



スラブ連続铸造用旋回流ノズルの吐出孔設計

塚口 友一*・中村 修*・横谷 真一郎*²・高木 茂男*²

Outlet Port Design of Swirling Flow Submerged Entry Nozzle for Slab Caster

Yuichi TSUKAGUCHI, Osamu NAKAMURA, Shinichiro YOKOYA and Shigeo TAKAGI

Synopsis : We have proposed a technology of swirling flow formation in submerged entry nozzle as a fundamental and effective measure for controlling flow pattern in continuous casting mold. A joint study started in 1997 with Nippon Institute of Technology, Osaka University, Kyushu Refractories and Sumitomo Metal Industries to develop a swirling flow submerged entry nozzle with a swirling blade for steel casting. As a result of the collaboration, the swirling flow submerged entry nozzle for wide slab casting has developed in Wakayama Works, which improve productivity and surface quality of slabs and coils.

Swirling flow formation in the submerged entry nozzle can be effective for controlling flow pattern in the mold in the case with optimum design of outlet port. The outlet port of the swirling flow submerged entry nozzle should be designed adapting a characteristic of swirling downward flow in the nozzle. As a result of full-scale water model experiment, we achieved a conclusion of outlet port design that the narrow width of the outlet port is optimum for the swirling flow submerged entry nozzle. Otherwise, outlet flow from the port extends widely and stagnates in the mold.

Key words: continuous casting; submerged entry nozzle; swirling flow; outlet port; flow pattern; water model.

1. 緒言

連続铸造铸型内においては、铸型壁面の冷却によって凝固シェルを成長させる一方で、溶鋼表面を通じて気泡や非金属介在物を系外に排出している。このことは、铸型壁面で冷却しつつも溶鋼表面温度は高く保たなければならないという、連続铸造操業の根元的な難しさに通じている。さらに一般の連続铸造では、溶鋼表面への熱供給を一本の浸漬ノズルから吐出される溶鋼流に頼っていることから、浸漬ノズルからの吐出流を制御して適切な铸型内流動を形成することが非常に重要である。

また、メニスカス近傍の凝固シェル前面への気泡や非金属介在物の捕捉を防止する観点から溶鋼表面流速の下限値が規定される一方で、モールドフラックスの巻き込み防止の観点からは溶鋼表面流速の上限値が規定される結果、铸型内の溶鋼表面流速には適正範囲が存在するとされている¹⁻³⁾。このように、温度のみならず流速の観点からも、铸型内流動の制御は重要な課題である。

铸型内流動制御技術としては、電磁気力を利用した電磁ブレイキや電磁攪拌が広く適用されている⁴⁻⁷⁾。しかしながら、これら電磁気力を利用した铸型内流動制御は、制御対象である溶鋼流の観測が困難であることから、見込み制御を行わざるを得ずその精度に限界があった。すなわち、铸型内流動の制御には、その源である浸漬ノズルからの吐

出流を安定に保ち、電磁気力を印可しない状態における铸型内流動の変動を抑制することが重要である。

著者らは、浸漬ノズル吐出孔以前の源流に遡った铸型内流動制御技術である、日本工業大学および大阪大学における浸漬ノズル内旋回付与技術のシーズ研究⁸⁻¹⁶⁾を実機铸造に活かすべく、産学協同研究を進めてきた¹⁷⁻²¹⁾。これは、位置エネルギー（タンディッシュヘッド）を利用した旋回流付与技術である。研究の結果、浸漬ノズル内における旋回付与は、優れた吐出流均等化および安定化作用を有することが確認された。しかし一方で、その特性を活かすためには、旋回しつつ流下するノズル内下降流の流動特性に応じて、吐出孔を適正に成形しなければならないことが明らかとなった。開発の結果、旋回羽根を内装した旋回流付与浸漬ノズル（以下、旋回流ノズル）は、電磁気力による制御に頼らずとも安定した铸型内流動を形成し、品質および生産性の改善に効果を発揮した^{22,23)}。本報告では、フルスケール水モデル実験による旋回流ノズルの吐出孔形状設計のうち、吐出孔幅の影響について考察した。

2. 実験方法

Table 1 および Fig. 1 に水モデル実験装置および条件の概要を示した。また、旋回羽根の寸法は、Fig. 2 のように規定した。旋回羽根の厚みは 15 mm とした。

平成 16 年 7 月 7 日受付 平成 16 年 11 月 1 日受理 (Received on July 7, 2004; Accepted on Nov. 1, 2004)

* 住友金属工業 (株) 総合技術研究所 (Corporate R&D Labs., Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Sunayama Hasaki-machi Kashima-gun Ibaraki 314-0255)

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

Table 1. Water model specification and condition.

