

研究会成果報告 - 11

# 電磁振動印加時の物理現象

Physical Phenomena under the Imposition of Electromagnetic Vibration

北海道大学  
大学院工学研究院  
教授 岩井一彦  
Kazuhiko Iwai

国立高専機構香川高専  
機械電子工学科  
准教授 嶋崎真一  
Shin-ichi Shimasaki

岩手大学  
理工学部  
教授 上野和之  
Kazuyuki Ueno

秋田大学  
大学院理工学研究科  
教授 大笹憲一  
Kenichi Ohsasa

秋田大学  
大学院理工学研究科  
准教授 棗 千修  
Yukinobu Natsume

大阪大学 大学院理工学研究科  
知能・機能創成工学専攻  
助教 柳楽知也  
Tomoya Nagira

北海道大学  
大学院工学院  
大学院生 丸山明日香  
Asuka Maruyama

## 1 はじめに

凝固組織は、冷却条件や固液界面近傍の液相濃度などによって変化する。液相中の溶質は拡散と対流により輸送されるが、前者を支配するパラメータである溶質の拡散係数は物性値なので、溶質の移動量はその分布（溶質勾配）と時間とで決まってしまう。一方、対流の大きさ、流動パターンを制御できれば、溶質輸送を制御しうる。熱エネルギーについても同様である。従って、液相の流動制御を通じて凝固組織制御が可能であり、その代表例が鉄鋼の連铸プロセスで使用されている電磁攪拌である。電磁攪拌は、非接触操作可能な電磁気力を用いて、高温液体である溶鋼に外力を加えることによりマクロスケールでの濃度場、温度場、速度場を制御するツールである。スケールをより小さくした流動を誘起できれば、濃度場、温度場を一段と精緻に制御できるばかりではなく、介在物などの第2相挙動を制御する新たなツールとなり得る。しかしながら、高温液体である溶鋼にミクロスケールの流動を付与する適切な方法はない。

一方、シュミット数は、濃度境界層厚みに対する速度境界層厚みの比を表す指標であるが、液体金属の値は100程度なので、一方向流れのときに固液界面近傍で形成される濃度境界層は速度境界層より薄くなる。しかしながら、振動を印加することで形成される速度境界層（ストークス境界層）は周波数が高いほど薄くなるので、固液界面近傍の溶質濃化領域内の攪拌効果が期待でき、その厚みを一段と薄くできる可能性がある。また、交流電流と静磁場とを重畳印加することで導電

体内に発生する交流電磁気力（電磁振動）を、凝固中に作用させることで合金の凝固組織が微細化された研究例もある<sup>1)</sup>。

そこで、電磁場、特に電流と磁場とを重畳して電磁振動を液相や固液界面近傍に印加したときに起きる物理現象を解明すべく、電磁振動印加時の物理現象研究会が設立された。本稿は、その一部をまとめたものである。

## 2 電磁振動印加下での第2相挙動

介在物を衝突・凝集させることで、浮上分離不可能な小さな介在物も除去可能となり、除去効率は向上する。溶鋼中で流動がなければ、直径の異なる介在物間の浮上速度差による衝突（差動衝突）が起こる。差動衝突の衝突頻度は、直径が介在物の直径の和、高さが介在物の浮上速度差となる円筒の体積に比例する（図1 (a)<sup>2)</sup>）。介在物に水平方向の電磁振動を印加することで、介在物の振幅分だけ通過領域は増大し、衝突頻度は促進される（図1 (b)<sup>2)</sup>）。そこで、電磁振動印加下における溶鋼中介在物挙動の解明および衝突頻度の評価を目的とし、モデル実験および理論解析を行った<sup>2,3)</sup>。

介在物の振動の駆動力は電磁気力であり、抵抗力は粘性抵抗力、球と周囲流体の慣性力、バセット力である。バセット力に対する粘性抵抗力の比を横軸、バセット力に対する慣性力の比を縦軸として、溶鋼 - アルミナ介在物系に対するこれらの値、及び近い条件である先行研究<sup>4,6)</sup>の値をプロットしたものが図2<sup>2)</sup>である。これらの先行研究は数値計算のみであったり、重力の影響を含んでいたり、不完全ではあるが、

