モデル実験およびDC磁場をもつ実機連铸機における初期凝固シェルへの気泡・介在物捕捉シミュレーション

三木 祐司*・大野 浩之*・岸本 康夫*・田中 進也*²

Numerical Simulation on Inclusion and Bubble Entrapment in Solidified Shell in Model Experiment and in Mold of Continuous Caster with DC Magnetic Field

Yuji MIKI, Hiroyuki OHNO, Yasuo KISHIMOTO and Sinya TANAKA

Synopsis : A model experiment investigating entrapment of inclusions and bubbles on the solidified shell was performed using molten steel, and the conditions for inclusion and bubble entrapment and mechanism of entrapment were studied. The results were applied to the flow behavior in the casting mold of a continuous caster.

1. At the solid-liquid interface, entrapment of inclusions is greatly reduced by the existence of a low velocity flow, e.g., 0.05 m/s.
2. The above-mentioned interfacial flow velocity dependency of inclusion entrapment is considered to be largely influenced by changes in the thickness of the concentration boundary layer, which depend on the interfacial flow velocity. Specifically, bubbles and inclusions which enter the concentration boundary layer are drawn to the solid-liquid interface by a suction force which is several orders larger than the Saffman's force.
3. In addition to the above-mentioned suction force, the so-called cleaning effect is determined by fluid-dynamic forces such as drag force, etc. which act on particles, and furthermore, by resident time of particles at the solid-liquid interface, which depends on the solidification rate.
4. In a FC mold with a 2-stage electromagnetic brake, flotation of bubbles entrained in the jet flow from the nozzle is accelerated with the large DC magnetic field. This is attributed to the braking effect of the DC field on the nozzle jet and the upward flow by the buoyancy of the bubbles. As a result, the interfacial flow velocity can be normalized by increasing the strength of the magnetic field, and entrapment of large bubbles and inclusions can be reduced.

Key words: continuous casting; mold; molten steel; numerical simulation; flow, solidified shell; surface defect; inclusion, bubble; entrapment; interfacial tension; electromagnetic field.

1. 緒言

鑄造時の初期凝固シェルに捕捉された介在物や気泡は、最終製品に残留して、表面欠陥や内部欠陥の起因となることがある¹⁾。このため、連続鑄造鑄型内の溶鋼流動の制御によって、溶鋼流動を最適化すべく電磁流動制御技術が開発されてきた。例えば、電磁ブレーキによって、鑄型内の流速や乱流を低減し、介在物や気泡の浮上分離を促進する、あるいは、電磁攪拌によって、凝固界面の流速を増加させて、凝固界面の粒子を洗い流すこと（いわゆる洗浄効果）で、介在物や気泡の捕捉を抑制する技術が開発されてきた。

一方、介在物や気泡が凝固界面に捕捉される機構については、Mukaiら²⁾、あるいは、Zezeら³⁾は、粒子の周りの界面張力勾配による引力を提案して、その溶鋼成分の影響を検討している。Stefanescuら⁴⁾やYasudaら⁵⁾は、凝固速度や熱的な凝固界面の形状の影響を指摘している。凝固界面の溶鋼流動による介在物捕捉抑制、いわゆる洗浄効果についても、これまで、水／氷系、あるいは、銅系のモデル実験

がなされ、流速の増加とともに粒子の捕捉が抑制されることが知られている。Yamadaら⁶⁾、Okazawaら⁷⁾、あるいは著者ら⁸⁾は、モデル実験や鑄片の介在物調査によって、凝固界面流速の増加とともに捕捉される介在物が減少することを定量的に示した。Tohら⁹⁾は、電磁攪拌下での界面の速度境界層の流速を数値解析によって推定している。また、Esakaら¹⁰⁾は、溶鋼モデル実験によって凝固シェルへの気泡の捕捉現象の観察を行っている。

しかしながら、いわゆる洗浄効果の素機構はいまだ明らかとは言えず、さらに、Fig. 1に示すように、実際の連続鑄造機の鑄型内溶鋼流動は複雑であるから、上記のような理論的アプローチやモデル実験から、鑄型内の初期シェルへの気泡・介在物捕捉挙動を定量的に予測できていない。特に、工業的には、操業と欠陥発生に関連が重要であるが、いまだ、定性的な議論しかなされていない場合が多く、連続鑄造の鑄片の欠陥を予測する数値解析モデルを構築することは困難であった。

そこで、本研究では、凝固シェルへの介在物・気泡の捕捉に関するモデル実験を実施し、そのメカニズムを議論す

平成23年1月7日受付 平成23年5月9日受理 (Received on Jan. 7, 2011; Accepted on May 9, 2011)

* JFE スチール (株) スチール研究所 (Steel Research Lab., JFE Steel Corp., 1 Kokan-cho Fukuyama Hiroshima 721-8510)

*2 JFE システムズ (株) (JFE Systems Corp.)

Fig. 1. Steel flow in mold and surface defects.

