

電磁振動による介在物合体のモデル実験

亀山 智樹*・丹羽 省三*²・Joonpyo Park*³・松村 忠和*⁴・佐々 健介*⁵・浅井 滋生*⁵

The Model Experiment on Coagulation of Inclusions by Imposing Electromagnetic Vibration

Tomoki KAMEYAMA, Shouzou NIWA, Joonpyo PARK, Tadakazu MATUMURA, Kensuke SASSA and Shigeo ASAI

Synopsis : A new process for eliminating inclusions in a molten steel has been proposed. In the process, the electromagnetic vibration force induced by simultaneous imposition of a direct magnetic field and an alternating electric field is imposed on the molten metal to promote collision and coagulation of inclusions. In order to confirm the validity of the proposed process an experimental work was conducted by simulating silicon particles precipitated in an Al-Si alloy as the model of inclusions in a molten steel. It is found from the experiment that the optimum frequency of vibration exists and its reason is discussed from the theoretical viewpoint taking account of particle motion.

Key words : electromagnetic vibration; inclusion; electromagnetic processing materials; elimination; collision and coagulation.

1. 緒言

溶鋼の製造過程において非金属介在物の生成、混入を避けることはできない。この介在物は鋼の機械的特性を著しく低下させるため溶鋼中からの非金属介在物除去技術の開発は製鋼技術者の永遠の課題となっている。実操業においてはこれまで主に溶鋼と介在物との密度差を利用した重力分離法に依ってきた。この方法では比較的粗大な介在物は分離可能であるものの微小介在物を迅速に分離させることは困難である。そのため高纯净鋼および高速精錬への要求が高まる中、新しい介在物分離技術の確立が叫ばれている。

介在物が存在する熔融金属中に電磁力を印加すると非金属介在物は非導電性であるため電磁力を直接受けることはないが、熔融金属は導電性であるため電磁力を受け、その反力によって介在物は電磁力の作用方向と反対の方向に力を受ける。この力は電磁アルキメデス力¹⁾と呼ばれている。この電磁アルキメデス力を用いた介在物分離法に着目する。朴ら²⁾は、直流磁場と直流電流との重畳印加により発生する電磁力を熔融金属に印加して介在物を一方向に移動させる方法を提案し、電磁力を用いない場合より介在物分離にかかる時間を大幅に縮小できることを報告した。また、田中ら³⁾は移動交流磁場を、山尾ら⁴⁾、El-Kaddahら⁵⁾、谷口ら⁶⁾は固定交流磁場をそれぞれ用いて、このアルキメデス力により介在物の除去が可能であることを実証した。しかし、提案された方法は実験室レベルの規模であり工業化を考えた場合、介在物の移動距離は長く、この方法で介在

物を分離させるには長時間が必要となる。そのため、細管を用いるといった方法³⁾を採らざるを得ず、その際には生産性の低下も余儀なくされる。

重力分離法で重要なパラメーターである浮力は体積力であり介在物の体積に比例して大きくなるが、粘性による抗力は表面積に比例する。そのため、ストークス則から明らかかなように介在物の浮上速度は粒径の2乗に比例する。すなわち、介在物を粗大化させることができれば分離に要する時間を大幅に短縮できる。

ここでは、電磁力の利用法として介在物合体促進に着目した。本研究では、Al-Si系溶湯からのSiの晶出系をモデル系として選び電磁振動印加による介在物の合体・凝集の可能性を理論と実験の両面から探る。

2. 振動電磁力下の介在物合体機構

2.1 水モデル実験による2粒子合体挙動の直接観察

Fig. 1に示すように磁極間にガラス製のセル(5 mm (H)×10 mm (W)×100 mm (L))を設置し内部に食塩水溶液を深さ5 mmまで満たし、その濃度を調整して模擬介在物とした169 μmのポリスチレン粒子を液中に浮揚させた。次に、磁場(0.18 T)と電流密度(126 A/m²)を直交方向に印加して電磁アルキメデス力による粒子の浮上を図った。容器の壁を固定した第一粒子と見立てて、それに鉛直方向に接近する第二粒子の挙動を拡大レンズを通して撮影しビデオに取り込み記録した。記録画像から粒子速度の推移を求めた一例をFig. 2に示す。粒子径距離内に2粒子が接近すると粒子

平成14年10月16日受付 平成15年2月14日受理 (Received on Oct. 16, 2002; Accepted on Feb. 14, 2003)

* 名古屋大学大学院生 (現: アイシン精機 (株)) (Graduate Student, Nagoya University, now Aishin Seiki Co., Ltd.)

