

連続铸造用浸漬ノズル内における 旋回流による吐出流分布の制御

横谷 真一郎*・浅古 豊*²・原 茂太*³・Julian Szekely*⁴

Control of Immersion Nozzle Outlet Flow Pattern by Using Swirling Flow in Continuous Casting

Shinichiro YOKOYA, Yutaka ASAKO, Shigeta HARA and Julian SZEKELY

Synopsis : In conventional continuous casting system, using a submerged nozzle with side-pouring holes, it is very difficult to achieve a low and uniform velocity distribution of molten metal stream in front of the holes.

In order to solve such a problem, fluid flow characteristics imparting a swirling motion at the entrance region of a nozzle have been investigated, using a water model. It has been shown that a uniform velocity distribution at the outlet can be obtained imparting a swirling motion in the entrance region of the divergent nozzle. This strongly suggests that the outlet flow pattern in the practical continuous caster can be controlled by introducing a swirling flow in the molten metal using an externally imposed rotating magnetic field.

Key words : water model ; submerged entry nozzle ; continuous casting ; external magnetic field.

1. 緒言

連続铸造铸片の品質に対する高度の要求と小断面の铸片の高速铸造に伴って铸塊内の非金属介在物の低減が課題となっている。連铸铸片における欠陥の多くはモールド内の溶鋼流動に起因する。特に、高速铸造時には、タンデッシュから铸型内へ大容量の溶鋼を注入するため、浸漬ノズル開口部からの溶鋼吐出流速は極めて大きくなり、メニスカス部の湯面変動が激しく、気泡、介在物の巻き込みによる欠陥発生率が高くなると言われている。この対策として、4孔ノズルの採用によるノズル開口部における最大流速の低減¹⁾²⁾や電磁ブレーキを利用して铸型内の流動を抑制する^{3)~5)}などの方法が採用されている。しかしながら、通常の浸漬ノズルを用いた場合、大部分の溶鋼はノズル開口部の下部から流出するため、単にノズル開口部の面積を増すだけでは、吐出流の最大流速を低減するのは困難である。むしろ、ノズル開口部の全面から一様な速度分布をもって溶鋼を流出させることが必要となる。これに対し、浸漬ノズル内の流れに注目し、開口部の吐出流速の制御を行った例は見られない。

本研究は従来とは異なり、浸漬ノズル内の流れに注目し、その流れを制御することにより浸漬ノズル開口部の全体にわたり一様な流速分布を持つ流れを作り出すことを目的とした。本報では、水モデルによる実験結果につい

て報告する。すなわち、浸漬ノズルの管の途中に旋回羽根を取り付けて管内の流れに旋回を与え、流体に遠心力を作用させ、ノズル開口部の速度分布を測定した。その結果、浸漬ノズル内の流体に旋回を与えると、その旋回に伴う遠心力の作用でノズル開口部から吐出する流れの速度分布は大きく変化すること、また、旋回速度を適切に選べると開口部における流速の分布を均一に出来ることが分かった。

2. 実験装置とその方法

Fig. 1 に本実験装置の構成を示す。本装置は、上流側のヘッドを一定にして浸漬ノズル内の平均流速を一定に保持するためのオーバーフロータンク(1)、モデルモールド部(2)、モデルモールド部の自由表面の高さを一定に保持するための下流側オーバーフロータンク(3)および液体を循環するためのポンプ(4)等から構成されている。モデルモールド部の詳細をFig. 2 に示す。モールド部は内径280mm、高さ400mmの円筒形で、その内部に浸漬ノズルが置かれ、その吐出口(Fig. 2, Fig. 4)は液体の自由表面より122mm下方に位置している。Fig. 3 に案内旋回羽根の詳細を示した。案内旋回羽根は、厚さ7mm、流出角度68°、12枚の羽根により構成されている。浸漬ノズル先端部の詳細をFig. 4 に示す。実験には断面積が一定で円形の直管型ノズルと先端に行くにつれて断面積が増加する拡大管型ノズルの2種類を用い

