

連铸鑄型内における渦によるパウダー巻き込みに関する水モデル実験

笠井 宣文*・井口 學*2

Water-model Experiment on Melting Powder Trapping by Vortex in the Continuous Casting Mold

Norifumi KASAI and Manabu IGUCHI

Synopsis : Water-model experiments have been carried out to understand the behavior of mold powder trapping phenomena by vortex in continuous casting mold. The following findings are obtained.

(1) Mold powder trapping by the vortex occurs irregularly near the immersion nozzle. It occurs only in the wake of the immersion nozzle.

(2) As for the occurrence frequency ratio of the vortex, the maximum value appears in the water flow rate regime ranging from 61.4 to 70.2 L/min. This regime is supposed to have a loose relationship with water flow velocity change near the immersion nozzle.

(3) An empirical equation is proposed for the length of the molten mold powder entrapped by the vortex.

Key words: continuous casting; mold powder; trapping; vortex; water-model.

1. 緒言

近年、薄板用スラブの高速鋳造化が指向され、水モデルによる溶融パウダー巻き込みに関する研究¹⁻⁴⁾が盛んに行われるようになった。特に吉田ら⁴⁾は、鑄型内において発生する可能性がある個々の巻き込み現象について、巻き込み臨界流速を明らかにした。このことは、実機においてパウダー巻き込みに対する操業改善を検討していくうえで有益な知見だと考える。

一方、溶融パウダー巻き込みの原因のひとつと考えられている浸漬ノズル（以下、INと略す）近傍において発生する渦は、鑄型内においてINを中心に幅方向に周期的な偏流が存在すること⁵⁾から、INと鑄型長辺間の流れによって生じるカルマン渦によるものと考えられている⁶⁾。しかしながら、カルマン渦の発生が原因とするのであれば、溶融パウダーの巻き込み発生は鑄型幅方向における周期的な偏流に依存して一定の規則性を有するものと考えられるが、鑄型内流動と渦の発生頻度の関係について詳述された研究⁷⁾は少なく、浸漬深さや吐出口角度などの操業因子との関係についても不明な点が多い。

本報では、IN近傍に発生する渦による溶融パウダーの巻き込み現象に関して、渦の発生頻度ならびに発生した渦の深さに与える鑄型内流動の影響について述べる。

2. 実験方法

本実験に用いた水モデル実験装置の構成を Fig. 1 に示す。

実験装置は実機の 1/2.5 である。水の流量制御は実機に近いシステムであり、鑄型槽上部に設置している圧力センサーからの信号と、下部に設置している流量計からの信号

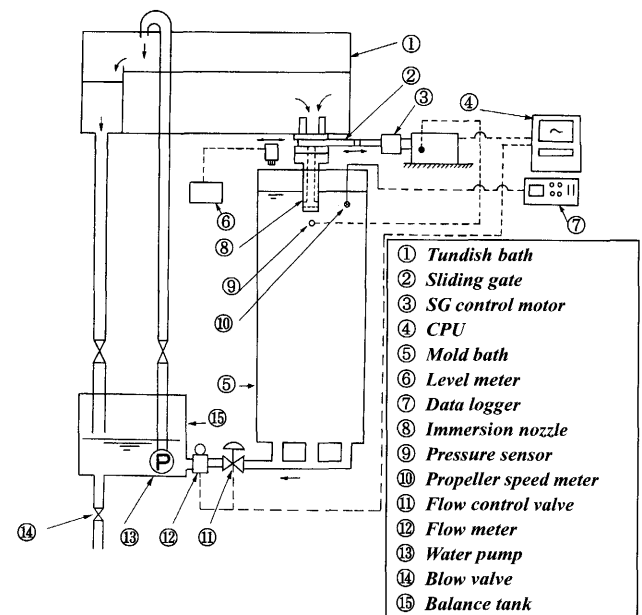


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

平成18年4月7日受付 平成18年6月2日受理 (Received on Apr. 7, 2006; Accepted on June 2, 2006)

* 住友金属工業（株）鋼板・建材カンパニー (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Ind., Ltd., 3 Hikari Kashima Ibaraki 314-0014)

