

円筒容器内における旋回液体噴流の過渡特性

井口 大亮*・吉田 仁*²・井口 学*

Transient Characteristics of Swirling Liquid Jet in a Cylindrical Bath

Daisuke IGUCHI, Jin YOSHIDA and Manabu IGUCHI

Synopsis : When liquid was injected through a nozzle settled on the bottom of a cylindrical bath, a liquid jet was formed above the nozzle. The jet swirled around the bath axis under a certain injection condition. The bath was highly agitated in the presence of the swirl motion. Therefore the swirl motion is very beneficial for the agitation of a molten steel bath. Considering these circumstances, the authors previously proposed a novel refining process using the swirl motion and investigated the basic characteristics of the swirl motion such as the preferable condition for its occurrence, the period, and the amplitude. In its practical applications, the transient characteristics of the swirl motion are necessary in addition to the basic characteristics. Water model experiments were carried out in this study to understand the starting time and damping time of the swirl motion in the bath. Empirical equations were derived for the two representative time scales.

Key words : steelmaking; refining; swirl motion; transient phenomena; top slag; jet; sloshing.

1. 緒言

鉄鋼精錬プロセスにおいて、攪拌時間の短縮は生産効率の向上に直結する。従来、溶鋼とスラッグの攪拌を行う際の手段として、トップランスを利用した上吹き、もしくは底部に設置したノズルからの底吹きでガスを溶鋼内に吹き込む攪拌操作が広く用いられている¹⁻⁴⁾。しかしながら、Arなどの吹込み用ガスは高価であり、しかも攪拌効率は吹込みガス流量に比例するわけではないことから、安価でさらに効率のよい攪拌法の開発が切望されている^{5,6)}。

著者らは新規攪拌法として、ガスではなく、ある臨界値以上の流量で底吹きノズルから浴内に液体を吹き込んだ際に形成される旋回液体噴流の利用を考えた⁷⁾。ガス吹込みでは、気泡に働く浮力が溶鋼の循環運動を誘起するまでに十分な時間を要するのに対し、液体の吹込みでは液体の慣性力がそのまま利用できるため、浴内の液体の循環運動、特に高効率攪拌が期待できる旋回運動⁸⁻¹³⁾の発生に至る時間の大幅な短縮が見込まれる。また、ガス吹込み攪拌では、

ガス流量を大きくしても吹き抜け現象が起こり、投入したエネルギーが十分効率よく攪拌に用いられない状況が起こる^{1,4)}、旋回液体噴流では、そのようなことはない。本研究ではエネルギー問題も視野に入れているため、攪拌には位置エネルギーを利用する。

Fig. 1に示すように、溶鋼吹込み口として円筒形の炉の底部にノズルを、吐き出し口として炉側面最下部近辺に複数のドレイン用ノズルを設置し、前のプロセスから攪拌を引き継ぐ⁷⁾。噴流により旋回が発生するためには一定以上の浴深を必要とするため、スライディングゲートの開閉によりその調整を行う。すなわち、Fig. 1の左図に示すように入り口側ゲートを開けて溶鋼を注入し、所定の深さに達したとき、出口側のゲートを開けて浴深を一定に保つ (Fig. 1の右図)。この過程において、所定の浴深に達する前に旋回の始まることを望ましい (Fig. 1の中央の図)。浅いところで旋回が起こると溶鋼中全体にスラッグが巻き込まれエマルジョンとなり、攪拌効率が向上するためである。したがって、実機への適用に際しては、液体を反応容器に

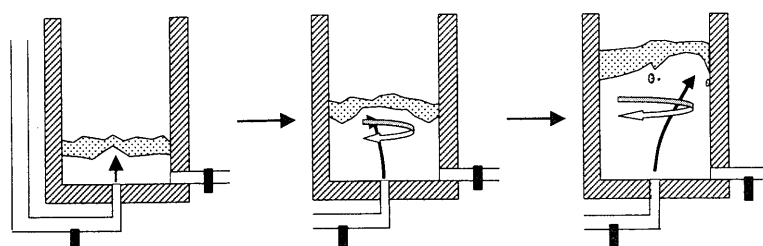


Fig. 1. Schematic of novel refining process using swirl motion of liquid jet.

