

# 偏流対策用段付ノズルの特性

横谷 真一郎\*・長尾 伸一\*・浅古 豊\*<sup>2</sup>  
高木 茂男\*・綾田 研三\*<sup>3</sup>・Julian Szekely\*<sup>4</sup>・原 茂太\*<sup>5</sup>

Characteristic of Nozzle with Step for Prevention of Uneven Flow

Shinichiro YOKOYA, Shinichi HASEO, Yutaka ASAKO, Shigeo TAKAGI, Kenzou AYATA, Julian SZEKELY and Shigeta HARA

**Synopsis :** The flow pattern of the molten steel in the immersion nozzle have a important effect on the quality of the slabs, billets or blooms produced.

Uneven flow in the nozzle developed after passing through a sliding gate, sometimes result in formation of vortex near the nozzle and entrapment of CC powder in the molten steel.

The purpose is to suppress those uneven flow as soon as possible after passing through the sliding gate. We proposed a new type nozzle with the contraction and a step. Numerical and water model studies revealed that rectification was accelerated significantly using the new type nozzle, which would lead to the suppression of the vortex generation and turbulence on the meniscus in the mold.

**Key words :** continuous casting ; uneven flow ; sliding gate ; vortex ; immersion nozzle ; contraction nozzle with a step.

## 1. 緒言

鋼の連続鋳造時における連鋳パウダーの巻き込みによる鋳片中の欠陥の発生は、近年指向されている小断面鋳片の高速鋳造の場合顕在化しつつある。このような連鋳パウダーの巻き込みの原因としては、(1)高速鋳造時に見られる浸漬ノズル出口における吐出流速の増大が、溶鋼パウダー界面の乱れを引き起こす場合、(2)脱酸生成物によるノズル閉塞防止用のアルゴンの一部がメニスカス部を攪乱する場合、また(3)スライジングゲート通過後に発生するノズル内の流れの不均一が原因して、ノズル吐出流の左右不均一から生ずるメニスカス直下流により、浸漬ノズル近傍のメニスカス部に発生する渦などが挙げられる。この対策として、鋳型内における最大流速を低下させることによりメニスカス部の最大流速や流速変動を低下させるのが有効である。すなわち、ノズル形状の改良<sup>1,2)</sup>、鋳型内に電磁力を作用させて電磁ブレーキにより溶鋼流動を低下させる方法<sup>3,4)</sup>、また著者らにより提案された浸漬ノズル内の溶鋼に旋回運動を与えて吐出口全面での流れの均一化<sup>5,6)</sup>などの手法が考案されている。

本研究は連鋳パウダー巻き込みの原因のひとつである、スライジングゲート通過後に現れる偏流発生に注目し、そ

の防止策について水モデル実験および数値解析により検討を加えたものである。すなわち、ブルーム連鋳において2孔以上の吐出口を有する浸漬ノズルとスライジングゲートを用いて連続鋳造を行う場合には各吐出口からの流れが均一に流出しないために、鋳型内での流れが不均一となり、速い側の吐出流がメニスカス直下においてノズルと鋳型長辺間を抜け遅い側に進み、ノズル近傍位置において渦を発生する。このような渦の発生がパウダーを巻き込み鋼中在物の要因の一つとなっているのではないかと考えられる。すでに、ノズル吐出口における偏流とメニスカス直下における渦発生に関する実験的検討を主体とする研究が行われているが<sup>7-14)</sup>、その基になるノズル内部の偏流阻止、つまりノズル流の整流化の研究は少なく、偏流抑制効果には絞<sup>15)</sup>りや、ノズル内壁面に段差を設けたり<sup>16,17)</sup>、ノズル吐出口径を小さくすること<sup>18)</sup>でかなり効果があると報告されているが、その機構は十分には明らかにされていない。従って、本研究では流量調整用スライジングゲートによって発生する偏流をノズル内で出来るだけ短距離で整流して、ノズル吐出口手前で軸対称流れとし、ノズル吐出口では左右対称な速度分布の吐出流を実現することを目指している。この目的のために次の3段階に従って研究を行った。

第1段階として、整流化実現を目指して種々のスライジ

平成7年9月22日受付 平成8年4月12日受理 (Received on Sep. 22, 1995; Accepted on Apr. 12, 1996)

\* 日本工業大学 (Nippon Institute of Technology, 4-1 Gakueidai Miyashiro-cho Minamisaitama-gun Saitama-ken 345)

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

\* 3 (株)神戸製鋼所 (Kobe Steel, Ltd.)

