

# 固定交流磁場を利用した 溶融金属中の非金属介在物除去

山尾 文孝\*・佐々 健介\*<sup>2</sup>・岩井 一彦\*<sup>2</sup>・浅井 滋生\*<sup>2</sup>

Separation of Inclusions in Liquid Metal Using Fixed Alternating Magnetic Field

Fumitaka YAMAOKA, Kensuke SASSA, Kazuhiko IWAI and Shigeo ASAI

**Synopsis :** The principle on separating inclusions in a molten metal by using a fixed alternating magnetic field has been confirmed through experiments with molten aluminium. The separating efficiency of inclusions is studied through experimental and analytical ways under different operating conditions. The mathematical model to predict the separating efficiency is developed and the efficiencies predicted by the model are compared with the experimental ones.

A feasibility study on the application of an electromagnetic inclusion separation in a molten steel is performed. An operating non-dimensional parameter,  $Y \equiv (\rho_f d_p^2 B_e^2 L_t S) / (\mu_t \mu_e W d_t^2)$  which characterizes an electromagnetic inclusion separation process is newly proposed.

**Key words :** inclusion ; separation ; fixed magnetic field ; electromagnetic processing of materials ; application of electromagnetic force ; molten metal ; steel making.

## 1. 緒言

金属中に残留する非金属介在物は、製品に数々の欠陥を生じせしめるのみならず、その機械的性質を著しく低下させる。そのため様々な介在物低減技術が開発されてきた<sup>1,2)</sup>。近年、金属材料の高品質化に対する強い要求から微細な介在物に対しても高い洗浄能力を持つ除去法の開発が強く望まれている。

新しい介在物除去技術の一つに溶融金属と介在物との電気伝導度の差を利用した電磁分離法がある。この電磁分離法は直流電磁気力と交流電磁気力を用いる2方法に大別される。前者についてはLeenovとKolin<sup>3)</sup>やMartyとAlemay<sup>4)</sup>が理論展開を行い、Parkら<sup>5)</sup>はこの原理を細管を用いて溶湯の対流を抑制し、電磁気力の効果を顕在化させることによって確かめた。一方、交流電磁気力を用いる方法はPatelとEl-Kaddah<sup>6)</sup>によって周波数の効果が理論的に検討された。交流電磁気力の印加方法には種々あり、固定交流磁場印加による方法に関してKorovin<sup>7)</sup>は理論式を導出し、谷口ら<sup>8,9)</sup>は反応工学的観点からプロセス解析を行い実操業に有用な知見を与えている。さらに、田中ら<sup>10)</sup>は商用周波数の移動磁場を用いる方法を提案し、移動磁場に新しい機能を見い出している。

一般に、交流磁場による方法は電磁気力を溶融金属に非接触のかたちで付与できるという点で大きなメリットを持

つが、内部に電磁気力の分布が生じるため溶融金属の流動が生じ、介在物の除去機構は複雑になる。そのため、これまでのところ電磁気力の分布および流動を考慮した交流磁場を用いた実験はなされてこなかった。

本研究ではソレノイドコイルによる固定交流磁場印加の実験を行い、主要な操業条件が介在物除去率に及ぼす効果を明らかにすると共に、工業的応用についても検討する。

## 2. 原理

固定交流磁場印加による介在物除去法の原理をFig. 1に示す。溶融金属の周りに配したソレノイドコイルが軸方向の交流磁場 $B$ を発生させる。この磁場は周方向に誘導電流 $J$ を生じせしめ、 $B$ と $J$ の相互作用によって内向きの電磁気力 $F$ (ピンチ力)が生じる。介在物を含有する溶融金属にこの電磁気力を作用させると、電磁気力は電気良導性の溶融金属に生じ不良導性の介在物には生じない。そのため、介在物には電磁気力と逆向きの力(以後、電磁アルキメデス力<電磁斥力>と呼ぶ)が発生する。電磁気力は内向きに作用するため電磁アルキメデス力は外向きに生じ、介在物は外側へと押し出されることになる。

交流磁場印加によって溶融金属内部に生ずる電磁気力の分布は溶融金属の半径 $a$ および磁場の浸透厚み $\delta$ (表皮厚み)の関数となる。また、電磁気力の不均一分布は付随的に溶

平成8年7月11日受付 平成8年9月9日受理 (Received on July 11, 1996; Accepted on Sep. 9, 1996)

\* 名古屋大学大学院生 (現: スズキ(株)) (Graduate Student, Nagoya University, now Suzuki Motor Corp.)

