

連铸铸型内溶鋼流動の水力学的検討

今村 晃*・草野 昭彦*²・森玉 直徳*³A Hydrodynamical Analysis of the Molten Steel Flow
in the Continuous Casting Mold

Akira IMAMURA, Akihiko KUSANO and Naonori MORITAMA

Synopsis :

Mold powders are easily entrapped in the molten steel and become one of the main sources of the troubles such as frange cracks in DI cans. It is important to know how the mold powders are entrapped and how to avoid these. In order to clarify the phenomena, a hydrodynamical analysis which treated the molten steel flow from the tundish to the mold has been made. The results of such an analysis were checked by some tests which were accomplished by a water model and by the YAWATA No. 3-CC plant. This can be concluded as follows :

(1) The analytical surface velocities and experimental ones show a good fit.

(2) The analytical surface velocities can be used as one of the most useful quality control parameters to classify the grades of the products.

Key words : continuous casting; non-metallic inclusions; clean steels; hydrodynamics; quality control.

1. 緒 言

品質要求レベルの厳格化や他素材との競合激化により鋼板に求められる清浄度は年々厳しくなっている。とりわけ飲料缶に代表される深絞り用缶 (DI 缶) では 100 μm 以下の微細な非金属介在物さえも製缶時の割れ欠陥原因となる。この結果、製鋼工程における種々の対策にも関わらず清浄化問題はいまだ解決されず、最善策としてパウダー巻込みの少ない低速铸造操業を生産性を犠牲にしつつ実施しているのが実情である。

そこで今回溶鋼清浄性向上のため不可欠な MD (モールド) での溶鋼流動を解明するため TD (タンディッシュ) から MD にかけての溶鋼流動を水力学的に解析し、水モデル試験および実機での確認試験を行った。

2. 非金属介在物の実態

2.1 非金属介在物の組成と大きさ

代表的な製品欠陥から検出された介在物は、アルミナ系介在物、アルミナに Ca, Mg が混入した転炉スラグ系介在物、Na が検出された MD パウダー系介在物に分類できる。

介在物は一般に磁粉探傷欠陥個数 (MT 値) で評価されているが、当該欠陥部を検鏡観察したところ介在物の大きさは 100 μm から 200 μm を主体とし、数十 μm から数百 μm の広範囲に及び組成別にはパウダー系介在物の比率の高いことがわかった。

2.2 铸造速度与パウダーの巻込みの関係

スラグ改質技術等の採用により MT 値は大幅に減少した。しかし铸造速度が 1.4 m/min から 1.6 m/min に増加すると MT 値は 5 倍に増加し铸造速度との関係は依然として認められる¹⁾。これは①铸造速度の上昇と共に浸漬ノズルからの吐出流速が速くなり MD 壁に衝突後上下に分岐した溶鋼流速も増加する、②分岐後の流速の増加によりパウダー溶鋼界面でのパウダー削り込みや渦発生によるパウダーの巻込みが起りやすくなるためである²⁾。このようにパウダー系介在物は MD 内溶鋼流動と深く関わっており、パウダー巻込み減少には溶鋼挙動の解明が重要である。

3. 水力学に基づく溶鋼流動の解析

MD 内溶鋼流動を解明するに当たり水力学から得られる知見を整理してみる。TD から出た溶鋼の流速が IN

昭和 63 年 11 月本会講演大会にて発表 平成 3 年 4 月 30 日受付 (Received Apr. 30, 1991)

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

*² 新日本製鉄(株)光製鉄所 (Hikari Works, Nippon Steel Corp.)

*³ 新日本製鉄(株)光製鉄所 (現: 日本重化学工業(株)) (Hikari Works, Nippon Steel Corp., Now Japan Metals & Chemicals Co., Ltd.)

(浸漬ノズル) を経由して MD に至り減衰する過程は、位置エネルギーの変化に基づき、次の三つに大別できる。

領域Ⅰ：TD～IN 内メニスカス位置

重力により加速される IN 内での落下過程

領域Ⅱ：IN 内メニスカス位置～吐出口

IN 先端部吐出口付近で分岐減衰する過程

領域Ⅲ：IN 吐出口～MD 内

IN より吐出した流れが MD 内で減衰する過程

領域Ⅰでは「IN 内が溶鋼で充満しているか、否か。」により水力学の取扱いが異なるので、IN 内に空間がある場合(重力が支配的な因子であるので自由落下流と呼ぶ)とない場合(以下、充満流と呼ぶ)に分けて整理した。各記号の説明について巻末にまとめる。

3.1 TD から MD に至る溶鋼流動現象の解明

3.1.1 IN 内自由落下流の場合の流動

TD から MD に至る溶鋼流動を模式的に Fig. 1 に示す。IN 内の空間が存在するため水学的には、

- ①TD から SN (スライディングノズル) 部
- ②SN から IN 内湯面
- ③IN 内湯面から IN 吐出口

の三つに大別し解析する。

1) TD から SN までの流動

この領域は SN 部で絞られた自由落下流と考えられるので SN 出側流速 v_1 は SN 部に加わる有効 TD ヘッ

ド $H_0 (= h_{TD} + l_1 - P_{IN}/\rho)$ を用いて、

$$v_1 = c\sqrt{2gH_0} \dots\dots\dots(1)$$

となる。ここで c は開口部からの流出係数であり、SN 開度により大きく変化する。

2) SN から IN 内湯面までの流動

SN から速度 v_1 で下ノズルに入った流れは IN 内湯面につくまで重力で加速されながら落下していく。落下距離は $(l_2 + l_3 + P_{IN}/\rho)$ と表され、IN 内湯面での流速 v_3 は (2) 式となる。