*2 北海道大学大学院 工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

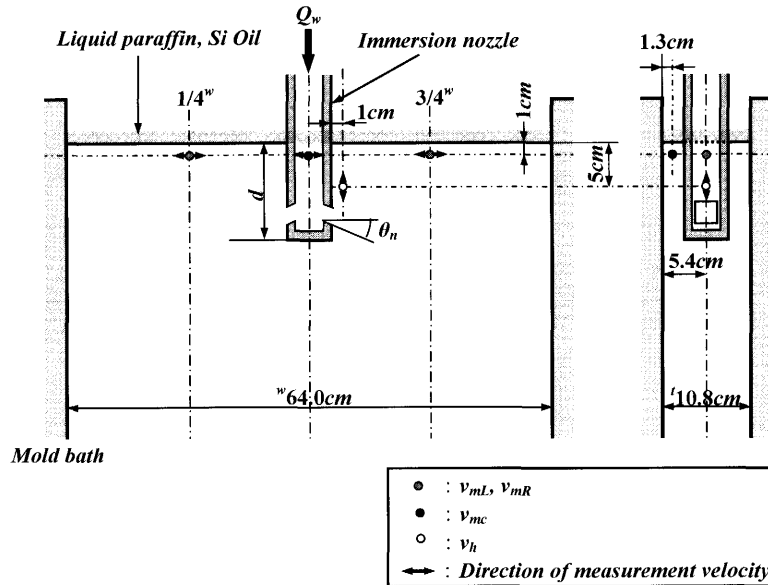


Fig. 2. Measurement point of water velocity in the mold bath.

Table 1. Experimental conditions of water model.

Mold size	10.8×64.0 (cm)	
Water flow rate	35.0~79.0 (L/min)	
Nozzle port angle	0°~30° (Box type)	
Nozzle depth	8.0~14.0 (cm)	
Analogous law	Fr number agreement	
Physical properties of mold powder	Liquid paraffin	$\rho = 0.76 \text{ g/cm}^3$ $\eta = 64.0 \text{ cp}$
	Si Oil A	$\rho = 0.85 \text{ g/cm}^3$ $\eta = 4.58 \text{ cp}$
	Si Oil B	$\rho = 0.92 \text{ g/cm}^3$ $\eta = 48.0 \text{ cp}$

をスライディングゲートにフィードバックすることで、水面の高さと水流量（以下、 Q_w と略す）を一定値に制御している。

Fig. 2に実験の概略，Table 1に実験条件を示す。

実験は渦によるパウダー巻き込みの発生頻度と侵入深さについて知ることを目的に、 Q_w 、IN吐出口の下向き角度（以下、 θ_n と略す）、浸漬深さ（以下、 d と略す）を変更して行った。なお、水モデルと実機は式(1)に示すフルード数を一致させることで相似させた。

$$Fr = u_0 / (gD_m)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Fr はフルード数、 u_0 は平均吐出噴流速速度、 g は重力加速度、 D_m は吐出口の円相当径である。

渦によるパウダー巻き込みの観察は、溶融パウダーを模擬するためにフェノールレッドで着色した流動パラフィンを用いたが、一部の条件については、比較のため物性値が異なるシリコンオイルを用いた実験を行った。模擬パウダーの厚みはメニスカスが静止した状態で1 cmである。また、本実験において模擬パウダーの物性値は着色後測定した値を用いた。

実験はIN傍傍に発生する渦に関わる鋳型内流動を把握

することを目的に、Fig. 2に示す鋳型槽内位置における流速を直径0.3 cmのプロペラ流速計によって10分間測定すると同時に、VTR撮影を行い渦の発生頻度と侵入深さを測定し、各位置における流速と渦の発生時期を照合することで両者の関係を求めた。

Fig. 2に示すそれぞれの流速測定位置を選択した理由は、第3・3項において詳述する。

3. 実験結果および考察

3・1 渦による溶融パウダー巻き込みの形態

Fig. 3に本実験において観察された渦による模擬溶融パウダー巻き込みの形態を示すとともに、渦の発生領域を図示した。

渦による巻き込みは、INを中心にして、左右いずれかの片側だけに単独で発生して、両側同時に発生することはなかった。また、発生領域はIN外面から鋳型槽幅方向に3 cm程度であり、発生した渦はその領域から短辺側に流れながら消滅するさまが観察された。

