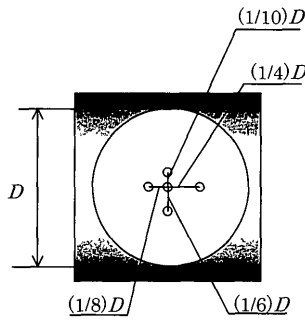


Fig. 2. Nozzle position.

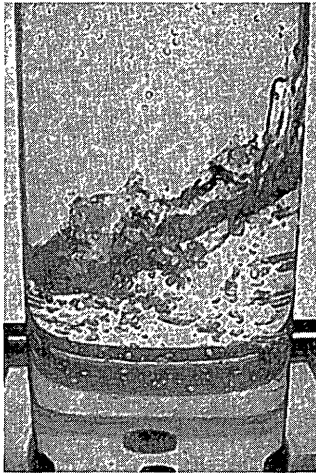


Fig. 3. Photograph of swirl motion.

し、循環させた。ノズルは、容器底部中心から容器内径 D の $1/4$, $1/6$, $1/8$, $1/10$ 倍離れた位置に設置した。旋回の発生する領域を詳細に調査するために、アスペクト比 H_L/D 及び水流量 Q_L を少しずつ変化させた。Fig. 3 は旋回液体噴流の写真である。激しい攪拌によって大小様々な多くの気泡が浴内に巻き込まれているのがみてとれる。

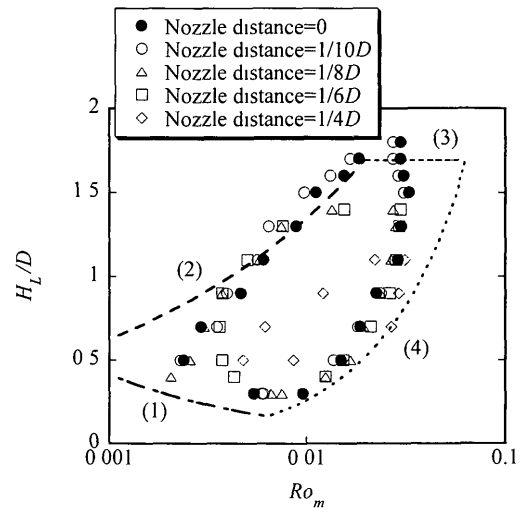
3. 旋回発生領域

3.1 旋回発生領域

旋回の発生領域を Fig. 4 に示す。中心からのノズル位置が $(1/8)D$ を越えて遠くなるほど発生領域は狭くなる傾向が見られた。 H_L/D はアスペクト比、 H_L は水の浴の深さ、 Ro_m は修正ロスビー数であり、 Ro_m は次式で与えられる。

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

ここで Q_L は水流量、 g は重力加速度、 d_{nen} はノズル内径である⁷⁾。修正ロスビー数 Ro_m は、液体噴流の旋回現象を取り扱う際に用いられる無次元数で、噴流の慣性力と、旋回している液体の遠心力の比によって表されている。図中の(1)~(4)で表示した4本の実線は、中心ノズルに対する旋回発生領域の境界に対して提案された実験式であり、それぞれ次式で与えられる¹⁶⁾。

Fig. 4. Boundary of occurrence region of swirl motion [$D=0.13$ m, $d_{nen}=13$ mm]

$$H_L/D = 0.0131 Ro_m^{-1/2} \quad (2)$$

$$H_L/D = 6.24 Ro_m^{1/3} \quad (3)$$

$$H_L/D = 1.69 \quad (4)$$

$$H_L/D = 26 Ro_m \quad (5)$$

中心ノズルに対する測定値はこれらの実験式でよく近似できている。偏心ノズルで発生する旋回の領域は、中心ノズルで発生する旋回の発生領域に含まれており、ノズル位置が $(1/10)D$ までは中心ノズルの発生領域に一致する。ノズル位置が遠ざかるほど旋回可能なアスペクト比 H_L/D の上限値は小さくなり、下限値は大きくなっていく。修正ロスビー数 Ro_m に関しては、ノズルの位置が中心から遠ざかるほど旋回の始まる境界(2)の Ro_m の値は大きくなることから、旋回の発生には多くのエネルギーを必要とする。旋回の発生する Ro_m の上限値(境界(4))はノズル位置に関わらずほとんど一定である。

