

## 242 3次元 Floating zone 内のマランゴニ対流に関する数値解析

The numerical simulation of the Marangoni convection in three-dimensional Floating zone

○水口尚(静大院) 鈴木貴弘(静大院) 正 岡野泰則(静大工)

Hisashi Minakuchi, Takahiro Suzumura, Yasunori Okano

Department of Materials Science & Chemical Engineering, Shizuoka University,

Johoku 3-5-1, Hamamatu 432-8561

### 【Introduction】

現在、電子産業用デバイスの基盤材料として、各種半導体バルク単結晶が広く用いられている。特に近年の大集積回路の発展に伴い、基盤材料は大口徑でより高品質なものが強く望まれている。この単結晶の作製法の一つとしてフローティングゾーン(FZ)法がある。この方法は、る渦と融液が接しないため、る渦材からの汚染が無い高品質な結晶が作製可能であるが、地球上では重力の影響により大口徑の結晶を作製することが難しい。そこで、大口徑の結晶作製には微小重力の利用が有効になるが、マランゴニ対流の影響がより顕著となり、結晶品質に種々の影響を及ぼすと考えられる。そこで本解析ではFZ法を模擬した3次元ハーフゾーン及びフルゾーン内に発生するマランゴニ対流に関して数値解析を行った。

### 【Numerical Method】

解析基礎式は以下に示す連続式(1)、Navier-Stokes式(2)、エネルギー方程式(3)である。これらの式を無次元化し、拡散項に中心差分、対流項に3次元風上差分を用いHSMAC法により解析を行なった。解析モデル図をFig.1に示す。解析は3次元円筒とし、物性値にはInSb、温度の初期値は最低温度 $T_c[-]$ で均熱とした。なお、本研究で使用する無次元数の定義を(6)(7)に示す。

1) ハーフゾーンモデル (Fig.1(a))

温度境界条件は、上部に最高温度 $T_H[-]$ で加熱、下部に最低温度 $T_c[-]$ で冷却、側面の自由界面温度を断熱とした。

2) フルゾーンモデル (Fig.1(b))

温度境界条件は、上部、下部を最低温度 $T_c[-]$ に保ち、側面の自由界面には(4)(5)で表される $T_a(z)$ で外部より加熱することを想定した。

基礎方程式

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} - \vec{g} \beta_T \Delta T \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) T = \alpha \nabla^2 T \quad (3)$$

境界温度条件(full-zone)

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -Bi(T - T_a(z)) \quad (4)$$

$$T_a(z) = -4(T_H - T_c)(z - \frac{1}{2})^2 + T_H \quad (5)$$

無次元数

$$Ma = \frac{\Delta T L}{\mu \nu} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right) \quad (6)$$

$$Bi = \frac{hL}{\lambda} \quad (7)$$

### 【Results and Discussion】

Fig.2にハーフゾーンモデル( $Ma=1 \times 10^4$ )における60[s]後の速度分布と温度分布を示す。(a)が $r-z$ 平面上( $\theta=0$ )の温度分布(左側)と速度分布(右側)、(b)が $r-\theta$ 平面上( $z=0.5$ )の速度分布を示している。マランゴニ対流の影響により自由界面付近で強い

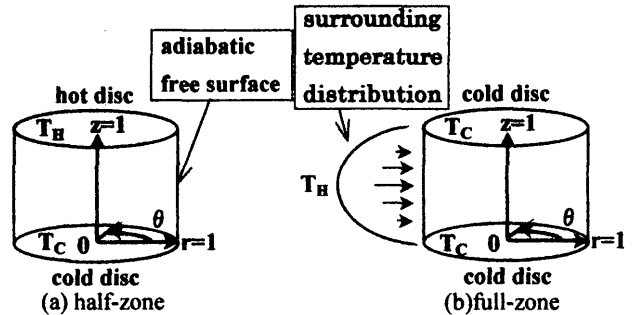


Fig.1 Configuration for the Analysis

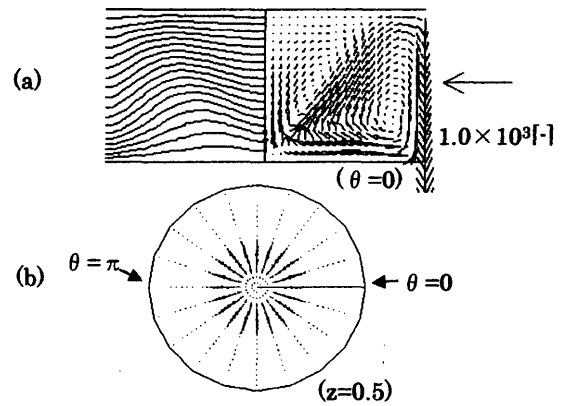


Fig.2 Convection and temperature distribution in half-zone (Time=60[S],  $Ma=1 \times 10^4$ ) (a) temperature contour line (left half) and velocity (right half) in  $r-z$  plane (b) velocity in  $r-\theta$  plane ( $\Delta T=0.05[-]$ )

