

凝固シェル近傍での 介在物挙動に与える溶鋼流動の影響

岡澤 健介*・清瀬 明人*・沢田 郁夫*・藤 健彦*²・竹内 栄一*²

Influence of Molten Steel Flow on Inclusion Behavior near the Solidification Shell

Kensuke OKAZAWA, Akihito KIYOSE, Ikuo SAWADA, Takehiko TOH and Eiichi TAKEUCHI

Synopsis : In in-mold electromagnetic stirring (EMS), horizontal flow is generated by Lorenz force so that non-metallic inclusion entrapment is avoided. Though the effect of EMS is popular by many reports, there are few studies about the behavior of non-metallic inclusions near solidified shell under horizontal flow. In this study, a model experiment using water and particles made of ion-exchange resin is performed to analyze relations between behavior of non-metallic inclusions near solidified shell and horizontal fluid. As a result of the model experiment, it is cleared that the main factor avoiding non-metallic inclusion entrapment is the force given by the horizontal flow and that influence of Saffman force can be negligible.

Key words : non-metallic inclusion entrapment ; in-mold electromagnetic stirring ; model experiment ; solidified shell.

1. 緒言

連続鋳造プロセスにおいて、溶鋼中に存在する非金属介在物の凝固シェルへの捕捉頻度を低減することは、鋳片品質を向上させるうえで大変重要な課題である。鋳片表層での非金属介在物については、凝固シェル近傍の溶鋼流速を増加させることで凝固シェルへの捕捉頻度を減らす試みがなされている。特に、電磁力を利用して溶鋼を加速する鋳型内電磁攪拌(以後、EMSと記述する)は、表層介在物の凝固シェルへの捕捉数を著しく低減し、鋳片の品質を向上させることが報告されている^{1,2)}。

こうした中、非金属介在物の凝固シェル近傍での挙動についての基礎研究も進められている。粒子の凝固界面への付着を扱った研究^{3,4)}や、凝固界面近傍での粒子の運動を扱った研究^{5,6)}などが挙げられる。特に、凝固界面付近の流体の速度勾配により発生する揚力は、溶鋼中の非金属介在物に大きな影響を与えられている⁷⁾。揚力には粒子回転による力⁷⁾と流体の慣性による力⁸⁾(以後、サフマン力と記述する)とがあり、特に後者のサフマン力の影響は大きい。溶鋼に比べ非金属介在物の密度は小さいので、凝固界面近傍において溶鋼流が上昇するとき、凝固界面の方向にサフマン力が働き、溶鋼流が下降するとき、凝固界面と反対の向きに、サフマン力が働く⁹⁾。EMSのように水平方向に流動攪拌するときは、乱流により溶鋼流と非金属介在物に相対速

度が生じたときに限り、凝固界面近傍における非金属介在物にサフマン力が作用する。このことを物理的に同等な系で置き換えて言うならば、液体と粒子の間に密度差がなく、凝固界面近傍において如何なる向き(上昇、下降、水平)に流動付与しても、粒子には流体との相対速度が生じたときのみサフマン力が作用し、密度差のある上昇・下降する流体中での粒子のように、常にサフマン力が作用することがない。そして、このときの凝固界面近傍における粒子挙動、特に凝固界面への捕捉と流れの関係についての現象支配因子やサフマン力の影響に関する詳細な研究はまだない。

本報告では、流れを付与しつつ水を凝固させ、水中に浮遊させた水とほぼ等しい密度の粒子を観察することにより、凝固シェル近傍での非金属介在物挙動を予測し、特にEMSなどの技術に見られる水平流れを付与したときの、非金属介在物の凝固シェルへの捕捉に与える流れの影響を解明する。

2. 実験概要

2・1 実験方法

3面がアクリル製で1面が銅製の容器に水を入れる(Fig. 1参照)。銅板の裏側は銅製の容器になっており、冷却剤(ドライアイス)を入れる。冷却剤により水は銅板に面した部分より一方向に凝固する。また、スターラーを回転させるこ