平成6年1月24日受付 平成6年7月8日受理 (Received on Jan. 24, 1994; Accepted on July 8, 1994)

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

* 2 東京都立大学工学部 (Faculty of Engineering, Tokyo Metropolitan University)

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

* 4 Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology

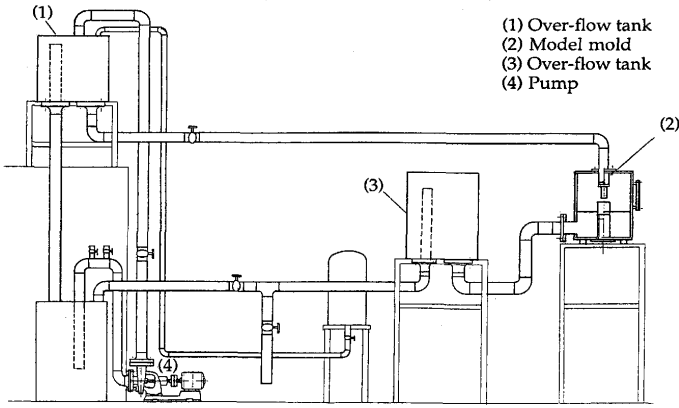


Fig. 1. The experimental apparatus used for the water model.

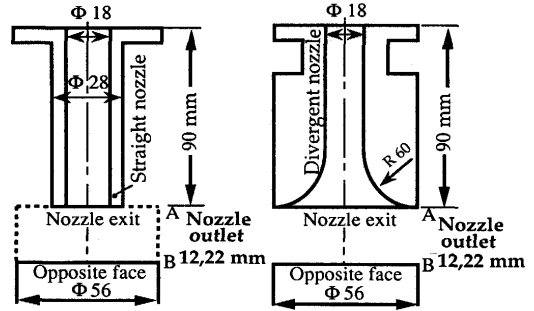


Fig. 4. Two types of nozzles, showing the nozzle exit, the nozzle outlet and the opposite face against which the flow impinges (Fig. 2).

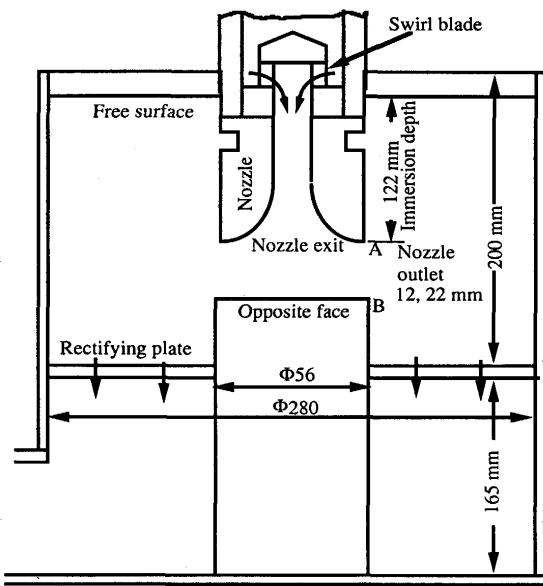


Fig. 2. Schematic diagram of model mold placed at section 2 of Fig. 1, showing the free surface, immersion depth, nozzle, nozzle exit, nozzle outlet and opposite face.

