

SHINAGAWA TECHNICAL REPORT

CFD解析と水モデル試験を活用した 浸漬ノズルの設計

Design of SEN with CFD Calculation and
Water Model Test

新 妻 宏 泰
Hiroyasu NIITSUMA

森 脇 宏 治
Koji MORIWAKI

西 尾 奏 恵
Kanae NISHIO

品川技報

CFD解析と水モデル試験を活用した浸漬ノズルの設計

Design of SEN with CFD Calculation and Water Model Test

新 妻 宏 泰^{*1}
Hiroyasu NIITSUMA

森 脇 宏 治^{*2}
Koji MORIWAKI

西 尾 奏 恵^{*3}
Kanae NISHIO

要 旨

CFD計算と水モデル試験を活用して、浸漬ノズル吐出孔周囲のアルミナ付着抑制を目的とした浸漬ノズルの新規吐出孔構造2形状を開発した。底部山型+ホームベース型形状は吐出孔柱部から吐出孔下部への付着に対して抑制効果が期待できる。台形断面吐出孔形状は、吐出孔上部への付着に対して抑制効果が期待できる。また、モールド短辺付近のメニスカスへの熱供給の向上を目的とし、浸漬ノズル形状の適正化をおこなった。吐出孔角度の最適化し、内管へ段差構造を導入した形状を実機試用し、良好な結果を得た。

Abstract

Two new SEN structures which may prevent alumina adhesion around outlet ports were developed by CFD calculation in conjunction with a water model test. “The no well and home plate” shape can be expected to suppress alumina adhesion from the column to the lower part of the outlet port. “The trapezoidal vertical section port” shape can be expected to suppress adhesion at the upper part of the outlet port. Also, optimum SEN shape was calculated to improve heat supply to the meniscus near the mold narrow face. The new SEN, with an ideal outlet port angle and annular-step structure, obtained good results at an actual casting.

1. 緒言

浸漬ノズルは鋼の連続 casting プロセスに使用される重要な耐火物のひとつである。浸漬ノズルを介して供給された溶鋼流はモールド内に特定の流動パターンを形成する。モールド内流動パターンは鑄片品質に大きな影響を与えており、鑄造条件に合致していない流動パターンが形成された場合に、鑄片品質の低下を招くことがある。例えば、メニスカスへの熱供給が不足するような流動パターンが形成された場合は、モールドパウダーの溶融不良を招き、鑄片品質の低下に繋がる。

1. Introduction

The Submerged Entry Nozzle (SEN) is one of the most important refractory items for continuous casting process of steel. The discharge flow from the SEN forms a specific flow pattern in the mold and influences slab quality. An unsuitable flow pattern deteriorates slab quality. For example, when a flow pattern with insufficient heat supply to the meniscus is formed, properties of molten mold powder become inadequate, resulting in quality deterioration.

^{*1} 東日本工場 湯本製造部 技術室 主任部員 Staff Manager, Technical Sec., Yumoto Plant, East Japan Works

^{*2} 技術研究所 第3研究部 第1研究室 室長 General Manager, Flow Control Refractories R&D Sec., Research Dept. No.3, Research Center

^{*3} (一財)岡山セラミックス技術振興財団 岡山セラミックスセンター 研究員 Okayama Ceramic Center, Okayama Ceramics Research Foundation

それぞれの使用条件に合致したモールド内溶鋼流動パターンを形成するために、吐出孔の角度や寸法の調整といった最適化の検討だけではなく、浸漬ノズル新規構造の研究もなされてきた。例えば、内管の一部分が縮径している段差ノズル、半球状の突起を複数設置したモーグルノズルは、タンディッシュのプレートの絞りによって生じる偏流を解消する効果があり、鋳片品質の向上に大きな効果を挙げている^{1),2)}。ブルーム・ビレット用では、屈折した吐出孔によってモールド内に旋回流を発生させ、鋳片表面品質を向上させることが可能なノズル構造が開発されている³⁾。

他方、浸漬ノズルの解決すべき課題の一つとして、ノズル内管へのアルミナ介在物の付着が挙げられる。アルミナ付着によって内管形状が変化するため、浸漬ノズルから供給される溶鋼流れの方向、速さが変わり、本来とは異なるモールド内流動パターンが形成される。アルミナ付着は、材質面、構造面からの様々な対策が検討されているが、完全解決には至っていない。

これら新規ノズル構造の開発や、浸漬ノズル形状の最適化には、水モデル試験が主に活用されてきた。水モデル試験は、実機と類似の結果が得られることがわかっているが、試験サンプルを形状毎に製造する必要があるため、時間的、コスト的な負荷の大きい試験方法である。一方、最近は数値流体力学（CFD）プログラムを活用したシミュレーションが盛んに実施されている。CFD計算は、計算結果の妥当性の検証が必要ではあるが、水モデル試験では正確な情報を得ることが難しいノズル内管やモールド下部の情報など、計算領域内の情報を容易に得ることができる。流速だけではなく、乱流運動エネルギー（TKE）などのパラメーターも得ることができ、これらをあわせることによって、溶鋼中に存在する介在物のノズルへの付着メカニズムに関する考察、改善案の検討も可能となってきている。