Fig. 5 は、 $D=0.13$ m の浴においてノズルの位置を中心から $(1/6)D$ 離れたときの旋回発生領域に及ぼすノズル内径 d_{nen} の影響を示している。この図から明らかなように、どのノズル内径 d_{nen} の場合にも旋回発生領域は同じであることから、アスペクト比 H_L/D と修正ロスビー数 Ro_m に基づく発生領域の整理法は中心ノズルだけでなく、偏心ノズルの場合にも妥当であることが伺える。同様に、Fig. 6, 7 は異なる容器内径 D ごとの旋回発生領域を示している。少々ずれがみられるが、誤差範囲であると考えられる。したがって、容器内径の異なる偏心ノズルに関しても本整理法は妥当であるといえる。

3.2 旋回開始時間

旋回開始時間 T_{SS} は、ノズルから液体の吹き込みを始めてから噴流が発生し、やがて旋回が始まるまでの時間を三度測定し、それらを平均して求めた。Fig. 8 は、旋回開始

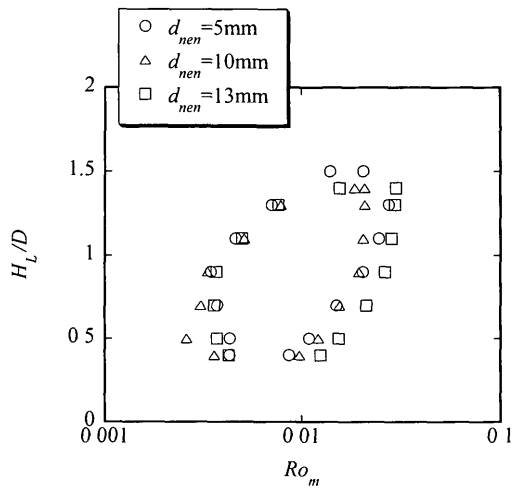


Fig. 5. Boundary of occurrence region of swirl motion [$D=0.13$ m, $R_E=(1/6)D$].

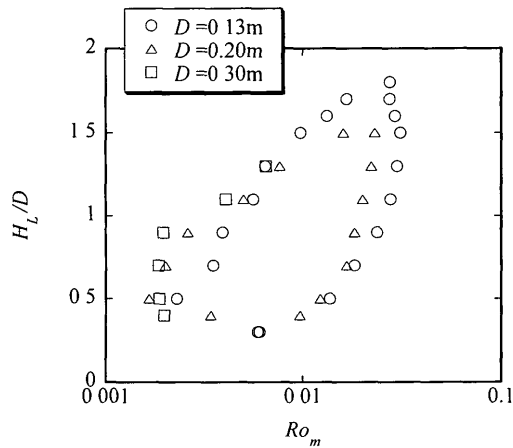


Fig. 6. Boundary of occurrence region of swirl motion [$d_{nen}=0.13$ m, $R_E=(1/10)D$].

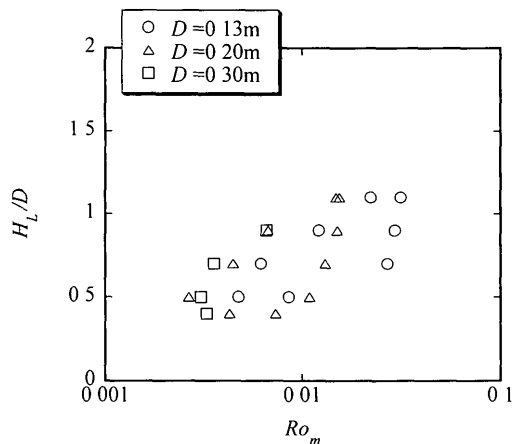


Fig. 7. Boundary of occurrence region of swirl motion [$d_{nen}=13$ mm, $R_E=(1/4)D$].

