

© 1992 ISIJ

 論 文
 ////////////////
 ////////////////

水モデル実験による連鑄パウダー巻込み現象の解析

 田中 宏幸*・鋤取 英宏*²・西原 良治*²

Analysis of Continuous Casting Powder Entrapping Phenomena by Water-model Experiments

Hiroyuki TANAKA, Hidehiro KUWATORI and Ryoji NISHIHARA

Synopsis :

Mold-powder entrapping brings a serious problem of steel sheet defect caused by inclusion.

It is caused by moldmeniscus flow, immersionnozzle Argon bubble burst in mold meniscus or sacking by voltex near the immersionnozzle. The present paper studies the effect of continuous casting condition on voltex growth by the watermodel experiment.

The voltex growth is found to be strongly affected by maximum flowrate and immersionnozzle depth, and partially affected by powder viscosity.

It is found to be little affected by mold meniscus velocity and immersionnozzle shape.

Key words : continuous casting; steelmaking; inclusion; powder entrapping phenomenon voltex; water-model experiment.

1. 緒 言

近年、容器用薄板に代表されるような、鋼板の高清浄化の要求レベルは極めて高く、また今後もさらに強まる傾向にあるため、その対策が急務である。製品欠陥の原因となる鑄片内に存在する介在物の起源は、取鍋耐火物や転炉精錬または二次精錬の溶融スラグ、脱酸生成物等のように鑄造時にあらかじめ溶鋼中に存在しているものと、連鑄パウダーのように鑄造時に鑄型内溶鋼中に巻き込まれるものに大別できる。たとえば、容器用薄板のフランジクラックの欠陥部からは主に連鑄パウダーの巻込みによると考えられる介在物が多く認められている¹⁾。

鑄型内への連鑄パウダーの巻込みの原因には①浸漬ノズルからの溶鋼吐出流が鑄型端部を経てメニスカス近傍の表面流となり、この表面流によりパウダーを巻き込む場合（以後、削込みと称す）⁴⁾⁷⁾、②浸漬ノズル内に吹き込まれた断気用アルゴンが鑄型内に吐出し、鑄型内を浮上する際にメニスカス部を乱すことによるパウダーの巻込み、③浸漬ノズル近傍に発生する渦により溶鋼中に巻き込まれたパウダーが浸漬ノズルの吐出口位置まで引

き込まれ、さらに吐出流により引きちぎられることによる巻込み、等に分けられる¹⁾。

一方、連鑄パウダー巻込みを低下させる方法としては、従来より鑄型時の鑄片の引抜き速度を低下させて浸漬ノズルからの吐出流速を低下させる方法、ノズルの吐出口形状を変更する方法⁸⁾、鑄型内に電磁力を使用して各位置の溶鋼流速を低下させる等の方法が試みられてきている²⁾³⁾。

しかしながら、鑄型内へのパウダーの巻込みを抑制して高清图度鋼を安定して製造するためには、上記のパウダー巻込みの原因を分離し、さらにおのおの因子における寄与を定量的に評価しなければならない。

そこで、本研究ではパウダーの巻込みの原因の一つである浸漬ノズル近傍に発生する渦の影響に着目した水モデル実験を行い、発生する渦の深さを支配する因子についての検討を行った。

2. 実験方法

Fig. 1 に本検討に使用した水モデル実験装置の概要を示す。実験は溶鋼の代わりに水、連鑄パウダーの代わ

昭和 63 年 11 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 10 月日本学術振興会製鋼第 19 委員会第 3 分科会にて発表
平成 3 年 9 月 6 日受付 (Received Sep. 6, 1991)

* 新日本製鉄(株)八幡技術研究部 (Yawata R & D Lab., Nippon Steel Corp., 1-1Tobihata Tobata-ku Kitakyushu 804)
*2 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp.)

