

機械式攪拌による低密度粒子分散特性に及ぼす 浸漬円柱の影響

須川 朋之*・井口 学*²

Effect of Immersion Cylinder on the Dispersion of Low Density Particles by Mechanical Agitation

Tomoyuki SUKAWA and Manabu IGUCHI

Synopsis : Water model experiments were carried out to promote the dispersion of fine particle into a molten steel bath agitated by an impeller. The dispersion was significantly promoted by immersing a circular cylinder at a radial position between the center of the bath and side wall of the vessel. This is because the liquid flow on the bath surface becomes asymmetrical with respect to the center line of the bath in the presence of the cylinder and, as a result, a large scale vortex is formed in the bath.

Key words: steelmaking; refining; desulfurization; mechanical agitation; mixing; fine particle.

1. 緒言

脱硫剤や脱磷剤などの低密度粒子をキャリアガス中に混入させて溶鋼中へ均一分散させることはかなり難しく¹⁻¹³⁾、機械式攪拌によって分散させる方式が再び注目されている¹⁴⁻²⁵⁾。キャリアガスを用いて微粒子を分散させる場合、微粒子と溶鋼との濡れ性が悪いと微粒子にキャリアガスが付着して溶鋼との直接接触を妨げるだけでなく、流動抵抗が増して溶鋼への侵入が阻害される^{26,27)}。一方、機械式攪拌では、攪拌羽根によって溶鋼に遠心力が働き、攪拌羽根直上の溶鋼が側壁の方へ押しやられ、その結果として浴表面が攪拌羽根に向かって降下してくる。微粒子が浴表面に散布されていると、浴表面とともに降下して攪拌羽根と衝突し、浴内に分散される。したがって、機械式攪拌では浴表面が攪拌羽根の位置まで降下しないと微粒子の分散は起こりにくい²⁴⁾。

著者らは、機械式攪拌に関する以前の研究において、攪拌羽根を偏心させると、攪拌羽根の支持棒と浴中心に関する点对称の位置から攪拌羽根に向かう傾斜渦が形成され、この渦によって浴表面に散布した微粒子の浴内分散が促進されることを見出した²⁴⁾。この現象は、中心回転の場合にも何らかの方法で浴表面近傍の流れを非軸対称にしてやれば、攪拌効率の向上が期待できることを示唆している。本研究では溶鋼のモデルとして水を用いたコールドモデル実験を行い、いくつかの可能性について検討した結果、浴表面に円柱を接触させることによって浴表面近傍の流れを変化させると低密度粒子をより効率的に巻き込む可能性があることを見出した。本報では、接触用の円柱の大きさや挿

入深さなどを変えて、粒子が均一に分散するまでの時間を測定した結果について報告する。なお、機械式攪拌に関して、本研究と同じように円柱を浸漬することによって浴内を攪乱し、電磁攪拌を促進する方法が特許として提案されているが²⁸⁾、後で明らかにされるように、著者らの提案する方法は浴表面に円柱を接触させて表面近傍の流れを非軸対称とすることが目的であって、浴内深く円柱を浸漬させて攪乱するのが目的ではなく、本質的に異なっている。事実、浴表面に散布した微粒子の浴内分散は、円柱を浴内へ深く挿入した場合よりも、浴表面近傍に設置したほうが極めて高い。

2. 実験装置と方法

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。攪拌槽には内径 200 mm、高さ 400 mm の透明アクリル製円柱容器を用い、浴深が 300 mm になるようにイオン交換水を満たした。浴内に投入する濡れ性が悪い微小粒子は、塩化ビニリデン・アクリロニトリルコポリマー製であり、その密度は約 40 kg/m³、直径は 30~50 μm である。浴表面には 0.2 g を散布した。攪拌羽根には Fig. 2 のような十字型の攪拌羽根を用い、円柱容器の中心軸上に設置した。攪拌羽根はモーターで回転させた。浸漬用円柱の直径、半径方向設置位置や深さ、および攪拌羽根の挿入深さを変化させて、微粒子の分散の様子をビデオカメラで撮影するとともに、目視による観察も行った。浴表面に散布した微粒子がすべて浴内へ分散することはなく、浮力によって浮上した微粒子は浴表面に一定時間とどまったあと、再び浴内へ分散する。したがって微

