

# 広幅スラブ連続铸造用旋回流ノズルの吐出角度設計

塚口 友一\*・中村 修\*・横谷 真一郎\*<sup>2</sup>・高木 茂男\*<sup>2</sup>

Outlet Flow Angle Design of Swirling Flow Submerged Entry Nozzle for Wide Slab Casting

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 optimum outlet port design that the narrow width of the outlet port is optimum for the swirling flow submerged entry nozzle.

In addition to that, we got another conclusion of the outlet port design relation to the outlet flow angle that the optimum downward angle of outlet flow is 30–40 degree for stable flow formation in the wide slab 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、铸型内における溶鋼表面流速には適正範囲が存在するとされている<sup>1-3)</sup>。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ーキや電磁攪拌が広く適用されている<sup>4-7)</sup>。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のみでは、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、まずその源である浸漬ノズルからの吐出流を安定に保つことが重要である。

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<sup>8-16)</sup>を実機铸造に活かすべく、産学協同研究を進めてきた<sup>17-23)</sup>。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。

フルスケール水モデル実験により吐出孔形状の影響について調査した結果として、前報では適正な吐出孔幅について述べた<sup>24)</sup>。本報告では、吐出孔幅を適正化した上で、吐出角度という観点から旋回流ノズルの吐出孔形状の適正化について考察した。

## 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。

铸型サイズを(株)住金鋼鉄和歌山の広幅サイズとしたのは、铸型内流動が不安定になりやすい広幅铸型<sup>23)</sup>に適

平成17年1月13日受付 平成17年4月21日受理 (Received on Jan. 13, 2005; Accepted on Apr. 21, 2005)

\* 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)

\*<sup>2</sup> 日本工業大学機械工学科 (Dept. of Mechanical Engineering, Nippon Institute of Technology)

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。

浸漬ノズルは、吐出孔開孔寸法を前報<sup>24)</sup>で適正とされた幅55mm×高さ90mmに固定した上で、Table 2に示すように吐出孔上壁および下壁形状(角度)を変えることにより様々な吐出角度を得た5種類の旋回流ノズル、および旋回流羽根を内装しない通常の浸漬ノズル(以下、通常ノズル)3種類を用いて、吐出角度が鋳型内流動におよぼす影響を調べた。吐出孔形状の一例(Case C)をFig. 2に示した。実験に供した浸漬ノズルは、アルミナグラファイト製である。浸漬ノズルは、全て吐出孔出口下端の浸漬深さを255mm一定に保って設置した。

Table 2に示す旋回流ノズルは、ノズル内径および旋回流羽根の仕様をTable 3およびFig. 3に示す共通した仕様とした。旋回流羽根の厚みは15mmとした。通常ノズルのHおよびJは、旋回流ノズルと同じ内径の本体を用い、旋回流

根を除いたものである。また、通常ノズルのIは、本体内部がノズル上端内径90mm 下端内径77mmの円錐台形状の一般的な浸漬ノズルである。これら浸漬ノズルは全て凹形状の底を有しており、その深さは、AからFは15mm、Iが10mm、ノズル外径は全て140mmとした。

鋳型内流動評価にはレーザードップラー流速計を用い、鋳型内表面流速および吐出孔流速を測定した。鋳型内表面流速は、代表値として鋳型1/4幅-1/2厚-水面下50mmにおける鋳型長辺と平行な水平方向流速を3分間測定した。吐出孔流速は、鋳造速度1.6m/min相当の条件下でノズル吐出孔の前面5mmにおける鋳型長辺に平行な水平方向および鉛直方向の流速を測定した。吐出流速の測定点は、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。測定時間は各点3分間とした。上記9点において測定した水平方向流速と鉛直方向流速の平均値から求めた吐出角度をTable 2に記している。

Table 1. Water model specification and condition.

Scale	1/1
Mold size	210 × 1850 (mm)
Bath depth	1850 (mm)
Corresponding casting speed	1.6 - 2.0 (m/min)

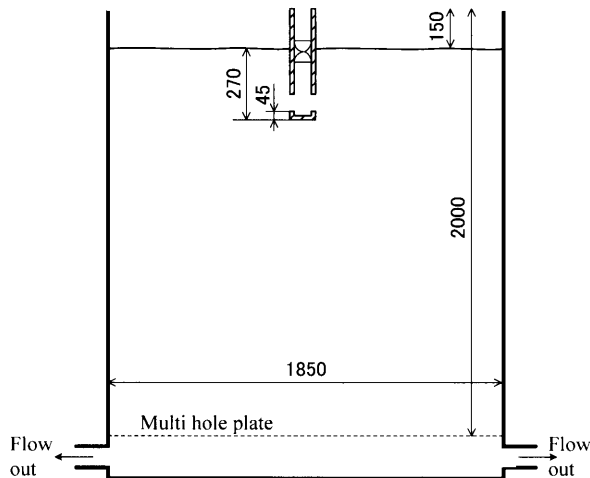


Fig. 1. Schematic view of water model.