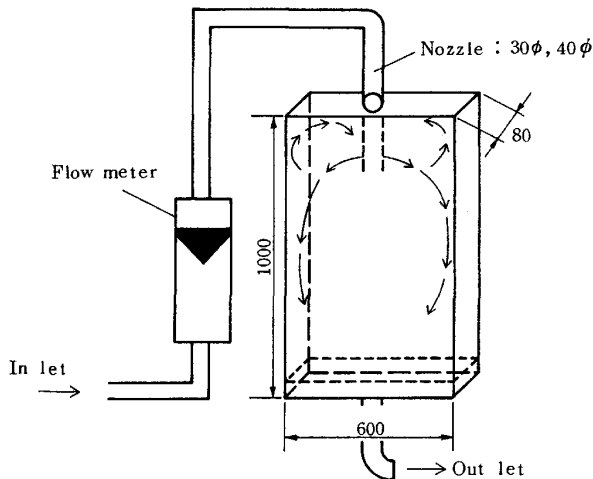


Fig. 1. Experimental apparatus.

りに油を用いる水-油系で行い、浸漬ノズル近傍に発生する渦の深さに及ぼす油の密度、粘度、浸漬ノズルからの吐出流速、ノズル外径、浸漬深さ、鋳型幅の影響を調べた。

実験に使用した水モデル実験装置は 80 mm (T) × 600 mm (W) × 1000 mm (L) のアクリル樹脂製の装置であり、鋳型幅の影響を調査する場合にはこの水モデル内に遮蔽板を設置して幅を変更した。さらに装置底部に設置した排水口からの流出の影響を抑えるために装置底部より 60 mm の位置にステンレス網製の緩衝板を設置した。また、浸漬ノズルは外径 30 mmφ、40 mmφ の 2 種類のアクリル樹脂製のパイプを用い、吐出角は下向き 30°、吐出口形状は 20 mmφ と 20 × 30 mm □ の角型の 2 種類を用いた、さらに吐出流が当初の設定角とおりに吐出し、上下に振動しないように、吐出部にあらかじめ効果を確認して決定した長さ 30 mm のアクリル樹脂製のガイドを接着した。

また、水は水道水を使用しローターメーターにより供給速度が一定となるように調整した。さらに、今回の実験においてはノズル内は水で充満し、ノズル内に発生する二次メニスカスの影響については無視できるようにした⁶⁾。

装置内の流速の測定は吐出流速についてはピトー管を用い、メニスカス流速は鋳型内に供給したトレーサの軌跡を高速ビデオにより観察することによっておのおの測定した。発生する渦の深さの測定は 3 min 目視観察を行い、その条件における最大渦深さを測定した。

実験はまず浸漬ノズル近傍に発生する渦の深さに関する操作条件の影響として、①水の供給流量と浸漬ノズルの外径を変更した実験を行い浸漬ノズル近傍に発生する渦の深さに関する影響を調査した。次に、②浸漬ノズル

Table 1. Experimental condition.

Operating condition	Oil property	$\rho_p: 860 \sim 900$ $\mu_p: 2.18 \times 10^{-3} \sim 16.2 \times 10^{-3}$	(kg/m ³) (Pa·s)
	Feeding rate	$1 \times 10^{-4} \sim 6.67 \times 10^{-4}$	(m ³ /s)
	Nozzle depth	30 ~ 100	(mm)
Model size	Model size	80 (T) × 400 ~ 600 (W) × 1000 (L)	(mm)
	Nozzle conditions	Outer diam.: 30 ~ 40 Outlet size: 20φ, 20 (W) × 30 (L)	(mm) (mm)

Table 2. Oil property.