\* 2 名古屋大学工学部 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-01)

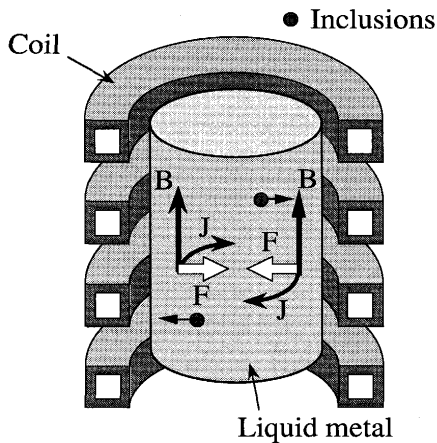


Fig. 1. Principle of the method for eliminating inclusions in liquid metal by use of fixed alternating magnetic field.

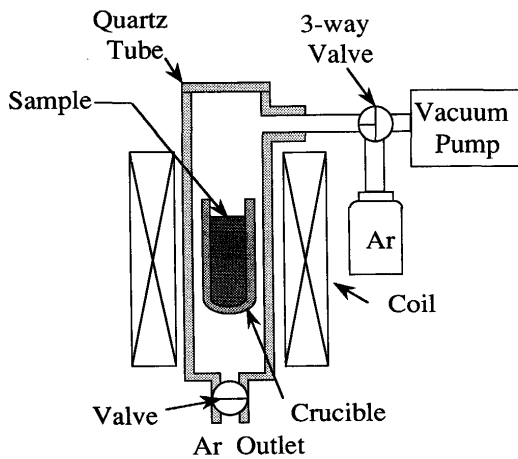


Fig. 2. Schematic view of experimental apparatus for eliminating inclusions.

融金属内部に流動を引き起こす。この流動は介在物の混合作用をもたらすため電磁アルキメデス力による介在物の分離作用を阻害するが、一方、電磁気力がほとんど作用しない熔融金属内部の介在物を電磁アルキメデス力の強い管壁近傍へと運ぶプラスの効果もある。

### 3. 実験

実験装置の概略図をFig. 2に示す。高周波電源としては3.0 kHzのサイリスター式発振器と33kHzのトランジスタインバーター式発振器を用いた。また、コイルとしては上述の2つの電源に共用できる内径30mm、外径50mm、長さ120mm、巻き数11のものを用いた。まず純AlとAl-20mass% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (粒径20 $\mu$ m)の母試料をAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の濃度が5mass%になるように秤量しアルミナ坩堝にて溶解した。溶湯を攪拌してAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粒子を均一に分散させた後、コイル中央部の石英製反応管内に設置した。酸化を防ぐため反応管内にはArガスを流通させ所定の磁場を所定時間印加した後、急冷し組織観

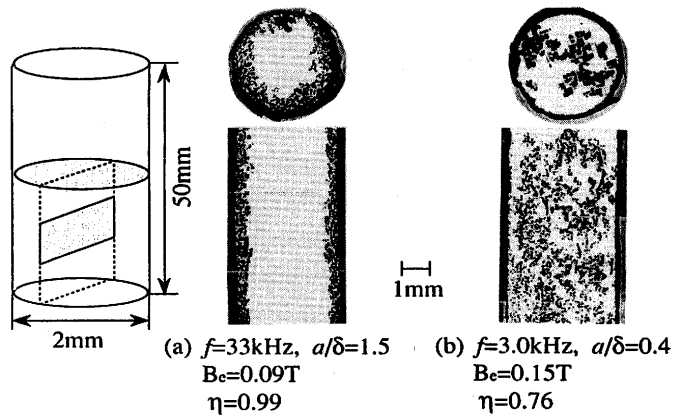


Fig. 3. Distribution of inclusions in the different magnetic intensity and frequency. (Al-5mass%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $t_1 = 10s$ )

