高温環境における運動制御ツールとしての交流電磁場*

Alternating Electromagnetic Field as a Motion Control Tool

under High Temperature Environment

岩 井 一 彦**

IWAI Kazuhiko

丸 山 明日香***

MARUYAMA Asuka

Abstract Solute control in boundary layer under a high temperature environment is important from the industrial viewpoint, because mass transfer in boundary layer is often rate-determining step of chemical reactions and chemical composition of solidified alloy is determined by solute concentration in the vicinity of solid-liquid interface. An alternating electromagnetic force is one of candidates to control the mass transfer in the boundary layer of molten metals and alloys since it can directly excite a flow in it. The alternating electromagnetic force also has a potential to enhance the removal of inclusions in molten metal because increase in their collision efficiency is expected. This paper reviews the recent investigations on possibility of the alternating electromagnetic force as a tool of solute concentration control and inclusion removal. A model experiment using an electrolyte aqueous solution and electrodes having a shape with triangles aligning in line was carried out to clarify the effect of the alternating electromagnetic force on solute concentration distribution in the vicinity of the boundary between the electrode and the electrolyte aqueous solution. The alternating electromagnetic force imposition changed the solute concentration distribution because of the flow excitation. Then, it was applied to solidification of an alloy. Local eutectic area ratio of a Sn-10mass% alloy was dependent on the imposing period of the alternating electromagnetic force during its solidification. This suggests that the alternating electromagnetic force might control the solute distribution. Theoretical investigation on collision frequency among the inclusions using the alternating electromagnetic force suggests that this method is suitable for small inclusions collision and the collision frequency increases as frequency of the alternating electromagnetic force becomes low.

Keywords: Alternating electromagnetic force, Solute concentration control, Solidification, Boundary layer, Inclusion behavior

1. 緒 言

鉄鋼製造などに代表される高温環境での化学反応は化学反応律速ではなく物質移動律速となることが多く、精錬反応高速化のためには物質移動促進が重要となる。物質移動は移流と拡散とで決定されるが、拡散係数は物性値なので、能動的な物質移動制御を行うためには移流の制御が必要である。一方、物質拡散係数に対する運動量拡

散係数の比であるシュミット数の値は、液体金属では1よりはるかに大きくなる。すなわち、固液界面近傍における濃度境界層は速度境界層より薄くなる。従って、速度境界層内に存在することとなる濃度境界層の攪拌は、バルク流速よりも流速の遅い速度境界層内での移流現象により行われる。物質移動を促進するためにはバルク流速を高速化すれば良いが、耐火物の溶損などの生産性

* 2016. 8. 9 受付

** 北海道大学大学院工学研究院材料科学部門 〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目

E-mail: iwai@eng.hokudai.ac.jp

*** 北海道大学大学院工学院材料科学専攻、大学院生

低下や品質低下を招く。目的が濃度境界層での流動制御ならば、濃度境界層内の流体に直接不均一外力を与えれば良い。合金の凝固においても、固液界面の溶質濃度によって析出固相の溶質濃度が決定されるので、界面近傍の濃度制御はきわめて重要である。しかしながら、高温環境下での外力印加方法は自ずと制限される。我々が着目したのは電磁気力である。静磁場、交流磁場、あるいは移動磁場は電磁ブレーキや電磁攪拌として既に鉄鋼などの製造現場で使用されている。また、電気炉では通電によりスクラップ溶解がなされている。一方、局所的な対流を促進させるための参考例として、ストークス境界層がある。ストークス境界層は、固体に与えた振動が固液界面を通して液相に伝達される領域であり、その領域は周波数により可変である。そこで、我々は高温液体の固液界面近傍での運動励起を交流電磁場によって行う溶質濃度制御方法を提案し、その基礎研究を行ってきた。

銅に含まれる酸化物などの介在物は割れの起点になるなど、製品品質を低下させるのでその除去が望まれている。一般に酸化物の密度は溶銅の密度より小さいので、介在物は浮上分離されることとなるが、小さな介在物の浮上速度は遅く、その除去は困難である。小さな介在物を除去するための方法として、衝突・凝集により、みかけの介在物直径を大きくする方法が挙げられる。上述の交流電磁気力を水平方向に印加すれば、介在物同士の間で衝突頻度の向上が期待される。