\* 4 Material Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology

\* 5 大阪大学工学部 (Faculty of Engineering, Osaka University)

ングゲート開度に対するノズル形状を検討して、最適と思われる形状を求めた。それには比較的計算時間の短くてすむ2次元の形状で数値解析を行った。次に2次元で求めた最適形状をもとに3次元形状を数値解析を用いて検討した。第3段階として3次元形状で求めた形状通りのノズルを作製して、実験液体として水を用いて実験を行い、実験結果と数値計算結果を比較検討して、ノズルの整流化の有効性を論じた。

## 2. 支配方程式と実験方法

Fig. 1は検討用の段付き絞りノズル(ノズルと呼称する)の概要を示したものである。実験用液体はノズル入口A—Bより流入し、スライジングゲート(SGと呼称する)を通過して偏流を発生した後、段付き絞りを通過して、ノズル出口E—Fより流出する。図中の実線は固体壁で、破線E—Fは計算上の流出境界である。

### 2.1 支配方程式

支配方程式は連続の式、運動方程式、乱流モデルから構成されており、それぞれ付録に表わされている。

境界条件

ノズル入口；二次元モデルでは  
 $p_t$ (総圧)一定； $2.8 \times 10^5 \text{Pa}$

$$\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = 0$$

$$k = 0.5(u'^2 + v'^2)$$

三次元モデルでは

$$u = 0.5 \text{ m/s}, \quad v = w = 0 \text{ m/s}$$

$$k = 0.5(u'^2 + v'^2 + w'^2)$$

$$\epsilon = C_\mu k^{3/2} / (0.07 r_{in})$$

$u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ は乱流速度変動でそれぞれ平均流速の10%とした。 $r_{in}$ はノズル入口直径(ノズル幅)である。

計算領域出口； $p = \text{一定}$ ,  $\partial k / \partial n = \partial \epsilon / \partial n = 0$   
 $\partial u / \partial n = \partial v / \partial n = \partial w / \partial n = 0$

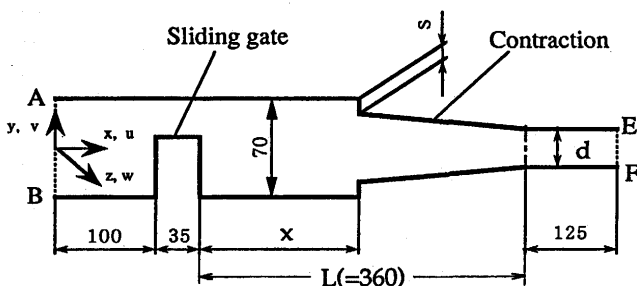


Fig. 1. Schematic diagram of the contraction nozzle with the step s.

ここに、 $n$ はAB, EFに垂直な法線ベクトルである。

また壁面上の速度および $k$ ,  $\epsilon$ についてはLaunder, Spalding<sup>19)</sup>の壁関数の扱いを適用した。すなわち、壁に最も近接した格子点に対し

$$\partial k / \partial n = 0, \quad \epsilon = C_\mu^3 k^{3/2} / \kappa y$$

ここに、 $\kappa$ はカルマン定数0.42である。

計算にはBFC法による離散化と圧力補正法による速度と圧力の結合を行っている流動解析汎用ソフトウェア<sup>20)</sup>を用いた。計算に用いた格子数は2次元モデルがx軸方向73, y軸方向30, 3次元モデルがx軸方向80, y軸方向15, z軸方向15である。繰返し計算の収束判定にはu, v, wの相対変化が0.1%を用いた。

### 2.2 実験装置とその方法

Fig. 2に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、モデル段付き絞りノズル(実験用液体の水温一定、密度一定で、ノズル充滿流を前提としているので、ノズル設置姿勢は鉛直でも水平でも同等である)②、液体を循環するためのポンプ③、ノズル内軸方向速度分布を計測するためのレーザー流速計④から構成されている。段付き絞りノズルの詳細をFig. 3に示す。