平成15年10月1日受付 平成15年12月22日受理 (Received on Oct. 1, 2003; Accepted on Dec. 22, 2003)

* 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)

* 2 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)

吹き込み始めてから旋回が発生するまでの過渡現象と、液体の吹き込みを止めてから旋回が停止するまでの過渡現象を調査する必要がある¹³⁾。

本論文では、水モデルを用いて液体噴流の旋回が発生するまでの過渡時間 $T_{s,s}$ 、旋回終了時間 $T_{s,d}$ を測定した結果について報告する。

2. 実験装置と方法

Fig. 2 に実験装置の概要を示す⁷⁾。水を溶鋼に見立てた水モデルを用いて実験を行った。透明のアクリル製円筒容器の周囲を正方形断面の浴で囲い、その間をイオン交換水で満たした。容器底部中心に塩化ビニル製のノズルを一つ設置し、インバータでポンプの出力を制御して、吹き込む水の流量 Q_L を調整した。このとき浴深が一定となるように、円筒容器底部四隅に設置した4個のドレインより水を排出し、循環させた。円筒容器は内径 D が 0.100, 0.130, 0.150, 0.200, 0.309 m の 5 種類のを、ノズルは内径 d_{nen} が 5, 10, 13, 15 mm の 3 種類のを使用し、水流量は 0~750 cm³/s の範囲で設定した。浴深 H_{L2} を容器内径 D で除した値をアスペクト比と定義し、0~1.5 の範囲で変化させた。なお、ドレインの位置と数が旋回現象に及ぼす影響については予備実験を行っているが、ノズルの数が 2~4 の範囲では、ノズルが側壁近傍にあるかぎり、その影響は無視できることを確認している。Table 1 に使用した水、溶鋼の物性値を示す。

3. 旋回運動の種類、旋回開始時間と終了時間の定義

本実験条件下では、Fig. 3 に示すように、回転スロッシングに似た 2 種類の旋回現象が発生した^{15,16)}。(a) のように浴が浅いとき、容器の中心近傍で旋回する場合は浅水波型旋回と呼び、容器底部の影響を大きく受ける。一方、(b) のように浴が深いときに現れ、浴全体が旋回している場合を深水波型旋回と呼び、容器底部ではなく容器側壁の影響を大きく受ける。浅水波型と深水波型の旋回の境界には、浴深および水流量が深く関与している⁷⁾。

工業上は、深水波型の旋回が重要であるため、本研究では流体として水を用いて、深水波型の旋回に対する旋回開始時間および旋回終了時間の調査を行った。溶鋼のモデルとして水を用いたのは、両者の動粘度がよく似ていることによる。旋回開始時間は、液体の吹き込みを始めてから旋回が始まるまでの時間、旋回終了時間は吹き込み停止後、旋回が止んで側壁における波動の振幅が 0.5 mm になるまでの時間と定義した。なお、旋回の周期と振幅の測定結果とその整理法については、前報⁷⁾で報告しているので、参照されたい。