平成 15 年 10 月 1 日受付 平成 15 年 12 月 25 日受理 (Received on Oct. 1, 2003; Accepted on Dec. 25, 2003)

* 北海道大学大学院生 (Graduate Student, Hokkaido University)

* 2 北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University, North 13 West 8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

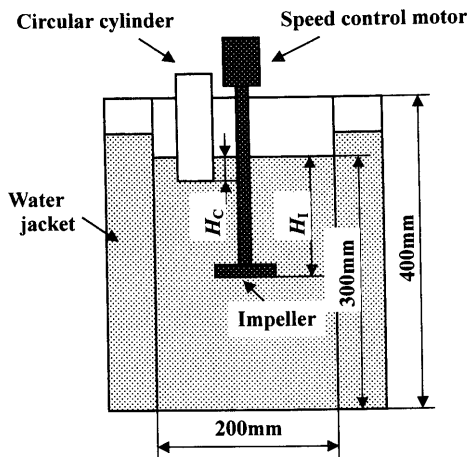


Fig. 1. Experimental apparatus.

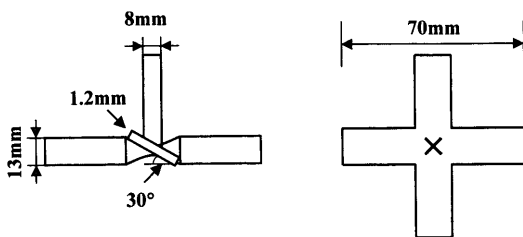


Fig. 2. Details of impeller.

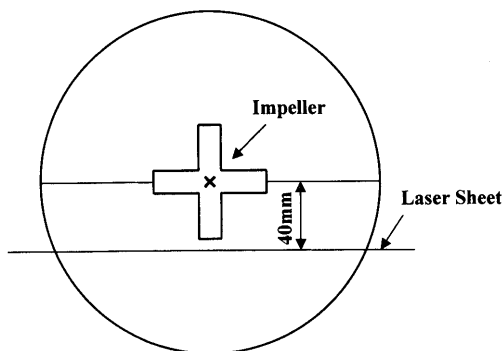


Fig. 3. Laser sheet position.

粒子はある割合で浴表面にとどまっていることになる。浸漬用円柱のない場合には、攪拌羽根の位置まで降下した浴表面にとどまる微粒子が多くあり、浴内に分散される微粒子の割合は浸漬用円柱を用いた場合よりも小さくなる。

過渡時間は、攪拌羽根の回転を開始してから、浴内の微粒子の分散状態が定常状態に達するまでの時間と定義した。したがって、過渡時間は、微粒子の均一分散を意味するものではないことに留意されたい。粒子をほとんど巻き込まなかった場合は分散なしとした。

過渡時間の測定には2種の方法を用いた。一つは浴内全体の微粒子の分散状況に着目して決定する方法であり、ビデオカメラの画像と目視観察によって判定した。他の方法は、浴内の特定の領域に着目する方法であり、粒子画像流速計(PIV)を用いて測定した。Fig. 3のように浴槽にシート

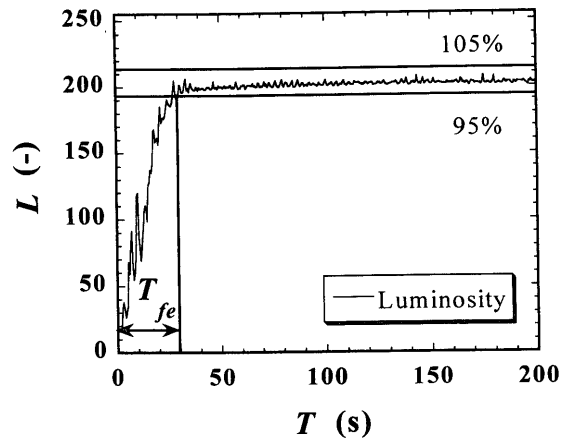


Fig. 4. Change in luminosity with time and definition of flow establishment time.

