

連続鋳造モールド内浸漬ノズル吐出口近傍における モールドパウダー巻き込みに関する水モデル実験

吉田 仁*・井口 学*・横谷 真一郎*²

Water Model Experiment on Mold Powder Entrapment around the Exit of Immersion Nozzle
in Continuous Casting Mold

Jin YOSHIDA, Manabu IGUCHI and Shin-ichiro YOKOYA

Synopsis : The problem of mold powder entrapment in molten steel in a continuous casting mold continues to be a serious obstacle to the producing of clean steel. Four types of the mechanisms of mold powder entrapment have been proposed on the basis of water model experiments. These mechanisms, however, cannot fully explain the size distribution of mold powder in the finished steel products. In this study, another type of entrapment mechanism was proposed. Namely, when the molten steel flow crosses the immersion nozzle, the pressure on the forward stagnation point increases, while that on the rear stagnation point decreases. As a result, the mold powder moves downwards along the rear surface of the immersion nozzle. If the mold powder reaches one of the ports of the immersion nozzle, it is sucked into the discharging molten steel flow, which causes significant mold powder entrapment. In order to ascertain the validity of this proposed mechanism, water model experiments were carried out using various kinds of silicone oils and salt water. The results of the model experiments revealed the possibility that the mold powder entrapment based on the mechanism proposed in this study takes place in the real continuous casting mold.

Key words : continuous casting; slab caster; mold powder entrapment; immersion nozzle; particle imaging velocimetry; water model experiment.

1. 緒言

連続鋳造プロセスにおいて、鋳型内に巻き込まれたモールドパウダーは製品欠陥の主要な原因となることが知られているが、実機を用いてモールドパウダーの巻き込み現象を調査することは非常に難しく、多くの研究者は水と種々の動粘度のシリコンオイルを用いてモデル実験を行っている。それらの結果をまとめると、主な巻き込み機構はFig. 1の(1)~(4)に示すように分類される。各々の巻き込み機構の詳細について以下に述べる。

(1) 定常的な反転流による巻き込み

Guptaら¹⁾は、浸漬ノズルが鋳型の正確な中心位置に設置されていないために、左右非対象の溶鋼流が発生すると報告している。このような定常的な偏流は、浸漬ノズル出口への介在物の付着によっても生じる。Fig. 1-(1)は、速度が大きい側の溶鋼流の反転に起因するせん断力によるメニスカス部でのモールドパウダーの削り込みを表している^{2,3)}。モールドパウダーが巻き込まれるときの溶鋼の臨界速度に関する予測式は浅井⁴⁾によって提案されている。なお、浸漬ノズルから放出された小さな気泡は溶鋼流により鋳型の短辺まで到達し、上昇することにより反転流の流速を加速する⁵⁾。

(2) 非定常的な反転流による巻き込み

Fig. 1-(1)の巻き込み現象は鋳型内の流れが定常のときに発生するが、鋳型内の溶鋼流は通常非定常である。Wangら⁶⁾は、浸漬ノズル内壁に付着したカーテン状のアルゴンガスが時間の経過とともに伸縮し、浸漬ノズルからの溶鋼流を非定常状態にすると述べている。鋳型内に非定常流が生じると、溶鋼とモールドパウダーの界面に瞬時に大きなせん断力が働く。著者ら⁷⁾は、せん断流の流速が臨界速度を超えると、Fig. 1-(2)に示すようにケルビン-ヘルムホルツ型不安定現象が発生して、モールドパウダーが溶鋼中に巻き込まれることを明らかにした。

(3) カルマン渦による巻き込み

Fig. 1-(3)は、浸漬ノズル周辺で発生するカルマン渦によってモールドパウダーが巻き込まれる場合を表している⁸⁻¹¹⁾。カルマン渦は、溶鋼の周期的な偏流や、浸漬ノズル吐出口の片方が介在物付着のために閉鎖されて溶鋼の片流れが発生したときに浸漬ノズル周辺で発生する。

(4) アルゴンガス気泡のパウダー層への衝突による巻き込み

浸漬ノズル内部に吹き込まれたアルゴンガスは、溶鋼と浸漬ノズルの濡れ性が悪いために浸漬ノズル内壁にカーテン状に付着して⁶⁾、 Al_2O_3 の浸漬ノズル内壁への付着を防ぐ機能を有している^{12,13)}。Fig. 1-(4)は、ノズルを出たア

平成13年3月19日受付 平成13年5月18日受理 (Received on March 19, 2001; Accepted on May 18, 2001)

* 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 日本工業大学 (Nippon Institute of Technology)

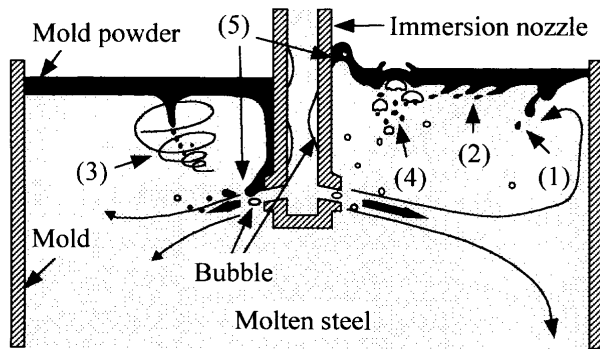


Fig. 1. Schematic of mold powder entrapment.