* 2 名古屋大学大学院生 (現: (株) JIN) (Graduate Student, Nagoya University, now JIN Co.)

* 3 名古屋大学大学院生 (現: 韓国 RIST 研究所) (Graduate Student, Nagoya University, now Research Institute of Industrial Sci. & Tech., Korea)

* 4 名古屋大学学生 (現: 日産自動車 (株)) (Student, Nagoya University, now Nissan Motor Co., Ltd.)

* 5 名古屋大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-8603)

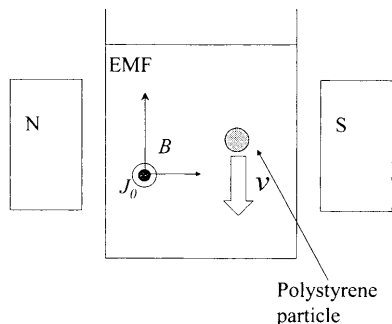


Fig. 1. Experimental apparatus for observation of colliding particles under electromagnetic force.

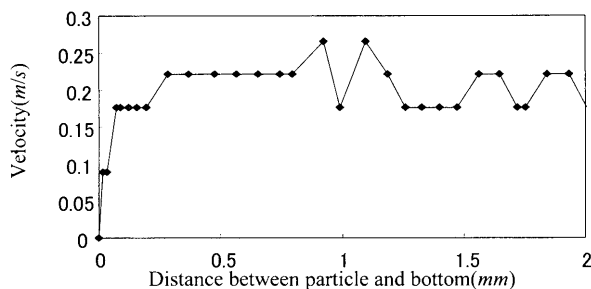


Fig. 2. Velocity of a particle approaching to bottom.

速度は急激に減衰することが分かる。窪田ら⁶⁾の研究によれば接近した2粒子に作用する電磁アルキメデス力は粒子間距離によってほとんど影響を受けないことが分かっており、この速度の減衰については流体力学的な詳細な検討が待たれるが、2粒子間に存在する流体の排出粘性抵抗に依るものと推察する。

2・2 振動電磁力下での粒子運動

粒子の運動方程式は以下のように表すことができる。

$$\frac{du}{dt} = \frac{F}{\rho} - \frac{18\mu}{d^2} u \dots\dots\dots(1)$$

ここで、Fは外力、ρは介在物の密度、dは介在物の直径、μは粘性係数である。定常状態での速度は(1)式の左辺を0とおいて

$$u = \frac{Fd^2}{18\mu} \text{ (ストークス則)} \dots\dots\dots(2)$$

と求まる。

直流電流と直流磁場を印加した状態では系内の電磁力分布により一方向の流動が生じる。いま思考対象系を単純化するために大小二つの粒子が同一の流れに乗った状態を考える。

(2)式から分かる通り大きい粒子の速度は小さい粒子のそれより大きいため、大きな粒子は小さな粒子を追い越す、すなわち衝突することになる。ところが2・1で述べたように、粒子の接近に伴って粒子速度が激減するため合体には長時間を要し、その結果、Fig. 3に示すように大粒

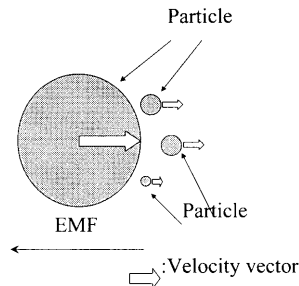


Fig. 3. Imaged view of behavior of particles before collision.