察に供した。なお、コイル中心軸上における試料上下端の磁場の値は中央のそれの約5%減であった。

### 4. 結果および考察

電磁気力の不均一分布から生ずる熔融金属の流動は介在物の混合作用をもたらす電磁アルキメデス力による介在物除去効果を消失させる。Parkらは細管を用いることでこの流動が抑制可能であることを確認している<sup>5)</sup>。流動の強さに影響を与える因子として管径、磁場強度、磁場の周波数、磁場分布が挙げられる。ここでは半径( $a$ )2mmのアルミナ坩堝を用い、周波数 $f$ は33kHz(この場合の表皮厚み $\delta$ は1.4mmである)と3.0kHz( $\delta$ は4.5mm)としたので、 $a/\delta$ はそれぞれ1.5, 0.4であった。実効値0.09Tと0.15Tの磁束密度を10s間印加して得られた試料の中央部の横断面とそれより下部の縦断面の組織写真をFig. 3 (a), (b)に示す。図中で黒く点状に見えるのがAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>介在物である。(a)の $a/\delta=1.5$ では介在物はほぼ均一に管壁に寄っており流動が抑制されていたことが推測できる。一方、(b)の $a/\delta=0.4$ では印加磁場の強度が強いかかわらず介在物は管内に均一に分散しており電磁気力による介在物分離の効果は見られない。これは $\delta$ より $a$ が小さいため誘導電流が小さくなり小さな電磁気力しか生じなかったためと考えられる。

次に、周波数33kHz、磁場0.04T、印加時間30sの下で、坩堝の半径を2mm, 4.5mm, 6.5mmと変化させた。このとき $a/\delta$ はそれぞれ1.5, 3.3, 4.8となる。得られた試料の上部から13mmおよび下部から13mmの横断面とその間の縦断面のマクロ写真をFig. 4 (a), (b), (c)に示す。図中で白く点状に見えるのがAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>介在物である。(a)の $a/\delta=1.5$ では介在物はFig. 3 (a)と同様ほぼ均一に管壁に寄っているが、 $a/\delta > 3$ である(b), (c)では、ほとんどの介在物は沈降している。

さらに、 $a/\delta > 3$ であるFig. 4 (b), (c)の場合について磁場を0.04Tから0.09Tと強化した実験を行った。Fig. 5 (a),

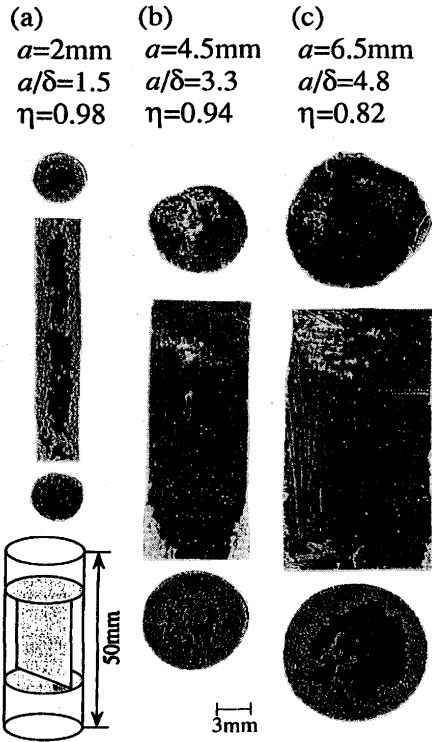


Fig. 4. Distribution of inclusions in the different radius of a crucible. (Al-5mass% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, f=33kHz, B<sub>e</sub>=0.04T, t<sub>i</sub>=10s)

(b)に得られた試料の断面マクロ写真(断面の位置はFig. 4と同じ)を示す。介在物は管壁にすり鉢状に寄っているが、これは印加磁場を強くしたために流動が生じ、対流効果と電磁アルキメデス力の効果が重畳した結果と考えられる。流れは磁場の一番強い試料の縦方向中央部で内側へ、上端および下端では外側へ円を描くように生じていたことが予測されるが、得られた介在物分布はこの流動パターンに乗って介在物が移動したことを推察させる。すなわち、上下方向からの流れがぶつかり停滞域となる縦方向中央部の管壁付近に多くの介在物が集まっている。また、この位置は介在物に働く電磁アルキメデス力が最も大きくなる点でもある。

### 5. 理論解析

#### 5.1 介在物の除去モデル

谷口ら<sup>8)</sup>によって提出されたプロセスモデルに基づいて本実験系の解析を行い、実験結果を考察する。

(静止モデル)