また、発生してすぐに消滅する渦と、渦の先端がちぎれて水中に巻き込まれる形態が観察された。

3・2 渦発生頻度におよぼす操作因子の影響

鋳型内における溶鋼流動を制御する最も一般的な手法としては、溶鋼流量、 θ_n 、 d を変更することで最適な鋳造条件を見いだす方法が挙げられる。

本項においては渦の発生頻度について、これらの操作因子が鋳型内溶鋼流動と渦の発生頻度に与える影響について述べるが、パウダーの物性値の影響については、3・4項にて後述する。

Fig. 4に Q_w と渦の発生頻度を示す。渦の発生頻度はいず

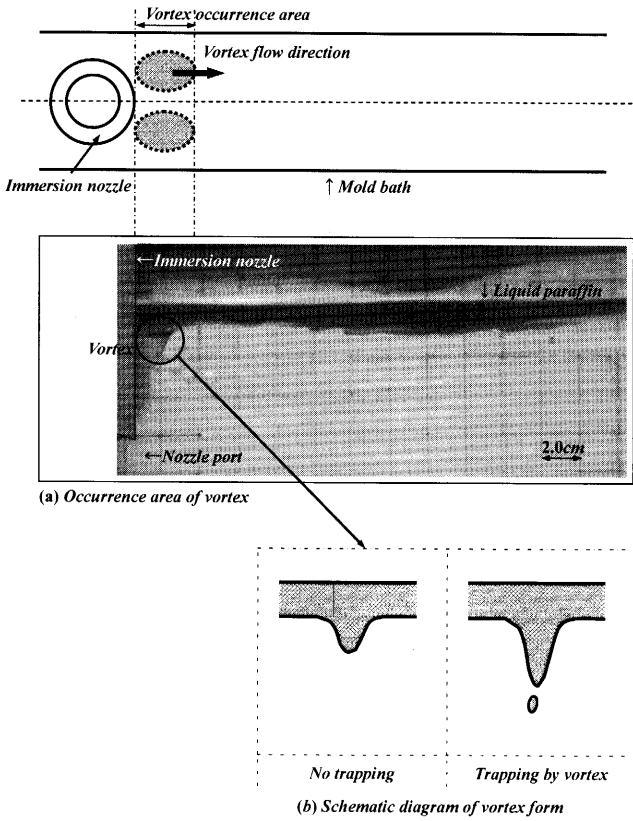


Fig. 3. Mold powder trapping by vortex.

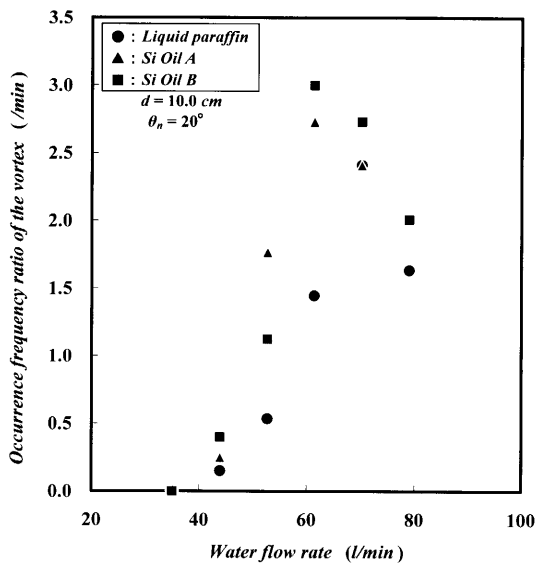


Fig. 4. Relationships between water flow rate and vortex appearance index.

れの模擬パウダーにおいても Q_w が大きくなるにしたがい増加し、61.4から70.2 L/minの範囲において最大となるが、それ以上の Q_w では減少する。

Fig. 5に θ_n 別の渦発生頻度ならびに、巻き込み発生頻度を示す。ここで、渦発生頻度は目視によって観察された渦の発生頻度であり、巻き込み発生頻度は発生した渦の先端がちぎれて模擬パウダーが水中に巻き込まれた渦の発生頻度である。

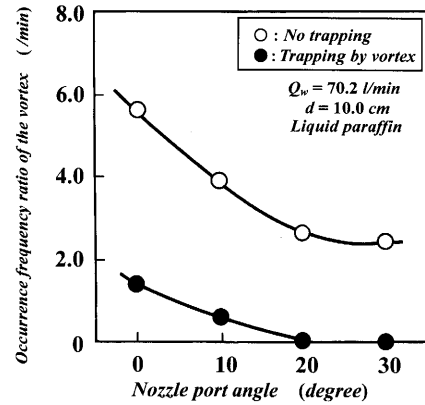


Fig. 5. Relationships between nozzle port angle and vortex appearance index.

