

浸漬ノズル内旋回羽根による偏流緩和

横谷 真一郎*・高木 茂男*・工藤 裕一郎*²・佐々木 康*³・井口 学*³

Relaxation of Uneven Velocity through Swirl Blade in Immersion Nozzle

Shinichiro YOKOYA, Shigeo TAKAGI, Yuichirou KUDOU, Yasushi SASAKI and Manabu IGUCHI

Synopsis : The flow pattern of the molten flow in the immersion nozzle have a important effect on the quality of the slab, 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 swirling blade. Numerical and water model studies revealed that rectification was accelerated significantly using the nozzle with the swirl blade, which would lead to the suppression of the vortex generation and turbulence on the meniscus.

Key words : uneven flow; rectification of uneven flow; swirl blade; immersion nozzle; swirl flow.

1. はじめに

連铸鑄片の生産性と品質に対する要求が年々厳しさを増している。最近、浸漬ノズル内流れに旋回を付与することによって著しく、浸漬ノズル吐出口流れ、鑄型内流れ、特にメニスカス流れ等が安定化することが水モデル実験、溶鋼を用いた実機テストや実操業で明らかにされている¹⁻⁹⁾。その結果、浸漬ノズル内に旋回を付与することによって鋼材の生産性と品質の著しい向上が達成された¹⁰⁻¹²⁾。しかしながら、浸漬ノズル内流れは軸対称流れを前提として取り扱っており、スライディングゲートによって浸漬ノズル内に発生する偏流の影響を十分考慮していなかった。従来、浸漬ノズル吐出流量制御装置としてスライディングゲートが用いられている。機構が簡単であるが大きな偏流が発生する結果、モールド内流れの不安定化、メニスカスのパウダー巻き込み、渦の発生等の一因となっていた¹³⁻¹⁵⁾。旋回流ノズルによって吐出流偏流が少なく、安定的流動条件を確保するためには、浸漬ノズル内流れが出来るだけ軸対称流であることが望ましい。したがって、スライディングゲートの下流に旋回羽根を設けることによる軸対称流発達の効果を検討した。

形流路、スライディングゲート (SGと呼称する)、アクリル透明管に設けられたねじり比 (180°ねじりピッチ長さ 30 mm / 内径 40 mm) 3/4のねじりテープ式旋回羽根、アクリル透明管から構成されている。旋回を付与しない場合は、ねじりテープ式旋回羽根を除去して実験を行った。スライディングゲート開度 (SG開度と呼称する) は3種類で、その開度は内径 40 mm 円管断面積の 14%、32%、69%

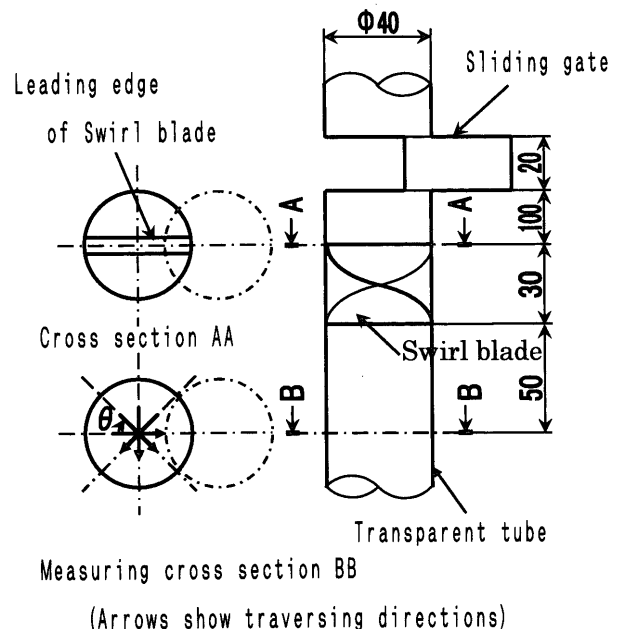


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus used for water model. Flow rate of $1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ and mean axial velocity of 1 m/s in tube.