Scale	1/1	
Mold size	210 × 1850 (mm)	
Bath depth	1850 (mm)	
Corresponding casting speed	1.6 (m/min)	
Submerged entry nozzle	Swirl blade specification	Twisted plate type φ100、L = 100 (mm) Twist angle = 120°
	Internal diameter	φ101 (Top) - φ80 (Bottom)

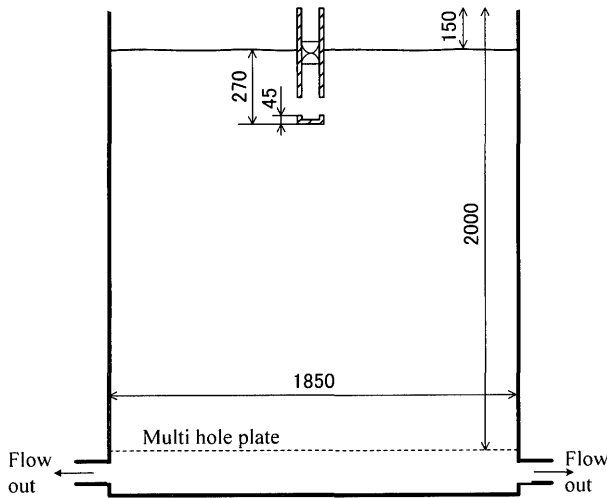


Fig. 1. Schematic view of water model.

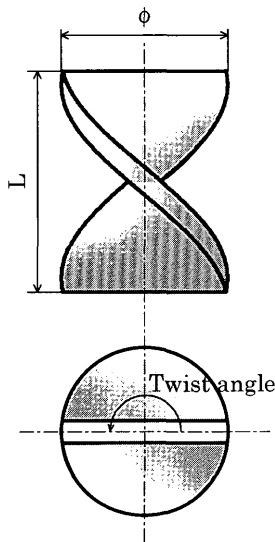


Fig. 2. Dimension of swirling blade.

鑄型サイズは（株）住金鋼鉄和歌山におけるNo. 3スラブ連鑄機の広幅サイズを模した。これは、鑄型内流動が不安定になりやすい広幅鑄型²³⁾に適用することによって、旋回流ノズルの特性が活かされると考えたためである。鑄造速度 1.6 m/min は、溶鋼の比重 7.0 としてスループットに換算すると、4.4 ton/min に相当する。

実験には、旋回羽根およびノズル内径の仕様が同一の旋回流ノズルを用い、吐出孔形状が鑄型内流動におよぼす影響を評価した。実験には、アルミナグラファイト製の浸漬

Table 2. Outlet port size.

Case	Size(mm)
A	W=80、H=62
B	W=66、H=75
C	W=55、H=90

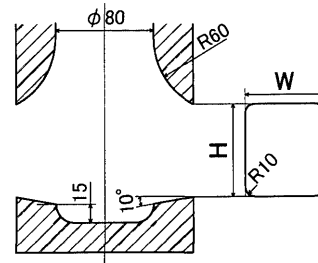


Fig. 3. Dimension of outlet port.

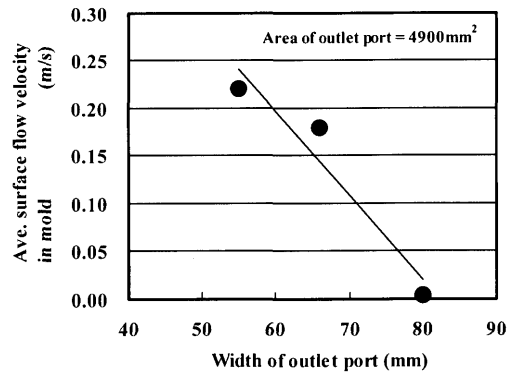


Fig. 4. Influence of outlet port width on surface flow velocity in mold.