平成8年2月13日受付 平成8年5月13日受理 (Received on Feb. 13, 1996; Accepted on May 13, 1996)

* 新日本製鐵(株)先端技術研究所 (Advanced Technology Research Laboratories, Nippon Steel Cop., 1618 Ida Nakahara-ku Kawasaki 211)

* 2 新日本製鐵(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

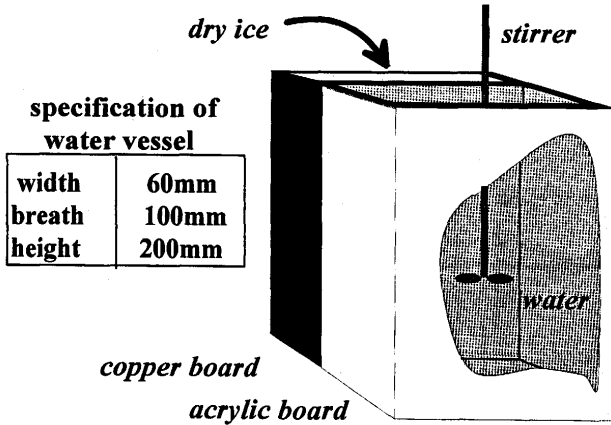


Fig. 1. Experimental apparatus.

Table 1. Particle quantities.

material density	ion-exchange resin
size	1010 (Kg/m ³)
	less than 6x10 ⁻⁴ (m)

Table 2. Experimental conditions.

solidification time	20 (min)
water volume	1.2x10 ⁻³ (m ³)
total volume of particles	6.0x10 ⁻⁵ (m ³)

とによって水を攪拌した。水にはあらかじめイオン交換樹脂製の粒子 (Table 1 参照) を入れておき、この粒子の挙動をマイクロスコープで50倍に拡大しビデオ撮影した。さらに、凝固時間、水量などが特定の条件 (Table 2) のもとで、スターラーの回転数を変えて、氷に取り込まれるトレーサーの量や粒子径の分布などを調べた。このとき、水を使用しているため凝固はプラナーであった。また、凝固速度は各ケースで異なるが、いずれも1.0~1.25mm/minの範囲内であった。

2・2 鋳型内流れと実験系の関係

ある瞬間の凝固界面近傍の流速分布をFig. 2に示した。攪拌強度が70V, 100Vのときについてビデオ1コマでの粒子の移動距離を測って流速を求めた。また、Fig. 2中の粘性底層厚み δ は

$$\delta = \frac{\nu}{u} \quad \dots \dots \dots (1)$$

を使って評価した。ただし、 ν は動粘性係数、 u はバルク流速を示す。実際の鋳型内における溶鋼流速は数十cm/sであるので、実験の流速は1オーダー小さい。このことから、溶鋼と水の動粘性係数を等しいとすると実験での速度境界層 (粘性底層) 厚みは、鋳型内の溶鋼中での速度境界層厚みよりも1オーダー大きいことになる。速度境界層厚みと粒

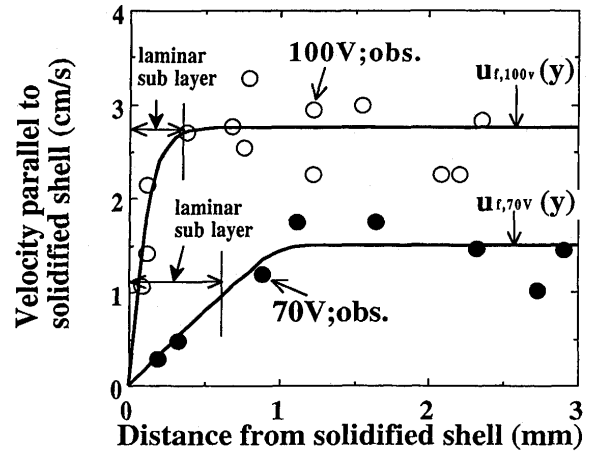


Fig. 2. Flow velocity near solidified shell.