子の進行方向の前面に小粒子が集まるかたちが想定される。

一方、反転する電磁力を印加するとFig. 3の状態から逆方向の電磁アルキメデス力を受け粒子は逆方向に加速されつつ減速し、ついには移動方向を反転させる。以下に、磁気アルキメデス力が反転した直後から粒子の移動方向が反転するまでの粒子の移動距離を理論的に求める。電磁力が反転した直後の粒子の運動を考えると運動方程式は(3)式となる。

$$\frac{du}{dt} = -\frac{F}{\rho} - \frac{18\mu}{d^2} u \dots\dots\dots(3)$$

電磁力が反転したためにFの前にマイナス記号が付いている。(3)式を初期条件t=0においてu=Fd²/18μの下で解くと(4)式を得る。

$$u = \frac{Fd^2}{18\mu} \left\{ 2 \exp\left(-\frac{18\mu}{\rho d^2} t\right) - 1 \right\} \dots\dots\dots(4)$$

速度uが0になる、すなわち粒子が反転するまでに要する時間t₁は(4)式から(5)式となる。

$$t_1 = -\frac{\rho d^2}{18\mu} \ln \frac{1}{2} \dots\dots\dots(5)$$

粒子の位置xは初期条件t=0においてx=0であるとして(4)式を積分して求まる。

$$x = \frac{Fd^2}{18\mu} \left\{ \frac{-\rho d^2}{9\mu} \exp\left(-\frac{18\mu}{\rho d^2} t\right) - t + \frac{\rho d^2}{9\mu} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

(5)式を(6)式に代入することにより、電磁力が反転してから粒子の移動方向が反転するまでに粒子が動く距離x₁を見積もることができる。

$$x_1 = \frac{Fd^4 \rho}{324\mu^2} \left\{ 1 + \ln \frac{1}{2} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

(7)式によると、100 μmの粒子のx₁は5.77 μmとなる。

理論からも分かるように、大きい粒子程大きい慣性を持つため大きい粒子と小さい粒子の移動方向が異なる期間が

生まれる (Fig. 4の模式図参照)。この期間中には2粒子が並進中より大きな力が粒子間の流体に作用し流体の排出を促すことになる。すなわち、粒子の移動方向を反転させることによって粒子同士の合体が促進される可能性がある。

3. 実験

3.1 電磁力の印加時間を変えた実験

Al-Si合金を用い、初晶Siを介在物とみなし固液共存状態に保って電磁振動を印加させる実験を行った。この際、初晶Siはバルク金属に比べて電気伝導度が小さいため電

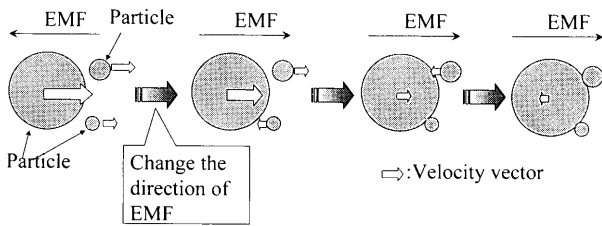


Fig. 4. Mechanism of coagulation of particles under electromagnetic vibration.

磁アルキメデス力 (斥力) を受けて振動する。この振動に伴う衝突・合体による粒子の粗大化を測定した。

実験装置の模式図をFig. 5に示す。内径11mm、深さ100mmのアルミナ管の底部に直径2mmの穴をあけ電極であるタングステン棒を挿入し固定した。次に、アルミナ管中にAl-20mass%Si合金 (液相線温度 685°C, 固相線温度 577°C) 約10g入れ、ヒーターにて試料を730°Cまで昇温させ完全融解させた後、ヒーターに印加した電流値を下げ冷却状態とした。690°Cになったところで初晶Siの微細組織を得るために交流電流20A (1Hz)と直流磁場(0.23T)を印加して溶湯に振動を与えた。次いで晶出Siの衝突・合体による粗大化を促進するために振動を与えつつさらに冷却し、所定温度 (今回の実験では680°C, 670°C, 660°C, 650°Cである) に到達後、電源を切り振動を停止させた。なお、振動を印加しない試料にも冷却速度を同じにするために電流のみは所定量印加した。690°Cから所定温度に冷却されるまでの振動印加時間をFig. 6に示す。所定温度に到達後、即座に試料をヒーターから取りだし所定時間空冷保持した後、水冷した。

取り出した試料の水平中央部を切断後、エミリー紙およ

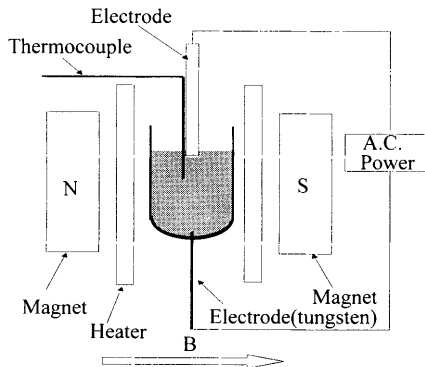


Fig. 5. Schematic view of experimental apparatus.