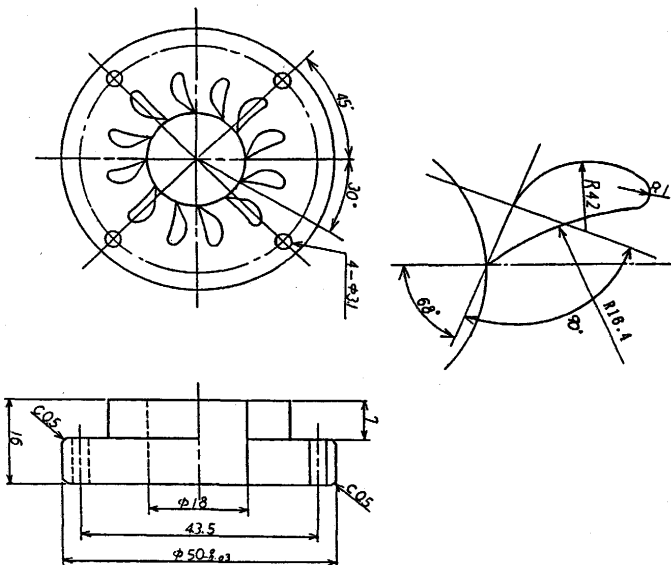


Fig. 3. Swirl blade inserted in Fig. 2.

た。

これらの浸漬ノズルは、先端が直円管あるいは拡大管と対向面の組み合わせで作られており、全周方向に吐出部を持つ。直管型ノズルの内径は18mm、拡大管型ノズルの内径は直管部で18mm、出口部は56mmで、拡大管部は半径60mmの円弧である。なお、直管あるいは拡大管の先端部をノズル出口、ノズル先端部(ノズル出口)と対向面に挟まれた周方向の吐出部(図中のA~B)をノズル吐出口と呼ぶ。

本実験に用いたノズルでは、対向面を移動させることによりノズル吐出口の間隔を調整することが可能である。そこで、吐出口の間隔が12mmおよび22mmの実験を行った。

実験用液体としては水道水を用い、浸漬ノズルの直管部の平均流速は、単位時間当たり吐出する水道水の重量を電子天秤を用いて計測する方法により定めた。流速の測定には2次元レーザードップラー流速計(Dantec製の2次元4W, Arレーザー)と付属の微動トラバース装置を用い、管軸方向、半径方向および周(接線)方向の流速を3mm間隔で測定した。計測用散乱粒子には0.3 μ mのアルミナ粒子を用いた。

実験はノズル直管部の平均流速が約2m/s(レイノルズ数約38,000)、水温約20°Cの条件で行った。なお、流れに旋回を与えない場合には、旋回羽根を取り除いて同様の実験を行った。

3. 実験結果および考察

Fig. 5に、ノズル出口と対向面の間隔(吐出口間隔)を12mmとした場合のノズル出口より1mm下方におけるノズル中心軸(以下、管軸)方向の流速分布を示す。Fig. 5(a), (c)は直管型ノズルの場合の、Fig. 5(b), (d)は拡大管型ノズルの場合の結果である。また、Fig. (a), (b)は旋回のない場合の、(c), (d)は旋回を与えた場合の結果である。Fig. 5から明らかなように、旋回の有無によって流速分布に大きな差異のあることが分かる。

直管型ノズルの場合、旋回のない流れは良く知られているように管軸上で最大流速を取る[Fig. 5(a)参照]。これに対し、旋回を与えるとFig. 5に示すように、最大流速を取る