子径の比を、鋳型内と実験とで一致させて考えると、実験での径0~600 μ mの粒子 (Table 1) は、1オーダー小さい径0~60 μ mの非金属介在物をシミュレートしていることになる。

2・3 粒子と流体の密度差の影響

粒子は水とほぼ等しい密度の材質を選定したが、実験の厳密性を追求するために、ごくわずかな密度差の影響を評価する。

粒子と流体の密度差に起因する粒子の浮上速度 u_{pr} は、以下に示すストークス浮上式より評価することができる。

$$u_{pr} = \frac{(\rho_p - \rho_f) d^2 g}{18\mu} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 ρ_p は粒子の密度、 ρ_f は流体の密度、 d は粒子の直径、 g は重力定数、 μ は粘性定数を示す。(2)に $\rho_p = 1.01 \times 10^3$ (kg/m³)、 $\rho_f = 1.00 \times 10^3$ (kg/m³)、 $d = 3 \times 10^{-5}$ (m)、 $g = 9.8$ (m/s²)、 $\mu = 1.8 \times 10^{-3}$ (kg \times m⁻¹ \times s) を代入すると浮上速度は 2.9×10^{-4} (m/s)となる。さらに、粒子のサフマン力による速度 u_{ps} は

$$u_{ps} = \frac{6.46}{12\pi} d \left[\frac{\rho_f}{\mu} \frac{du_r}{dy} \right]^{1/2} u_{pr} \quad \dots \dots \dots (3)$$

で表される。ただし、 y は凝固界面からの距離、 u_r は凝固界面に平行な流速をそれぞれに示していて、Fig. 2に示すように u_r は y の関数である。すなわち、

$$u_r = u_r(y) \quad \dots \dots \dots (4)$$

と表される。また、攪拌強度が100Vのときの流速勾配をFig. 2の $u_{r,100v}$ で近似すると

$$\frac{du_r}{dy} = 167 \text{ [1/s]} \quad \dots \dots \dots (5)$$

となる。(5)と(2)で使用したその他の各値を(3)に代入すると、粒子のサフマン力による速度は 1.4×10^{-4} (m/s)となる。Fig. 2の凝固界面近傍の水の速度と比較すると粒子の浮上速度とサフマン力による速度は非常に微小であり、実

験では水と粒子の密度差に起因する粒子挙動はないと考える。

3. 実験結果と考察

3.1 粒子捕捉数に与える流速の影響

Fig. 3は、スターラー攪拌強度増加に伴う、凝固界面に取り込まれた粒子数の変化を示している。Fig. 3より凝固界面に取り込まれる粒子数は、攪拌強度が一定値(臨界攪拌値)を超えると激減することがわかる。この傾向は、Fig. 4に示した鋼の連続製造プロセスにおける溶鋼流速と非金属介在物の凝固シェルへの捕捉数の傾向を良く再現している。

3.2 流速増加による粒子捕捉頻度低減効果の現象支配因子

Fig. 5より、凝固界面への粒子の捕捉数は、水に対する粒子の総体積の割合にほぼ比例して増加することがわかる。このことは、粒子同士の衝突あるいは相互作用が粒子の凝固界面への捕捉へ与える影響が少ないことを示している。

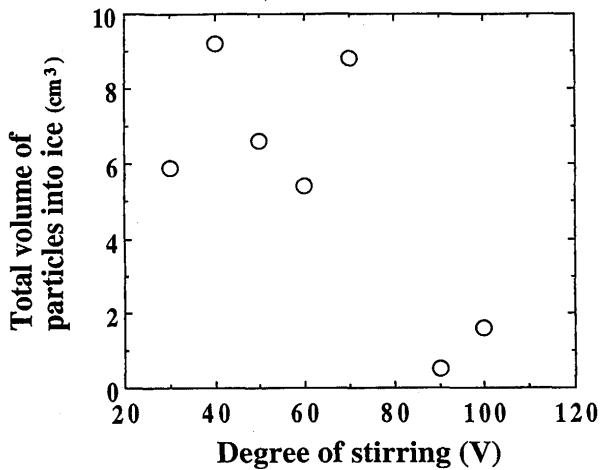


Fig. 3. Relation between stirring and number of particles into ice.

