

過渡状態における旋回液体噴流に及ぼすスラグの影響

井口 大亮*・大参 達也*²・井口 学*²

Effect of Slag on Swirling Liquid Jet in Transient Period

Daisuke IGUCHI, Tatsuya OHMI and Manabu IGUCHI

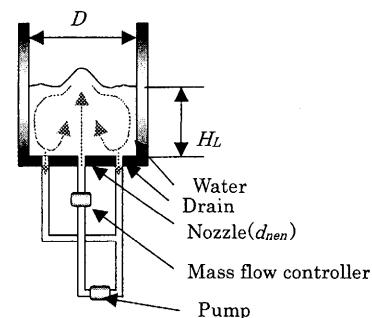
Synopsis : A swirl motion of a cylindrical water bath agitated by a bottom blown liquid jet has been investigated. Silicone oil or normal pentane on water is used as model fluid for molten slag. Boundary of occurrence region, the starting time and period of the swirl motion are determined.

Key words : steelmaking; refining; slag; swirl motion; transient period.

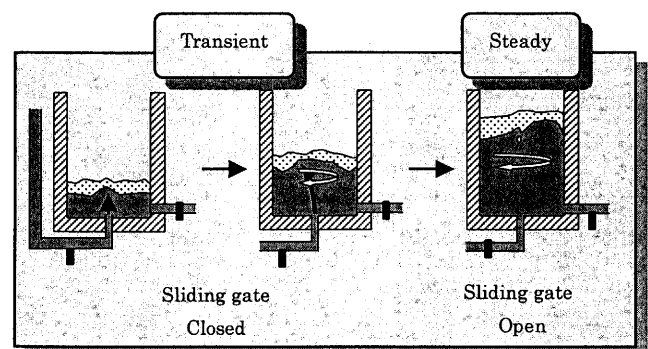
1. 緒言

現在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 ガス吹き込みによる攪拌や電磁攪拌、機械式攪拌などが用いられている。筆者の一人はこのうちのガス吹き込み攪拌に着目し、炉底ノズルもしくは溶鋼内に浸漬させたランスから Ar ガスを吹き込んだ時、ある条件で発生する旋回運動について調べてきた¹⁾。水モデル実験における均一混合時間の測定では、旋回が発生することにより均一混合時間が著しく短縮することを見出した。さらに、気体ではなく同種の液体を吹き込んだ方が、旋回開始時間が短くなることや、流量、浴深ともに旋回可能なプロセス条件の範囲が広がることがわかっている。そこで、筆者らは液-液系、固体粒子-液体系での攪拌に旋回液体噴流を用いることを提唱し、旋回液体噴流の基本特性と攪拌特性を調査してきた^{2,3)}。筆者らは旋回液体噴流に関する実験では円筒容器を用いて、容器内の浴深を一定に保つ方法を用いてきた。Fig. 1(a)に実験装置図を示す。本装置では、底部に取り付けた流入、排出の二種のノズルを、ポンプを設けた配管で結合することで容器内の液体を循環させた。この方式で発生させた旋回液体噴流の状態を定常状態と呼ぶことにする。しかしながらこの方法では、例えば溶鋼のような高温の液体を扱う場合、実験装置にあるような連続式での長時間の稼働は実用上非常に困難である。対応案としては Fig. 1(b)に示すようなバッチ式をとることが挙げられる。あらかじめ炉内にスラグを敷き詰め、底部から溶鋼を吹き込み、旋回による攪拌が行われた後に吹き込みを停止し溶鋼を排出する。この方式による旋回運動を過渡状態と呼ぶことにする。本プロセスでは、吹き込みを停止しても慣性で旋回はある程度持続するため、

均一な攪拌が見込まれる。しかしながら過渡状態では定常状態とは異なる特性を示すことが考えられる。そこで、本研究では水モデル実験によって両特性の比較調査を行った。



(a) Experimental apparatus (steady)



(b) Schematic of batch type for steel refining process

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

平成 18 年 1 月 4 日 受付 平成 18 年 3 月 30 日 受理 (Received on Jan. 4, 2006; Accepted on Mar. 30, 2006)