実験用液体として水道水を用い、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求めた。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4 W, Arレーザー)と付属の微動トラバース装置を用い、管軸方向の流速を管軸を含む断面で半径方向1mm間隔で測定した。計測用散乱粒子には1 $\mu$ のアルミナ粒子を用いた。

実験は段付き絞りノズル絞り終焉後の直管部の平均流速が2m/s(レイノルズ数約38,000), 水温約20°C, Fig. 3に示すSG開度一定の条件で行った。

### 2.3 偏流値の定義

偏流は流量調整用SGを通過することによって発生する。

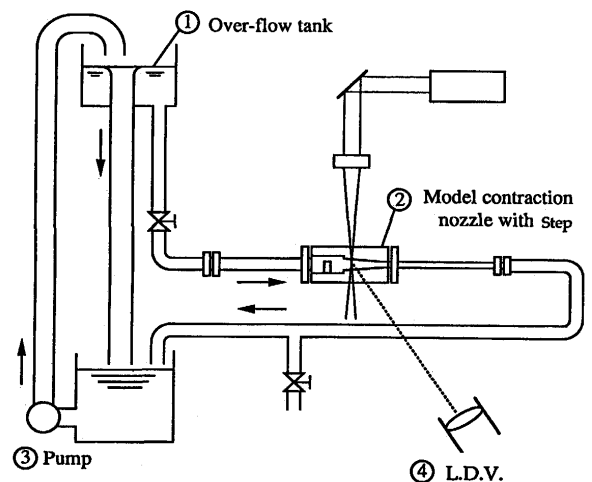


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus used for the water model.

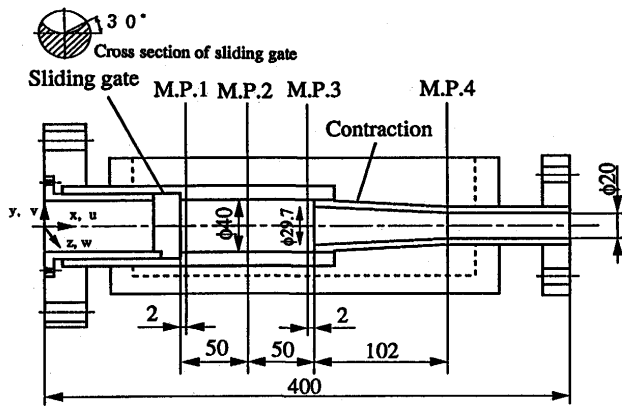


Fig. 3. Schematic diagram of the contraction nozzle with the step, showing several points for measuring an axial velocity component, M.P..

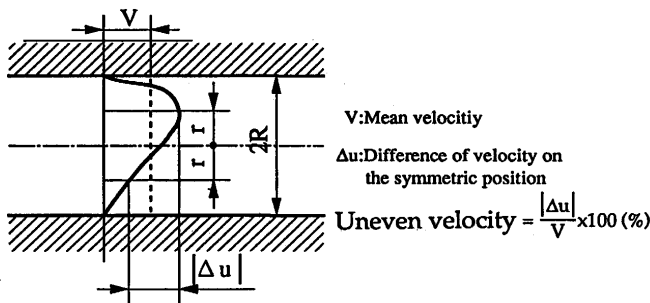


Fig. 4. Uneven velocity defined in this study.

その偏流の度合いを表す量として偏流値を次式で定義した。

$$(\text{偏流値}) = \frac{|\Delta u|}{V} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\Delta u$ は対称位置における速度差、 $V$ は管内平均流速 (Fig. 4 参照)である。

### 3. 段付き絞りノズルの偏流抑制効果の実証実験

段付き絞りノズル(ノズルと呼称する)について、まず2次元モデル(溶鋼流)による数値解析によって偏流抑制効果を検討することから始めた。ノズル内流れを2次元化して扱うことにより、計算上の労力は大幅に緩和されるので、最初に2次元モデルでノズル各部寸法と偏流抑制効果について数値実験を行って最適のノズル形状を求め、その形状をもとに3次元ノズルを設計し、計算と実験の両面からノズルの偏流抑制効果の実証実験を行った。