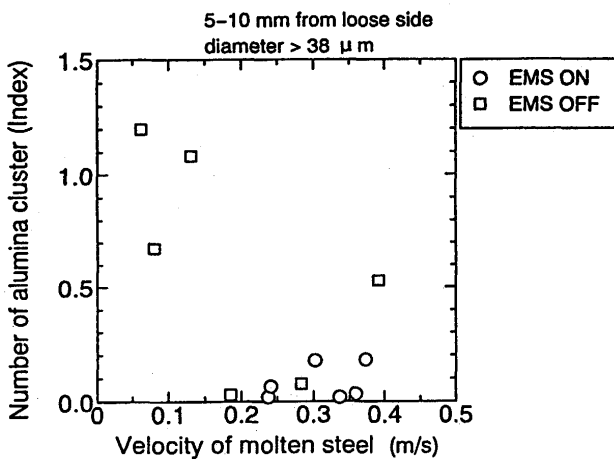


Fig. 4. Relation between molten steel velocity and number of inclusions into slab.

以下の考察では、粒子同士の衝突を無視する。

Fig. 6には、粒子が凝固界面に良く捕捉される場合の代表例として、攪拌強度70Vの場合の粒子の軌跡の一例を、Fig. 7には、粒子が捕捉されにくい場合の代表例として、攪拌強度が100Vの場合の粒子の軌跡の一例を、それぞれ示した。

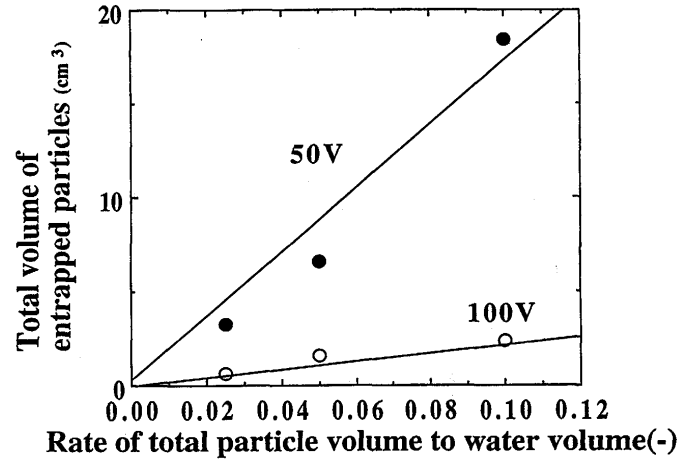


Fig. 5. Influence of total particle rate to water volume on particle entrapment.

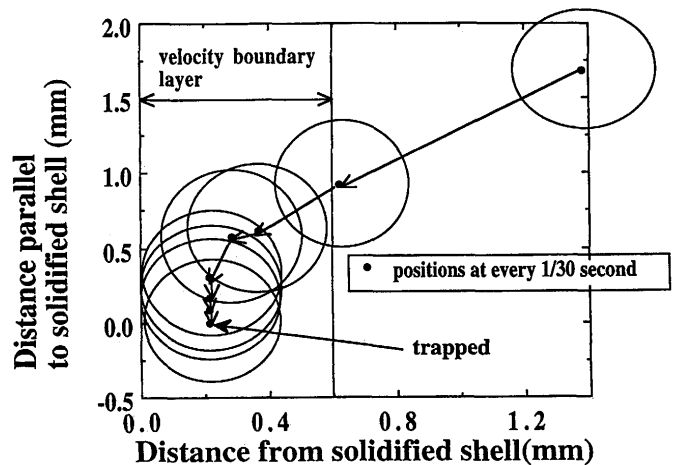


Fig. 6. Trajectory of particle in 70V.