* 北海道大学大学院生 (Graduate Student, Hokkaido University, 13-8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

* 2 北海道大学大学院工学研究科材料科学専攻 (Division of Materials Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

2. 実験条件

旋回液体噴流は、条件によって浅水波型旋回、深水波型旋回の二種類が発生する^{1,2)}。浅水波型旋回は水流量、浴深が小さい場合に発生し、液面が旋回する際に底部の影響を受けるため、噴流近辺で小さく旋回する。深水波型旋回は水流量、浴深共に大きい場合に発生し、浴全体が大きく旋回する。本実験では、深水波型旋回について調査を行った。

実験装置を Fig. 2 に示す。本装置は、内径 D が 0.13 m の透明なアクリル樹脂製の円筒容器の浴と、別途用意した貯水浴、そしてそれらを結合するための塩化ビニル製のドレインノズル及び配管、ポンプから構成されている。なお、一部比較のために 0.20 m の浴を用いた実験も実施した。以前行った実験から、旋回に及ぼす因子は流速であることが分かっているので、水吹き込みノズルの内径 d_{nen} は 13 mm に固定し、水流量を調整して流速を変えている。初期液面の高さ H_{Li} はアスペクト比に換算して、 H_{Li}/D が 0, 0.1, 0.3, 0.4, 0.5 となるように設定した。スラグあるいは污水处理における油のモデル流体として動粘度の異なる 3 種類のシリコンオイル及びノルマルペンタンを用いた。使用した流体の物性値を Table 1 に示す。二層にとった場合、下層が水、上層がモデル流体となり、初期液面の高さ H_{Li} は二層の計としている。定常状態において、二層での旋回液体噴流の実験では、両層が攪拌しながら同じ周期で旋回するが、

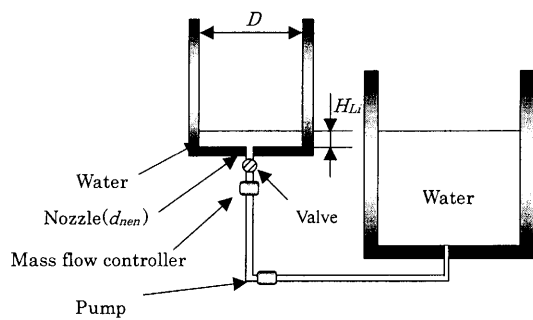


Fig. 2. Experimental apparatus (transient).

上層が厚くなるほど旋回が発生しにくくなる傾向が見られた。本方式がバッチ式であり、吹き込み量で混合時の密度を調整できることから、上層の厚みを薄くアスペクト比 0.1 にとり、比較のためアスペクト比 0.4 までを調査した。定常状態における実験結果と比較するため、過渡状態における水単層及び二層での初期液面は、定常状態において旋回が始まる高さであるアスペクト比 0.3 を基準に実験した。

過渡状態における旋回液体噴流の特性が、定常状態における特性とどのように異なるのかを明らかにするために定常状態、過渡状態、二層における過渡状態のそれぞれの旋回発生領域、旋回開始時間、旋回周期を比較した。

3. 実験結果

3.1 旋回発生領域

Fig. 3 は旋回発生領域に及ぼす浴深 H_L 及び水流量 Q_L の影響を、定常状態と過渡状態について比較した結果である。定常状態については、各浴深で調査した結果を、過渡状態では初期液面の高さ H_{Li}/D を 0 としたときの旋回発生高さを示している。浴内径はいずれも 0.13 m である。過渡状態では徐々に液面が増加していくことで慣性がつくため、旋回発生領域は定常状態における旋回発生領域に比べ全体的に上部にシフトしている。以前著者らが行った定常状態に

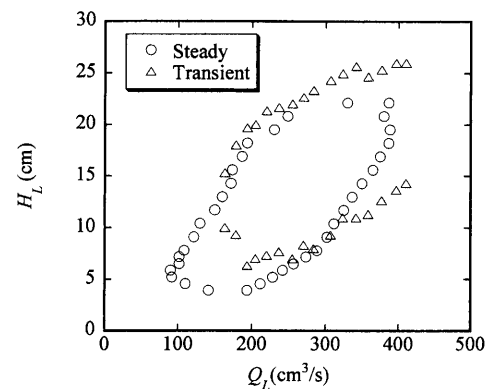


Fig. 3. Boundary of occurrence region of swirl motion [$D=0.13$ m, $d_{nen}=13$ mm].