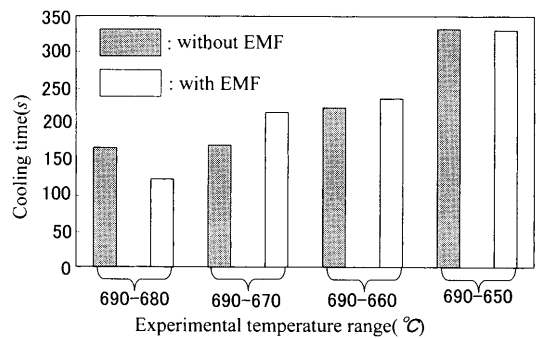


Fig. 6. Cooling time vs. experimental temperature range.

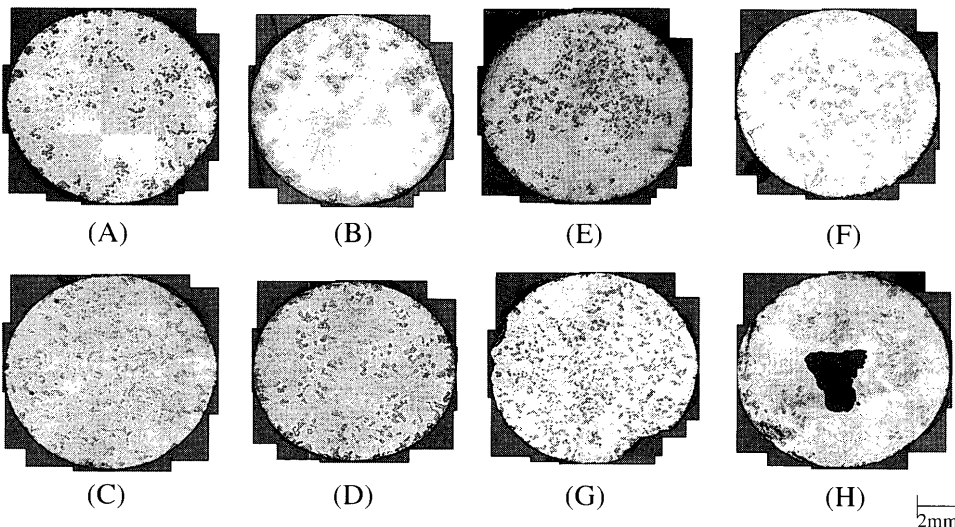


Fig. 7. Macrostructures of Al-Si alloy. (A) 690°C→650°C (without vibration), (B) 690°C→650°C (with vibration), (C) 690°C→660°C (without vibration), (D) 690°C→660°C (with vibration), (E) 690°C→670°C (without vibration), (F) 690°C→670°C (with vibration), (G) 690°C→680°C (without vibration), (H) 690°C→680°C (with vibration).

びアルミナ研磨剤によって研磨した組織写真を Fig. 7 に示す。初晶 Si の濃度が異なって見えるものがあるが、これは縦方向の断面組織観察から縦方向の偏析によるものと確認された。また、Si の粒径を見ると振動を印加させることにより粒子径の粗大化が目視で確認できる。コンピューター画像解析により求めた平均粒子径を Fig. 8 に示す。ここで用いた平均粒子径とは粒子の断面積に相当する円の直径である。このグラフからも粗大化が確認できる。また、振動終了温度を低くすると電磁振動の効果も大きくなることも分かる。これは、振動印加時間が長くなったためと考えられる。