るとともに、得られた結果をもとに、連続鋳造機スラブの気泡・介在物欠陥発生を予測するモデルを構築することで、連続鋳造機における欠陥発生機構を検討した。

2. モデル実験方法

溶銅を用いた実験によって、流速と介在物捕捉の関係を把握するためのモデル実験を行った。以下、浸漬回転実験と称す。

Fig. 2に示すような50 kg真空溶解炉を使用し、Table 1に示す成分（目標値）の極低炭素鋼を溶製した。実験前の介在物を極力一定とするため、Al脱酸後に10分間溶銅を等温保持し、脱酸生成物のアルミナが浮上する時間を設けた。そして、各浸漬実験前に、実験前の介在物量を一定とするため、再度100 ppm分の酸素に相当する酸化鉄とAlを添加した。凝固速度を揃えるため、浸漬実験前の溶銅温度を1595~1600°Cに調整後、Ar雰囲気下の真空チャンバー上部からロッドを回転させながら浸漬し、ロッドと溶銅の間に相対的な流速を与えた。同一溶銅で各ロッドごとに、0, 20, 40, 80, 115 rpmと回転数を変化させ、浸漬・回転後、30秒間後にロッドを引き上げた。浸漬の前に溶銅の全酸素値は17~24 ppmに調整し、初期の介在物量のばらつきを抑えた。

浸漬後のロッドに生成した凝固シェルの上端から50~75 mmの断面を光学顕微鏡で観察し、アルミナクラスターの長軸と短軸を測定することにより、楕円と仮定して、不定形全体の面積を測定した。観察されたすべてのアルミナクラスターの面積を総和し、測定した面積で割ることで、単位測定面積あたりの介在物面積を求め、また、回転前の溶銅サンプル中のアルミナクラスター面積で規格化することにより、初期の介在物量の影響を排除し、シェルへの捕捉割合を直接評価した。

3. 数値解析方法

3.1 モデル実験のシミュレーション方法

Fig. 3に計算フローを示す。まず、3次元で浸漬回転実

Fig. 2. Schematic view of experimental apparatus.

Table 1. Chemical composition of molten steel in model experiment.

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	O
0.005	0.01	0.15	0.015	0.008	0.03	0.03	0.003
(wt %)							

験のモデル化を行い、凝固界面の流速を求める。ロッドの周りからの非定常放熱を考慮した凝固計算を行い、シェル厚と、凝固界面の周りの温度分布を計算し、 f_s に応じた粘性係数を考慮して、ロッドの周りの流速を求める。流体は運動方程式、連続の式と、乱流モデルとして $k-\omega$ モデルを用い、凝固については、二次の風上差分法によってエネルギー方程式を解き、潜熱を考慮して f_s を計算し、 f_s に依存した粘性係数を流体解析に用いることによって、温度場(f_s)と流動場を連成することにより、流速分布を計算する。

3.2 介在物・気泡に作用する力

Saffman力¹¹⁾、濃度勾配に起因する吸引力²⁾、および粒子を球形と仮定したときの抗力を計算して介在物の軌跡を求める。

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (1)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D \text{Re}}{24} \quad (2)$$

ここで、 μ : 溶銅粘性係数(Pa·s), u : 溶銅流速(m/s), u_p : 粒子流速(m/s), D_p : 粒子径(2R)(m), C_D : 抗力係数(-), ρ_p : 粒子密度(kg/m³), ρ : 溶銅密度(kg/m³), g : 重力加速度(m²/s), Re : Reynolds数(-), F : 外力項(Saffman力や吸引力)

〈Saffman力〉

外力 F には、凝固界面に垂直な方向に速度分布が生じたとき、すなわち、壁面近傍の速度境界層に介在物・気泡が入ったときには、Saffman力やMagnus力¹²⁾が作用する。Saffman力は速度境界層内の速度分布に起因して、本モデル実験では、固相側の壁面流速のほうが溶銅流速より大きいので、粒子は溶銅側から凝固界面に近づく方向に力を受

Fig. 3. Calculation flow chart.

ける。

$$F_s = 1.62\mu(u - u_p) \sqrt{\frac{\partial u}{\partial y}} \frac{D_p^2}{\sqrt{v}} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 v : 溶鋼動粘性係数(m^2/s)

〈界面張力勾配に起因する吸引力〉

速度境界層より薄い速度境界層に入った介在物・気泡は、Mukai ら²⁾が提案している、凝固界面の溶質の濃度勾配に起因する界面張力差に起因して、凝固界面に垂直な方向に吸引力 F を受けると仮定する。

$$K = \frac{d\sigma}{dx} = \frac{d\sigma}{dC_L} \frac{dC_L}{dx} \dots\dots\dots(4)$$

$$F_i = -\frac{8}{3} \pi R^2 K \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 ρ : 溶鋼中の介在物の界面張力(N), C_L : 境界層中の溶質濃度(%), K : 境界層中の界面張力勾配(N/m^2), F_i : 介在物が界面張力勾配によって受ける力(N), x : 濃度境界層中の介在物の凝固界面からの距離(m), R : 介在物半径(m)。

