

スラブCC鋳型内流動に及ぼす底無し浸漬ノズル内での 旋回流動効果に関する水モデル実験

横谷 真一郎*・高木 茂男*・井口 学*²・丸川 雄浄*³・原 茂太*⁴

Model Experiment of Swirl Effect in Bottomless Immersion Nozzle
on Molten Steel Flow in Slab CC Mold

Shinichiro YOKOYA, Shigeo TAKAGI, Manabu IGUCHI, Katsukiyo MARUKAWA and Shigeta HARA

Synopsis : The characteristics of molten steel jet flowing out from the immersion nozzle in the continuous casting mold control the flow pattern in the mold, thereby strongly influencing the quality and productivity of the cast steel slabs. We proposed a new method to establish a reasonable flow pattern in the mold by imparting a swirling motion to the flow in the immersion nozzle without the bottom. The following results were obtained from a water model study.

(1) A quite stable swirling flow being established in the immersion nozzle without the bottom when the swirling velocity exceeded a critical value of 0.8 m/s, under this condition there existed no separation on the inner wall of the immersion nozzle.

(2) When the swirling velocity was higher than 0.8 m/s, the fluid on the symmetry plane of the immersion nozzle moved along the curved inner wall of the nozzle. Accordingly, the outlet-flow was directed outwards as well as downwards, while a weak upward flow, i.e., in-flow was observed around the vertical nozzle axis near the outlet of the nozzle. As a whole, the fluid flow near the guide plane of the nozzle was directed downwards.

(3) The fluctuation of the surface flow, i.e., the flow on the meniscus of the mold was strongly suppressed due to the appearance of the S-shaped flow pattern in the transverse sections. As a result, swirl motions around the immersion nozzle were also suppressed. In addition, both the fluctuations of the mean velocity components and the turbulence components of the flow in the mold became very small, being preferable conditions for continuous casting.

Key words : water model; swirl; swirling motion in the immersion nozzle; control the flow pattern in the mold; s-shaped circulation; continuous casting; calm and uniform flow on the meniscus; uniform and stable outlet flow.

1. 緒言

連続鋳造による鉄鋼の生産性と鋼塊の高品質の要望から、鋳型内流動における安定性が益々重要視されている。鋳造速度を増加させると、浸漬ノズルの吐出流の変動が著しく、表面流の乱れは激しくなり、周期的な変動やそれによる渦の発生、削り込み等が観察され、パウダー流入の不均一や巻き込みによって鋼材の品質悪化を助長していることが知られている。この対策として鋳型内の最大流速を低下させることによって、メニスカス部の流速や変動を緩和するのが有効である。すなわち、ノズル吐出口形状の変更^{1,2)}、鋳型内に電磁力を用いて各位置の溶鋼流速を低下させる方法等が試みられてきている^{3,4)}。著者等が提案した浸漬ノズル内流れに旋回を付与する方式を、水モデル実験を用いてスラブ鋳型およびピレット鋳型に適用すると鋳型内流れの変動や乱れが著しく緩和されることを明らかに

した⁵⁾。本研究では逆Y字型浸漬ノズルの底を取り除いた浸漬ノズル（以後底無しノズルと呼ぶ）を提案して、水モデル実験を行い、従来の逆Y字型浸漬ノズルとの検討を行った。

2. 実験装置

Fig. 1 は水モデル実験装置を示す。鋳造速度はオーバーフロータンクによって一定に保たれ、浸漬ノズル内旋回流はノズル上端部に挿入された旋回羽根によって、付与される。Fig. 2 はノズル上端部に旋回羽根を設置した状態で使用する底無し浸漬ノズル、Fig. 3 は通常の旋回を付与しない状態で試験された逆Y字型浸漬ノズルの概略を示す。内径は40 mm、吐出口上端部の曲率半径30 mmの曲壁は旋回を付与した場合吐出口からの流れの拡散を促すために有る。x, y, z 方向速度は2次元レーザードップラー流速計と