溶融金属が完全に静止している場合、円管の中心軸から無次元距離Rの位置にある介在物を壁面(R=1)まで移動させるのに要する時間t<sub>e</sub>は次式で表せる。

$$t_e = a \int_R^1 \frac{1}{u_{pr}} dR \quad (1)$$

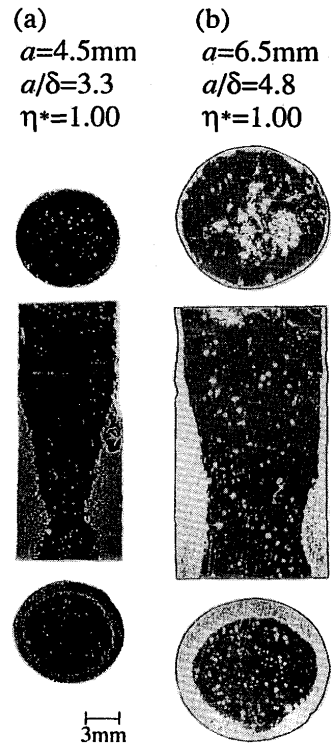


Fig. 5. Distribution of inclusions in the different radius of a crucible. (Al-5mass% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, f=33kHz, B<sub>e</sub>=0.09T, t<sub>i</sub>=30s)

(1)式に(2)式で与えられる介在物の泳動速度u<sub>pr</sub>を代入するとt<sub>e</sub>は(3)式となる。

$$u_{pr} = \frac{d_p^2 B_e^2}{24\sqrt{2}\mu_f \mu_e a} \Psi(\beta, R) \quad (2)$$

$$t_e = \frac{24\sqrt{2}\mu_f \mu_e a^2}{d_p^2 B_e^2} \int_R^1 \frac{1}{\Psi(\beta, R)} dR \quad (3)$$

ここでΨ(β, R) =

$$\beta \frac{ber_0 \beta R (ber_1 \beta R + bei_1 \beta R) - bei_0 \beta R (ber_1 \beta R - bei_1 \beta R)}{ber_0^2 \beta + bei_0^2 \beta}$$

である。また、ber<sub>v</sub>, bei<sub>v</sub>はv次の第1種と第2種のケルビン関数である。磁場の印加時間をt<sub>i</sub>とすると(3)式よりt<sub>i</sub>の間に除去できる最も内部の介在物位置R<sub>i</sub>が数値的に求まる。介在物の除去率ηはR<sub>i</sub>を用いて次式で表せる。

$$\eta = 1 - R_i^2 \quad (4)$$

(完全混合モデル)

溶融金属内に半径方向の流動が存在する場合、その流動により介在物は壁近傍まで運ばれ、そこで電磁アルキメデス力により速度境界層内に取り込まれる。ここで内部の介在物は流動により完全混合されていると仮定すると、介在物濃度Cは時間のみの関数となる。また、速度境界層は非常に薄く壁面(r=a)における介在物の泳動速度u<sub>pr,a</sub>を用いて、

流速 $u_{pr,a}C$ で除去されると仮定する。円管内の介在物の収支式を解いて $C$ が求まると、除去率は $\eta^*=1-C/C_0$ で表せるので、(2)式を用いて次式を得る。

$$\eta^* = 1 - \exp\left(-\frac{d_p^2 B_e^2 t_i}{12\sqrt{2}\mu_r\mu_e a^2} \xi(\beta)\right) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $t_i$ は磁場の印加時間である。また、

$$\xi(\beta) = \Psi(\beta, 1) = \beta \{ \text{ber}_0\beta(\text{ber}_1\beta + \text{bei}_1\beta) - \text{bei}_0\beta(\text{ber}_1\beta - \text{bei}_1\beta) \} / (\text{ber}_0^2\beta + \text{bei}_0^2\beta) \text{である。}$$

5.2 考察

Fig. 6 (a), (b)に静止モデルから求めた除去率 $\eta$ を、Fig. 6 (c), (d)に完全混合モデルから求めた除去率 $\eta^*$ を示す。物性値は実験と同じAlのものを用い、磁場は $B_e=0.02\text{T}$ 、介在物径は $d_p=20\mu\text{m}$ とした。(a), (c)は磁場の周波数 $f$ を30kHzで一定( $\delta=1.42\text{mm}$ )とした場合、(b), (d)は管の半径 $a$ を5mmで一定とした場合である。したがって横軸 $a/\delta$ の増加は(a), (c)では管の半径の増大を意味し、(b), (d)では周波数の増大を表す。(a)の上部には横軸 $a/\delta$ に対応する管の半径を、(b)の上部には周波数をそれぞれ示した。また、各図のパラメーターは磁場の印加時間 $t_i$ である。