2. 実験装置とその方法

2.1 実験装置

Fig. 1は実験装置図を示す。実験装置は内径 40 mm の円

平成 15 年 10 月 6 日受付 平成 16 年 3 月 2 日受理 (Received on Oct. 6, 2003; Accepted on Mar. 2, 2004)

* 日本工業大学機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, Nippon Institute of Technology, 4-1 Gakuendai Miyashiro-cho Minami-Saitama-gun Saitama-ken 345-8501)

*² 日本工業大学学生 (Student, Nippon Institute of Technology)

*³ 北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

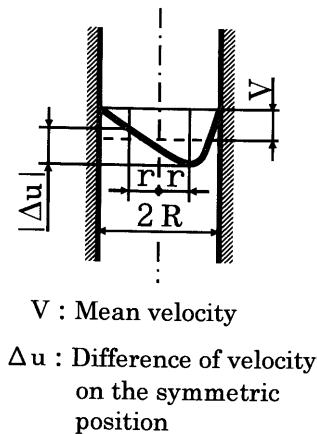


Fig. 2. Uneven velocity defined in this study.

である。

管路系はオーバーフロータンクによって管内流量 $1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ が確保されるようになっている。SG 上流から十分な助走距離を経た一様流（管内軸方向平均流速 1 m/s ）が、ゲート部通過時に大きな偏流を発生する。SG 下流 100 mm の位置 AA 上において旋回羽根を設けない条件で、SG 摺動方向を基準軸として右回り方向の角度 θ を 0° とおき、それから 45° 、 90° 隔たった縦断面における管軸方向速度、周方向速度をレーザー Doppler 流速計を用いて計測した。同様に SG 下流 180 mm の位置 BB において旋回羽根を設けた場合についても、SG 摺動方向を基準軸として右回り方向の角度 θ を 0° とおき、それから 45° 、 90° 隔たった縦断面における管軸方向速度、周方向速度をレーザー Doppler 流速計を用いて計測した。同時に FLUENT Code を用いて数値解析を行った。乱流モデルは RSM モデル (Reynolds stress model) を用いた。

2.2 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。その度合いを表す量として Fig. 2 を参照して、偏流値を次式で定義した。

$$\text{偏流値} = |\Delta u|/V \times 100 (\%) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 Δu は対称位置における速度差、 V は管内軸方向平均流速である。

3. 実験結果と考察

Fig. 3 に、旋回羽根を設けない場合 (a)、設けた場合 (b) について、管軸を通る Fig. 1 の角度 $\theta = 0^\circ$ 、つまり、SG 摺動方向縦断面における軸方向速度分布の概要を示す。(a)、(b) 共に上流からの一様な軸方向流れが SG を通過することによって著しい偏流を発生して、SG 直後の近傍では循環流が存在している。旋回羽根を設けない場合 (a) では、偏流の影響がかなり下流迄及んでいるが、旋回羽根を設けた

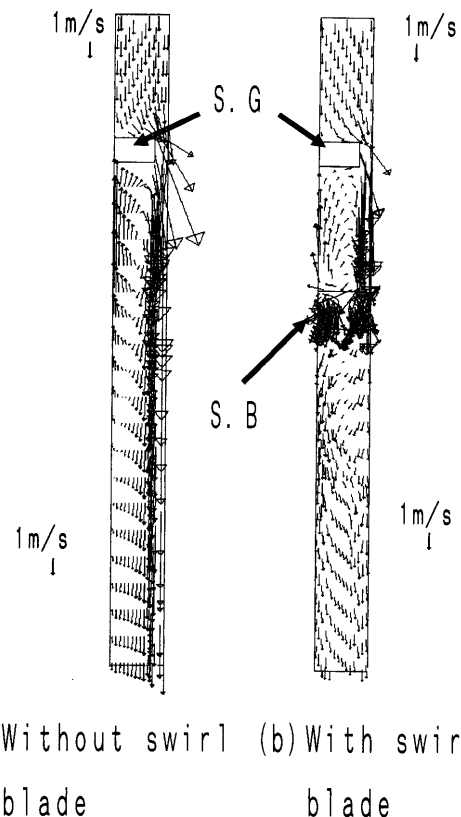


Fig. 3. Flow pattern around sliding gate (SG) and swirl blade (SB). Mean axial velocity of 1 m/s in tube.