Table 1. Physical properties of Liquids.

	Water	Silicone oil 1cSt	Silicone oil 10cSt	Silicone oil 100cSt	N-pentane	Molten steel
Temperature (K)	298	298	298	298	298	1973
Density ρ_L (kg/m ³)	997	818	935	960	630	7210
Surface tension σ (mN/m)	72.7	52.7	52.7	53.0	57.8	1000
Kinematic viscosity ν_L (mm ² /s)	0.89	1.0	10	100	0.37	0.929

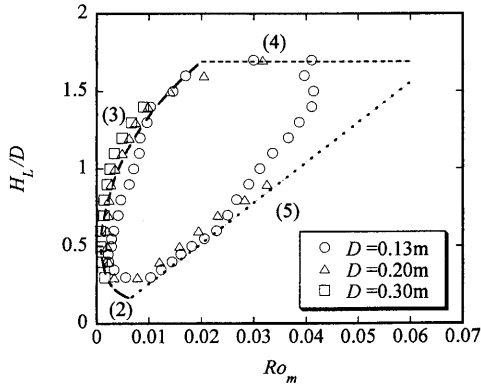


Fig. 4. Boundary of occurrence region of swirl motion in steady period [$d_{nen}=13$ mm].

おける実験では、アスペクト比 H_L/D を縦軸に、修正ロスビー数 Ro_m を横軸にとることで旋回発生領域の境界を記述する実験式を導くことができた⁴⁾。修正ロスビー数は発生した噴流の慣性力と旋回している液体の遠心力の比として表される無次元数で、式(1)より表される。

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

ここで g は重力加速度である。Fig. 4 は各容器内径における定常状態での旋回発生領域を示している。浴内径が異なる実験の結果が一つの旋回発生領域で整理できることがわかる。定常状態における旋回発生領域の境界は、次式(2)~(5)で表される⁵⁾。

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

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

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

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

式(2)は浅水波型旋回と深水波型旋回が発生する境界を表している。また、式(3)は液面を揺すり、旋回を発生させるのに必要な力の下限を、式(4)は噴流の広がりにより液面を振動させることが不可能になる境界を、式(5)は噴流が液面を吹き抜けることで旋回が発生しなくなる境界を表している。これらの実験式で表された旋回発生領域の境界と、過渡状態における各初期液面の高さに対する旋回発生領域を Fig. 5 に示す。初期液面 H_{Li} が高くなるにつれ旋回発生領域は狭くなっていくが、上側の境界、つまり旋回が停止する浴深は初期液面に関係なくほぼ一定となっている。そして Ro_m の大きい、つまり流量が高い領域において式(4)のようにアスペクト比が一定であることから、定常状態で求めた実験式と同様の傾向を示していることが分かる。これに対し、旋回が発生し始める境界に関しては初期液面の高さの影響が顕著に表れている。ここで Ro_m の小さい領域に着目してみると、発生領域の差が初期液面の高さの差にほぼ等しくなっていることが確認できる。しかし Ro_m が大きくなるに従い発生領域に差がなくなっていくこ

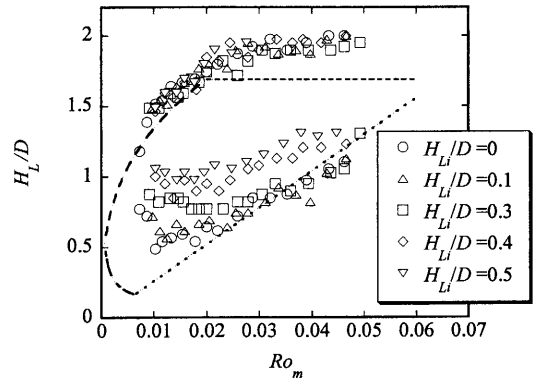


Fig. 5. Boundary of occurrence region of swirl motion in transient period [single phase, $D=0.13$ m, $d_{nen}=13$ mm].