静止モデルの(a), (b)では、ともに $a/\delta=2$ で除去率が最大となり、 $a/\delta < 2$ では熔融金属内に生ずる誘導電流が小さく電磁気力が弱くなるために、 $a/\delta > 2$ では電磁気力の作用しない領域が拡大するために除去率は低下する。一方、完全混合モデルでの(c)においても静止モデルと同様 $a/\delta=2$ で除去率が最大となる。 $a/\delta < 2$ では電磁気力が弱くなるために、 $a/\delta > 2$ では $a$ の増大に伴い熔融金属部の領域( $\propto a^2$ )が介在物の除去される壁面部( $\propto a$ )に対して相対的に大きくなる

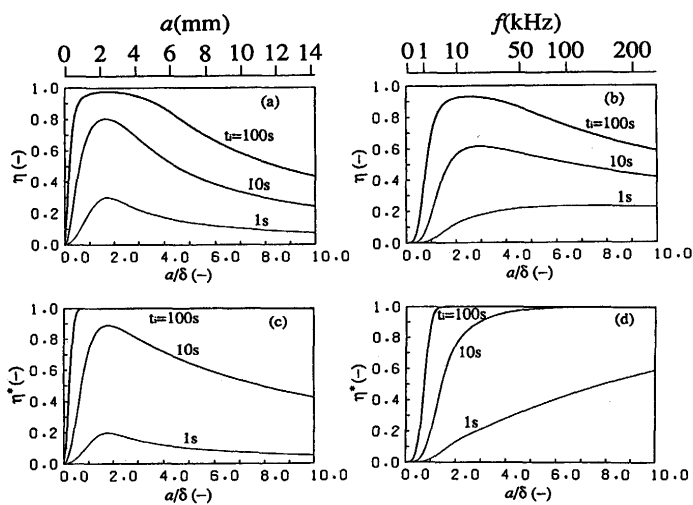


Fig. 6. Effect of  $a/\delta$  on the calculated elimination ratio.  $B_e=0.02\text{T}$ ,  $d_p=20\mu\text{m}$ . (a)stationary liquid model,  $f=30\text{kHz}$ . (b)stationary liquid model,  $a=5\text{mm}$ . (c)complete mixing model,  $f=30\text{kHz}$ . (d)complete mixing model,  $a=5\text{mm}$ .

ために、除去率は低下する。しかし、(d)では $a/\delta \geq 2$ であっても内部の領域の介在物が流動により瞬時に壁面に移動すると仮定したため除去率は低下せず、むしろ壁面部には電磁気力が集中することになるため除去率が増加している。

実験結果(Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5)とFig. 6の解析結果の比較から得られる両者の定性的な一致点を以下に述べる。

- 1) 静止モデルにおける除去率最大の条件 $a/\delta=2$ に最も近い試料であるFig. 3 (a)とFig. 4 (a)において、介在物はほとんど除去されているのに対し、 $a/\delta < 1$ および $a/\delta > 3$ にあたる試料Fig. 3 (b), Fig. 4 (b), (c)では除去率は低下している。
- 2) 流動が存在したと考えられる試料Fig. 5 (a), (b)においては、完全混合モデルを適用すれば $a/\delta > 3$ であるにもかかわらず高い除去率が説明できる。

なお、Fig. 3, 4, 5に示した $\eta$ (静止モデル)と $\eta^*$ (完全混合モデル)の値は実験条件に合わせて本モデルから求めたものである。

6. 工業的応用についての検討

Fig. 7に示すようにコイル中に多数の細管(細管束)を配し、その細管内に熔融金属を流通させながら連続的に介在物を除去する装置を想定した。

6.1 細管束を用いたときの介在物除去に対する検討

無限長ソレノイド内に細管を配する場合を考える。細管の有無にかかわらず、コイル内の磁場は軸方向成分のみであり、液体金属内部以外では均一となる。この場合、磁場の強さは周波数や細管の本数、形状によらず、コイル電流のみによって決定される。従って、周波数が除去効率に与える影響は前章の理論解析で述べたとおりであるが、実作業においては周波数変化に伴うコイル電圧の変化に着目する必要がある。本系においてはコイルを1次側、細管内の液体金属を2次側とした変圧器の理論が適用可能で次式が成立する<sup>11)</sup>。