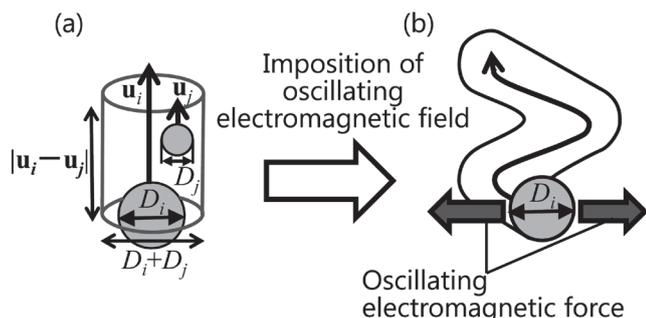


図1 電磁振動印加による介在物間の衝突頻度の促進<sup>2)</sup>  
 (a) 直径の異なる2個の介在物間の衝突が単位時間内に起こる領域  
 (b) 電磁振動印加による衝突領域の拡大

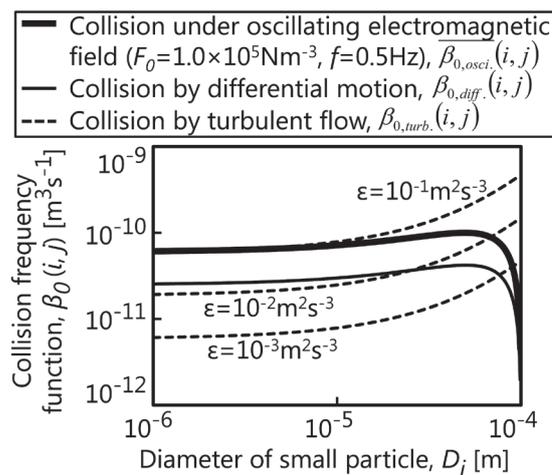


図3 アルミナ介在物間の、電磁振動印加、差動、乱流、それぞれによる衝突頻度関数<sup>3)</sup>

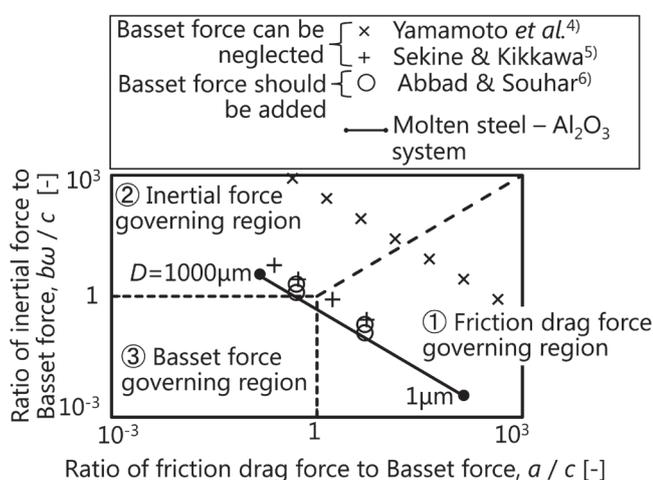


図2 アルミナ介在物に作用するバセット力に対する粘性抵抗力あるいは慣性力の比、および先行研究におけるバセット力省略の可否<sup>2)</sup>

バセット力を省略可能<sup>4,5)</sup>、省略不可能<sup>6)</sup>としている報告がそれぞれある。そこで、電磁振動印加下における溶鋼中の介在物挙動に対するバセット力の影響を明らかにするためにモデル実験を行ったところ、バセット力を省略すると、介在物の振幅を過大評価することが分かった。

次に、直径の異なる二つのアルミナ介在物間の衝突頻度関数を、バセット力を考慮しつつ求めた。電磁振動印加下における衝突、差動衝突、タンディッシュ中を想定した乱流(乱流エネルギー散逸速度  $\epsilon = 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ )による衝突を対象として、それぞれの衝突頻度関数を、小さい介在物直径の関数として図3<sup>3)</sup>に示す。ただし、大きい介在物の直径を  $100 \mu\text{m}$ 、電磁振動の周波数を  $0.5 \text{ Hz}$ 、介在物の単位体積当たりに働く電磁気力を  $10^5 \text{ Nm}^{-3}$  とした。電磁振動を印加することで差動衝突より衝突頻度関数は増加した。特に、介在物径が小さいときの衝突頻度関数は乱流による衝突頻度関数と同等か、それ以上に大きくなった。すなわち、この領域において電磁振動印加による、介在物間の衝突頻度促進効果が期待できる。