本報では、水モデル試験とCFD計算を活用して開発された、アルミナ付着の抑制が期待される浸漬ノズル形状、鋳片品質を向上させることが期待される浸漬ノズル構造について紹介する。

In order to form a suitable flow pattern in the mold, not only adjustment of SEN port angle and size, but also developments of a new SEN structure have been studied. For example, the annular-step SEN has a certain length of smaller inner diameter range and Mogul SEN in which plural spherical obstructions were located on the inner surface of the bore are able to rectify biased flow caused by slide gate throttling and improve slab quality^{1),2)}. A unique SEN for bloom or billet mold casting has been developed that can generate a swirling flow in the mold by a “bending port” and improve the surface quality of cast steel³⁾.

Preventing alumina adhesion is also one of the problems of the SEN. When severe alumina adhesion occurs, the inner structure of the SEN is changed to induce undesirable flow direction as well as flow velocity. Hence, an undesirable flow pattern is formed in the mold. For preventing alumina adhesion, there are many studies for many materials or structural improvements, but it has not been completely solved yet.

Conventionally, a water model test has been carried out for the development of new SEN structure and optimization of SEN design. The water model test results are in good agreement with the actual results. However, it is necessary to make test nozzles for every trial. Thus, it is thought to be a time and cost consuming method.

Recently, simulations by the computational fluid dynamics (CFD) program are being actively carried out.

Although, it is necessary to verify the validity of the CFD calculation results, it enables simulation of the fluid flow in the bore of the SEN as well as deeper area of the mold. CFD calculation can obtain information not only for flow velocity but also for turbulence kinetic energy (TKE). By combining this information, it becomes possible to investigate the adhesion mechanism of alumina inclusions within the molten steel adhering to the nozzle inner bore in detail, so as to devise an improvement method.

In this report, we introduce new SEN structures that prevent alumina adhesion and a SEN

2. 浸漬ノズル吐出孔周囲のアルミナ付着を抑制可能な構造

2. 1 吐出孔周囲の付着

浸漬ノズル内管へのアルミナ付着抑制のため、TD上ノズルからのArガスの吹き込み、浸漬ノズルへの難付着材の適用、段差やモーグルといった内管構造の適用などの手法が研究されている。これらを組み合わせることによって、ノズル内管への付着ひいては閉塞が大幅に改善されてきている⁴⁾が、吐出孔周囲はいまだに付着が多い例がある。よく認められる付着部位としては、①吐出孔柱部から吐出孔下部にかけて ②吐出孔上部の2箇所である。

これらの付着は、鋼中のアルミナ介在物が溶鋼流から離脱し、れんが壁面に付着することで成長する。萩原は、付着しやすい場所について「ミクロ的渦を生じ易い場所」と述べている⁵⁾が、浸漬ノズルの内側の現象であるために個別の条件について水モデル試験を用いた詳細な調査は困難である。そのため、水モデル試験と並行して付着発生位置の流動状況のCFD計算を行った。計算プログラムにはPHONICSを使用し、 $k-\varepsilon$ モデルを乱流モデルとして採用した。

2. 2 吐出孔柱部から吐出孔下部にかけての付着

2. 2. 1 付着例とCFD計算結果

①のパターンの付着例として、Fig.1に浸漬ノズル吐出孔部に発生したアルミナ付着の模式図を示す。アルミナと地金が混在した付着が吐出孔周囲に大きく成長している。

Fig.1の浸漬ノズル形状（矩形吐出孔、吐出孔角度は下向き25°）をモデルとしてCFD計算をお

design optimized for slab quality improvement developed on the bases of CFD calculations in conjunction with a water model test.

2. A Structure for Preventing Alumina Adhesion Around the Out Let Port of the Sen

2. 1 Alumina adhesion phenomena aroundoutlet port

In order to suppress alumina adhesion to the SEN, some methods such as Ar gas blowing from the TD upper nozzle, application of anti-adhesion material, utilization of an inner structure such as the annular-step and mogul have been studied. By combining these methods, alumina adhesion and clogging of the SEN bore have been greatly improved⁴⁾, while, alumina adhesion around the outlet port still remains. The adhered areas that are frequently observed are (1) from the column to the lower part of the outlet port, and (2) the upper part of the outlet port.

These adhesion growths are caused by alumina inclusions within the molten steel exiting from the molten steel flow and adhering to the SEN surface. Ogibayashi described that alumina tends to adhere on “a place that is likely to generate micro vortex”⁵⁾. Since, this phenomenon occurs inside of the SEN, detail investigations of individually varying conditions using water model tests are difficult.