#### 3・1 2次元モデルによる検討

##### 3・1・1 基本形状

検討を行った2次元段付き絞りノズル(以後ノズルと呼称する)をFig. 1に示す。ノズルは一段の段差 $s$ とその段部より下流に設けられた絞り部によって偏流を抑制しようとするものである。この形状を実際の流れに適用するに当たって段の大きさ、絞り比、長さ、等の諸量を定める必要がある。

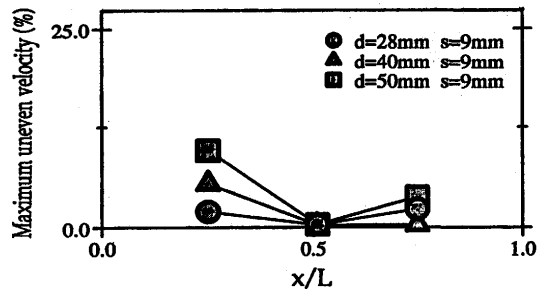


Fig. 5. Maximum uneven velocity versus starting point of contraction nozzle,  $x/L$  for optimized magnitude of step,  $s$  for different diameter,  $d$  as shown in Fig.1.

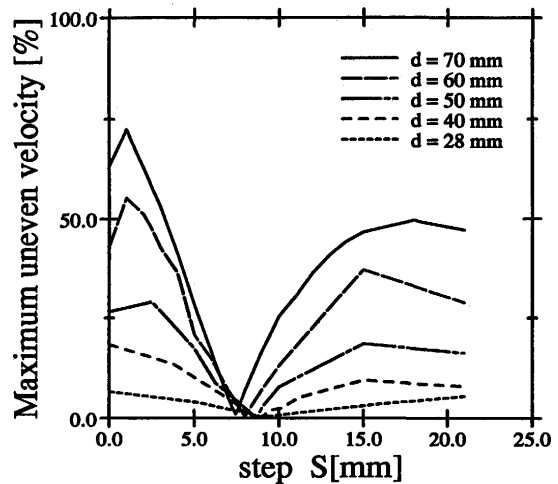


Fig. 6. Maximum uneven velocity versus magnitude of step,  $s$  for different diameter,  $d$ .

ここでは段差 $s$ 、絞りの終焉部径 $d$ 、SGから絞り始め迄の距離 $x$ 、SGから絞り終焉部迄の距離 $L$ (360mm)以外の諸量は実機の寸法を考慮して定めた。なお、偏流値の評価には絞りの終焉部における最大偏流値を用いた。

##### 3・1・2 段差の効果

各無次元絞り始め位置( $x/L=0.25\sim 0.75$ )で、絞り終焉部径 $d$ を段階的に変化させて求めた絞り終焉部における最大偏流値をFig. 5に示す。段差 $s$ はほぼ9mmと一定で、特に $x/L=0.5$ 、つまり、絞り始め位置 $x$ がSGから絞り終焉部までの中間点( $x=180\text{mm}$ )に位置するとき、最大偏流値は1%以下であることが分かった。従って、その位置を固定して、各絞り終焉部径( $d=28\sim 70\text{mm}$ )について段階的に段差 $s$ を変化させた場合の最大偏流値をFig. 6に示す。段差も絞りもない( $s=0\text{mm}$ ,  $d=70\text{mm}$ )従来型ノズルの場合は70%とかなり高く、一方段差のない( $s=0$ )円錐状絞りの場合、 $d$ の減少とともに最大偏流値は系統的に小さくなっている。段付き絞りをを用いることによってその傾向は著しく、一層整流化が促進される。ここで、絞り終焉部での径 $d$ と絞り始め位置での径 $(70-2s)$ の比を絞り比とすれば、絞り比 $(d/(70-2s)) \leq 1$ のとき、つまり、絞り始め位置から絞り終焉部に向かって絞りの状態にあるとき、段差 $s=9\text{mm}$ を基点として、それよ

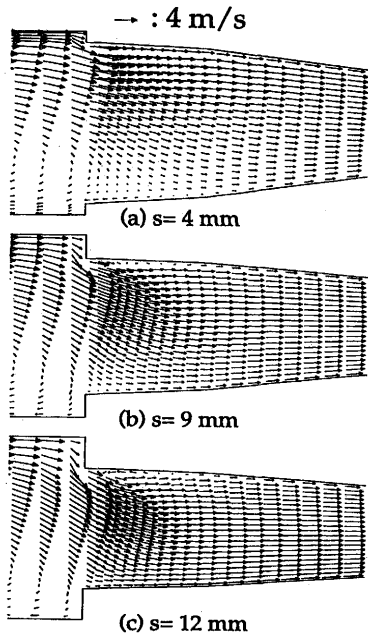


Fig. 7. Flow pattern for different magnitude of step, s.