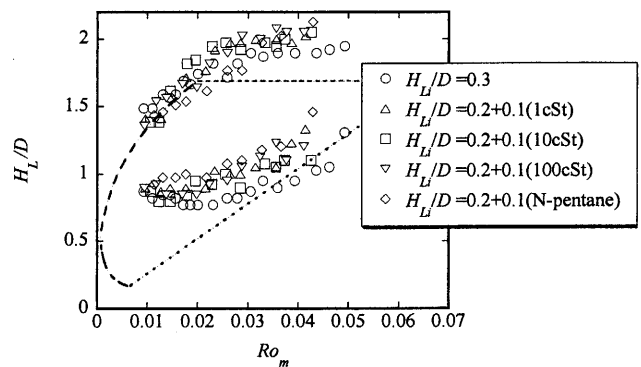


Fig. 6. Boundary of occurrence region of swirl motion in transient period [two-phase, $D=0.13$ m, $d_{nen}=13$ mm].

とから、初期液面が高いほど旋回に至るまでの時間が短くなるのが分かる。この原因としては、式(2)に示すように、深水波型旋回はアスペクト比0.3近傍から発生することが挙げられる。旋回が生じる際に、浴深が浅いと主に容器底部の抵抗を受けるためであり、これにより、過渡状態において初期液面が低いほど旋回に至るまでの時間が長くなるものと考えられる。

Fig. 6 に過渡状態における水単層、水-シリコンオイル二層、及び水-ノルマルペンタン二層の場合での旋回発生領域を示す。単層の初期液面 H_{Li}/D を0.3とし、二層での初期液面 H_{Li}/D を下層(0.2)、上層(0.1)の合わせて0.3とした。それぞれの旋回領域を比較すると、少々差が見られるものの同じような領域となった。特に二層の場合は、1cSt、10cSt、100cStのシリコンオイル、ノルマルペンタンを乗せた場合にかかわらず差が見られなかった。本実験ではこの結果から、上層と下層が共に旋回する旋回運動では、二層での特性は、吹き込まれる下層の液体噴流の特性のみに依存するのではないかと考えられる。

Fig. 7 は、比較のために行った上層と下層の厚みを換えした場合の実験結果である。上層の流体として1cStのシリコンオイルを用いた。Fig. 7では、初期液面の高さを水の層0.1、シリコンオイルの層を0.2の計0.3と、水の層0.1、シ

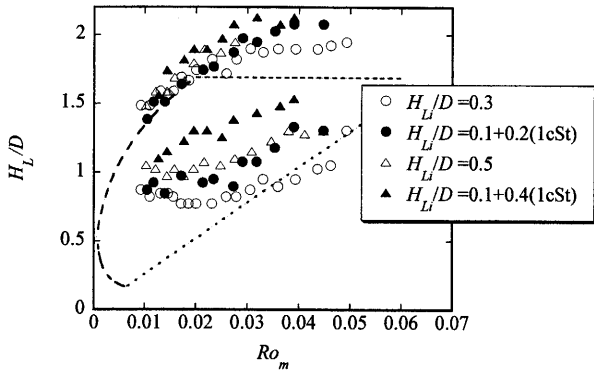


Fig. 7. Boundary of occurrence region of swirl motion in transient period [two-phase, thick, $D=0.13$ m, $d_{nen}=13$ mm].