状のレーザー光を照射して、浴槽の可視化された面をビデオカメラで撮影し、断面内の特定の領域で粒子が均一に分散するまでの時間の測定を行った。PIVでは粒子の輝度分布に着目して速度を求めることができるようになっているが、本研究では輝度そのものが時間とともに変化しなくなるまでの時間を過渡時間として求めた。輝度が0に近づくほど暗く、255に近づくほど明るくなる。Fig. 4の縦軸は輝度、横軸は経過時間を表している。輝度が定常値の上下5%の範囲に納まるまでの時間を過渡時間 T_{fe} と定義し、目視での結果と比較検討した。

3. 結果と考察

3.1 円柱を設置した場合の流れ

浸漬用円柱の有無による微粒子分散の様子の違いをFig. 5に示す。円柱の外径は50 mm、半径方向設置位置は50 mm、攪拌羽根の設置位置は150 mmである。浸漬用円柱を設置しなかったFig. 5(a)の写真では、攪拌羽根支持棒の周りに筒状に微粒子が集まり、羽根に弾かれて分散するが、定常状態になっても多くの微粒子が支持棒周りに集まっており、巻き込み量はわずかである。一方、Fig. 5(b)のように浸漬用円柱を中心から50 mmずらして深さ20 mmの位置に設置した場合、大きなスケールのらせん状の渦が生じ、微粒子はこの渦によって浴内に分散するとともに攪拌羽根に弾かれて分散する。Fig. 5(b)の写真では、Fig. 5(a)に比べて短時間に均一に分散しており、大部分の粒子は巻き込まれている。円柱がある場合の様子を模式図であらわすとFig. 6ようになる。このような大きなスケールの渦の発生は、円柱の下方に形成されるTaylor-Proudmanの柱の崩壊に関連していると考えられるが²⁹⁾、その詳細については今後の課題としたい。

浸漬用円柱を設置したときとしないときの流れをPIVを用いて測定した結果をFig. 7に示す。浸漬用円柱を設置した場合、攪拌羽根によって生まれた下向きの渦の他に渦が

