

底吹き液体噴流によって攪拌される円筒浴の 旋回運動に及ぼすスラグの影響

井口 大亮*・吉田 仁*²・井口 学*

Effect of Top Slag on the Swirl Motion of Cylindrical Bath Agitated by Bottom Blowing Liquid Jet

Daisuke IGUCHI, Jin YOSHIDA and Manabu IGUCHI

Synopsis : Model experiments were carried out to understand the effects of slag on the swirl motions of a molten steel jet generated through a centered bottom nozzle. Two types of swirl motions were observed. One appeared when the silicone oil layer was thin, while the other appeared when the silicone oil layer was thick. The starting time, damping time, period and amplitude of the two swirl motions were investigated and correlation methods of them were proposed.

Key words : steelmaking; refining; slag; swirl motion; jet.

1. 緒言

鉄鋼精錬プロセスの低コスト化ならびに生産効率の向上が切望されている^{1,2)}。著者らはその方策の一つとして、従来のガス吹込み方式から液体吹込み方式への移行を前報において提案した^{3,4)}。特に、円筒形容器の底部から液体中に液体を噴流として吹き込んだ際に形成される液体噴流旋回流は、ガスを吹き込んだ場合と比較して、旋回が開始されるまでの時間が短く、必要とされる流量も小さくすることができ、攪拌効率の大幅な向上が期待できる有望な方法であると考えられる。しかしながら、実操業においては精錬の際、溶鋼の上にスラグが乗せられているため、単層ではなく、二相成層状態での旋回液体噴流の挙動を詳細に調査する必要がある。本研究では、スラグの厚さを大きく変化させたときに、旋回の形態とそれらが現れる領域がどのように変化するかを水モデル実験によって明らかにするとともに、旋回現象の基本特性⁵⁻¹¹⁾である旋回開始時間 $T_{s,s}$ 、旋回終了時間 $T_{s,d}$ 、周期 T_s 、振幅 A にスラグがどのような影響を及ぼすかについて調べた。

2. 実験装置と方法

Fig. 1に実験装置の概要を示す。水を溶鋼に、シリコンオイルをスラグ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、円筒容器内の旋回現象を横方向からビデオカメラで観察するときの画像の歪ができるだけ小さくなるように配慮した。ただし、図が繁

雑になるため正方形浴は描いていない。容器底部中心に塩化ビニル製の単孔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。水の層の厚さを H_{L2} 、シリコンオイルの層の厚さを H_{L1} と表示する。このとき H_{L1} と H_{L2} の和として表される浴深 H_L 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^{3,4)}。ここで、シリコンオイルが水の循環流に巻き込まれた場合、ノズルより発生する噴流は水-シリコンオイルの液々二相流となり、境界条件が変わってしまう。したがって、そのような実験条件においてはたとえ旋回が発生していたとしても、対象外としている。

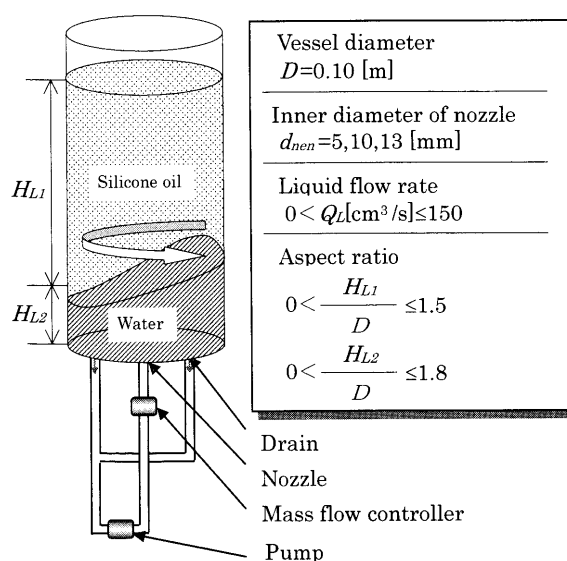


Fig. 1. Experimental apparatus.

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)

Table 1. Physical properties at 298K.

Liquid	Kinematic viscosity ν_L (mm ² /s, cSt)	Density ρ_L (kg/m ³)	Interfacial tension σ (mN/m)
Water	0.891	996	/
Silicone oil 1	1.0	818	52.7
Silicone oil 10	10	935	52.7

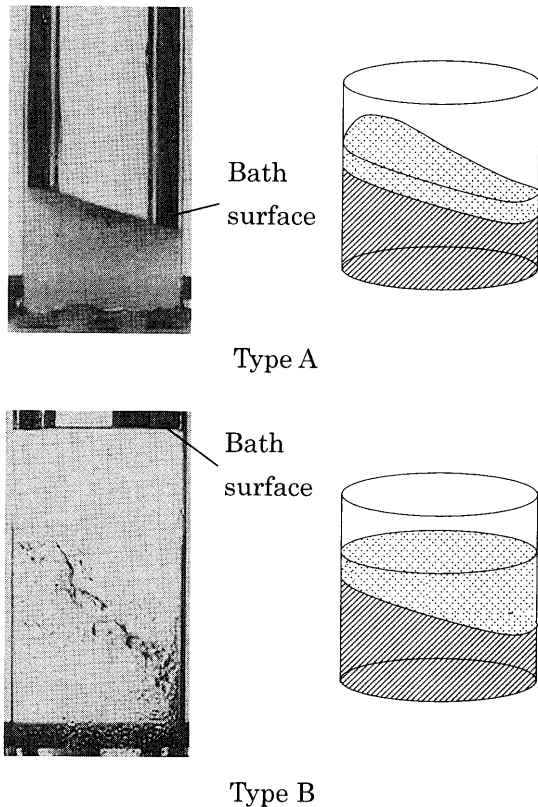


Fig. 2. Two types of swirl motions.