$$v_3 = \sqrt{v_1^2 + 2g(l_2 + l_3 + P_{IN}/\rho)} \dots\dots\dots(2)$$

3) IN 内湯面から IN 先端分岐部に至るまでの流動

IN 内湯面に到達した流れは周りの流体を巻き込みながら流下し IN 先端部で分岐する。従って流れは湯面に到達した時の落下流の断面積 a_3 から IN 内断面積 A_2 に拡がる過程とその後の IN 先端での分岐過程とに分けられる。ここで断面積拡大損失係数を ζ_3 、分岐損失係数を ζ_4 とすればこの領域におけるエネルギー保存式は、

$$v_3^2/2g = v_4^2/2g + \zeta_3 v_3^2/2g \dots\dots\dots(3)$$

$$v_4^2/2g = v_5^2/2g + \zeta_4 v_4^2/2g \dots\dots\dots(4)$$

となり³⁾、IN 吐出流速 v_5 は次式で表される。

$$v_5 = \sqrt{(1-\zeta_3)(1-\zeta_4)} \times v_3 \dots\dots\dots(5)$$

ここで ζ_3 は面積比 (a_3/A_2) の関数として、

$$\zeta_3 = 1.1 \times (1 - a_3/A_2)^2 \dots\dots\dots(6)$$

となる³⁾。また、 ζ_4 は流体の IN からの実際の吐出角 θ により決定される⁴⁾。

(1)、(2)、(5) 式より IN 吐出速度 v_5 は、

$$v_5 = \sqrt{2gH_i} \sqrt{(1-\zeta_3)(1-\zeta_4)} \dots\dots\dots(7)$$

$$H_i = c^2 H_0 + (l_2 + l_3 + P_{IN}/\rho)$$

と表すことができる。

3.1.2 IN 内充満している場合の流動

IN 内充満流の場合、SN 部で流れを分離できず、

- ①TD から MD メニスカスレベル
- ②MD メニスカスレベルから IN 先端分岐部

の2領域に分けて解析する。

1) TD から IN 内湯面までの流動

エネルギー保存式は TD から IN 内湯面までのトータルヘッドを $H_1 (= h_{TD} + l_1 + l_2 + l_3)$ とすると、

$$H_1 = (\zeta_0 + f l_1/D_1 + \zeta_1) v_0^2/2g + (\zeta_0 + f l_2/D_1) v_1^2/2g + (f l_3/D_2) v_2^2/2g + v_3^2/2g \dots\dots\dots(8)$$

となる。また IN 内で質量は保存されるので(上ノズル～下ノズル)

$$v_0 = v_1 \dots\dots\dots(9)$$

(下ノズル～IN 入側)

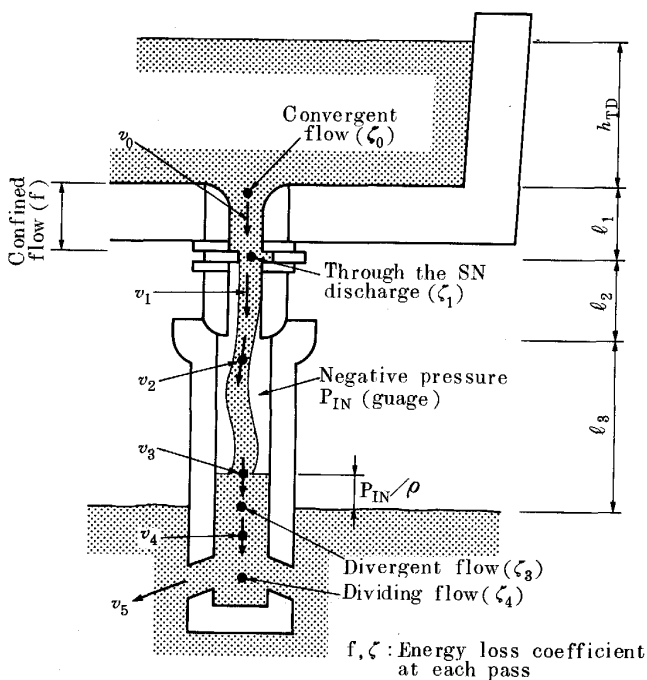


Fig. 1. Flow model between TD & MD (potential flow).

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \dots\dots\dots(10)$$

(IN 内)

$$v_2 = v_3 = v_4 \dots\dots\dots(11)$$

となる。(9)から(11)式を(8)式に代入し IN 内湯面における流速 v_3 を求めると(12)式となる。

$$v_3 = \sqrt{2gH_1 / \sqrt{\beta\alpha^2 + fl_3/D_2 + 1}} \dots\dots\dots(12)$$

$$\alpha = A_2/A_1$$

$$\beta = \zeta_0 + \zeta_1 + \zeta_2 + \{f(l_1 + l_2)/D_1\}$$

2) IN 先端分岐部

分岐損失係数 ζ_4 を用いると IN 内が自由落下流の場合と同様に IN 吐出流速 v_5 は(13)式で表される。

$$v_5 = \sqrt{1 - \zeta_4} \times v_3 = \sqrt{1 - \zeta_4} \times \sqrt{2gH_1 / \sqrt{\beta\alpha^2 + fl_3/D_2 + 1}} \dots\dots\dots(13)$$

ここで(13)式中の定数として土木設計に用いられる値³⁾⁴⁾を代入すると、

$$\beta = 0.05 + 15.0 + 0.11 + 0.22$$

$$fl_3/D_2 = 0.15 \text{ (マンニングの式)}$$

となる。従って微小項を省略し、

$$v_5 = \sqrt{1 - \zeta_4} \times \sqrt{2gH_1 / \sqrt{15\alpha^2 + 1}} \dots\dots\dots(14)$$