### 3 電磁振動印加下での流動と溶質濃度

電磁振動印加が、固液界面近傍における液相流動や溶質濃度に及ぼす影響を解明するために、実験、理論解析、数値解析を行った。実験では、可視化、通電のために透明かつ電気伝導性を有する硫酸銅と硫酸との混合溶液を模擬液相として採用した。容器の上部に平板上の銅製カソードを、下部に固相を模擬した凹凸形状を有する銅製アノードをそれぞれ配置して通電を行うとともに、静磁場を通電方向に垂直な方向に印加することで、液相内に電磁振動を励起した。その状態で下部のアノード近傍を直接観察して、流動や濃度境界層の評価を行った<sup>7)</sup>。電磁振動が濃度境界層付近の局所的な液相振動を励起するので、濃度境界層厚みは電流の交流成分と同一周期で変動し、その平均値は電磁振動を印加しないときに比べて増加、あるいは減少した。そして、その増減は、マクロ的な流動に依存した。この実験では、電磁振動が局所的な攪拌機能を有することが確認された。

一方、理論や数値解析による検討も行われた<sup>8,9)</sup>。凝固界面近傍の電磁振動による流動と溶質輸送の理論解析では、それらの特徴付ける無次元パラメータを抽出した<sup>8)</sup>。流動パターンや速度境界層厚み、デンドライト1次アーム間の流速などの考察を通して、電磁振動による流れによって溶質の輸送が促進されるための条件を見出した。これらの結果は、従前の合金による微細化条件<sup>1)</sup>をよく説明するものであった。

数値解析<sup>9)</sup>からは、ストークス層タイプ<sup>1)</sup>の速度境界層が層状構造を維持できずに、デンドライトアーム先端付近で渦を形成することがわかった。この半周期ごとに発生する渦が溶質を巻き上げることにより溶質輸送が促進される。図4<sup>9)</sup>に示した典型的な条件においておおむね5倍の溶質輸送促進が

達成された。電磁振動による溶質輸送促進効果を得るためには1次アームレイノルズ数 $Re_1$ は大きいほど効果的であり、少なくとも $Re_1 = 14$ 程度が必要であった。一方、1次アームウオマスリー数 $Wo_1$ には $Wo_1 = 9$ 近辺に最適値があり、大き過ぎても小さ過ぎてもいけないことが明らかになった。これはデンドライトアームのスケールと速度境界層厚みとの比を適度な値に維持することに対応している。この最適条件で振動による流れを駆動するためには、使用する周波数はターゲットにするデンドライトアーム間隔の2乗に反比例する値に設定する必要がある。これらの特性は、上述の理論解析<sup>8)</sup>と矛盾しない結果であった。

## 4 電磁振動印加下での凝固

ここでは、凝固に関する数値計算結果と実験結果について述べる。まず、1次元セルオートマトン法を応用して、合金の一方向凝固過程で生じる溶質再分配と凝固後のマクロ偏析に及ぼすミクروسケールの流動の影響を、乱流混合拡散係数を用いることにより検討した<sup>10)</sup>。対象とした合金はオーステナイト単相で凝固するFe-0.6mass% Cで、Cの固相内拡散が速いので固相内の拡散も計算した。乱流混合拡散係数の与え方として「マイクロ流動」と「マクロ流動」の二つの条件を設定した。「マイクロ流動」は凝固遷移層内まで等しく流動が生起する状態を想定し、バルクの液相内と、凝固遷移層内の液相領域で等しく一定値の乱流混合拡散係数を適用した。「マクロ流