ルゴンガス気泡の上昇が原因で溶鋼とモールドパウダーの界面に擾乱が生じ、モールドパウダーが巻き込まれる場合を示している。このとき、浸漬ノズル吐出口から連続的に気泡が上昇する場合¹⁴⁾と巨大な単一気泡が溶鋼とモールドパウダーの界面で崩壊する場合¹⁵⁾の2種類がある。

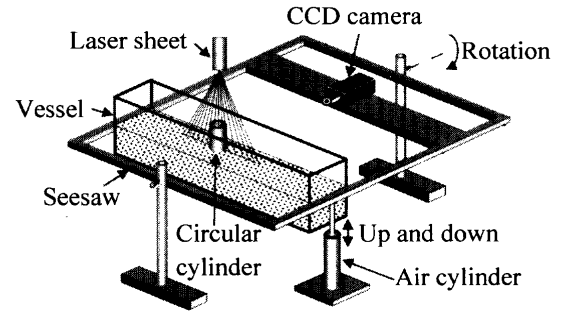
(5) 浸漬ノズル表面での圧力差による巻き込み

以上の4種類が現在までに考えられているモールドパウダーの巻き込み機構であるが、いずれが主たる巻き込み原因であるのかについての明確な判断はなされていない。とくに、どのモデルでも巻き込まれたモールドパウダーが分裂して非常に小さな径になる事実¹⁶⁾を十分説明できない。

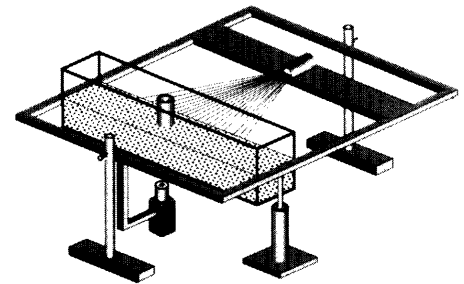
本研究において、筆者らは別のタイプの巻き込み機構を提案する。溶鋼の片流れや周期的な遍流が発生して溶鋼流が浸漬ノズルを横切るとき、浸漬ノズル前方のよどみ点では圧力が増加し、後方のよどみ点では圧力が減少する。したがって、浸漬ノズル前方では溶鋼が浸漬ノズル表面に沿って上昇し、逆に後方ではモールドパウダーが浸漬ノズル表面に沿って降下する。降下したモールドパウダーは、浸漬ノズル吐出口まで達すると、Fig. 1-(5)に示すように高速の溶鋼流によって細かく分断されて溶鋼中へ巻き込まれる。したがって、このタイプの巻き込みが実際に起こっているのであれば、従来鋼片の観察から得られた知見すなわち溶鋼中には大小さまざまな寸法のパウダーが存在するという事実¹⁶⁾を矛盾なく説明できる。この巻き込み現象を調査するために、本研究では食塩水と種々の動粘度のシリコンオイルを用いてモデル実験を行った。液体の速度は粒子画像流速計(PIV)¹⁷⁾を用いて測定した。PIVは、本研究で扱うような過渡的な流れの速度を広い範囲にわたって測定する場合に最適な流速計である。

2. 実験装置と方法

実験装置の概要をFig. 2に示す。容器は、実機の1/2サイズの幅 $W=1.000$ m, 厚み $B=0.100$ m, 長さ $L=0.200$ mの透明アクリル製容器である。容器の中心には、浸漬ノズルに見たてたアルミ製円柱を容器上壁と垂直に設置した。アル



(a) Visualization of longitudinal section of vessel



(b) Visualization of transverse section of vessel

Fig. 2. Schematic of experimental apparatus.

ミ製円柱の直径 D は、 $D=0.010, 0.020, 0.030, 0.040$ mの4種類である。円柱による流路のブロックageファクター D/B は $0.1\sim 0.4$ となる。容器中には、溶鋼相当層として食塩水を、溶融モールドパウダー相当層として種々の動粘度のシリコンオイルを層の厚さ比が1となるように満たした。円柱と食塩水との接触角は 60 deg. であり、したがって両者の濡れ性は良い。実験で使用した液体の温度は 298 K である。物性値をTable 1に示す。ここで添字1, 2はそれぞれ上層と下層の液体を表す。またSilicone oil 2は、動粘度が $2.0\text{ mm}^2/\text{s}$ のシリコンオイルを表しており、他の液体についても同意である。液体中には、PIVを用いた画像解析のために粒径 $75\sim 150\text{ }\mu\text{m}$ のトレーサー粒子を混入してある。食塩水中に分散させた粒子はスチレン-ジビニルベンゼン共重合体製であり、シリコンオイル中に分散させた粒子はポリエチレン製である。粒子の密度は液体と同密度であるが、今回Silicone oil 2と同密度のトレーサー粒子が見当たらなかったために、Silicone oil 2のみに対してはトレーサー粒子を混入していない。

トレーサー粒子の動きを可視化するために、幅 2.0 mm のレーザーシート光を用いて容器の縦横断面を照射した。容器の横断面を可視化するとき、レーザーがアルミ製円柱に遮られるためにアルミ製円柱背後の粒子を可視化することができない。そこでアルミ製円柱背後側の容器の外壁に鏡を設置して、レーザー光を反射させることによりアルミ製円柱周囲の液体の流れを可視化した。

トレーサー粒子が液体中に中立浮遊状態で停止している

Table 1. Physical properties of liquids (298K).