### 3. 実験結果

吐出角度と鋳型内表面流速との関係をFig. 4、鋳型内表面流速変動との関係をFig. 5に示す。Fig. 4およびFig. 5において吐出角度は下向きが正、Fig. 4におけるメニスカス流速は鋳型短辺からノズルへ向かう方向を正とした。Fig. 5の縦軸は、鋳型内表面流速変動の指標として、その標準偏差を平均値で除した値である。鋳型内表面流速の標準偏差は、測定データを0.5s毎に平均化したものを1データとし、測定時間3分間の360データから求めた。Fig. 4およびFig. 5中の実線は旋回流ノズルデータ5点の2次近似曲線、破線は通常ノズルデータ3点を結ぶ2次曲線である。またFig. 4およびFig. 5中の添字は、Table 2におけるノズル銘柄(Case)を示す。

Fig. 4およびFig. 5より、旋回流ノズル・通常ノズルともに、概ね吐出角度が30~40°において、鋳型内表面流速が極大、その変動が極小となることがわかった。ただし、Fig. 4における通常ノズルデータの極大点は、データ3点

Table 2. Specification of submerged entry nozzle.

Type of nozzle	Case	Shape of outlet port			Internal diameter (mm)	Outlet flow angle (°)
		Size (mm)	Upper wall	Lower wall		
Swirling flow	C	W=55, H=90	R60	u10°	φ101-φ80	d40°
	D		R60	u20°	φ101-φ80	d37°
	E		R60	0°	φ101-φ80	d24°
	F		u10°	u10°	φ101-φ80	d14°
	G		R120	d30°	φ101-φ80	d41°
Conventional	H		u10°	u10°	φ101-φ80	d18°
	I		u10°	u10°	φ90-φ77	d32°
	J		d30°	d30°	φ101-φ80	d42°

u: upward, d: downward

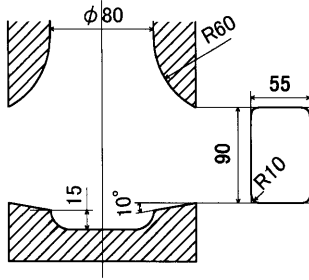


Fig. 2. Dimension of outlet port (Case C).

Table 3. Specification of swirling flow nozzle.

Type	Twisted plate (Fixed in nozzle)
Diameter & Length	φ100, L = 100 (mm)
Twist angle	120°

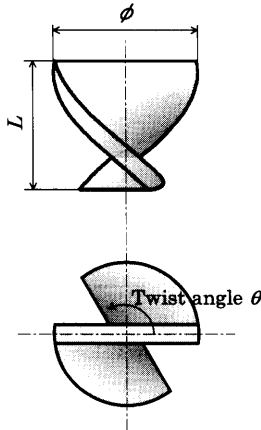


Fig. 3. Dimension of swirling blade.

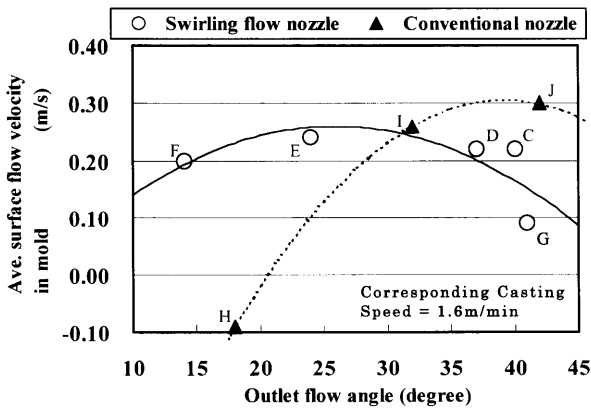


Fig. 4. Influence of outlet flow angle on surface flow velocity in mold.

を結ぶ2次曲線からの推定である。また Fig. 5 に示されるように、旋回流ノズルは、通常ノズルに比べ鋳型内表面流速の変動が幅広い吐出角度範囲において低位である。