場合 (b) では、旋回羽根通過後かなり短い流下距離で著しく偏流が緩和され、一様流に近づいていることが分かる。つまり、SG 下流に旋回羽根を設けることによって、偏流が著しく緩和される傾向にあることが分かった。

3.1 SG 摺動軸に対する方向と管軸方向偏流値

Fig. 4 は SG 開度 14% 、Fig. 5 は SG 開度 32% 、Fig. 6 は開度 69% の状態で、旋回羽根を設けない場合の SG 下流 100 mm の位置 AA、 180 mm の位置 BB における $\theta = 0^\circ$ 、 $\theta = 45^\circ$ 、 $\theta = 90^\circ$ 方向の管軸を通る直径上の軸方向速度分布、および旋回羽根を設けた場合の SG 下流 180 mm の位置 BB における $\theta = 0^\circ$ 、 $\theta = 45^\circ$ 、 $\theta = 90^\circ$ 方向の管軸を通る直径上の軸方向速度分布を示す。旋回羽根を設けない場合、 $\theta = 0^\circ$ つまり、SG 摺動方向縦断面上では著しく大きな偏流値を示し、その値は SG 下流 100 mm の位置 AA の偏流値に比べて、SG 下流 180 mm の位置 BB の偏流値が若干小さくなっているが、大差はない。両者の偏流値は $\theta = 45^\circ$ 、 $\theta = 90^\circ$ と SG 摺動方向縦断面から直角な断面に向かうに従い、系統的に偏流値は減少し、SG 摺動軸と直角な断面では著しく偏流値は減少していることが分かる。それらの偏流値は半径方向において外側に向かい単調増加を示している。つまり、 $\theta = 90^\circ$ 縦断面において、流れは SG 摺動方向縦断面に対してほぼ対称な速度分布を形成する。計算結果はかなり対称な速度分布を示しており、実験結果を再現していると言える。一方、SG 下流に旋回羽根を設けた場合、 $\theta = 0^\circ$ 、

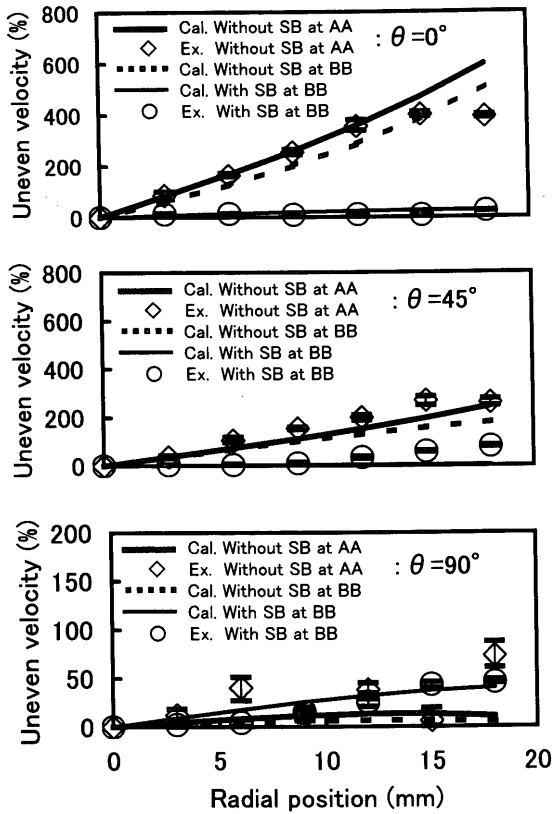


Fig. 4. Uneven velocity vs. radial position at various crossing directions of θ for cases with and without swirling blade, under amount of SG opening of 14%. Mean axial velocity of 1 m/s in tube.