	Viscosity (Pa·s)	Density (kg/m ³)
I	16.2×10^{-3}	9.0×10^2
II	5.4×10^{-3}	8.8×10^2
III	2.2×10^{-3}	8.6×10^2

の浸漬深さを変更した実験を行い、渦の深さに及ぼす浸漬深さの影響を調査した。一方、上述した実験方法では同一の吐出口形状の浸漬ノズルを使用しているために水の供給流量と浸漬ノズルからの吐出流速とが比例関係にあったと考えられる。同様に、鋳型サイズが同一であるために吐出流量とメニスカス流速とが比例関係にあると考えられる。そのために、発生する渦の深さに対する水の供給流量と吐出流速やメニスカス流速との影響が分離できていなかった。そこで、上述の実験において渦の深さに関する影響がラップしていると考えられる項目について影響の分離を行うために、③水の供給流量と吐出流速との影響を分離する目的で、浸漬ノズルの吐出口を 20 mmφ のものと 20 × 30 mm □ の 2 種類を用いて、水の供給量に対するノズルからの吐出流速の影響を変化させた実験を行った、④水モデル実験装置の幅を 600 mm から 400 mm まで変更させて同一の供給流量に対するメニスカス流速の寄与を変化させた実験を行った。これ以外に、通常連続鋳造においては鋳型内への連鋳パウダーの巻き込みを防止する方法としてパウダーの粘性などの物理的性質の変更がなされることがある。そこで、⑤ノズル近傍に発生する渦の深さに対する巻き込まれる油の物理的性質の影響を調査するために、粘性や密度の異なる三種類の油を使用して実験を行った。実験条件を Table 1 に、使用した油の物性を Table 2 に示す。

3. 実験結果

3.1 渦深さに及ぼす水の供給流量、浸漬ノズル外径、浸漬深さの影響

浸漬ノズル近傍に発生する渦の深さに関する水の供給流量と浸漬ノズル外径の影響を調査した結果を Fig. 2 に示す。供給流量が増加するに従いノズル近傍に発生する渦の深さは深くなっている。Fig. 2 の直線の勾配は

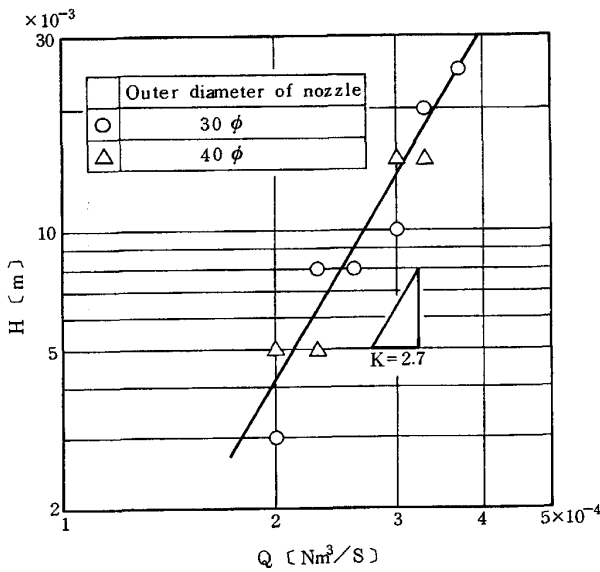


Fig. 2. Relation between voltex depth H and water-feeding rate Q .

2.7であり、渦深さとの関係は(1)式の形で表すことができる。

$$H = C_1 \cdot Q^{2.7} \dots\dots\dots (1)$$

なお、図中に浸漬ノズルの外径が 30 mmφ の場合と 40 mmφ の場合と併せて示してあるが、発生する渦の深さに関しては浸漬ノズル外径の影響は、今回の実験範囲では認められなかった。

この結果により浸漬ノズル近傍に発生する渦によるパウダーの巻込みには供給流量の影響が大きいことが推定される。

次に、鑄型、ノズルの条件を同一にして、浸漬深さを变化させた場合の渦深さと水の供給流量との関係を Fig. 3 に示す。ここで、浸漬深さとはメニスカス部から浸漬ノズル吐出口中心部までの距離を示す。Fig. 3 から浸漬深さを深くするに従い、同一の水の供給流量でも渦の深さは小さくなってゆくことがわかる。次に同一の水の供給流量の下での渦深さと浸漬深さとの関係を Fig. 4 に示す。図より、渦深さは浸漬深さにはほぼ反比例しており、渦深さに対する浸漬深さの影響は以下の(2)式で表せる。

$$H = C_2 \cdot L^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

3.2 渦深さに関する各種影響因子の分離

前述したように、これまでの実験では浸漬ノズルの吐出口形状が同一のものを使用しているために水の供給流量と浸漬ノズルからの吐出流速とが比例関係にあったと考えられる。同様に、鑄型サイズが同一であるために吐出流量とメニスカス流速とが比例関係にあると考えられる。そのために、発生する渦の深さに対する水の供給流