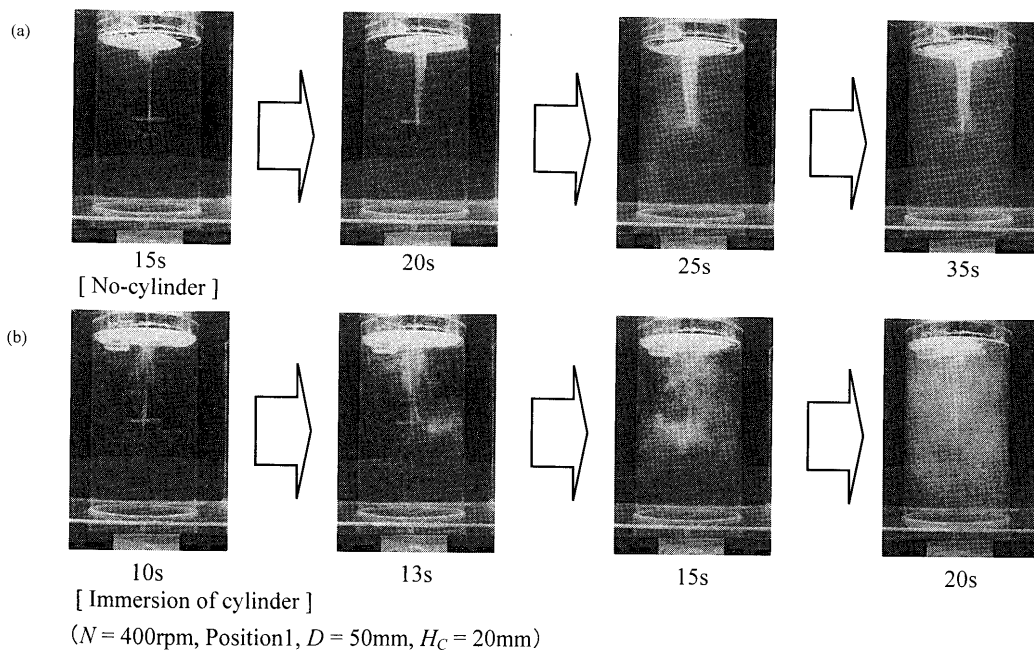


Fig. 5. Photographs of particle dispersion.

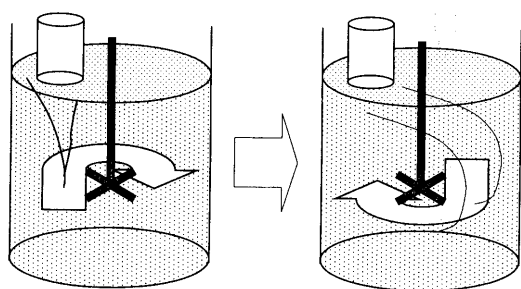


Fig. 6. Schematic illustration of vortex motion.

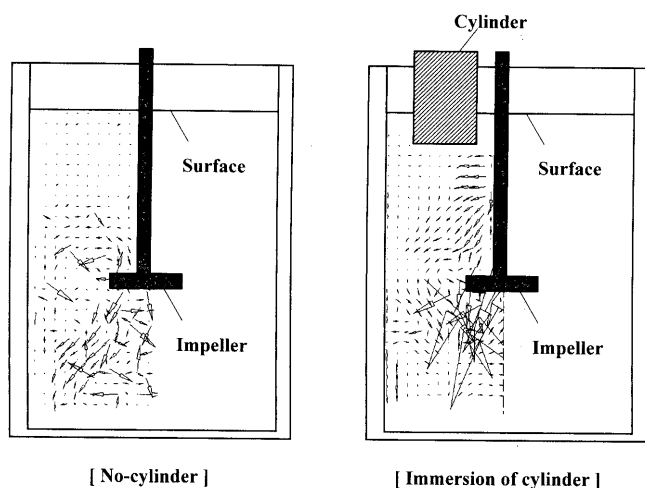


Fig. 7. Velocity vectors in the presence of spiral vortex.

できていることを目視だけでなく、定量的に測定することができた。

3.2 浸漬用円柱浸漬深さの過渡時間への影響

浸漬用円柱の浸漬深さの影響を Fig. 8 に示す。円柱の外径は 50 mm、半径方向設置位置は 50 mm、攪拌羽根の設置

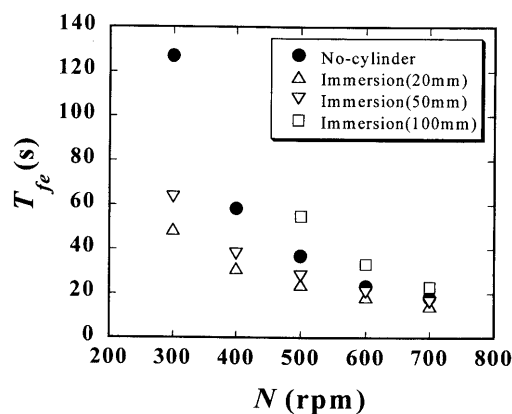


Fig. 8. Effect of immersion depth of circular cylinder on flow establishment time.