このような力を受けるには、濃度境界が生成していることが必要条件である。また、濃度境界層中の溶質の濃度勾配 dC_L/dx は凝固理論¹³⁾より(6)式で表される。(6)式中の実効分配係数 K_E は(7)式で表される。

$$\frac{dC_L}{dx} = -C_0(1 - K_E) \left(\frac{V_s}{D_L} \right) \exp \left[-\frac{V_s(x - \delta)}{D_L} \right] \dots\dots\dots(6)$$

$$K_E = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0) \exp(-V_s \delta / D_L)} \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 C_0 : バルク溶鋼中の溶質濃度(%), K_E : 実効分配係数(-), V_s : 凝固界面移動速度(m/s), D_L : 溶質の拡散係数(m^2/s), δ : 濃度境界層厚さ(m), K_0 : 平衡分配係数(-)。

(7)式中の濃度境界層厚 δ について、Burton¹⁴⁾らが回転凝固時で求めた濃度境界層厚に関する(8)式を用いて算出した。

$$\delta = 1.6 D_L^{1/3} \nu^{1/6} \omega^{-1/2} \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 ν : 動粘性係数(cm^2/s), ω : 角速度(1/min)以上の

Fig. 4. Relationship between solid fraction and viscosity.¹⁵⁾

Fig. 5. Schematic drawing of steel flow velocity gradient and force on particle near solid/liquid interface.

ように、介在物の軌跡の計算では、介在物の周りの抗力、Saffman力および濃度勾配に起因する界面張力差に起因する吸引力を考慮した。吸引力は濃度勾配が生じる厚みを先の濃度境界層厚みとして、この範囲にある介在物に吸引力を作用させた。

3.3 凝固に伴う溶鋼流動の影響

凝固界面の挙動を再現するためには、ダルシー流れを仮定することが一般的であるが、本研究では、特に、凝固界面近傍の粒子の挙動を再現するため、サスペンションの粘度実測値¹⁵⁾が物質によらず固相率と完全液相粘度で変化することから、固相率をパラメーターとして界面近傍の粘性係数をFig. 4のように変化させた。ここで、高固相率の領域では測定点の外挿となるが、粘性係数が溶鋼より3オーダー大きくなるため、この領域の流速はほとんど0となり、誤差の影響は小さいと考えられる。

3.4 モデル実験における計算モデル

回転凝固実験における凝固シェルの周りの凝固界面流速を計算するため、3次元の凝固を考慮した熱流体解析を行う。凝固界面流速は、その位置の f_s によって変化するため、 f_s が0.8以上で流動限界と考えて、固体と同様に振舞うと考える。Fig. 5に示すように、回転凝固実験では、凝固シェル側の流速が大きく、一方、鋳型内溶鋼流動のようなノズル噴流に起因する流動では、バルク側での流速が大きい。よって、凝固界面における最大流速は、回転凝固実験

では $f_s=0.8$ とした。デンドライト1次アーム間隔は、今回、対象としている気泡・介在物径と比較して1/10程度であるので、デンドライトの形状（凹凸）は無視した。

介在物に働く力の算出については、濃度境界層厚みと今回対象としている介在物径の大きさのオーダーが同じであることから、界面張力勾配に起因する吸引力が吸引力が表面積に比例するとした。すなわち、Fig. 5に示すように、介在物を球形と仮定し、境界層に一部のみ入った介在物は、その部分の表面積比率に従った吸引力を受けるものとし、Saffman力と比較する。

3.5 連続鋳造機鋳型内の介在物・気泡の挙動の計算方法

3次元の流体解析によって流速を計算する際に、二次の風上差分法によってエネルギー方程式を解いて、凝固シェルの生成を流体計算と連成する。この際、凝固界面では、 f_s に応じて溶鋼の粘性を変え凝固界面の流速を求める。流体計算では、運動方程式、連続の式と、乱流モデルとして $k-\epsilon$ モデルを用いた。

凝固界面の取扱いにおいて、凝固界面における最大流速は当然に $f_s=0$ の位置となる。しかしながら、Fig. 4に示すように、流速を決定する粘性係数が f_s が $0=0.2$ までの範囲でほとんど変わらないために流速が変化しないこと、また、界面でないバルク内では f_s は0となるから、界面を特定するために $f_s=0.2$ の位置を界面における流速と設定した。先に行ったモデル実験の結果から、上記界面流速と介在物の捕捉確率の関係を計算モデルに組み込む。後述のように、モデル実験で介在物面積率を決定する介在物径は数百 μm であったので、モデル実験の結果を0.5mm径の気泡にも捕捉確率を拡張し、アルゴン気体の体積膨張考慮後の密度 0.24kg/m^3 を気泡密度として、溶鋼流動と連成して気泡の分散を計算した。