平成11年8月6日受付 平成11年11月22日受理 (Received on Aug. 6, 1999; Accepted on Nov. 22, 1999)

* 日本工業大学 (Nippon Institute of Technology, 4-1 Gakuendai Miyashiro-cho Minamisaitama-gun Saitama-ken 345-8501)

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

* 3 住友金属工業(株) (Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

* 4 大阪大学工学部 (Faculty of Engineering, Osaka University)

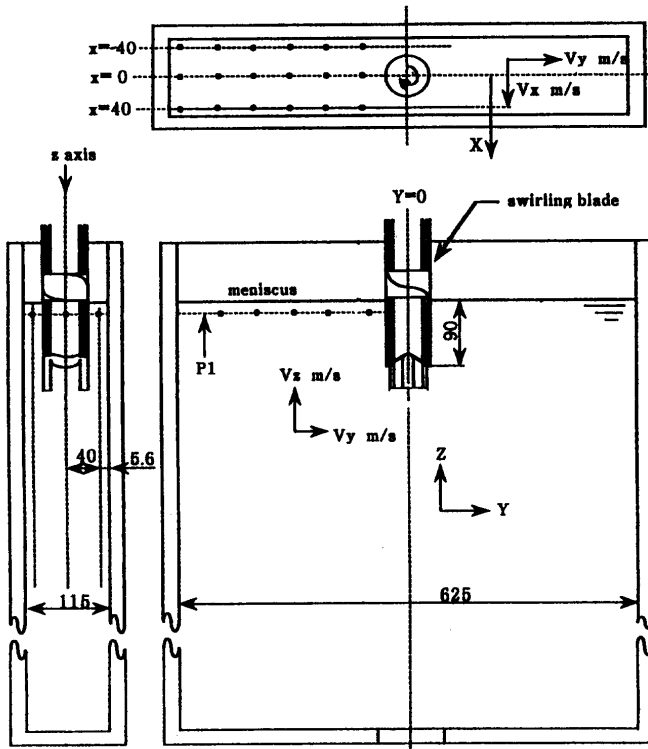


Fig. 1. Schematic diagram of water model mold, showing swirling blade, positions for measuring velocity, P1 and nozzle.

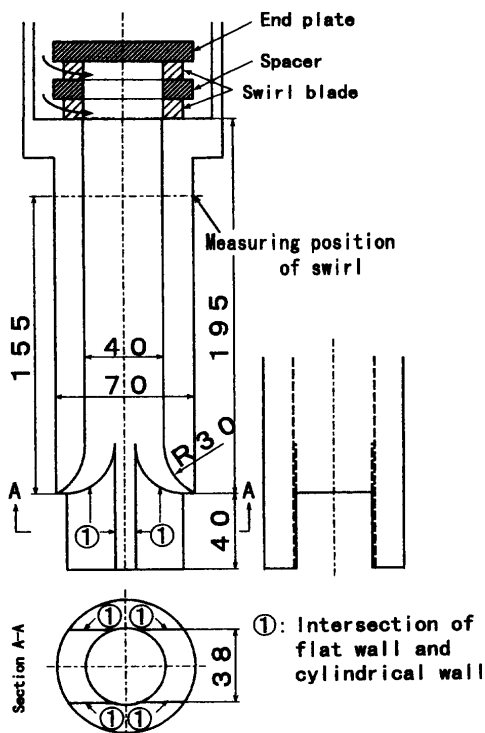


Fig. 2. Schematic diagram of nozzle without bottom with swirl blade.