各実験条件における粒径分布を Fig. 9 に示す。なお、曲線はガウス分布を仮定して画像解析結果に基づいて求めた。横軸は $20\mu\text{m}$ ずつ刻んだ粒子径の範囲を表し、縦軸はその範囲の中にある粒子個数を全個数で割った値である。振動を印加することにより大きなピークの山が崩れ粒径の

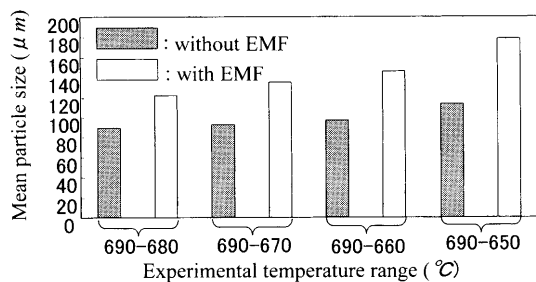


Fig. 8. Mean particle sizes obtained by electromagnetic vibration under different temperature ranges.

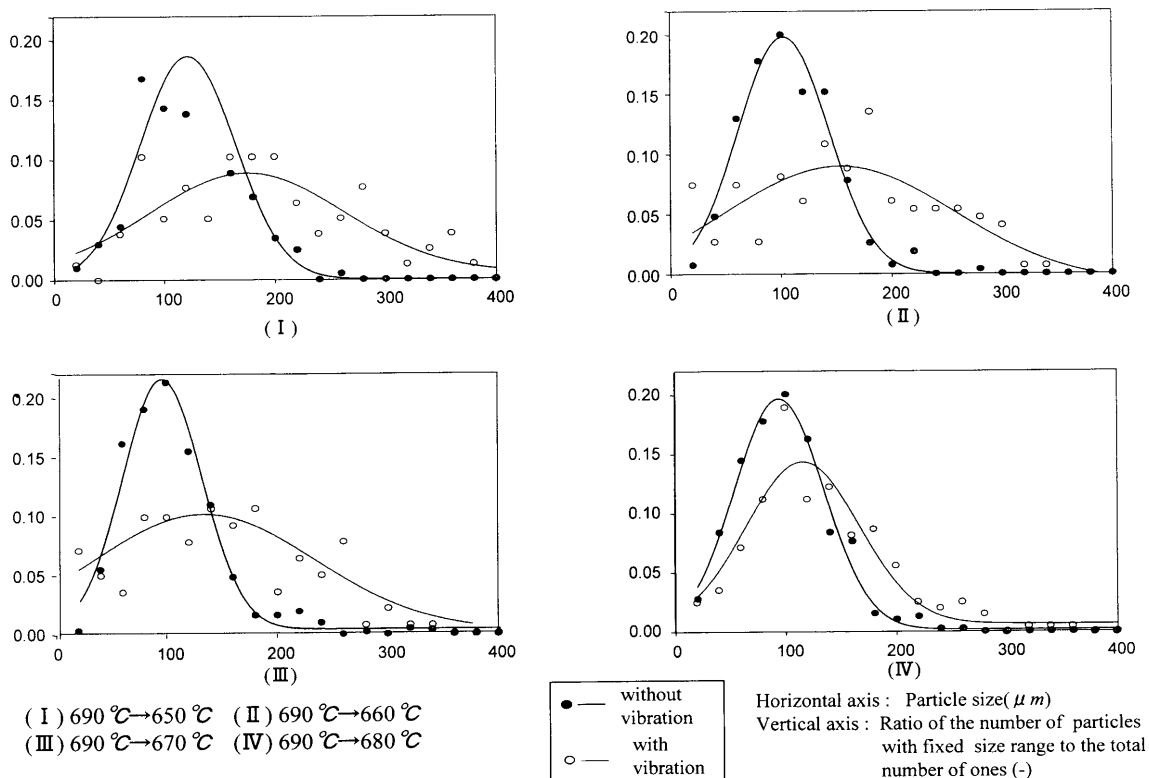


Fig. 9. Distribution of particle sizes.