Liquid	Kinematic viscosity ν_1, ν_2 (mm ² /s, cSt)	Density ρ_1, ρ_2 (kg/m ³)	Interfacial tension σ_{12} (mN/m)
Salt water	1.0	1013	
Silicone oil 2	2.0	873	52.7
Silicone oil 10	10	935	52.7
Silicone oil 50	50	960	52.7
Silicone oil 100	100	965	53.0

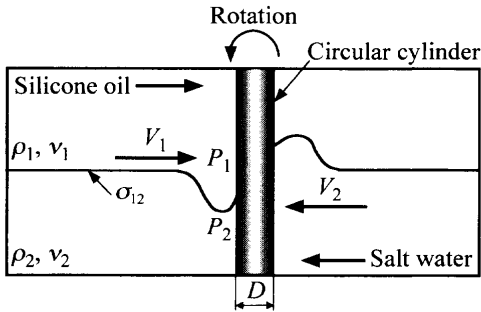


Fig. 3. Symbols used in this study.

ことを確認したあと、容器を水平から傾斜角度 $\theta=10, 20 \text{ deg.}$ 、回転速度 $\Omega_r=2.7, 3.8, 18.7 \text{ deg./s}$ でエアシリンダーを用いて傾斜後、停止させた。可視化された粒子を撮影するために、CCDカメラ(30 frames/s)を用いた。CCDカメラの有効画素数は 768×493 であるが、CCDカメラで出力されたアナログ信号は画像ボードでAD変換する際に縦方向の走査線768本分のうち646本のみ変換して取り込み、さらに処理を要するため、実際の画素数は 512×480 である。液体の速度は撮影画像を基にPIVを用いて測定した。Fig. 3は容器縦断面の模式図であり、あわせて本研究で用いた記号を記入している。すでにTable 1に関して述べたように、 ρ は液体の密度、 ν は液体の動粘度、 σ は二液の界面張力、 P は圧力、 V は液体の速度、添字の1はシリコンオイル層、2は食塩水層を表している。

3. 実験結果と考察

3.1 円柱周囲における二液界面の変形

Fig. 4は、容器側面から観察した円柱周囲における二液界面の変形を表している。円柱周囲における圧力差によって二液界面が上下に変形したあと、円柱の両側でシリコンオイルの激しい巻き込み現象が観察された。円柱の右側で食塩水が上方に移動することによって巻き込まれたシリコンオイルは浮力によって浮上し、シリコンオイル層に戻る。この巻き込み現象は左側で起こる現象に比べると、それほど重要ではない。Fig. 5は、容器横断面での二液界面から 0.010 m 下方における食塩水の速度ベクトルの一例である。円柱後方において発生した双子渦はカルマン渦へ

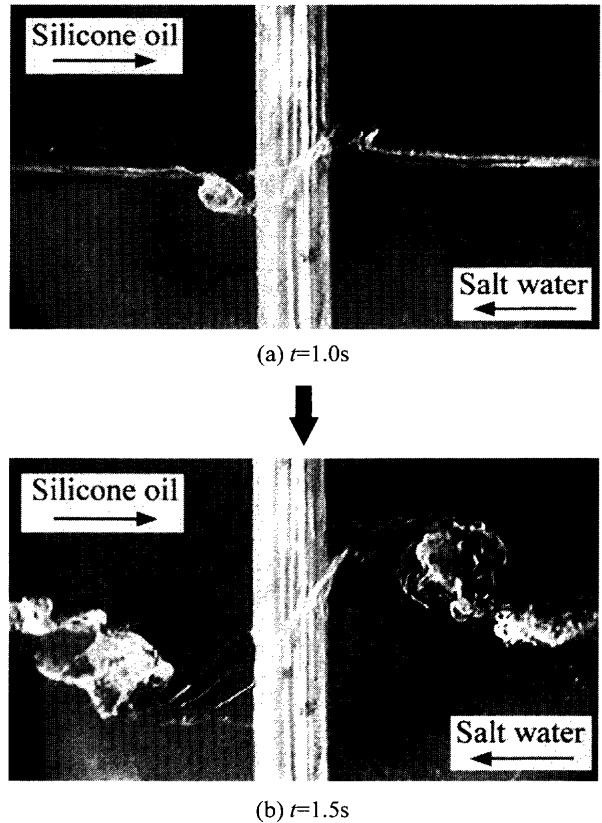


Fig. 4. Deformation of interface around cylinder [Silicone oil 2, $D=0.03 \text{ m}$, $\theta=10 \text{ deg.}$, $\Omega_r=18.7 \text{ deg./s}$].

