OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	スラブ連続鋳造用旋回流浸漬ノズルの開発
Author(s)	塚口, 友一; 林, 浩史; 栗本, 英典 他
Citation	鉄と鋼. 2009, 95(1), p. 33-42
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/26369
rights	©日本鉄鋼協会
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

論 文

鉄 と 鋼 Tetsu-to-Hagané Vol. 95 (2009) No. 1

スラブ連続鋳造用旋回流浸漬ノズルの開発

塚口 友一*・林 浩史*2・栗本 英典*3・横谷 真一郎*4・丸川 雄浄*5・田中 敏宏*6

Development of Swirling Flow Submerged Entry Nozzles for Slab Casting

Yuichi TSUKAGUCHI, *Hiroshi* HAYASHI, *Hidenori* KURIMOTO, *Shinichiro* YOKOYA, *Katsukiyo* MARUKAWA and *Toshihiro* TANAKA

Synopsis : We have started a development of swirling flow submerged entry nozzles in 1997 as a fundamental and effective measure for controlling flow pattern in continuous casting molds.

As a first step, we have developed a swirling flow submerged entry nozzle for round billet casting in Wakayama works. Then we started the development of swirling flow submerged entry nozzles for slab casting. A main purpose of our development was to prove the effect of the swirling flow formation in submerged entry nozzles which improve quality of products and productivity of continuous casting processes. We have examined swirling flow submerged entry nozzles with swirl blade in these main bodies, because that was the easiest way to apply swirling flow to submerged entry nozzles in continuous casters without any investment of facilities. We had only to change a submerged entry nozzle for the experiment.

Swirling flow submerged entry nozzles for slab casting have been developed and examined in Wakayama and Kashima works. As a result of these examinations, the effect of the swirling flow formation in submerged entry nozzles was evaluated to increase casting speed and improve surface quality of slabs and steel sheets.

Key words: continuous casting; submerged entry nozzle; swirling flow; surface quality; casting speed.

1. 緒言

浸漬ノズル内の下降流に旋回を付与する旋回流付与型浸漬ノズル（以下，旋回流ノズル）は，鋳型内流動制御の源流対策であり，形成した鋳型内流動を安定に維持することにより鋳造速度の向上や鋳片ならびに鋼板コイルの表面品質改善を図る技術である。著者らは1997年から，鋼の連続鋳造プロセスにおいて浸漬ノズル内旋回流付与の効果を実証するべく研究開発を進めてきた[1–8]。本研究開発においては，連続鋳造設備の改造を伴わずに実機における鋳造試験を進められる観点から捻り板状旋回羽根を内装する旋回流ノズルを用い，最終的な目的をスラブの連続鋳造において旋回流ノズルの効果を実証することとした。なお，スラブの連続鋳造における旋回流ノズルの開発は，鋳型内流動制御に電磁気力を利用しない条件を前提とした。その背景には，源流対策である浸漬ノズル吐出流の均一化ならびに安定化が鋳型内電磁気力利用に匹敵する効果を生むとの期待があった。また，本報における旋回流ノズルは，タンディッシュ–鋳型間の位置エネルギーを利用する技術であり，数億円規模の設備投資と電気エネルギーを必要とする鋳型内電磁気力利用法に比べて経済的で省資源・省エネルギーな鋳型内流動改善が可能な方法である。

連続鋳造実機を用いた旋回流ノズルの開発は，操業ならびに品質上のリスクが小さい丸ビレット連続鋳造における開発[9,10]によって耐火物の耐久性や捻り板状旋回羽根が形成する旋回流の強さ等を確認した後，スラブの連続鋳造にその場を移した。スラブの連続鋳造に旋回流ノズルを適用するに当たっては，水モデル実験および数値流動解析による十分な事前検討を行って，利用可能な範囲の位置エネルギーを有効に活用する設計や，浸漬ノズル内の旋回流を活用して適正かつ安定な鋳型内流動を得る吐出孔設計に関する指針を得た[11–13]。

本報では，得られた設計指針を用いてスラブ連続鋳造用旋回流ノズルを設計し，実機における鋳造試験に供する過程およびその結果について述べる。鋳造試験の対象は，自動車外板等に使用される亜鉛メッキ鋼板の素材である極低炭素鋼とした。対象材質は，最も表面品質に対する要求水準が高い材質のひとつである。このような表面品質厳格材

平成20年6月20日受付 平成20年8月18日受理 (Recieved on June 20, 2008; Accepted on Aug. 18, 2008)

＊ 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 Kamisu Ibaraki 314–0255)
＊2（株）住金鋼鉄和歌山 (Sumikin Iron & Steel Corp.)
＊3 住友金属工業（株）鋼板建材カンパニー鹿島製鋼部 (Steel Making Department, Kashima Works, Steel Sheet, Plate, Titanium & Struction Steel Compamy, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)
＊4 スウェーデン王立工科大学 (Division of Applied Process Metallurgy, KTH)
＊5 住友金属工業（株）(Sumitomo Metal Industries, Ltd.)
＊6 大阪大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Osaka University)

に適用することによって，旋回流ノズルの効果を明確に評価することができると考えた。本報では鋳造試験に先だって，まず実機大の水モデル実験によって，浸漬ノズル内の下降流に旋回を付与しない通常の浸漬ノズル（以下，通常浸漬ノズル）に対する旋回流ノズルの優位性を確認した。その後，スラブの連続鋳造実機に旋回流ノズルを適用し，その鋳型内流動安定化ならびに鋳片および鋼板コイルの品質向上に対する効果を実証した。

2. 通常浸漬ノズルが有する問題点と旋回流ノズルの優位性

ここでは，通常浸漬ノズルが有する問題点を整理し，旋回流ノズル適用の目的を明らかとする。一般的なスラブの連続鋳造において，通常浸漬ノズルは，流動の観点から次のような問題を有すると考えられる。

通常浸漬ノズル内においては，下降流がその底部で水平方向の速度成分を付加されて，2つの対向する吐出孔から流出する。そのため，吐出流は吐出孔の下部に偏りやすく，高速の流れとなって鋳型内湯面を波立たせる。また吐出孔上部では，吸い込み流が形成される。さらに浸漬ノズル底部で跳ね上がる流れが発生し，吐出流の上下方向角度を変動させる。