拡大傾向にあることが分かる。

3.2 振動周波数を変えた実験

実験装置、実験方法は3.1節で述べた実験と同じである。周波数0.5 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 50 Hz, 100 Hzの交流電流を用いて実験を行った。また、比較のため、直流電流と直流磁場による0 Hzの実験も合わせて行った。電流値は20 A, 印加直流磁場は0.23 Tである。

試料水平中央部の組織写真を Fig. 10 に、画像解析によって求めた平均粒子径を Fig. 11 に示す。1 Hzを除いて粒径には大きな変化は見られない。Fig. 12 に印加周波数毎の平均粒子径分布を示す。1 Hz以外ではピークの山が振動無印加時のピークと同じ粒径サイズのところにあり、最適周波数の存在を窺わせる。

3.3 Al-Cu 合金中に分散させた Al_2O_3 介在物の凝集実験

Al-Si 合金に代えて $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ の溶融 Al-Cu50mass% 合金中に平均粒子径 $20\mu\text{m}$ の Al_2O_3 を5mass%濃度になるように添加し攪拌混合後 $590\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで温度を下げ、その温度で保持し Table 1 に示す条件で電磁振動を印加した。なお、この合金は Al_2O_3 の密度とほぼ同じになるように成分調整をしたものである。実験終了後の試料の断面を観察したところ底部の Al_2O_3 濃度が上部に比べ若干大きくなっていて、これは溶湯の密度が Al_2O_3 のそれと完全には一致していなかったためである。この試料水平中央部の介在物の状態を見るため前述と同様に切断し研磨したところの写真を Fig. 13 に示す。これによると磁場を印加してない試料 *d* に比べ磁場を印加した試料の介在物がより大きいことが分かる。また、

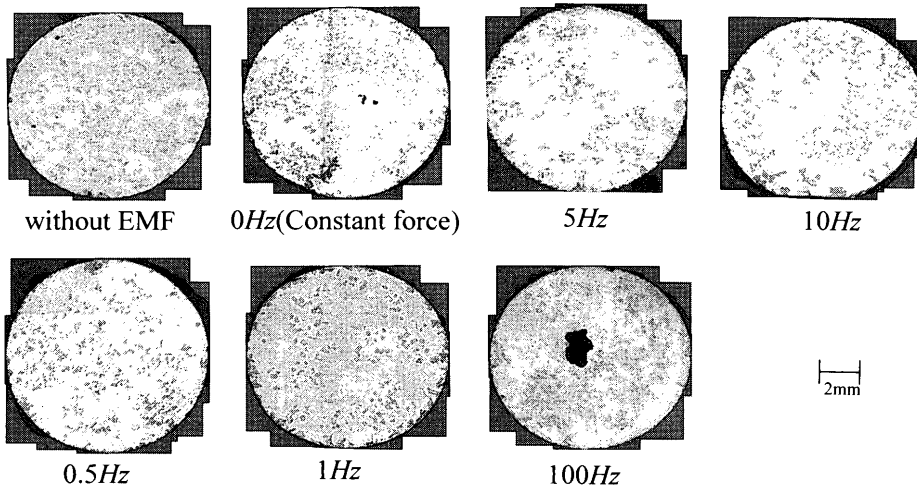


Fig. 10. Macrostructures of Al-Si alloy.