今回は、まず一連の研究の第一段階としてスラグが存在するときの旋回の形態とそれらが現れる領域の大まかな把握を目的としているので、円筒容器は内径 D が 0.100 m のもののみを用いた。ノズルは内径 d_{nen} が 5, 10, 13 mm の 3 種類のものを使用し、水流量は 0~150 cm³/s の範囲で設定した。両層の厚さ H_{L1} と H_{L2} を容器内径 D で除した値をアスペクト比と定義し、 H_{L1}/D を 0~1.5, H_{L2}/D を 0~1.8 の範囲で変化させた。Table 1 に使用した液体の 298K における物性値を示す。

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. 2 に示すように、水の層とシリコンオイルの層が共に旋回している Type A と、水とシリコンオイルの境界で旋回が現れ、シリコンオイルの表面の

運動に影響を与えない Type B の 2 種類の旋回現象が発生した。なお、これらの旋回現象は以前に報告されていないので、便宜的に Type A, B と名づけた。すなわち Type B ではシリコンオイル表面は静止しているとみなせる。後で詳しく示すように H_{L1} が小さいときに Type A の旋回が、 H_{L2} が大きいときに Type B の旋回が発生したが、これらはすべて深水波型^{12,13}の旋回である。Type A, Type B の旋回が現れる領域と、それらが発生するまでの時間は、これも後で示すように両層のアスペクト比および水流量が深く関与している。そこで 2 種類の旋回現象についてこれらの量を大きく変化させて発生領域および過渡特性を調査した。過渡特性を特徴づける旋回開始時間 $T_{s,s}$ は、液体の吹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 $T_{s,d}$ は吹込み停止後、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⁴。

なお、円筒容器内に密度の異なる二種類の液体を成層状態にし、容器に外部から振動を加えると旋回が発生するとの報告がある¹⁴。この場合の旋回は、二層がともに旋回する Type A の旋回に分類できる。その論文では旋回周波数を与える解析解が与えられているので、今回の実験データが整理可能かどうかを調べた。

4. 実験結果と考察

4.1 旋回発生領域

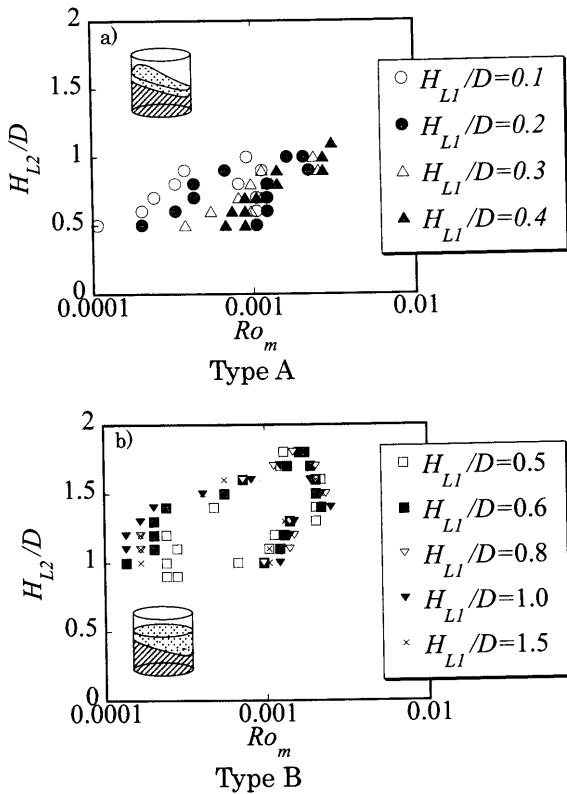
4.1.1 旋回発生領域に及ぼすシリコンオイルのアスペクト比の影響

(1) 1 cSt (1 mm²/s) のシリコンオイルの場合

上層に 1 cSt のシリコンオイルを用い、内径 5 mm のノズルから水を吹き込んだときに現れる旋回の発生領域の境界を Fig. 3 に示す。各記号で囲まれた領域で旋回が発生している。以下の Fig. 4~6 でも同様である。水の層のアスペクト比 H_{L2}/D が 0.5~1.0, シリコンオイル層のアスペクト比 H_{L1}/D が 0.1~0.4 の範囲で Type A の旋回が発生した (Fig. 3(a))。 H_{L1}/D が大きくなるほど旋回の現れる領域は狭くなり、しかも修正ロスビー数 Ro_m の大きい方向に移動した。ロスビー数とは、回転流体を取り扱う際に重要な役割を演じる無次元数であり、慣性力と遠心力の比によって表されるが、これを次式 (1) のように修正して用いるため修正ロスビー数と名づけている³。