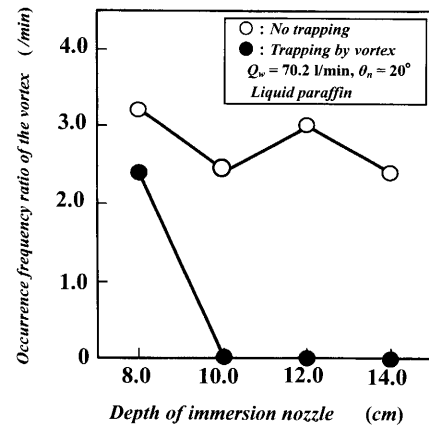


Fig. 6. Relationships between d and vortex appearance index.

渦発生頻度ならびに巻き込み発生頻度のいずれも、 θ_n が大きくなるにしたがい減少する。

また、Fig. 6に d と渦発生頻度ならびに流動パラフィンがちぎれて水中に巻き込まれた頻度を示す。渦の発生頻度は浸漬深さの違いによって大きな差があるとは言えないが、ちぎれて巻き込まれる頻度は d が小さい方が高くなっている。

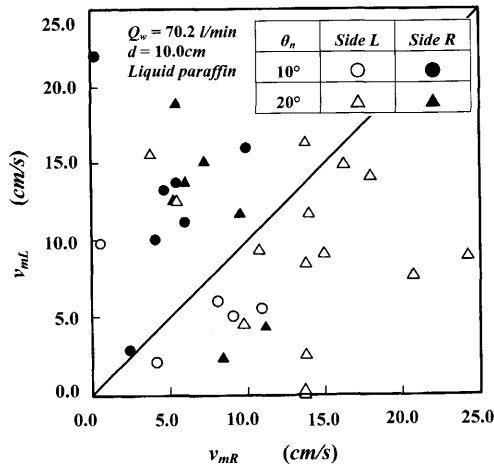
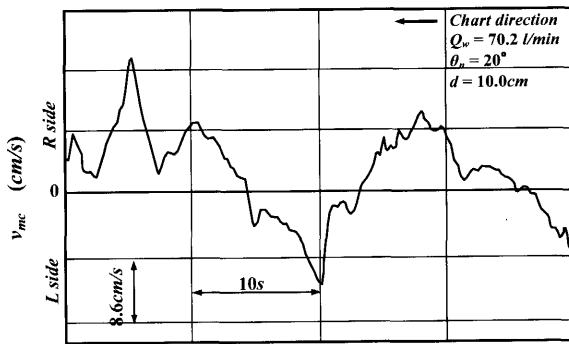
これらの結果から、渦の発生頻度は鋳型内におけるメニスカス直下ならびに、IN近傍の流動の影響を大きく受けているものと推察される。

3.3 液の流動が渦発生頻度に与える影響

Fig. 5, 6に示した結果は、渦の発生に関わる流れが θ_n や d の違いによって影響を受けるためと推察される。そこで、鋳型槽内の流動に着目して渦の発生を整理した。

メニスカス直下における流動が渦の発生に与える影響を知ることを目的に、鋳型槽 1/4th, 3/4th 位置におけるメニスカス直下流速 (v_{mL} , v_{mR}) を測定するとともに、IN近傍に発生する渦の観察を行った。

Fig. 7は渦が発生した時の左右 v_m の大きさを比較した結果であるが、渦の発生は v_m が小さい側で多く認められることがわかる。 v_m が周期性を持って鋳型長辺の左右で強弱

Fig. 7. Relationships between v_{mR} and v_{mL} .Fig. 8. An example of measurement result of v_{mc} .