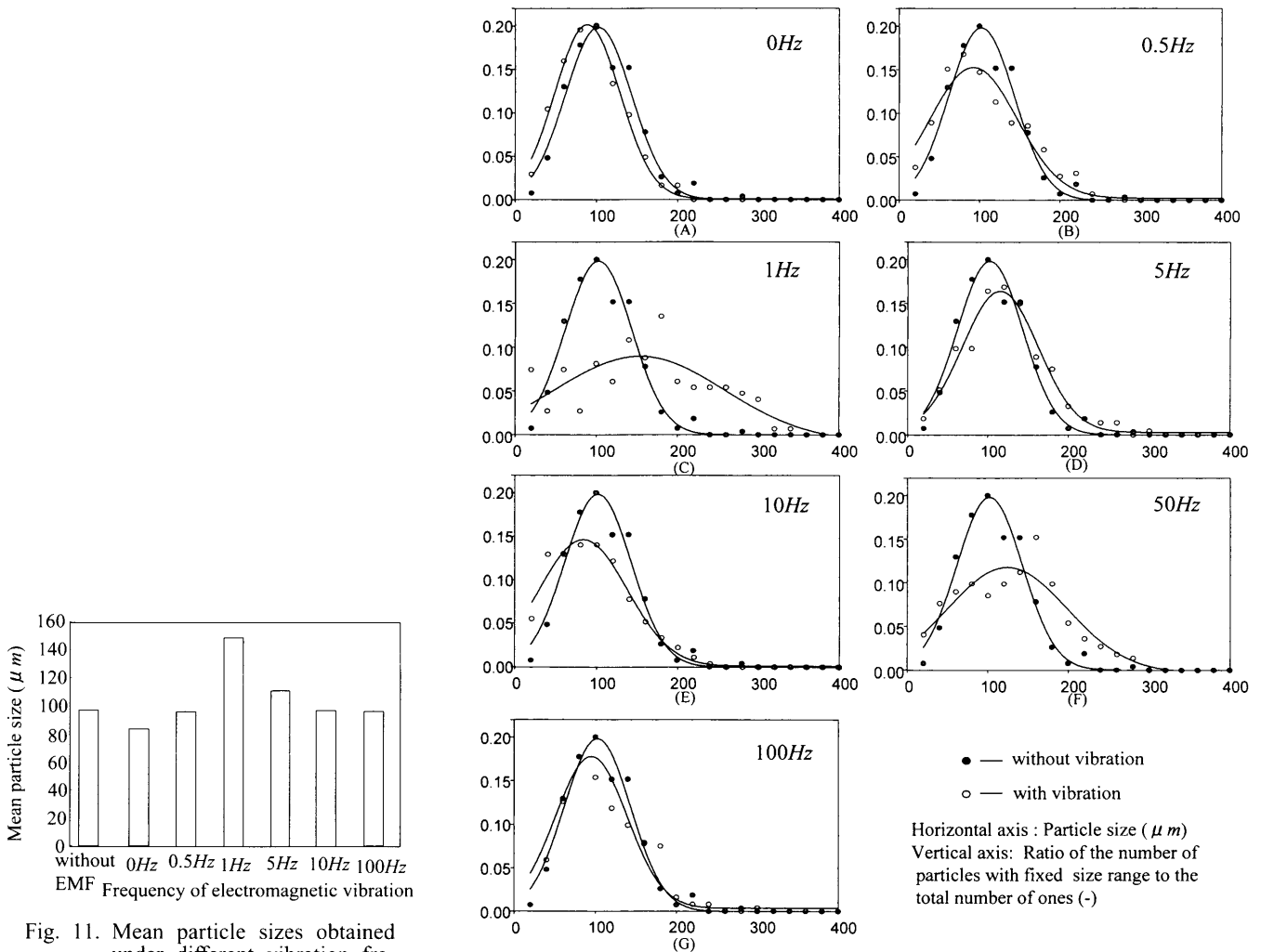


Fig. 11. Mean particle sizes obtained under different vibration frequencies.

Fig. 12. Distribution of particle size.

画像解析装置によって介在物粒子の面積を求め Fig.14 に示した。ここで、横軸に粒子面積、縦軸にはその範囲内にある粒子個数を全個数で割った介在物粒子の割合を示す。これより電磁振動を印加すると小さい粒子の存在割合が減少することが分かる。

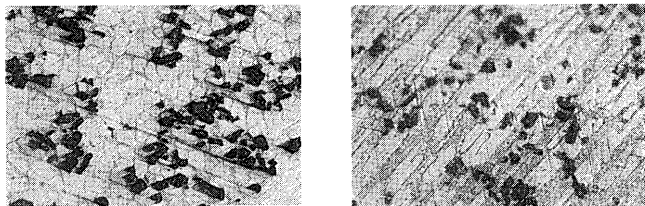
4. 考察

従来、介在物の合体機構として大きな粒子が小さな粒子に追い付けば凝集が起ると考えられてきたが、この考えが正しいとすると振幅が最も長い0Hz, すなわち直流電流

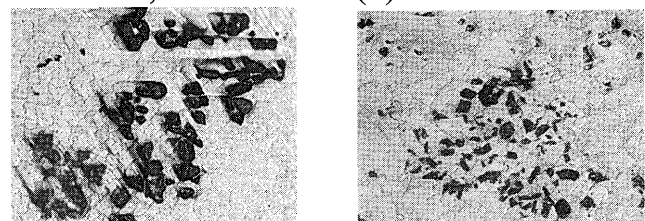
Table 1. Experimental conditions.