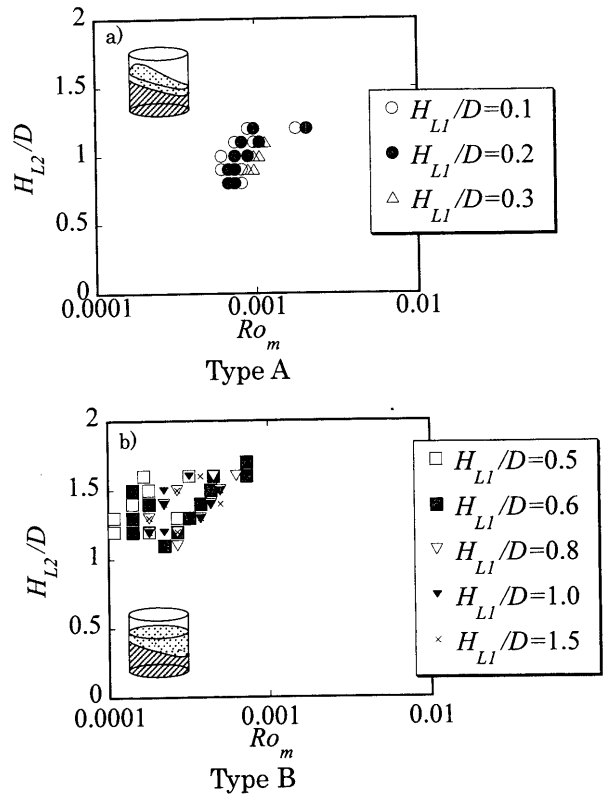
$$Ro_m = \frac{Q_L^2}{g d_{\text{nen}}^2 D^3} \dots\dots\dots (1)$$

ここで g は重力加速度である。Fig. 3(b) に示すように、シリコンオイルのアスペクト比 H_{L1}/D が 0.5~1.5 の範囲で Type B の旋回が発生した。この旋回は Type A と異なり、 H_{L1}/D の値にほとんど依存せず、同じ領域で発生している。すなわち、水のアスペクト比 H_{L2}/D は 0.9~1.5, 修正ロス



[Silicone oil=1cSt, $d_{nen}=5\text{mm}$]

Fig. 3. Effects of the aspect ratio of silicone oil layer on the boundary of region in which swirl motion of water jet appears (Silicone oil 1 cSt).



[Silicone oil=10cSt, $d_{nen}=5\text{mm}$]

Fig. 4. Effects of the aspect ratio of silicone oil layer on the boundary of region in which swirl motion of water jet appears (Silicone oil 10 cSt).

ピー数は0.0001から0.003の範囲である。Type Bの発生領域の下限とType Aの発生領域の上限はほぼ一致している。

(2) 10cSt (10 mm²/s)のシリコンオイルの場合

上層に10cStのシリコンオイルを用いた場合の、内径5mmのノズルから水を吹き込んだときに生じる旋回の発生領域の境界をFig. 4に示す。Type Aの場合、1cStのシリコンオイルに比べて、旋回は非常に狭い領域で発生した (Fig. 4(a))。すなわち、シリコンオイルのアスペクト比 H_{L1}/D は0.1~0.3、修正ロスビー数 Ro_m は0.0006~0.003、水の層のアスペクト比である H_{L2}/D は0.8~1.3となっている。Fig. 4(b)に示すように、シリコンオイル層のアスペクト比 H_{L1}/D が0.5~1.5、水の層のアスペクト比 H_{L2}/D が1.1~1.6、修正ロスビー数が0.0001~0.0008の範囲でType Bの旋回が発生した。発生領域は H_{L1}/D にほとんど依存せず、Type Aと同様にシリコンオイルの動粘度が大きくなり、水との密度差が小さくなると発生領域は狭くなった。ただし、シリコンオイルの動粘度と密度差のいずれがより大きく関与しているのかについては今後の検討課題としたい。Type Bの発生領域の下限とType Aの発生領域の上限とは、1cStのシリコンオイルの場合とは異なり、一致しない。

4.1.2 旋回発生領域に及ぼすノズル内径の影響

Fig. 5は、縦軸に水の層のアスペクト比 H_{L2}/D を、横軸

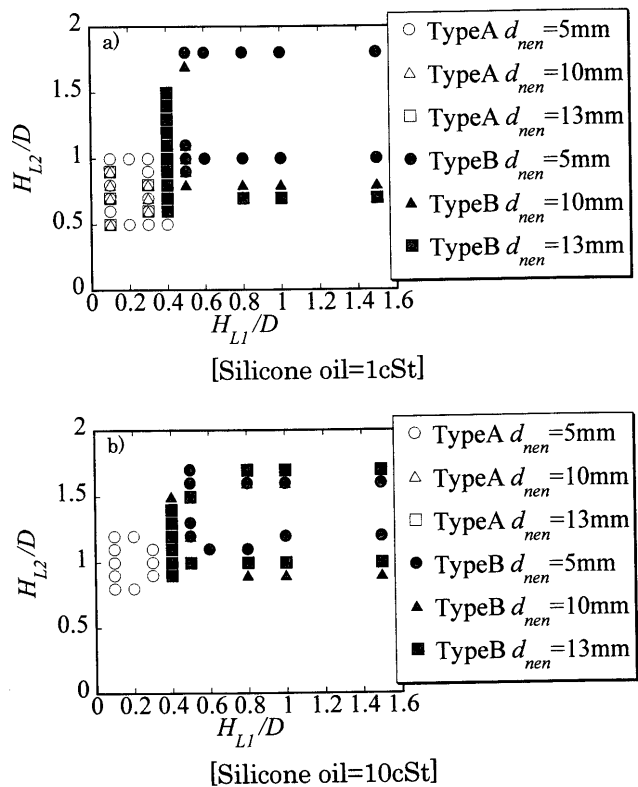


Fig. 5. Effects of the nozzle diameter on the boundary of region in which swirl motion of water jet appears.