と簡略化できる。

3.2 MD 内における溶鋼流動現象の解明

流速 v_5 (最大流速 v_{5max}) で IN から吐出した流れは MD 内で周りの流体を巻き込みながら減衰していく。この領域での現象は Fig. 2 に示すごとく四つの部分に分けて考えることができる。

3.2.1 IN 吐出口から MD 短片に至る領域

IN 吐出流は自由噴流となり RAJARATNAM⁵⁾ によれば最大流速は通過距離に反比例して減衰する。

$$v_{x1max} = v_{5max}(x_1/b_1 d_0)^{-1} \dots\dots\dots(15)$$

ここで b_1 はポテンシャルコア長さを示し RAJARATNAM は軸対称噴流に関し、 $b_1 = 6.3$ の結果を得ている。

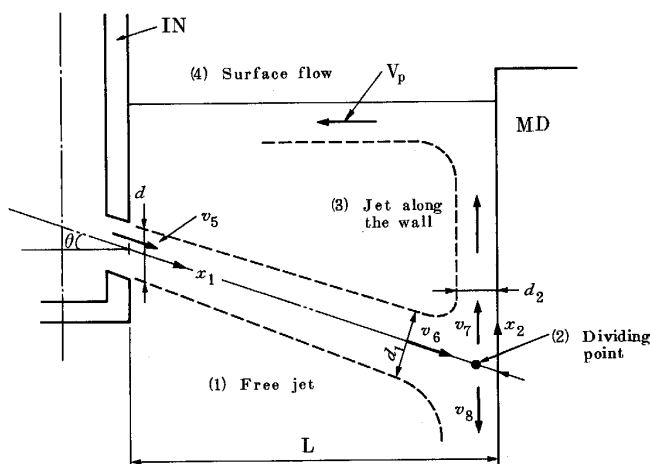


Fig. 2. Flow model in the MD.

3.2.2 短片との衝突による分岐

この領域では IN 吐出口からモールド短片に至るまで自由噴流として減衰してきた流れが上下に分岐され、ベルヌーイの定理より流速は一定で質量のみ分岐される¹⁶⁾。

$$v_6 = v_7 = v_8 \dots\dots\dots(16)$$

$$d_2 = d_1 = (1 - \sin \theta)/2 \dots\dots\dots(17)$$

また、質量保存式と(15)式より次式が得られる。

$$(\pi d_0^2/4) \times v_5 = (\pi d_1^2/4) \times v_6 \dots\dots\dots(18)$$

$$v_{6max} = v_{5max}(L_0/b_1 d_0)^{-1} \dots\dots\dots(19)$$

流速分布は分岐の前後で大きく変化しないので、

$$v_6/v_{6max} = v_7/v_{7max} \dots\dots\dots(20)$$

式(16), (18), (19), (20)を連立させて解くことにより次式を得る。

$$v_{7max} = v_{6max} = v_{5max}(L_0/b_1 d_0)^{-1} \dots\dots\dots(21)$$

$$d_1 = d_0 \sqrt{v_5/v_6} = \sqrt{L_0 d_0/b_1} \dots\dots\dots(22)$$

3.2.3 分岐から短片に沿って上昇する領域

短片に沿った流れは壁面付着噴流となり SFORZA⁷⁾ によれば最大流速は通過距離の 0.5 乗に反比例して減衰する。

$$v_{x2max} = v_{7max}(x_2/b_2 d_2)^{-0.5} \dots\dots\dots(23)$$

3.2.4 モールド表面 (メニスカス近傍)

短片から反転してきた流れはモールド表面を IN の方向に向かって流れるが、噴流としての深さ方向の速度分布は平坦化し、また溶融パウダーによる溶鋼流速粘性減衰効果も小さいので表面流速は一定と考えた。

3.2.5 IN 吐出口部の最大流速と平均流速の関係

IN 内の溶鋼流動解析はエネルギー収支に基づき平均流速について行った。一方モールド内の解析では最大流速の減衰に力点をおいて議論をした。従って溶鋼流動を一元的に述べるには、平均流速と最大流速の二つの物理量を結び付けることが必要である。

そこで IN 吐出部において最大流速 v_{5max} と平均流速 v_5 の比 (v_{5max}/v_5) を次式で定義する。

$$\gamma = v_{5max}/v_5 \dots\dots\dots(24)$$

一般に速度分布が放物型であれば、 $\gamma = 2$ である。

3.3 TD から MD に至る流動のまとめ

以上の結果をまとめるとモールド内での溶鋼流速は (1) IN 吐出口からモールド壁面衝突まで

$$v_{x1max} = v_{5max}(x_1/b_1 d_0)^{-1} \dots\dots\dots(25)$$

(2) モールド壁面衝突部からモールドメニスカスまで

$$v_{x2max} = v_{5max}(L_0/b_1 d_0)^{-1} \times (x_2/b_2 d_2)^{-0.5} \dots\dots(26)$$

(3) モールド表面流

$$v_{maxsurf} = v_{5max}(L_0/b_1 d_0)^{-1} \times (L_1/b_2 d_2)^{-0.5} \dots\dots\dots(27)$$

ここで v_{5max} は次式で与えられる。

• 自由落下流 :

$$v_{5max} = \sqrt{2g(c^2 + l_2 + l_3 + P_{IN}/\rho)} \times \sqrt{(1-\zeta_3)(1-\zeta_4)} \times \gamma \dots\dots\dots(28)$$