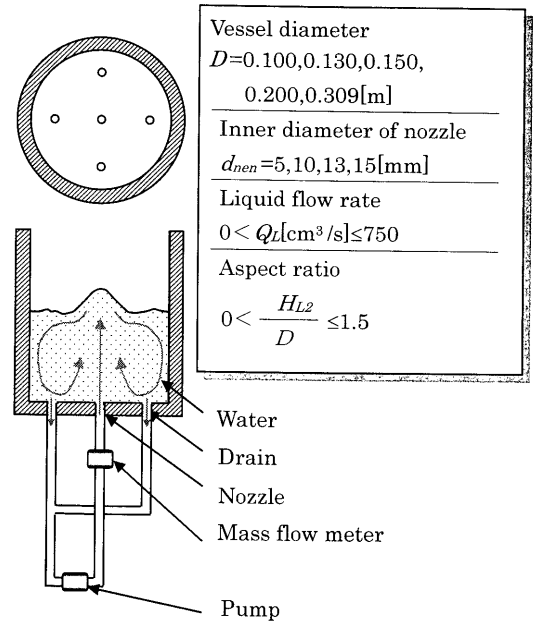
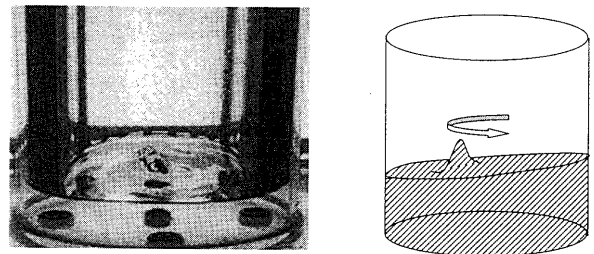


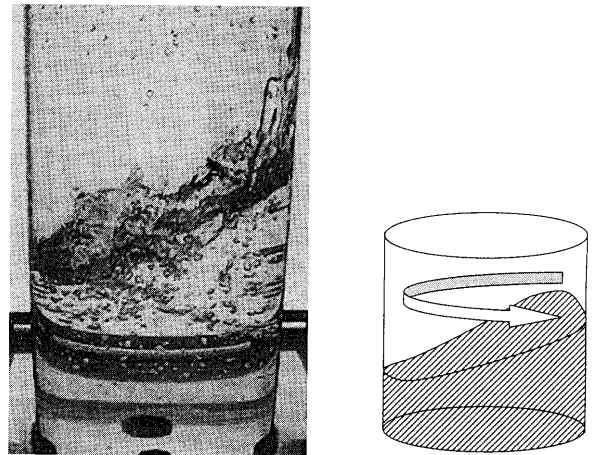
Fig. 2. Experimental apparatus.

Table 1. Physical properties of water and molten steel.

	Water(298K)	Molten steel(1873K)
Density ρ_l (kg/m ³)	996	7220
Kinematic viscosity ν_l (mm ² /s,cSt)	0.907	0.830



(a) Shallow water wave type



(b) Deep water wave type

Fig. 3. Swirl motion of liquid jet.

4. 実験結果と考察

4.1 旋回開始時間

4.1.1 流れ場の時間的变化

粒径75~150 μm のスチレン-ジビニルベンゼン共重合体のトレーサー粒子を水に混入し、粒子画像流速計(PIV)を用いて画像解析を行った¹⁷⁾。Fig. 4は、容器内径 D を0.150m、アスペクト比 H_{L2}/D を0.500、ノズル内径 d_{nen} を13mm、流量 Q_L を83.3 cm^3/s にとり、ダブルパルスのヤグレーザーの発信周波数 f_L を4Hz、相互相関を行う二枚の画像間隔 T_p を9msに設定し、PIVを用いて算出した速度ベクトルを表している。3つのベクトル図は、噴流の発生から旋回が始まるまでの様子を順次表したものである。速度ベクトルの大きさと実際の速度の対応関係は図の左下に示している。1枚目の図は、ノズル吹込み口に噴流が発生し始めている状況を表している。2枚目の図より、ノズルの左右に循環流が発生していることが、3枚目の図より、左上方に向かう強い流れとそれを取り巻く循環流の存在が確認できる。この強い流れは時々刻々方向を変え、1周期後に元の状態に戻ってくる。実際には、3枚目の図は旋回している際の縦断面図となっている。したがって、この図より旋回運動であることを判別することは困難であり、横断面におけるベクトル図を作成する必要があるが、本実験装置