ノズルを用いた。浸漬ノズルは、吐出孔形状にかかわらず、吐出孔出口下端の浸漬深さを 225 mm 一定に保った。

鑄型内流動評価にはレーザードップラー流速計を用い、鑄型内表面流速の代表値として、鑄型 1/4 幅 - 1/2 厚 - 水面下 50 mm における鑄型長辺と平行な水平方向流速を測定した。鑄型内表面流速は、各 Case で 3 分間測定した平均値を用いて評価した。

3. 実験結果

3.1 浸漬ノズル詳細仕様

Table 2 および Fig. 3 に示す 3 種の吐出孔を有する旋回流ノズルを実験に供し、吐出孔幅が鑄型内流動におよぼす影響を調べた。3 種のノズルは吐出孔上壁形状・吐出孔下壁角度・ノズル底部形状および吐出孔面積が同一で、吐出孔幅（吐出孔縦横比）が異なる。吐出孔上壁を Fig. 3 のような円弧断面の曲面に成形したのは、遠心力を受けて広がりながら吐出する旋回流ノズル特有の流れを円滑に吐出させるための工夫である。これらノズルを用いて鑄型内表面流速を測定した結果を Fig. 4 に示した。

3・2 鋳型内表面流速におよぼす吐出孔幅の影響

Fig. 4に明らかなように、吐出孔幅がノズル内径と同じ80 mmの場合には、鋳型内表面流速が大きく減衰し、停滞した鋳型内流動となることがわかった。

上記結果から、旋回流ノズルにおいて、鋳型内流動の停滞を避けるには、縦長の吐出孔が適しているといえる。特に吐出孔幅が55 mmのCase Cは、鋳型内表面流速が適正と言われる $0.2\sim 0.3\text{ m/s}^{(2)}$ の範囲内であり、好適である。

4. 考察

4・1 吐出状況の推定

前述のように、旋回流ノズルにおいては、吐出孔幅が鋳型内表面流速に大きな影響をおよぼすことがわかった。ここではその機構について考察する。

旋回流ノズルの場合、ノズル内下降流には回転速度成分が付加されていることから、吐出流が直接その影響を受け旋回方向に振れて（水平角度を持って）吐出することが予測される。特に、ノズル内径と同じ大きな吐出孔幅の場合には、旋回流下流側からの吐出流が旋回方向に大きな水平角度を持ち、吐出流が幅方向に広がって吐出すると推定される。その場合には、吐出流が、その広がりによって減衰することに加え、鋳型長辺と干渉して減衰する現象が生じると考えられる。

4・2 水平吐出角度測定

4・2・1 測定方法と結果

Table 2-Case Cの旋回流ノズルを用い、フルスケール水モデル実験によって水平面内の吐出角度を測定した。測定には、Fig. 5に概要を示す高さ100 mm幅30 mm厚さ0.3 mmの黄銅板を風向計のように吐出孔直前に吊して固定し、10 s間の振れ角（水平吐出角度）の最大値と最小値を読み取り、その中間値を水平吐出角度と定義することにより求めた。水平吐出角度は、吐出孔側壁と平行な方向を 0° とし、旋回流の回転方向を正とした。測定位置は、0-1に無次元化した吐出孔幅の0.2, 0.5, 0.8の3箇所とした。結果を模式的にFig. 6に示す。Fig. 6より、吐出流が旋回方向の水平角度を持って吐出することが明らかである。また、吐出流の水平吐出角度は、旋回流回転方向の下流側（Fig. 6においては吐出孔下側）ほど、大きいことがわかった。

4・2・2 平均水平吐出角度

ノズル吐出孔の前面5 mmにおいて測定された鋳型長辺に平行な水平方向の吐出流速をFig. 7に示した。Fig. 7における吐出流速測定点は、0-1に無次元化した吐出孔幅の0.2, 0.5, 0.8のライン、および0-1に無次元化した吐出孔高さの0.2, 0.5, 0.8のライン、の交点となる9点とした。測定にはレーザードップラー流速計を用い、1点あたり3分間測定した平均値を採用した。

Fig. 6に示された吐出流の水平方向角度を α 、Fig. 7に示

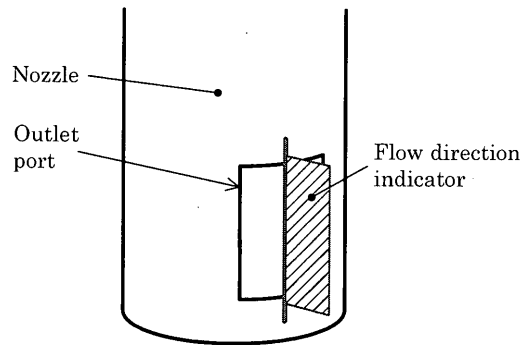


Fig. 5. Setting of flow direction indicator plate.