時間 T_{SS} と流量 Q_L の関係を表したものである。流量 Q_L の増加に伴い旋回開始時間 T_{SS} は減少していく傾向が見られる。ここで旋回開始時間 T_{SS} を整理するために用いる循環時間 T_C について説明する。循環時間 T_C とは、ノズルで発

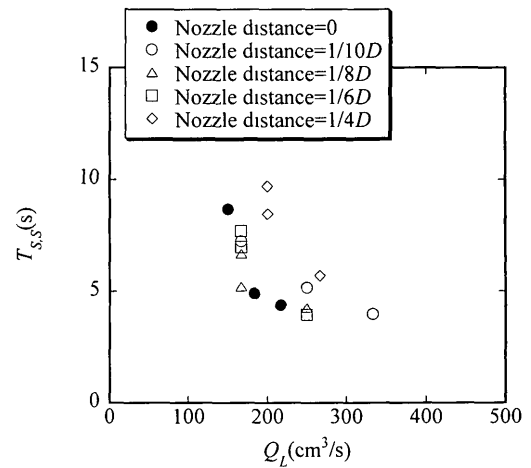


Fig. 8. Starting time of swirl motion, T_{SS} [$D=0.13$ m, $d_{nen}=13$ mm].

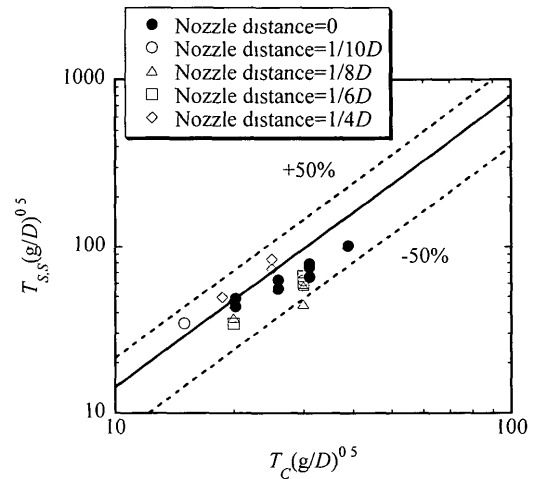


Fig. 9. Starting time of swirl motion, T_{SS} [$D=0.13$ m]

生した噴流内の流体が容器内を循環後、再びノズル近辺に戻ってくるまでの時間のことで、噴流連行液流量 Q_{LS} 及び容器内液体積 V_L によって求められる¹⁴⁾。

$$Q_{LS}=0.3 Q_L H_L / d_{nen} \dots\dots\dots (6)$$

$$V_L = \pi D^2 H_L / 4 \dots\dots\dots (7)$$

$$T_C = \frac{V_L}{Q_{LS}} = \frac{\pi D^2 d_{nen}}{1.2 Q_L} \dots\dots\dots (8)$$

Fig. 9は容器内径 D が0.13 mのときの各ノズル位置における旋回開始時間 T_{SS} を無次元化して示したものである。縦軸と横軸に、旋回開始時間と循環時間 T_C をそれぞれ容器内径 D 及び重力加速度 g によって無次元化したものをとっている。図中の実線は、中心ノズルに対する旋回開始時間 T_{SS} の実験式(9)を表している¹⁴⁾。

$$T_{SS}(g/D)^{0.5} = 0.253 [T_C(g/D)^{0.5}]^{1.75} \dots\dots\dots (9)$$

どの偏心ノズル位置においても、測定値は±50%の偏差で

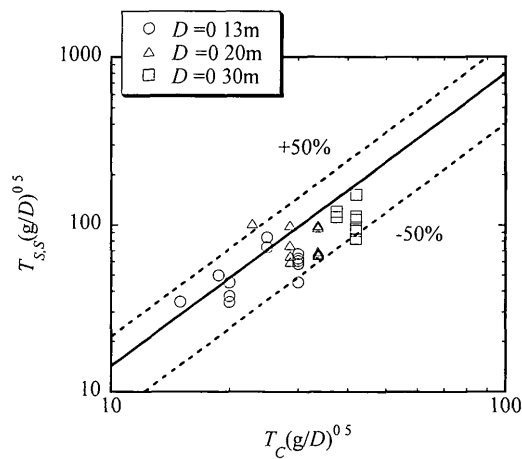


Fig. 10. Starting time of swirl motion, $T_{S,d}$ [$D=0.13$ m, $d_{nen}=13$ mm]

