

# 移動固液界面を含む FZ 法融液の熱流動解析

## Numerical Analysis of Thermal Melt Flow with the Moving Solid-Liquid Interface in the FZ Method

河野 晴彦, 慶應大院, 〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1, E-mail: kohno@tana.mech.keio.ac.jp  
 棚橋 隆彦, 慶應大, 〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1, E-mail: taka@mech.keio.ac.jp  
 Haruhiko Kohno, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, 223-8522, JAPAN  
 Takahiko Tanahashi, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, 223-8522, JAPAN

In the FZ (floating zone) process, it is important to predict the interface shape to produce the single crystal of good quality. On this basis, two-dimensional numerical analysis of thermal melt flow is carried out by adopting the ALE (arbitrary Lagrangian-Eulerian) method for the moving solid-liquid interface with the GSMAC (generalized simplified marker and cell) algorithm. Under microgravity, the flow keeps axisymmetrical and has a steady state. However, a difference in shape is observed between two solid-liquid interfaces. It is found that the feed-crystal interface deforms larger than the crystal-melt one because of the effect of the convection.

### 1. 緒言

高品質な単結晶の育成を可能とする FZ 法が, 近年微小重力環境の有効利用技術の 1 つとして注目されている. FZ 法において形成される熔融帯は2つの自由界面, 即ち側面の「気液界面(自由表面)」, 上底面の「固液界面」に囲まれており, 製品の品質, 及び育成の安定性を考える時, これら2つの移動界面の取り扱いに注意を要することになる. 筆者らはこれまで, 微小重力環境における熔融帯側面の形状が, 高周波誘導加熱に伴う電磁力と, 自身の表面張力の大きさにより決定されるという観点から, 自由表面の変形を考慮した流動解析を行ってきた<sup>(1)</sup>. そこで本研究では, もう1つの移動界面である「固液界面」に焦点を当て, 加熱条件, 重力加速度の大きさ, 及び自由表面上の境界条件の差異に依存する界面形状の変化を調査する.

### 2. 解析モデル及び数値解析手法

本研究では, 単結晶, 多結晶の固相, 及びそれらの間に存在する熔融帯の3つを解析対象とし, 2次元空間において各領域に分布する物理量や相変化の計算を行う. 解析格子は四角形で, 要素分割数は x, y 方向に 34×100 とする. 尚, 変形は固液界面のみとし, 気液界面の変形は考慮しない. また, 本解析では交流磁場による誘導加熱の代わりに, 外部ヒーターから Gaussian 分布に従う熱が供給されるものとする.

熔融帯の対流と熱輸送を支配する連続の式, Navier-Stokes 方程式, 及びエネルギー方程式を以下に示す.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_m \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho_m \beta (T - T_m) \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T = \alpha_m \nabla^2 T \quad (3)$$

また, 単結晶-融液, 融液-多結晶の固液界面は, 以下に示す Stefan 条件により移動する.

$$\rho_m L V_n = k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial n} \quad (4)$$

これらの支配方程式の離散化には, GSMAC 有限要素法<sup>(1)</sup>を採用し, 移動固液界面に対しては ALE 法を適用する.

### 3. 解析結果

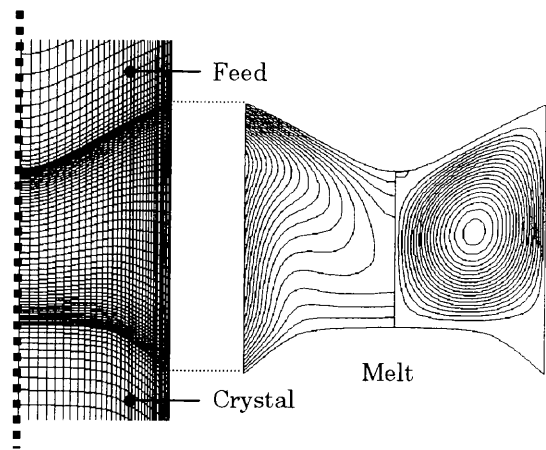


Fig. 1 Calculation grid for three parts and the distributions of the isotherms and the streamlines in the melt.

図1に, 単結晶(crystal), 融液(melt), 多結晶(feed)とそれらの移動固液界面を含む解析格子図, 及び融液部の等温線, 流線図を示す. 解析対象は微小重力下(0.1g)に置かれているものとし, 自由表面上の Marangoni 効果は考慮していない. また, 流れは層流, 軸対称を保つものとして解析領域は片側のみとする. 上下2つの固液界面の変形を比較すると, 単結晶-融液間よりも融液-多結晶間の方がより大きいことが判る. これは, ヒーターによる側面の加熱より生じた自然対流が, 自由表面近傍において高温の流体を上部へ移流させることに起因する. また, 融液内部の流れ場を見ると, 流線の分布から1つの大きな渦が形成されている様子を確認でき, 融液-多結晶界面近傍から下方へ向かう流れによって等温線が下向きに傾いている様子を見ることができる.

本解析で得られた固液界面の形状は, 異なる手法を適用した他者の解析結果<sup>(2)</sup>と定性的に一致することから, ALE 法を適用した本スキームの有効性を確かめることができる.

### 参考文献

- (1) 河野・棚橋, 機論, 67-658, B(2001), 1408-1415.
- (2) C.W. Lan, M.C. Liang, *J. Crystal Growth*, 208(2000), 327-340.