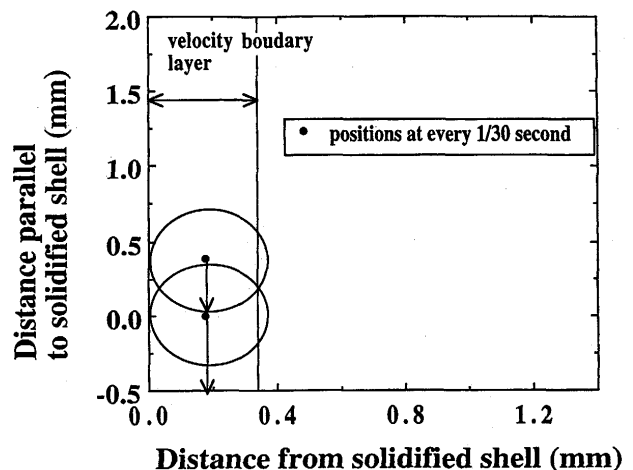


Fig. 7. Trajectory of particle in 100V.

また、それぞれの流速はFig. 2に示してある。Fig. 6とFig. 2より流速が小さいと速度境界層は厚く、粒子は速度境界層内に侵入し、失速して凝固界面に捕捉されることがわかる。一方Fig. 7とFig. 2より、流速が大きいと速度境界層は薄く粒子は界面近傍でも界面に平行な乱流域流れから力を受けるので、失速することなく、移動することがわかる。すなわち、粒子の凝固界面への捕捉を防止するのは、流速によりある一定値(付着しない限界力 F_b)を超える抵抗力が粒子に付与されるからである。このとき、凝固界面近傍の粒子に流動が与える抵抗力は F_f は、粒子径 d と界面に平行な流速 u_f の関数となり

$$F_f = F_f(d, u_f) \dots\dots\dots (6)$$

と表せられ、粒子が凝固界面に捕捉されない条件は

$$F_b < F_f(d, u_f) \dots\dots\dots (7)$$

である。前述のごとく、凝固界面に平行な流速成分は界面からの距離の関数であり、攪拌強度が70V, 100Vのそれぞれについて

$$u_{f,70v} = u_{f,70v}(y) \dots\dots\dots (8)$$

$$u_{f,100v} = u_{f,100v}(y) \dots\dots\dots (9)$$

と近似すると(Fig. 2),それぞれの攪拌強度での凝固界面近傍の粒子に流動が与える抵抗力 F_f は

$$F_{f,70v} = 3 \pi \mu d \times u_{f,70v} \left(\frac{d}{2}\right) \dots\dots\dots (10)$$

$$F_{f,100v} = 3 \pi \mu d \times u_{f,100v} \left(\frac{d}{2}\right) \dots\dots\dots (11)$$

でストークスの法則より近似できる。(10), (11)を粒子径 d を横軸にグラフ化したのがFig. 8である。Fig. 8より、粒子径が大きいほど粒子に流動が与える抵抗力 F_f は大きい。Fig. 9には、攪拌強度70V, 100Vでの水に取り込まれた粒子の粒径分布と、凝固初期の水中の粒径分布を示した。Fig. 9より、水中の粒径分布に比べ、攪拌強度70V(粒子の水への捕捉頻度が高い場合)での水に取り込まれた粒子の粒径分布には大きな変化がないのに比べ、攪拌強度100V(粒子の水への捕捉頻度が少ない場合)は小さい粒子の割合が大きいたことがわかる。このことは、粒子径が大きいほど捕捉頻度が少ないことを示している。

さらにFig. 9では、水中の粒径分布と攪拌強度70Vでの水中の粒径分布はほとんど等しいものの、粒子径0.1mmでは攪拌強度70Vの方の粒径分布は若干多く、0.4mm以上では若干少ない。このことは、攪拌強度70Vでは0.4mm以上の粒子径の捕捉がわずかながら阻止されているためであり、粒子径0.4mmの近傍で