4. 連続鋳造機スラブの気泡・介在物分布調査

スラブ表層の気泡・介在物分布の調査を行うために、スラブ表層1mmを研削後、全幅のZ面で超音波探傷を実施し、約80 μm 径以上の気泡・介在物の個数を調査した。本超音波探傷では、表面から1mmの不感帯があるため、鋳片表面から2~3mm、3~4mmおよび4~5mmの位置の気泡・介在物個数を測定した。なお、鋳造時には、ノズル吐出孔を挟んだ上下2段の静磁界による流動制御（FCモールド¹⁶⁾）を行い、静磁界による流動と気泡・介在物の捕捉低減効果も評価した。

5. 実験および計算結果と考察

5.1 モデル実験結果

Fig. 6に流速と初期の溶鋼中の介在物量で規格化した介在物面積比および代表的な介在物形態を示す。回転数が20rpm以上では介在物面積比が1より小さく、もとの溶鋼の介在物面積率よりも小さくなっている。回転数が40rpm以上になると介在物面積比が大きく低減するが、一方で、回転しない場合には、もとの溶鋼の介在物面積率よりも5倍近く大きくなっていることから、介在物捕捉を促進する（介在物が凝固界面に吸引される）駆動力が存在することが明らかとなった。観察された介在物で面積率を決定しているのは、Fig. 6に示すような、おおむね数百 μm 径のアルミナクラスターであった。

5.2 モデル実験における介在物捕捉機構の解明

今回対象としている介在物はデンドライト1次アーム間隔に比べて十分に大きいので、介在物が捕捉される位置は凝固界面前面と考えられる。凝固界面流速はこれまでデンドライト傾角によって測定されているが、低流速では、傾角のばらつきが大きく十分な精度が得られなかったので、以下のように、数値解析によって界面流速を推定した。

Fig. 7に浸漬回転実験における、3次元熱流体解析した f_s および溶鋼流速の例と同条件のロッドの周りに成長したシェルの組織を示す。実験においては5~7mm程度の凝固シェルが生成しており、とくに、最外周部1~2mmでは、デンドライト組織が鮮明である。これは、所定時間浸漬後にロッドを速やかに引き上げたため、樹間の液相が流れ出たためと考えられ、この長さが固液共存域長さとはほぼ一致すると推定される。Fig. 7の左側には、回転しないときの流動計算結果を示した。回転しないときには熱対流によって流動が発生するが、対流による流動は非常に小さく、界面流速はおおよそ 10^{-3}m/s のオーダーであった。

Fig. 8に、数値解析結果による40rpm時の凝固界面の f_s と流速を示した。ロッドの角速度が一定下で、凝固シェルの成長に伴って $f_s=1$ の線流速は増加するが、ロッドから離れるに従って f_s が低下して溶鋼粘性が低下するから、溶鋼流速も低減する。また、固液共存域はおおむね1~2mm

Fig. 6. Relationship between steel flow velocity and entrapped inclusion ratio.

程度であり、Fig. 7に示したデンドライトが鮮明であった長さとも一致しており、ほぼ実現象を再現できていると考えられる。

Fig. 9に、各回転数で計算した相対速度を示した。回転数の増加とともに、凝固界面流速が大きくなり、また、 f_s の増加に伴って流速が低減する。

Fig.10(a)に、表面直力勾配に起因する吸引力と Saffman 力の概算値を、凝固界面からの距離で整理した。濃度境界層内では上記吸引力が圧倒的に大きいため、境界層内で

は、捕捉の駆動力は、界面張力勾配に起因する吸引力となる。Fig.10(b)に、Burtonら¹⁴⁾の結果をもとに、回転流速と濃度境界層の関係を示した。流速の増加とともに急速に境界層厚みが減少する。ここで、Burtonらの実験でも回転するロッド周りの境界層厚みを推定しているが、厳密な固相率評価ができないので、横軸の流速はロッドの線速度で表記した。

粒子に外力が働かないときには、凝固速度に依存して粒子はシェルに捕捉される。凝固速度を V とすると、シェル

Fig. 7. Comparison between calculated and investigated solidified shell. a) Calculated liquid fraction around rod, b) iso-surface of solid fraction and flow velocity by 3D model ($t=10$ s), c) microstructure on cross section of solidified shell.

Fig. 8. Calculated liquid fraction and flow velocity around rod by 3D model used in model experiment (40 rpm, $t=10$ s).

Fig. 9. Effect of rotational speed on relative velocity (calculated at $f_s=0.2-0.8$).