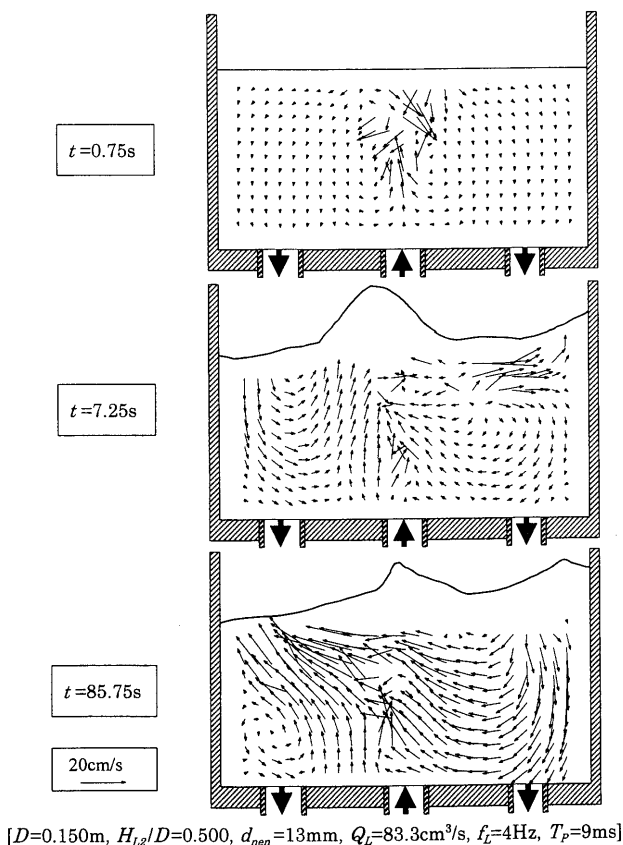


Fig. 4. Velocity vectors in transient period from start of liquid injection.

では撮影上の制約があって難しいため、今後の課題とした。

4.1.2 旋回開始時間 $T_{s,s}$ の実験結果

縦軸を旋回開始時間 $T_{s,s}$ に、横軸を水流量 Q_L にとり、Fig. 5に容器別の、Fig. 6にノズル別の結果を示す。Fig. 5より、水流量の増加に伴い旋回開始時間は Q_L のほぼ7/4乗に比例して減少していく傾向が見られ、容器が大きくなるほど長くなる。Fig. 6中の測定値をFig. 5中に示した傾きが-7/4の直線で近似すると、 d_{nen} が小さいほど下側にくる。すなわち Q_L が同じ場合では d_{nen} が小さいほど $T_{s,s}$ は小さくなる。これは、 d_{nen} が小さくなるほど液体噴流の慣性力が大きくなるためである。Fig. 7に示すように、浴深 H_{L2} は液体噴流の旋回開始時間 $T_{s,s}$ にほとんど影響を及ぼさないことが分かる。以上のことから、旋回開始時間はおもに容器内径 D 、水流量 Q_L およびノズル内径 d_{nen} に依存していると考えられる。

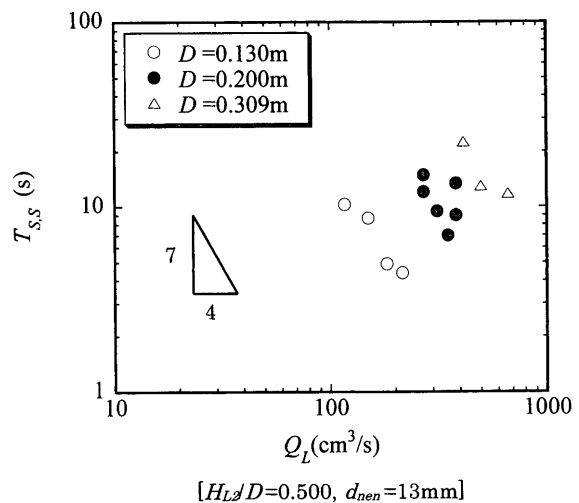


Fig. 5. Effect of vessel diameter on starting time of swirl motion.