$$F_b = F_{f,70v} \dots\dots\dots (12)$$

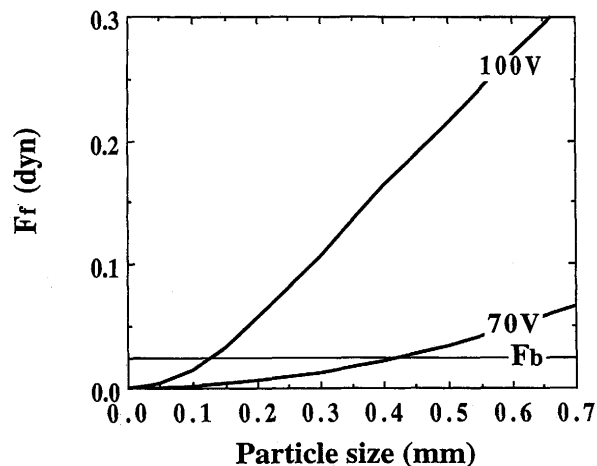


Fig. 8. Force given by flow.

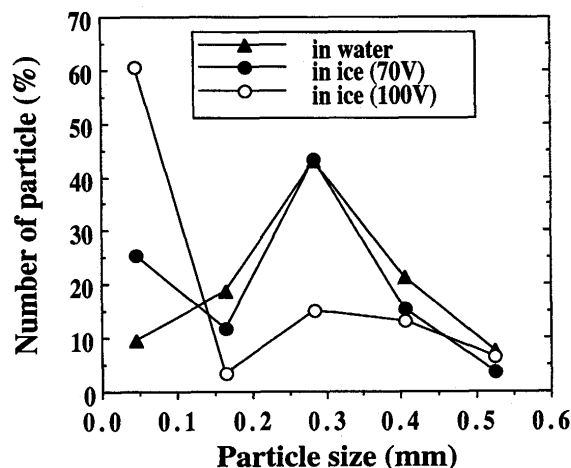


Fig. 9. Distribution of particle size.

となることを示唆している。このことから、 F_b はFig. 8に示したように表され、 F_b と $F_{f,100v}$ は0.1mmと0.2mmの間で等しくなる。このことは、攪拌強度100Vでは粒子径0.1mm以下は捕捉され0.2mm以上では捕捉されないことを示しており、Fig. 9の攪拌強度100Vでの水中の粒子径分布が定量的に説明できる。すなわち、流速増加に伴う粒子の凝固界面への付着を防止しているのは、凝固界面に平行な流れが粒子に与える抵抗力であることが定量的に証明された。

以上のことから、鋳型内容鋼に水平方向流を付与したときにおいても、非金属介在物の凝固シェルへの捕捉頻度を低減させている主な因子は、凝固界面に平行な溶鋼流の非金属介在物に及ぼす抵抗力であると推定できる。

3.3 サフマン力の影響

凝固界面付近の粒子には前述した力以外に、乱流により生じた粒子と流体の相対速度 δu に起因するサフマン力が作用する可能性がある。サフマン力は

$$F_s = \frac{6.46}{4} d^2 \left[\mu_f \rho_f \frac{du_f}{dy} \right]^{\frac{1}{2}} \delta u \dots\dots\dots (13)$$

で表される。 δu の見積もり方によりサフマン力のオーダー

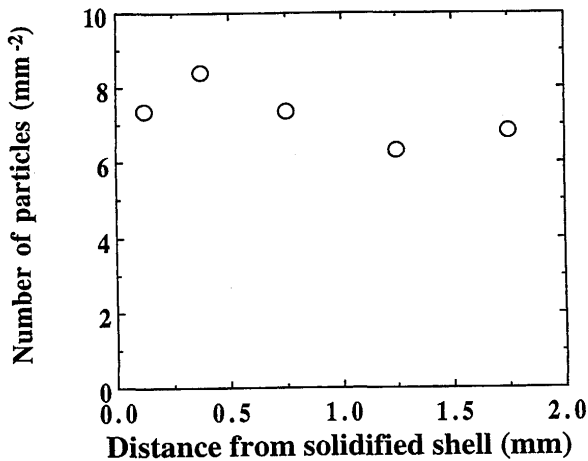


Fig. 10. Distribution of particles near solidified shell.