に捕捉される粒子の濃度 C_{shell} は、次式で表される。

$$C_{shell} = \frac{C_0(V + \delta)}{C_0V} \quad (9)$$

今回のモデル実験のシェル厚みから、 $V=200 \mu\text{m/s}$ となり、(8)式より各回転数ごとの δ を求めて、 C_{shell} を計算した。結果を Fig.11 に示す。Fig.11 は、Fig.10 で示した吸引力が発生するとして、均一に分散していた介在物がどのように捕捉されるかを求めたものであるが、モデル実験においても、Saffman 力と流体による抗力、浮力、さらには、回転流れによる求心力（遠心力の反作用）が作用するので、これらを(1)~(3)式で考慮して介在物の軌跡・捕捉を計算した。

Fig.12 に、Thomas¹⁷⁾ が整理した凝固界面の粒子に働く力のうち、今回の回転凝固実験のシミュレーションで考慮したものを整理した。ここで、反応、摩擦力に関する力については十分な知見が得られていないので、介在物・気泡と凝固界面の溶鋼の相対速度がデンドライトの成長速度以下であれば介在物・気泡が界面に十分に滞留していると考え、介在物・気泡は界面に捕捉されるとした。Fig.13 に計算結果の例を示す。ここで、Fig.10~13 において、仮定①：均一分散して吸引力のみを考慮した場合、仮定②：仮定②に加えて、Saffman 力と流体による抗力、浮力、さらには、回転流れによる求心力（遠心力の反作用）を考慮、仮定③：仮定②に加えて、気泡が界面に十分に滞留することを捕捉条件とした場合である。

仮定③まで考慮すると、計算による介在物捕捉率は、回転しない場合にはもとの溶鋼の 6 倍程度が捕捉され、回転すると急速に捕捉される介在物が減少し、Fig. 6 の実測値と比較すると、20 rpm（流速 0.03 m/s）では計算値が実測値より低くなっているが、傾向はおおむね一致する。ここで、凝固界面での滞在時間を考慮しない仮定②では、回転流による粒子の求心力によって回転数の増加とともに捕捉されやすくなるが、実現象ではこのような現象は観察されない。

すなわち、介在物・気泡捕捉には一定時間界面に滞留す

Fig. 10. Force and thickness of boundary layer used in simulation for model experiment. (a) Estimation of Saffman's force and force due to interfacial tension Comparison (rotational speed: 40 rpm, particle: 100 mm in diameter), (b) estimated thickness of boundary layer.

Fig. 11. Calculation result of C_{shell} using Eq. (9).

ることが必要と推察され、界面張力勾配に起因する力と、介在物に働く抗力、浮力、Saffman 力、さらには介在物の滞在時間の影響を考慮することで、実験における介在物捕捉現象を説明することができた。

捕捉の駆動力でいうと、Fig.14 に模式的に示すように、凝固界面流速増加に伴う捕捉介在物低減は、界面流速に依存する濃度境界層厚の変化に起因するところが大きいと考えられる。いったん濃度境界層に入った気泡・介在物は Saffman 力より数オーダー大きい吸引力によって凝固界面に引き寄せられると考えられ、流速の増加に伴う濃度境界層厚みの減少が、流速増加に伴う気泡・介在物の捕捉抑制の起因と推定され、従来から言われていた Saffman 力の影響は小さいといえる。

5・3 従来研究との比較

Fig.15 に、モデル実験における界面流速と捕捉された最

Fig. 13. Calculation results of inclusion entrapment in model experiment (inclusion diameter 100 μm).

Fig. 14. Mechanism of bubble/inclusion entrapment in the vicinity of solid/liquid interface.

Fig. 15. Relationship between steel flow velocity and entrapped inclusion ratio or maximum diameter of inclusions (*casting speed).

大の介在物粒径の関係を、Yamadaら^⑥の結果と併せて示す。ここで界面流速は後述の数値シミュレーションより求めた $f_s = 0.8$ の位置での流速とした。今回の数値シミュレーションによる実験結果の整理は、高界面流速の領域では従来データと傾向が一致している。Yamadaら^⑥は、流速を鋳造後のデンドライト傾角などによって特定しており、その測定精度上、低流速領域の流速決定が困難であると考えられる。今回の検討では数値シミュレーションに基づき精度良く低流速の領域を求めた結果、捕捉する介在物の最大径が従来の報告よりも低流速領域で急速に減少することが明らかとなった。0.05 m/s というような低流速でも捕捉最大径が大きく低減するという結果は、連続鋳造鋳型内における初期凝固シェルへの介在物・気泡の捕捉に大きく影響する。ここで、Yamadaらは捕捉された介在物の最大径で整理しており、本実験結果も同様に最大径で整理したが、0.03 m/s 付近で、Fig. 6の捕捉率と幾分傾向が異なっている。この理由についてはいまだ明らかとなっていないが、0.05 m/s では捕捉率、捕捉された最大径ともに大きく減少している。

5・4 連続鋳造機スラブの気泡分布

Fig.16に、1600 mm幅、スループット量 4.5 ton/min で、

Fig. 16. Distribution of bubbles and inclusions detected by ultrasonic wave on each surface (1500 mm width, throughput 4.5 ton/min, static magnetic density 0.2 T).

