

# 電磁力によって駆動される合金結晶近傍流れの数値解析

Simulation of MHD flows around solidifying alloy

- 上野 和之, 岩手大, 岩手県盛岡市上田 4-3-5, E-mail: uenok@iwate-u.ac.jp
- 柳 東秀, 岩手大院
- 棗 千修, 秋田大
- 嶋崎 真一, 香川高専
- 岩井 一彦, 北大
- 大笹 憲一, 秋田大

Kazuyuki UENO, Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka 020-8551, Japan

Dongsu YOU, Iwate University

Yukinobu NATSUME, Akita University

Shin-ichi SHIMASAKI, National Institute of Technology, Kagawa College

Kazuhiko IWAI, Hokkaido University

Kenichi OSASA, Akita University

Oscillating melt flows and its solute transport driven by electromagnetic force around dendrite is numerically studied. The electromagnetic force is obtained by static magnetic field and alternating electric field. Transport of solute in a metal alloy was calculated with the flow field. Influence of the electromagnetic oscillating flows on the solute transport is elucidated by the simulation results.

## 1. はじめに

固液界面における液相側の溶質濃度制御は多くのプロセスで生産性と品質の向上に寄与する。液相側物質移動が律速となるような固液反応では、液相溶質濃度を制御することが重要である。また、合金の凝固プロセスでは固液界面の液相側の溶質濃度が濃化するので、その溶質排出が凝固後のマイクロ組織に大きな影響を与える。

液相内の溶質は拡散と対流によって輸送される。拡散係数は温度や圧力により変化するものの、それらを積極的に変化させて溶質輸送を制御することは多くのプロセスにおいて困難である。一方、対流速度は外部から制御可能な変数なので、流動によって溶質輸送を促進するのが効果的である。

系の代表流速が dendrite の成長速度と同じ程度の大きさの場合、溶質拡散層に対する流動速度境界層の比はシュミット数で評価できる。一般に液体金属のシュミット数は数十から百程度であり、溶質拡散層は流動速度境界層に較べて薄い。このとき凝固界面近傍の溶質濃化領域（溶質拡散層と同じ）は流動速度境界層の底部に位置するため、そこでの流速は dendrite 成長速度よりもはるかに遅い。したがって、この状況では対流による溶質輸送は期待できない。拡散濃化領域の溶質を流動によってバルク領域に輸送するためには、流動速度を増加させる必要がある。しかしながら、バルク駆動による流動の高速化は、狙った溶質濃度制御領域の外にも影響を与える。素の結果、衝突流やせん断流による容器の溶損などを招く可能性がある。このため、バルク駆動による流速

の高速化は必ずしも得策ではない。

固液界面の固相側を界面と平行に振動させると、液相に振動剪断流が発生する。この振動流は、粘性によって流れと直角な方向に伝わる。この流れの境界層（ストークス層）の厚さは振動周波数の平方根に反比例するので、振動周波数によって液相の振動領域を制御することが可能である。溶鋼をはじめとする溶融金属のプロセスでは鋳

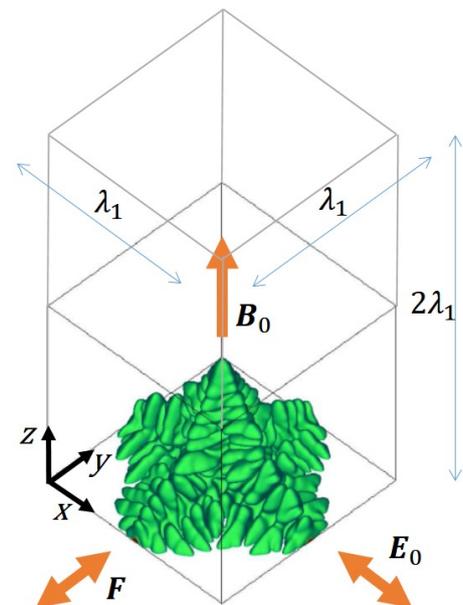


Fig. 1: Computation domain.