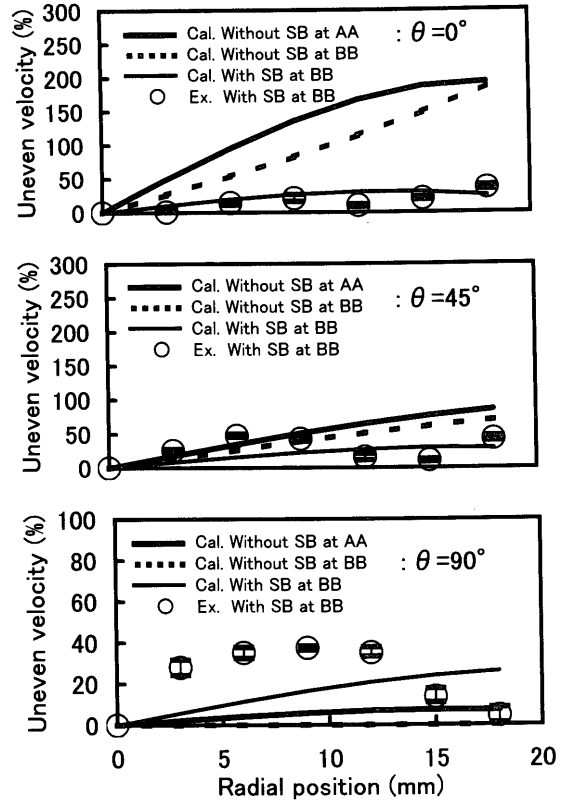


Fig. 6. Uneven velocity vs. radial position at various crossing directions of θ for cases with and without swirling blade, under amount of SG opening of 69%. Mean axial velocity of 1 m/s in tube.

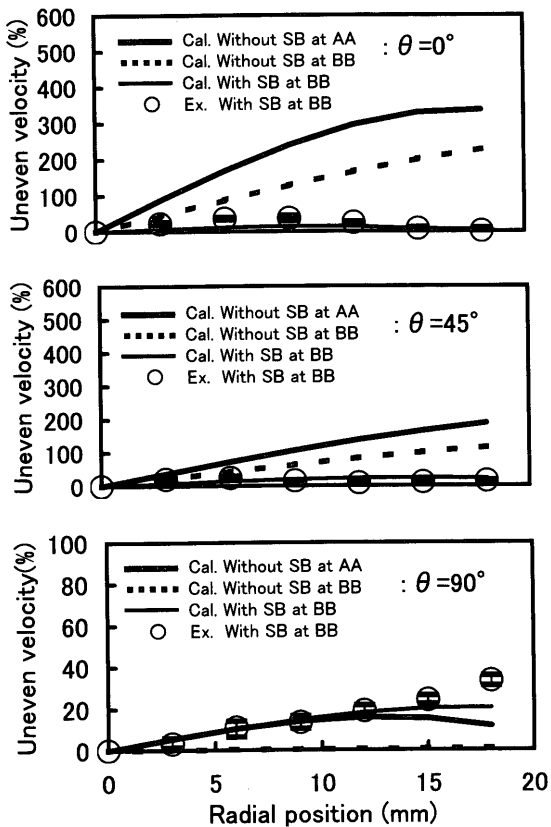


Fig. 5. Uneven velocity vs. radial position at various crossing directions of θ for cases with and without swirling blade, under amount of SG opening of 32%. Mean axial velocity of 1 m/s in tube.

$\theta=45^\circ$ 縦断面において旋回羽根を付与しない場合に比較して顕著に偏流値は減少しているが、 $\theta=90^\circ$ 縦断面においてその傾向が逆転している。これは旋回羽根を付与しない場合は機構上 SG 摺動方向縦断面に対して対称な速度分布を形成するが、旋回羽根を付与した場合には羽根の厚みによる流れの剥離現象、SG に起因する偏流に対する羽根の非対称性による流れの歪等によって、軸対称流れから見ると若干歪んだ流れになるからだとと思われる。数値計算結果は程よく実験結果を再現していると言える。SG 開度を 14% から 32% に増加させると偏流値の減少が見られるが 32% と 69% の間に差は見られない。

Fig. 7 は SG 開度 14%、32%、69% の場合、SG から下流 180mm の位置 BB を基準として、流下距離に対する旋回羽根を設けない場合、設けた場合の最大偏流値を示す。旋回羽根を設けない場合は著しく大きな偏流値を示し、SG 開度の増加とともに偏流値は減少を示し、SG からの流下距離の増大につれて、偏流値は単調減少して、下流では SG 開度 32%、69% の差は小さくなっている。一方、旋回羽根を設けることによって、偏流値は激減して、特に開度 32% 以上では下流における偏流値は微小であり、開度 69% の場合の偏流値との差は見られず、旋回羽根から下流に流下する程偏流値はわずかに減少する傾向にある。