りも小さくても大きくても  $|s-9| \leq 6$  mm の範囲ではほぼ比例的に最大偏流値が増加している。一方、絞り比  $(d/(70-2s)) > 1$  のとき、つまり、絞り始め位置から絞り終焉部に向かって広がり状態にあるとき、段差  $s$  の基点は  $s=9$  mm よりやや小さくなっているが同様の傾向を示している。この機構を Fig. 7 に示す。すなわち、一方の壁よりの大きな速度の偏流を段部で逸らして反対側の最低速部に流入させて流速分布の平均化を計るとともにさらに円錐状の絞り部で流速分布の一樣化を促進している様子を示しているが、段差  $s=0.009$  m が整流化に最適であることを明らかにしている。

3・2 3次元モデルによる検討

整流効果について検討した結果 (Fig. 5, Fig. 6), スライジングゲートから短い距離で最も整流効果の優れているノズルは段付き絞りノズルで、しかも絞り始め距離は SG と絞り終焉部の中間点で、絞り終焉部径の大小にかかわらず段差  $s=9$  mm か、それよりやや小さいがその近傍であることが分かった。

そこで3次元モデルによる検討では段付き絞りノズル (Fig. 3) を用い、Fig. 3 のノズルの形状の諸元が Fig. 1 (2次元モデル検討用の段付き絞りノズル) のその0.57倍であることを考慮して、段差  $s=5.15$  mm、絞り終焉部径20 mm の場合を検討した。

3・2・1 水モデル実験結果と考察

スライジングゲート直後①、スライジングゲートと段付き絞りの中間点②、段付き絞り直前③、絞り終焉部④における軸方向速度分布の実験値と計算値を Fig. 8, Fig. 9 に示す。ここで□, ▽, ◇等はそれぞれ一連の実験値を示し、実線は計算値を示す。これらの位置は Fig. 3 に示された M.P. 1 ~ M.P. 4 に対応する。Fig. 8 に見られるように境界層の

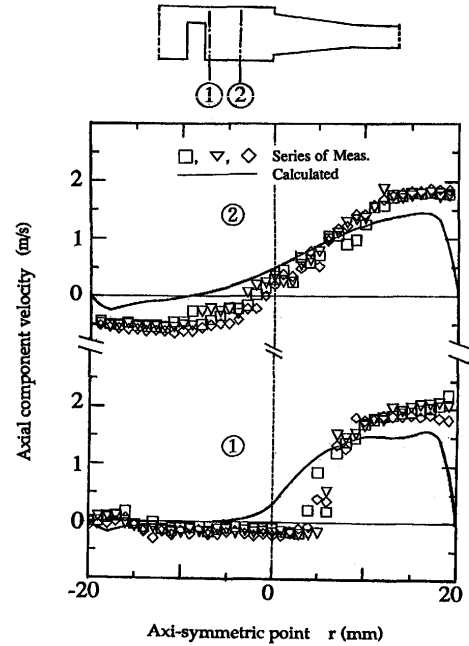


Fig. 8. Axial velocity distributions obtained through experiment and calculation at the point ① and ② after flowing through the sliding gate.

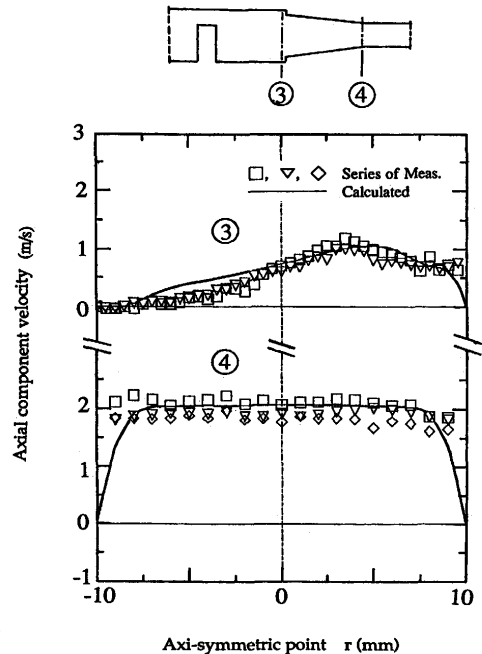


Fig. 9. Axial velocity distributions obtained through experiment and calculation at the points ③ and ④ after flowing through the sliding gate.