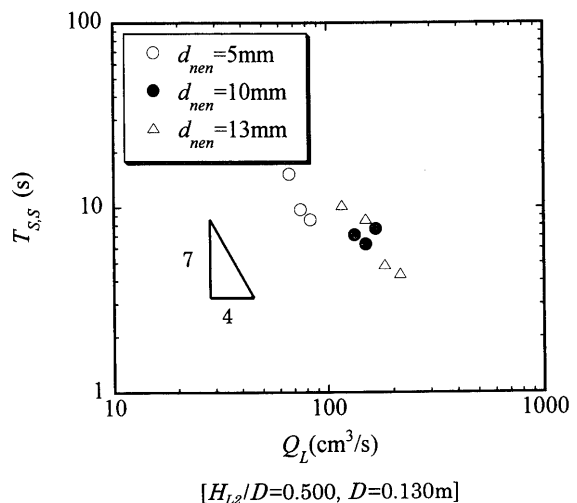


Fig. 6. Effect of nozzle diameter on starting time of swirl motion.

4・1・3 旋回開始時間の実験式

貫入噴流に対する循環時間 T_c を参考にして^{17,18)}、すべての測定結果を Fig. 8 に示すように整理した。循環時間とは、ノズルから噴流状態で浴内に吹き込まれた液体が浴内を一回りして再びノズル近傍へ戻ってくるまでの時間を表す。旋回開始時間 $T_{s,s}$ はここで提案した式(1)によって±70%の偏差で近似できた。

$$T_{s,s}(g/D)^{0.5} = 0.253 [T_c(g/D)^{0.5}]^{1.75} \dots\dots\dots (1)$$

$$T_c = V_L / Q_{Ls} = \pi D^2 d_{nen} / (1.2 Q_L) \dots\dots\dots (2)$$

$$V_L = \pi D^2 H_{L2} / 4 \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_{Ls} = 0.3 Q_L H_{L2} / d_{nen} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 g は重力加速度、 T_c は循環時間、 V_L は浴内の液体の体積、 Q_{Ls} は液体噴流によって上方向に誘起される液体の流れの流量である。一見すると、式(1)の偏差は大きいようであるが、この種の実験においては許容できる範囲内にある。

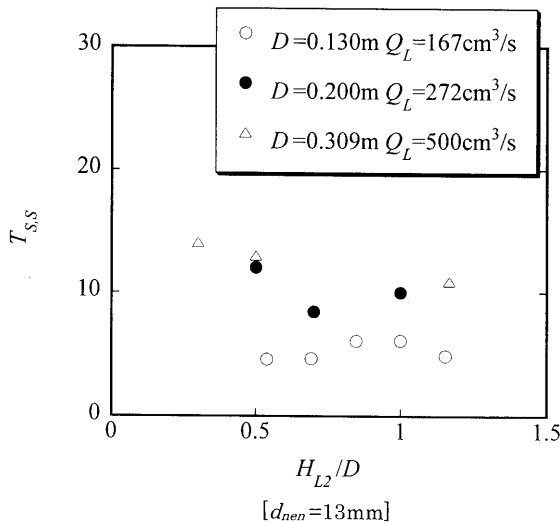


Fig. 7. Relation between aspect ratio and starting time of swirl motion.

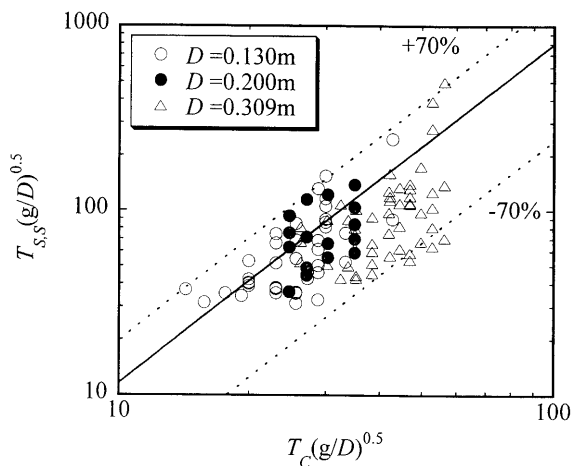


Fig. 8. Correlation of starting time of swirl motion.