• 充満流 :

$$v_{5max} = \sqrt{2gH_1} \times \sqrt{1-\zeta_4} / \sqrt{1-\alpha^2\zeta_1} \times \gamma \dots(29)$$

以上のことから IN 先端での流体の吐出角 θ 、速度比 γ 、分岐損失係数 ζ_4 および ζ_3 、そして SN 部での圧力損失係数 ζ_1 がかわれば各操業状況におけるモールド内各点での最大流速は算出可能であることがわかった。

4. 水モデル実験による流動現象解明

4.1 水モデル実験条件

4.1.1 水モデル実験設備

水力学に基づく知見確認のため水モデル実験を行った。設備概略図を Fig. 3 に示す。設備寸法は Re 数および Fr 数を合わせるため実機 1/1 モデルとし、また IN 内に空間がある場合とない場合 (充満流) の流動状況を観察するため IN 側面に貫通孔を穿きこれに結がるストップバルブの開度を調整し IN 内に吹き込むガス量を変化させ内圧をコントロールした。ただし、MD 内減衰挙動は、ガスを含む流れの低速域での測定精度が極端に悪化するため充満流の測定結果を用いて推定した。

4.1.2 水モデル実験での鑄造条件

水モデル実験の鑄造条件は、鑄型厚み 200 mm × 幅 1250 mm 一定とし、鑄造速度を 0.25 m/min から 1.60 m/min まで 6 水準変化させた。IN 内はガス吹込み有無の 2 水準とし、ノズル吐出角は下向き 15° を使用した。

4.1.3 流速測定方法および測定位置

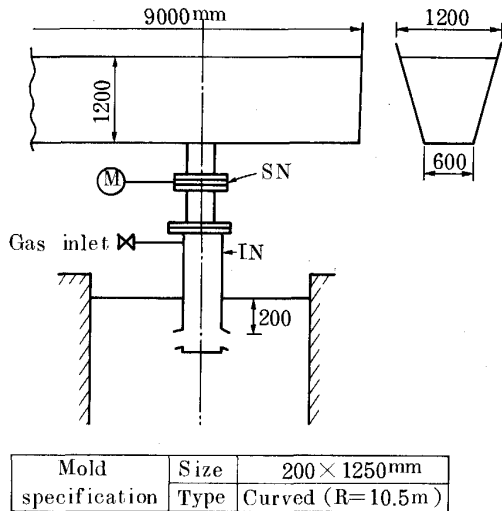


Fig. 3. Schematic view of the experimental apparatus.

流速測定位置は IN 内で 2 点、モールド内で 31 点 (Fig. 10 中の流速ベクトル参照)、計 33 点とした。IN 内の流速はスペースの制約から高速度ビデオ撮影により測定を行い、モールド内では 3 次元探針式電磁流速計を用いた。解析に当たっては時間的変動によるばらつきをなくすため、高速度ビデオ撮影の場合は 3 回の測定の平均値を、電磁流速計の場合は 5 min の測定データの最頻値を採用した。

4.2 水モデル実験結果ならびにその考察

4.2.1 IN 内溶鋼流動

1) IN 内充満流の実験結果

IN 内が充満流の場合の流速測定結果を Fig. 4 に示す。鑄造速度 $V_c = 0.50$ m/min と 1.60 m/min のいずれにおいても IN 内流速はほぼ一定であり、前項で検討した (11) 式に一致している。次いで IN 吐出流速 v_5 は約 1/2 に減速されている。

2) IN 内自由落下流の実験結果

IN 内が自由落下流の場合の流速測定結果を Fig. 4 に併せ示す。鑄造速度 $V_c = 0.75$ m/min と 1.30 m/min の場合下ノズルから出た流れは IN 内湯面まで落下加速される。しかし $V_c = 1.60$ m/min の場合は逆に減速される現象が観察された。次いで IN 吐出流速 v_5 は約 1/3 に減速されている。

3) IN 内溶鋼流動の考察

i) 下ノズル出側流速

前項の水力学的検討では下ノズル出側流速は (1) 式および (11)、(12) 式により与えられ、

• 自由落下流 :

$$v_2 = \sqrt{2g(c^2 H_0 + l_2)} \dots\dots\dots(30)$$

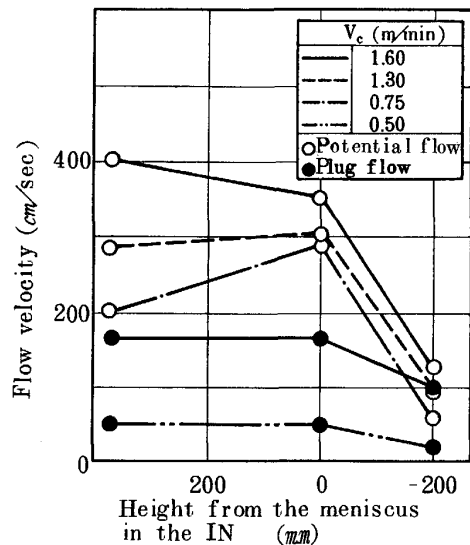


Fig. 4. Flow velocity in the IN.

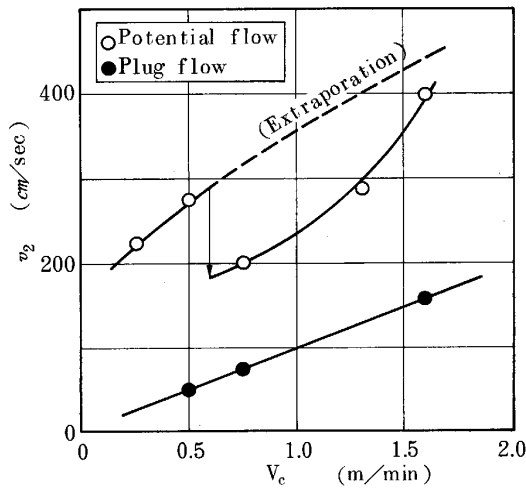


Fig. 5. Relation between flow velocity at the exit of the upper nozzle (v_2) and casting speed (V_c).