一方，浸漬ノズル内の下降流が不安定に揺らぐ影響を受けて，2つの吐出孔からの吐出流は不均等になりやすく，吐出角度の変動によって生じる鋳型内流動の自励振動的な片流れ[13]を助長すると考えられる。鋳型内の片流れ（浸漬ノズル左右での不均等流れ；Fig. 1(a) 参照）は，流れが弱い側の浸漬ノズル近傍にカルマン渦を生じる。カルマン渦や上述の吐出孔上部における吸い込み流は，湯面上の潤滑保温材であるモールドパウダーを鋳型内へ巻き込み，モールドパウダー欠陥を引き起こす。さらに，流れが強い側では，上述の吐出孔下部からの高速流による湯面の波立ちが助長され，流れの弱い側では鋳型内流動の停滞現象が生じやすい。湯面の波立ちが大きくなると，凝固シェル先端部へのモールドパウダーの巻き込み等の問題が生じるので，その沈静化のために鋳造速度を下げる必要がある。鋳造速度の低下は，鋳型内の片流れによって流速が低下した側での流動停滞を助長する。鋳型内流動の停滞は，鋳型内凝固シェル前面の流速低下に伴いSaffman力による洗浄作用[14–16]の減少をもたらし湯面温度の低下と相まって気泡や非金属介在物の凝固シェルへの捕捉を促進する。これらの問題点をFig. 1に模式的に示す。

旋回流ノズルは，旋回する下降流に作用する遠心力が上記の通常浸漬ノズルが有する問題点を抜本的に解消することを狙いとしている。すなわちFig. 2に対比して示すように，遠心力によって広がろうとする流れが吐出孔上部からの溶鋼流出を促す結果，吐出孔の流速分布が均一化され，

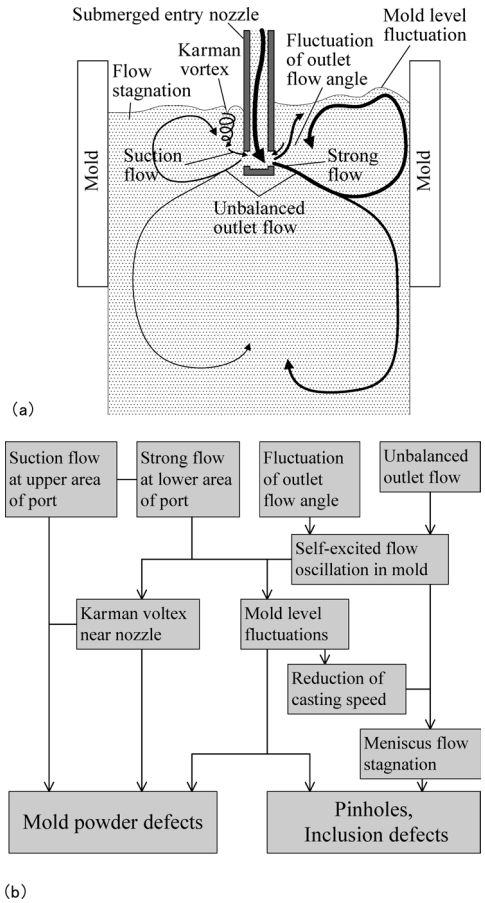

Fig. 1. Bad influences of conventional nozzle.

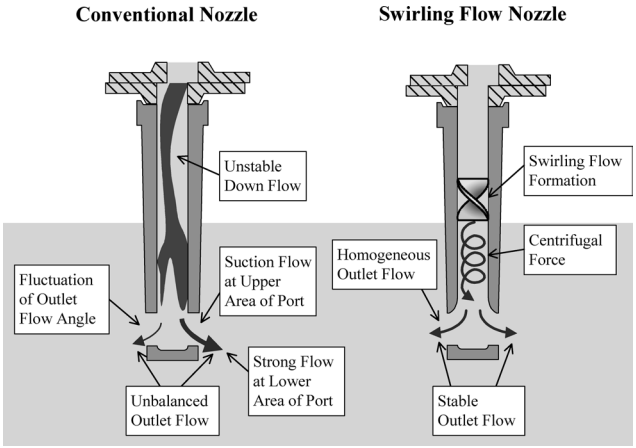

Fig. 2. Schematic view of flow formation in nozzle.

吸い込み流が解消される。また，吐出角度の変動も抑制される。さらに旋回下降流に作用する遠心力は，2つの吐出孔に均等に溶鋼流を分配する作用を有すると考えられる。これらの効果によって，鋳型内流動の自励振動的片流れが抑制され，湯面の波立ちや流動の停滞が防止できると考えられる。

Table 1. Water model specification and condition.

	Wakayama caster	Kashima caster
Scale	1/1	1/1
Mold size	210 × 1850 (mm)	270 × 1650 (mm)
Bath depth	1850 (mm)	2315 (mm)
Corresponding casting speed	1.6 – 2.0 (m/min)	1.5 (m/min)

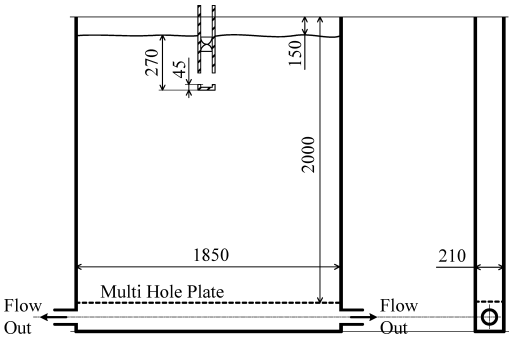

Fig. 3. Schematic geometry of water model set-up (Wakayama).

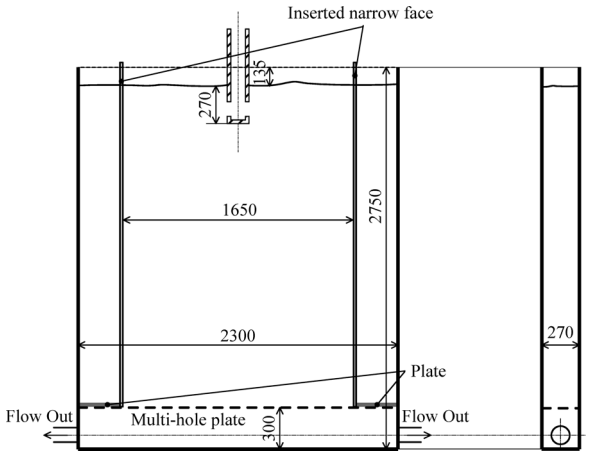

Fig. 4. Schematic geometry of water model set-up (Kashima).