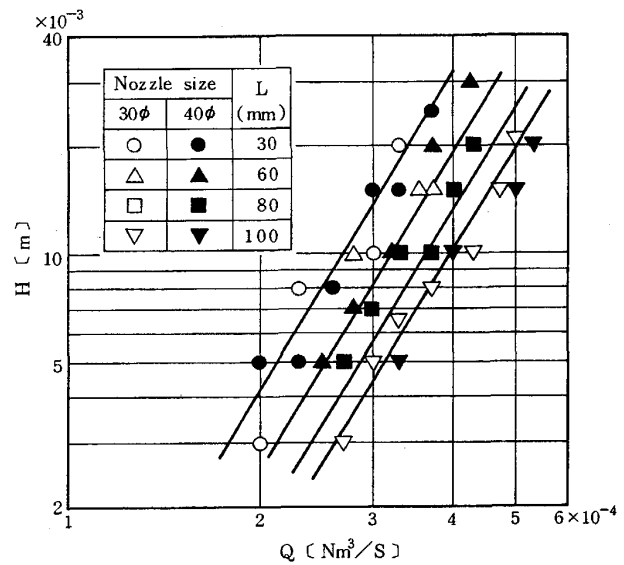


Fig. 3. Effect of nozzle-depth on voltex depth H .

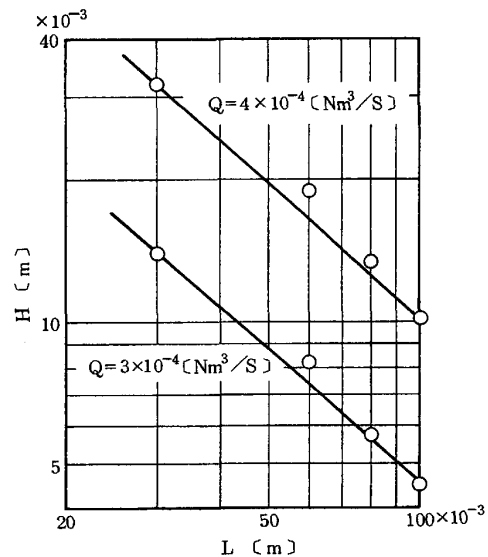


Fig. 4. Relation between voltex depth H and immersion-nozzle depth L .

量と吐出流速やメニスカス流速との影響が分離できていなかった。そこで、これらの影響を分離するため、吐出口(断面積、形状)を変更した実験を行った、結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、供給流量と渦深さとの関係の勾配はノズルを変更してもほぼ同様であるが、同一の水の供給流量の場合には吐出口形状が角型で断面積が大きい(20 x 30 □)ノズルを使用する方が、吐出口形状が円形で吐出口断面積が小さい(20 φ)ノズルを使用するよりも渦の深さは小さくなっている。ここで、各ノズルにおける水の供給流量と最大吐出流速との関係を Fig. 6 に示す。図より、今回使用した2種類のノズルでは水の供給流量と最大吐出流速とは比例関係にあり、