付属の微動トラバース装置を用いて、3mm 間隔ごとに計測した。計測用散乱粒子には 0.3μ のアルミナ粒子を用いた。

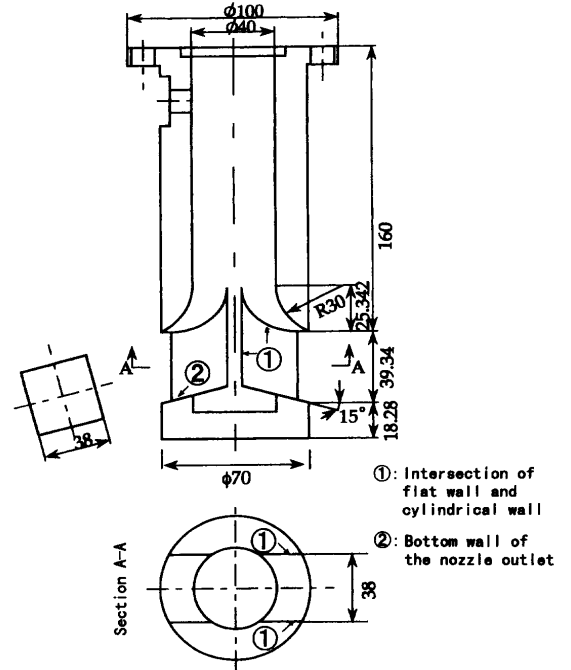


Fig. 3. Schematic diagram of conventional nozzle without swirl.

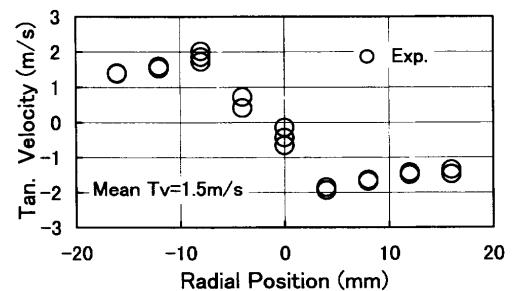


Fig. 4. Radial profile of the tangential velocity measured near the entrance of the nozzle.

3. 実験結果および考察

Fig. 4 は Fig. 2 に示すノズル吐出口上端部から上流 155 mm の位置での周速度分布 (以後ノズル入り口周速度) を示す。管軸近傍は周速が管軸からの半径距離に比例するほぼ強制渦型周速度分布, その外周部は半径の距離に反比例する自由渦型周速度分布をしていることが分かる。Fig. 5 は浸漬ノズル吐出口側端部における水平方向速度分布の実験値と乱流モデル $k-\epsilon$ モデル⁶⁾ を用いて (付録を参照) の計算値を示す。Fig. 6 はノズル入り口周速度とノズル吐出口下端の軸方向速度の水平方向分布の実験値と乱流モデル $k-\epsilon$ モデルを用いての計算値を示す。ノズル周速度が 1.5 m/s, つまり軸方向速度近傍迄は乱流 $k-\epsilon$ モデルを用いてもそこそこに合っていると思われるので, ノズル内流動の検討に用いた。Fig. 7 はノズル入り口周速度がノズル吐出口側端部の水平方向速度成分の軸方向分布に及ぼす影響を示す。Fig. 8 はノズル入り口周速度とノズル吐出口下端の軸方向速度の水平方向分布の関係を示す。入り口周速度

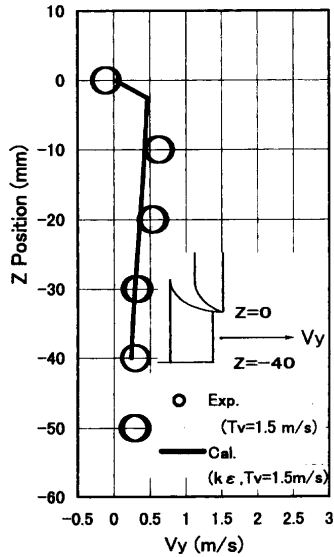


Fig. 5. Profile of horizontal velocity, V_y with swirl strengths, 1.5 or 1.7 m/s at the side of outlet of the immersion nozzle shown in Fig. 2. V_z in nozzle, 1.5 m/s.