3. 水モデル実験

3・1　実験条件および浸漬ノズル仕様

スラブ連続鋳造実機での鋳造試験に先だって，実機大の水モデル実験によって，通常浸漬ノズルに対する旋回流ノズルの優位性を確認した。

Table 1に実機大水モデル実験条件を，Fig. 3およびFig. 4に実機大水モデル実験装置の概要を示す。水モデル実験装置は，鋳造試験を行う2つの連続鋳造機の鋳型サイズをそれぞれ摸した2種類を用いた。本実験における流速の測定には，和歌山仕様の実験ではレーザードップラー流速計，鹿島仕様の実験には直径3 mmの小型プロペラ流速計を用いた。流速データのサンプリングピッチは，レーザードップラー流速計が2.6 ms，プロペラ流速計が0.5 sである。

旋回流ノズルの仕様をTable 2およびFig. 5，Fig. 6に示す。吐出孔部の浸漬ノズル外径は，和歌山仕様が140 mm，鹿島仕様が161 mmである。

比較対象となった通常浸漬ノズルの仕様をTable 3に示す。通常浸漬ノズルは，一定の内径を有し，吐出孔は旋回流ノズルと同様に矩形で，その上下壁は，浸漬ノズル内部から吐出孔出口に向かって同じ下向きあるいは上向きの角度を有する斜面から成る。吐出孔部の浸漬ノズル外径は，和歌山仕様が140 mm，鹿島仕様が150 mmである。

Fig. 7には，和歌山仕様の通常浸漬ノズル形状を示す。通常浸漬ノズルは，和歌山仕様・鹿島仕様いずれもFig. 7のように，内側底部が凹み形状であり，凹み深さ（吐出孔下壁が内径と交わる線から内側底面までの距離）は，10 mmから15 mmの範囲のものを用いた。

3・2　実験結果

3・2・1　吐出孔流速

Fig. 8に，和歌山仕様の通常浸漬ノズルを用いた場合に，浸漬ノズル吐出孔の前面5 mmにおいて測定された吐出孔の流速分布を示す。Fig. 8における吐出流速測定点は，−0.5～0.5に無次元化した吐出孔幅の−0.3，0，0.3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。なおFig. 8では，グラフの底面を吐出孔の高さおよび幅方向に見立てて，各測定点での流速測定値を棒の高さで示した。測定値は，1点あたり3分間測定した時間平均値を採用した。測定した流速は，吐出孔から鋳型短辺へ向かう方向を正とする鋳型長辺面に平行な水平方向流速である。吐出流は下向きの角度を有しているので測定結果は必ずしも正確な流速を表していないが，流速分布の傾向を知るに足るデータが得られた。

吐出孔内部の流動を観察すると，Fig. 8の上部に示すような渦が発生し，その渦の回転方向が，浸漬ノズル内下降流の予期せぬ偏りによって変化することがわかった。吐出孔内の渦の回転方向は，吐出孔流速分布に影響を及ぼしていることが予測されたので，Fig. 8においては，渦がどちらかの方向に安定した時の流速を各測定点についてそれぞれ3分間測定し，渦の回転方向別に左右の図を示した。

なお，同等の渦の発生は，Baiら[17]やRamos-Banderasら[18]，あるいは吉田ら[19]によっても報告されている。

Fig. 8から明らかなように，例えば渦の回転方向が時計回りの場合（左の図），下降流が最初に浸漬ノズル底部に

Table 2. Specification of swirling flow nozzles.

	Wakayama caster	Kashima caster
Internal diameter D_1 (Diameter of swirl blade)	100 (mm)	123 (mm)
Internal diameter D_2	80 (mm)	98 (mm)
Length of swirl blade L	100 (mm)	163 (mm)
Twist angle of swirl blade θ	120 (°)	175 (°)
Cross-section of outlet port	55w×90h (mm)	55w×90h (mm)
Upper wall shape of outlet port	R60 (mm)	R90 (mm)
Lower wall angle of outlet port	Upward 10 (°)	Upward 10 (°)

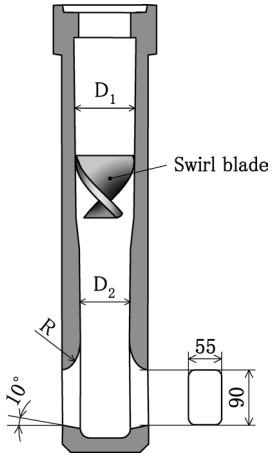

Fig. 5. Dimension of swirling flow nozzle.

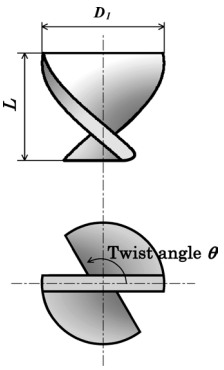

Fig. 6. Dimension of swirl blade.

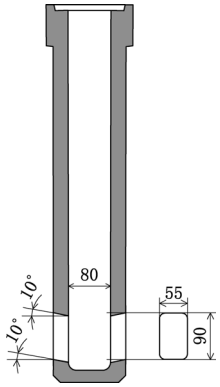

Fig. 7. Dimension of conventional nozzle (Wakayama).

Table 3. Specification of conventional nozzles.

	Wakayama caster	Kashima caster
Internal diameter	80 (mm)	83 (mm)
Cross-section of outlet port	55w×90h (mm)	90w×92h (mm)
Upper wall angle of outlet port	Upward 10 (°)	Downward 30 (°)
Lower wall angle of outlet port	Upward 10 (°)	Downward 30 (°)

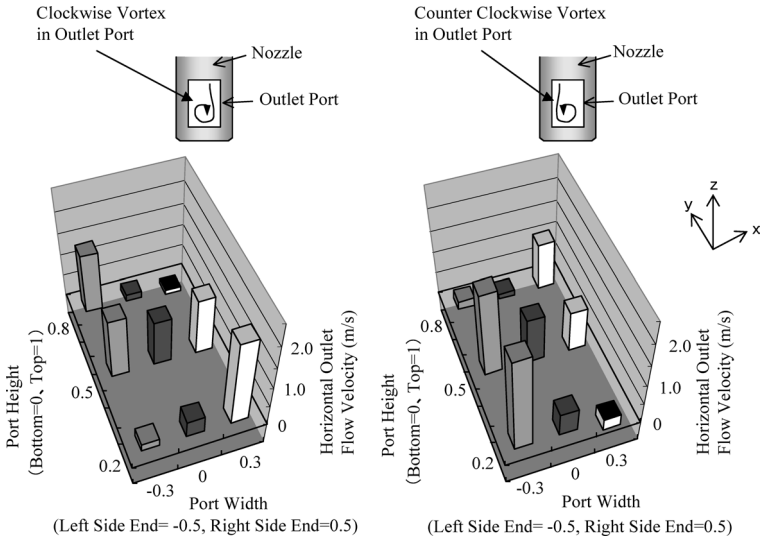

Fig. 8. Outlet flow velocity distributions of conventional nozzle under two directions of vortex in port (Wakayama, corresponding casting speed=1.6 m/min).