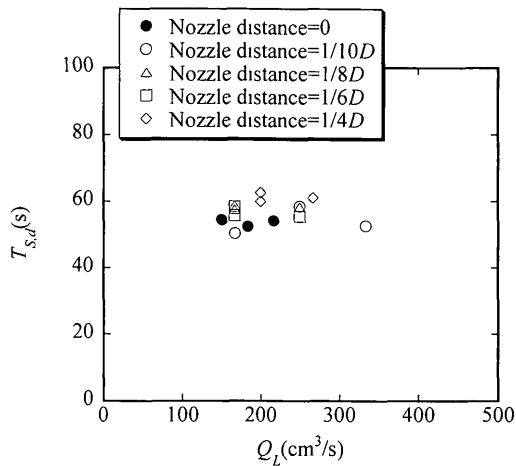


Fig. 11 Damping time of swirl motion, $T_{S,d}$

式(9)によって近似できている。Fig 10に、各容器内径の旋回開始時間 $T_{S,d}$ を無次元化したものを示す。この場合の測定値も、全て実験式(9)で整理できている。したがって、偏心した位置にノズルが設置されていても、旋回が発生する領域であれば旋回開始時間 $T_{S,d}$ は底部中心にノズルを設置したときの実験式で整理可能である。

3.3 旋回終了時間

旋回終了時間 $T_{S,d}$ は、水吹き込みを止めてから容器内の振幅が0.5 mmになるまでの時間を三度測定し、それらを平均して求めた。Fig 11は、容器内径 D が0.13 m、ノズル内径 d_{nen} が13 mmにおける各ノズル位置での旋回終了時間 $T_{S,d}$ と流量 Q_L の関係を表している。旋回終了時間 $T_{S,d}$ は、流量 Q_L およびノズル位置の影響は受けないといえる。

Fig 12は各容器の旋回終了時間 $T_{S,d}$ であるが、 $T_{S,d}$ は容器内径 D に依存し、 D が大きいほど大きくなる。Fig.13は、容器内径 D が0.13 mのときの旋回終了時間 $T_{S,d}$ を容器内径 D および重力加速度 g を用いて無次元化したものを縦軸に、横軸に力の無次元数である修正ロスビー数 Ro_m をとって表したものである。図中の実線は以下に示すノズルを底

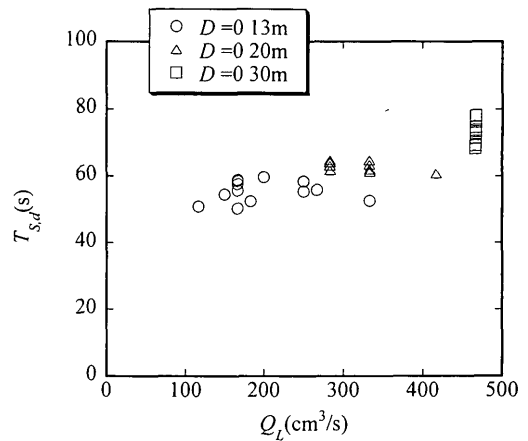


Fig. 12. Damping time of swirl motion, $T_{S,d}$ [$d_{nen}=13$ mm]

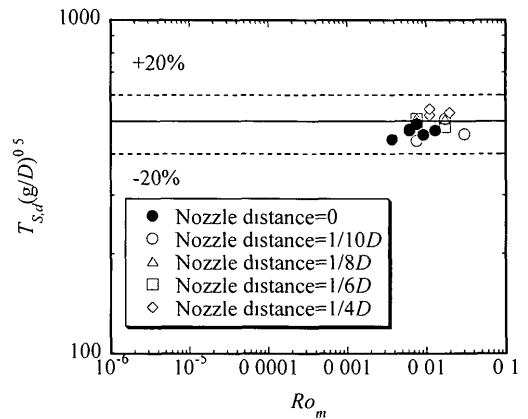


Fig. 13. Damping time of swirl motion, $T_{S,d}$ [$D=0.13$ m].

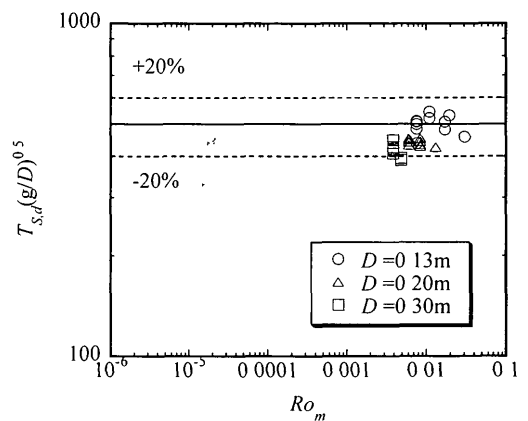


Fig. 14 Damping time of swirl motion, $T_{S,d}$

部中心に設置したときの実験式(10)であるが¹⁴⁾、これにより測定値は±20%の偏差で近似できている。

$$T_{S,d}(g/D)^{0.5} = 500 \dots \dots \dots (10)$$

またFig 14には容器内径別に旋回終了時間 $T_{S,d}$ を整理した。測定値はすべて実験式(10)で整理できていることから、旋回終了時間 $T_{S,d}$ も既存の中心ノズルに対する実験式で整理可能である。