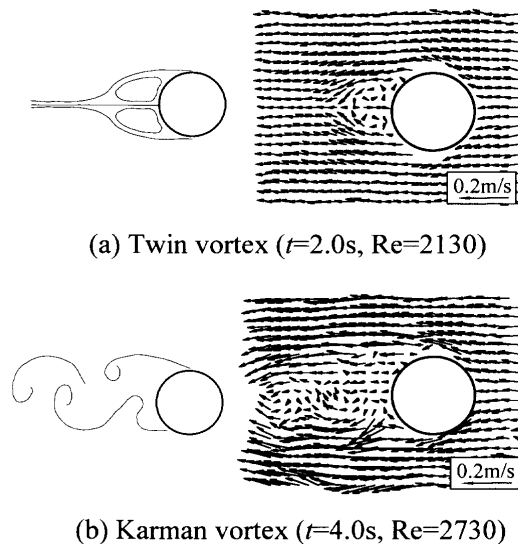


Fig. 5. Velocity vectors measured with PIV at transverse section in salt water layer [Silicone oil 2, $D=0.03 \text{ m}$, $\theta=20 \text{ deg.}$, $\Omega_r=2.7 \text{ deg./s}$].

と遷移した。Fig. 5(a)と同条件での円柱の中心軸を含む容器縦断面の速度ベクトルをFig. 6に示す。二液界面の変形は双子渦の領域で発生していたことから、Fig. 4の巻き込み現象はカルマン渦によるものではなく、円柱周囲の圧力差が原因であると考えられる。

また、Fig. 7, 8は円柱上流側 20 mm における速度分布を

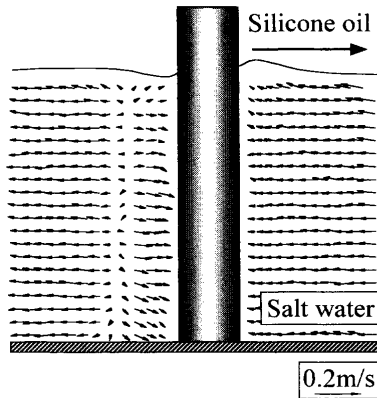


Fig. 6. Velocity vectors measured with PIV at longitudinal section in salt water layer [Silicone oil 2, $D=0.03$ m, $\theta=20$ deg., $\Omega_r=2.7$ deg./s, $t=2.0$ s].

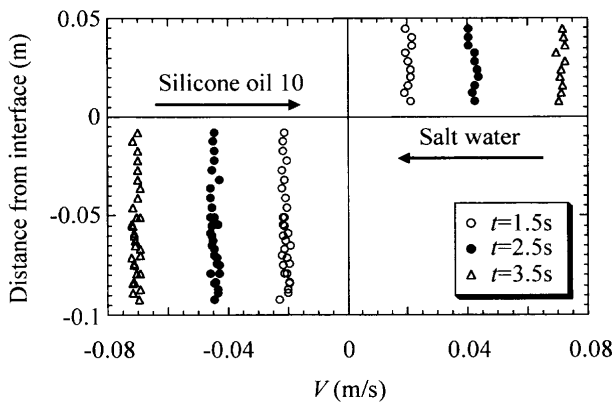


Fig. 7. Change in velocity distribution [Silicone oil 10, $D=0.03$ m, $\theta=20$ deg., $\Omega_r=2.7$ deg./s].

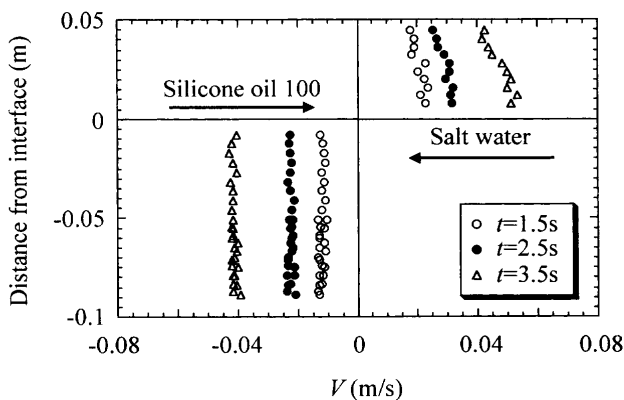
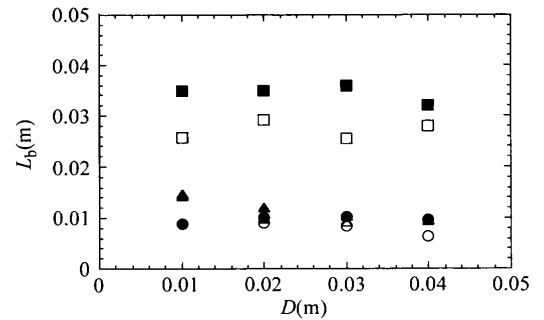
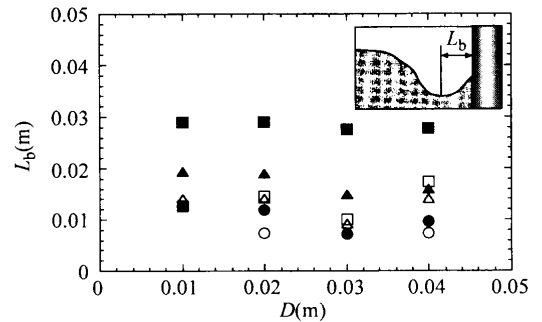


Fig. 8. Change in velocity distribution [Silicone oil 100, $D=0.03$ m, $\theta=20$ deg., $\Omega_r=2.7$ deg./s].