当たる吐出孔右下の流速が最も高く，逆に左下や右上の流速は小さくなった。流速が小さい部位では，流速の時間変動を考慮すると，吸い込み流（流速がマイナス）となっている時間が存在すると考えられる。渦の回転方向が反時計回りの場合には，上記とは左右逆の流速分布となった。

渦の回転方向は浸漬ノズル内下降流のゆらぎによって変化するので，実機鋳造においては，Fig. 8に示したふたつの吐出流速分布の間を変動すると推測される。なお，後述の鹿島仕様の通常浸漬ノズルにおいては，吐出孔内の渦は観察されなかったので，このような渦の発生は，吐出孔幅が浸漬ノズル内径に比べて小さいことに起因して，浸漬ノズル内下降流の底部での反転すなわち渦の発生が吐出孔からの流出に優先して生じることによると推定した。

和歌山仕様の旋回流ノズルを適用した場合の吐出孔流速分布をFig. 9に示す。Fig. 9に示すように，旋回流ノズルの吐出孔流速は吐出孔全域に渡って均等であった。その結果，測定された吐出流速の最大値は，通常浸漬ノズルのそれの約1/2に低下した。

Fig.10に，鹿島仕様の通常浸漬ノズルを用いた場合の吐出孔の流速分布を示す。各測定点のデータは3分間測定した平均値である。

吐出孔幅が浸漬ノズル内径よりも大きな鹿島仕様の通常浸漬ノズルにおいては，吐出孔内部の渦は観察されず，Fig. 8に示したような吐出流速分布に対する渦の影響は見られなかった。一方，吐出流は吐出孔の下部に集中し，吐出孔中央部から上部にかけての広い範囲で吸い込み流（流速がマイナス）が生じていることが明らかとなった。

鹿島仕様の旋回流ノズルを適用した場合の吐出孔流速分布をFig.11に示す。Fig.11に示すように，旋回流ノズルの吐出孔流速は吐出孔全域に渡って概ね均等であり，通常浸漬ノズル (Fig.10) との差異が明確であった。Fig.11において，吐出孔上部からの吐出流速が吐出孔下部のそれに比べて大きいのは，遠心力によってR形状の吐出孔上壁に沿って吐出する流れが，浸漬ノズル底部に当たって吐出する流れよりも支配的であることを示していると考えられる。

Fig.12には，Fig. 8からFig.11に示した各点における吐出流速の測定データの標準偏差を浸漬ノズル毎に平均した値を流速変動の指数として比較して示す。なお，Fig. 8のデータからは，ふたつの吐出流速分布パターンの内，吐出孔内の渦が時計回りのデータ（右側の図）を採用した。Fig.12に示すように，旋回流ノズルの吐出流速は安定していることがわかる。すなわち，旋回流ノズルは，吐出流速分布の均一化と吐出流速の安定化の双方に有効であることが明らかとなった。

3･2･2　鋳型内流速

次に，鋳型内表面流速を測定した。鋳型内表面流速は，鋳型内1/2厚1/4幅（もしくは3/4幅）の水面下50 mmにおける鋳型長辺に平行な流速を代表値として評価した。

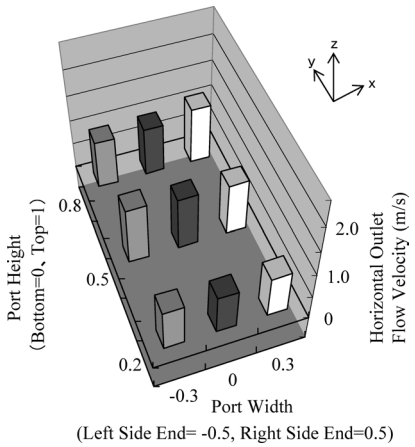

Fig. 9. Outlet flow velocity distributions of swirling flow nozzle (Wakayama, corresponding casting speed= 1.6 m/min).

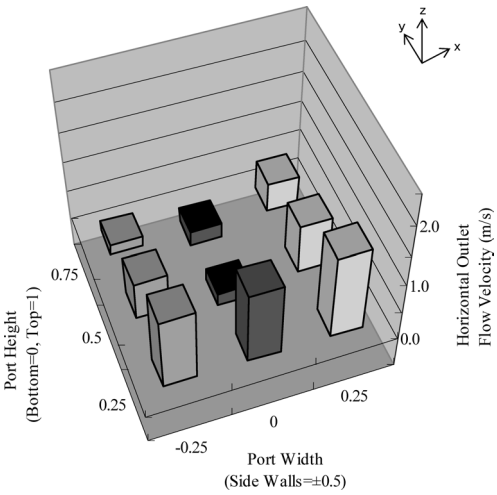

Fig. 10. Outlet flow velocity distributions of conventional nozzle (Kashima, corresponding casting speed= 1.5 m/min).

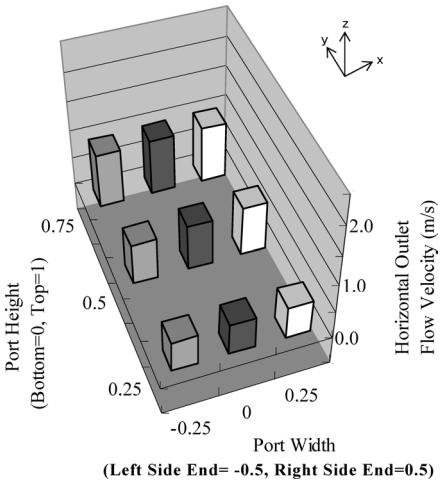

Fig. 11. Outlet flow velocity distributions of swirling flow nozzle (Kashima, corresponding casting speed= 1.5 m/min).

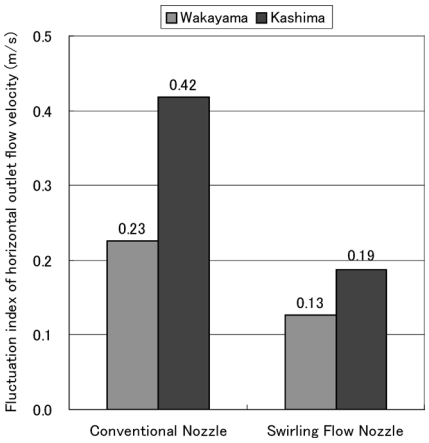

Fig. 12. Effect of swirling flow nozzle on stability of outlet flow velocity.