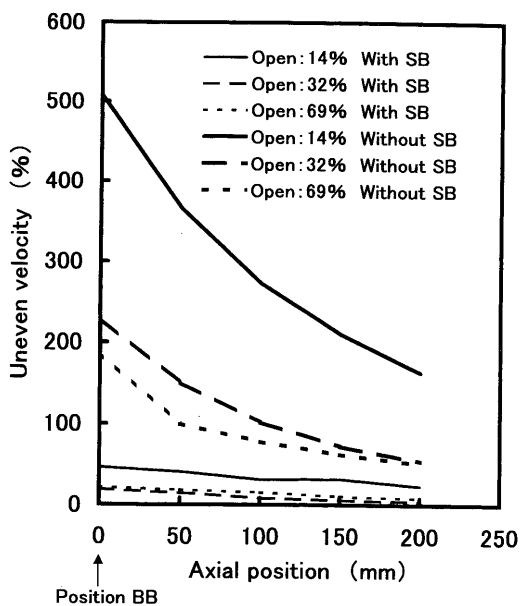


Fig. 7. Uneven velocity vs. axial positions at various amount of opening from 14% to 69% for cases with and without swirl blade. Mean axial velocity of 1 m/s in tube.

3.2 旋回羽根による偏流緩和機構

Fig. 8に旋回羽根による偏流値緩和機構を述べるためのSG摺動方向縦断面 ($\theta=0^\circ$) での旋回羽根による偏流値の発達状況を示す。旋回羽根前方10 mmの位置では偏流値最大900%と大きな偏流値を示す偏流が、旋回羽根中で偏流値を激減させて100%以下つまり、羽根直前の偏流値の10分の1以下に減少し、羽根直後では羽根直前の偏流値の20分の1にまで減少していることが分かる。すなわち、旋回羽根の存在によって流れの軸対称性が著しく促進されていることが分かる。Fig. 9はFig. 8に対応する位置での旋回流の発達状況を示す。偏流が旋回羽根に流入することによって、羽根水平断面の半分は流入直後から管壁に沿う周方向速度ベクトルを形成し始め、羽根出口まででほぼ同心状の旋回流を形成していることが分かる。したがって、羽根内の旋回流形成の過程で、羽根に流入してきた大きな局所的偏流を分散させて、偏流から近似的に軸対称流を形成するものと思われる。

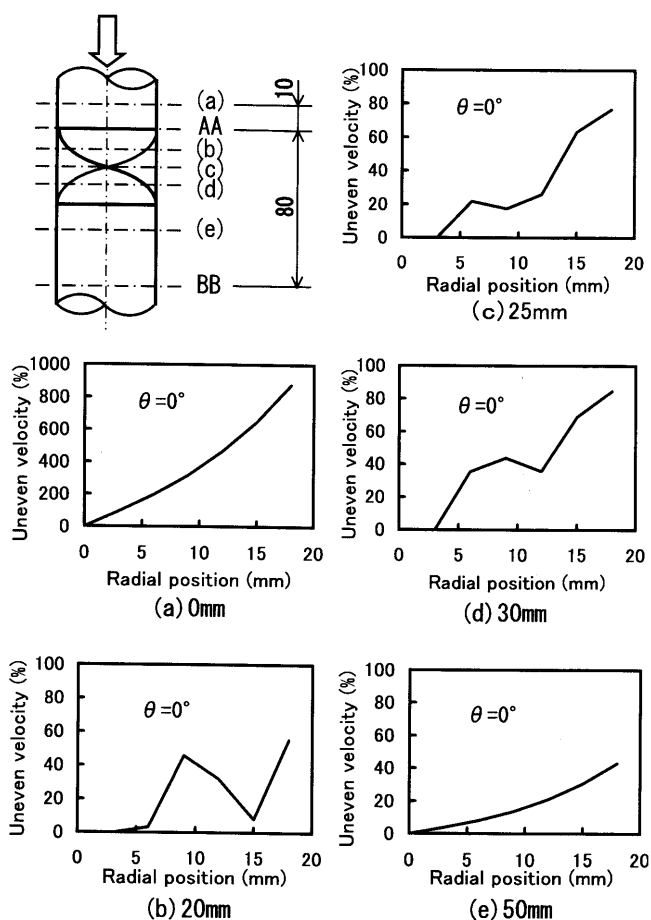


Fig. 8. Developments of uneven velocity around swirling blade from 0 to 50 mm at crossing direction θ of 0° through calculation. Mean axial velocity of 1 m/s in tube.