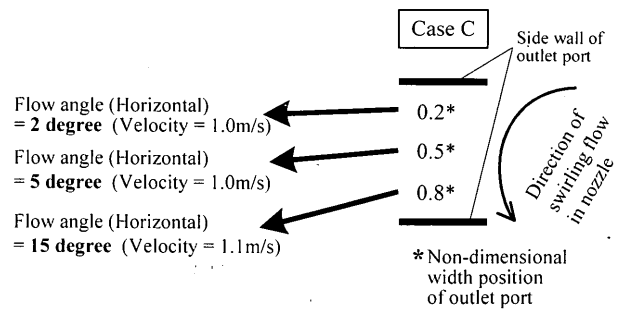


Fig. 6. Horizontal angle of outlet flow.

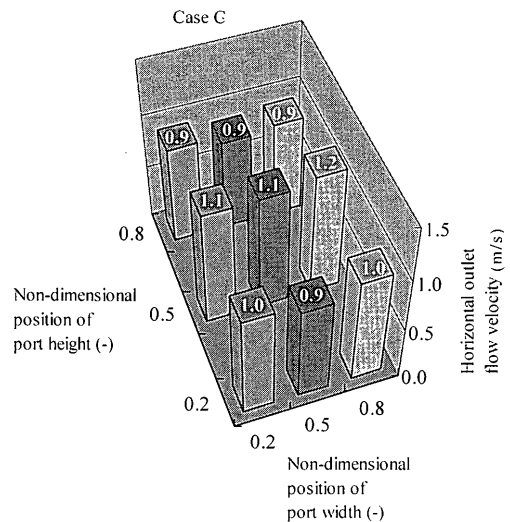


Fig. 7. Distribution of horizontal outlet flow velocity.

された鋳型長辺に平行な測定流速の上下3点の平均値を u とし、(1)式を用いて吐出孔幅方向の各位置における平均流速 v (Fig. 6中に記載)を算出した。

$$v = u / \cos \alpha \dots \dots \dots (1)$$

次に(1)式によって求められた吐出孔幅方向の各位置（無次元幅0.2, 0.5, 0.8）の平均流速 $v_{0.2}, v_{0.5}, v_{0.8}$ およびFig. 6に示された吐出孔幅方向の各位置における吐出流の水平方向角度 $\alpha_{0.2}, \alpha_{0.5}, \alpha_{0.8}$ から、(2)式のように単純に加重平均して水平吐出角度 α_{ave} すなわち吐出孔側壁に対する平均水平吐出角度を求めた。

$$\alpha_{ave} = (\alpha_{0.2} \cdot v_{0.2} + \alpha_{0.5} \cdot v_{0.5} + \alpha_{0.8} \cdot v_{0.8}) / (v_{0.2} + v_{0.5} + v_{0.8}) \dots \dots (2)$$

こうして求めた、平均水平吐出角度は8°であった。

Fig. 6は、吐出孔幅が55mmと最も小さい場合の測定値である。吐出流の水平方向への広がり具合は旋回流回転方向の下流側 (Fig. 6における吐出孔下側) ほど大きいことから、吐出孔幅が広がると、さらに吐出流が大きく広がると考えられる。

4.3 流動計算による検証

上記考察を裏付けるべく、3次元数値解析により水モデル実験における流動状況の検討を行った。解析には汎用流動解析ソフトウェアFLUENT 6.0²⁴⁾を使用した。離散化スキームはQUICK schemeとし、乱流モデルには旋回流に適しているとされるReynolds stress modelを採用した。境界条件として、入り口において水モデル実験における流量に相当する均一流速を与え出口においては多孔板からの自然流出とし、鋳型内表面においてはslip流れ、それ以外の壁面においては壁関数を使用した。解析格子をFig. 8に示し