にシリコンオイルのアスペクト比 H_{L1}/D を採って旋回発生領域を示している。Fig. 5(a)より、上層を1cStのシリコンオイルとした場合、白抜き記号で示したType Aの発生領域は d_{nen} が大きくなるにつれて狭くなった。黒抜き記号で示されているType Bの発生する領域は H_{L2}/D が約1.8のところでは黒丸(●)のみがプロットされているが、黒三角(▲)と黒四角(■)も同じところに重なり合っている点に留意されたい。Type Bの発生領域は d_{nen} が大きくなるにつれて広がった。

Fig. 5(b)より、10cStのシリコンオイルを上層とした場合、Type Aは $d_{nen}=5\text{mm}$ のときにのみ現れた。Type Bはいずれのノズルの場合にも現れたが、ノズル内径にはほとんど依存しない。

4.1.3 修正重力による旋回発生領域の比較

(1) 修正重力の導入

Type Bの旋回の場合、空気中で水単層での旋回を行うのと同じように、シリコンオイル中で水の旋回が行われているとみなすことが出来る。したがって水とシリコンオイルの境界にかかる重力を補正すれば現象が系統的に整理できるのではないかと考え、次式で定義される修正重力 g' を導入した¹⁵⁾。

$$g' = g \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで ρ_2 は水の密度、 ρ_1 はシリコンオイルの密度である。

(2) 旋回発生領域

Fig. 6(a)は、シリコンオイル層のアスペクト比 H_{L1}/D を0.2、ノズル内径 d_{nen} を5mmとしたときのType Aの旋回の発生領域を示している。比較のため同条件での水単層時の旋回発生領域も示している。横軸はここで新たに導入した修正ロスビー数 Ro'_m であり、次式で定義される。

$$Ro'_m = \frac{Q_L^2}{g' d_{nen}^2 D^3} \dots\dots\dots (3)$$

上のシリコンオイル層の動粘度を上げていく(密度差は小さくなる)と、旋回発生領域は図中の右側、すなわち Ro'_m の大きい方向へ移動し、またその領域は狭くなった。これよりも大きな動粘度ではType Aの旋回は発生しなくなると考えられる。このように、Type Aの旋回発生領域は密度差を考慮に入れている Ro'_m では整理できないことから、Type Aの旋回の発生領域には密度差 $(\rho_2 - \rho_1)$ よりもシリコンオイルの動粘度が関与していると考えられる。

Fig. 6(b)は、シリコンオイル層のアスペクト比 H_{L1}/D を1.0、ノズル内径 d_{nen} を5mmとしたときに現れるType Bの旋回の発生領域を示している。1cStのシリコンオイルをのせた場合の旋回発生領域は水単層時の旋回発生領域に一部重なっている。10cStのシリコンオイルをのせた場合、旋回発生領域は修正ロスビー数 Ro'_m の大きい方向へ移動

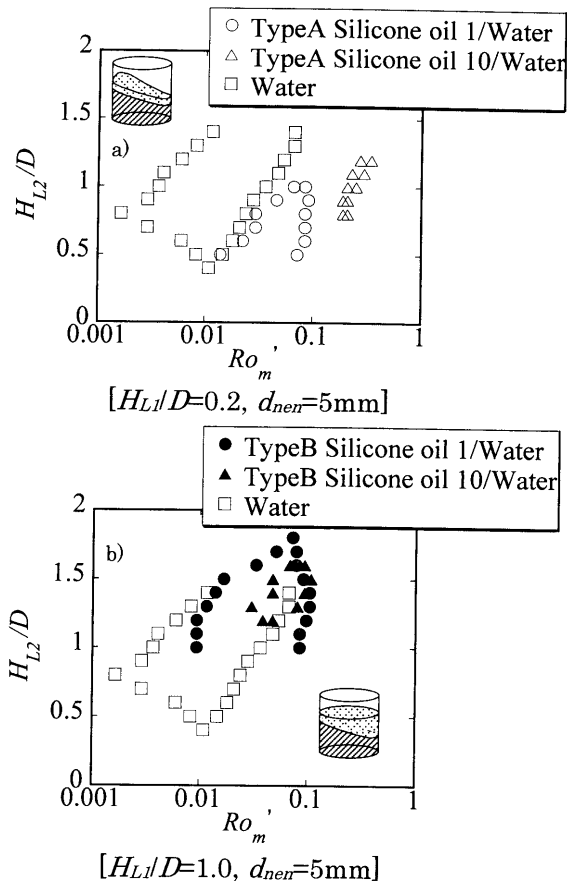


Fig. 6. Boundary of region in which swirl motion of water jet appears.

し、発生領域は狭くなっているが、水単層時の旋回発生領域に重なっている。この場合には密度差 $(\rho_2 - \rho_1)$ とシリコンオイルの動粘度 ν_1 が同程度に関与しているように思われる。なお2種類のシリコンオイルと水との間の界面張力は等しいので、その影響をみることはできない。Type AとType Bの旋回発生領域の整理法については、さらに実験結果を蓄積したうえで考察したい。

4.2 旋回開始時間

Fig. 7は、旋回開始時間の測定結果を水単層の場合の旋回液体噴流の実験式と比較したものである。水単層の旋回開始時間 $T_{s,s}$ は式(4)で近似できる⁴⁾。

$$T_{s,s}(g/D)^{0.5} = 0.253 [T_c(g/D)^{0.5}]^{1.75} \dots\dots\dots (4)$$

$$T_c = \frac{V_L}{Q_{Ls}} = \frac{\pi D^2 d_{nen}}{1.2 Q_L} \dots\dots\dots (5)$$

$$V_L = \pi D^2 H_{L2} / 4 \dots\dots\dots (6)$$

$$Q_{Ls} = 0.3 Q_L H_{L2} / d_{nen} \dots\dots\dots (7)$$

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。しかしType Aの旋回においては、水の層と、シリコンオイルの層が一緒になって旋回してい