剥離による渦が発生する領域では実験値と計算値の間に不一致が見られるが、一方、Fig. 9 に示される境界層の剥離が存在しない領域では計算値と実験値は比較的良く一致する。

Fig. 10 は Fig. 9 の軸方向速度分布を管軸から管壁までの偏流値分布を用いて表したものである。偏流値は段付き絞り直前では150~200%であるが、絞り終焉部ではほぼ0%で

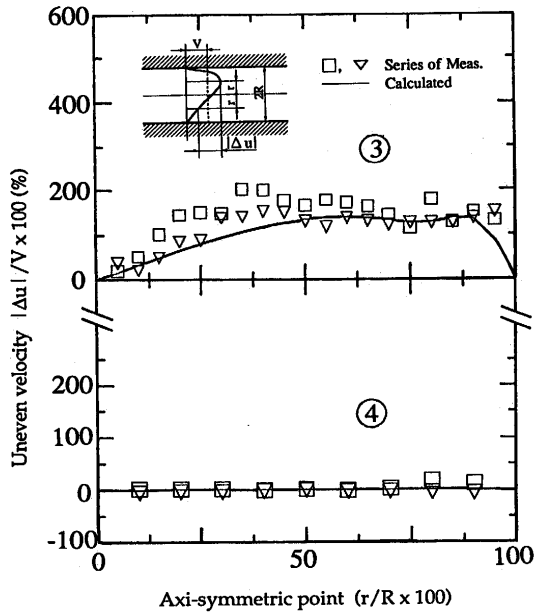


Fig. 10. Uneven axial velocity distributions on the symmetric position at the points ③ and ④ shown in Fig.9 after flowing through the sliding gate.

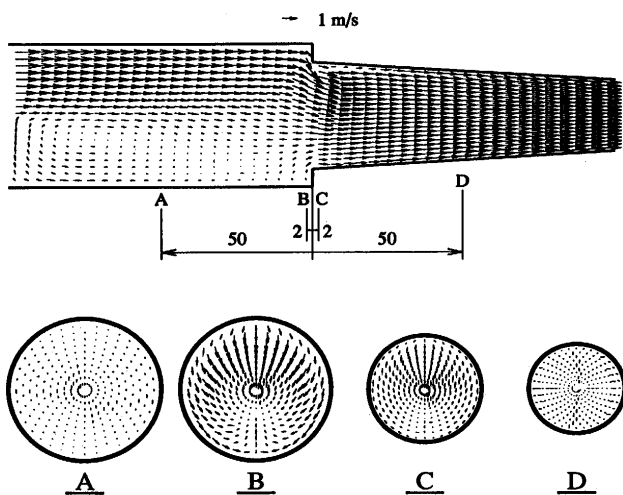


Fig. 11. Flow pattern for contraction nozzle with step,  $s=5.15$  mm as shown in Fig.3.

ある。このことから、段付き絞りをを用いれば、ノズル入口において大きな偏流をもつ流れでも、入口からかなり短い距離でほぼ完全に整流化されることが明らかになった。その機構をFig.11に示す。壁際の大きな流速の偏流を段部で逸らして反対側の低流速域に流入する流れと、一方、流れの一部は段部で回り込み対称面で合流しながら流入する流れ、つまり段部から二重螺旋運動をしながら流下する流れとの二つの流れによって流速分布の平均化を計るとともに円錐状の絞り部で一層の流速分布の一樣化を促進していることが分かった。従って、ノズル径が異なる場合でも本研究のノズル径と段差 $s$ との比率関係を当てはめると、適用の可能性が考えられる。なお、この原理を非充満流に適用した場合、