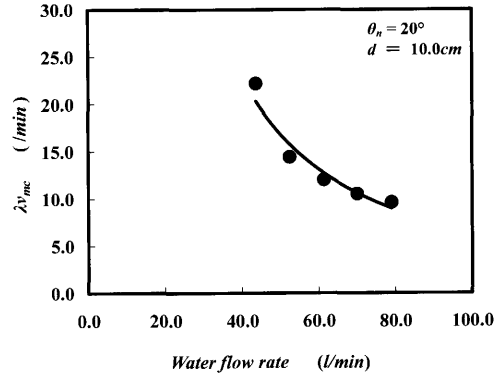
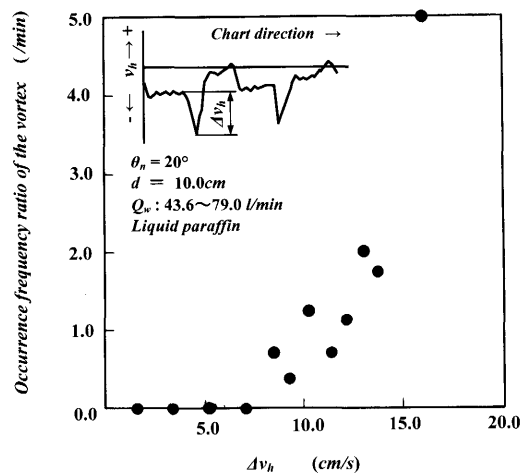
があることは、久保田ら⁵⁾によって実機においても確認されており、これはINからの溶鋼噴流が周期的に変動することによると考えられる。また、渦による巻き込みの発生はINが存在することによって発生するカルマン渦が原因と考えられており⁴⁾、Fig. 7の結果はこれらの結果を間接的に証明している。

すなわち、INからの溶鋼噴流が周期的に変動することによって左右の v_m に差が生じ、INと鋳型槽長辺間において v_m が大きい側から小さい側へ通り抜ける流れが生じる。このことによって、 v_m の小さい側ではINと鋳型槽長辺間の流れの下流側となり、カルマン渦が発生するものと考えられる。また、渦による巻き込みがIN近傍のみでしか発生しないことからINと鋳型槽長辺間の流れが渦の発生に関与しているものと推察される。

上記の推論を確認することを目的にINと長辺間の流れに着目した。Fig. 8に v_{mc} を測定した結果の一例を示す。 v_{mc} は周期的に鋳型槽の幅方向に変動している。

このIN長辺間における流れの変動回数（以下、 $\lambda_{v_{mc}}$ と略す）と Q_w との関係をFig. 9に示す。 $\lambda_{v_{mc}}$ は Q_w が大きくなるにしたがい減少している。

この結果からだけでは、Fig. 4に示した発生頻度が特定の領域において最大となる結果を説明することはできない。そこで、メニスカスにおけるカルマン渦の発生は起点

Fig. 9. Relationships between water flow rate and $\lambda_{v_{mc}}$.Fig. 10. Relationships between Δv_h and index of vortex.

であり、渦を水中に引き込む力が別に存在するのではないかと考えた。

すなわち、INが存在することによってその周辺ではメニスカス直下における流動が必ずしも一方向ではなくIN外壁面に沿って下向きの流れが存在することで、成長した渦の発生に関与しているものと推察される。

このことを実証することを目的に、鋳型槽右側の v_h を測定すると同時に、測定側に発生する渦の観察を行った。

v_h の測定結果において特徴的なことは、渦が発生した時に突発的に下向き流速が変動する現象が認められたことである。この突発的な下向き流速について、1s以内に変動した速度を Δv_h と定義して渦の発生頻度との関係を求めた。Fig.10に結果を示す。

Δv_h が大きくなるのにしたがって渦の発生頻度も高くなっており、本実験では渦の発生限界 Δv_h は8.6 cm/sであった。

Fig.11に Q_w と8.6 cm/s以上の Δv_h 発生頻度の関係を示すが、 Q_w が大きくなるのにしたがって Δv_h 発生頻度も増加しており、 Δv_h の発生は吐出噴流が変動することによって生じるものと考えられる。

以上の結果を模式的に示すとFig.12のとおりとなり、

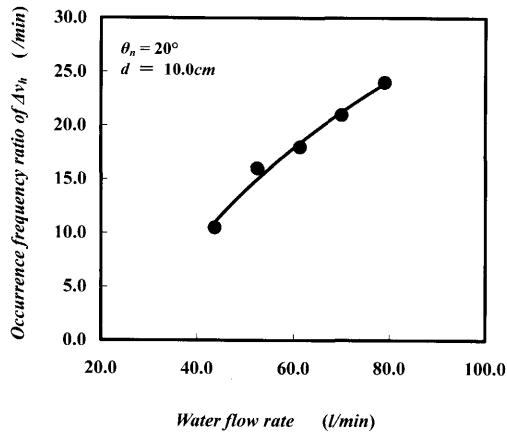


Fig. 11. Relationships between water flow rate and index of Δv_h .