For that reason, CFD calculation at the adhesion occurrence area was also carried out, along with the water model test. In this study, the

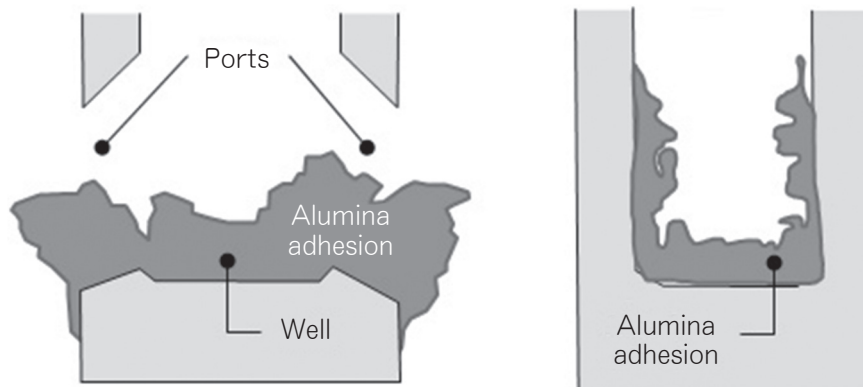


Fig.1 Vertical section of used SEN with alumina adhesion.

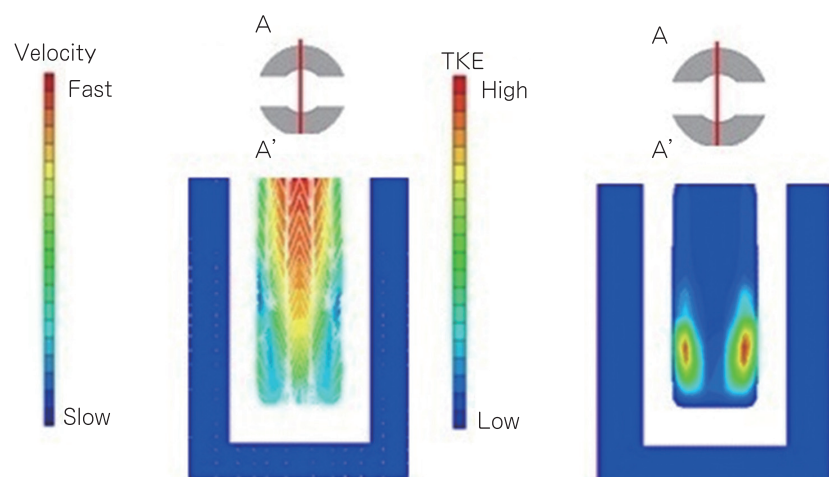


Fig.2 Contour map of velocity and turbulent kinetic energy (TKE) at the vertical-section A-A'.

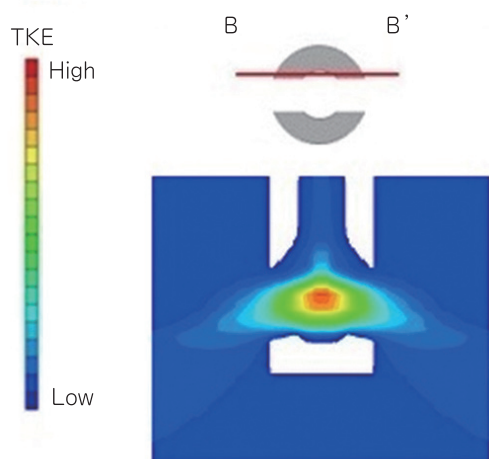


Fig.3 Contour map of turbulent kinetic energy (TKE) at the vertical-section B-B'.

こなった。CFD計算の妥当性についてはメニスカス流速について水モデル試験の測定値とCFD計算結果の比較をおこない、問題ないことを確認した。Fig.2に浸漬ノズル反吐出孔方向断面A-A'におけるCFD計算結果を示す。吐出孔内部ではノズル中央部を流下し、プール部で反転した流れと、ノズル壁面に沿って流下してきた流れが衝突し、流れの停滞が発生することがわかった。同位置では、乱流エネルギーの集中も認められた。面A-A'と垂直で、吐出孔柱部壁面に近い断面B-B'における乱流エネルギーの計算結果をFig.3に示す。面B-B'においても、吐出孔柱部から吐出孔下部にかけて乱流エネルギーの集中が認められた。この領

turbulent flow problem was solved by applying $k-\varepsilon$ model by utilizing *PHOENICS*[®] as the analytical code.

2. 2 Alumina adhesion from the column to the lower part of the outlet port

2. 2. 1 Actual adhesion and CFD calculation result

As an example of adhesion pattern (1), Fig.1 shows schematic drawings of alumina adhesion around the outlet port of the SEN. The mixed adhesion of alumina and metal grew considerably around the outlet port.

The CFD calculation was carried out for the SEN shape shown in Fig.1. This SEN has a square outlet port with a downward port angle of 25°.

Accuracy of the calculation results had been previously validated by comparing the measured value of the water model test with the CFD calculation result for the meniscus flow velocity. Figure 2 shows the CFD calculation results for the cross section of A-A' of SEN. Inside of the SEN, formation of a stagnant zone was found at the area where the downward stream along the nozzle wall collides with the upward stream reversed at the wall.