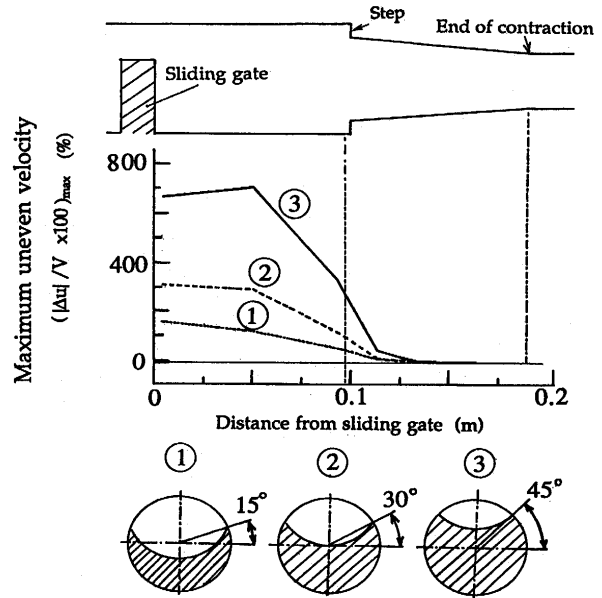


Fig. 12. Development of maximum uneven velocity with increasing distance from the sliding gate for the different opening value, illustrating uniform flow development due to the contraction with the step.

段部および円錐状の絞り部によって近似的に充満流になり、偏流抑制効果が期待できるのではないかとと思われる。

### 3・2・2 スライジングゲート開度と偏流値

ここではSGの開度を変えた場合の偏流値の計算結果について述べる。SG直後の位置を原点として、絞り終焉部までの各下流位置の最大偏流値をFig.12に示す。そこではSG開度がパラメータである。SGと段付き絞り間、すなわち上流区間ではSG開度が小さいほど、最大偏流値は大きい。SGより13cm下流ではその値はほぼ0になっている。すなわち、段付き絞りノズルは、SGの開度を広範囲に変化させて発生する広範囲の偏流値に対しても、SGからかなり短距離で一樣に整流化出来る有効な整流ノズルである。

## 4. 結言

各種絞りノズルの整流化の検討を2次元モデルで数値的検討を行い、それをもとに3次元モデルで計算と実験の検討を行った結果、次のことが明らかになった。

(1) 壁際の大きな流速の偏流を段部で逸らして反対側の低流速域に流入する流れと、一方、流れの一部は段部で回り込み対称面で合流しながら流入する流れ、つまり、段部から二重螺旋運動をしながら流下する流れとの二つの流れによって流速分布の平均化を計るとともに円錐状の絞り部で一層の流速分布の一樣化を促進していることが分かった。

(2) 2次元モデルの検討により、今回の研究の範囲内で、最適条件は絞り始め位置がSGから絞り終焉部までの中間点に位置し、絞り比が $(d/(70-2s)) \leq 1$ のとき、つまり、絞り始め位置から絞り終焉部に向かって絞りの状態にある

場合、段差 $s=9\text{ mm}$ で、最大偏流値は1%以下であり、その段差を基点としてそれよりも大きくても小さくても最大偏流値は増加する。一方、絞り比が $(d/(70-2s))>1$ のとき、つまり、絞り始め位置から絞り終焉部に向かって広がる状態にある場合、段差の基点は $9\text{ mm}$ よりやや小さいが同様の傾向を示している。

(3)乱流 $k-\epsilon$ モデルを用いても、その結果は段付き絞り始めや、絞り終焉部のような境界層の剥離の存在しない領域では比較的实验結果とよく一致し、偏流の整流化を目指す本研究の段付き絞りノズルの検討のために有効であることを明らかにした。

(4)段付き絞りノズルはスライジングゲートで発生した偏流を整流化するに有効であることが実験によっても計算によっても明らかになった。

記号

- $\rho$  : 密度 (溶鋼:  $7200\text{ kg/m}^3$ , 水:  $1000\text{ kg/m}^3$ )
- $\mu$  : 粘性係数 (溶鋼:  $0.006\text{ Pas}$ , 水:  $0.001\text{ Pas}$ )
- $p$  : 静圧 (Pa)
- $p_t$  : 総圧 ( $P + \frac{1}{2}\rho(u^2 + v^2 + w^2)$ )
- $x, y, z$ : 軸, 縦, 横方向座標
- $u, v, w$ :  $x, y, z$ 方向時間平均速度 (m/s)
- $u', v', w'$ :  $x, y, z$ 方向乱流速度変動 (m/s)