4・2 旋回終了時間

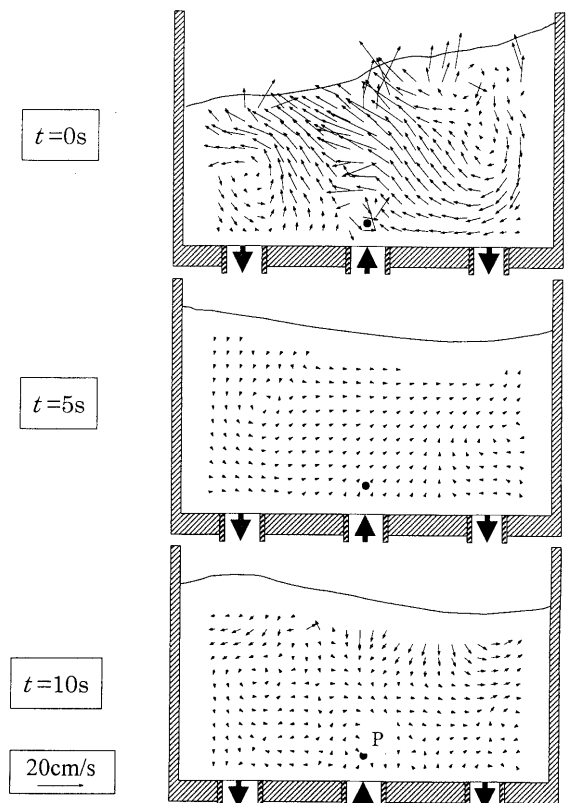
4・2・1 流れ場の時間的变化

Fig. 9 に示す速度ベクトル図は、水の吹込みを停止させ、液面の揺らぎが静定していく過渡的な期間の結果を表したものである。1枚目($t=0$)の図は吹込みの停止と同時に得たベクトルであり、まだ十分に大きい攪拌力を有していることが推察できる。2枚目、3枚目となるにつれ、液面変動は緩やかになっていくが、縦断面における撮影のため、速度ベクトルによる旋回終了時間の決定は困難である。

Fig.10 に Fig. 9 中の測定点 P における速度ベクトルの履歴を表す。時間の経過とともに速度の減衰していく様子が確認できる。旋回の終了時間を速度が最大速度の5%になるまでの時間と定義し、目視による結果と比較したところ、目視による実測値が51.0sであるのに対し、速度履歴による測定値は49.7s前後とほぼ一致していることが確認できた。したがって、振幅が0.5mmになるまでの時間として目視によって求める方法は妥当なものであるといえる。

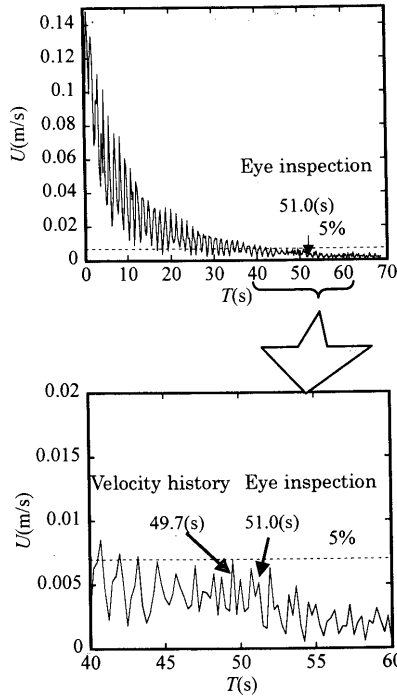
4・2・2 旋回終了時間 $T_{s,d}$ の実験結果

縦軸を旋回終了時間に、横軸を水流量にとり、Fig.11 に容器別の、Fig.12 にノズル別の、Fig.13 にアスペクト比別の結果を示す。旋回終了時間は、液流量、ノズル内径、アスペクト比の影響をほとんど受けず、容器内径 D のみに依存するものと考えられる。



[$D=0.150m, H_{L2}/D=0.500, d_{nen}=13mm, Q_L=83.3cm³/s, f_L=4Hz, T_p=9ms$]

Fig. 9. Velocity vectors in transient period from stoppage of liquid injection.