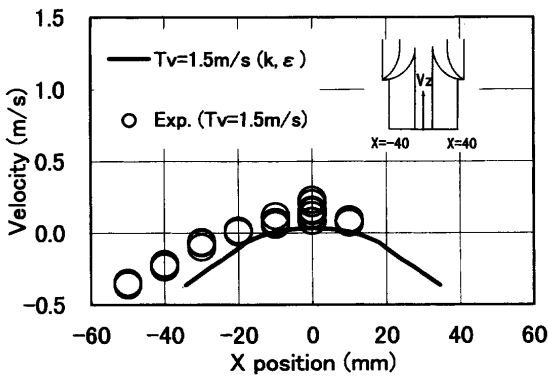


Fig. 6. Profile of vertical velocity, V_z with swirl strengths, 1.5 or 1.7 m/s at the bottom of outlet of the immersion nozzle shown in Fig. 2. V_z in nozzle, 1.5 m/s.

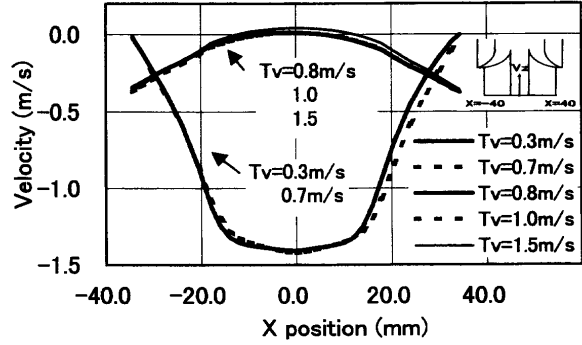


Fig. 8. Profile of vertical velocity, V_z for the different swirl strengths at the bottom of the outlet of the immersion nozzle shown in Fig. 2. V_z in nozzle, 1.5 m/s.

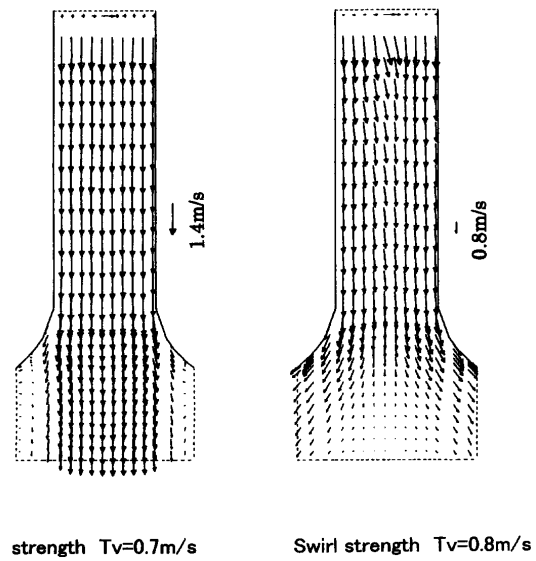


Fig. 9. Calculated velocity distributions at the center section of the immersion nozzle outlet with swirl strengths, 0.7 and 0.8 m/s. V_z in nozzle, 1.5 m/s.