文献

- 1) 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), 299.
- 2) N.Bessho, R.Yoda, H.Yamasaki, T.Fujii, T.Noizaki and S.Takatori: Pro. of 6th Int. Iron and Steel Cong., ISIJ, Nagoya, (1990), 340.
- 3) I.Hoshikawa, M.Kimura, Y.Kaiharu, K.Tanikawa, H.Fukumoto and K.Ayata: Pro. of 6th Int. Iron and Steel Cong., ISIJ, Nagoya, (1990), 309.
- 4) H.Tozawa, S.Takeuchi, T.Sakuraya and T.Fujii: Flow Control of Molten Steel in Continuous Casting Mold by Static Magnetic Field, ed. by J.Szekely, J.W.Evans, K.Blazek and N.El-Kaddah, The Minerals, Metals & Materials Society, (1991), 215.
- 5) 横谷真一郎, 浅古 豊, 原 茂太, J.Szekely: 鉄と鋼, 80 (1994), 754.
- 6) 横谷真一郎, R.Westhoff, 浅古 豊, 原 茂太, J.Szekely: 鉄と鋼, 80 (1994), 25.
- 7) J.Herbertson, Q.L.He, P.J.Flint and R.B.Mahapatra: Steelmaking Conference Proceedings, (1991), 171.
- 8) 田中 誠, 藤野伸司, 上原彰夫, 内藤成弘, 木村秀明: 材料とプロセス, 1 (1988), 1264.
- 9) 竹内秀次, 戸澤宏一, 別所永康, 石塚靖彦, 奥田治志: 材料とプロセス, 3 (1990), 1110.
- 10) 丸川雄浄, 笠井宣文, 川崎守夫: 学振19委-No.11104(平成2年5月)
- 11) 鈴木幹雄, 宮原 忍, 北川 融, 石井俊夫, 長棟章生: 学振19委

- No.11105(平成2年5月)
- 12) 丸川雄浄, 笠井宣文, 川崎守夫, 長道常昭, 渡部忠男: 学振19委-No.10977(平成元年2月)
- 13) 河井良彦, 山岡祐一, 鈴木幹男, 村上勝彦: 学振19委在物一流動-25-2 (平成5年6月)
- 14) 笠井宣文, 川崎守夫, 花崎一治, 坂下 努: 材料とプロセス, 3 (1990), 1114.
- 15) 池森亀鶴: 水力学, コロナ社, (1981), 82.
- 16) 浅野 貞, 市川健治, 塚本 昇, 飯田栄司, 森田明広, 井上淳一: 耐火物, 42 (1990), 149.
- 17) 広木伸好, 高橋 明, 南波安利, 塚本 昇, 倉科幸信, 柳川浩洋: Shinagawa Technical Report, 36 (1993), 75.
- 18) 笹井勝浩, 山村英明, 堤 直人, 水上義正, 江阪久雄: 材料とプロセス, 5 (1992), 223.
- 19) B.E.Lauder and D.B.Spalding: Computer Methods Appl. Mech.Eng., 13 (1974), 269.
- 20) FLUENT User's Manual Version 4.2.2, ed. by Fluent Inc., March, 6 (1993)

付録

連続の式および運動量の式は次のように表わされる。ここで添え字 $i(i=1, 2, 3)$ はデカルト座標系 $(x, y, z)$ に対応している。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots (A1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u'_i u'_j) \dots\dots (A2)$$

レイノルズ応力

$$(\rho u'_i u'_j) = \rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \dots\dots\dots (A3)$$

乱れエネルギー $k$ およびエネルギー散逸率 $\epsilon$ の輸送方程式は式(A4), (A5)である。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + Gk - \rho \epsilon \dots\dots (A4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_1 Gk - C_2 \rho \epsilon) \dots\dots (A5)$$

ここで

$$Gk = \mu_t \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \dots\dots\dots (A6)$$

乱流粘性係数および有効粘性係数は式(A7), (A8)である。

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \dots\dots\dots (A7)$$

$$\mu_e = \mu + \mu_t \dots\dots\dots (A8)$$

モデル方程式の経験定数は次の値が用いられる。

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$