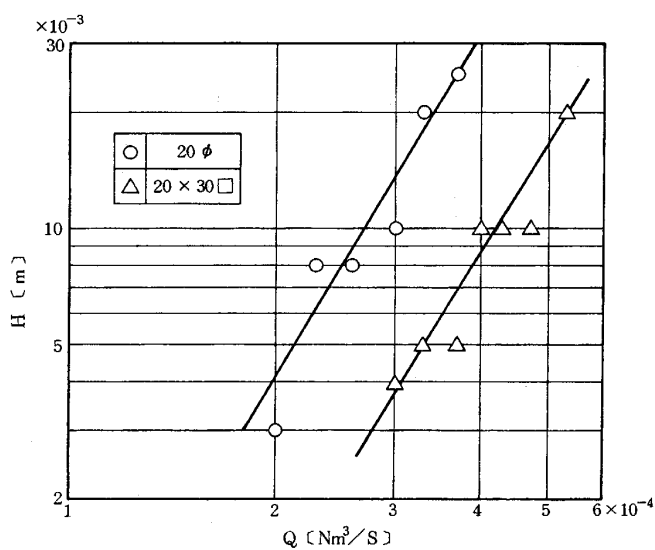


Fig. 5. Effect of nozzle-shape on voltex depth H .

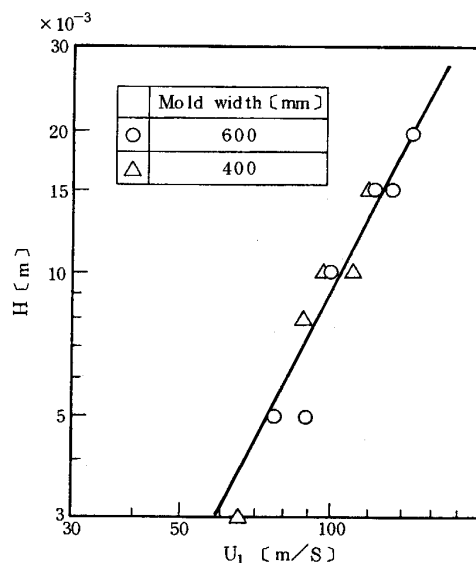


Fig. 7. Effect of maximum flow-velocity U_1 on voltex depth H .

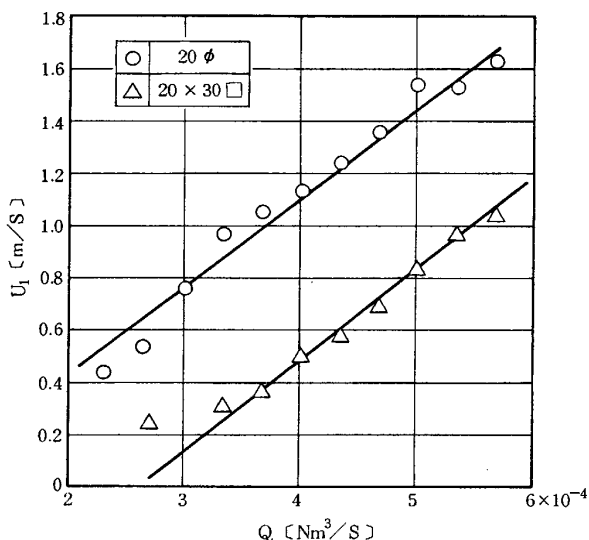


Fig. 6. Relation between maximum flow-velocity U_1 and water-feeding rate Q .

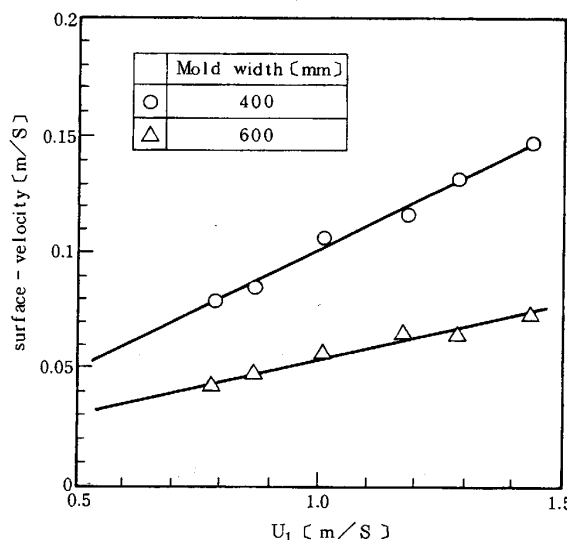


Fig. 8. Relation between surface-velocity and maximum flow-velocity U_1 .