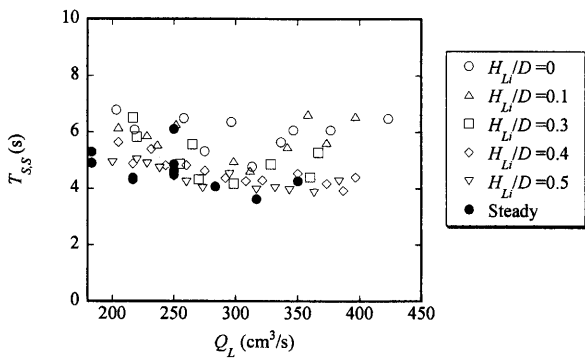


Fig. 8. Starting time of swirl motion, T_{SS} [single phase, $D=0.13$ m, $d_{nen}=13$ mm].

シリコンオイルの層を0.4の計0.5の結果とを水単層の結果と比較している。旋回発生領域は、両層の厚みの計が0.3である2条件ではほとんど差が見られないが、水の層0.1、シリコンオイルの層を0.4とした場合の水単層0.5との比較ではかなりの差が生じた。この原因としては、水噴流がシリコンオイル層を通過する際に発生するエマルジョンが、シリコンオイル層が厚くなるに従い旋回を阻害する度合いが大きくなることが考えられる。これにより、シリコンオイル層が薄い場合、上層は旋回運動に大きな影響を及ぼさないものと考えられる。

3.2 旋回開始時間

旋回開始時間 T_{SS} は、液体の吹込みをはじめてから深水波型の旋回が発生するまでの時間と定義している。Fig. 8は、旋回開始時間 T_{SS} を縦軸に、液体流量 Q_L を横軸にとり、水単層での定常状態における旋回開始時間と、過渡状態における各初期液面の旋回開始時間を比較した結果である。まず過渡状態での流量域に着目すると、初期液面の高さが高いほど旋回に至る時間が短いという傾向が見られた。この理由としては以下のことが考えられる。旋回運動は噴流を中心に発生するのであるが、浴深が小さいと浴底部の抵抗を受けるために発生し辛くなる。従って初期液面が高いほど浴底部の影響が小さくなり、旋回開始時間が短くなるのであろう。また、容器内径が小さいほど旋回に至るまで

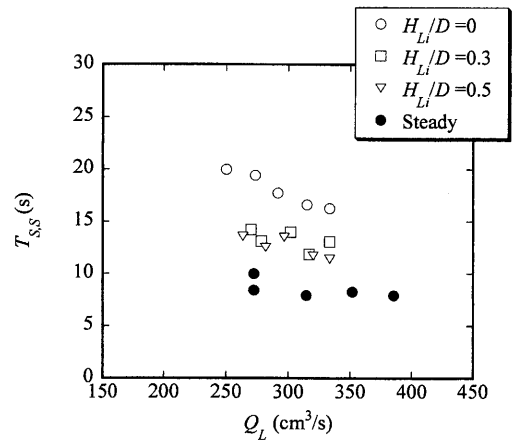


Fig. 9. Starting time of swirl motion, T_{SS} [single phase, $D=0.20$ m, $d_{nen}=13$ mm].

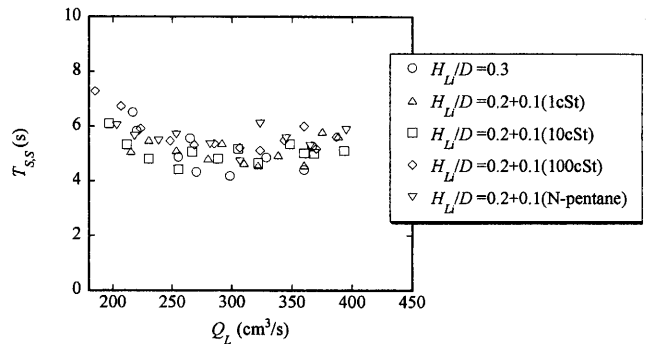


Fig. 10. Starting time of swirl motion, T_{SS} in transient period [two-phase, $D=0.13$ m, $d_{nen}=13$ mm].