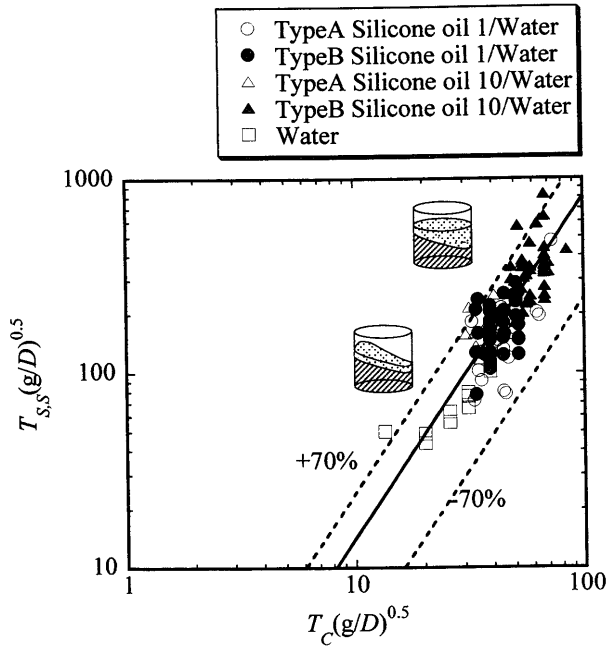


Fig. 7. Correlation of starting time of swirl motion.

るため、Type Aの旋回に関してはこの点を考慮に入れ、式(6)の代わりに次式(8)で計算した。

$$V_L = \pi D^2(H_{L1} + H_{L2})/4 \dots \dots \dots (8)$$

Type A, Type Bの旋回開始時間はともに水単層での旋回開始時間の実験式(4)によって±70%の偏差で近似できた。

4.3 旋回終了時間

水単層の場合の旋回終了時間 $T_{s,d}$ は次式(9)によって得られる⁴⁾。

$$T_{s,d}(g/D)^{1/2} = 500 \dots \dots \dots (9)$$

修正重力が適用できると仮定し、次式を導入する。

$$T_{s,d}(g'/D)^{1/2} = 500 \dots \dots \dots (10)$$

直径 $D=0.100$ mの本実験容器を用いて得られた水単層の場合の測定値(□)はFig. 8に示すように、式(9)にほぼ一致しているが、水の上にシリコンオイルを置いた場合の測定値はすべて式(9)の計算値よりも小さくなっている。修正重力を用いた式(10)との比較も行ったが、Fig. 9でみられるように測定値は式(10)で近似できない。したがって、シリコンオイルの存在する場合の旋回終了時間 $T_{s,d}$ はシリコンオイルの動粘度の影響を強く受ける。 $T_{s,d}$ の系統的整理法についても今後の課題としたい。

4.4 旋回周期

4.4.1 回転スロッシングに対する旋回周期の理論式との比較

容器に外部から振動を加えた際の浴の旋回周期の理論式(11), (12)¹⁴⁾と今回の実験データとの比較を行った。

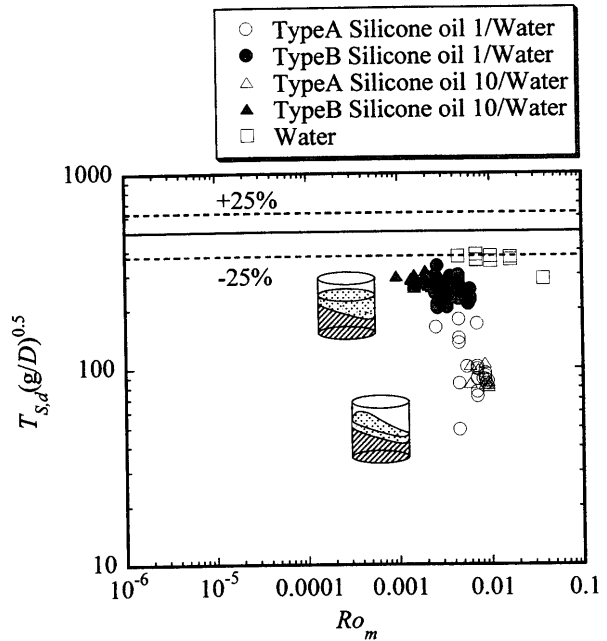


Fig. 8. Relationship between damping time of swirl motion and modified Rossby number.

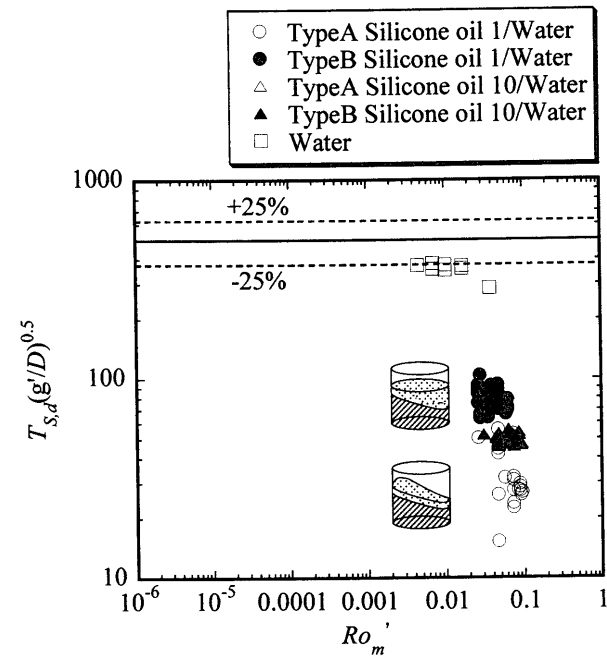


Fig. 9. Relationship between damping time of swirl motion and modified Rossby number based on modified gravity.