さらに水の供給流量が同一の場合、吐出口断面積が大きいノズルの吐出流速が小さくなっていた。そこで、この2種類のノズルを使用した場合の渦深さをノズルからの最大吐出流速で整理した結果を Fig. 7 に示す。これより、吐出口形状、断面積の変更により吐出条件を変化させても、渦の深さに対してはノズルからの最大吐出流速で統一的に整理できることが明らかになった。ここで図中の直線の勾配は 2.0 であり、渦深さと吐出流速との関係は以下の (3) 式で整理できる。

$$H = C_3 \cdot U_1^{2.0} \dots \dots \dots (3)$$

次に、ノズル近傍に発生する渦の深さに及ぼすメニスカス流速の影響について検討した。実験は前述したよう

に水モデル実験装置の幅を変化させることにより吐出流量とメニスカス流速との関係を変化させて行った。Fig. 8 に水モデルの幅を変化させた場合の最大吐出流速とメニスカス流速との関係を示す。吐出流速が同一でも水モデル装置の幅を縮小するとメニスカス流速は約2倍近くまで増加している。この2種類の鋳型幅について、渦深さと最大吐出流速との関係を調査して Fig. 9 に示す。図より、鋳型幅を変更してメニスカス流速の寄与を変化させてもノズル近傍に発生する渦の深さは吐出流速で統一的に整理できる。従って、ノズル近傍に発生する渦の深さに関してはメニスカス流速による寄与は小さいと考えられる。

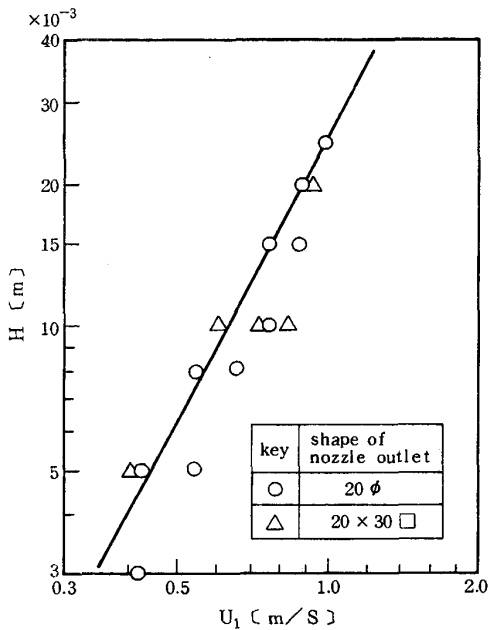


Fig. 9. Effect of mold-size on vortex depth H.

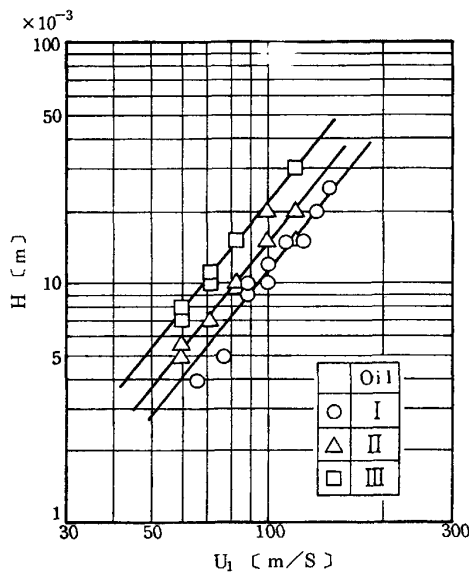


Fig. 10. Effect of oil property on vortex depth H.