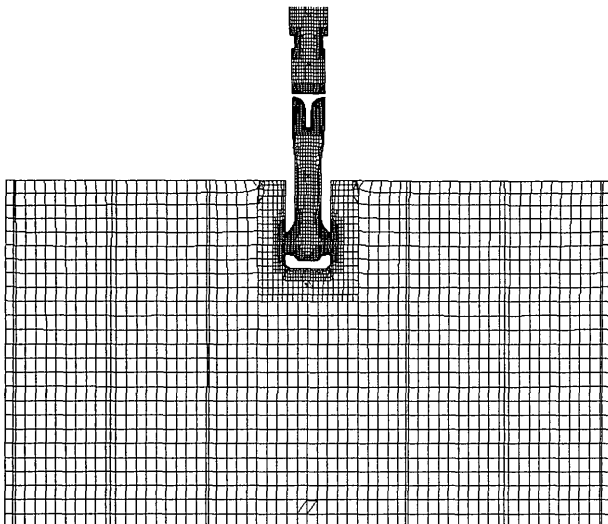


Fig. 8. Geometry of grid (vertical cross section).

た。解析結果より、Table 2-Case Aのノズルにおける吐出流の幅方向への広がり状況をFig. 9, Fig.10に図示した。

上記計算により旋回方向への吐出流の平均水平角度を、前述と同じ方法で求め、吐出孔幅に対してプロットした結果を実測値と併せてFig.11に示した。Fig.11より、計算結果は吐出孔幅55mmにおける実測値とよく一致している。また、計算結果より、吐出孔幅が広い場合に吐出流が旋回方向への大きな水平角度を有する傾向が明らかである。

吐出孔幅80mmのノズル (Case A) および吐出孔幅55mmのノズル (Case C) を用いた場合の吐出流の鋳型内における挙動を、鋳型幅中央から100mm, 300mm, 500mmにおける長辺に垂直な鉛直面上に、等流速線図として投影したのが、Fig.12およびFig.13である。これらの図から、吐出孔幅が大きいCase Aでは、吐出流が旋回方向に広がり鋳型長辺と干渉する様子が明らかである。それに対し、吐出孔幅の小さいCase Cでは、吐出流が鋳型長辺と干渉することなく鋳型短辺へ向かうことがわかる。

4.4 旋回流ノズルに適した吐出孔幅

このように旋回流ノズルにおいては、吐出流がノズル内旋回流の回転方向に水平角度を有して広がる特性を有するので、吐出孔幅を狭めて吐出流の広がりを抑制しなければ、鋳型内流動が停滞すると言える。本実験においては吐出孔部の浸漬ノズル内径80mmに対し55mm、すなわち浸漬ノズル内径の70%よりも小さな吐出孔に成形することによって、吐出流の水平方向の広がりに伴う鋳型内流動の停滞を避けられることが明らかとなった。

5. 結言

フルスケール水モデル実験により、旋回流ノズルの特性に適応した吐出孔設計について検討した。前提条件は、溶鋼換算スループット4.4 ton/minに対し、内径φ80の2孔浸漬ノズルを用い、吐出孔面積 (1孔あたり) 4900 mm²である。その結果、以下の結論が得られた。

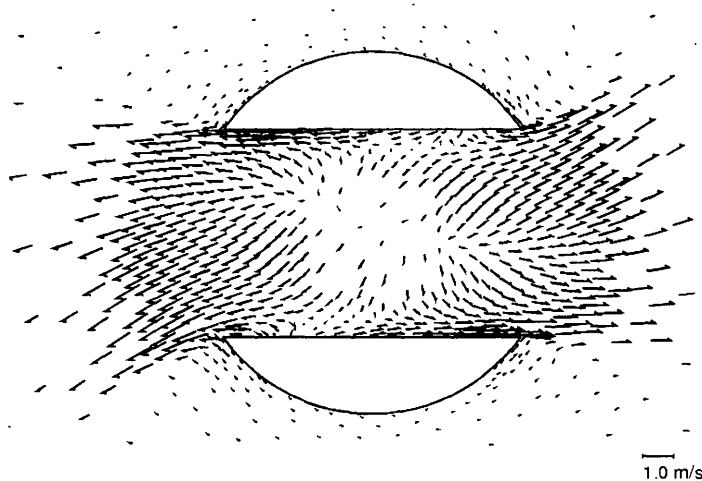


Fig. 9. Mean velocity vectors (horizontal cross section at center of outlet port, Case A).