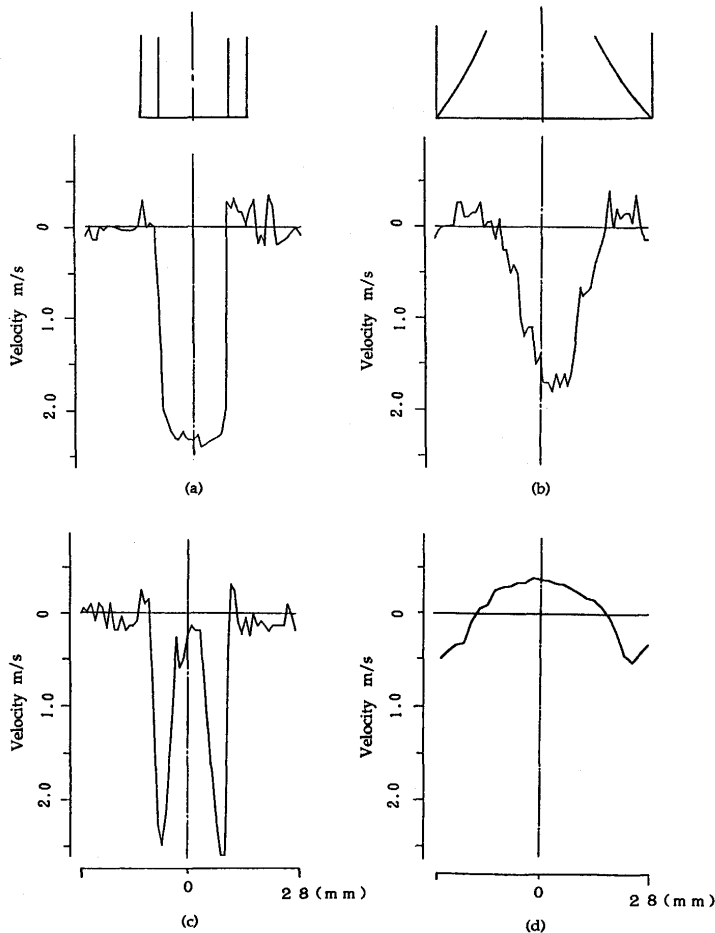


Fig. 5. Profiles of the axial velocity at a position 1 mm from the nozzle exit (a) straight nozzle, no swirl, (b) divergent nozzle, no swirl, (c) straight nozzle with swirl, (d) divergent nozzle with swirl (separation between nozzle and opposite face is 12mm).

位置は管壁方向に移動し、管軸上の流速は零に近づく。一方、拡大管型ノズルで旋回のない場合は、直管型ノズルと同様に管軸上で最大流速を取るが、ノズル壁面の近傍では Fig. 5 (b) に示すように、流れの剥離による逆流が見られる。

一方、旋回を与えると、最大流速となる位置は管壁側に移動し、管軸上の流速は負、すなわち管軸上に逆流が生じる。吐出口の間隔が22mmの場合についても同様の実験を行ったが、その結果は上記の12mmで得られた結果と類似の傾向を持つ流速分布を示した。したがって、このような旋回の効果は吐出口間隔の影響をほとんど受けないものと思われる。

Fig. 6 は管軸に垂直な水平面内の半径方向の分速度と周方向の分速度とその測定位置を示したものである。半径方向の分速度は図のx軸上の中心X=0から3mm間隔で27mmまでの10点、周方向分速度はx軸に対して90°回転したy軸上のy=0から3mm間隔でy=27mmまでの10点で測定した。流れが軸対称流れであると仮定し、半径方向分速度と周方向分速度を合成し面内の速度ベクトルを求めた。Fig. 7 にこのようにして求めた速度ベクトル図を示す。Fig. 7 (a)

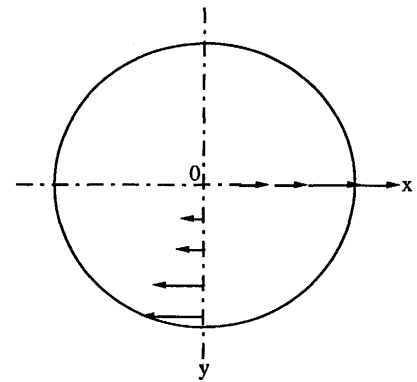


Fig. 6. Illustration of the radial velocity component (shown on the x-axis) and the tangential velocity component (shown on the y axis) as measured in the water model.