3.3 油の粘性、密度の影響

粘性、密度の異なる3種類の油を用いて渦深さに及ぼす影響を調査した結果を Fig. 10 に示す。図より、粘性の高い油を用いる方が渦の深さは小さくなっている。しかしながら、その影響は上述した吐出流速や浸漬深さに比べると小さい。

4. 渦深さのエネルギーバランスからの検討

浸漬ノズルからの吐出流により、溶鋼表面のパウダーが引き込まれる現象についてエネルギーバランスより以下に考察する。渦無し流れで粘性が無視できる流れを仮

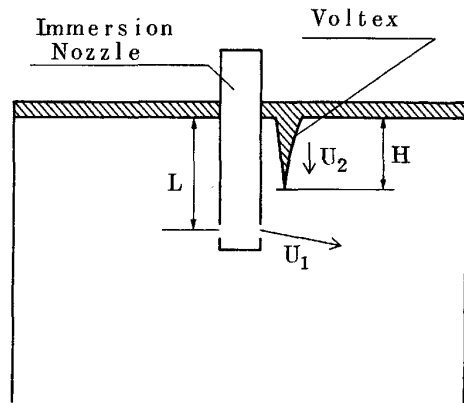


Fig. 11. Schematic diagram of powder sacked phenomena.

定すると、流体部には(4)式で示されるベルヌイの式が成立する。

$$P/\rho_l + U^2/2 + gL = \text{const} \dots\dots\dots(4)$$

鑄型表面のパウダーが引き込まれる現象を模式的に Fig. 11 に示す。ここで、装置内における水-油の界面に作用する静圧 P は等しく、発生する渦の深さには流動によって生じる動圧のみが影響すると考えられる。そこで浸漬ノズル近傍に発生する渦により引き込まれる場所の下向きの流速を U₂ として(4)式を適用すると、渦の深さと吐出流速との間には以下の(5)式が成立する。

$$\Delta\rho gH = -1/2\rho_l U_2^2 \dots\dots\dots(5)$$

$$(\Delta\rho = \rho_l - \rho_p)$$

ここで、パウダーを引き込む流速 U₂ は浸漬ノズルからの吐出流により駆動されるとすると、U₂ は(6)式の2次元噴流の式で表される⁵⁾。

$$U_2 = \alpha U_1 / L^{1/2} (\alpha \text{ は定数}) \dots\dots\dots(6)$$

(6)式より渦の深さに及ぼすノズルからの吐出流速、浸漬深さの影響は(7)式で表される。

$$\Delta\rho H = (\rho_p \alpha^2 / 2g) (U_1^2 / L)$$

$$= C_4 \cdot U_1^2 / L \dots\dots\dots(7)$$

$$(C_4 = \rho_p \alpha^2 / 2g)$$

つまり、本結果よりノズル近傍に発生する渦の深さは、浸漬ノズルからの吐出流速の2乗に比例し浸漬深さに反比例すると考えられる。これらの、渦深さに及ぼす各種要因の寄与は前節までの実験により得られた結果と良い対応を示している。この結果に基づいて同一の油を使用した場合の実験結果を整理し Fig. 12 に示す。図より、渦の深さの実験結果は(7)式で表される関係で整理できる。

さらに、実験により影響が見られたパウダー粘性を考慮すると渦深さに対する影響は(8)式で示される。

$$\Delta\rho H = C_4 (U_1^2 / L) F(\nu) \dots\dots\dots(8)$$

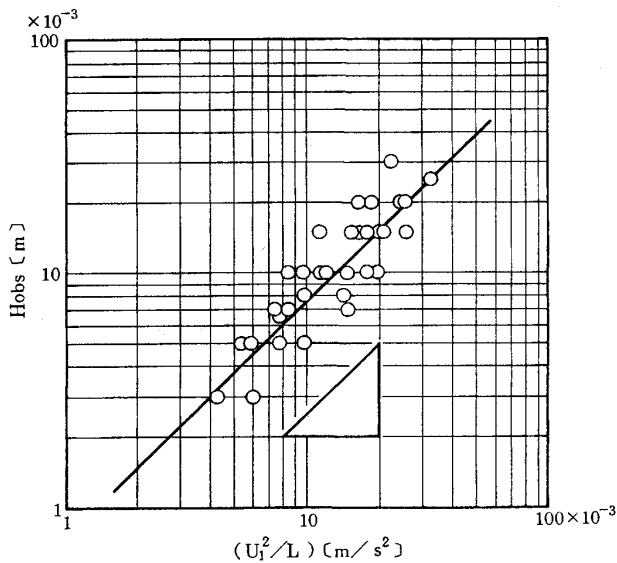


Fig. 12. Effect of casting-condition on vortex depth H at same oil property (No. I).