実験的にFCモールドの直流磁界を0.2 Tだけ印加した際の、スラブ表面から2.5~4.5 mm位置での、超音波探傷によって検出された100~500 μm 径の幅方向の気泡・介在物分布を示す。短辺近くに気泡・介在物が観察される。欠陥部を顕微鏡で調査した結果、Fig.16に示すような気泡とアルミナクラスターが合体した欠陥が見られた。

5・5 連続鋳造機における計算結果

Fig.17に、電磁ブレーキ強度が0.1 Tと0.2 Tのときの、 f_s 0.2の等 f_s 面と、同面上の流速ベクトルを示す。シェルの厚みは、ノズル噴流の影響を受けて、流速の速いところでシェル厚みが小さくなっている。また、電磁ブレーキ強度が大きい0.2 Tのときに、界面流速は空間的に均一な流速分布となっている。

Fig.18に、厚み中央および凝固界面($f_s = 0.2$)における0.5 mm径の捕捉された気泡分布計算値を示す。上段は厚み中央の気泡分布で、2段目が、凝固界面における気泡分

Fig. 12. (a) Forces acted on particles at solid/liquid interface, (b) calculated concentration of inclusions entrapped on surface of fs 0.2.

Fig. 18. Calculated argon bubble distribution (0.5 mm in diameter) in molten steel with static magnetic fields of 0.1 T and 0.2 T. (1500 mm width, 260 mm thickness, and throughput 4.5 ton/min).

Fig. 17. Calculated shell profile and flow velocity at interface (fs 0.2, magnetic density 0.1 T and 0.2 T) (1500 mm width, 260 mm thickness, and throughput 4.5 ton/min).

布 (本モデル実験で得た流速と捕捉率の関係を仮定), 下段は, 捕捉の臨界値が 0.15 m/s と仮定²⁰⁾した場合の凝固界面における気泡分布を示す。また, 左列は, FCモールドの直流磁界が 0.1 T 時, 右列が 0.2 T 時である。ここで, 計算値の捕捉率は, 吹込んだ気泡の濃度で規格化した。ノズルへアルゴンガスを吹込むために, ノズル噴流の気泡密度が大きく, この噴流が鋳型内で広がって気泡の濃度分布を形成し, かつ, Fig.17の界面流速と見比べてみると, 凝固界面近傍の流速が低い領域で捕捉が起こっている。また, FCモールドによる直流磁界強度が大きいとき (磁場強度 0.2 T) に, ノズル噴流に混入している気泡の浮上が促進されているが, これは, ノズル吐出孔からの溶鋼流速と気泡の浮力によって決定されるノズル噴流が直流磁界によって制動されて, 結果, 気泡浮力による上昇流が促進されてノズル噴流が上方に歪曲されるためである。

Fig.19に, 幅方向の気泡・介在物分布を, 左列に実測値,

中央列に本モデル実験に基づく計算値, 右列に捕捉の臨界値が 0.15 m/s としたときの計算値を比較した。上段から, スラブ表面から 2.5 mm (溶鋼上面から推定 63 mm), 3.5 mm (同じく 92 mm), 4.5 mm (同じく 127 mm) 相当の結果となっている。ここで, Fig.18と同じく, 計算値の捕捉率は吹込んだ気泡の個数で規格化した。実測値および本モデル実験に基づく計算値では, 短辺付近に気泡分布が多く, かつ, スラブ表面から深くなるほど気泡・介在物密度は低減しており, 傾向がよく一致している。一方, 捕捉の臨界値が 0.15 m/s としたときには, 幅方向での差異が小さくなり, かつ, 深くなるほうが捕捉密度が増加するなど, 傾向が一致しない。

以上の結果からも本計算モデルの妥当性が示唆された。本研究によれば連続鋳造時の気泡の捕捉は 0.15 m/s 以下よりもはるかに流速が小さい領域での洗浄効果に大きく影響されていることがわかる。

Fig. 19. Comparison between measured and calculated bubble and inclusion distribution along width direction (1500 mm width, throughput 4.5 ton/min, static magnetic density 0.2 T, bubble diameter 0.5 mm).

5・6 初期凝固シェルへの介在物・気泡の捕捉機構

モデル実験において Saffman 力が介在物離脱に影響しないこと、および、界面張力勾配に起因する力に比して Saffman 力のオーダーが極めて小さいことを考えると、すでに Okazawa ら¹⁸⁾も推察していたとおり、介在物捕捉において Saffman 力は支配的でないことが明らかである。

本論文では、界面流速の増加に伴う介在物捕捉抑制効果を、濃度境界層内の界面張力勾配に起因するシェル側への吸引力による介在物捕捉機構で説明することができた。すなわち、本実験条件下では濃度境界層内の界面張力勾配に起因するシェル側への吸引力が他の外力よりも大きく、介在物が濃度境界層に入ったら、急速に吸引、捕捉される。界面流速が増加すると、それに伴い濃度境界層厚みが減少し、結果、界面張力勾配に起因する吸引力が減少、介在物・気泡捕捉が抑制されると推察された。最近、同様のモデル実験により、介在物の捕捉に及ぼす S の影響を調査し、S 濃度の増加とともに捕捉される介在物が増加する結果を得ている¹⁹⁾が、これも凝固界面に形成される濃度勾配層の違いによるものと考えられ、上記の考察を裏づける。