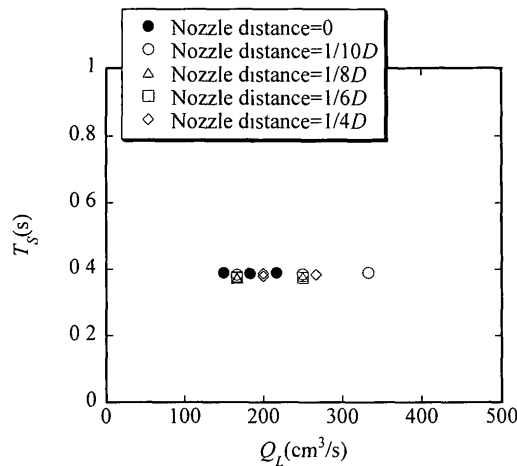


Fig. 15. Period of swirl motion, T_s [$D=0.13$ m, $d_{nen}=13$ mm].

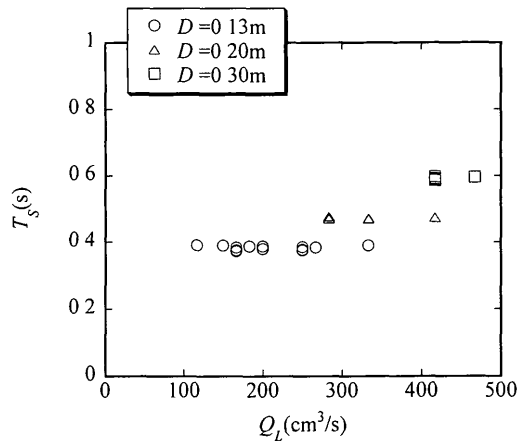


Fig. 16. Period of swirl motion, T_s [$d_{nen}=13$ mm]

3.4 旋回周期 T_s

旋回周期 T_s は 50 周期分の時間から算出した。Fig. 15 は容器内径 D が 0.13 m, ノズル内径 d_{nen} が 13 mm のときのもので、縦軸に旋回周期 T_s を、横軸に流量 Q_L をとっているが、旋回周期にノズル位置は関与しないことがわかる。Fig. 16 は、各容器別の旋回周期 T_s を表したものであるが、旋回周期 T_s は、容器内径 D の影響を受け、 D の増加とともに増加する。過去の研究において、旋回液体噴流の旋回周期 T_s と、容器を外部から加振した際に現われる回転スロッシングの振動周期が一致するという結果が得られている¹⁵⁻¹⁷⁾。

$$T_s = 2\pi / \omega_1 \dots \dots \dots (11)$$

$$\omega_1 = [(2g\varepsilon_1/D) \cdot \tanh(2\varepsilon_1 \cdot H_L/D)]^{1/2} \dots \dots \dots (12)$$

ここで $\varepsilon_1 = 1.8412$ はベッセル関数 J_1' の零点である。Fig. 17 に容器内径 D が 0.13 m のときの旋回周期 T_s を無次元化して示す。縦軸に旋回周期 T_s を容器内径 D および重力加速度 g を用いて無次元化したもの、横軸にアスペクト比 H_L/D をとっている。各ノズル位置における旋回周期 T_s は、既存

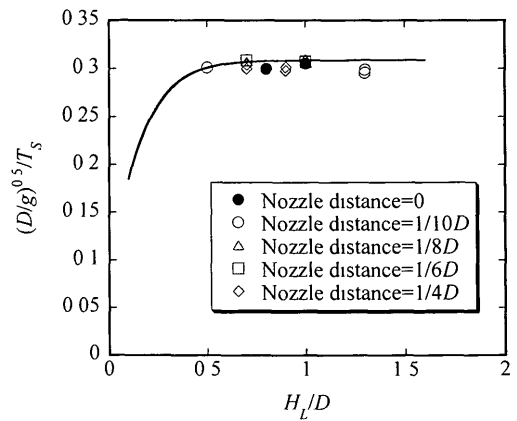


Fig. 17. Period of swirl motion, T_s [$D=0.13$ m].