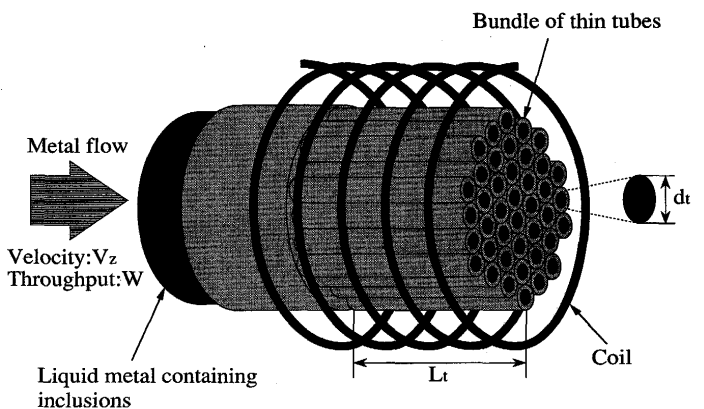


Fig. 7. A conceptual apparatus for feasibility study on eliminating inclusions.

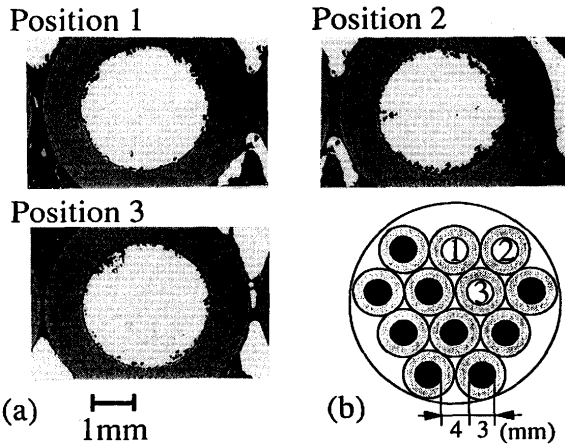


Fig. 8. Distribution of inclusions in each tube. (a) Photograph at the positions 1, 2 and 3. (b) Schematic view showing the position of the photographs.

$$V_1 = (R_1 + \Delta R) I_1 + j\omega (L_1 - \Delta L) I_1 \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $V_1$ ,  $R_1$ ,  $I_1$ はコイルの電圧、抵抗、電流、 $\omega$ は角周波数であり、 $\Delta R$ ,  $\Delta L$ は細管とコイルとの相互作用による抵抗、インダクタンスの変化を表す。周波数が高ければ、電圧に対する寄与は無視できて、(6)式は以下のように近似できる。

$$V_1 \approx j\omega (L_1 - \Delta L) I_1 \dots\dots\dots (7)$$

$\Delta L$ の見積として、例えばDelageらのモデル<sup>13)</sup>が使用可能である。

一方、実操業においては有限長のコイルを用いることになるため、コイル内の磁場は均一とはならず、コイル中心軸付近に配された細管の除去効率の低下が懸念される。そこで、以下の実験を行った。実験装置はFig. 2に示したものと同じである。内径22mm、高さ80mmのアルミナ坩堝にてAl-5mass%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(粒径20 $\mu$ m)の母溶湯を造った。次に、内径3mm、外径5mm、高さ50mmのアルミナ製の細管を12本束ねて坩堝上部から浸漬し、管内に溶湯を充満させた。これを坩堝ごとコイル中央に設置し、36kHz、0.04Tの磁場を90s間印加した後、急冷凝固させた。また、磁場をかけず電気炉内にて90s間放置した比較試料も作成した。

磁場を印加して得られた試料の縦方向中央部における横断面の組織写真をFig. 8 (a)に、また、写真に示した細管の配置位置をFig. 8 (b)に示す。黒い点状のものが介在物である。これより細管一本一本において介在物は管壁にほぼ均一に寄っており、単独細管の結果と同様となった。他方、ここには示していないが、磁場を印加しない比較試料では介在物は下部に沈降し管壁には寄っていなかった。