また、今回、凝固シェルと介在物の相対速度によって考慮した凝固界面における介在物の滞在時間を捕捉判定に用いることは、凝固界面に付着後の介在物に働く Lift force^{20,21)}(再離脱)や、熱伝導度の低い気泡・介在物の周りでは凝固遅れが起り、捕捉されにくい現象に相当すると思われるが、今後、ミクロな現象解明も必要である。

加えて、今回のモデル実験および連続 casting 条件では考慮する必要はないが、対象とする介在物径が小さく、凝固速度が遅く、溶鋼流速が小さいときには、従来から提案されている凝固界面における介在物のプッシング効果⁴⁾なども

考慮する必要がある。

5・7 電磁ブレーキによる気泡・介在物捕捉抑制

Fig.18 に示したように、連铸機における初期凝固シェルへの気泡捕捉に及ぼす溶鋼内気泡密度偏在の影響が極めて重要である。すなわち、気泡密度の大きいノズル噴流の拡がりによって鋳型内溶鋼内に気泡濃度分布が生成し、気泡密度が大きく、かつ、凝固界面流速が小さい位置で気泡は凝固シェルに捕捉される。本条件下では、端部から 1/4 付近までに、介在物・気泡の捕捉が多く起こるが、溶鋼流動状況によってこの傾向は変化する。

電磁攪拌によって界面流速を付与する場合はノズル噴流と旋回流との干渉によって流速が極めて小さくなる領域があり、当該位置に気泡・介在物が捕捉されること²²⁾が指摘されているが、電磁ブレーキの場合には、Fig.16 に示したように、磁界強度を大きくすることにより界面流速が均一化するため、大きな気泡・介在物捕捉が抑制できる。

このように、鋳型内溶鋼流動は非常に複雑であるから、工業的には対象とする介在物・気泡径を明らかとしたうえで、本研究に基づく数値計算によって凝固シェルへの気泡・介在物捕捉を予測することにより、欠陥を低減する条件を見いだすことが重要である。Murai ら²³⁾は、溶融めっき用薄鋼板で、おおむね 0.5~2 mm の欠陥径で表面欠陥となること、表面欠陥となる欠陥径が欠陥の位置(鋳片表面からの深さ)に依存していることを指摘している。しかしながら、欠陥の臨界径は製品の用途(要求レベル)によって異なることは自明であり、今後、欠陥径に応じた必要界面流速を確保する casting を考えることが必要であるが、この場合においても必要流速は 0.03~0.05 m/s というような低流速の領域を生成させないことが重要である。

6. 結言

溶鋼を用いた凝固シェルへの介在物・気泡の捕捉に関するモデル実験を行い、介在物・気泡の捕捉条件および捕捉機構を検討した。また、実連続鋳造機の鋳型内流動にその結果を適用して、以下の知見を得た。

(1) 凝固界面では、0.05 m/s というようなわずかな流動の存在によって、介在物の捕捉率、捕捉された介在物最大径が大きく低減する。

(2) 上記の介在物の捕捉に及ぼす界面流速の依存性は、界面流速に依存する濃度境界層厚の変化に起因するところが大きいと考えられる。すなわち、いったん濃度境界層に入った気泡・介在物は Saffman 力より数オーダー大きい吸引力によって凝固界面に引き寄せられると考えられる。流速の増加に伴って気泡・介在物の捕捉が抑制されるのは、流速の増加に伴い濃度境界層厚みが減少し介在物・気泡が吸引力の影響を受けにくくなるためと推定される。

(3) モデル実験および数値解析によって、いわゆる洗浄効果は、上記の界面張力勾配に起因する吸引力に加えて、抗力などの粒子に流体力学的に働く力、さらには、凝固速度に依存する凝固界面での粒子の滞留によって決定されていると推察される。

(4) 実際の連続鋳造機においては、ノズルから吹込まれる気泡の噴流が拡がることにより、鋳型内溶鋼内に気泡の高い濃度分布を有する場所が発生し、その位置の凝固界面流速が小さい場合に介在物・気泡が捕捉される。モデル実験に基づく凝固界面流速と介在物・気泡の捕捉率の関係を考慮した新しい数値計算により、この結果を初めて定量的に再現・説明することができた。すなわち、0.05 m/s とした極低流速の界面流速が介在物・気泡の付着有無を決定する。