Fig.13に，和歌山仕様の通常浸漬ノズルおよび旋回流ノズルを用いた場合の鋳型内表面流速の推移を比較して示す。また，Fig.14には鹿島仕様の通常浸漬ノズル，Fig.15には旋回流ノズルを用いた場合の鋳型内表面流速の推移を比較して示す。和歌山仕様に対してはレーザードップラー流速計を用いて鋳型幅方向片側の1/4幅位置を3分間測定し，鹿島仕様に対してはプロペラ流速計を用いて鋳型幅方向両側の1/4幅および3/4幅位置を同時に15分間測定した。測定データの瞬時値には微小な渦の影響と考えられる大きな変動が含まれたため，Fig.13，Fig.14およびFig.15中の各測定点は，5秒間の平均値を示したものである。5秒という時間間隔は水モデル実験における鋳型内流動の自励振動周期（15~35秒程度）[13]に対して十分に小さいとは言えないが，3分間もしくは15分間に渡って連続的に測定することによってその変動の大きさを比較評価することができた。なお同図では，鋳型短辺から浸漬ノズルへ向かう流れの方向を正としている。

Fig.13から明らかなように，旋回流ノズルを用いると鋳型内表面流速の変動幅が1/2程度に抑制された。なお，和歌山仕様の通常浸漬ノズルは吐出孔上下壁の角度が上向きとなっているが，実際の吐出流は下向きの角度を有しており，鋳型内流動は鋳型短辺から浸漬ノズルへ向かう表面流を有するダブルロールパターン[13]であった。

さらにFig.14およびFig.15から明らかなように，鹿島仕様のノズルを用いた場合でも，旋回流ノズルの適用時には鋳型内表面流速の変動幅が3割程度低減した。

和歌山仕様・鹿島仕様ともに，旋回流ノズル適用時に鋳型内表面流速変動が抑制できたのは，浸漬ノズル内旋回流が当初予想した通り鋳型内流動を安定化した結果であると考えられる。

Fig.13に示した和歌山仕様の測定においては，実験装置の制約上，鋳型幅方向片側のみの短時間の測定にとどまったが，Fig.14およびFig.15に示した鹿島仕様の測定においては，鋳型幅方向両側を同時にかつ十分な時間に渡って測定し，旋回流ノズルの効果をより正確に評価することができた。

測定時間が長い鹿島仕様（Fig.14およびFig.15）の測定値を用いて，鋳型内表面流速が適正とされる0.2~0.3 m/s[1,21]の範囲内であった時間の総測定時間に対する割合をFig.16に示す。Fig.16には，鋳型内表面流速がより広い0.1~0.4 m/sの範囲内であった時間の総測定時間に対する割合も併せて示した。Fig.16より，旋回流ノズルを用いると鋳型内表面流速が適正範囲に保たれる割合が高まることがわかる。実際の鋼板コイルにおける表面品質不適合品の発生率が品質厳格材でも数%程度である実態を考慮し，かつ鋳型内流動（流速の適否）が表面品質を支配していると仮定すると，上記数%を除くほとんどの時間は良好な鋳型内流動が保たれていることになる。そのような観点に立つと，0.2~0.3 m/sという鋳型内表面流速適正範囲では通常浸漬ノズルが適合する時間割合が56%と小さく，逆に鋳型内表面流速が適正範囲を外れる不適合時間割合は44%と，上記の数%という表面品質不適合品の発生率に比べて大きい。一方，鋳型内表面流速適正範囲を0.1~0.4 m/sと仮定すると，通常浸漬ノズルが適合する時間割合が89%に上昇し，鋳型内表面流速の不適合時間割合は11%と表面品質不適合品発生率の実態に近づく。むろん，表面品質不適合の発生にはいくつかの要因が複合して関係していると考えられることや，鋼板コイルにおける表面品質不適合品の発生率は切り捨てられた鋼板の重量比率であるので欠陥の長さ比率と必ずしも対応しないことから，表面流速が適正範囲を外れた比率と，品質不適合との関係を厳密に議論することは難しいが，上述の対比から適正流速範囲が0.2~0.3 m/sというのは狭すぎると考えられる。これは，従来の鋳型内流速適正範囲という設定が，瞬時値ではなく時間平均値の指標であることに由来していると考えられる。上述のように，Fig.13~Fig.15における個々の測定点は，5秒毎の時間平均値である。この程度の短い時間で平均された値を対象とする場合，鋳型内表面流速の適正範囲は従来の報告値よりも広がると考えられる。

4. スラブ連続鋳造実機試験

4・1 鋳造条件および浸漬ノズル仕様

次に，スラブ連続鋳造の実機における旋回流ノズルの適用試験を行い，その鋳型内流動安定化作用や，鋳片あるいは鋼板コイルに対する品質改善効果を確認した。

Table 4に住友金属工業（株）和歌山製鉄所（現，（株）住金鋼鉄和歌山），Table 5には鹿島製鉄所における鋳造条件を示す。鋳造試験の対象としたのは，表面品質要求水準が最も高い鋼種のひとつである自動車用メッキ鋼板素材の極低炭素鋼である。旋回流ノズル適用時には，鋳型内流動

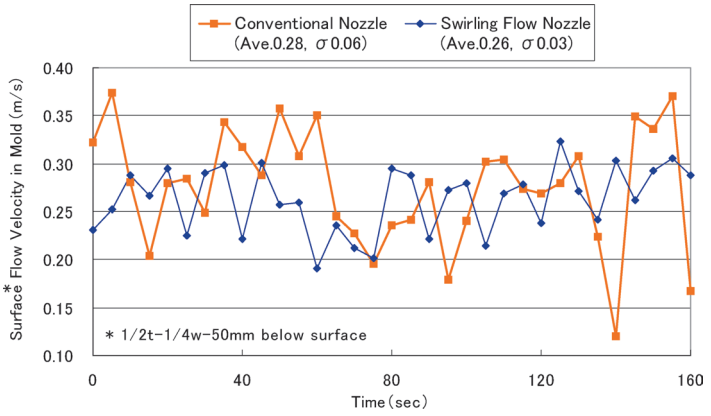

Fig. 13. Effect of swirling flow nozzle on surface flow stability in mold (Wakayama, corresponding casting speed＝1.6 m/min).

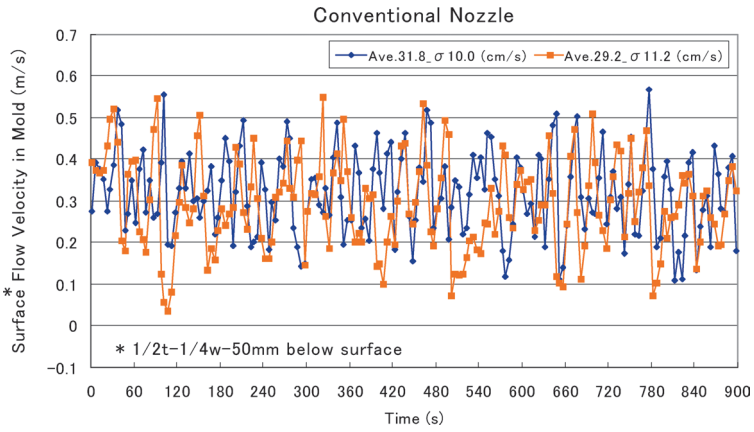

Fig. 14. Transition of surface flow velocity with conventional nozzle (Kashima, corresponding casting speed＝1.5 m/min).