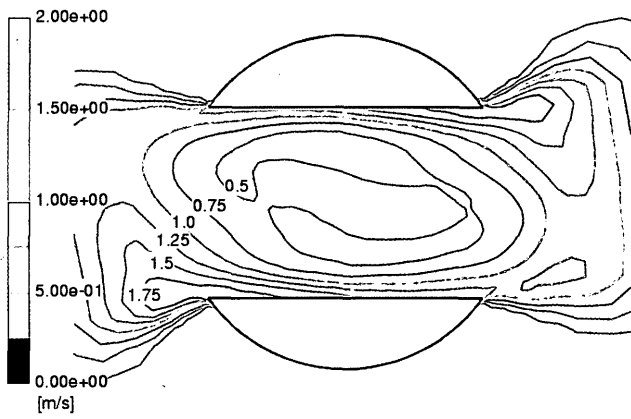


Fig. 10. Contours of mean velocity magnitude (horizontal cross section at center of outlet port, Case A).

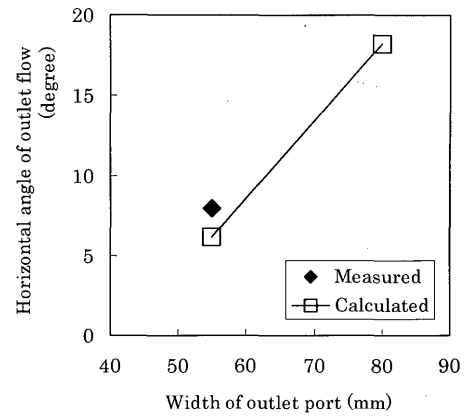


Fig. 11. Influence of outlet port width on horizontal outlet flow angle.

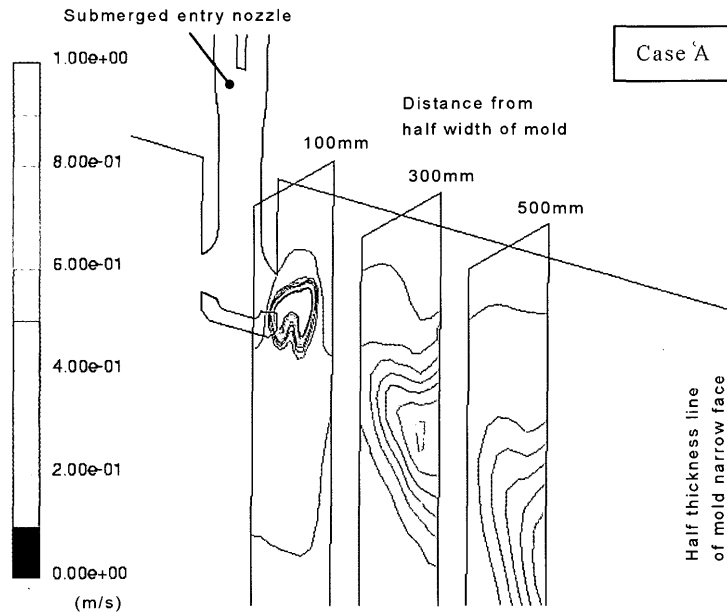


Fig. 12. Contours of mean velocity magnitude in mold (Case A).