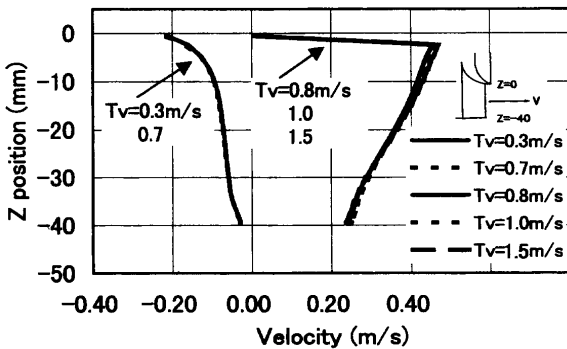


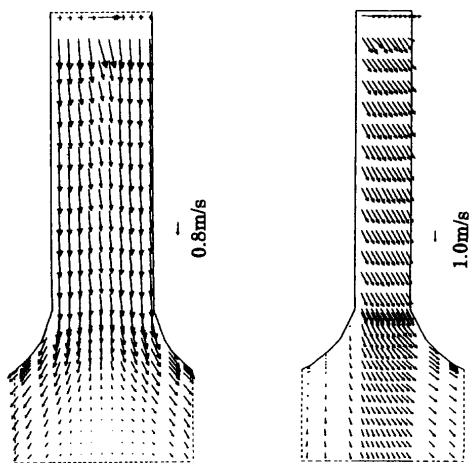
Fig. 7. Profile of horizontal velocity, V_y for the different swirl strengths at the side of the outlet of the immersion nozzle shown in Fig. 2. V_z in nozzle, 1.5 m/s.

が 0.8 m/s 以上になると側端部の水平分方向速度分布も下端の軸方向速度分布も流れ方向が逆転して変化量 (増加) も大きいですがそれ以上周速度を増加しても変化量は僅かである。Fig. 9 は各周速度と吐出口の対称面上の速度場を示す。

周速度が 0.7 m/s では流れがノズル曲壁から剥離して、管軸方向に下流に向かって直進している。一方周速度 0.8 m/s の場合はノズル曲壁に沿って吐出口上端部から流出しており、それに対応して、ノズル下端からの若干の上流向き流入流が見られる。Fig.10 はノズル対称面上の速度場とノズルガイド面より 2.5 mm 離れた面の速度場の比較を示す。対称面上の管軸近傍は上流側に向かう速度分布を有するが、ガイド面近傍では総じて下流側速度分布を有する。すなわち、ノズル入り口に旋回を付与することによって、ノズル吐出口側端部からの吐出流は旋回速度が 0.8 m/s を境に逆転して側端部からの吐出方向が内向きから外向きとなり大幅に吐出流速は増加するが、それ以上周速度を増加しても吐出流速の変化は僅かである。同様に吐出口下端部の管軸を通る対称面では、ノズル入り口旋回速度の増加に伴い、ノズル入り口旋回速度が 0.8 m/s 以上になると逆転して、上向き流速に変化する。一方、ガイド面近傍では常にガイド面に沿って流下するため下流方向成分を持つ流速

であることが分かった。以上より入り口周速度が0.7m/s以下では吐出流はノズル管軸方向に流下する流れで、ノズル壁面（曲壁，ガイド面）との間に剥離が存在する流れである。一方0.8 m/s以上の旋回を付与することによってノズル壁面（曲壁，ガイド面）に沿った密着した流れとなり、それによって吐出流速の変動が極めて僅かな安定した吐出流となっている。

Fig.11 はノズル入り口に旋回を付与した場合における底無し浸漬ノズルの吐出流と旋回を付与しない場合の逆Y字型2孔浸漬ノズルの吐出流を2秒おきに計測した結果である。旋回を付与した場合の底無しノズルの吐出流はほぼ変動が無視できるが、旋回を付与しない逆Y字型2孔浸漬ノズルの吐出流ではかなり変動することが分かった。これは上述したようにノズル流とノズル壁面（吐出口上端部の曲壁，ガイド面）との間に、旋回流を付与した場合は剥離の



(a) At the Center section (b) Near the guide surface

Fig. 10. Calculated velocity distributions at the center section (a) and on the face of 2.5 mm away from the guide-face (b) of the outlet of the immersion nozzle with swirl strength, 1.5 m/s. V_z in nozzle, 1.5 m/s.