そこで、本稿では、交流電磁気力を利用した溶質分布制御や介在物の除去など、我々が最近行った研究を紹介する。

2. 交流電磁気力による溶質分布の制御

2.1 局所攪拌効果の観察

実用合金が凝固するときの固液界面は平滑ではなく、デンドライトと呼ばれる凹凸形状になる場合が多々みられる。そこで固液界面が凹凸形状を有しているときに、交流電磁気力が界面近傍の溶質濃度に与える影響について、導電性水溶液を用いてモデル実験を行った[1]。実験装置は以下の通りである。モデル液相として採用した硫酸銅と硫酸の混合水溶液でアクリル容器内を満たした。アクリル容器の下部には山形が連なる形状の銅電極を配置し、上部には板状の銅電極を設置して、

それらの間で通電を行いつつ、水平方向磁場を印加することで、電磁気力を水溶液内に励起させた。そして、容器内の様子を側面からカメラで観察した。通電に伴い下部の山形電極では銅の溶解（析出）反応が起きるので、その近傍では銅イオン濃度、すなわち明度が変化する。そこで、得られた画像データから、電極から 100 μm 程度離れた位置における明度の経時変化を求めた。その結果を Fig. 1、Fig. 2 に示す。Fig. 1 は山形電極間に形成される谷の左側、Fig. 2 は谷の右側における明度の経時変化である。それぞれの図における太線は直流電流のみを通電したときの明度であり、細線は直流電流に交流電流を重ねて通電したときの結果である。いずれも通電量は同一とした。通電開始から明度は低下しはじめるが、これは銅イオンの析出によるものである。谷の左右にかかわらず、交流電流を重ねると明度も交流電流と同一周期で振動した。谷の左側（Fig. 1）では、交流電流を重ねることで明度低下が抑制された。すなわち、銅イオン濃度の増加が抑制された。これは以下の通り説明される。硫酸と硫酸銅の混合水溶液の電気伝導度は電極として用いた銅の電気伝導度より小さいので、下部の山形電極を流れる電流はその頂点に集中する。従って、その近傍での銅イオン濃度は増大し、密度差対流により下降流が生じる。一方、谷の左側斜面では下降流を抑制する向きに電磁気力が作用するので、谷の底部では銅イオン濃度が薄く頂部では濃い状態が形成される。Fig. 1 の計測位置は頂部と同じく銅イオンが濃化した領域内であるが、希薄領域との境界近傍なので、交流成分印加により濃化領域と希薄領域との局所的な攪拌が起き、明度低下が抑制されたと解釈される。一方、谷の右側斜面における交流電流重畳時の明度低下は、別の原理により起きる。交流電流と直流電流の向きが揃ったときには、山形電極頂点近傍で銅がイオンとして激しく溶解するとともに、山頂から谷の右側斜面へ向かって銅イオンの濃化水溶液が流れ込む流れが励起されて、明度低下が起きたものである。すなわち、交流電流の一周期のうちのある時間範囲、電極の先端という局所的な領域で、銅イオン溶解が増幅され、それが他の領域に伝播して起きた現象である。

以上のことから、交流電磁気力を印加することで固液界面近傍では局所攪拌による濃度変化が

Fig.1 Relative brightness change with time in the vicinity of left side slope [1].

Fig.2 Relative brightness change with time in the vicinity of right side slope [1].

起きること、また、局所時間、局所領域で増幅される現象により、直流電磁気力を印加するときとは異なる現象が起きること、が明らかとなった。

なお、凝固界面近傍での流動と溶質移動に関する理論解析[2]や数値解析[3]も行われている。

2.2 凝固プロセスへの適用

交流電磁気力印加が固液界面近傍での溶質濃度に影響を与えることは上述のモデル実験から明らかとなった。そこで、次に低融点合金である Sn-10%Pb 合金に交流電磁気力を印加しつつ凝固させて、共晶相割合の分布を調査した[4]。成分調整した合金をセラミックス容器に入れて下から上へ向かって凝固させつつ、水平方向静磁場の印加と鉛直方向交流電流の通電を同時に行い、交流電磁気力を試料内に励起させた。作製した試料は、凝固初期と後期に交流電磁気力を印加した試料 (sample A)、凝固初期のみに交流電磁気力を印

加した試料 (sample B)、電磁気力を印加せずに凝固させた試料 (sample C) の三つである。本合金は典型的な共晶系合金であり、まず Sn リッチな初晶が晶出するので、凝固が進行するにつれて、また初晶の Pb 濃度が低いほど、液相中の Pb 濃度が高くなる。そして、共晶凝固が開始するときの液相中の Pb 濃度が高いほど、共晶割合が増加する。試料下部から上部へ向かっての共晶割合の変化を Fig. 3 に示す。試料底部から 10 mm 弱までの範囲に着目すると、交流電磁気力を印加しなかった sample C の共晶割合は凝固初期に交流電磁気力を印加した sample A や sample B に比べて高い。凝固後期に交流電磁気力を印加しなかった sample B や sample C は、そこから 20 mm 付近まで共晶割合が増加した一方、凝固後期に交流電磁気力を印加した sample A の共晶割合は大きくには横ばいに推移している。この結果は、以下の通り解釈される。

Fig.3 Distribution of eutectic area ratio[4].