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

$$\omega_i^2 = (g\varepsilon_i/R)(\tanh \beta_{1i} + \alpha \tanh \beta_{2i}) / (1 + \alpha \tanh \beta_{2i} \tanh \beta_{1i}) \dots \dots \dots (12)$$

ここで ε_i はベッセル関数 $J'_1(x)$ の i 番目の零点、 R は容器半径 ($D/2$) であり、 $\alpha, \beta_{1i}, \beta_{2i}$ はそれぞれ次式で表される。

$$\alpha = \rho_1/\rho_2 \dots \dots \dots (13)$$

$$\beta_{1i} = \varepsilon_i H_{L1}/R \dots \dots \dots (14)$$

$$\beta_{2i} = \varepsilon_i H_{L2} / R \dots \dots \dots (15)$$

ここで ε_1 は 1.8412 である。Type A の旋回周期 T_s の測定値は式(11), (12)で精度よく近似できたが、Type B の測定値は近似できなかった。本実験条件下では、式(12)は十分な精度(-5%~0%)で式(16)によって近似できる。

$$\omega_1 = [(2g\varepsilon_1/D) \cdot \tanh(2\varepsilon_1 H_L/D)]^{1/2} \dots \dots \dots (16)$$

$$H_L = H_{L1} + H_{L2} \dots \dots \dots (17)$$

式(16)は、水単層における深水波型旋回スロッシングの旋回周期の理論式である⁶⁾。旋回周期 T_s の測定結果を深水波型旋回周期の理論式と比較して Fig.10 に示す。Type A および水単層における旋回周期は式(11), (16)から計算される値に一致した。したがって、Type A は水とシリコンオイルが一体となって旋回しているとみなすことによって旋回周期を十分な精度で予測できる。しかし、Type B は式(11), (16)では予測できないことが明らかである。

4.4.2 修正重力による旋回周期の整理

Fig.11 に、修正重力 g' を用いて整理した旋回周期 T_s の測定結果を示す。Type B および水単層で得られた測定値は修正重力を導入して提案した次式(18)で近似することができた。

$$\omega_1 = [(2g'\varepsilon_1/D) \cdot \tanh(2\varepsilon_1 H_L/D)]^{1/2} \dots \dots \dots (18)$$

したがって、水と一体となってシリコンオイルが旋回する Type A では旋回周期は理論式(16)で、水とシリコンオイルの境界で旋回し、シリコンオイルの表面に影響を及ぼさない Type B の旋回周期は修正重力を導入した式(18)で近似することができる。

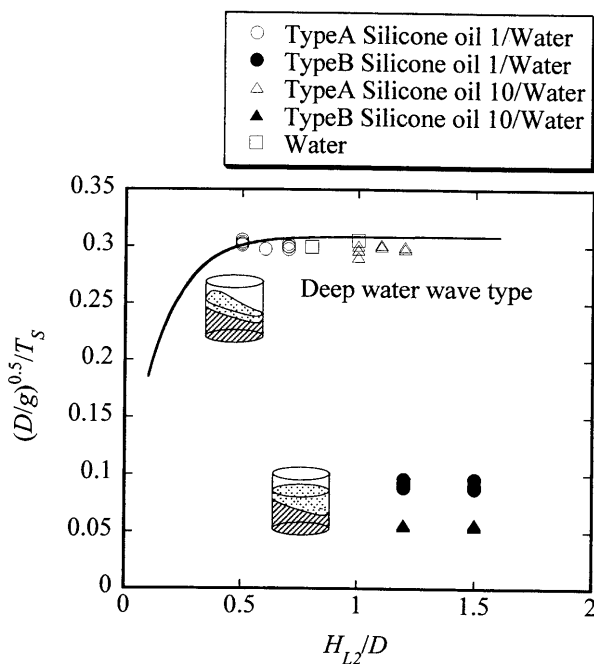


Fig. 10. Correlation of swirl period of water jet.

4.5 振幅

Fig.12 において、振幅の測定結果を水単層の旋回液体噴流の実験式(19)と比較した³⁾。

$$A/D = 3.5 Ro_m^{0.5} \dots \dots \dots (19)$$

Type A のとき、測定値は実験式をやや下回っているが、これは発生したシリコンオイル滴により浴表面の上下運動が阻害されるためであり、滴の発生量が少なくなれば、式

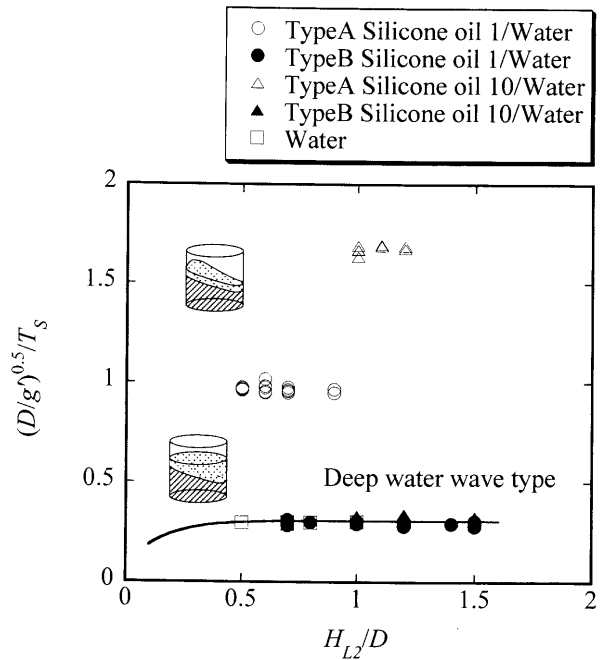


Fig. 11. Correlation of swirl period of water jet based on modified gravity.