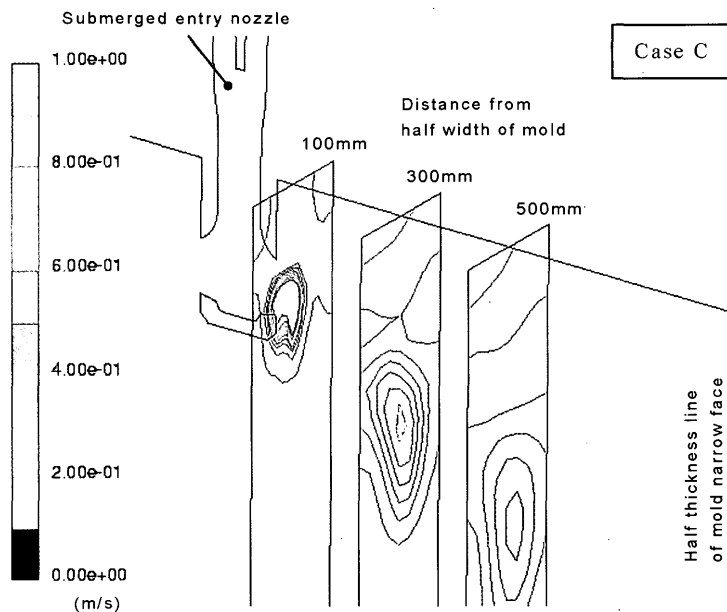


Fig. 13. Contours of mean velocity magnitude in mold (Case C).

(1) 旋回流ノズルにおいて、ノズル内径と同じ吐出孔幅に設計すると、吐出流が水平面で旋回方向に大きく広がり、鑄型内で減衰する。

(2) 旋回流ノズルにおいては、吐出孔幅をノズル内径の70%以下に設計し、吐出流の広がりに伴う減衰を避けることが求められる。

文 献

- 1) T.Tokonami, 尾上善則, K.Matsuo, H.Tai, M.Morishita, H.Yasunaka and K.Ayata: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 606.
- 2) Y.Ohtani, J.Fukuda, A.Kiyose, T.Kawase, J.Nakashima and K.Nakamura: Proc. of 1st Int. Congress on Science and Technology of Steel-making, Tokyo, (1996), 97.
- 3) M.Iguchi, J.Yoshida, T.Shimizu and Y.Mizuno: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 685.
- 4) K.Suzuki, K.Murata, K.Nakanishi, M.Kodama and S. Kojima, *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), S920.
- 5) A.Idogawa, Y.Kitano and H.Tozawa: *Kawasaki Steel Giho*, **28** (1996), 46.
- 6) W.Yamada, A.Kiyose, J.Nakashima, 福田 淳, K.Okazawa and K.Miyazawa: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 682.
- 7) J.Kubota, N.Kubo, M.Suzuki, T.Ishii, R.Nishimachi and N.Aramaki: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 271.
- 8) S.Yokoya, S.Takagi, M.Iguchi, Y.Asano, R.Westhoff and S.Hara: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 827.
- 9) S.Yokoya, S.Takagi, M.Iguchi, K.Marukawa, W.Yasugaira and S.Hara: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 584.
- 10) S.Yokoya, 松本正勝, Y.Asako, S.Hara and J.Szekely: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1158.
- 11) S.Yokoya, R.Westhoff, J.Szekely, Y.Asako and S.Hara: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1159.
- 12) S.Yokoya, R.Westhoff, Y.Asako, S.Hara and J.Szekely: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 759.
- 13) S.Yokoya, S.Takagi, 牧 博文, K.Ayata, J.Szekely and S.Hara: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1116.
- 14) S.Yokoya, S.Takagi, K.Ayata, Y.Asako and S.Hara: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 608.
- 15) S.Yokoya, S.Takagi, 安ヶ平和一, 金丸修久, M.Iguchi, S.Hara: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 753.
- 16) S.Yokoya, S.Takagi, M.Iguchi and S.Hara: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 809.
- 17) Y.Tsukaguchi, S.Furuhashi, M.Kawamoto: *ISIJ Int.*, **44** (2004), 350.
- 18) 林 浩史, Y.Tsukaguchi, 岩田勝吉, 野々部和男, S.Yokoya: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 162.
- 19) 大谷慎吾, S.Yokoya, S.Takagi, Y.Tsukaguchi, S.Hara, K.Marukawa: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 163.
- 20) 原田貴文, Y.Tsukaguchi, S.Yokoya, S.Takagi, S.Hara and K.Marukawa: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 164.
- 21) Y.Tsukaguchi, 野々部和男, S.Yokoya, S.Takagi, S.Hara and K.Marukawa: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 165.
- 22) Y.Tsukaguchi, T.Watanabe, S.Yokoya, S.Hara, K.Marukawa and K.Nonobe: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 839.
- 23) 小坂周一郎, 吉原光夫, 林浩史, 岩田勝吉, Y.Tsukaguchi and S.Yokoya: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 949.
- 24) FLUENT 6.0 User's Guide, ed. by Fluent Inc., Dec., (2001).