固相から Pb が排出されることで密度が増加した液相は下部に沈降するので、共晶割合の増加につながる (sample C の底部)。しかしながら、交流電磁気力の印加は、Pb が濃化した液相と Pb が濃化していない液相との搅拌を招くこととなり、試料底部の共晶割合は大きくならない (sample A や sample B の底部)。試料下部から 10 mm 程度及びその上部では、凝固後期での交流電磁気力印加の有無により液相中 Pb の濃化が抑制された試料 (sample A) と濃化が進行した試料 (sample B や sample C) とで差が出たと説明される。すなわち、交流電磁気力印加により、固液混相状態の試料内に流動が誘起されたために、共晶割合の分布が変

化したものと理解される。

3. 交流電磁気力による介在物間衝突頻度促進

3.1 原理および衝突タイプの分類

ここでは、溶鋼に含まれる代表的な介在物の一つであるアルミナ介在物を対象とする。溶鋼中介在物の浮上速度は介在物直径の2乗に比例するため、直径の異なる介在物間で浮上速度差による衝突が起こりうる。この衝突を差動衝突とよぶ。直径の異なる2個の介在物間の衝突頻度は、Fig. 4(a)に示す、直径が介在物の直径の和、高さが浮上速度差の円筒体積に比例する。介在物に対し、水平方向の交流電磁気力を印加することで、Fig. 4(b)のとおり、介在物の通過領域は振幅分だけ増加するので、介在物間衝突頻度は促進される[5]。これが、交流電磁気力を水平方向に印加することによる、介在物間の衝突・凝集頻度向上の原理である。

Fig. 4 Enhancement of collision frequency by imposing alternating electromagnetic force; (a) volume in which inclusion of diameter D_i collides with inclusion of diameter D_j per unit time by buoyancy force, (b) extension of volume by horizontal alternating electromagnetic force[5].

単一介在物の振動の駆動力は交流電磁気力であり、抵抗力は粘性抵抗力、バセット力、慣性力(付加質量による力および介在物の慣性による力)である。介在物振動の最も支配的な抵抗力が粘性抵抗力となる領域を粘性抵抗力支配領域、バセット力となる領域をバセット力支配領域、慣性力となる領域を慣性力支配領域とそれぞれ分類し、これらの領域を介在物直径および交流電磁気力の周波数の関数として Fig. 5 [6] に示す。粘性抵抗力支配領域や慣性力支配領域では、介在物振動の

抵抗力のうちバセット力の占める割合は粘性抵抗力や慣性力よりも小さいものの、バセット力が全く働かないわけではない。例えば、粘性抵抗力支配領域において、直径が限りなく小さく小さく周波数が限りなく低い条件では粘性抵抗力のみが介在物振動の抵抗力として働き、介在物直径や周波数の増加とともに、バセット力の占める割合は増加する。

Fig. 5 Dominant resistance force acting on Al_2O_3 inclusions in molten steel[6].

Table 1 Combination of dominant resistance forces acting on two inclusions[6].

		<i>j</i> -particle		
		Friction drag force	Basset force	Inertial force
<i>i</i> -particle	Friction drag force governing region	①Friction – Friction (F-F)	—	—
	Basset force	②Basset – Friction (B-F)	③Basset – Basset (B-B)	—
	Inertial force	④Inertial – Friction (I-F)	⑤Inertial – Basset (I-B)	⑥Inertial – Inertial (I-I)

Fig. 5 から分かるとおり、周波数が一定ならば、介在物直径によって支配的な抵抗力は決まる。すなわち、同一溶鋼中に存在する直径の異なる2個の介在物に対し、同一周波数の交流電磁気力が同時に働く場合の介在物間衝突は、各介在物振動の

支配的な抵抗力の組み合わせの違いにより、Table 1 に示す 6 つの衝突タイプに分類される。そこで、介在物間衝突頻度に及ぼす交流電磁気力の周波数および介在物の影響について、介在物振動の抵抗力と合わせて、次の節で述べる。