無い安定した流れが存在する。一方、旋回を付与しないノズルでは間欠的にノズル流とノズル壁面（曲壁，ガイド面）との間に剥離が発生して吐出流速の大きな変動に繋がったと思われる。

Fig.12 は各鋳型厚における速度分布を、それに対応する水平断面の速度ベクトル分布を Fig.13 に示す。吐出流が奥の長辺に衝突し、向きを変え、手前の長辺では逆向きの流れになっている様子が見える。すなわち旋回攪拌により、ノズル出口での吐出流が広がるだけでなく、水平断面で見た場合、長辺に沿ったs字曲線のような流れとなるために上昇流が低減する。

それに対応する鋳型厚さ中央のメニスカス上の表面流分布を Fig.14 に示す。旋回を付与した場合かなり長辺方向流速が低減している。

Fig.15 はメニスカス上の一点で2秒ごとに計測した表面流の水平方向速度の時間的変動を示す。旋回を付与しない場合は大きな表面流の変動が見られるが、旋回を付与することによって著しく表面流変動が緩和されることが分かる。旋回付与によるノズル吐出流の安定化はもとより、鋳型内流動の複雑な流跡によって自励振動発生を抑制したものと考えられる。

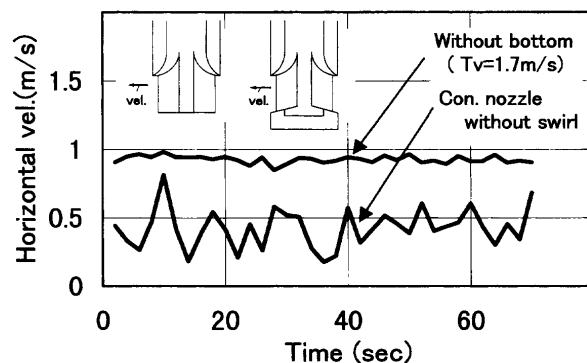


Fig. 11. Velocity fluctuation at the outlet of the immersion nozzle for the case with and without swirl, at the position of center line section shown in Fig. 2. V_z in nozzle, 1.5 m/s.

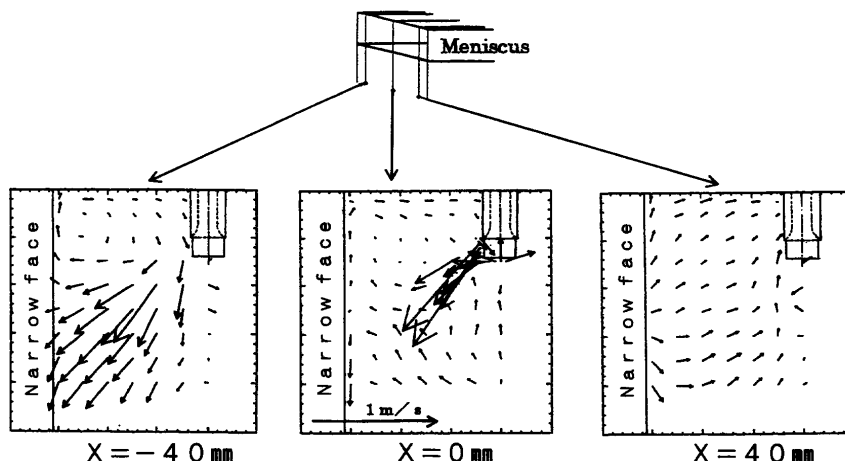


Fig. 12. Flow patterns with swirl, at the sections parallel to the wide face, for the water model. V_z in nozzle, 1.5 m/s.