6・2 操業条件の検討

Fig. 7に示した介在物除去装置における除去率の算出式を導出する。管内の流れは乱流とし介在物は乱流拡散により

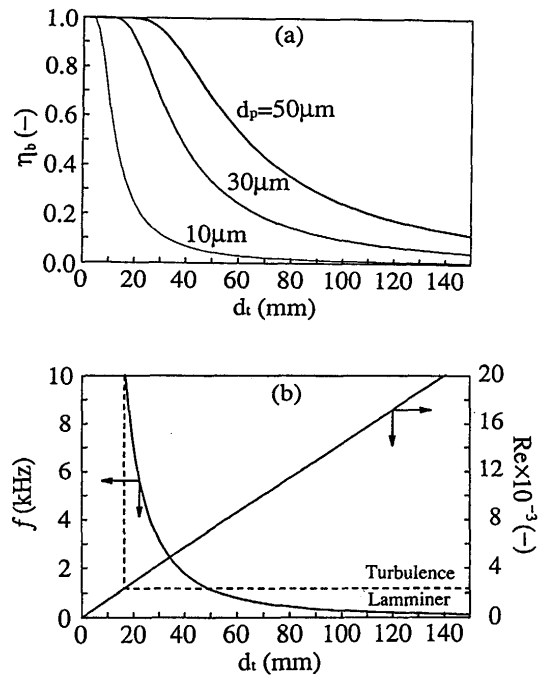


Fig. 9. (a) Effect of a thin tube diameter on elimination ratio. (b) Frequency and the Reynolds number as the function of a thin tube diameter.

層流底層まで運ばれ、電磁アルキメデス力によりそこに取り込まれ除去されるものとする。層流底層は非常に薄いためその厚さを近似的に0とし、半径方向には完全混合、軸方向の流れは栓流とする。(5)式において磁場の印加時間 $t_i$ を溶湯の管内平均滞留時間 $L_t/v_z$ ( $L_t$ :管の長さ、 $v_z$ :熔融金属の軸方向の線速度)で、管の半径 $a$ を細管の半径 $d_t/2$ で表すと介在物除去率は近似的に次式で表される。

$$\eta_b = 1 - \exp\left(-\frac{d_p^2 B_e^2 L_t}{3\sqrt{2}\mu_f \mu_e v_z d_t^2} \xi(\beta)\right) \dots\dots\dots (8)$$

また熔融金属の処理量 $W$ 、密度 $\rho_f$ 、細管束の全断面積 $S$ とすると熔融金属の軸方向の線速度は $v_z = W/\rho_f S$ となるので、(8)式は次式となる。

$$\eta_b = 1 - \exp\left(-\frac{Y}{3\sqrt{2}} \xi(\beta)\right), Y \equiv \frac{\rho_f d_p^2 B_e^2 L_t S}{\mu_f \mu_e W d_t^2} \dots\dots\dots (9)$$

ここで $Y$ はFig. 7に提案する電磁介在物除去プロセスを特徴づける無次元操作変数である。

次に溶鋼処理を対象とし、装置の寸法(管の全断面積 $S = 0.018\text{m}^2$ (内径15mmの細管を100本束ねたものに相当)、管の長さ $L_t = 1.5\text{m}$ )および操業条件(印加磁束密度(実効値) $B_e = 0.05\text{T}$ 、処理量 $W = 50\text{t/hour} (\approx 0.014\text{t/s})$ )の下で、細管径の最適化について検討する。

管の全断面積 $S$ を一定として細管径と周波数を $a/\delta = 2\sqrt{2}$ の関係の下に変えて、10 $\mu$ m、30 $\mu$ m、50 $\mu$ mの各介在物の除去率を求めFig. 9 (a)に、周波数、レイノルズ数と細管径の関

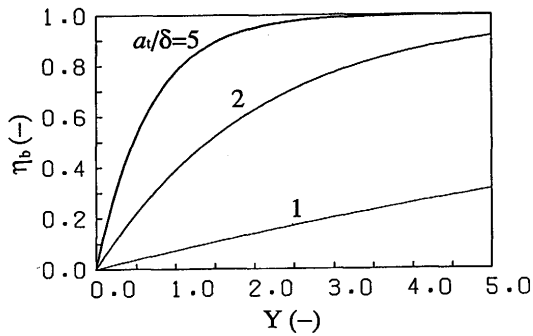


Fig. 10. Relation between elimination ratio  $\eta_b$  and non-dimensional number  $Y \equiv \frac{\rho_f d_p^2 B_e^2 L_t S}{\mu_f \mu_e W d_t^2}$ , based on Eq.(9).

係をFig. 9 (b)に示す。除去率が細管径を小さくすること(周波数を高くすることを意味する)で向上することが分かる。なお、細管径15mm(このときのレイノルズ数は約2300)未満では流れが層流になるため、この解析モデルを用いることはできないことになる。

ここで直径20mmの細管を57本用いる場合(全断面積 $S=0.018\text{m}^2$ に相当)について考察する。Fig. 9 (a)より管径150mmでは $50\mu\text{m}$ の介在物でさえ除去率20%以下であるのに対して、管径20mmにすると $10\mu\text{m}$ の介在物で20%、 $30\mu\text{m}$ 以上の介在物ならほぼ100%除去可能であることが分かる。なお、この場合Fig. 9 (b)より周波数は約7kHzと求まる。