に直管型ノズルの、Fig. 7 (b) に拡大管型ノズルの結果を示す。いずれもノズル出口と対向面の間隔 (Fig. 2, A~B) が12mmの場合で、ノズル出口から下方3, 5, 7mmの位置における水平面の速度ベクトルである。直管型ノズルの速度ベクトルは断面の位置によって変化し、下方に移動するにつれて周辺部の流速が急速に大きくなっている様子が分かる。このことから、流れは対数ラセン状の経路を経てノズル吐出口より流出しているものと思われる。管軸から半径6mmの領域の周方向分速度は、管軸からの距離の増加とともに大きくなるが、半径が約6mmから28mmの環状領域では周方向分速度は中心からの距離に反比例して減少する。このことから、管軸近傍のコア部 ($r < 6$ mm) では周方向分速度が $v = r\omega$ の関係を満たす強制渦、その外側では $v = K/r$ の関係を満たす自由渦流れとなっているのではないかとと思われる。一方、拡大管型ノズルの場合には断面の深さ方向位置による大きな差異が見られず、深さ方向にほぼ一様な流速の分布を持つことが予想される。

ノズル出口と対向面の間隔 (吐出口間隔) を12mmとした場合の管軸を通る鉛直面の速度ベクトルを Fig. 8 に示す。ここで、(a), (c) は直管型ノズルの、(b), (d) は拡大管型ノズルの、また、(a), (b) は旋回を与えない場合の、(c), (d) は旋回を与えた場合の結果である。旋回のない直管型ノズルの場合、管軸近傍の流れは対向面直前まで直進した後、対向面直前で向きを変え、その後は対向面に沿って流れ、吐出口より流出する。旋回のある場合の流れは、遠心力の作用でノズル出口を離れた直後に向きを変え始める。また、対向面上の管軸付近に渦が形成されているのが分かる。

一方、拡大管型ノズルで旋回のない場合の流れは、直管型ノズルのそれと類似で、対向面直前まで直進し、対向面の直前で向きを変えた後、対向面に沿って流れ、吐出口より流出する。旋回のある場合にはノズル出口と対向面の間に右回りの大きな渦が生じている。また、管軸上の速度ベクトルに半径方向成分が認められるが、これは旋回羽根によって与えられた旋回流れが、完全な軸対称流れとなって