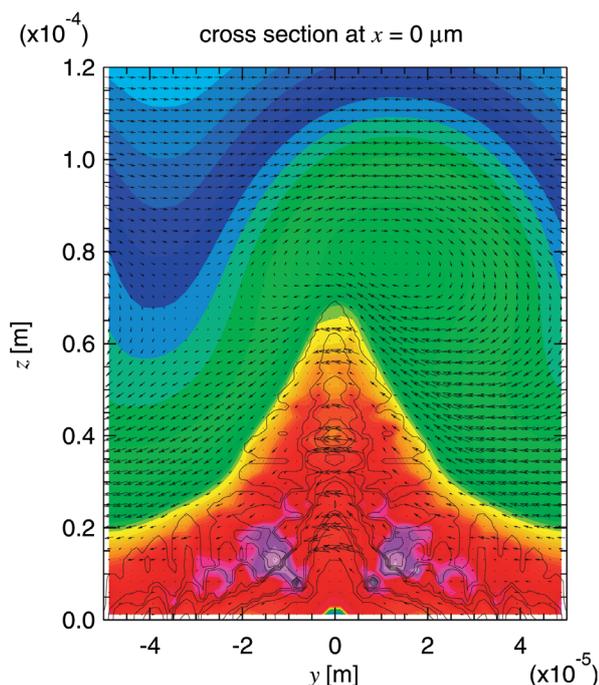


図4 溶質の質量分率と速度の分布<sup>9)</sup>

動」では通常の電磁攪拌による流動を想定し、バルクの液相内では均一に乱流混合拡散係数を適用し、凝固遷移層内では直線的に値が減少して流動限界固相率の位置で分子拡散係数と等しくした。その結果、マクロ流動、マイクロ流動どちらも顕著なマクロ偏析が生成したが、マクロ偏析がより顕著だったのはマイクロ流動の方であった。

次に、固液界面近傍の局所的な溶質移動を考慮した固液界面局所流動モデルを考案して、それとデンドライト成長のフェーズフィールドモデルを組み合わせた数値計算を行い、電磁振動と凝固組織形成の関係について考察した<sup>11)</sup>。本研究で考案した固液界面局所流動モデルは、フェーズフィールドの固液界面領域内で固液界面の接線方向に時計回りの流れを一定の外力により発生させるものである。固液界面局所流動加速度の大きさ ( $a_{local}$ ) を与えることで、図5<sup>11)</sup>のようにデンドライト形状に沿った時計回りの流れが発生し、 $a_{local}$ の増加に伴いデンドライト形態が等軸晶から粒状晶へと変化した。これは、固液界面近傍の局所的な溶質移動によってデンドライト先端の濃度境界層が厚くなり、成長速度が低下した結果である。従って、強制対流のようなマクロスケールの流動が無くても、電磁振動が固液界面近傍の局所的な溶質輸送を起こせ

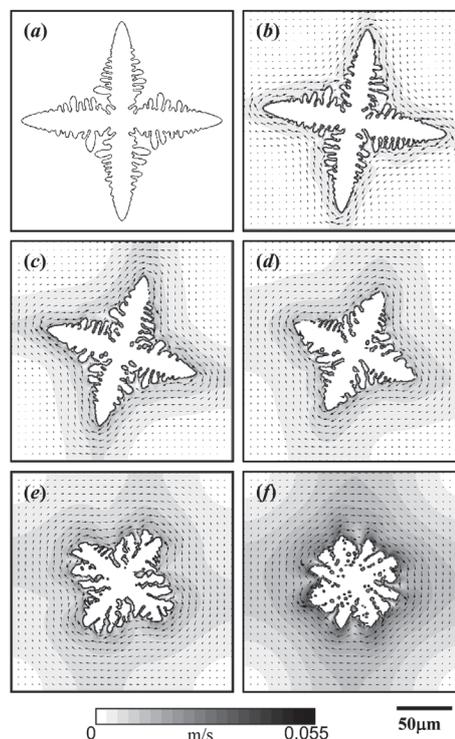


図5 局所流動を誘起する加速度を変化させたときのデンドライト形態と周囲の流速分布<sup>11)</sup>  
 (a) 加速度なし,  
 (b)  $a_{local} = 0.5 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ ,  
 (c)  $a_{local} = 0.8 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ ,  
 (d)  $a_{local} = 1.0 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ ,  
 (e)  $a_{local} = 1.5 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ , and  
 (f)  $a_{local} = 2.5 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ .

ば、凝固組織形態は大きく変化する。さらに電磁振動が核生成やフラグメンテーションを促進すれば、従前の実験報告<sup>1)</sup>にあるような凝固組織の微細化も起こり得ると考えられる。

実験であるが、Sn-Pb系合金をモデル合金として電磁振動が偏析に与える影響について調査した<sup>12)</sup>。実験方法を以下に述べる。母合金を溶解した後、試料を下部から冷却・凝固させた。試料が所定の温度まで冷却された時点で、上下方向へ交流電流通電、および水平方向へ0.3 Tの静磁場印加を開始し、さらに低温の所定温度になった時点で電流、磁場の印加を停止することで、特定期間だけ試料内に電磁振動を励起させた。この手順で、電磁振動を凝固前期と後期の2回印加した試料、凝固前期のみに印加した試料、電磁振動無印加試料の三つの試料を作製した。電磁振動無印加試料は試料全体が柱状組織であったが、凝固前期のみに電磁振動を印加した試料、及び凝固前期と後期に電磁振動を印加した試料は、初期凝固部である試料下部で等軸晶が観察された。凝固が開始する試料底部においては、電磁振動無印加試料の共晶領域割合は電磁振動を印加した二つの試料と比べて多かった。これは、液相のPb濃化による重力偏析が電磁振動無印加試料では顕在化したものの、電磁振動を印加した試料では流動が誘起されたため、重力偏析が顕在化しなかったものと解釈される。試料高さ中央付近において、電磁振動を凝固前期のみに印加した試料の共晶割合は、電磁振動を前期と後期の2回印加した試料の共晶割合に比べて多くなっていたが、これも凝固前期のみに電磁振動を印加した試料では、印加終了後に重力偏析が起きたものと理解される。これらの実験結果などから、今回の実験条件における溶質移動可能な限界固相率は約0.7であると推察された。また、電磁振動は凝固後期においても溶質分布に影響を及ぼす可能性が示唆された。

## 5 超音波印加の効果

超音波は指向性を有し、外部から振動を所望の位置へ直接伝達可能である。局所的かつ瞬間的な高温高圧場が生じるばかりではなく、音響流や、マイクロジェットと呼ばれる微小スケールの高速噴流が発生するので、超音波印加は凝固組織の微細化、偏析の抑制、介在物の除去などの効果が期待され、古くから数多くの研究が行われてきている。ここでは、超音波印加が濃度境界層に与える効果、及び合金の凝固に与える効果のそれぞれについて直接観察を行った。まず、前者であるが、上述の「3. 電磁振動印加下での流動と溶質濃度」で述べた実験装置<sup>7)</sup>と類似の装置を用いて、固液界面近傍に形成される濃度境界層に与える超音波印加の効果について、電気化学的な水溶液系モデルを用いて調査した<sup>13)</sup>。その結果、超音波印加により発生したマイクロジェットが濃化液相をバル

クへ吹き飛ばすために、印加開始から数十ミリ秒という短時間で濃度境界層厚みが低減するものの、新たな定常状態に到達する時間は約0.5秒と相対的に長いことが明らかとなった。

次に、Sn-21mass % Bi合金を対象として超音波印加が凝固組織に与える影響について、放射光X線によるその場観察により調査した<sup>14)</sup>。柱状晶デンドライトの成長過程(図6(a)<sup>14)</sup>で、溶湯中に浸漬させたホーンを通して超音波印加を開始し、組織変化をリアルタイムで観察した。印加と同時に、デンドライトエンベロープ前方で循環する音響流が発生した。デンドライトエンベロープ近傍では、デンドライトの成長形態が、高次のアームの発達のないセルに近い形態に遷移し、この領域では、ほとんどデンドライトアームの溶断は起こらなかった。一方、固液共存領域では、一次、二次アームともに溶断が頻繁に起きていた(図6(b)<sup>14)</sup>)。特に、低温側から高温側に向かう流れが形成される下流側で溶断が顕著であったが、これは溶質濃度の高い液相が輸送され、局所的な再溶解が起こったものと判断された。また、音響流による流動だけでなく、数十Hzの低周波数でのデンドライトの振動も流動に寄与しており、デンドライトアームの溶断に影響を及ぼしていた。透過X線強度を利用した液相濃度、固相率分布(図6(c)、(d)<sup>14)</sup>から、固液共存領域において、低濃度の液相が流入する音響流の上流側では固相率が増加すること、高濃度の液相が流入する下流側では、デンドライトアームの溶断やチャンネル偏析の生成によって固相率が減少すること、が見て取れた。以上より、超音波印加によって誘