At the same part, the concentration of TKE was also calculated. Figure 3 shows the calculation results for the TKE in cross section B-B' perpendicular to the cross section A-A'

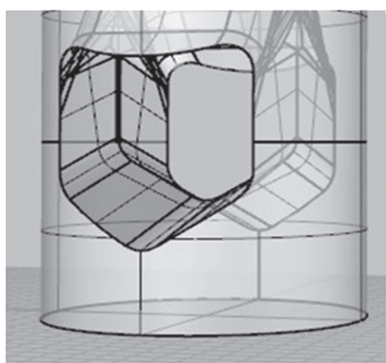


Fig.4 Schematic drawing of new SEN design.

域は、荻原のいう「ミクロ的渦を生じ易い場所」と言い換えることが出来る。加えて、Fig.1とFig.2、Fig.3を比較すると、流れの停滞・乱流エネルギーの集中が発生している領域と、使用後ノズルにおいて介在物付着が大きい位置がよく一致した。このことから、流れが停滞し、乱流エネルギーが集中している領域ではアルミナ付着が進行しやすく、反対に流れの停滞や、乱流エネルギーの集中領域の発生を抑制することが可能な形状は、介在物付着を抑制出来る可能性がある。

2. 2. 2 底部山型+ホームベース型吐出孔形状

様々な形状についてCFD計算し、吐出孔周囲における流れの停滞・乱流エネルギーの集中領域を抑制できる構造を見出した。新形状のスケッチをFig.4に示す。

新形状は、1. 底部にプール部を持たない、2. 吐出孔が五角形（ホームベース型）であることを特徴とする。これらの特徴により、プール部での流れの反転が抑制されるため、衝突が起こりにくく、停滞することなく溶鋼流が吐出孔から吐出される。新形状のCFD計算の比較結果をFig.5に示す。新形状では目立った流速の停滞領域は認められず、乱流エネルギーの集中も抑制されていた。

底部山型+ホームベース型吐出孔を有する浸漬ノズルは、実機テストが決定しており、今後同構造による吐出孔周囲のアルミナ付着抑制効果を評価する予定である。

2. 3 吐出孔上部への付着

2. 3. 1 付着例とCFD計算結果

側面に上向きの吐出孔を4孔有するブルーム向け浸漬ノズルを使用した際、吐出孔上部へのアル

ミナ付着が確認された。これは、吐出孔上部の隅に流れが停滞し、乱流エネルギーが集中しているためと考えられる。Not only for cross section A-A' but also for cross section B-B', the flow stagnant and TKE concentration were calculated. This part can be regarded as Ogibayashi's "a place that is likely to generate micro vortex". Furthermore, by comparing Figs.1, 2 and 3, good conformity between the part where the flow was stagnant, the TKE concentration calculation position, and a considerable alumina adhering area was recognized. According to this conformity, it is reasonable to assume that the alumina adhesion is likely to occur in the part where TKE concentrated stagnation zone is formed. Thus, it can be expected that alumina adhesion can be suppressed by optimizing the shape of the outlet port so as to eliminate TKE concentrated flow stagnation.

2. 2. 2 “No well and Home plate” shape

We found a new structure by CFD calculation which can suppress the flow stagnant / TKE concentration. A schematic drawing of the new shape is shown in Fig.4. The new shape is characterized by (1) No well structure and (2) Pentagonal (Home plate) outlet port shape. Thanks to these structural properties, the collision of flow was suppressed by preventing reversed flow generation at the well. The fluid was discharged from the outlet port without stagnation. Figure 5 shows that the CFD calculation results of the new shape. In the new shape, no noticeable flow stagnation was recognized, and the concentration of turbulent kinetic energy was suppressed.

The New SEN (no well and home plate) will be used in actual casting. Therefore, the effect of alumina adhesion suppression around outlet port was evaluated.

2. 3 Alumina adhesion to the upper part of the SEN

2. 3. 1 Actual adhesion and CFD calculation result

In the case of the four upward side ports type SEN application, alumina adhesion to the upper side of the outlet port was sometime observed. Figure 6 shows a schematic drawing of alumina adhesion to this part. Adhesion was observed

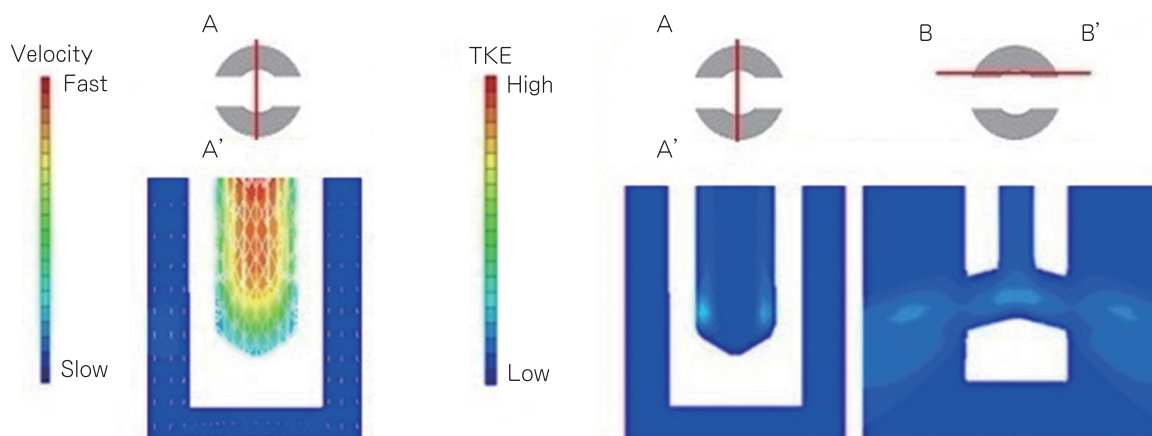


Fig.5 Contour map of velocity and turbulent kinetic energy (TKE) in vertical sections A-A' and B-B'.