位置は 150 mm である。その結果、浸漬深さが小さいほうが早く分散した。これは、浸漬深さを大きくした場合、円柱が流れを阻害してしまう効果が、円柱が液面で粒子をらせん状に巻き込む効果を上回ってしまうためであると思われる。なお、円柱浸漬深さ 100 mm、攪拌羽根の回転速度 300, 400 rpm のときは分散なしとなった。以降の図においても測定値がプロットされていないのは分散なしとなった場合である。また、浸漬深さ 100 mm よりも大きい場合についても測定を行ったが、Fig. 8 と同じように、浸漬深さが深くなればなるほど分散に要する時間は長くなり、したがって攪拌効率は悪くなった。

3.3 浸漬用円柱の半径方向設置位置の過渡時間への影響

Fig. 9 に示すように、浸漬用円柱を半径方向の 3 箇所に設置した。浸漬用円柱の直径は 50 mm、浸漬深さは 20 mm、攪拌羽根の設置位置は 150 mm である。実験結果を Fig. 10 に示す。その結果、浴中心と側壁との中間位置よりも少し

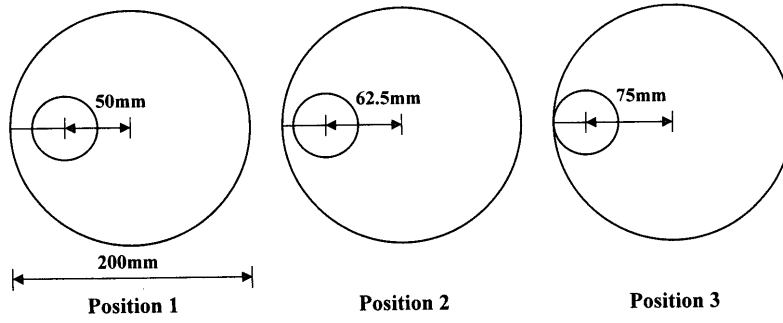


Fig. 9. Radial position of circular cylinder.

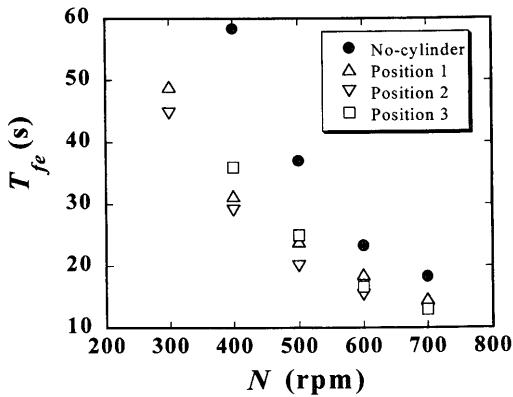


Fig. 10. Effect of cylinder position on flow establishment time (visual observation).

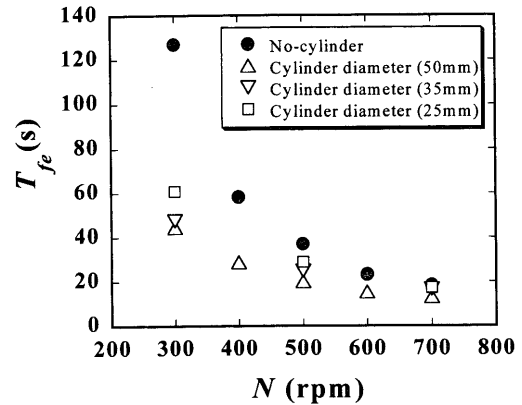


Fig. 12. Effect of cylinder diameter on flow establishment time.

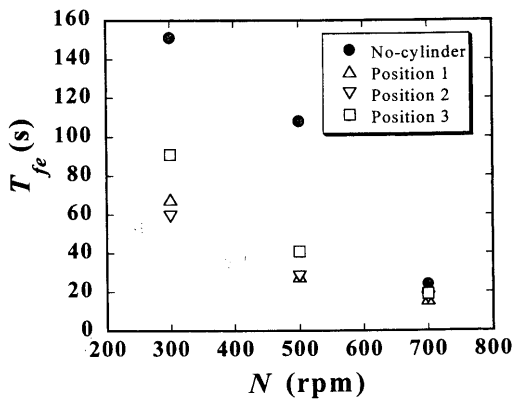


Fig. 11. Effect of cylinder position on flow establishment time (PIV method).