Sample number	Magnetic field(T)	Current(A)	Frequency(Hz)	time(min.)
a	0.23	30	1	10
b			0.5	
c			1	20
d	0			

(a) with vibration for 10min,1Hz (b) with vibration for 10min,0.5Hz



(c) with vibration for 20min,1Hz (d) without vibration



100 μ m

Fig. 13. Microstructures of Al₂O₃ in Al-Cu alloy.

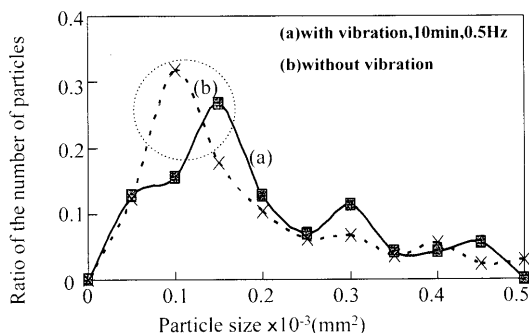


Fig. 14. Distributions of particle sizes of Al₂O₃.

を用いた時、粒子が最も粗大化するはずである。ところが、今回そのような結果とならなかったのは、電磁振動によって顕在化する慣性力の効果も凝集現象に関与していることが考えられる。反転流の場合に一方向流（直流電流と直流磁場）の場合より、介在物分布が大粒子側に移行した理由には先に述べた2粒子の並進運動から対向運動への移行が関係するのではないかと推察する。周波数が大きいと大粒子に近接する小粒子の数が減少する。一方、周波数が小さ

いと、この粒子の対向運動の頻度が少なくなる。すなわち、反転周期には合体を促進させたい介在物粒子径によって異なる最適周波数の存在が窺われる。なお、溶湯の流動はその方向を変える度に粒子の対向運動を必然的に生むことになり、介在物合体になんらかの寄与をなしているものと推論する。ここに提案する振動電磁力印加法は介在物の合体をより促進するため、人為的に粒子の対向運動を導入したものとと言える。

5. 結言

電磁振動により介在物を凝集させる目的で、水モデル実験とAl-Si系合金を用いて初晶Siを介在物に見立てたモデル実験およびAl-Cu合金中のAl₂O₃を介在物とした実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 2粒子の相対速度は粒径距離内に接近すると激減することを水モデル実験によって見出した。
- (2) 晶出過程に電磁振動を印加することにより晶出するSiの粒子径が粗大化することを平均粒子径、粒径分布の双方から明らかにした。
- (3) 印加する電流の周波数を変化させる実験を行い、最適周波数が存在する可能性を見出した。
- (4) Al-Cu合金中においてAl₂O₃介在物の凝集が電磁振動印加により促進されることを明らかにした。
- (5) 電磁振動に伴って生ずる大小粒子の対向運動が介在物の凝集現象に関与する可能性を示した。

本研究の一部は日本鉄鋼協会研究助成金および大韓民国RIST研究所からの支援を受けて行われたことを記し感謝の意を表します。

記号

- d : 介在物の直径 (m)
- F : 外力 (N)
- t₁ : 時間 (s)
- u : 速度 (m/s)
- x₁ : 移動距離 (m)
- μ : 粘性係数 (N s/m²)
- ρ : 介在物の密度 (kg/m³)

文 献

- 1) 浅井滋生：入門材料電磁プロセッシング、内田老鶴圃、東京、(2000)、51.
- 2) J.P.Park, K.Sassa and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 389.
- 3) F.Yamao, K.Sassa, K.Iwai and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 30.
- 4) Y.Tanaka, K.Sassa, K.Iwai and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **81** (1995), 1120.
- 5) N.El-Kaddah, A.D.Patel and T.T.Natarajan: *JOM*, **47** (1995) No. 5, 46.
- 6) S.Taniguchi and J.K.Brimacombe: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 24.
- 7) Y.Kubota, N.Yoshikawa and S.Taniguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 113.