示している。Silicone oil 100のときはシリコンオイル層に、大きくはないが速度勾配が存在するのに対して、Silicone oil 10のときにはシリコンオイル層に速度勾配がほとんど見られない。この速度勾配はシリコンオイルの動粘度が大きいことによるものである。Silicone oil 2の速度に関しては適当なトレーサー粒子がなかったために測定は行っていないが、Silicone oil 10より動粘度が低いために速度勾配を無視することができると考えられる。



(a) Silicone oil 2



(b) Silicone oil 100

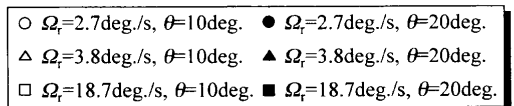


Fig. 9. Distance from wall of cylinder to maximum descending position [Silicone oil 2, Silicone oil 100].

なお本実験条件下では、前報⁷⁾で報告したようなケルビン-ヘルムホルツ型不安定は観察されなかった。

3.2 二液界面が最も降下した地点から円柱壁面までの距離 L_b

Fig. 9に二液界面が最も降下した地点から円柱壁面までの距離 L_b の測定結果の例を示す。Silicone oil 2に関して、 L_b は容器の傾斜角度 θ および回転速度 Ω_r 、つまり液体の近寄り速度の増加とともに増加した。 L_b は円柱の直径 D にあまり依存していないように見えるが、 D が変わると近寄り流れの速度 V_1, V_2 も変化するので、 D の L_b への影響はこの図から陽には分からない。Silicone oil 100においても同様の傾向が見られ、 L_b に及ぼす動粘度 ν_l の影響はほとんどなかった。したがって L_b には円柱へ近寄ってくる流れの慣性力が影響していると考えられる。また、二液界面の降下には浮力が関与することから、 L_b は慣性力と浮力との比であるフルード数によって整理できると予想される。そこで次式に示す修正フルード数 Fr を用いた。

$$Fr = \frac{\rho_2 V_2^2}{gD(\rho_2 - \rho_1)} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 g は重力加速度を表す。Table 1に示したすべてのシリコンオイルに対して測定した距離 L_b を D で無次元化して Fr に対してプロットすると Fig.10のようになり、 L_b の測定値は次式によって $\pm 40\%$ の偏差で近似できる。

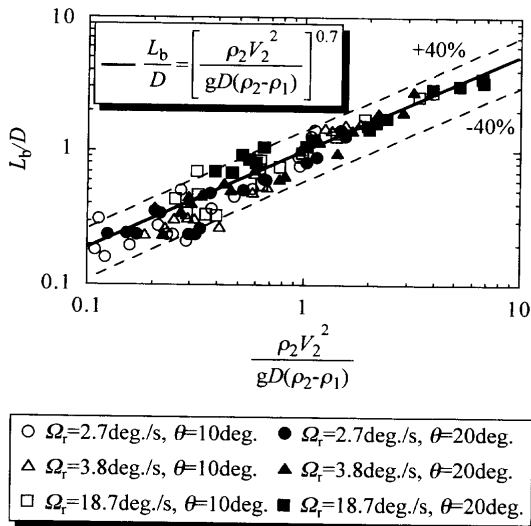


Fig. 10. Relation between L_b/D and modified Froude number for all kinds of silicone oils.

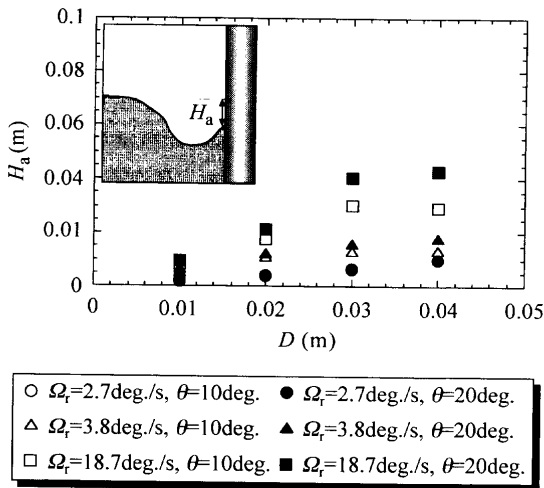


Fig. 11. Maximum descending distance of interface on wall of cylinder [Silicone oil 2].

$$L_b = D \left[\frac{\rho_2 V_2^2}{gD(\rho_2 - \rho_1)} \right]^{0.7} \dots\dots\dots (2)$$

なお、本実験条件下で二液界面が最も降下したとき、食塩水の層側のレイノルズ数 $Re_2 (=V_2 D/\nu_2)$ は710~7200の範囲にある。

3.3 二液界面の降下距離 H_a, H_b

Fig.11は円柱後方壁面に沿う二液界面の最大降下距離 H_a を表す。 H_a は円柱の直径 D , 容器の回転速度 Ω_r , 傾斜角度 θ に依存している。これは、容器の回転速度 Ω_r と傾斜角度 θ が大きいほど液体の速度が大きくなって円柱周囲での圧力変化が大きくなり、また円柱の直径 D が大きいほど円柱後方で圧力の降下する領域が大きくなり、上層の液体が降下しやすくなるためであると考えられる。以下に円柱壁面上の圧力差と H_a との関係式を導く。