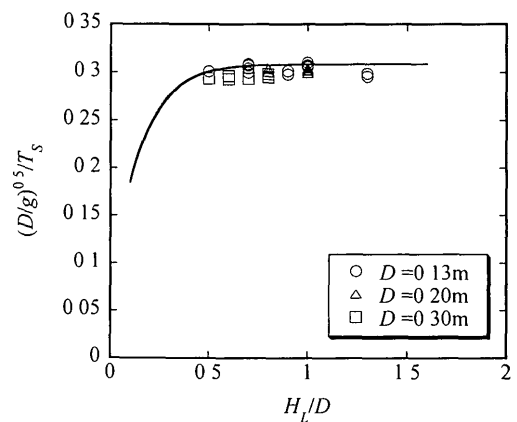


Fig. 18. Period of swirl motion, T_s .

の理論式(11)で整理できている。Fig 18 に各容器内径における旋回周期 T_s を無次元化して示すが、この場合も良好な精度で整理できており、旋回周期 T_s はノズル位置に関係なく、既存の中心ノズルに対する理論式で整理できる。

4. 結論

偏心した位置にノズルを設置して発生させた液体噴流の特性について実験的研究を行い、以下の点を明らかにした。

(1) 旋回発生領域はアスペクト比 H_L/D , 修正ロスビー数 Ro_m , 無次元ノズル位置 R_E/D で整理でき、ノズルの設置位置が中心から遠ざかるほど狭まるが、いずれの場合も中心ノズルに対する発生領域に含まれる。

(2) 旋回開始時間 T_{ss} , 旋回終了時間 T_{sd} 及び旋回周期 T_s はノズル位置に関わらず、中心ノズルに対する既存の実験式及び理論式で整理が可能である。

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_{L_s} : 噴流によって浴内で誘起される液体の上向きの流量の浴表面での値
 T_C : 循環時間
 T_{S_d} : 旋回終了時間
 T_{S_s} : 旋回開始時間
 T_S : 旋回周期
 V_L : 浴内の液体積

文 献

- 1) K Mori and M Sano *Tetsu-to-Hagané*, **67** (1981), 672
- 2) 浅井滋生: 第100・101回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1984), 65
- 3) D Mazumdar and R I L Guthrie *ISIJ Int*, **35** (1995), 1
- 4) O J Ilegbushi, M Iguchi and W Wahnshiedler *Mathematical and Physical Modeling of Materials Processing Operations*, Chapman-Hall/CRC, Boca Raton, (1999)
- 5) K Marukawa, S Hara and M Sano *ISIJ Int*, **41** (2001), S36
- 6) 精錬・凝固プロセスの高効率化への革新的技術, 日本鉄鋼協会編, 日本鉄鋼協会, 東京, (2002).
- 7) J Yoshida, D Iguchi, M Shtara and M Iguchi *ISIJ Int*, **43** (2003), 1890
- 8) M Iguchi, H Ihira, Y Takatsuka and S Hosohara *ISIJ Int*, **43** (2003), 1108
- 9) Y Kato, K Nakanishi, T Nozaki, K Suzuki and T Emi *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 1604
- 10) M Iguchi, S Hosohara, T Koga, R Yamaguchi and Z Morita *ISIJ Int*, **33** (1993), 1037
- 11) Y Xie and F Oeters *Steel Res*, **63** (1992), 227
- 12) M P Schwartz *Chem Eng Sci*, **45** (1990), 1765
- 13) M Iguchi, Y Itoh and Z Morita *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 189
- 14) D Iguchi, J Yoshida and M Iguchi *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 357
- 15) M Iguchi, Y Eguchi, A Kawasaki, S Kitamura and K Naito *ISIJ Int*, **39** (1999), 767
- 16) M Iguchi, D Iguchi and J Yoshida *Mater Trans*, **45** (2004), No 5, 1764
- 17) A Kimura and H Ohashi *Trans Jpn Soc Mech Eng*, **44** (1978), 3024