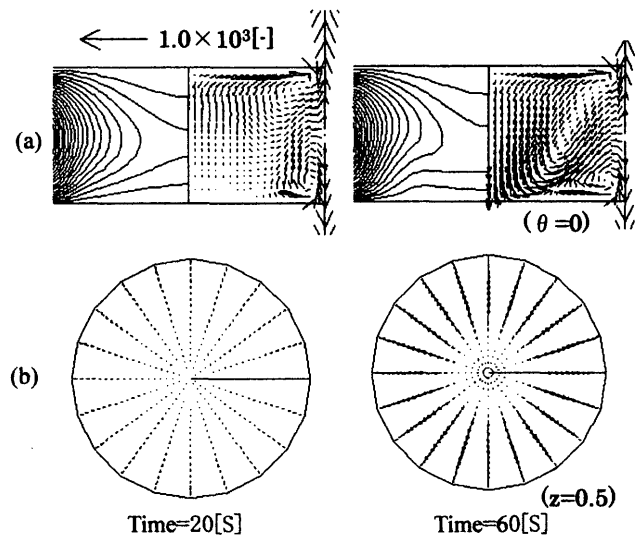


Fig.3 Convection and temperature distribution in full-zone ( $Ma=1 \times 10^4$ ) (a) temperature contour line (left half) and velocity (right half) in  $r-z$  plane (b) velocity in  $r-\theta$  plane ( $\Delta T=0.05[-]$ )

流れが発生し温度分布に影響を与えている。Fig.3 に  $Ma=1 \times 10^4$  におけるフルゾーンモデルでの 20, 60[s]後の速度分布と温度分布 ((a):  $\theta=0$ , (b):  $z=0.5$ ) を示す。これより、20[s]後においては自由界面付近に 2 つの対流が発生しているのに対し、60[s]後は、上部の対流が発達し、温度分布の対称性が崩れていることが分かる。Fig.4 に  $Ma=1 \times 10^5$  における速度分布と温度分布 ((a):  $\theta=0$ , (b):  $z=0.5$ ) を示す。これより、20[s]後の時点ですでに上部の対流が発達し、温度分布の対称性が崩れていることが分かる。60[s]後にはさらに非対称となりFig.3 に比べて温度が内部まで伝播していないことが分かる。また(b)に注目するとFig.3 においては円周方向速度  $V_\theta$  が非常に小さかったのに対し、Fig.4 では  $V_\theta$  が大きくなり流れが旋回していることが分かる。ここで、Figs.5,6 に  $Ma=1 \times 10^4$  と  $Ma=1 \times 10^5$  の自由界面上 ( $\theta=0, r=1$ ) での円周方向速度  $V_\theta$  を示す。  $Ma=1 \times 10^4$  においては  $V_\theta$  が小さく上部と下部で対称な流れであるのに対し、  $Ma=1 \times 10^5$  の時は、  $V_\theta$  が大きく非対称な流れが存在していることがわかる。Fig.7 に自由境界上の点 ( $\theta=0, z=0.5, r=1$ ) における  $V_\theta$  の経時変化を示す。  $Ma=1 \times 10^4$  においてはほぼ一定で小さいのに対し、  $Ma=1 \times 10^5$  の時は時間変化と共に大きくなっている事がわかる。これより  $Ma$  数が増加すると  $V_\theta$  が大きくなると考えられる。Fig.8 に自由表面上の縦方向速度  $V_z$  の経時変化 ( $\theta=0, z=0.5, r=1$ ) を示す。  $Ma=1 \times 10^4$  においては速度がほぼ一定なのに対し、  $Ma=1 \times 10^5$  の時は振動して不安定であることがわかる。これはマランゴニ対流特有の振動現象と考えられ、このことが温度や濃度に影響を及ぼすと考えられる。

【Conclusion】

3次元円筒内におけるマランゴニ対流に関し数値解析を行なった。フルゾーンモデルにおいて時間の経過に伴い上部の対流が支配的となり、下部の対流を打ち消したため内部の温度対称性が崩れた。また、円周方向速度  $V_\theta$  は  $Ma$  数が大きいときは単調増加するが、  $Ma$  数が小さい時はあまり変化が見られなかった。縦方向速度  $V_z$  については  $Ma=1 \times 10^5$  の時には周期的でない振動が発生し、作製した結晶に悪影響を及ぼす。