本研究の目的は、鋳型内流動が安定する条件を見つけることであるから、上記鋳型内表面流速極大・流速変動極小点に近く、かつ測定データの鋳型内表面流速変動が小さい

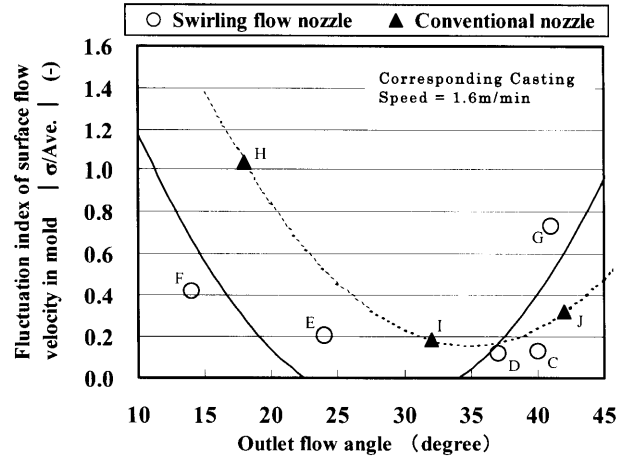


Fig. 5. Influence of outlet flow angle on surface flow fluctuation in mold.

Case CあるいはDが適正な吐出孔形状であるといえる。

#### 4. 考察

##### 4.1 鋳型内流動の自励振動

Fig. 4 および Fig. 5 に示したように、吐出角度には鋳型内表面流速が極大となるとともに安定化する適正領域が存在することがわかった。そこで、吐出角度が鋳型内表面流速変動に影響をおよぼす機構について、短辺反転流の形成、および鋳型内流動の自励振動（自励振動的片流れ）の観点から、考察した。

鋳型内表面流速測定時には、周期的に流速が変動する自励振動的挙動が観察される場合があった。その自励振動周期を求めるべく、鋳型内表面流速データをFFT解析に供した。解析の結果パワースペクトル密度が  $2.0 \times 10^{-4}$  以上のピークが観察された場合に、その周期を鋳型内流動の自励振動周期と定めた。解析においては、データ収集期間長さ（3分間）を考慮し、精度が低下する周波数 0.03 Hz 未満（周期 34 s 以上）のピークは無視した。

Table 4 にこうして求めた自励振動周期を平均鋳型内表面流速と合わせて示す。

Table 4 における自励振動の有無を、吐出角度および鋳型内表面流速と関連づけて表したものが Fig. 6 である。Fig. 6 より、流速の絶対値が 0.1 m/s 以下と小さく鋳型内流動が停滞して自励振動の発生が不明確な領域を除くと、鋳型内流動の自励振動は吐出角度が小さい領域で生じることがわかった。この傾向は、旋回流ノズル・通常ノズルの別を問わず、同じであった。

Fig. 6 の自励振動発生領域において、FFT 解析によって求めた自励振動周期と平均鋳型内表面流速との関係を整理すると、Fig. 7 が得られた。Fig. 7 より、鋳型内流動の自励振動周期は、鋳型内表面流速と一次の負の相関関係にあることがわかった。

Table 4. Period of self-excited flow oscillation in mold.

Type of nozzle	Case	Shape of outlet port		Corresponding casting speed	Ave. surface flow velocity in mold	Period of flow oscillation			
		Size: W*L	Upper wall				Lower wall		
Swirling flow	A	80*62	R60	u10°	1.6 m/min	0.00m/s	-		
	B	66*75	R60	u10°	1.6 m/min	0.18m/s	32s		
	C	55*90	R60	u10°	1.6 m/min	0.22m/s	-		
	D		R60	u20°	1.6 m/min	0.22m/s	-		
	E		R60	0°	1.6 m/min	0.24m/s	18s		
	F		u10°	u10°	1.6 m/min	0.20m/s	32s		
	G		R120	d30°	1.6 m/min	0.09m/s	-		
H	u10°		u10°	1.6 m/min	-0.09m/s	-			
Conventional	I-1		55*90	u10°	u10°	1.6 m/min	0.26m/s	21s	
	I-2	2.0 m/min				0.28m/s	17s		
	J	d30°				d30°	1.6 m/min	0.30m/s	-

u: upward, d: downward

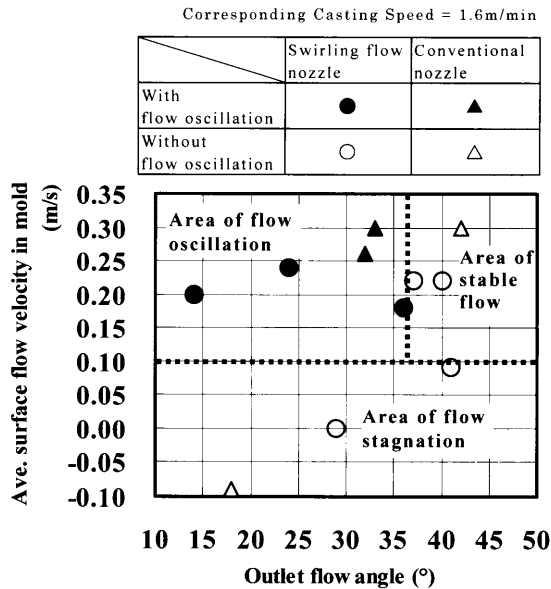


Fig. 6. Area division of flow pattern in mold.