• 充滿流 :

$$v_2 = \sqrt{2gH_1} / \sqrt{1 + \alpha^2 \zeta_1} \dots\dots\dots(31)$$

となる。ここで試験条件は $P_{IN} = 0 \text{ kg/cm}^2 (G)$ である。下ノズル出側流速の計算値と実験値を対比させ Fig. 5 に示す。充滿流の場合計算値と実験値が良く一致しており、SN 開度を調節し圧力損失を変化させることにより流速を制御し V_c に見合った下ノズル出側流速 v_2 が得られている。

また自由落下流では $V_c = 0.60 \text{ m/min}$ を境に流速が大きく変化している。これは水の場合壁面との濡れ性が良いため流量が増えるとノズル壁面に付着した流れとなり減速したためである。しかし溶鋼の場合には比重および表面張力が大きい水のような壁面付着流とはなりにくいと考え、自由落下流として取り扱うことにした。従って、IN 内自由落下流においては (1) 式における流出係数 c を溶鋼換算鑄造量 $Q \text{ t/min}$ の関数として取り扱い、速度 v_2 の外挿線 (Fig. 5 中の点線) から $c (= v_1 / \sqrt{2gH_0})$ を算定し (32) 式を用いることにした。

$$c = 0.364 \times Q^{0.65} \dots\dots\dots(32)$$

ii) 下ノズル出側から IN 内湯面に至る領域

水力学の知見から v_2 と v_3 の関係は、

• 自由落下流 :

$$v_3 = \sqrt{v_2^2 + 2gl_3} \dots\dots\dots(33)$$

• 充滿流 :

$$v_3 = v_2 \dots\dots\dots(34)$$

で与えられる。充滿流においては計算値と実験値が良く一致している。一方、自由落下流では Fig. 5 同様鑄造速度が 0.60 m/min 以上で実験値が小さな値となったが、前述のごとく溶鋼では起こりにくいと考えられるの

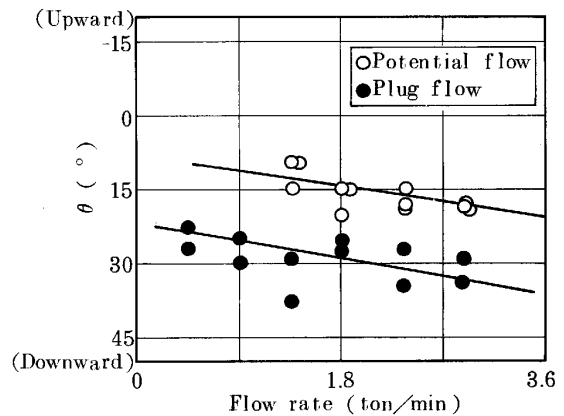


Fig. 6. Relation between the flow rate & the flowout angle at the IN (θ).

で、以下の解析では自由落下流として (33) 式を用いた。

iii) IN 湯面から IN 吐出口に至る領域

水力学の知見より v_3 と v_6 の関係は、

$$v_5 = v_3 \sqrt{(1 - \zeta_3)(1 - \zeta_4)} \dots\dots\dots(5)$$

で与えられる。ここで ζ_3 は (6) 式で与えられるが、 ζ_4 は吐出角 θ の関数になっている (前述) ので、まず水モデルにおいて吐出角を求めることにした。Fig. 6 に示すごとく溶鋼換算鑄造量 Q と吐出角度の関係は IN 内の空間の有無によって大きく異なりばらつきはあるものの Q の関数として、

• 自由落下流 :

$$\theta = 3.89 \times Q + 8.5 \dots\dots\dots(35)$$

• 充滿流 :

$$\theta = 4.44 \times Q + 21.0 \dots\dots\dots(36)$$

と近似できることがわかる。

式 (35), (36) で与えられる θ より ζ_4 を求めることができる。しかし自由落下流の場合 IN 先端における分岐直前の流速 v_4 を測定することができないので、 v_3 から v_5 に減速される過程として総括的な分岐損失係数 ζ_{35} を式 (37) で定義し、これに ζ_3 を代入し ζ_4 を推定した。

$$\zeta_{35} = 1 - (1 - \zeta_3)(1 - \zeta_4) \dots\dots\dots(37)$$

ただし、充滿流の場合 $\zeta_3 = 0$ であり $\zeta_{35} = \zeta_4$ となる。

次に計算値と実験値を対比し Fig. 7 に示す。図より IN 先端部の圧力損失係数 ζ_4 は充滿流・自由落下流に関わらず吐出角 θ の関数として、式 (38) となる。

$$\zeta_4 = 1.16 - 0.015 \times \theta \dots\dots\dots(38)$$

ただし、 $\theta \geq 10^\circ$ ($\zeta_4 < 1.0$) である。更に自由落下流の場合、 ζ_3 と ζ_4 の値を (37) 式に代入した総括的な分岐損失係数 ζ_{35} は自由落下流断面積占有率 (a_3/A_2) の関数として、

$$\zeta_{35} = 1 - 0.414 \times (a_3/A_2)^2 \dots\dots\dots(39)$$

と表される。Fig. 7 は、充滿流、自由落下流とも実験値

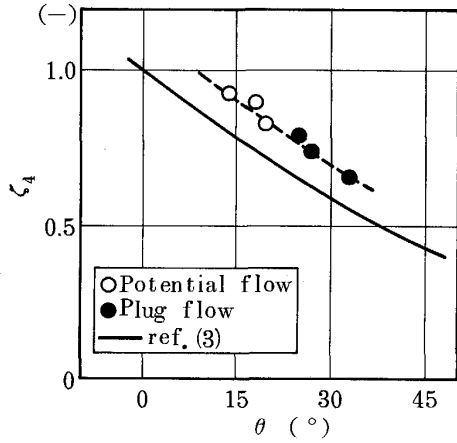


Fig. 7. Relation between the flowout angle at the IN and the coefficient of the division losses (ζ_4).