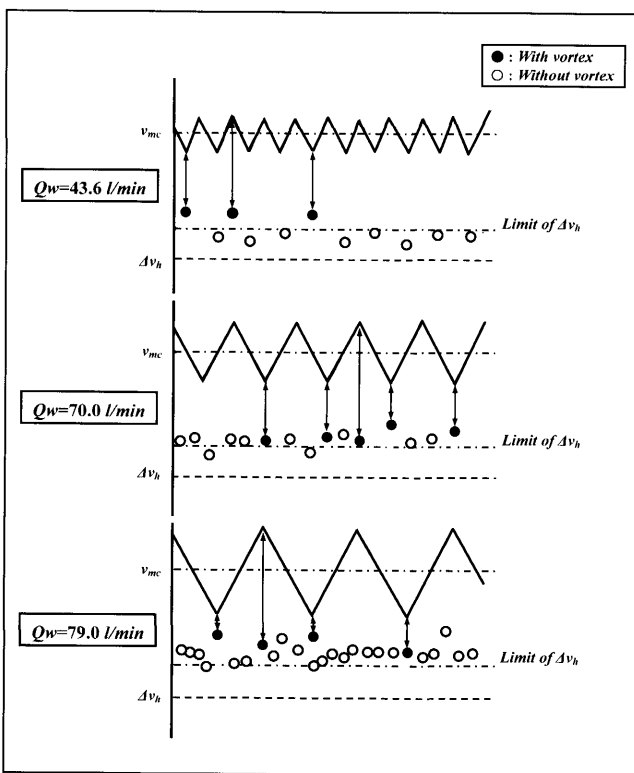


Fig. 12. Schematic diagram for explaining vortex appearance condition.

Fig. 4に示した Q_w が 61.4 から 70.2 L/min で渦の発生頻度が最大になることが定性的には説明可能となる。

渦によるパウダー巻き込みの発生はメニスカスにおけるカルマン渦が起点となって、吐出噴流が変動することで Δv_h が生じた結果と考えられる。 Q_w が大きくなるにしたがって v_{mc} は大きくなるが、 $\lambda_{v_{mc}}$ は小さくなり、起点となるカルマン渦の発生頻度は減少する。そのために、 Q_w が大きくなるにしたがい渦の発生限界を越える Δv_h の発生頻度が増加しても渦の発生頻度は減少する。

すなわち、 v_{mc} によるカルマン渦の発生タイミングと渦の発生限界を越える Δv_h の発生タイミングが一致した時に IN 近傍の渦が発生し、渦の発生頻度が最大となる Q_w は

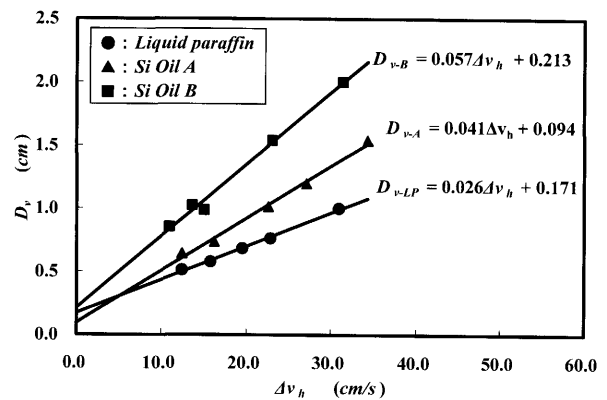


Fig. 13. Relationships between Δv_h and D_v .

61.4 から 70.2 L/min の範囲に存在したものと推察される。

また、 θ_n が大きくなると渦の発生頻度が小さくなり、 d が小さくなると渦がちぎれやすくなるのは、いずれも吐出噴流が変動する影響範囲が物理的に変わることによるものと考えられる。