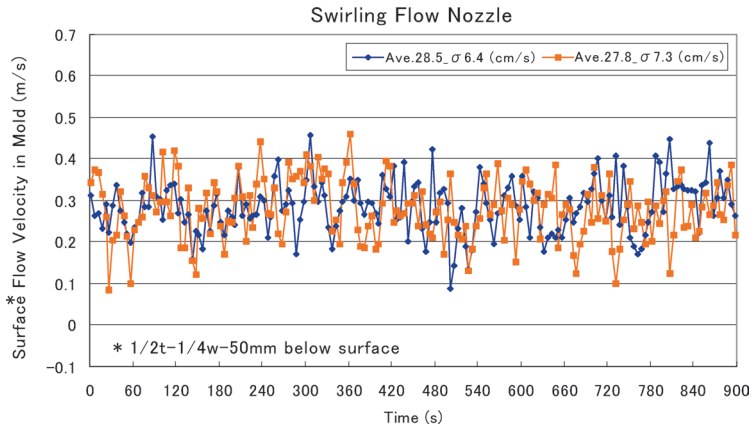

Fig. 15. Transition of surface flow velocity with swirling flow nozzle (Kashima, corresponding casting speed＝1.5 m/min).

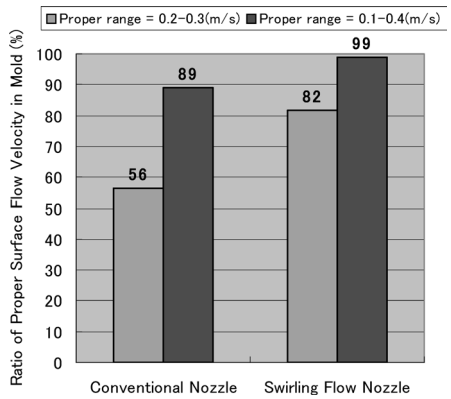

Fig. 16. Effect of swirling flow nozzle on flow velocity control in mold.

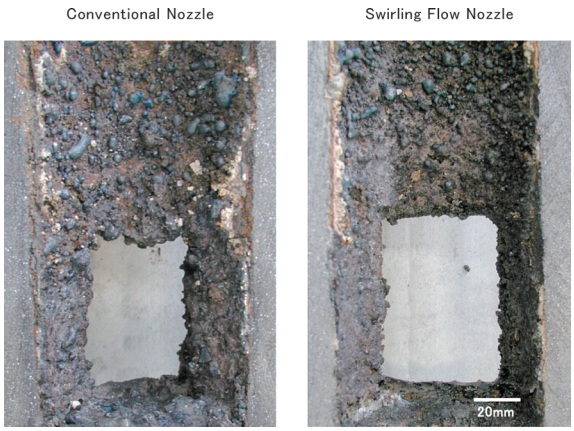

Fig. 25. Comparison of internal view of port after casting (Wakayama).

Table 4. Casting condition (Wakayama).

Items	Specifications	
Mold Size (mm)	210t×1780–1880w	
Steel Grade	Ultra Low Carbon Steel for Automobile Panels	
Casting Speed	Swirling Flow Nozzle	Max. 1.5–1.8 m/min.
	Conventional Nozzle	Max. 1.3 m/min.

Table 5. Casting condition (Kashima).

Items	Specifications	
Mold Size (mm)	270t×1500–1625w	
Steel Grade	Ultra Low Carbon Steel for Automobile Panels	
Casting Speed	Swirling Flow Nozzle	Max. 1.4–1.6 m/min.
	Conventional Nozzle	Max. 1.4 m/min.

が安定化する効果が見込まれたので，通常浸漬ノズル適用時に比べて高い鋳造速度を与えて鋳造試験を行った。

浸漬ノズルは，水モデル実験に用いたものと同じ仕様とした。材質は，本体および旋回羽根ともにアルミナ–グラファイトとした。

4・2 試験結果

4・2・1 鋳型内流動

和歌山製鉄所および鹿島製鉄所における鋳造中の鋳型内湯面レベル変動を鋳造速度に対して図示し，旋回流ノズルの効果を評価した結果を，Fig.17およびFig.18に示す。図中の鋳型内湯面レベル変動は，スラブ1枚毎の湯面レベル高低差の最大値を表している。湯面レベルの変動周期は10~30秒が主体であった。この変動周期は，スラブ1枚を鋳造するのに要する時間（4~7分程度）に比べて十分に小さい。いずれの図からも，旋回流ノズルを適用した場合には，高鋳造速度であったにもかかわらず鋳型内湯面レベル変動が通常浸漬ノズル適用時に比べて低位に抑制されたことがわかる。鋳型内の湯面レベルは，渦流式のセンサーによって計測され，PIDコントローラ等を用いて目標値に制御されている。Fig.17およびFig.18の結果は，鋳造速度の上昇に伴い制御上の外乱となる湯面の変動が大きくなることを表している。制御上の外乱となる湯面の変動は，Fig.1に示した自励振動的片流れによる湯面片側の盛り上がりや，吐出孔から噴出した流れによる湯面の波立ちがもたらすと考えられる。旋回流ノズルは，これらの外乱を抑制することによって湯面レベル変動を減少させたと考えられる。

Fig.19には，和歌山製鉄所において鋳型短辺の冷却水温差から片流れを表す指数Hを求め，その変動の標準偏差σ_Hを鋳型内流動の変動を表す指標に用いて，旋回流ノズルの効果を評価した結果を示す。片流れを表す指数Hは，左右の吐出孔からの吐出流がどちらかに偏ると吐出流が偏った側の溶鋼温度が上昇し鋳型短辺の熱流束が増大することを利用して，鋳型左右それぞれの短辺の冷却水温上昇（熱流束の指標）の差を両者の平均で除して求めたものである。鋳型内流動の片流れは自励振動的に生じるので，鋳型内流動の不安定さを，片流れを表す指数Hの標準偏差σ_Hを用いて評価した。

Fig.19から，旋回流ノズルを用いると湯面レベル変動を引き起こす外乱のひとつである鋳型内における自励振動的

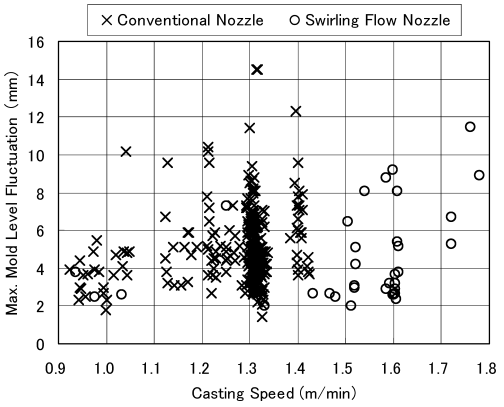

Fig. 17. Effect of swirling flow nozzle on mold level fluctuation (Wakayama).