型や凝固シェルに振動を与えることは困難であるが、導電性なので磁場と電流との重畳印加によって熔融金属そのものに外力を及ぼすことができる。静磁場と交流電流との重畳印加をすれば、ストークス層に類似した振動せん断流れを駆動することができる。交流電流の通電領域を固液界面近傍に限れば、バルク領域に過度の流動を起こさずに電磁振動流によって溶質輸送を促進できる可能性がある。

岩井らの実験研究<sup>(1, 2)</sup>によって、電磁振動流が凝固組織を微細化させることが示されている。しかしながら、そのメカニズムは明らかではない。そこで、岩井らの実験を模擬する流動解析および溶質輸送解析<sup>(3)</sup>を行い、電磁振動流による溶質輸送の仕組みを探る。また、上野らの理論的研究<sup>(4)</sup>で示された効果的な溶質輸送を行うための条件を検証する。

## 2. 問題設定

Fig.1 に示すような領域を解析する。 $x$  方向と  $y$  方向には周期境界条件を与える。

デンドライト形状は、あらかじめフェーズフィールド法<sup>(5, 6)</sup>で計算したものを利用する (Fig.1)。ただし、この研究では結晶成長は考慮せずに、与えられた形状がそのまま維持されるものとして取り扱う。

一様な静磁場を  $z$  方向に印加する。その磁束密度の大きさを 1 T とする。空間的に一様で時間的に変化する交流電場を印加する。印加電場の向きは  $x$  方向である。電流密度はおおむね印加電場に比例する。しかし、固体金属の導電率と融液の導電率には差があるため、実際の電流密度ベクトルは印加電場ベクトルと完全には平行にならない。また、磁場下の融液に流れがある場合には電流密度分布は流れの影響を受ける。

直交する電流と磁場が存在すると導電体に電磁力が作用する。この電磁力によって融液に流れが生じる。その方向はおおむね  $y$  方向である。しかし、固液界面形状やその他様々な要因によってより複雑な流れとなるので、流速ベクトルには  $y$  成分だけではなく  $x$  成分と  $z$  成分も発生する。そのため、交流電磁力によって駆動される流れは 3 次元的な振動流となる。

電磁力で駆動された振動流によって溶質が輸送される。その効果を考慮した溶質濃度分布を得るために溶質濃度の非定常移流拡散方程式を解く。この研究では、流れは溶質濃度分布に影響を与えるが、溶質濃度は流れに影響を与えないものと単純化する。固液界面位置の変化は考慮しない。このような単純化を行ったとしても電磁振動流による溶質輸送の促進効果について一定の見通しを得ることは可能である。

デンドライトの複雑形状に対応するために直交カット

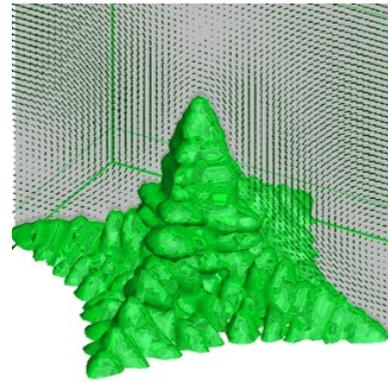


Fig. 2: Flow velocity around the dendrite.

セル法<sup>(7)</sup>を使って固液界面を判別した。液相中は空間 2 次精度の離散化であるが、固液界面を含むセルでは空間 1 次精度の離散化である。

## 3. 計算結果と考察

振動電磁力下の溶融合金の流動と溶質輸送の数値解析を行った。Fig.2 に計算結果の一例を示す。

溶質輸送が促進されるためには、ストークス層タイプの振動境界層を発生させる必要があることがわかった。このとき半周期毎に、デンドライト 1 次アーム (または 3 次アーム) の先端付近で剪断層から渦が発生する。これらの渦が溶質を巻き上げるので、溶質輸送が促進される。種々の条件の計算結果から、ウオマスリー数<sup>(4)</sup>には最適値があることが明らかになった。また、効果的な溶質輸送を達成するためには、1 次アームレイノルズ数<sup>(4)</sup>を 1 よりも大きくすることが必要であることがわかった。

## 参考文献

- (1) K. Iwai and T. Kohama: *Tetsu-to-Hagan*, **96** (2010), 637.
- (2) F. Murakami, A. Maruyama and K. Iwai: *Tetsu-to-Hagan*, submitted.
- (3) K. Ueno, Y. Natsume, S. Shimasaki, K. Iwai and K. Osasa: *Tetsu-to-Hagan*, submitted.
- (4) K. Ueno, K. Iwai and S. Shimasaki: *Tetsu-to-Hagan*, submitted.
- (5) S. G. Kim, W. T. Kim and T. Suzuki: *J. Crystal Growth*, **263** (2004), 620.
- (6) Y. Natsume, D. Takahashi, K. Kawashima, E. Tanigawa and K. Ohsasa: *ISIJ Int.*, **54** (2014), 366.
- (7) G. Yang, D. M. Causon and D. M. Ingram: *I. J. Num. Methods Fluids*, **33** (2000), 1121.