円柱が密度 ρ の静止流体中を一方向へ速度 V で移動するとき、円柱前方のよどみ点での圧力 P_A と後方のよどみ点での圧力 P_B はそれぞれ、

$$P_A = \frac{1}{2} \rho V^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$P_B = -\frac{2.5}{2} \rho V^2 \dots\dots\dots (4)$$

となる¹⁸⁾。式(3), (4)を本研究に適用すると、Fig. 3に示すシリコンオイルの上流側における円柱のよどみ点での圧力 P_1 と食塩水の下流側における円柱のよどみ点での圧力 P_2 はそれぞれ、

$$P_1 = \frac{1}{2} \rho_1 V_1^2 \dots\dots\dots (5)$$

$$P_2 = -\frac{2.5}{2} \rho_2 V_2^2 \dots\dots\dots (6)$$

となり、二液界面での圧力差 ΔP は、

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho_1 V_1^2 + \frac{2.5}{2} \rho_2 V_2^2 \dots\dots\dots (7)$$

と表すことができる。したがって、円柱のよどみ点近傍において円柱に垂直な面内の単位面積あたりに働く圧力、重力、浮力のバランスから

$$\Delta P + \rho_1 H_a g = \rho_2 H_a g \dots\dots\dots (8)$$

となり、式(7)を式(8)に代入して H_a について整理すると

$$H_a = \frac{\rho_1 V_1^2 + 2.5 \rho_2 V_2^2}{2g(\rho_2 - \rho_1)} \dots\dots\dots (9)$$

が得られる。

H_a を計算するに際して、Fig. 7, 8より Silicone oil 2の速度に関しては速度勾配を無視することができる。そこでPIVを用いて測定した食塩水の速度から連続の式によって Silicone oil 2の速度を導き⁷⁾、式(9)に代入した。ただし、本実験条件下では液層の厚さ比が1であることから、食塩水の速度と Silicone oil 2の速度は等しくなる。すべてのシリコンオイルにおける測定値と計算値との比 $H_{a,mea}/H_{a,cal}$ を $D/L_{b,cal}$ に対してプロットすると Fig.12 のようになり、 $D/L_{b,cal} \geq 1.5$ においては、式(9)によって測定値は $\pm 40\%$ の偏差で近似できる。 $D/L_{b,cal} < 1.5$ において式(9)が適用できないのは、円柱の直径が小さいと二液界面の降下する領域が狭くなることから、界面降下に対する流動抵抗が大きくなり、その結果として計算値が測定値より大きくなるためである。

Fig.13は、円柱から離れたところで二液界面が最も降下した距離 H_b を表している。すべてのシリコンオイルの H_b に関しても式(9)を用いて無次元化し、 $D/L_{b,cal}$ に対してプ

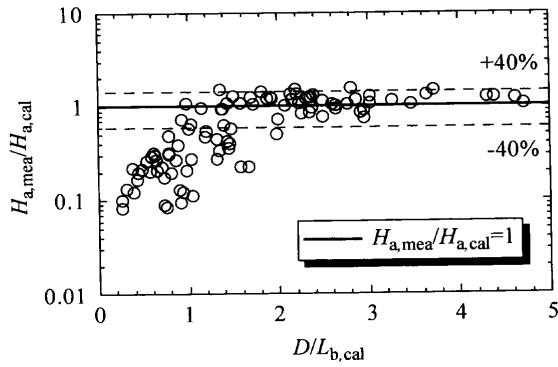


Fig. 12. Relation between $H_{a,mea}/H_{a,cal}$ and $D/L_{b,cal}$ for all kinds of silicone oils.

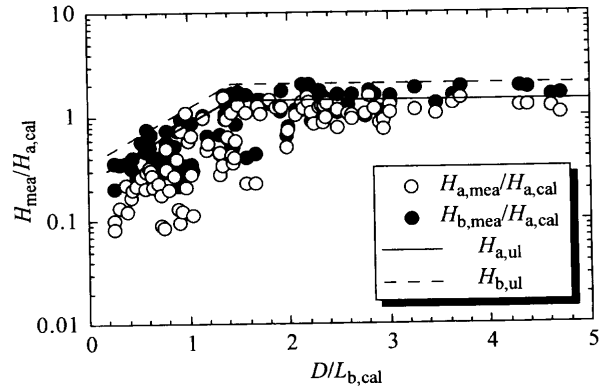


Fig. 15. Upper limit of maximum descending distance of interface, $H_{a,ul}$ and $H_{b,ul}$ for all kinds of silicone oils.

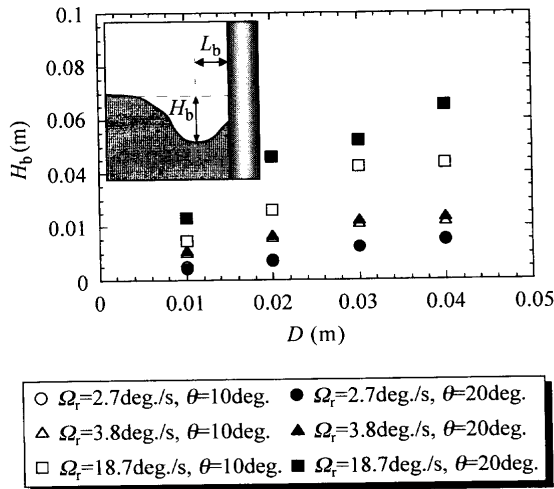


Fig. 13. Maximum descending distance of interface behind cylinder [Silicone oil 2].