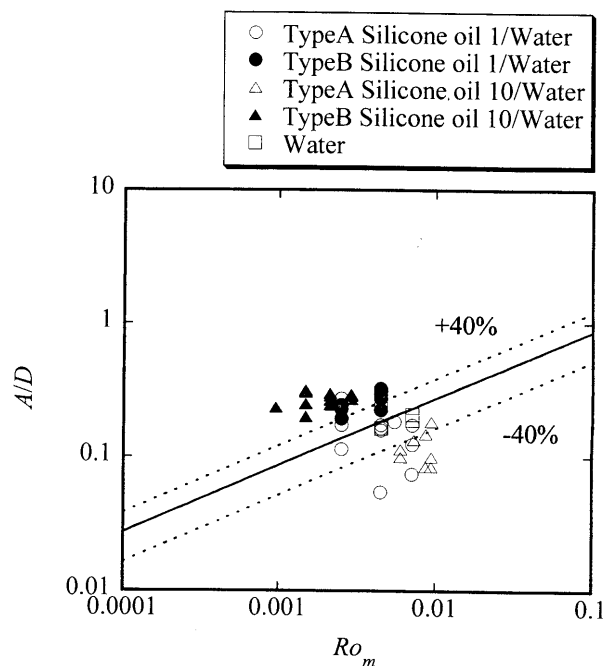


Fig. 12. Relationship between amplitude and modified Rossby number.

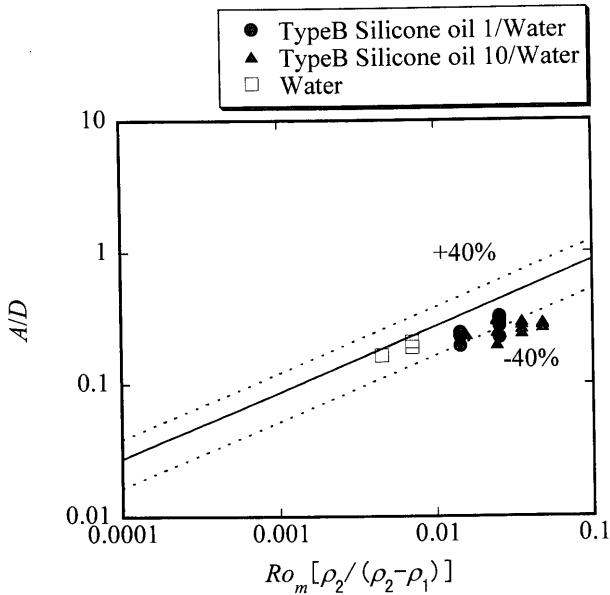


Fig. 13. Correlation of amplitude for type B.

(19)が適用できるであろう。Type Bのときには実験式を上回っている。以下、Type Bの整理法について考える。

式(19)を変形すると次式が得られる。

$$A/[v_{sp}^2/(2g)] = 5.5(D/d_{nen})(gd/v_{sp}^2)^{0.5} \dots\dots\dots(20)$$

$$v_{sp} = Q_L/(\pi D^2/4) \dots\dots\dots(21)$$

ここで v_{sp} は空塔速度である。 $v_{sp}^2/(2g)$ は、水の上に空気がある場合に、水噴流が液表面を持ち上げる高さの尺度を与える。 $v_{sp}^2/(gd)$ はフルード数である。水の上にシリコンオイルがある場合には、前報¹⁶⁾の結果を参考にすることによって、 $v_{sp}^2/(2g)$ の代わりに $v_{sp}^2/[2g\rho_2/(\rho_2-\rho_1)]$ を上記尺度として用いればよいことが分かる。 $v_{sp}^2/(2g)$ の代わりに、この量を式(20)に代入して変形すると次式が得られる。

$$A/D = 3.5Ro_m^{0.5}[\rho_2/(\rho_2-\rho_1)]^{0.5} \dots\dots\dots(22)$$

A/D を $Ro_m[\rho_2/(\rho_2-\rho_1)]$ に対して Fig.13 に示す。測定値が式(22)よりもやや小さい値を示すのは、やはりシリコンオイル滴により界面の上下運動が阻害されたためである。したがって、Type Bの場合にも滴の発生量が少なくなれば、振幅は式(22)で近似できると考えられる。