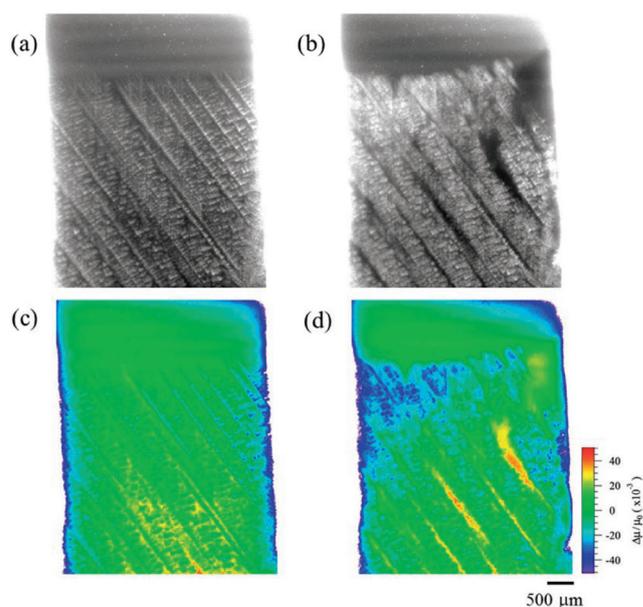


図6 超音波印加が凝固組織に与える影響<sup>14)</sup>  
 (a) 印加前のマイクロ組織  
 (b) 印加後22.182 sのマイクロ組織  
 (c), (d) (a), (b)に対応する液相濃度、固相率分布を反映したコンター図

起される音響流は凝固組織を著しく変化させることが明らかとなった。

## 6 おわりに

本稿で述べた成果は、現象に関する基礎的な知見であり、将来的に鉄鋼業の現場にて応用されることが望まれる。更なる現象の解明や、電磁場、超音波の印加方法の検討など、やるべきことは山ほどある。ここで得られた成果が、今後の研究の礎となり、さらに発展することを期待する。

最後となりましたが、研究会発足から終了まで高温プロセス部会の委員の方々を始め、大学、企業の多くの方々にご協力を賜りました。紙面を借りて御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) K.Iwai and T.Kohama : ISIJ Int., 50 (2010), 187.
- 2) 丸山明日香, 岩井一彦 : 鉄と鋼, 102 (2016), 106.
- 3) 丸山明日香, 岩井一彦 : 鉄と鋼, 102 (2016), 113.
- 4) 山本博美, 高曾徹, 速水洋, 平田敬一郎 : 九州大学機能物

質科学研究所報告, 8 (1994), 141.

- 5) 関根正人, 吉川秀夫 : 土木学会論文集, 387 (1987), 209.
- 6) M.Abbad and M.Souhar : Exp.Fluid, 36 (2004), 775.
- 7) 横田智之, 丸山明日香, 山田隆志, 岩井一彦 : 鉄と鋼, 102 (2016), 119.
- 8) 上野和之, 岩井一彦, 嶋崎真一 : 鉄と鋼, 102 (2016), 134.
- 9) 上野和之, 棗千修, 嶋崎真一, 岩井一彦, 大笹憲一 : 鉄と鋼, 102 (2016), 141.
- 10) 大笹憲一, 棗千修 : 鉄と鋼, 102 (2016), 157.
- 11) 棗千修, 大笹憲一 : 鉄と鋼, 102 (2016), 151.
- 12) 村上史展, 丸山明日香, 岩井一彦 : 鉄と鋼, 102 (2016), 164.
- 13) 山角宥貴, 山田隆志, 岩井一彦 : 102 (2016), 127.
- 14) 柳楽知也, 中塚憲章, 安田秀幸, 上杉健太郎, 竹内晃久 : 鉄と鋼, 102 (2016), 170.

(2016年6月10日受付)