なお、Fig. 7 に示した自励振動周期の絶対値は、水モデル実験装置の槽深さや排水経路等の影響を受けて変動すると考えられるので、絶対値の意味についてはここでは論じない。

4・2 吐出角度に適正範囲が存在する理由

これら調査結果を総括して、吐出角度には鋳型内表面流速が極大となるとともに安定化する適正範囲が存在する理由を、以下に考察する。

Fig. 7 において、鋳型内流動の自励振動周期は鋳型内表面流速と負の相関関係にあった。このことは、Fig. 8 に示すようなダブルロール流動パターンが形成され鋳型内表面流速が短辺反転流の速度を代表していると仮定し、自励振動が短辺反転流のゆらぎ、すなわち循環流の生成・成長と消滅サイクルによって生じ、ゆらぎが変化する速さを決めるひとつの因子がその流速であると考えたと説明できる。ゆえに、鋳型内表面流速に見られる自励振動は、循環流で

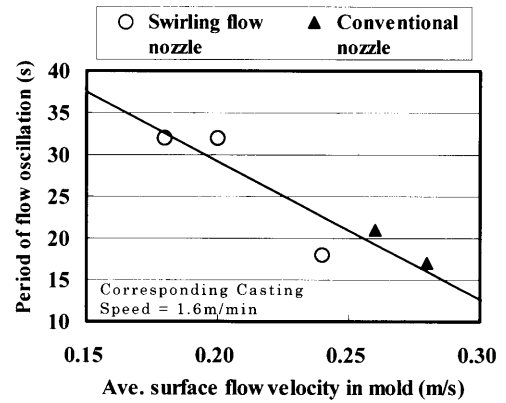


Fig. 7. Relationship between surface flow velocity and period of flow oscillation in mold.

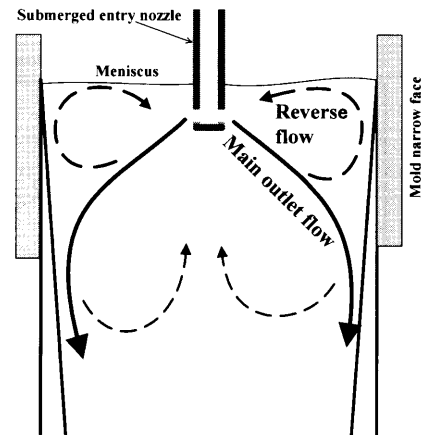


Fig. 8. Schematic View of Double Roll Flow Pattern in Mold.

ある短辺反転流の自励振動を表しており、鋳型内表面流を安定化するには、短辺反転流を安定して形成する必要があると言える。

このような観点に立つと、吐出角度が大きすぎる場合には短辺反転流が鋳型内表面に到達するまでに減衰し安定した流動パターンが形成されず、また吐出角度が小さすぎる

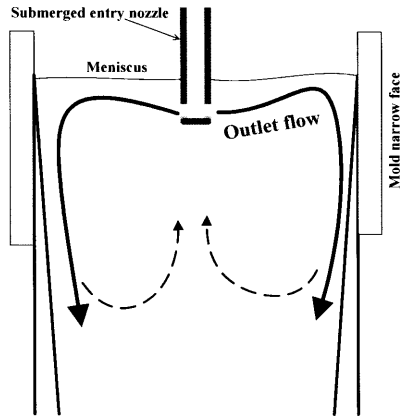


Fig. 9. Schematic View of Single Roll Flow Pattern in Mold.

場合には流動の自励振動が生じ短辺反転流の形成が不安定になると解釈できる。すなわち、吐出角度には短辺反転流を安定して形成する適正範囲があり、Fig. 4 および Fig. 5 に示したようにその適正範囲においては高いメニスカス流速が安定して維持される。

吐出角度が小さすぎる場合に短辺反転流の形成が不安定になる理由は、以下のように考えられる。

吐出角度が水平に近いか上向きである場合には、Fig. 9 に示すような、吐出流が鋳型短辺へ向かうメニスカス流を直接形成するシングルロール流動パターンへ移行し<sup>2)</sup>、短辺反転流が消滅する。吐出角度が小さい場合には、シングルロール流動パターンへの遷移域に入り、吐出流と短辺反転流との干渉に起因する自励振動が発生して流動が不安定になると考えられる。