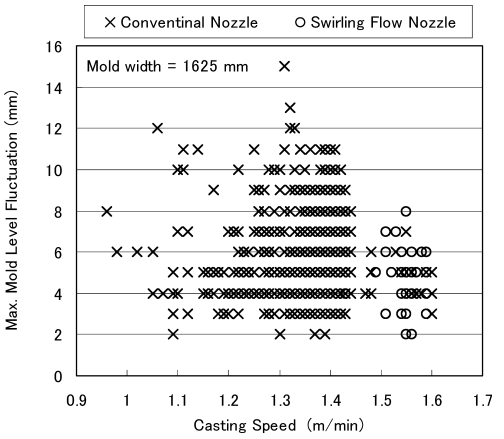

Fig. 18. Effect of swirling flow nozzle on mold level fluctuation (Kashima).

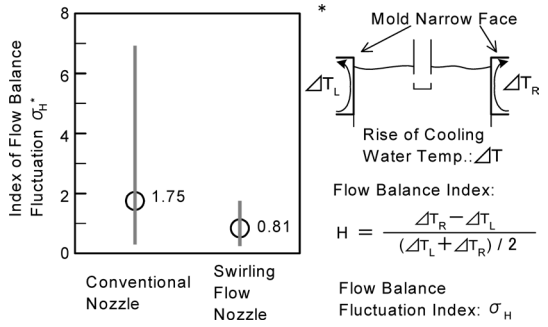

Fig. 19. Effect of swirling flow on stable flow formation in mold (Wakayama).

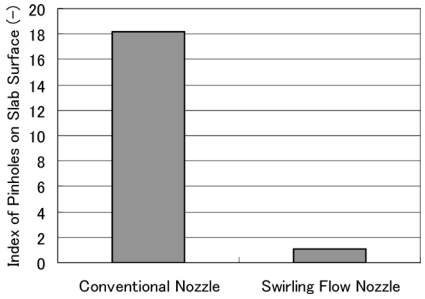

Fig. 20. Effect of swirling flow nozzle on pinholes on slab surface (Wakayama).

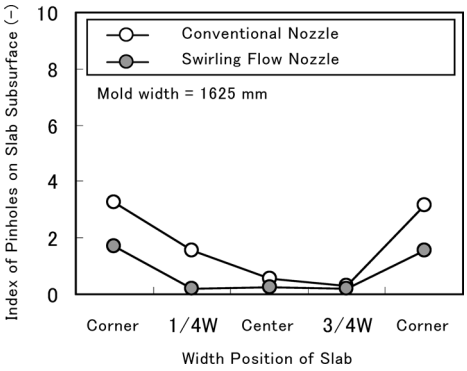

Fig. 21. Effect of swirling flow nozzle on pinholes on slab surface (Kashima).

片流れが抑制されることが確認できた。

4・2・2　品質改善効果

(1)　スラブ表層部ピンホール

Fig.20には，和歌山製鉄所において鋳造したスラブ表面を1.5 mm厚さ溶削した後に目視検査した結果，表面のピンホールが多く存在し品質不適合と判定されたスラブの割合を指数化して，浸漬ノズルの種類によって比較した結果を示す。

Fig.21には，鹿島製鉄所において鋳造したスラブの全表面を2.5 mm厚さ溶削した後，幅方向中央および1/4幅・3/4幅をハンドトーチを用いてそれぞれ約60 mm幅で溶削し，溶削後の表面に観察されたピンホールを数えた結果を指数化して示す。ハンドトーチによる溶削の深さは1 mm程度であったので，表面からの深さ2.5～約3.5 mmまで間のピンホールが評価されている。

Fig.20およびFig.21に示すように，旋回流ノズルの適用によって，スラブ表層部のピンホールが大幅に低減したことが明らかとなった。これは，水モデル実験によって確認したように，鋳型内表面流速が安定して維持されたことが，気泡の凝固シェルへの捕捉を抑制した効果であると考えられる。

(2)　鋼板コイル表面疵

Fig.22には，和歌山製鉄所において鋳造したスラブから熱延・冷延・亜鉛メッキ工程を経て得られたメッキ鋼板コイルの表面品質を，鋳造に用いた浸漬ノズル別に比較した

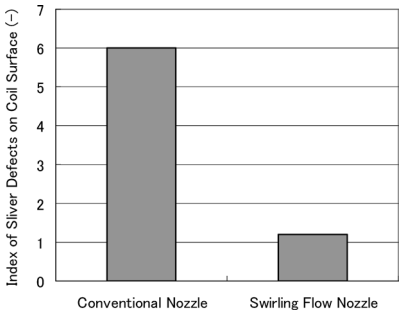

Fig. 22. Effect of swirling flow on surface quality of coils (Wakayama).

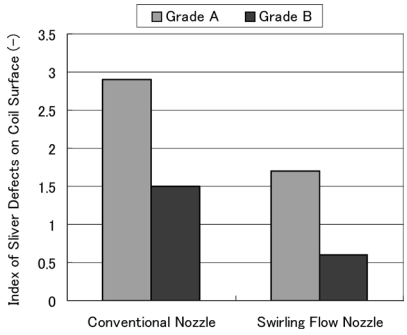

Fig. 23. Effect of swirling flow on surface quality of coils (Kashima).

結果を示す。Fig.22の縦軸は，メッキ鋼板コイルにおいて表面品質不適合と判定された部位の内，スラブ欠陥起因とされる表面疵が主要因であった部位の重量比率を指数化して表したものである。Fig.22から，旋回流ノズルの適用によって，表面品質不適合鋼板の発生重量比率が約1/5に低減したことがわかる。

同様にFig.23には，鹿島製鉄所において鋳造したスラブから熱延・冷延・亜鉛メッキ工程を経て得られたメッキ鋼板コイルの表面品質を，鋼板の要求品質レベルおよび鋳造に用いた浸漬ノズル別に比較した結果を示す。Fig.23の縦軸は，メッキ鋼板コイル表面におけるスラブ欠陥起因とされる表面疵の個数を指数化して表したものである。Fig.23から，旋回流ノズルの適用によって，鋼板の要求品質レベルによらず表面疵が約1/2に減少したことがわかる。

(3)　品質改善効果まとめ

上述の鋳片ならびに鋼板コイルの品質改善に関する効果は，旋回流ノズルが有する鋳型内流動安定化作用の有効性を実証するものであり，その品質改善効果は，電磁気力を利用した鋳型内流動制御の効果[22–24]に匹敵するものであった。

4・2・3　浸漬ノズル吐出孔の閉塞

Fig.24は，和歌山製鉄所において約450 tonの溶鋼を鋳造した後の旋回流ノズルの吐出孔面積を，同一条件で鋳造した後の通常浸漬ノズルの吐出孔面積と比較したものである。またFig.25には同鋳造後の旋回流ノズルおよび通常浸漬ノズルの吐出孔内面写真の典型例を比較して示す。

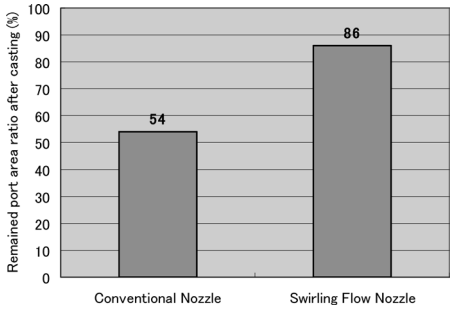

Fig. 24. Effect of swirling flow on prevention of outlet port clogging.