(5) 上下二段ブレーキの FC モールドでは、直流磁界強度が大きいとき（磁場強度 0.2 T）に、ノズル噴流に混入している気泡の浮上が促進される。これは、ノズル噴流が、直流磁界によって制動され、気泡浮力により上方に歪曲されるためである。その結果、磁界強度を大きくすることにより界面流速が均一化し、大きな気泡・介在物捕捉が抑制できる。

文 献

- Y. Miki and S. Takeuchi: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 1548.
- K. Mukai and W. Lin: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 533.
- K. Mukai, L. Zhong and M. Zeze: *ISIJ Int.*, **46** (2006), No. 12, 1810.
- D. M. Stefanescu, R. V. Phalnikar, H. Pang, S. Ahuja and B. K. Dhindaw: *ISIJ Int.*, **35** (1995), 700.
- 安田秀幸, 大中逸雄, 定司英明: 超清浄鋼研究の最近の展開 超清浄鋼研究会最終報告書, (1999), 303.
- W. Yamada: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 682.
- 岡沢健介: 超清浄鋼研究の最近の展開 超清浄鋼研究会最終報告書, (1999), 286.
- Y. Miki, K. Yamane and S. Takeuchi: *CAMP-ISIJ*, **17** (2004), 847.
- T. Toh, H. Hasegawa and H. Harada: *ISIJ Int.*, **41** (2001), 1245.
- H. Esaka, Y. Kuroda, K. Shinozuka and M. Tamura: *ISIJ Int.*, **44** (2004), 682.
- P. G. Saffman: *J. Fluid Mech.*, **22** (1965), 385.
- S. L. Rubinfeld and J. B. Keller: *J. Fluid Mech.*, **11** (1961), 447.
- たとえば, B. Chalmers 著, 岡本 平, 鈴木 章訳: 金属の凝固 (丸善) (1971), 125.
- J. A. Burton, R. C. Prim and W. P. Slichter: *J. Chem. Phys.*, **21** (1953), 1987.
- S. Sukenaga, N. Saito and K. Nakajima: *CAMP-ISIJ*, **19** (2006), 648.
- たとえば, A. Idogawa, Y. Kitano and H. Tozawa: *Kawasaki Steel Gihō*, **28** (1996), 46.
- Q. Yuan and B. G. Thomas: *MCWASP XI Conf., France*, (2006), 745.
- K. Okazawa, A. Kiyose, I. Sawada, T. Toh and E. Takeuchi: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 749.
- H. Ohno, Y. Miki and Y. Kishimoto: *ISIJ-Int.*, **23** (2010), 913.
- A. M. Mollinger and F. T. M. Nieuwstadt: *J. Fluid Mech.*, **316** (1996), 285.
- T. Kato, S. Shimazaki, K. Koike and S. Taniguchi, ICS2008 Int. Cong. on Science and Technology of Steelmaking, Gifu, ISIJ, Tokyo Japan, (2008), 412.
- M. Morishita, H. Mori, R. Suzuki, K. Miyake, T. Nakaoka and Y. Hosokawa: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 6.
- T. Murai, Y. Ito, Y. Miki and Y. Kishimoto: *CAMP-ISIJ*, **23** (2010), 43.
- Fluent 6.3 Manual, ANSYS Inc., 10 Cavendish Court, Lebanon, NH, U.S.A. (2007).

付録：数値計算法に関する補足

数値計算は、汎用の流体解析プログラム Fluent²⁴⁾ に自作サブルーチンを練成させて計算した。Fluent に組み込まれている基礎式を (a1)~(a3) に示す。

質量保存式 (連続の式) :

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad \dots\dots\dots(a1)$$

運動量保存式 (Navier-Stokes 方程式) :

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P - \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{V} + \frac{\vec{g}}{\rho} \quad \dots\dots\dots(a2)$$

エネルギー保存式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T = \frac{k}{\rho C_p} \nabla^2 T + \frac{Q}{\rho C_p} \quad \dots\dots\dots(a3)$$

ここで、 $\vec{V}$: 流速ベクトル, ρ : 溶鋼密度, P : 圧力, μ : 溶鋼粘性係数, g : 重力加速度, T : 溶鋼温度, k : 熱伝導係数, C_p : 定圧比熱, Q : 凝固潜熱凝固界面流速は、すでに本文中に記載のように、エネルギー方程式から凝固界面を計算し、温度場より f_s を特定、サブルーチンを用いて粘性係数を変化させることにより、流動計算とカップリングしている。

磁場解析では、静磁界による外部磁場 B を設定し、Magnetic induction 法で (a4), (a5) 式のように溶鋼流動と磁場をカップリングして解いた。

Ohm の法則, Ampere の関係から,

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{B} \quad \dots\dots\dots(a4)$$

Maxwell の法則と合わせて,

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{B} = \frac{1}{\sigma \mu} \nabla^2 \vec{B} + (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{V} \quad \dots\dots\dots(a5)$$

ここで、 $\vec{j}$: 電流ベクトル, E : 電位ベクトル, B : 磁場ベクトル, ρ : 電気伝導度。