の方が計算値より約10%ほど大きくなっておりIN先端での減衰が配管抵抗として一般に使われている ζ_4 より大きいことを示している。これはIN吐出部での偏流およびIN先端凹部でのせき止め効果により激しい乱れを生じていることに起因することが推察される。

4)IN 吐出口での流速分布

Fig. 8 から吐出口における最大吐出流速 (v_{5max}) は铸造速度の増加と共に速くなっていることがわかる。従ってMD内での渦の発生を左右する溶鋼表面流速の大きさを議論するには最大流速の大きさが問題である。

Fig. 8 より最大吐出流速は、自由落下流では v_5 (平均吐出流速) の約1.56倍に比例し、充満流では低速域では v_5 の約1.33倍、溶鋼換算铸造量 Q が0.9 t/min から2.7 t/min の速度域では吐出流速の増加と共に自由落下流に漸近することがわかる。これを定式化すると、

- 自由落下流:

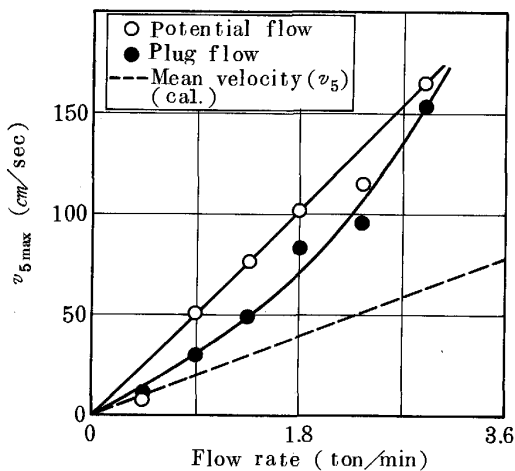


Fig. 8. Relation between the maximum velocity at the IN outlet (v_{5max}) and the flow rate.

$$v_{5max} = v_5 \times 1.56 \dots\dots\dots(40)$$

- 充満流:

$$v_{5max} = v_5 \times 1.33 \quad (Q \leq 0.9)$$

$$= v_5 \times (\delta + 1.33) \quad (0.9 < Q \leq 2.7)$$

$$= v_5 \times 1.56 \quad (2.7 < Q) \dots\dots\dots(41)$$

となる。ただし、 $\delta = 0.23 \times (Q - 0.9) / 1.8$ 。

4.2.2 MD内における流動現象

1)実験結果

IN内充満流のMD内の流速測定結果をFig. 9に示す。IN吐出流は急速に減衰し、同時に流動範囲が拡がっている。そして壁面上昇流速および表面流速は吐出流速の数分の一になっている。

Fig. 10は $V_c = 1.0$ m/min と 1.6 m/min におけるFig. 9中の断面a-a, b-b, c-cにおける流速の絶対値を比較したものである。aからb, cと進むに従い吐出流の最大流速位置は下方に移動すると共にピークの値は低くなり平均化されていく。铸造速度の増加と共に流速の絶対値は大きくなるが流速分布は同じ傾向を示している。

一方、表層100mmの範囲ではMD幅方向の流速は一定であった。従って、表層下100mmまでの深さで流速を測定すれば高い測定精度が得られると考えられるので、実湯ではこの範囲での流速を測定することにした。

2)MD内流速測定結果の考察

水力学の知見からMD内流動は

$$v = v_{5max} (x_1/b_1d_0)^{-1} (x_2/b_2d_2)^{-0.5}$$

で表される(式(25)(26)(27))。この式に基づく計算値と水モデル実験結果をFig. 11に併せ示すが、両者の減衰曲線は良く一致しておりMD内減衰は上式で表され

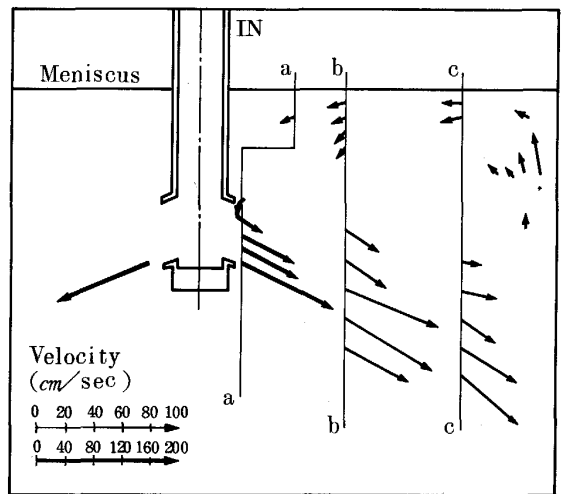


Fig. 9. Velocity distribution in the mold ($V_c = 1.60$ m/min).