$[D=0.150\text{m}, H_{L2}/D=0.500, d_{nen}=13\text{mm}, Q_L=83.3\text{cm}^3/\text{s}, f_L=4\text{Hz}, T_P=9\text{ms}]$

Fig. 10. Determination method of damping time of swirl motion.

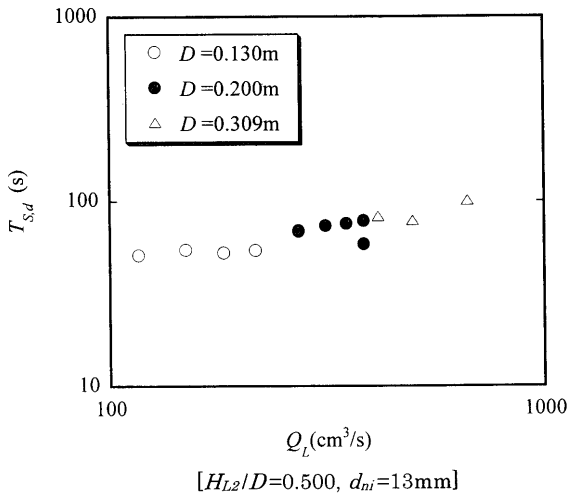


Fig. 11. Effect of vessel diameter on damping time of swirl motion.

4.2.3 旋回終了時間の実験式

縦軸に容器内径 D と重力加速度 g を用いて無次元化した旋回終了時間を、横軸に前報で導入した修正ロスビー数 Ro_m ととり、Fig.14に示す。修正ロスビー数とは噴流の有する慣性力と浴内で旋回している液体に働く慣性力との比を表すが、旋回終了時間の測定値は、 Ro_m には依存せず、ここで提案した式(5)によって $\pm 25\%$ の偏差で近似できる。

$$T_{s,d}(g/D)^{0.5} = 500 \dots \dots \dots (5)$$

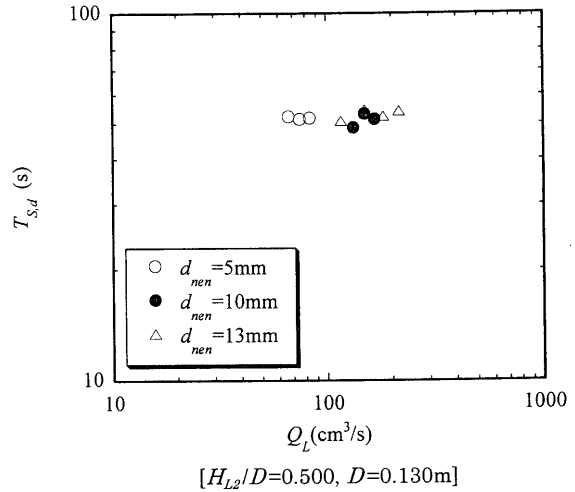


Fig. 12. Effect of nozzle diameter on starting time of swirl motion.

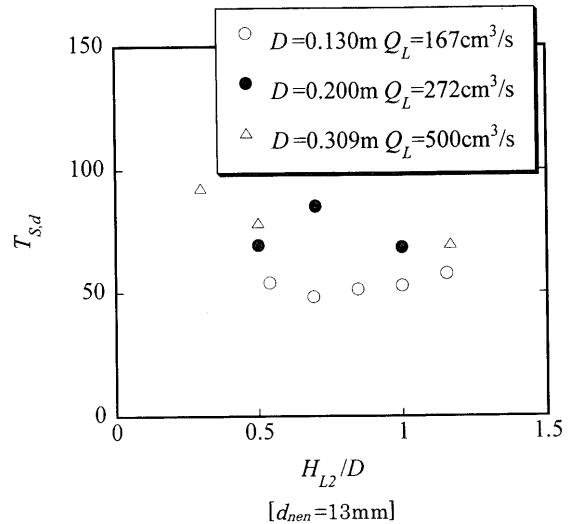


Fig. 13. Relation between aspect ratio and damping time of swirl motion.