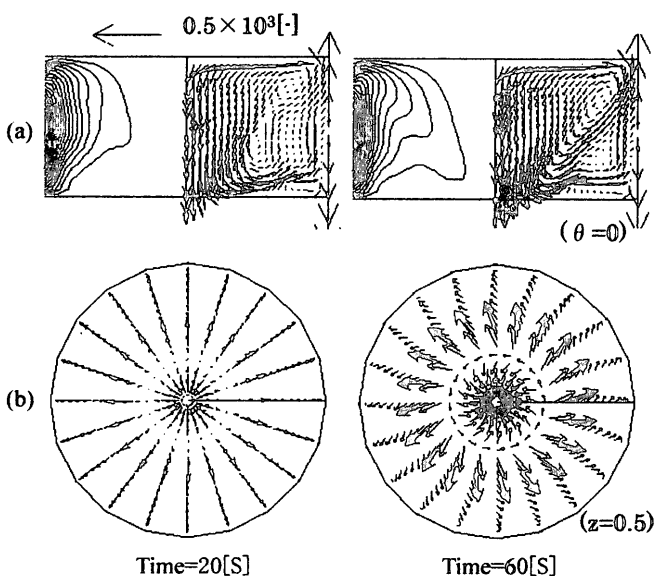


Fig.4 Convection and temperature distribution in full-zone ( $Ma=1 \times 10^5$ ) (a) temperature contour line (left half) and velocity (right half) in  $r-z$  plane (b) velocity in  $r-\theta$  plane ( $\Delta T=0.05[-]$ )

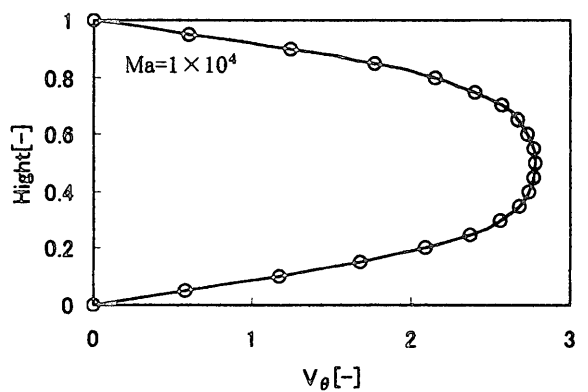


Fig.5  $\theta$ -direction velocity along the free surface (Time=60[S],  $Ma=1 \times 10^4$ ,  $\theta=0, r=1$ )

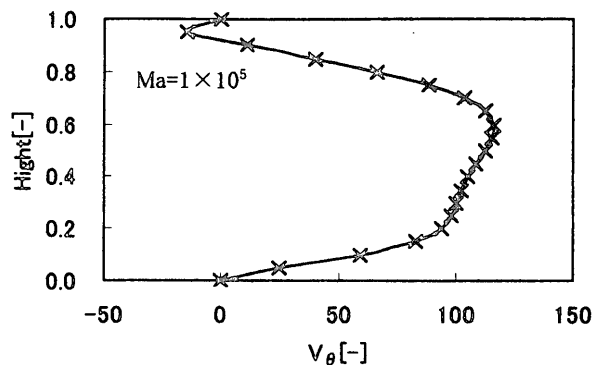


Fig.6  $z$ -direction velocity along the free surface (Time=60[S],  $Ma=1 \times 10^5$ ,  $\theta=0, r=1$ )

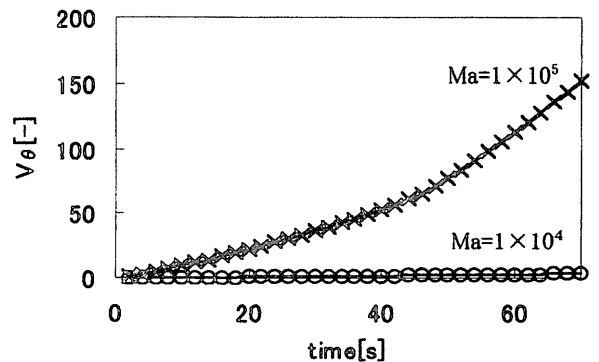


Fig.7 Time dependency of  $\theta$ -direction velocity ( $\theta=0, z=0.5, r=1$ )

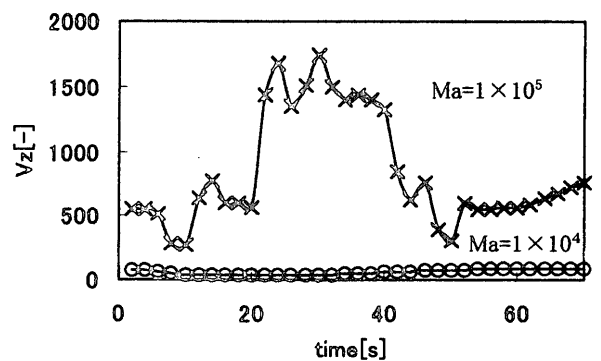


Fig.8 Time dependency of  $z$ -direction velocity ( $\theta=0, z=0.5, r=1$ )