ここで、Fig. 4 あるいは Fig. 6 の通常ノズルにおいて最も吐出角度が小さいプロット (Case H) の鋳型内表面流速平均値はマイナス (ノズルから鋳型短辺に向かう流れ) であり平均的な流れはシングルロール流動パターンへ移行していることを表している。しかし、Fig. 5 に示した鋳型内表面流速変動の大きさからは、Case H の鋳型内表面流速は正負領域にまたがって変動していると考えられ、ダブルロール流動パターンからシングルロール流動パターンへの遷移域を脱していないと言える。完全なシングルロール流動パターンへ移行した場合には、短辺反転流と吐出流との干渉が解消され、鋳型内流動は安定化すると推測される。

#### 4.3 通常ノズルと旋回流ノズルとの違い

Fig. 4 あるいは Fig. 6 において、吐出角度が下向 20° 未満の領域では、上記のように通常ノズルを適用した場合にのみシングルロール流動パターンへ移行している。また、Fig. 5 から読みとれるように、吐出角度が適正範囲の下限值である 30° よりも小さい側に外れた場合の鋳型内表面流速変動増大は、通常ノズルの方が旋回流ノズルよりも大きい。これらの理由は、以下のように考えられる。

通常ノズルの場合、ノズル内下降流が底部に当たること

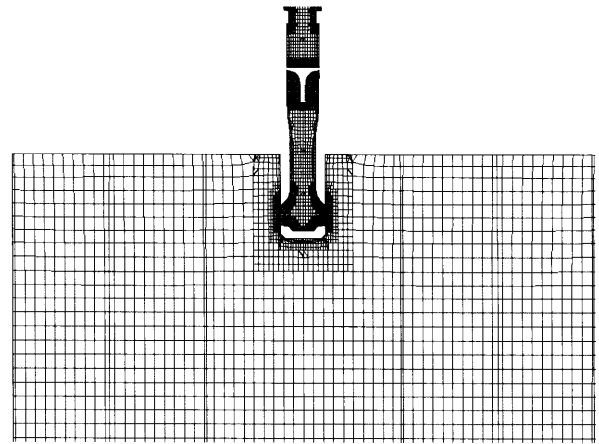


Fig. 10. Geometry of Grid (Vertical Cross Section).

によって水平方向の速度ベクトルを与えられる。そのようなノズル内流動の特性上、吐出流がノズル底部によって形成される流れの影響を強く受ける。水モデル実験において鋳型内流動を観察すると、通常ノズルの場合には、吐出角度の変動が大きく、ノズル底から跳ね上がる流れが時折水平あるいは上向きに噴流状に吐出し、浸漬ノズルから鋳型短辺に向かう短辺反転流とは逆向きの流動を形成する状況が見られた。それに対し、旋回流ノズルの場合には、吐出孔全面から均等かつ安定な吐出流が観察され、吐出孔よりも上部においては鋳型短辺からノズルに向かう短辺反転流が安定して維持されていた。すなわち、通常ノズルの方が旋回流ノズルよりも吐出流の上下の広がりの方が大きいので、吐出流が短辺反転流と干渉し、短辺反転流の不安定さやシングルロール流動パターンへの移行を引き起こすのである。

#### 4.4 流動計算による検証

上記観察結果を裏付けるべく、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 6.0<sup>25)</sup> 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対しより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、水面においては 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.10 に示す。計算は換算鋳造速度 1.6m/min 条件において行った。解析結果から、ノズル Case C および Case H の吐出孔 1/2 幅の鋳型長辺に平行な縦断面における吐出孔近傍の流速を Fig.11 および Fig.12 に示す。Fig.11 および Fig.12 の対比から、旋回流ノズルの吐出孔流速は全面で均等な分布であるのに対し、通常ノズルの吐出孔流速分布は、下部から斜め下向きに吐出する主流と、上部から斜め上向きに吐出する流れに2分されていることがわかる。