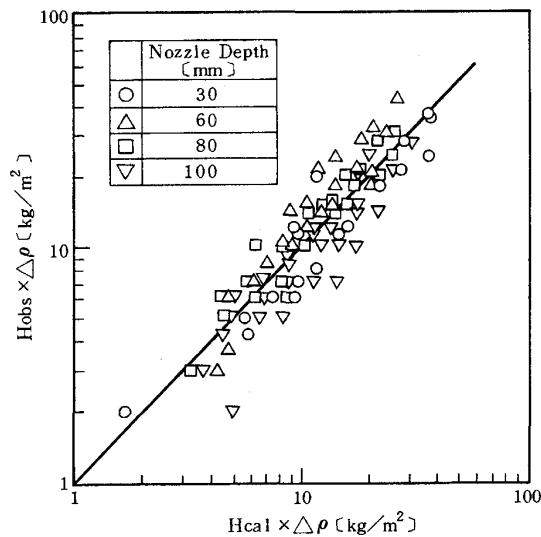


Fig. 13. Effect of casting-condition on vortex depth H .

ここで、渦深さに対するパウダー粘性の影響を回帰計算により算出した結果、渦深さは動粘度の0.3乗に比例しており、渦の深さには巻き込まれるパウダーの粘性も影響することが明らかになった (Fig. 13)。しかしながら、その寄与は本実験では吐出流速や浸漬深さほど顕著には現れなかった。

5. 結 論

鋳型内浸漬ノズル近傍に発生する渦による連鋳パウダーの巻込みを低減するために、水モデル実験により各種条件の寄与を調査した。その結果以下のことが明らかになった。

1) 浸漬ノズル近傍に発生する渦の深さは同一の連鋳パウダーを使用する場合にはノズル形状や鋳型サイズには影響されず、最大吐出流速と浸漬深さで統一的に整理できる。

2) 渦の深さに対するメニスカス流速の影響は小さい。

3) パウダー粘性の影響では、粘性が高い方が渦の深さは小さくなる傾向にあるが、今回の実験ではその寄与は吐出流速や浸漬深さなどと比較すると非常に小さい。

記 号

$F(\nu)$: 渦深さに及ぼす粘性項

g : 重力加速度 (m/s^2)

H : 渦深さ (mm)

L : 浸漬深さ (mm)

(メニスカスから吐出口中央までの距離)

Q : 供給流量 (m^3/s)

U : 流速 (m/s)

U_1 : 最大吐出流速 (m/s)

U_2 : 渦発生部の下向き流速 (m/s)

C_1, C_2, C_3, C_4 : 比例係数

ρ_p : 油の密度 (kg/m^3)

ρ_l : 水の密度 (kg/m^3)

μ_p : 油の粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

ν : 油の動粘度

文 献

- 1) 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 (昭和62年5月)
- 2) 永井 潤, 児玉正範, 宮崎容治, 日和佐章一, 児島信次, 村田賢二: 鉄と鋼, **68** (1982), S270
- 3) 鈴木健一郎, 村田賢治, 中西恭二, 児玉正範, 児島信次, 宮崎容治: 鉄と鋼, **68** (1982), S920
- 4) 浅井滋生: 第100・101回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1984), p. 65
- 5) 野村安正: 噴流 (1981) [森北出版]
- 6) 今村 晃, 瀧川家光, 今村 茂, 沖森麻佑巳, 草野昭彦: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 1258
- 7) 今村 晃, 瀧川家光, 今村 茂, 沖森麻佑巳, 草野昭彦: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 1259
- 8) 北川逸朗, 西原良治, 瀧川家光, 小西淳平, 野元一仁, 田中宏幸, 今村 晃: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 261