3.2 介在物間衝突頻度に及ぼす周波数、直径の影響

交流電磁気力を印加しない場合の介在物間衝突頻度（差動衝突の頻度）に対する、交流電磁気力を印加した場合の介在物間衝突頻度の増加率を求めた[6]。直径の異なる 2 個の介在物のうち大きい介在物の直径を $D_i=1000\text{ }\mu\text{m}$ とし、交流電磁気力の周波数を $f=0.1, 0.5, 2, 50\text{ Hz}$ とした場合の交流電磁気力印加による介在物間衝突頻度の増加率を、小さい介在物直径 D_j の関数として Fig. 6 に示す。破線は、2 個の介在物直径 D_i, D_j を限りなく小さく、周波数 f を限りなく低くした際の衝突頻度増加率の近似値である。この近似が成り立つ条件とは、前述の通り、粘性抵抗力のみが介在物振動の抵抗力として働く条件である。衝突頻度の増加率は、周波数 f の減少あるいは小さい介在物直径 D_j の減少とともに増加する。そのため、Table.1 に示した 6 つの衝突タイプの中では、①粘性 - 粘性型の衝突衝突で最も衝突頻度増加率が高く、⑥慣性 - 慣性型の衝突で最も低くなる。さらに、粘性抵抗力のみが介在物振動の抵抗力として働く、直径が限りなく小さく、周波数が限りなく低い条件で、衝突頻度増加率は最大となる。

交流電磁気力の周波数を $f=0.5\text{ Hz}$ とし、大きな介在物の直径を $D_i=10, 100, 1000\text{ }\mu\text{m}$ とした時の衝突頻度増加率を、小さい介在物直径 D_j の関数として Fig. 7 に示す。この周波数では、いずれの条件も①粘性 - 粘性型の衝突となる。破線は、Fig. 6 における破線と同様、粘性抵抗力のみが介在物振動の抵抗力として働く条件に対する近似値である。大きな介在物直径 D_i の減少により衝突頻度増加率は増加する。また、Fig. 6 と同様、粘性抵抗力のみが介在物振動の抵抗力として働く場合に衝突頻度増加率は最大になる。

以上をまとめると、交流電磁気力印加による介在物間衝突頻度は、(1) 2 個の介在物直径がいずれも小さい場合ほど、(2) 低周波条件ほど、良く促進されるといえる。すなわち、介在物振動の抵抗力のうち、粘性抵抗力の占める割合が大きくな

Fig. 6 Increasing ratio of collision frequency function among Al_2O_3 inclusions in molten steel and combination of dominant resistance forces[6].

Fig. 7 Effect of large particle diameter on increasing ratio of collision frequency function among Al_2O_3 inclusions in molten steel [6].

る条件ほど、交流電磁気力印加による衝突頻度増加率は高くなる。

4. 結 言

本解説は、鉄と鋼、第 102 巻 3 号、特集号「電磁振動印加時の物理現象」に掲載された論文の内容の一部をまとめたものである。興味があれば、是非とも原著に当たっていただきたい。本解説が、当研究分野について広く知って頂くのに役に立てば幸いである。

参考文献

- [1] Yokota, T., Maruyama, A., Yamada, T. and Iwai, K., Direct Observation of Concentration Boundary Layer Formed in the Vicinity of Anode Electrode under Imposition of Vibrating Electromagnetic Force, *Tetsu-to-Hagané*, Vol. 102 (3), 119-126 (2016).
 - [2] Ueno, K., Iwai, K. and Shimasaki, S., Dimensionless Parameters Characterizing Oscillating Flows of Molten Metal Driven by Electromagnetic Force, *Tetsu-to-Hagané*, Vol. 102 (3), 134-140 (2016).
 - [3] Ueno, K., Natsume, Y., Shimasaki, S., Iwai, K. and Ohsasa, K., Numerical Study of Oscillating Melt Flows and Its Solute Transport Driven by Electromagnetic Force around Dendrite, *Tetsu-to-Hagané*, Vol. 102 (3), 141-150 (2016).
 - [4] Murakami, F., Maruyama, A. and Iwai, K., Effects of Electromagnetic Vibration on the Macro Segregation of Sn-10 mass%Pb Alloy, *Tetsu-to-Hagané*, Vol. 102 (3), 164-169 (2016).
 - [5] Maruyama, A. and Iwai, K., Effect of Basset Force on Non-conductive Particle Motion in Electrically Conductive Fluid under Oscillating Electromagnetic Field, *Tetsu-to-Hagané*, Vol. 102 (3), 106-112 (2016).
 - [6] Maruyama, A. and Iwai, K., Enhancement of Collision among Non-conductive Particles in Electrically Conductive Liquid by Imposing an Oscillating Electromagnetic Field, *Tetsu-to-Hagané*, Vol. 102 (3), 113-118 (2016).
-