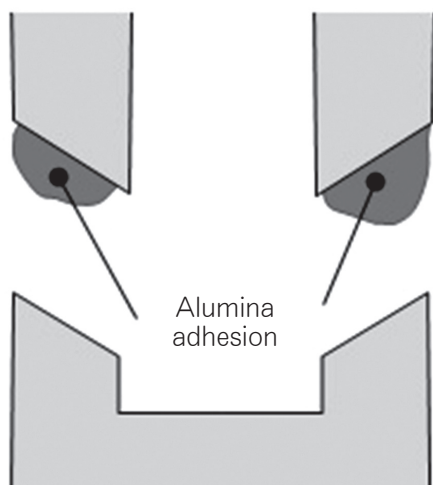


Fig.6 Schematic drawing of alumina adhesion to upper-outlet port.

ミナ付着が認められた。吐出孔上部への付着のスケッチをFig.6に示す。吐出孔柱部へは付着は認められず、吐出孔上部のみに付着が認められる。このノズルの吐出孔周囲の溶鋼流動を調査した。

Fig.7に吐出孔縦断面のCFD結果を示す。流速ベクトル図をみると、内管側から吐出孔に向かう流れが吐出孔管壁上面付近に生じていない。逆に吐出孔外側からノズル内管側への弱い吸い込み流が生じていた。このように流れが管壁に沿わずに剥離し、その部分の流れが停滞する現象は、吐出孔が上向きである本形状では特に顕著であった。吐出孔上部の付着は、付着発生領域の流れが停滞しているため、溶鋼中の介在物が浮力によって浮上しやすく、一旦壁面に付着した介在物は除去され難いために付着が大きく成長したと考えられる。

not only for the upper part of the outlet port but also for the column. Thus, we investigated the fluid flow around the outlet port of this nozzle. Figure 7 shows the calculated velocity vector distribution on the vertical cross section of the outlet port. In the vicinity of the upper wall of the outlet port, a slight inward stream was calculated rather than outward stream. This flow separation and stagnant zone formation was marked for the SEN with upward outlet port.

Alumina adhesion to the upper side of the outlet port is considered attributable to the above mentioned flow status, that is, inclusions tend to float up and become fixed to the upper side of the outlet port by buoyancy in the stagnant zone where the flow out force is poor.

A water model test of this SEN was also carried out. Inward flow at the upper part of the outlet port was also confirmed (Fig.8). Hence, it was verified that the water model test results agreed with the CFD calculation results.

2. 3. 2 “Trapezoidal cross section” shape

We investigated a new SEN shape which can suppress alumina adhesion. As a result of CFD calculation for various shapes, it was found that a trapezoidal cross section shape, of which the upper wall of the outlet port is horizontal while the lower wall of the outlet port is inclined upward, is effective for suppressing flow separation. Figure 9a shows the CFD calculation result

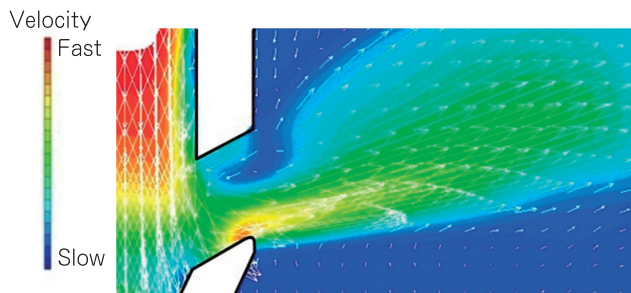


Fig.7 Contour map of velocity at the vertical section of conventional outlet port.

同ノズルについて水モデル試験も実施した。水モデル試験においても吐出孔上部の吸い込み流は確認でき (Fig.8), 吐出流速の水モデル測定結果とCFD計算結果が良く一致していることを確認した。

2. 3. 2 台形断面吐出孔形状

流れの剥離がアルミナ付着の原因であると考えられたため、流れの剥離を抑制可能な新形状について検討を行った。様々な形状についてCFD計算による検討の結果、吐出孔鉛直断面でみると、吐出孔管壁上側は水平、下側は外側に向かって上向きの角度を有し、内管側および外周側が鉛直方向に平行な台形であることを特徴とする形状が、流れの剥離を抑制可能であることが判った。Fig.9aに新形状のCFD計算結果を示す。新形状では、吐出孔内を通過する流れは吐出孔上部に沿って流れるように改善し、吐出流の吸い込み流は抑制された。水モデル試験においてもこの効果は確認された (Fig.9b)。