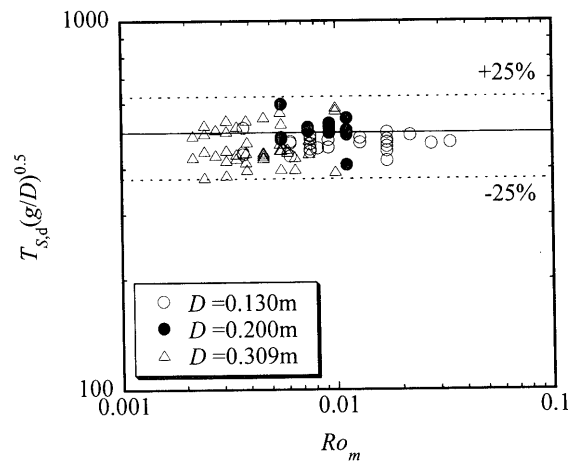


Fig. 14. Correlation of damping time of swirl motion.

$$Ro_m = \frac{Q_L^2}{ga_{nen}^2 D^3} \dots \dots \dots (6)$$

$T_{s,s}$: 旋回開始時間
 T_s : 旋回周期
 V_L : 浴内の液体積

5. 結論

本研究では、円筒容器内の水浴中に水を吹き込んだときに現れる水噴流の旋回現象に着目し、過渡特性を調べた。得られた主な成果をまとめると次のようになる。

アスペクト比 H_{L2}/D の値によって、回転スロッシングに類似な2種類のタイプの旋回現象が観察された。アスペクト比が小さいときには浅水波型の、多いときには深水波型の旋回現象が現れた。本報告では工業上利用価値の高い深水波型旋回運動の開始時間と終了時間を調べたが、開始時間は、式(1)により整理できた。旋回終了時間は吹込み水流量、ノズル内径、アスペクト比の影響を受けず、容器径 D のみの関数として式(5)で近似できた。

記号

D : 容器内径
 d_{nen} : 水吹込みノズルの内径
 g : 重力加速度
 H_{L2} : 水の層の浴深
 Q_L : 吹込み水流量
 Q_{Ls} : 噴流によって浴内で誘起される液体の上向きの流量
 T_c : 循環時間
 $T_{s,d}$: 旋回終了時間

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, 東京, (1984).
- 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提案, 日本鉄鋼協会, 東京, (2002).
- 7) J.Yoshida, D.Iguchi, M.Shitara and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 1890.
- 8) Y.Kato, K.Nakanishi, T.Nozaiki, K.Suzuki and T.Emi: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 1604.
- 9) M.Iguchi, S.Hosohara, T.Koga, R.Yamaguchi and Z.Morita: *ISIJ Int.*, **33** (1993), 1037.
- 10) Y.Xie and F.Oeters: *Steel Res.*, **63** (1992), 227.
- 11) M.P.Schwartz: *Chem. Eng., Sci.*, **45** (1990), 1765.
- 12) M.Iguchi, Y.Itoh and Z.Morita: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 189.
- 13) G.G.K.Murthy, S.P.Mehrorra and A.Ghosh: *Metall. Trans. B*, **19** (1988), 839.
- 14) M.Iguchi, Y.Eguchi, A.Kawasaki, S.Kitamura and K.Naito: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 767.
- 15) A.Kimura and H.Ohashi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **44** (1978), 3024.
- 16) A.Kimura and H.Ohashi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **44** (1978), 3446.
- 17) T.Shimizu, M.Iguchi and N.Tsuda: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 571.
- 18) K.Abe and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **42** (2002), 581.