評価は大きく異なる。粒子の捕捉頻度が少なかった攪拌強度100Vの場合において、サフマン力を最大に見積もるために、 δu が凝固界面に平行な乱流域流速成分(0.0275(cm/s))に等しいとするならば

$$F_s = 7.68d^2 \text{ (dyn)} \quad \dots\dots\dots (14)$$

となる。(14)より粒子径が0.5mmのとき F_s は0.0192dynとなる。サフマン力はFig. 8に示した凝固界面に平行な流れが粒子に与える力 $F_{f,100V}$ よりも小さい。さらに、サフマン力が凝固界面付近の速度勾配が大きい領域で、多くの粒子に作用しているならば、粒子は凝固界面から離れた向きに移動するので、凝固界面近傍で粒子数の少ない層が存在する可能性がある。しかし、本実験ではFig.10に示すように、粒子数の少ない層は認められなかった。これらのことから、サフマン力が常に粒子に作用し、凝固シェルから離れた方向に粒子を移動させることはない。ただし、ほぼ界面に沿って移動する粒子は、Fig.11に示すように、界面から離される現象が幾つか観察された。これは、粒子が界面より摩擦を受け減速したために生じた粒子と流体の速度差によるサフマン力が作用したためと推定する。

以上のことから、鋳型内溶鋼中の水平方向流れを付与した凝固シェル前面においてサフマン力による非金属介在物の捕捉低減効果は少ないものの、凝固界面にほぼ接触している粒子を若干内部へ移動させることがわかった。

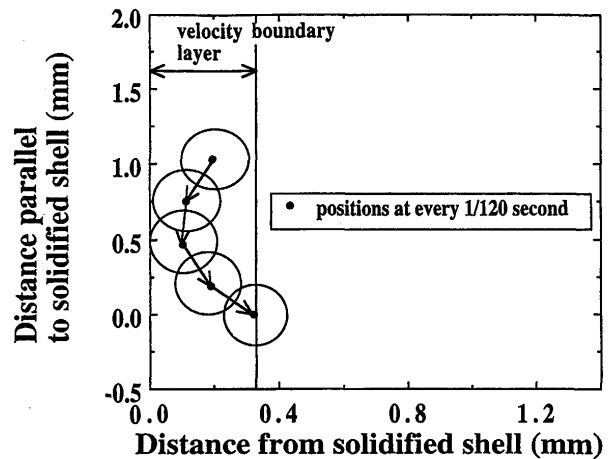


Fig. 11. A case under influence of Saffman force.

4. 結言

EMSなどの技術に見られる、溶鋼を水平に攪拌したときの非金属介在物の凝固シェルへの捕捉頻度低減効果のメカニズムを解明する目的で、水およびイオン交換樹脂製の粒子を用いたモデル実験を行った。実験の結果、凝固界面近傍で上昇・下降流を付与したときのように、サフマン力が現象を支配することがなく、粒子は凝固界面に平行な流れから力を受けるために凝固界面への捕捉が阻止されることがわかった。また、サフマン力は凝固界面に軟接触した粒子が減速したときに、凝固界面から離れる向きに若干作用していることも判明した。

文 献

- 1) 湯山英俊, 鈴木 真, 三隅秀幸, 山村英明, 射手由雄: 材料とプロセス, **1** (1988), 1220.
- 2) 清瀬明人, 宮沢憲一, 福田 淳, 大谷康彦, 中島潤二: 材料とプロセス, **7** (1994), 1195.
- 3) D.R.Uhlmann, B.Chalmers and K.A.Jackson: J.Applied Physics, **35** (1964), 2986.
- 4) G.F.Bolling and J.Cisse: J.Crystal Growth, **10** (1971), 56.
- 5) 向井楠宏, 林 偉: 鉄と鋼, **80** (1994), 533.
- 6) 谷口尚司, 菊池 淳: 鉄と鋼, **78** (1992), 423.
- 7) S.I. Rubinow and J.B. Keller: J. Fluid Mech, **11** (1961), 447.
- 8) P.G. Saffman: J. Fluid Mech, **31** (1965), 385; **31** (1968), 624.
- 9) Q.Han and J.D.Hunt: J.Crystal Growth, **140** (1994), 406.