3. 上向きの吐出孔を持つスラブ用浸漬ノズルの最適形状の検討

3. 1 上向き吐出孔によって形成されるスラブモールド内流動パターン

一般的なスラブ用浸漬ノズルでは、吐出孔は水平あるいは下向きの角度をもつ。下向きに吐出した吐出流の一部はモールド短辺に到達したあとに上昇し、メニスカスで反転してノズルへ向かう“ループ”を形成する。一方、メニスカスへの熱供給向上を目的として水平よりも上向きの角度をもって配置される浸漬ノズルの場合、吐出流がメニスカスに到達し、浸漬ノズルからモールド短辺

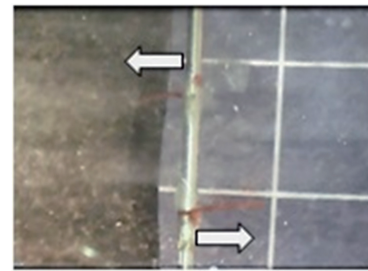


Fig.8 Reverse flow at upper-outlet port.

for the new shape. The flow passing through the outlet port of the new shape was improved so as to flow along the upper wall of the outlet port, and the inward flow was suppressed. This effect was also confirmed by water model test (Fig.9b).

3. Optimization of SEN with Upward Outlet Port for Slab Casting

3. 1 Flow pattern in the slab mold generated by the upward outlet port

The outlet port angle of the SEN generally used for slab casting is horizontal or downward. Some portions of the discharge flow from this SEN rises after colliding with the mold narrow face and turn into a meniscus flow from the mold narrow face to the SEN. This flow sequence forms a loop. On the other hand, in the case of the upward outlet port SEN being used in order to improve the heat supply to the meniscus, a “reverse” meniscus flow from the SEN to the mold narrow face is formed since the discharge flow directly reaches the meniscus (Fig.10). In this situation, it is thought that the area where the discharge flow reaches the meniscus is raised locally, thus, the mold slag layer becomes thin. Furthermore, the flow near the mold narrow face stagnates because the reverse meniscus flow sinks before reaching the mold narrow face. Because the heat supply is insufficient in the stagnant flow area, there is a possibility of slab quality deterioration caused by inadequate of molten mold powder properties.

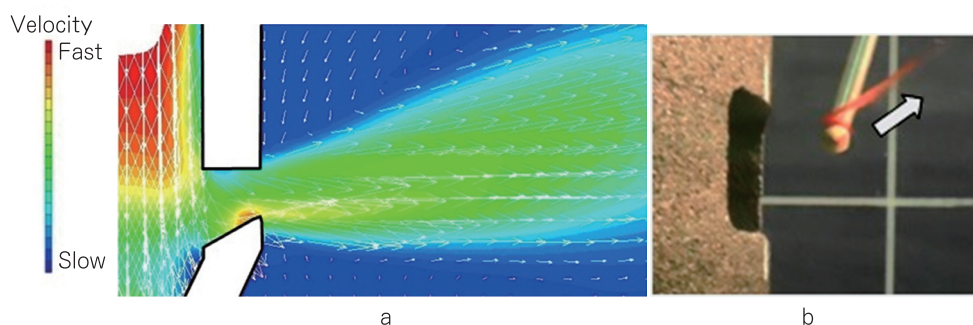


Fig.9 a: Contour map of velocity at vertical section of outlet port.
b: Water model test result.

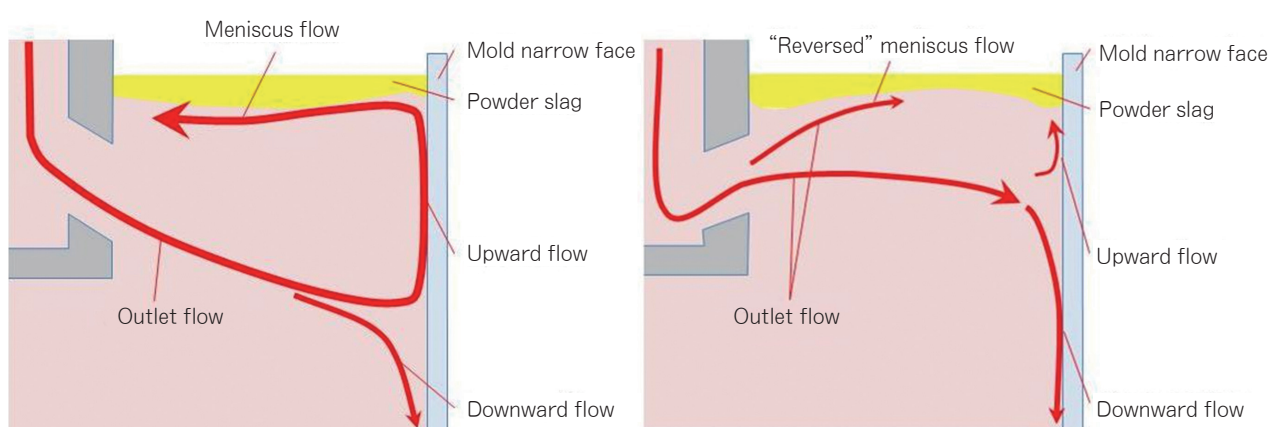


Fig.10 Difference in flow pattern caused by angle of outlet port.