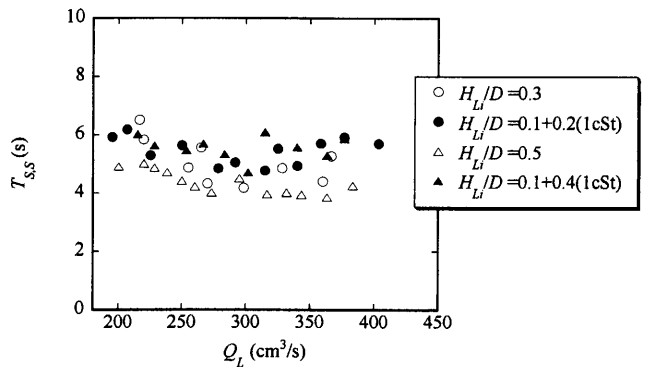


Fig. 11. Starting time of swirl motion, T_{SS} in transient period [two-phase, thick, $D=0.13$ m, $d_{nen}=13$ mm].

の時間が短いため $D=0.13$ m の結果では顕著な傾向は見られないが、比較として示す Fig. 9 の $D=0.20$ m の結果から流量が大きくなるほど開始時間が短くなる傾向が明瞭に見受けられる。

単層及び二層における旋回開始時間の比較を Fig.10 に示す。旋回に至るまでの時間がほぼ一定であったことから、旋回開始時間が影響を受けるのは浴深および流量のみであると考えられる。Fig.11は Fig. 7と同様の条件で得られた実験結果であり、旋回開始時間は、両層の合計の厚さが

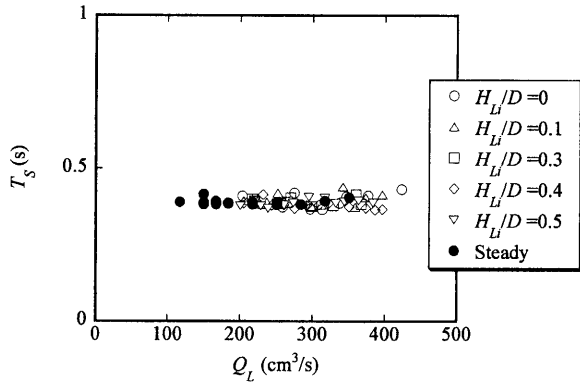


Fig. 12. Period of swirl motion, T_S [single phase, $D=0.13$ m, $d_{nen}=13$ mm].

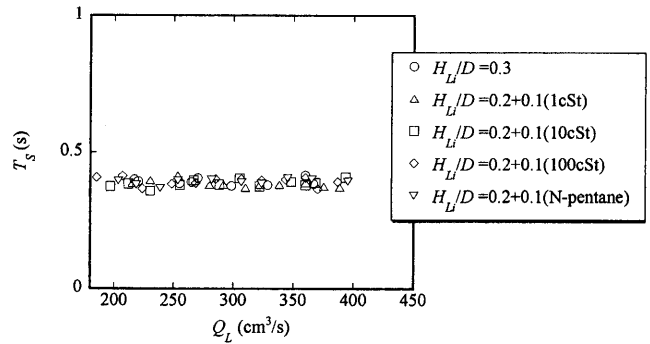


Fig. 14. Period of swirl motion, T_S , in transient period [two-phase, $D=0.13$ m, $d_{nen}=13$ mm].

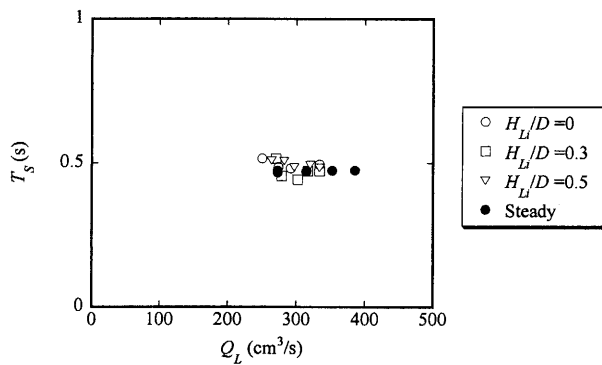


Fig. 13. Period of swirl motion, T_S [single phase, thick, $D=0.20$ m, $d_{nen}=13$ mm].