上記計算により、浸漬ノズルから 30mm 離れた鋳型長

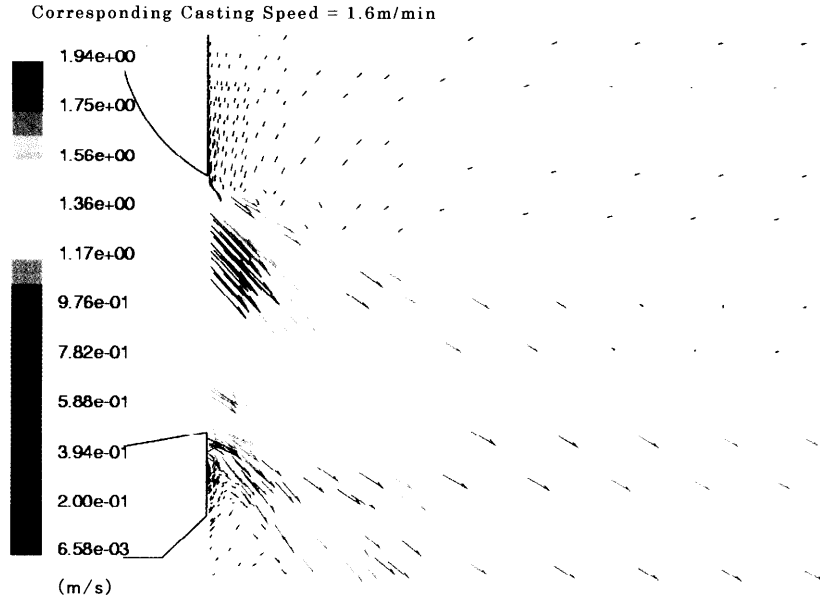


Fig. 11. Outlet Flow Vectors of Mean Velocity (Vertical Cross Section, Case C).

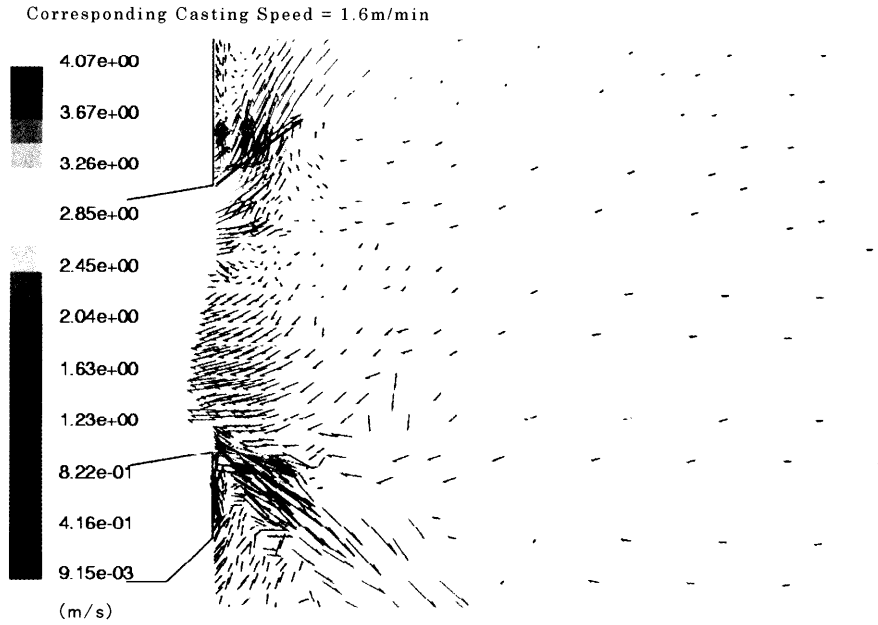


Fig. 12. Outlet Flow Vectors of Mean Velocity (Vertical Cross Section, Case H).

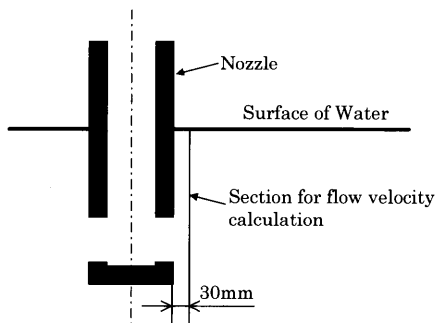


Fig. 13. Section for Flow Velocity Calculation near Nozzle.

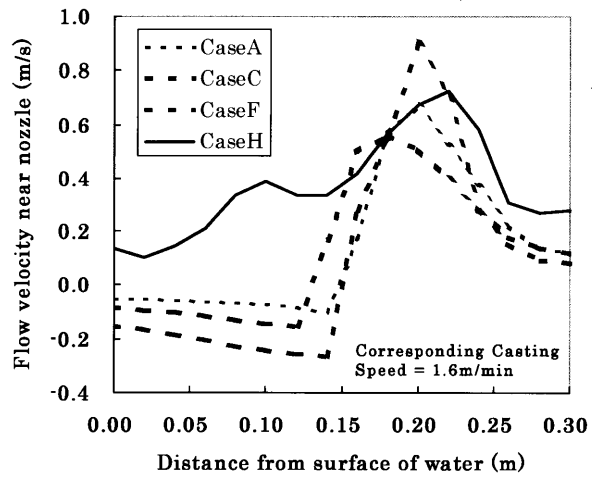


Fig. 14. Flow Velocity Distribution near Nozzle.