に向かう“逆向きの”メニスカス流が認められることがある (Fig.10)。このとき、吐出流はメニスカスに到達した部分で局所的に湯面が盛り上がるため、実機ではパウダースラグ層が薄くなることが考えられる。加えて、メニスカス流はモールド短辺に到達する前に沈み込むため、短辺付近の流れが停滞する。流れの停滞域では熱供給が不足し、モールドパウダーの溶融不良に起因する問題が発生する可能性がある。

3. 2 上向き吐出孔を有する浸漬ノズルのCFDによる検討

ステンレス鋼を铸造するA製鉄所のスラブ連続铸造機向け浸漬ノズルについて、モールド短辺付近側のメニスカス付近への熱供給の改善を目的としたノズルの形状検討を行った。計算条件は、モールドサイズ200×1275 mm、スループット 0.8 ton/minである。初めに、現行品の上向き角度10°と15°の比較計算を行った。Fig.11にモールド内流

3. 2 Optimization of SEN with upward outlet port by CFD calculation

SEN optimization was carried out that a stainless slab caster in steelworks A for the purpose of improving the heat supply to the meniscus near the mold narrows face. A mold size of 200×1275 mm and throughput of 0.8 ton/min were assumed for calculation. At first, conventional shapes (10 and 15 degree upward outlet port angles) were calculated. Figure 11 shows the flow pattern and velocity contour map in the mold. While a similar flow pattern was obtained with both shapes, a detail comparison clarifies the degree of stagnation in the meniscus near the mold narrow face, which became smaller in the case of the upward 15° outlet port SEN. On the other hand, the “reverse” meniscus flow velocity of the 15° port was faster than the 10° port. This result indicated that the mold level

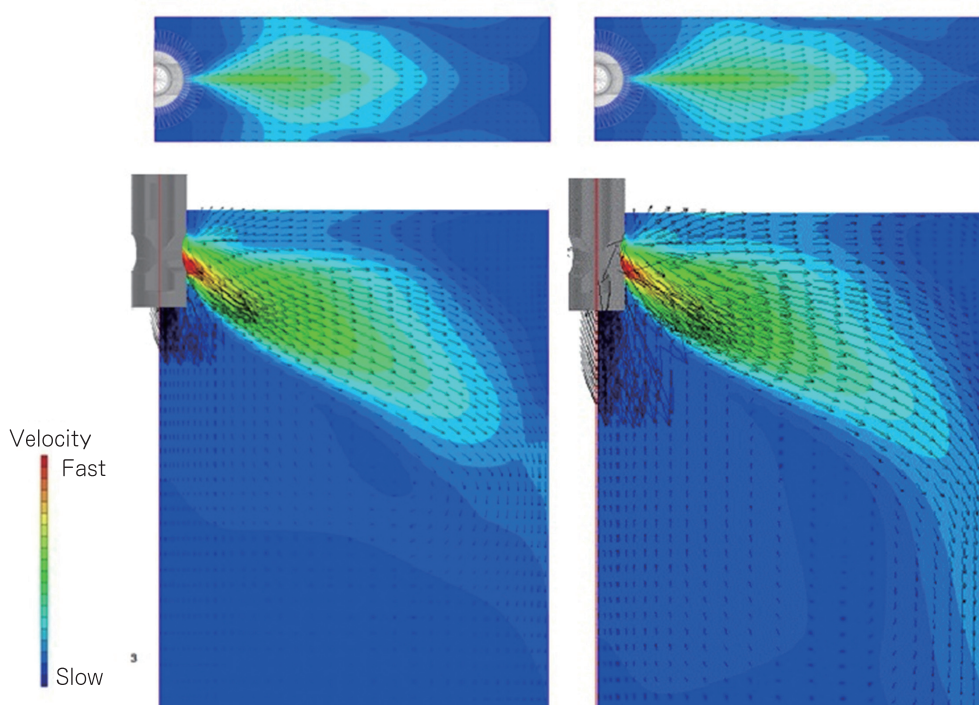


Fig.11 Contour map of velocity (Left: Port angle $+10^\circ$, Right: Port angle $+15^\circ$).