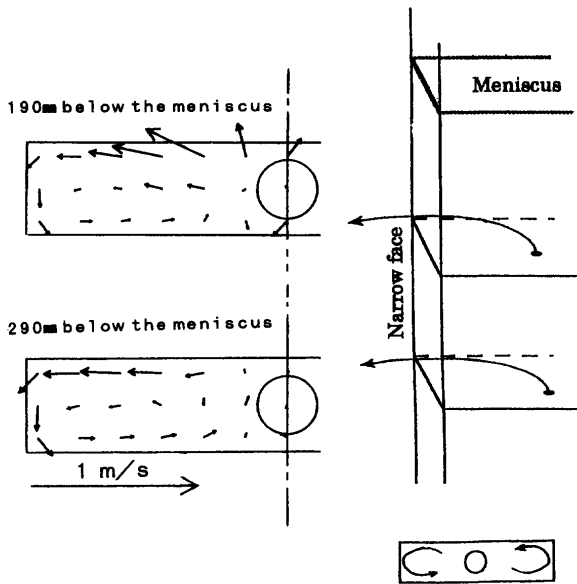


Fig. 13. Flow patterns with swirl at the transverse sections, 190 and 290 mm below the meniscus, for the water model. Vz in nozzle, 1.5 m/s.

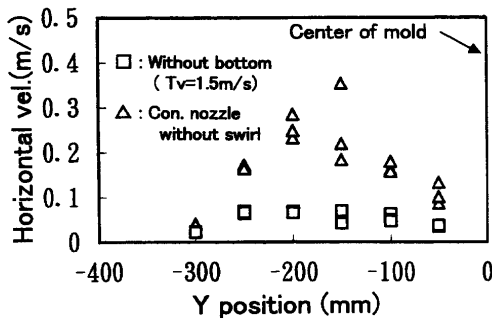


Fig. 14. Velocity of the surface flow with and without swirl at 11 mm below the meniscus. Vz in nozzle, 1.5 m/s.

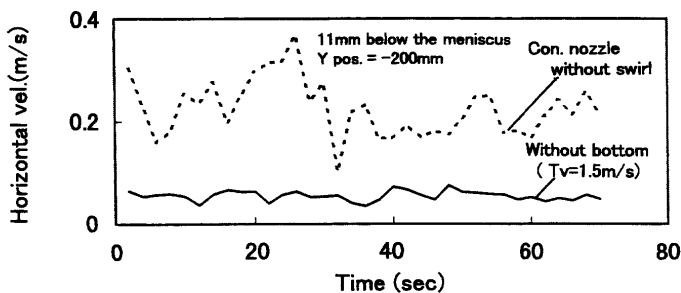


Fig. 15. Velocity fluctuation of the surface flow at 11 mm below the meniscus. ($y=-200$ mm at the center line section). Vz in nozzle, 1.5 m/s.

4. 結論

底無し浸漬ノズルに旋回を付与して水モデル実験を行い以下のことを明らかにした。

(1) 底無し浸漬ノズルに旋回を付与すると旋回速度 0.8 m/s 以上でノズル曲面壁に沿った流れとなり、ノズル壁面との間に剥離の無い著しく安定した吐出流が得られるこ

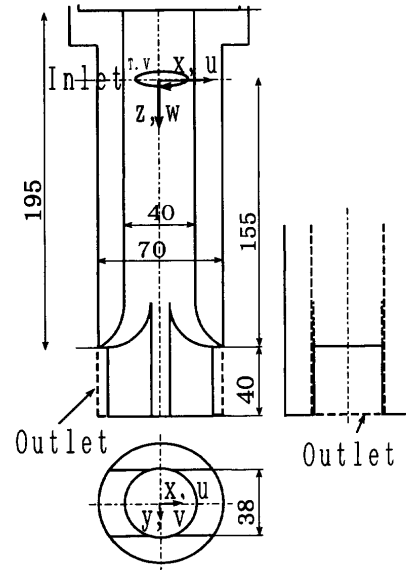


Fig. A1. Boundary conditions.