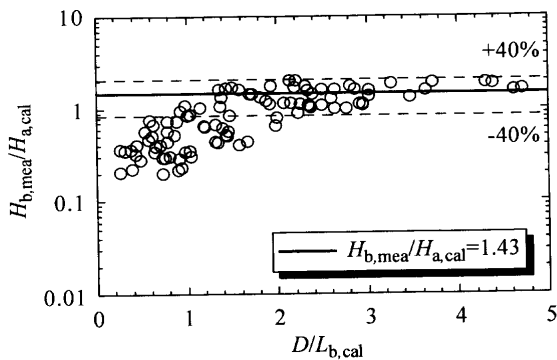


Fig. 14. Relation between $H_{b,mea}/H_{a,cal}$ and $D/L_{b,cal}$ for all kinds of silicone oils.

ロットすると Fig.14 のようになり, $D/L_{b,cal} \geq 1.5$ において, 測定値は

$$H_b = 1.43 H_{a,cal} \dots \dots \dots (10)$$

によって $\pm 40\%$ の偏差で近似できる。 H_b が H_a よりも大きいのは, H_a が円柱表面の圧力差に依存しているのに対し, H_b は土木工学分野で知られている研究成果を参考にして判断すれば¹⁹⁾, 円柱周囲の流れにも依存しているためであると思われる。

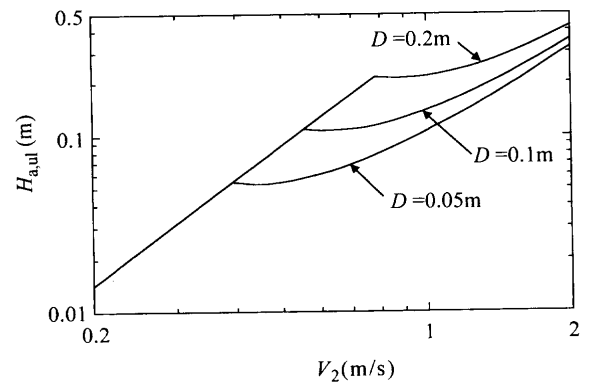


Fig. 16. Relation between $H_{a,ul}$ and V_2 .

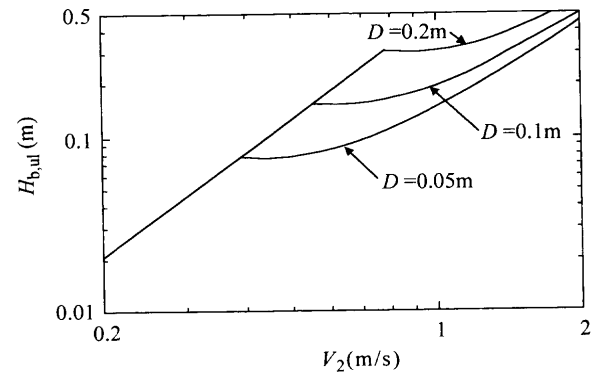


Fig. 17. Relation between $H_{b,ul}$ and V_2 .

3.4 実機への適用

実機における溶鋼の速度を, 片流れが生じたときを考慮して $V_2=0.2\sim 2.0\text{m/s}$ と大きめに見積もり, モールドパウダーは静止していると仮定して速度を $V_1=0\text{m/s}$ とおく。モールドパウダーの密度は $\rho_1=3500\text{kg/m}^3$, 溶鋼の密度は $\rho_2=7000\text{kg/m}^3$ と仮定する。 Fig.12, 14 において各々の横軸の値に対する測定値の最大値を Fig.15 に示すように直線近似し, $H_{a,ul}$, $H_{b,ul}$ と表す。ただし横軸に平行な部分は, それぞれ Fig.12, 14 に +40% と記した値そのものを表している。 Fig.15 の $H_{a,ul}$ と $H_{b,ul}$ を基にして, 実機内の $H_{a,ul}$ と $H_{b,ul}$ を計算し, ノズル外径 D をパラメータとして, Fig.16, 17 に示

す。溶鋼の速度 V_2 と外径 D の増加につれて、モールドパウダーの降下する距離は大きくなる。

例えば、 $V_2=1.0\text{ m/s}$ 、 $D=0.1\text{ m}$ のとき、 $H_{a,ul}=0.14\text{ m}$ 、 $H_{b,ul}=0.20\text{ m}$ となり、これらの値は実機における浸漬ノズルの浸漬深さに相当している。したがって、浸漬ノズルに沿って降下したモールドパウダーは、浸漬ノズル吐出口から流出する溶鋼流によってモールド内へ取り込まれ、細かく分断されて溶鋼中へ分散する可能性は十分にあると考えられる。なお、 $H_{a,ul}$ 、 $H_{b,ul}$ には溶鋼、モールドパウダーと浸漬ノズルとの濡れ性や界面張力も関与していると考えられるので詳細については今後の課題としたい。