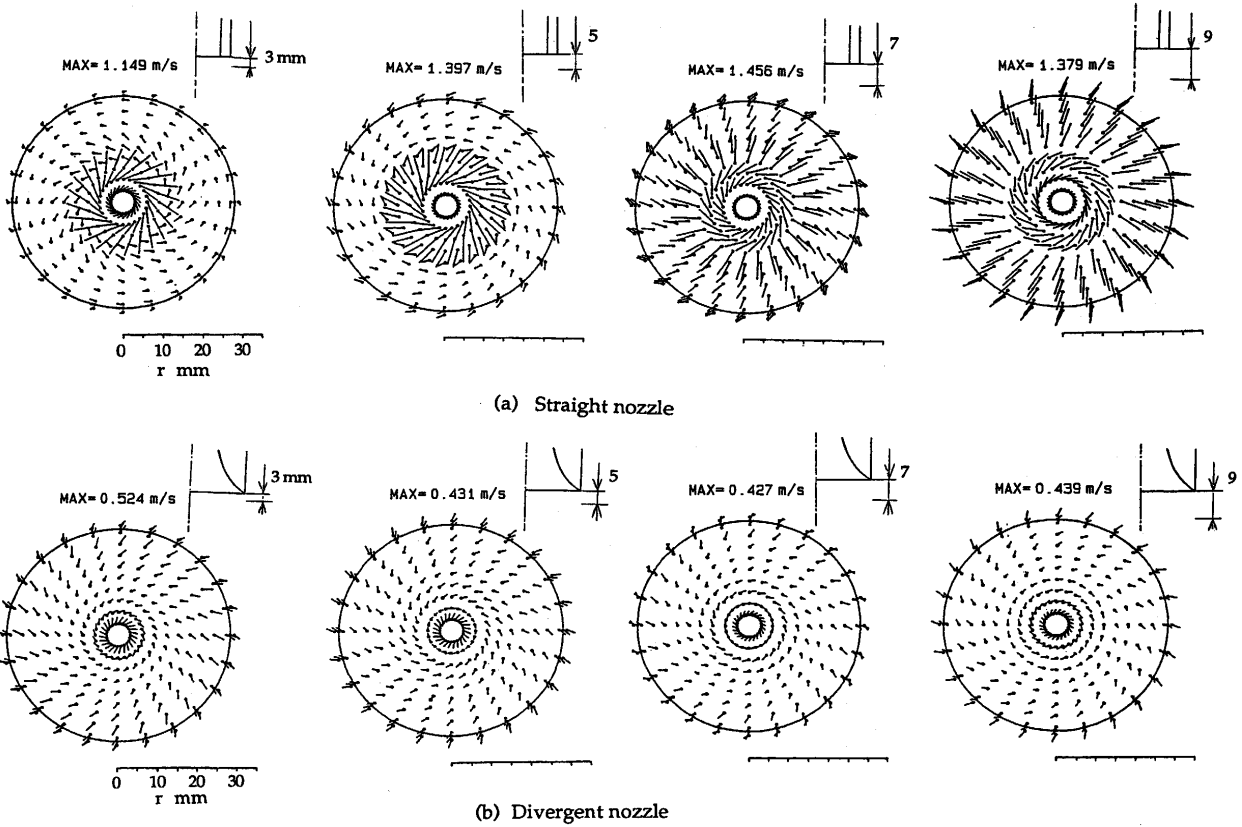


Fig. 7. Velocity vectors (radial and tangential components) measured in planes oriented perpendicular to the nozzle axis at positions 3, 5, 7 and 9mm from the nozzle exit. (a) straight nozzle (b) divergent nozzle.