とが分かった。

(2) 旋回速度 0.8 m/s 以上でノズル吐出流は対称面ではノズル側端からノズル曲面壁に沿う吐出流を、ノズル下端では特に管軸近傍では一部吸い込み流を示しているが、ガイド面近傍では総じて下流方向成分を有する流れである。

(3) 表面流はS字型流動によって拡散され、流速は緩和され、流速変動や乱れ、渦の発生が抑制されていることが明らかとなった。

文 献

- 1) K.Saitou, H.Yamasaki, T.Nozaki, A.Hiwasa and Y.Oguchi: *CAMP-ISIJ*, 2 (1989), 299.
- 2) N.Bessho, R.Yoda, H.Yamasaki, T.Fujii, T.Nozaki and S.Takatori: Proc. of 6th Int. Iron and Steel Cong. (6th IISC), Vol. 3, ISIJ, Tokyo, (1990), 340.
- 3) I.Hoshikawa, T.Saito, M.Kimura, Y.Kaiharu, K.Tanikawa, H.Fukamoto and K.Ayata: Proc. 6th Int. Iron and Steel Cong. (6th IISC), Vol. 3, ISIJ, Tokyo, (1990), 309.
- 4) H.Tozawa, S.Takeuchi, T.Sakuraya and T.Fujii: Flow Control of Molten Steel in Continuous Casting Mold by Static Magnetic Field, ed. by J.Szekely *et al.*, TMS, Warrendale, (1991), 215.
- 5) S.Yokoya, S.Takagi, M.Iguchi, A.Asako, R.Westoff and S.Hara: *ISIJ Int.*, 38 (1998), 827.
- 6) Fluent User's Manual Ver. 4.4, Fluent-Asia-Pacific, Inc, Tokyo, (1996).

付 録

添え字 ($i=1,2,3$) はデカルト座標系 (x,y,z), 時間平均流速 (u,v,w), 乱流速度変動 (u',v',w') に対応している。 P は圧力を示す。乱流粘性係数および有効粘性係数は (A-1), (A-2) である。

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \dots \dots \dots (A-1)$$

$$\mu_e = \mu + \mu_t \dots \dots \dots (A-2)$$

モデル方程式の経験定数は次の値が用いられる。

$$C_1=1.44, C_2=1.92, C_m=0.09, s_k=1.0, s_\epsilon=1.3$$

境界条件 (Fig. A1 を参照)
計算領域入り口 (Inlet)

軸方向速度 $W=1.5$ m/s,
周方向速度 T.V は

$$r \leq 6 \text{ mm}, \text{ T.V} = (1.866/6.03) (\text{m/s/mm}) \dots\dots\dots (\text{A-3})$$

$$6 < r < 20 \text{ mm}, \text{ T.V} = -0.05 (\text{m/s/mm})(r - 6 \text{ mm}) + 1.87 (\text{m/s}) \dots\dots\dots (\text{A-4})$$

$$k = 0.5(u'^2 + v'^2 + w'^2) \dots\dots\dots (\text{A-5})$$

$$\varepsilon = C_m k^{3/2} / (0.07 r_{in}) \dots\dots\dots (\text{A-6})$$

u', v', w' は乱流速度変動でそれぞれ平均流速の10%とした。 r_{in} はノズル内径である。

計算領域出口 (Outlet)

静圧 $p = \text{一定}$,

$$\partial k / \partial n = \partial \varepsilon / \partial n = 0, \partial u / \partial n = \partial v / \partial n = \partial w / \partial n = 0 \dots\dots\dots (\text{A-7})$$

ここに、 n は法線ベクトルである。

また、壁面上の速度および k, ε については Launder, Spalding の壁関数の扱いを適用した。すなわち、壁に最も近接した格子点に対し

$$\partial k / \partial n = 0, \varepsilon = C_\mu^{3/4} k^{3/2} / \kappa y \dots\dots\dots (\text{A-8})$$

ここに、 κ はカルマン定数 0.42 である。

計算には BFC 法による離散化と圧力補正法による速度と圧力の結合を行っている流動解析汎用ソフトウェアを用いた。計算に用いた格子数は x 軸方向、 y 軸方向、 z 軸方向である。繰り返し計算の収束判定には u, v, w の相対変化が 0.1% を用いた。