Fig.25は使用前には同じ吐出孔出口形状であったものを比較している。Fig.24およびFig.25から明らかなように，通常浸漬ノズルに比べて旋回流ノズルでは吐出孔の閉塞が軽微にとどまったことがわかる。これはFig. 8およびFig. 9に比較して示したように，旋回流ノズルでは，吐出孔における流れが均一かつ安定しており，非金属介在物付着の起点となる流れの淀みが生じにくいことに起因すると考えられる。

吐出孔の閉塞が小さいことは，鋳造の進行に伴う吐出流の変化が小さいことを意味する。この効果もまた，スラブや鋼板コイルの表面品質を良好に保つことに寄与していると考えられる。

5. 結言

本報では，スラブ連続鋳造用の旋回流ノズルを設計し，実機大の水モデル実験および実機における鋳造試験に供して，その効果を評価した。前報[11–13]に述べた検討結果に基づいて設計した旋回流ノズルは，実機大の水モデル実験の結果，設計方針通り均一かつ安定した吐出流と，安定した鋳型内流動を形成することが確認された。旋回流ノズルを和歌山製鉄所および鹿島製鉄所において，最も表面品質が厳格な材質のひとつである亜鉛メッキ鋼板用極低炭素鋼スラブの連続鋳造に適用した結果，鋳型内流動の安定化や，鋳片ならびに鋼板コイルの表面品質向上に対する効果を確認できた。その効果は，電磁気力を利用した鋳型内流動制御に匹敵するものであった。

捻り板状旋回羽根を内装した浸漬ノズルを世界で初めて開発した本研究は，浸漬ノズル内における旋回流の付与が鋳型内流動制御手法として有効であることを実証し，鋳型内流動の安定化ならびにその源流対策である浸漬ノズル内流動制御の重要性を示して，その目標を達成することができた。

旋回流を付与するために本研究で採用した捻り板状旋回羽根を浸漬ノズル本体内に設置する方式は，浸漬ノズルを通常のものと交換するだけで容易に実機での試験が可能である点で，本研究の目標達成には最適な方法であった。一方，本方式は前報[11]で述べたように，位置エネルギーの利用効率が約20%と低く，許容されるヘッド消費の制約内で得られる旋回流の強さに限界がある。さらに，通常の浸漬ノズルに比べると非金属介在物による閉塞が生じやすいという問題があり，鋼の連続鋳造プロセスにおいて実用的に適用する対象はロットサイズが小さく鋳造時間が短い鋼種に限られる。

今後，高い効率で浸漬ノズル内下降流に旋回を付与し，非金属介在物による閉塞にも強い，新たな方式の旋回流付与型浸漬ノズルを開発することによって，上記の問題を解消し，本研究によって実証された効果を幅広く享受することが可能である。

文　献

1) S.Yokoya, S.Takagi, Y.Tsukaguchi, M.Iguchi, S.Hara and K.Marukawa: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 160.
2) S.Furuhashi, M.Kawamoto, T.Kato, S.Hiraki and Y.Tsukaguchi: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 161.
3) H.Hayashi, Y.Tsukaguchi, K.Iwata, K.Nonobe and S.Yokoya: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 162.
4) S.Otani, S.Yokoya, S.Takagi, Y.Tsukaguchi, S.Hara and K.Marukawa: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 163.
5) T.Harada, Y.Tsukaguchi, S.Yokoya, S.Takagi, S.Hara and K.Marukawa: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 164.
6) Y.Tsukaguchi, K.Nonobe, S.Yokoya, S.Takagi, S.Hara and K.Maruayama: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 165.
7) Y.Tsukaguchi, T.Watanabe, S.Yokoya, S.Hara, K.Marukawa and K.Nonobe: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 839.
8) S.Kosaka, M.Yoshiwara, H.Hayashi, K.Iwata, Y.Tsukaguchi and S.Yokoya: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 949.
9) Y.Tsukaguchi, M.Kawamoto and S.Furuhashi: *ISIJ Int.*, **44** (2004), 350.
10) Y.Tsukaguchi, H.Hayashi, S.Yokoya, T.Tanaka and S.Hara: *Tetsu-to-Hagané*, **93** (2007), 575.
11) Y.Tsukaguchi, O.Nakamura, P.Jönsson, S.Yokoya, T.Tanaka and S.Hara: *ISIJ Int.*, **47** (2007), 1436.
12) Y.Tsukaguchi, S.Nakamura, S.Yokoya and S.Takagi: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), 245.
13) Y.Tsukaguchi, S.Nakamura, S.Yokoya and S.Takagi: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), 581.
14) 清瀬明人，後藤裕規，宮沢憲一，福田　淳，大谷康彦，中島潤二：学振凝固プロセス研究会提出資料，19委-11548，凝固プロセス-38, (1995).
15) W.Yamada, A.Kiyose, J.Nakashima, J.Fukuda, K.Okazawa and K.Miyazawa: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 682.
16) T.Toh, T.Inomoto, Y.Konno, H.Kondo, H.Yamamura, M.Wakoh, E.Takeuchi and A.Itoh: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 13.
17) H.Bai and B.G.Thomas: Material Processing in the Computer Age III, (2000), 86.
18) A.Ramos-Banderas, R.D.Morales, R.Sanchez-Perez, L.Garcia-Demedices and G.Solorio-Diaz: *Int. J. Multiph. Flow*, **31** (2005), 643.
19) J.Yoshida, M.Morishita and T.Mimura: *CAMP-ISIJ*, **21** (2008), 87.
20) K.U.Koehler, P.Andrzejewski, E.Julius and H.Haubrich: Proc. of 78th ISS Steelmaking Conf., (1995), 397.
21) T.Tokonami, Y.Onoe, K.Matsuo, H.Tai, M.Morishita, H.Yasunaka and K.Ayata: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 606.
22) M.Morishita, H.Mori, R.Suzuki, K.Miyake, T.Nakaoka and Y.Hosokawa: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 6.
23) A.Idogawa, Y.Kitano and H.Tozawa: *Kawasaki Steel Giho*, **28** (1996), 1, 46-51.
24) J.Kubota, N.Kubota, M.Suzuki, T.Ishii, R.Nishimachi and N.Aramaki: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 271.