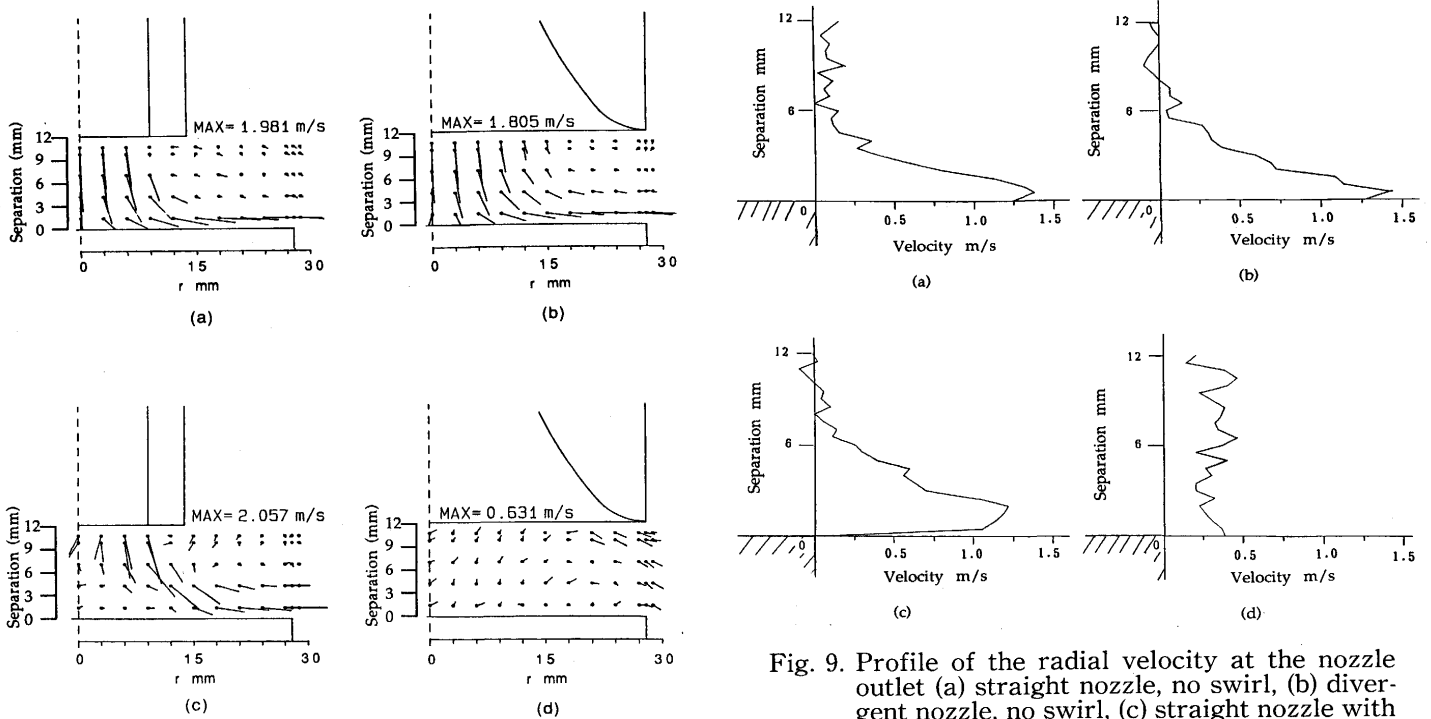


Fig. 8. Velocity vectors (radial and axial components) in the nozzle exit region, measured in a plane through the nozzle axis (a) straight nozzle, no swirl, (b) divergent nozzle, no swirl, (c) straight nozzle with swirl, (d) divergent nozzle with swirl (separation between nozzle exit and opposite face is 12mm).

Fig. 9. Profile of the radial velocity at the nozzle outlet (a) straight nozzle, no swirl, (b) divergent nozzle, no swirl, (c) straight nozzle with swirl, (d) divergent nozzle with swirl (separation between nozzle exit and opposite face is 12mm).

いないことを示唆しているものと思われる。Fig. 9, 10には、ノズル出口と対向面の間隔をそれぞれ12mm, 22mmとした場合のノズル吐出口における半径方向の流速分布を示す。

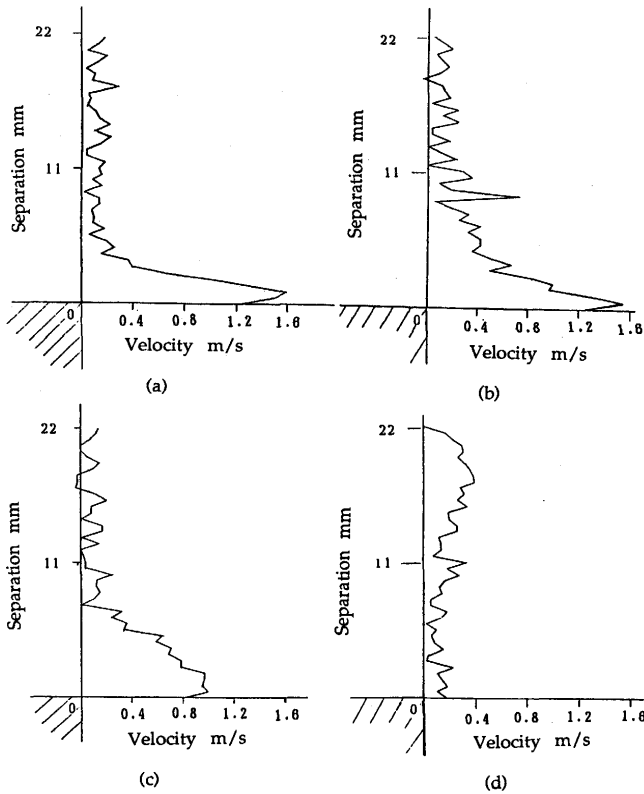


Fig. 10. Profile of the radial velocity at the nozzle outlet (a) straight nozzle, no swirl, (b) divergent nozzle, no swirl, (c) straight nozzle with swirl, (d) divergent nozzle with swirl (separation between nozzle exit and opposite face is 22mm).