外側に円柱を設置した Position 2 のときに、攪拌効率が最もよくなることがわかった。円柱を壁に接触するように設置した場合には、円柱と容器の間の浴表面に粒子が集まってしまい、分散が阻害されたために分散効率が落ちたと考えられる。過渡時間の測定に際して本実験で用いられた二つの方法による測定値がどの程度一致するのかを次に述べる。PIVを用いた過渡時間の測定結果を Fig.11 に示す。Fig.10 のビデオカメラと目視の結果と比較すると、浸漬用円柱がない場合では、ビデオカメラと目視による場合よりも過渡時間が長くなっているが、浸漬用円柱がある場合には、目視とほぼ同じ結果が得られている。浸漬用円柱がな

い場合に過渡時間が長くなる理由として次のことが考えられる。Fig. 5(a) の写真のように浸漬用円柱がない場合には、中心に粒子が集まってしまい、その粒子が周りに少しずつ分散されていくので目視より過渡時間が長くなっているものと思われる。しかし、浸漬用円柱を設置した場合には、Fig.5 (a) のように中心に粒子が集まってしまわずに全体にほぼ均一に粒子が分散するために二つの方法にほとんど差が見られなかったと考えられる。

3.4 浸漬用円柱外径の過渡時間への影響

浸漬用円柱外径の影響を Fig.12 に示す。浸漬用円柱の半径方向設置位置は 50 mm、浸漬深さは 20 mm、攪拌羽根設置位置は 150 mm である。外径 50 mm の浸漬用円柱が最も早い分散を見せた。したがって本実験の範囲では、円柱の外径は大きいほうが良い分散を見せることがわかった。ただし、過渡時間の差は小さいので経済的に考えれば、小さい浸漬用円柱を用いる方が実用的である。

3.5 攪拌羽根の設置位置の過渡時間への影響

攪拌羽根の設置位置の影響を Fig.13 に示す。浸漬用円柱の直径は 50 mm、半径方向設置位置は 50 mm、浸漬深さは 20 mm である。設置位置が 150 mm と 100 mm のときはほとんど差がないが、200 mm のときは大きなスケールのらせん状渦ができにくく、そのために分散にかかる時間が長くなったと思われる。

浸漬用円柱の浸漬深さや半径方向設置位置を替えて実験

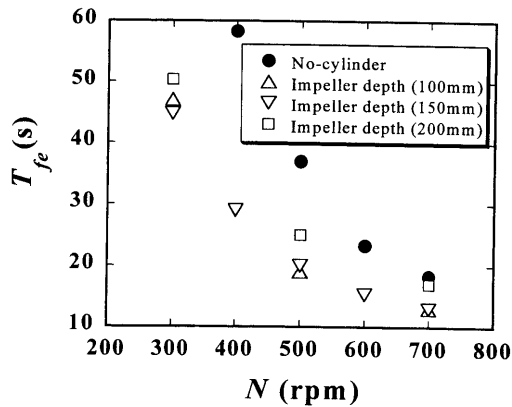


Fig. 13. Effect of impeller position on flow establishment time.

してみたところ、やはり上記と同じ結果が得られた。したがって、攪拌羽根の設置位置は浴の中央よりも上に設置すれば良いと考えられる。本実験の場合はアスペクト比で表すと、 H_f/D が0.5~0.70にあるときに良い結果が得られている。ただし、本論文では容器径 D は1種類、浴深も1種類なので今後、これらの影響について調査したい。

4. 結論

浸漬用の円柱を用いることによって攪拌効率を飛躍的に上げることが可能であることがわかった。具体的には次のような条件下において最も高い攪拌効率を得られる。

- (1) 浸漬円柱の浸漬深さはできるだけ小さくする。
- (2) 浸漬円柱の半径方向設置位置は浴中心と容器壁との中間位置よりも少し外側とする。
- (3) 攪拌効率の浸漬円柱外径への依存性は強くないので、実用上はできるだけ小さなもののほうが良い。
- (4) 攪拌羽根の設置位置はアスペクト比にして0.50から0.70の範囲とする。