4. 結言

連続鋳造鋳型内において、浸漬ノズル表面壁での圧力差によるモールドパウダーの巻き込み現象を食塩水とシリコンオイルを用いた水モデル実験により調査した。得られた主な成果は以下のとおりである。

(1) 溶鋼のモデルである食塩水の流れの中に置かれた円柱後方のよどみ点における上下方向の圧力差によって二液界面が移動し、シリコンオイルが食塩水中へ激しく巻き込まれた。二液が最も降下した地点から円柱壁面までの距離 L_b は修正フルード数によって式(2)で近似できた。偏差は $\pm 40\%$ である。

$$L_b = D \left[\frac{\rho_2 V_2^2}{gD(\rho_2 - \rho_1)} \right]^{0.7} \dots\dots\dots (2)$$

(2) 円柱に沿って降下する二液界面の円柱壁面での最大降下距離 H_a は、本実験のレイノルズ数 Re_2 の範囲では液体の動粘度の影響を受けず、Fig.12 で整理できた。 $D/L_{b,cal} \geq 1.5$ のとき、 H_a は浸漬ノズルのよどみ点における圧力、重力、浮力のバランスから導かれた式(9)で近似できる。偏差は $\pm 40\%$ である。

$$H_a = \frac{\rho_1 V_1^2 + 2.5 \rho_2 V_2^2}{2g(\rho_2 - \rho_1)} \dots\dots\dots (9)$$

(3) 円柱から離れた位置における二液界面の最大降下距離 H_b は Fig.14 で整理できる。 $D/L_{b,cal} \geq 1.5$ のとき、測定値は次式によって $\pm 40\%$ の偏差で近似できる。

$$H_b = 1.43 H_{a,cal} \dots\dots\dots (10)$$

(4) 実機においても、ここで提案したメカニズムによってモールドパウダーの巻き込みの起こる可能性を示した。

記号

- B : 容器の厚み (m)
- D : 円柱の直径 (m)
- Fr : フルード数 (-)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- H_a : 円柱後方壁面に沿う二液界面の最大降下距離 (m)
- H_b : 円柱から離れたところで二液界面が最も降下した距離 (m)
- L : 容器の長さ (m)
- L_b : 二液界面が最も降下した地点から円柱壁面までの距離 (m)
- P : 圧力 (N/m^2)
- P_A : 円柱前方よどみ点での圧力 (N/m^2)
- P_B : 円柱後方よどみ点での圧力 (N/m^2)
- Re : レイノルズ数 (-)
- t : 時間 (s)
- V : 液体の速度 (m/s)
- W : 容器の幅 (m)
- ν : 液体の動粘度 (mm^2/s)
- θ : 容器の傾斜角度 (deg.)
- ρ : 液体の密度 (kg/m^3)
- σ : 界面張力 (mN/m)
- Ω : 容器の回転速度 (deg./s)

添え字

- 1 : 容器中の上の層
- 2 : 容器中の下の層
- cal : 計算値
- mea : 測定値
- ul : 上限臨界値

文 献

- 1) D.Gupta, S.Chakraborty and A.K.Lahiri: *ISIJ Int.*, **37** (1997), 654.
- 2) 小舞忠信, 佐伯 毅, 堤 直人: 日本学術振興会製鋼第19委員会第3分科会凝固現象協議会資料 No. 19委-10801凝固-426, (1987).
- 3) N.Kasai, M.Kawasaki, K.Hanazaki and T.Sakashita: *CAMP-ISIJ*, **3** (1990), 1114.
- 4) 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.
- 5) Z.Wang, K.Mukai, Z.Ma, M.Nishi, H.Tsukamoto and F.Shi: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 795.
- 6) Z.Wang, K.Mukai and D.Izu: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 154.
- 7) M.Iguchi, J.Yoshida, T.Shimizu and Y.Mizuno: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 685.
- 8) J.Kubota, K.Okimoto, Y.Oka, T.Masaoka and M.Suzuki: *CAMP-ISIJ*, **3** (1990), 1098.
- 9) Y.Yamaoka, M.Suzuki and K.Murakami: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 279.
- 10) K.Watanabe, M.Nakata, M.Suzuki and T.Shiomi: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 860.
- 11) H.Tanaka, H.Kuwatori and R.Nishihara: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 761.
- 12) K.Mukai, R.Tsujino, I.Sawada, M.Zeze and S.Mizoguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 307.
- 13) R.Tsujino, K.Mukai, W.Yamada, M.Zeze and S.Mizoguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 362.
- 14) M.Iguchi, Y.Sumida, R.Okada and Z.Morita: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 569.
- 15) J.Yoshida, S.Yamashita and M.Iguchi: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 973.
- 16) T.Hiraoka, T.Ohashi, H.Matsunaga and T.Hiromoto: *Seitetsu Kenkyu*, **294** (1978), 79.
- 17) T.Tsuda, T.Namieno, T.Saga and T.Kobayashi: *Shinnittetsu Giho*, **359** (1996), 32.
- 18) H.Schlichting: *Boundary-layer Theory*, 7th ed., McGraw-Hill, New York, (1987).
- 19) Y.Fukushima, N.Hayakawa and M.Murakami: *Proc. Jpn. Soc. Civ. Eng.*, **497** (1994), 51.