3.4 渦深さにおよぼす鋳型内流動の影響

前項において、IN 近傍における渦の発生はメニスカスにおけるカルマン渦の発生と突発的な下向き流れの発生が一致することが原因であると推察した。

このことから、IN 近傍に発生する渦深さ（以下、 D_v と略す）はカルマン渦による渦深さ（以下、 D_{vk} と略す）と Δv_h によって引き込まれる渦深さ（以下、 $D_{v\Delta v_h}$ と略す）の和に相当し式(2)によって表わすことができる。

$$D_v = D_{vk} + D_{v\Delta v_h} \dots \dots \dots (2)$$

D_{vk} は渦の周速度から求めたエネルギー収支より、式(3)によって表される⁸⁾。

$$D_{vk} = \frac{\rho_w}{(\rho_w - \rho_p)} \frac{v_a^2}{g} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 v_a は渦の周速度を表しているが、IN と鋳型槽長辺間の流速 ($= v_{mc}$) と見なす。 ρ_w 、 ρ_p はそれぞれ水と模擬パウダーの密度である。

Δv_h と D_v の関係を本実験結果から求めると Fig.13 に示すとおりとなり、模擬パウダーの違いから、式(4)から(6)を得る。

$$D_{v-LP} = 0.026\Delta v_h + 0.171 \dots \dots \dots (4)$$

$$D_{v-A} = 0.041\Delta v_h + 0.094 \dots \dots \dots (5)$$

$$D_{v-B} = 0.057\Delta v_h + 0.213 \dots \dots \dots (6)$$

ここで、添字の LP, A, B は模擬パウダーの種類を表しており、それぞれ、流動パラフィン、シリコンオイル A、シリコンオイル B である。

式(4)から(6)の右辺第2項が D_{vk} と等しいと見なすと式(2)は式(7)で表わすことができる。

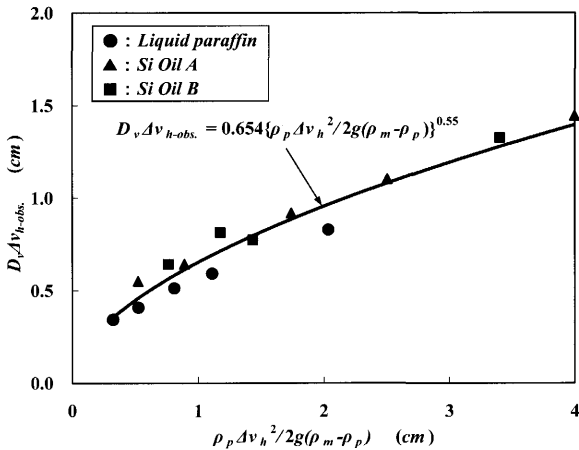


Fig. 14. Relationships between $\rho_p \Delta v_h^2 / 2g(\rho_m - \rho_p)$ and $D_v \Delta v_{h-obs.}$.

$$D_v = \frac{\rho_w}{(\rho_w - \rho_p)} \frac{v_{mc}^2}{g} + D_{v\Delta v_h} \quad \dots\dots\dots (7)$$

一方、 $D_{v\Delta v_h}$ は水-模擬パウダー間における運動エネルギーと浮力による仕事量が等しいとすると式(8)となり、式(9)を得る。

$$\frac{1}{2} m_v \rho_p \Delta v_h^2 = g(\rho_w - \rho_p) m_v D_{v\Delta v_h} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$D_{v\Delta v_h} = \frac{\rho_p \Delta v_h^2}{2g(\rho_w - \rho_p)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 m_v は渦によって引き込まれた模擬パウダーの質量である。

Δv_h によって模擬パウダーが引き込まれる深さは式(4)から式(6)では右辺第1項で表わしているが式(9)に置き換えて、本実験で得られた Δv_h を代入して求めた $D_{v\Delta v_h-cal.}$ と D_v の測定値から式(3)で求めた D_{vk} を減じた $D_{v\Delta v_h-obs.}$ の関係を求めた。ここで、添字の cal. と obs. はそれぞれ計算値と実測値を表わす。

Fig.14の結果から、 $D_{v\Delta v_h}$ は式(10)によって表わすことができる。

$$D_{v\Delta v_h-obs.} = 0.654 \left\{ \frac{\rho_p \Delta v_h^2}{2g(\rho_w - \rho_p)} \right\}^{0.55} \quad \dots\dots\dots (10)$$

以上の結果より、IN近傍に発生する渦による溶融パウダーの巻き込みは、メニスカス直下において鑄型槽長辺とIN間における流動と吐出噴流の非定常的な挙動によって起こる突発的な下向きの流動が同時に生じた時にカルマン渦が起点となって発生するものと考えられ、渦による巻き込み深さ D_v は式(11)によって表わすことができる。

$$D_v = \frac{\rho_w}{(\rho_w - \rho_p)} \frac{v_{mc}^2}{g} + \alpha \left\{ \frac{\rho_p \Delta v_h^2}{2g(\rho_w - \rho_p)} \right\}^\beta \quad \dots\dots\dots (11)$$