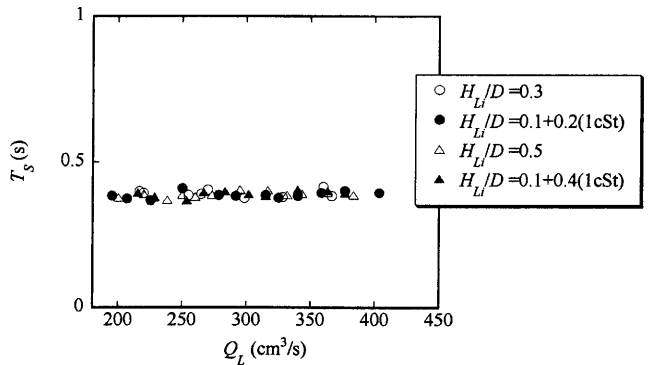


Fig. 15. Period of swirl motion, T_S , in transient period [two-phase, thick, $D=0.13$ m, $d_{nen}=13$ mm].

0.3の場合は水単層に比べ約10%、0.5の場合は約20%長くなっている。

3.3 旋回周期

旋回周期 T_S は、発生した波が6回転する時間から算出した。Fig.12に示すように、水単層における旋回周期は、初期液面の高さにかかわらずほとんど差が見られなかった。過去の研究において旋回周期と容器に外部から振動を加えた際に発生するスロッシング振動周期とが一致するという結果が得られている^{6,7)}。本研究の過渡状態における実験結果においても旋回周期は回転スロッシングの振動周期に一致することがFig.12から見出された。Fig.13に容器内径が0.20 mの結果を示しているが、こちらも各条件における旋回周期はほぼ一致した。

単層及び二層における旋回周期の比較をFig.14に示す。上層流体の物性値に関係なく同じ結果となっている。また、Fig.15にFig. 7と同様の条件で得られた旋回周期を示すが、これらの結果から両層が同じ周期で旋回する Type A の旋回運動に関しては、旋回周期は常に一定であることが分かる。

4. 結言

(1) 過渡状態における水単層の旋回運動に関して、初期液面が高いほど旋回発生領域は狭く、旋回開始時間は短くなったが、旋回周期に関してはどの条件においても同じ結果となり、回転スロッシングの振動周期に一致した。

(2) 水と異なる物性値をもつ液体を水の上に浮かべた二層での旋回運動の基本特性は両層が共に旋回しているため水単層の旋回周期とほとんど同じ結果となった。しかしエマルジョンにより阻害されるため、旋回開始時間は上層が厚くなるに従い遅くなる傾向がみられた。すなわち、二層での旋回液体噴流の基本特性は、上層が薄い場合においては吹き込まれる下層の液体のみでの実験である程度の予測が可能である。

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
- H_{Li} : 初期液面
- Q_L : 吹き込み水流量
- Ro_m : 修正ロスビー数
- $T_{S,S}$: 旋回開始時間
- T_S : 旋回周期
- ν_L : 動粘度

文 献

- 1) O.J.Ilegbusi, M.Iguchi and W.Wahnsiedler: *Mathematical and Physical Modeling of Materials Processing Operations*, Chapman-Hall/CRC, Boca Raton, (1999).
- 2) D.Iguchi, J.Yoshida and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), No. 6, 357.
- 3) D.Iguchi, M.Iguchi, Y.Sasaki and S.Yokoya: *ISIJ Int.*, **44** (2004), No. 8, 1451.
- 4) J.Yoshida, D.Iguchi and M.Iguchi, *ISIJ Int.*, **43** (2003), No. 12, 1890.
- 5) M.Iguchi, D.Iguchi and J.Yoshida: *Mater. Trans.*, **45** (2004), No. 5, 1764.
- 6) M.Iguchi, Y.Eguchi, A.Kawasaki, S.Kitamura and K.Naito: *ISIJ Int.*, **39** (1999), No. 5, 767.
- 7) A.Kimura and H.Ohashi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Pt. 1, **44** (1978), 3024.