次に(9)式で示した無次元操作変数 $Y$ と除去率 $\eta_b$ との関係をFig.10に示す。これより $Y$ を増加させると除去率が向上することが分かる。またパラメーターに用いた $a/\delta$ は周波数を大きくすると大きくなることから、周波数の増大は大幅な除去効率向上につながる事が分かる。なお、実操業に当たっては細管内の通過流と電磁気力が駆動する循環流が重畳することになる。この問題は電磁気力が大きい場合には重要となるが、現時点で個々のケースについて実験で確認する以外に方法がなく普遍的な解答を与えることができない。そのため本稿では、この重畳の効果については考慮されていない。

## 7. 結言

固定交流磁場印加による介在物除去について実験および理論の両面から除去効率に及ぼす諸因子の影響を検討した。得られた知見を以下に示す。

(1)固定交流磁場印加によって、非金属介在物が電磁気力と逆の管壁方向に移動することをAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系の実験により確認した。

(2)流動が生じない場合には、 $a/\delta=2$ 近辺において介在物の除去率は最大値をとる。

(3) $a/\delta>3$ の条件においては、磁場が弱く流動が生じない場合には介在物の除去はなされないが、磁場が強い場合には流動が生じ、高い除去率が見られた。

(4)流動の有無に基づいて介在物の除去率を求める完全混合モデルと静止モデルを展開した。モデルから得られた解析結果は実験結果と定性的一致を見た。

(5)細管束を用いた系では電磁気力は細管一本一本に独立に作用していた。

(6)コイル中に配した多数の細管中に熔融金属を流通させる介在物除去プロセスを提案し、無次元操作変数 $Y \equiv \rho_f d_p^2 B_e^2 L_t S / \mu_f \mu_e W d_t^2$ を新たに定義して、本プロセスの特性を明らかにした。

最後に、本論文作成に当たり有益なご助言および資料を賜った新日本製鐵(株)室蘭製鉄所技術開発本部室蘭研究開発部主幹研究員草野祥昌氏および同主任研究員磯部浩一氏に謝意を表します。

## 記号

$B_e$ : 磁束密度の実効値(T),  $C_0$ : 介在物の初期濃度( $1/\text{m}^3$ ),  $d_p$ : 介在物径(m),  $R$ : 無次元の半径方向距離[ $=r/a$ ]( $-$ ),  $R_e$ : レイノルズ数[ $=\rho_f r v_e d_t / \mu_f$ ]( $-$ ),  $r$ : 半径方向距離(m),  $S$ : 細管の全断面積( $\text{m}^2$ ),  $\beta$ :  $\equiv \sqrt{2} a/\delta$ ( $-$ ),  $\delta$ : スキンデプス[ $=\sqrt{2/\mu_e \sigma \omega}$ ](m),  $\mu_e$ : 透磁率(H/m),  $\mu_f$ : 粘性係数(Pa·s),  $\sigma$ : 電気伝導度( $1/(\text{ohm}\cdot\text{m})$ ),  $\omega$ : 角周波数(rad/s)

## 文献

- 1) 内堀秀男: 第126・127回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1988), 1.
- 2) 城田良康: 第143・144回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1992), 167.
- 3) D.Leenov and A.Kolin: J.Chem.Phys., **22** (1954), 683.
- 4) P.Marty and A.Aleman: Proceeding of Symposium of IUTAM, The Metal Society, (1984), 245.
- 5) J.P.Park, 佐々健介, 浅井滋生: 鉄と鋼, **80** (1994) 5, 389.
- 6) A.D.Patel and N.El-Kaddah: Proc. Int. Symp. Electromagnetic Processing of Materials, Nagoya, ISIJ, (1994), 115.
- 7) V.M.Korovin: Magnetohydrodynamics, **21** (1985), 321.
- 8) S.Taniguti and J.K.Brimacombe: ISIJ Int., **34** (1994), 722.
- 9) 谷口尚司, 菊池 淳, 竹内康臣: 日本鉄鋼協会高温プロセス部会, 材料電磁プロセッシング研究グループ資料, 平7-5-1 (平成7年6月).
- 10) 田中佳子, 佐々健介, 岩井一彦, 浅井滋生: 鉄と鋼, **81** (1995) 12.
- 11) D.Delage, R.Ernst and J.Driole: Proc. Sympo. IUTAM, Cambridge, (1982), 108.