なお、式(19)を修正重力を用いて変形すると次式が得られる。

$$A/D = 3.5Ro_m'^{0.5} \dots\dots\dots(23)$$

Fig.14 に示すように、Type Bの測定値はもちろんのこと、Type Aの測定値もこの式では整理出来ない。

4.6 修正重力導入の妥当性

本研究で用いた水とシリコンオイルの密度差が小さいので、旋回発生領域とそれらの旋回特性のうち旋回周期のみについては修正重力の導入が妥当であることが示された

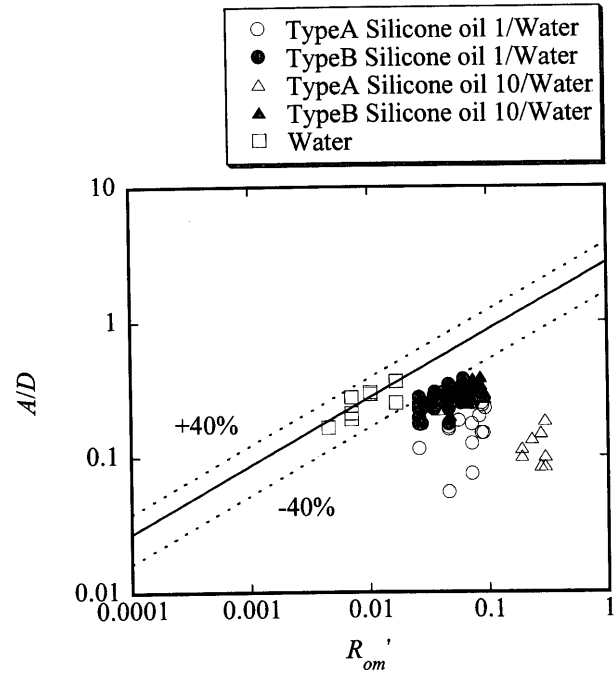


Fig. 14. Relationship between amplitude and modified Rossby number based on modified gravity.

が、他の項目については明確に結論付けることはできない。今後、密度差を大きく変化させて実験を行い、この点について検討したい。

5. 結論

本研究では、水の上にシリコンオイル層がある場合について、旋回運動の発生領域、開始時間と終了時間などの過渡特性ならびに旋回周期と振幅を調べた。得られた主な成果をまとめると次のようになる。

(1) 旋回の種類として、水の層と共にシリコンオイルの層も旋回する Type A、水の層とシリコンオイルの層の境界で旋回し、シリコンオイルの表面に影響を及ぼさない Type B が観察された。

(2) シリコンオイル層のアスペクト比 H_{L1}/D が 0.1~0.4 の範囲で Type A の旋回が、0.5~1.5 の範囲で Type B の旋回が発生した。2種類の旋回はともにシリコンオイルの物性値の影響を大きく受け、動粘度が大きくなる（密度差は小さくなる）ほど旋回発生領域は狭くなっていく。また、Type A に関しては密度差が小さくなるほど界面がエマルジョン化しやすくなるため、ノズル内径 d_{nen} が小さく、噴流の慣性力が強くないと旋回は発生しなくなった。

(3) 旋回開始時間は、Type A、Type B の旋回ともに水単層における旋回開始時間の実験式(4)で整理できた。

(4) 旋回終了時間に関しては、従来の実験式および修正重力の適用によっても整理が困難なため、その系統的な整理法は今後の検討課題としたい。

(5) 旋回周期は、Type A の旋回では式(12)あるいは水

単層における旋回周期の理論式(16)によって、Type Bの旋回では修正重力を適用して導いた式(18)で近似できた。

(6) Type Aの旋回の振幅は、発生したシリコンオイル滴により上下運動が阻害されるため水単層における実験式(19)を少し下回った。Type Bの旋回の振幅も同様な理由で式(22)を少し下回った。滴の発生量が少なくなれば、両式が適用できると考えられる。

記号

A	: 振幅
D	: 容器内径
d_{nen}	: 水吹込みノズルの内径
g	: 重力加速度
g'	: 修正した重力加速度
H_{L1}	: シリコンオイル層の浴深
H_{L2}	: 水の層の浴深
Q_L	: 吹込み水流量
Q_{Ls}	: 噴流によって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
$T_{s,s}$: 旋回開始時間
T_s	: 旋回周期
V_L	: 浴内の液体積

文献

- 1) K.Marukawa, S.Hara and M.Sano: *ISIJ Int.*, **41** (2001), S36.
- 2) 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).
- 3) J.Yoshida, D.Iguchi, M.Shitara and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 1890.
- 4) D.Iguchi, J.Yoshida and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 357.
- 5) Y.Kato, K.Nakanishi, T.Nozaiki, K.Suzuki and T.Emi: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 1604.
- 6) M.Iguchi, S.Hosohara, T.Koga, R.Yamaguchi and Z.Morita: *ISIJ Int.*, **33** (1993), 1037.
- 7) Y.Xie and F.Oeters: *Steel Res.*, **63** (1992), 227.
- 8) M.P.Schwartz: *Chem. Eng. Sci.*, **45** (1990), 1765.
- 9) M.Iguchi, Y.Itoh and Z.Morita: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 189.
- 10) G.G.K.Murthy, S.P.Mehrorra and A.Ghosh: *Metall. Trans. B*, **19** (1988), 839.
- 11) M.Iguchi, Y.Eguchi, A.Kawasaki, S.Kitamura and K.Naito: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 767.
- 12) A.Kimura and H.Ohashi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **44** (1978), 3024.
- 13) A.Kimura and H.Ohashi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **44** (1978), 3446.
- 14) Y.Tang, D.C.Ma and Y.W.Chang: *ASME, PVP, Fluid-Structure and Sloshing*, **223** (1991), 97.
- 15) Handbook of Fluid Mechanics, 2nd ed, ed. by Jpn. Soc. Fluid Mechanics, Maruzen, Tokyo, (1998), 712.
- 16) S.Takashima and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 217.