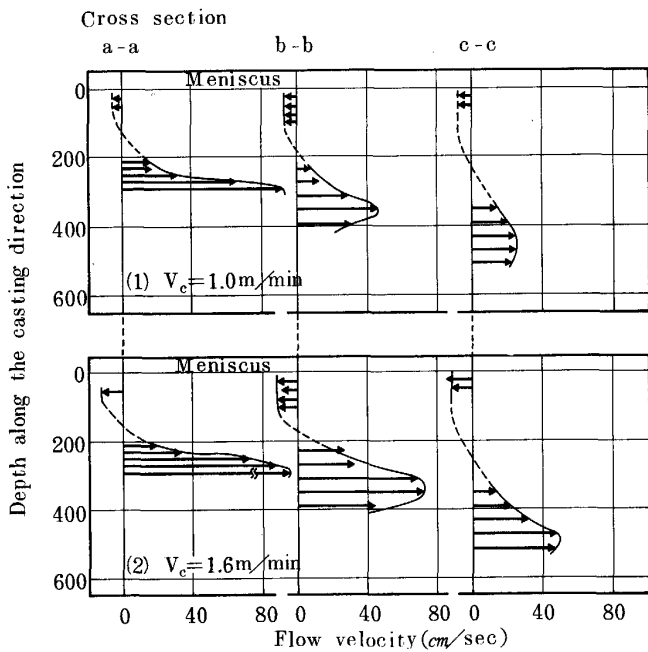


Fig. 10. Change of the velocity distribution along the mold width direction.

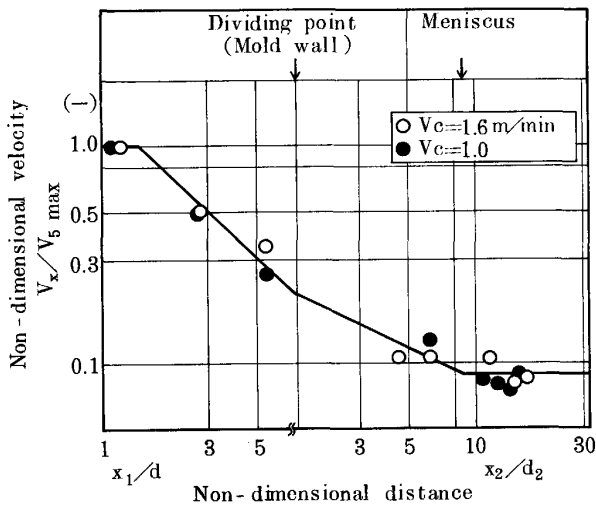


Fig. 11. Change of the maximum velocity regression in the mold.

ることがわかる。

ここで水モデル結果から推定すると、 $b_1 = 1.5$, $b_2 = 1.5$ となる。従来の知見(5)より小さな値でありIN吐出口およびMD内で減衰しやすい流速分布形状となっていることを示している。

4.2.3 水モデル実験結果のまとめ

水モデル実験結果によりMD表面流速 V_p は次式で与えられることがわかった。

$$V_p = v_{5max} (L_0/1.5d_0)^{-1} \times (L_1/1.5d_2)^{-0.5} \dots\dots\dots(42)$$

v_{5max} は(40) (41)式に示してある。

5. 実機における流動現象の解明

以上の結果を踏まえ、八幡三製鋼工場 No. 1 連铸機において溶鋼表面流速の測定を行った。

5.1 鑄造条件および流速測定法

鑄造条件を Table 1 に示す。鑄造速度 0.90 m/min から 1.60 m/min まで5水準、鑄片幅は 1270 mm から 1900 mm まで4水準とした。

IN 条件はプロパー条件とした。広幅材では IN スリットからのガス吹込み無しの条件である。

流速の測定は永井ら⁸⁾が使った浸漬棒式歪みゲージ法を改良した方式を採用した。測定位置は幅方向短片から 150 mm, 300 mm, 450 mm の3点、また深さ方向では 40 mm, 80 mm の2水準とした。

5.2 実湯での測定結果

5.2.1 浸漬深さ方向の流速

深さ方向の流速の変化は鑄片幅など鑄造条件の違いにより絶対値は異なるが上記2水準での値は ± 10% の測定誤差の範囲内で一致しており、鑄型表層での深さ方向

Table 1. Casting condition.

	Narrow size	Wide size
Slab width	1270~1600 mm	1900 mm
Slab thickness	258 mm	208 mm
Casting speed	0.9~1.6 m/min	1.0~1.3 m/min
IN inner diameter	φ70	φ70
IN outlet shape	70×80 mm	70×80 mm
IN outlet angle	15°	5°
Gas flow rate (Upper nozzle)	18~20 l/min	18~20 l/min
(Lower nozzle)	4~6 l/min	~ l/min

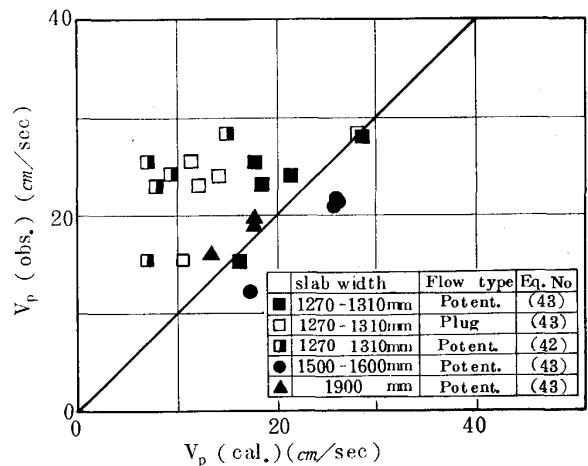


Fig. 12. Comparison of the surface velocity of the calculated value and the measured one.