ここで、(a)、(b)は旋回のない場合の、(c)、(d)は旋回のある場合の結果で、(a)、(c)は直管型ノズルの、(b)、(d)は拡大管型ノズルの結果である。図中の縦軸はノズル対向面から測定した上向きの距離を示す。旋回のない流れでは、直管型ノズル、拡大管型ノズルいずれの場合も対向面に沿って流出し、対向面近傍 (Fig. 4 のB点近傍) で最大流速となり、対向面から離れるにしたがって流速は減少する。特に、対向面から6mm上方までの流れは非常に速い。拡大管型ノズルの場合には、Fig. 3 (b)に示すように、上部には流れの剥離に起因する吐出口から管軸方向に向かう流れが認められる。

直管型ノズルについて、旋回がある場合 (Fig. 9 (a)) と旋回のない場合 (同(c)) を比較すると、旋回により若干の最大流速の低下と高い流速を示す吐出口の部位の増加が認められる。このことは、旋回が吐出口部における最大流速の低下と均一化に寄与していることを示唆している。この傾向はノズル出口と対向面の間隔が12mmから22mmと増加しても保持されている。

一方、拡大管型ノズルで旋回を与えた場合、Fig. 9 (d) およびFig.10(d)に示すように、ノズルの吐出口部においてほ

ぼ均一な流速の分布が得られるのみならず、最大流速も直管型ノズルで旋回を与えない場合に比して1/3から1/4へと大きく低下している。このように、浸漬ノズル内の流れに旋回を付与することが、吐出口における最大流速の低下と均一化に大きく寄与することが明らかになった。

他方、ノズル出口と対向面の間隔を22mmとした場合には、吐出口における流速は対向面から離れた上部においてむしろ増加の傾向を示している。本研究では旋回の強さを変化させていないが、浸漬ノズルの形状や寸法に適合した旋回の強さを選択すると吐出口部における流速の分布を最適化できる可能性を示唆するものである。この点に関しては、現在、計算機シミュレーションにより研究を行っており、その条件は徐々に明らかになってきている。その結果については、別報にて報告する予定である。

4. 結言

鋼の連続铸造用浸漬ノズルの開発を目的として、浸漬ノズル内の流れに旋回を与えた場合の吐出口近傍における流速分布の変化を、レーザードップラー流速計を用いた水モデル実験により検討した。

その結果、直管型ノズルおよび拡大管型ノズルいずれの場合も、ともにノズル内の流れに旋回を付加すると、吐出口における吐出流速分布は変化し、均一化することが明らかになった。

この結果を、通常行われている旋回を付加しない操業と比較すると、浸漬ノズルの吐出口下部に見られる最大の吐出流速を1/3~1/4と大きく低下し得る可能性があることを示唆している。特に、この効果は拡大管型ノズルに旋回を付加した場合に顕著となる。

この手法を溶鋼の連続铸造プロセスに適用する場合、浸漬ノズルの上部において外部よりノズル内の溶鋼に回転磁場を付加して旋回を与える方法が考えられる。この方法によって浸漬ノズルの鑄型内にある開口部前面における最大流速の低減による流速分布の均一化、ひいては鑄型内の流れの制御が可能であると考えている。

文 献

- 1) 竹内秀次, 戸澤宏一, 別所永康, 石塚晴彦, 奥田治志: 材料とプロセス, 3 (1990), p.1110
- 2) 齊藤健志, 山崎久生, 野崎 努, 日和佐章一, 小口征男: 材料とプロセス, 2 (1989), p.299
- 3) 久保田淳, 沖本一生, 白山 章, 政岡俊雄, 手嶋俊雄: 材料とプロセス, 3 (1990), p.256
- 4) 久保田淳, 藤原 等, 岡 良徳, 沖本一生, 白山 章, 政岡俊雄, 手嶋俊雄: 材料とプロセス, 3 (1990), p.257
- 5) 久保田淳, 沖本一生, 岡 良徳, 政岡俊雄, 鈴木幹雄: 材料とプロセス, 3 (1990), p.1098