動パターンと、メニスカス位置の流速分布について示す。両形状ともに類似のパターンが得られたが、短辺付近では流れの停滞域は上向き角度 15° の方がやや小さくなった。ただし、吐出流によって生じた“逆向きの”メニスカス流速は 15° 品の方が速く、より湯面変動が大きくなることが予想された。 15° 品の吐出流は上下方向に広く拡散しており、上方向に拡散した流れがメニスカスまで到達していることが確認された。

吐出流の拡散は吐出流速のばらつきで助長されると考えられる。弊社の複段差構造は、ノズル内を通過する溶鋼流の偏流を解消し、比較的均等な吐出流をモールド内に供給することが可能である¹⁾。 15° 品をベースとして内管に段差構造を導入した形状の計算結果をFig.12に示す。吐出流の上下方向への拡散は大幅に抑制され、メニスカスに直接到達する吐出流が減少し、モールド短辺へ直接衝突する成分が増加した結果、短辺の上昇流が増加し、結果として短辺付近の活性化が認められた (Fig.12)。

吐出孔角度を変更し、複段差構造を導入した浸漬ノズルは実機試用され良好な結果が得られている。

fluctuation of 15° port was wider.

It was confirmed that the discharged flow of the 15° -SEN spreads widely in the vertical direction and the upwardly diffused flow reached the meniscus. The spread of the discharged flow is considered to be accelerated by the uneven discharged flow velocity.

Our double annular-step structure can supply an even discharge flow to the mold by eliminating uneven flow in the bore¹⁾. Figure 12 shows the calculation results for the upward 15° -SEN with double annular-step. The spread in the vertical direction of the discharge flow was greatly suppressed and the flow direction was changed as follows; the discharge flow directly reaching the meniscus decreased and directly colliding with the mold narrow face increased. As a result, the conditions of meniscus near the mold narrow face were active by the increase in rising flow near the mold narrow face. The new SEN, with an optimized outlet port angle and double annular-step obtained good results in actual casting.

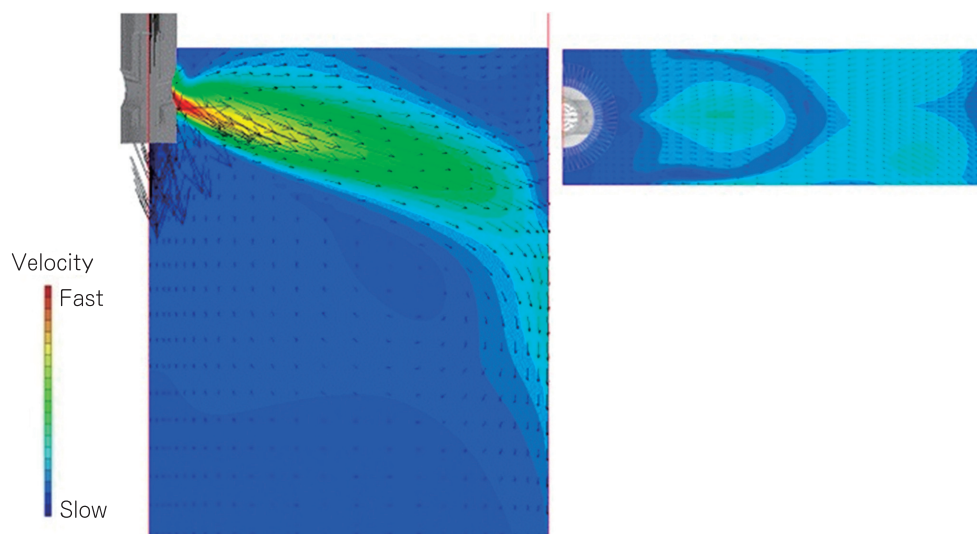


Fig.12 Contour map of velocity (Port angle $+15^\circ$, Double annular step bore).

4. 結言

浸漬ノズルのシミュレーション方法として、水モデル試験とCFD計算が広く実施されている。CFD計算は水モデルでは得られにくい情報についても容易に求めることが可能である。浸漬ノズルの内側で発生する付着問題の解決、メニスカス短辺付近の流動性の向上を目的としてCFD計算と水モデル試験を活用して新形状の開発、客先使用条件に合致する浸漬ノズル形状の最適化を行った。実機テストを行い、改善効果を今後検証していく予定である。

4. Conclusion

Water model tests and CFD calculations were widely carried out to simulate a SEN in actual use.

CFD calculation can provide information which is difficult to evaluate by water model test. According to CFD calculations in association with water model test, we developed new SEN shapes which can prevent alumina adhesion. Moreover, we optimized SEN design to improve flow states at the meniscus near the mold narrow face. The effectiveness of these shapes will be confirmed in actual casting in the future.

References

- 1) Osamu Nomura, Masamichi Takai, Masanori Ogata, Shinsuke Inoue : Shinagawa Technical Report, **46** 95-104 (2003).
- 2) Pierre Colucci, Maurice Halloucherie, Frédéric Leclercq, Dominique Verrelle, Claude Schiltz, Eishi Iida, Makoto Nakamura : Shinagawa Technical Report, **51** 9-18 (2008).
- 3) Hiroyasu Niitsuma, Yukio Ohkawa, Shinsuke Inoue, Takayuki Matsunaga : Shinagawa Technical Report, **58** 17-24 (2015).
- 4) Hiroyasu Niitsuma, Masanori Ogata, Ian McLennan, Paul Cassar, Mark Camplin : Shinagawa Technical Report, **55** 59-66 (2012).
- 5) Shigeaki Ogibayashi : TAIKABUTSU, **46** [4] 166-178 (1994).