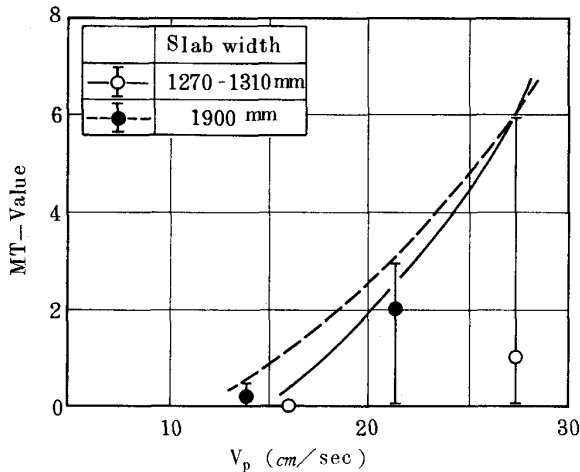


Fig. 13. Relation between MT-Value and the surface velocity of the molten steel.

の流速の変化は小さいことが確認できた。

また、鑄造速度が速いほど表面流速は速くなっているが、表面流速の幅方向の減衰は認められない。

5.2.2 実測値と計算値の比較

実湯での測定データと既存の水力学理論および水モデル実験に基づく計算値との比較を Fig. 12 に示す。狭幅材を例に(42)式による計算結果を■で示した。また(42)式において $b_1 = 2$, $b_2 = 4$ を代入し((43)式), v_{5max} を充満流として計算した場合(□印)と自由落下流として計算した場合(●印)を示した。自由落下流は広幅材の例も併記している(●印, ▲印)。

$$V_p = v_{5max} (L_0/2d_0)^{-1} (L_1/4d_2)^{-0.5} \dots\dots\dots(43)$$

■印と□印は計算値が小さく、自由落下流として(43)式で計算した値(●印)が実測値と最も良く一致しており、実湯ではノズル内に空間が存在しかつ水モデルよりも吐出流速が減衰しにくくなっていることがわかる。以上の結果に基づき実湯解析には(43)式を使用した。

6. 表面流速と磁粉探傷欠陥 (MT 値) との対応

今回の解析により、パウダー巻込みと関係の深い表面流速は(43)式で算定できることがわかった。Fig. 13 に(43)式により表面流速を算定し MT 値との関係を示す。図中に表面流速と MT 値は良い関係を示しており表面流速を 15 cm/s 以下とすることにより MT 値の低い鏽片が得られることがわかる。

このことから表面流速を算定することは品質管理上でも大いに役立つ指標であると考えられる。

7. 結 言

MD 内パウダー巻込み現象を解明するための基礎データを採取するため、TD から MD に至る溶鋼流動を水力学的に解析し、水モデル実験ならびに実湯での表面流速測定により MD 内溶鋼流動を解明した。その結果、

①溶鋼表面流速は水モデルおよび実湯での測定結果を踏まえ次式により解析的に求められることがわかった。

$$V_p = v_{5max} (L_0/2d_0)^{-1} (L_1/4d_2)^{-0.5}$$

ただし、 v_{5max} は

• 自由落下流 :

$$v_{5max} = \gamma \sqrt{(1 - \zeta_4)(1 - \zeta_3)} \times \sqrt{2g(c^2(h_{TD} + l_1) + l_2 + l_3)}$$

• 充満流 :

$$v_{5max} = \gamma \sqrt{2gH_1} \sqrt{1 - \zeta_4} \sqrt{1 - \alpha^2 \zeta_1}$$

ただし、 γ は IN 吐出部最大流速と平均流速の比、 c は開口部からの吐出係数、 α は断面積比 a_3/A_2 である。

②溶鋼表面流速を算定することは品質管理上でも大いに役立つ指標であることが判明した。

記 号

θ : IN からの実効吐出角, v_0 : 上ノズル部流速, v_1 : 下ノズル部流速, v_2 : IN 入口流速, v_3 : IN 内湯面流速, v_4 : 先端分岐前流速, v_5 : IN 吐出口流速, v_6 : 壁面分岐前流速, v_7 : 壁面上昇流速, v_8 : 壁面下降流速, v_p : 表面流速, d_0 : IN 吐出口径, d_1 : 分岐前噴流径, d_2 : 分岐後噴流径, P_{IN} : IN 内圧 (ゲージ圧), h_{TD} : TD 浴深, l : 上ノズル長, l_2 : 下ノズル長, l_3 : 下ノズル~IN 内湯面間距離, l_4 : IN 浸漬深さ, D_1 : 上/下ノズル内径, D_2 : IN 内径, L : IN 吐出口~MD 壁面までの水平距離, L_0 : IN~壁面までの距離 (= $L/\sin \theta$), L_1 : 分岐~壁面までの距離 (= $L/\tan \theta + l_4$), x_1 : IN 吐出口~MD 壁面間の通過距離, x_2 : MD 壁面~MD 表面間の通過距離

文 献

- 1) 草野昭彦, 寺田 勉 (新日本製鉄(株)): 私信
- 2) 例えば, 田中宏幸, 鋏取宏英, 宮村 紘: 材料とプロセス, 1 (1988), p. 1260
- 3) 吉岡幸男: 水理学の基礎 (1985) [技報堂出版]
- 4) 管路・ダクトの流体抵抗 (日本機械学会編) (1989)
- 5) N. RAJARATNAM 著, 野村安正訳: 噴流 (1981), p. 43 [森北出版]
- 6) 例えば, 谷 一郎: 流れ学 (1973) [岩波書店]
- 7) N. TRENTACOSTE and P. M. SFORZA: Journal of A. I. A. A., 5 (1967), p. 88
- 8) J. NAGAI, K. SUZUKI, S. KOJIMA and S. KOLLBERG: Iron Steel Eng., 61 (1984) May, p. 41