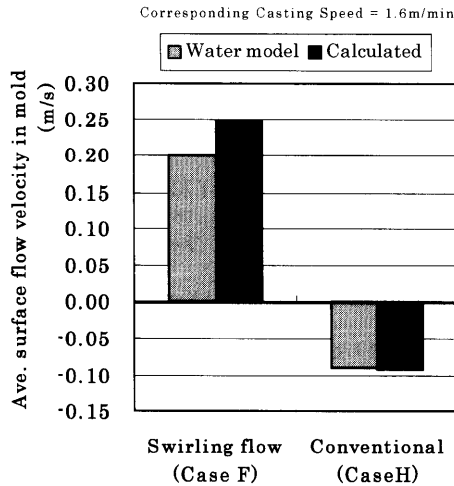


Fig. 15. Comparison of surface flow velocity in mold.

辺に垂直な縦断面 (Fig.13 参照) における平均流速の分布を求めた。結果を Fig.14 に示す。Fig.14 において、横軸は水面からの深さ (下向きが正) を表し、縦軸は鋳型全厚みで平均した流速を示す。また、縦軸の符号が正のときノズルから鋳型短辺へ向かう流れ、負のとき鋳型短辺からノズルに向かう流れが形成されていることを示す。Fig.14 より、旋回流ノズル (Case A, Case C, Case F; Table 4 参照) の場合には吐出角度が 14° と小さい Case F を含めいずれも水面から深さ 200~250 mm に単一の流速ピークが見られ、水面から 150 mm 程度までの浅い領域においては鋳型短辺から浸漬ノズルに向かう短辺反転流が明確に表れている。それに対し、通常ノズル (Case H) の場合には、水面から深さ 200~250 mm における第 1 ピークの他に、水面から深さ 100 mm 近傍に小さな第 2 ピークが見られる。また、水面近傍の浅い領域においても短辺反転流 (負の流れ) は見られない。

これらの比較から、吐出流が直接形成すると考えられる単一の明瞭な流速ピークが存在する旋回流ノズルに対し、通常ノズルでは、上記第 2 ピークが存在するなど、ノズルから鋳型短辺へと向かう吐出流が水面近くまで不明瞭に広がっている。この第 2 ピークは、水モデル実験において観察されたノズル底から跳ね上がる流れが再現されたものと解釈される。そのような第 2 ピークの形成は、通常ノズル適用時にシングルロール流動パターンへ移行しやすい原因であると考えられる。

Fig.15 には、吐出角度がともに下向 20° 未満の旋回流ノズル (Case F) および通常ノズル (Case H) の平均鋳型内表面流速測定値と計算値とを示した。Fig.15 より、計算結果は、通常ノズル適用時にシングルロール流動パターンに移行しやすいという水モデル実験結果を、良く反映することが確認された。

このように、通常ノズルの場合、ノズル内下降流に水平方向速度ベクトルを与えるのがノズル底部のみであること

から、ノズル底部からの跳ね上がり流が強く生じ、ノズル内下降流がゆらぐ影響も受けて、鋳型内表面に向けて吹き上がる流れが不安定に生じると考えられる。この流れが、短辺からノズルに向かう短辺反転流と干渉するので、通常ノズルの場合には、鋳型内表面流速の変動が大きくなり、また旋回流ノズルに比べて吐出流に大きな下向き角度を与えなければ安定した短辺反転流が形成されないと考えられる。しかしながら、吐出流に大きな下向き角度を与えると、特に広幅スラブ鋳造においては、鋳型内溶鋼表面温度が低下して操業・品質上のトラブルを招きやすい。それに対し、旋回流ノズルは幅広い吐出角度範囲で鋳型内流動を安定に保てるので、鋳造条件にかかわらず操業・品質を安定化できる。

従来、ノズル本体内径に急激な絞りと拡管 (段差) を設けた浸漬ノズル<sup>26)</sup> や、浸漬ノズルの吐出孔あるいは底部形状の工夫<sup>27-29)</sup> など、浸漬ノズル形状の工夫により鋳型内流動を安定化する試みが成されている。しかしながら、ノズル内下降流に水平方向速度ベクトルを与えるのをノズル底部のみに頼っていることから、Fig.11 と Fig.12 との対比からも明らかのように、吐出孔全面が有効に使われず吐出孔下部に吐出流が集中し吸い込み流が生じやすい。あるいは、凹形状の底を有する場合には上述したように吐出角度の変動が大きくなる。これらは、介在物付着による吐出孔の閉塞や、鋳型内流動が不安定になる原因となる。それらに対し、旋回流ノズルの場合は、遠心力により広がって吐出孔上部から流出する流れが生じるので、吐出孔全面から均等な吐出流が安定して形成される。ゆえに、吐出孔の閉塞が小さく<sup>30)</sup>、かつ、鋳型内流動が安定化すると考えられる。