α, β は係数であり、本実験では $\alpha=0.654, \beta=0.55$ であっ

た。

4. 結言

カルマン渦が原因と考えられる溶融パウダーの巻き込み現象の発生機構を明らかにすることを目的に水モデル実験ならびに、実機鑄片の調査を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 水モデル実験において観察された渦による模擬溶融パウダー巻き込みは、IN近傍において不規則に発生する。また、INを中心にして、左右いずれかの片側のみに発生して、両側同時に発生することはない。

(2) 渦の発生頻度はいずれの模擬パウダーにおいても Q_w が大きくなるにしたがい増加し、61.4から70.2L/minの範囲において最大となるが、それ以上の Q_w では減少する。この現象は v_{mc} と Δv_h の変動によって生じているものと推察される。

(3) IN近傍に発生する渦による溶融パウダーの巻き込み深さは渦の周速、 Δv_h と溶融パウダーの運動方程式から、以下の式で与えられる。

$$D_v = \frac{\rho_w}{(\rho_w - \rho_p)} \frac{v_{mc}^2}{g} + \alpha \left\{ \frac{\rho_p \Delta v_h^2}{2g(\rho_w - \rho_p)} \right\}^\beta$$

記号

- Q_w : 水流量
- Fr : フルード数
- u_0 : 平均吐出噴流速度
- g : 重力加速度
- D_{ni} : 吐出口の円相当径
- v_m : 厚み中央部, 1/4幅, 3/4幅位置における深さ10mm位置の水平方向流速
- v_{mc} : IN-鑄型槽長辺間, 1/2幅位置における深さ10mm位置の水平方向流速
- v_h : 厚み中央部, IN外壁面から10mm位置, 深さ50mm位置の垂直方向流速
- θ_n : IN吐出口角度
- d : 浸漬深さ
- $\lambda_{v_{mc}}$: IN長辺間における流れの変動回数
- Δv_h : v_h が1s以内に変動した速度
- D_v : 渦深さ
- D_{vk} : カルマン渦による渦深さ
- $D_{v\Delta v_h}$: Δv_h によって引き込まれる渦深さ
- v_a : 渦の周速度(= v_{mc})
- ρ_w, ρ_p : 水と模擬パウダーの密度
- m_v : 渦によって引き込まれた模擬パウダーの質量
- α, β : 係数

添字

- L, R : 鑄型槽幅方向の左右
- w, t : 鑄型槽幅, 厚
- cal., obs. : 計算値と実測値
- LP, A, B : 模擬パウダーの種類

文献

1) Y.Ootsuka, H.Yuyama and S.Kajio: *CAMP-ISIJ*, 3 (1990), 1225.

- 2) Y. Shimizu, T. Touge, S. Sasayama, T. Endou, Y. Hayashi and M. Matsui: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 300.
- 3) A. Mutou and N. Kasai: *CAMP ISIJ*, **10** (1997), 900.
- 4) 吉田 仁：鑄型内溶鋼流動と介在物の動的挙動，井口 學編，日本鉄鋼協会，東京，(2002)，155.
- 5) J. Kubota, N. Kubo, M. Suzuki T. Ishii, Y. Yamaoka and M. Yamagishi: *CAMP ISIJ*, **10** (1997), 235.
- 6) H. Kuwatori, H. Miyamura, E. Ikezaki and A. Kusano: *Tetsu-to-Hagané*, **71** (1985), S900.
- 7) Y. Yamaoka, M. Suzuki and K. Murakami: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 279.
- 8) H. Tanaka, H. Kuwatori and R. Nishihara: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 761.
- 9) 笠井宣文：鑄型内溶鋼流動と介在物の動的挙動，井口 學編，日本鉄鋼協会，東京，(2002)，243.
- 10) M. Iguchi, Y. Sumida, R. Okada and Z. Morita: *ISIJ Int.*, **34** (1994), 164.
- 11) N. Kasai and M. Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), No. 12, 847.
- 12) 黒澤文夫：第19回白石記念講座，日本鉄鋼協会編，東京，(1990)，87.