記号

- D : 円柱容器内径 (mm)
 H_C : 円柱浸漬深さ (mm)
 H_f : 攪拌羽根設置位置 (浴表面から測る) (mm)

- N : 攪拌羽根回転速度 (rpm)
 T_{fe} : 過渡時間 (s)
 T : 経過時間 (s)

文献

- 1) T.A. Engh, H. Sandberg, A. Hultkvist and L.G. Norber: *Scand. J. Metall.*, **1** (1972), 103.
- 2) K. Nakanishi, A. Ejima, T. Suzuki and H. Sudo: *Tetsu-to-Hagané*, **64** (1978), 1323.
- 3) T.A. Engh, K.L. Larsen and K. Venas: *Ironmaking Steelmaking*, **6** (1979), 268.
- 4) K. Mori and M. Sano: *Tetsu-to-Hagané*, **67** (1981), 672.
- 5) Y. Ozawa, K. Suzuki and K. Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **69** (1983), 753.
- 6) E. Kimura: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **23** (1983), 522.
- 7) G.A. Irons and B.H. Tu: *Proc. Scaninject III, Part 1, MEFOS, Lulea*, (1983), 11.
- 8) K. Narita, T. Makino, H. Matsumoto and K. Ogawa: *Tetsu-to-Hagané*, **69** (1983), 392.
- 9) K. Mori and M. Sano and Y. Ozawa: *Tetsu-to-Hagané*, **69** (1983), 1714.
- 10) H. Itaya, M. Araya, K. Nakanishi and T. Hukutake: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), S849.
- 11) K. Marukawa, M. Anezaki, T. Yamamoto and N. Aoki: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), S850.
- 12) K. Ogawa and H. Matsumoto: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 80.
- 13) 織田 剛, 三宅俊也, 井上 健, 星川郁生: 精錬・凝固プロセスの効率化への革新的技術提案, 日本鉄鋼協会, 東京, (2002), 65.
- 14) K. Nakanishi, N. Bessyo, S. Takada, A. Eshima, M. Kuga, J. Katsuki and M. Kawana: *Tetsu-to-Hagané*, **64** (1978), 1528.
- 15) N. Kurokawa, H. Jouguchi, H. Sugimoto and M. Kataoka: *CAMP-ISIJ*, **4** (1991), 1149.
- 16) N. Kurokawa, S. Matsuo, H. Jouguchi, K. Yamada and Y. Watanabe: *Sumitomo Met.*, **45** (1993), 52.
- 17) S. Kawaguchi, S. Taniguchi and A. Kikuchi: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 230.
- 18) K. Sakai, H. Yamahaba and M. Furusawa: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 787.
- 19) T. Takaoka, Y. Kikuchi and K. Yamada: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 765.
- 20) T. Wada, S. Taniguchi and A. Kikuchi: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 198.
- 21) T. Takaoka, Y. Kikuchi and K. Yamada: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 141.
- 22) Y. Kawai, T. Takaoka, Y. Kikuchi and K. Yamada: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 132.
- 23) S. Wakamatsu, S. Akai, H. Tanaka, S. Kohira, A. Watanabe and K. Kawashima: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 735.
- 24) T. Nomura and M. Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 1.
- 25) S. Shimasaki, T. Wada and S. Taniguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), 637.
- 26) Y. Mizuno and M. Iguchi: *ISIJ Int.*, **41** (2001), S56.
- 27) N. Sonoyama and M. Iguchi: *Metall. Mater. Trans. B*, **32B** (2002), 155.
- 28) 小川雄司, 藤 健彦: 特開平5-287398, (1993).
- 29) H.P. Greenspan: *The theory of rotating fluids*, Cambridge University Press, Cambridge, (1980), 2.