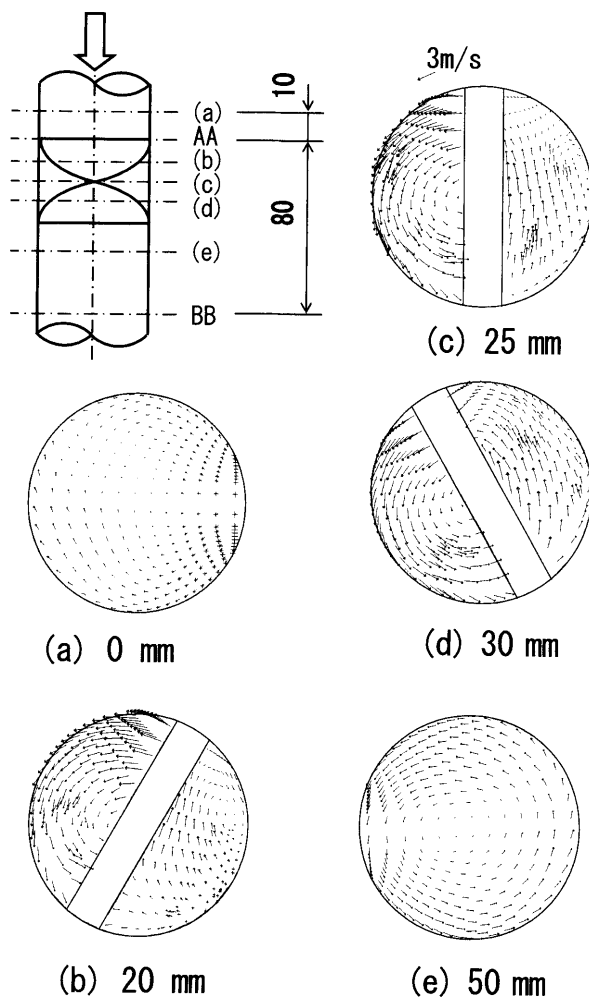


Fig. 9. Developments of velocity field across tube around swirling blade from 0 to 50 mm. Mean axial velocity of 1 m/s in tube.

4. 結論

スライディングゲートによって形成された偏流は、旋回羽根に流入することによって、旋回流を形成する結果、局所的偏流は直ちに羽根断面（管断面）全体に拡散して近似的に軸対称流に近い極めて低い偏流値を有する流れを形成する。その偏流値はスライディングゲート開度が大きい程小さく、旋回羽根から下流に流下する程偏流値は減少する傾向にある。

文 献

- 1) S.Yokoya, Y.Asako, S.Hara and J.Szekely: *ISIJ Int.*, **34** (1994), 883.
- 2) S.Yokoya, Y.Asako, S.Hara and J.Szekely: *ISIJ Int.*, **34** (1994), 889.
- 3) S.Yokoya, S.Takagi, M.Iguchi, Y.Asako, R.Westoff and S.Hara: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 827.
- 4) S.Yokoya, S.Takagi, M.Iguchi, K.Marukawa and S.Hara: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 572.
- 5) S.Yokoya, S.Takagi, M.Iguchi, K.Marukawa, Y.Asako and S.Hara: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 1086.
- 6) S.Yokoya, S.Takagi, M.Iguchi, K.Marukawa and S.Hara: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 578.
- 7) S.Yokoya, S.Takagi, M.Iguchi, K.Marukawa and S.Hara: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 57.
- 8) S.Yokoya, S.Takagi, S.Ootani, M.Iguchi, K.Marukawa and S.Hara: *ISIJ Int.*, **41** (2001), 1208.
- 9) S.Yokoya, S.Takagi, K.Tada, M.Iguchi, K.Marukawa and S.Hara: *ISIJ Int.*, **41** (2001), 1201.
- 10) T.Tsukaguchi, K.Nonobe, S.Yokoya, S.Hara and K.Marukawa: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 165.
- 11) T.Tsukaguchi, T.Watanabe, S.Yokoya, S.Hara, K.Marukawa and K.Nonobe: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 839.
- 12) S.Kosaka, M.Yoshihara, H.Hayashi, K.Iwata, T.Tsukaguchi and S.Yokoya: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 949.
- 13) S.Yokoya, S.Haseo, Y.Asako, S.Takagi, K.Ayata, J.Szekely and S.Hara: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 31.
- 14) J.Herbertson, Q.L.He, P.J.Flint and R.B.Mahapatra: Steel Making Conference Proceedings, Vol. 74, Iron Steel Soc., Washington, (1991), 171.
- 15) N.Kasai, M.Kawasaki, K.Hanasaki and T.Sakasita: *CAMP-ISIJ*, **3** (1990), 1114.