## 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角度を調査した。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 吐出角度には旋回流ノズル・通常ノズルを問わず、安定した鋳型内表面流速が得られる適正範囲がある。この適正範囲内においてはダブルロール流動パターンが安定して形成されるが、吐出角度が適正範囲を外れて小さくなるとシングルロール流動パターンへの遷移域に入り、吐出流と短辺反転流との干渉に起因する自励振動が発生し流動が不安定になる。また吐出角度が適正範囲を外れて大きくなると、吐出流の減衰が大きくなり安定した短辺反転流が形成されなくなる。適正な吐出角度は、今回の鋳造条件において下向 30°~40° であった。この適正な吐出角度を得ることができる旋回流ノズル吐出孔形状は、今回前提とした吐出孔開孔寸法 (幅 55 mm×高さ 90 mm) において、上壁形状 R60-下壁角度上向 10°~上向 20° の組合せであった。

(2) 旋回流ノズル適用時に比べ、通常ノズル適用時のメニスカス流速が不安定であり、鑄型内表面流速が安定する吐出角度範囲が吐出角度の小さい側で狭い理由は、以下のように考えられた。すなわち、吐出孔における吐出流速分布が均一で安定した下向角度の吐出流を形成する旋回流ノズルに比べ、凹形状の底部を有する通常ノズルからの吐出流分布は不均一で上下に2分され、上方への吐出流が短辺反転流の形成を阻害する。

## 文 献

- 1) 床並徹二, 尾上善則, 松尾勝良, 田井啓文, 森下雅史, 安中弘行, 綾田研三: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 606.
- 2) Y.Ohtani, J.Fukuda, A.Kiyose, T.Kawase, J.Nakashima and K.Nakamura: Proc. of 1st. Int. Cong. on Science and Tech. of Steelmaking (ICS '96), ISIJ, Japan, (1996), 97.
- 3) M.Iguchi, J.Yoshida, T.Shimizu and Y.Mizuno: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 685.
- 4) 鈴木健一郎, 村田賢治, 中西恭二, 児玉正範, 小島信司, 宮崎容治: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), S920.
- 5) 井戸川聡, 北野嘉久, 戸沢宏一: *Kawasaki Steel Giho*, **28** (1996), 46.
- 6) 山田 亘, 清瀬明人, 中島潤二, 福田 淳, 岡澤健介, 宮沢憲一: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 682.
- 7) 久保田淳, 久保典子, 鈴木 真, 石井俊夫, 西町龍三, 荒巻則親: *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) 横谷真一郎, 松本正勝, 浅古 豊, 原 茂太, J.Szekely: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1158.
- 11) 横谷真一郎, R.Westhoff, J.Szekely, 浅古 豊, 原 茂太: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1159.
- 12) 横谷真一郎, R.Westhoff, 浅古 豊, 原 茂太, J.Szekely: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 759.
- 13) 横谷真一郎, 高木茂男, 牧博文, 綾田研三, J.Szekely, 原 茂太: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1116.
- 14) 横谷真一郎, 高木茂男, 綾田研三, 浅古 豊, 原 茂太: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 608.
- 15) 横谷真一郎, 高木茂男, 安ヶ平和一, 金丸修久, 井口 学, 原 茂太: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 753.
- 16) 横谷真一郎, 高木茂男, 井口 学, 原 茂太: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 809.
- 17) Y.Tsukaguchi, S.Furuhashi and M.Kawamoto: *ISIJ Int.*, **44** (2004), 350.
- 18) 林 浩史, 塚口友一, 岩田勝吉, 野々部和男, 横谷真一郎: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 162.
- 19) 大谷慎吾, 横谷真一郎, 高木茂男, 塚口友一, 原 茂太, 丸川雄浄: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 163.
- 20) 原田貴文, 塚口友一, 横谷真一郎, 高木茂男, 原 茂太, 丸川雄浄: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 164.
- 21) 塚口友一, 野々部和男, 横谷真一郎, 高木茂男, 原 茂太, 丸川雄浄: *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, 塚口友一, 横谷真一郎: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 949.
- 24) 塚口友一, 中村 修, 横谷真一郎, 高木茂男: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), 245.
- 25) FLUENT 6.0 User's Guide, ed. by Fluent Inc., Dec., (2001).
- 26) 横谷真一郎, 長尾伸一, 浅古 豊, 高木茂男, 綾田研三, Julian Szekely, 原 茂太: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 581.
- 27) 小西淳平, 沖森麻佑巳, 奥村裕彦, 久富良一, 今村 晃, 田中宏幸: *CAMP-ISIJ*, **3** (1990), 260.
- 28) 久保田淳, 小澤宏一, 桑野清吾, 山岡祐一, 鈴木幹雄: *CAMP-ISIJ*, **5** (1992), 1245.
- 29) 沖村利昭, 向 政登, 中島義夫: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 292.
- 30) 原田貴文, 野々部和男, 横谷真一郎, 原 茂太, 丸川雄浄: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 899.