水平流体層における浮力・マランゴニ効果 共存自由対流の研究

東大院 前川 透^{*} 東大生研 棚沢 一郎

NATURAL CONVECTION IN HORIZONTAL RECTANGULAR LIQUID
LAYERS DRIVEN BY MARANGONI EFFECT AND GRAVITY

T. Maekawa*, I. Tanasawa, S. Enya and J. Ochiai

The purpose of this study is to make clear the possible effect of thermocapillary (Marangoni) convection on the growth of crystal which is made by such techniques as Czochralski, floating zone, etc. Horizontal layers of liquid in open rectangular containers with different geometry were heated from the vertical side walls or from bottom wall and cooled at the middle part of free surface. Characteristics of heat transfer and convective flow driven both by buoyancy and surface tension gradient were measured under different combinations of geometrical and thermal factors.

1. まえがき

本報告は、単結晶を作る場合などに、表面張力差によって生じる対流がどの程度の影響をもつかを知るための基礎研究である。濃度差あるいは温度差により生じる界面張力の局所変化が引き起こす対流をマランゴニ対流⁽¹⁾と呼んでいる。ブリッジマン法、チョクラルスキー法、フローティングゾーン法等で単結晶を作成する場合、作成系に自由表面が存在し、マランゴニ対流が発生する。また、地球上では浮力による自然対流を伴う。本研究では、2次元長方形流体層の側壁を加熱、液表面中央部を冷却した場合と下面を加熱、液表面中央部を冷却した場合に生じる密度差・表面張力差共存自由対流について、熱的・幾何学的条件および流体を変えて、伝熱・流動特性を測定した。その中で、流れの可視化と温度勾配分布の可視化を行なった。

2. 実験装置および方法

側面を加熱する場合の実験装置の概略図をFig.1に示す。厚さ5mm、高さ15mm、幅100mmの銅板の幅高さ方向に5本のC-C熱電対を埋め込み、裏側を厚さ30μmのステンレス箔ヒータで加熱し高温壁とした。また、厚さ10mmの銅板に5本のC-C熱電対を埋め込み、裏側を恒温槽で温度制御した水

Fig.1 Apparatus

*Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo; 7-22-1 Roppongi, Minato-ku, Tokyo, 106 Japan

で冷却し低温壁とした。高温壁側はナイロンで、下面はアクリルで断熱した。下面を加熱する場合には、厚さ5mm、幅60mm×100mmの銅板に5本の熱電対を埋め込み高温壁とし、高温壁側をナイロンで、側壁をアクリルで断熱した。試験流体として、シリコーン油（信越シリコン社KF96、25℃における動粘性係数 $10^{-2}\text{m}^2/\text{s}$, $10^{-3}\text{m}^2/\text{s}$, $10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$, $10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$, $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ ）を使用し、アス

ペクト比A1, A2の組み合わせを変え、装置を恒温槽に入れ、熱伝達実験および可視化を行った。

3. 側面を加熱した場合

3-1. 熱伝達実験結果

熱伝達実験結果をFig.2に示す。（幾何学的条件はTable 1を参照）縦軸のNu数は高温壁における熱流束の値から求めた。使用したシリコーン油のレイリー数は $Ra = (\alpha \rho g H^3 / \sigma_t) \cdot Ma \approx 30 Ma$ となる。流体のPr数が決まるとNu数はアスペクト比に依らず、Ma数の $1/4$ 乗に比例する。またPr数の影響が認められ、 $\log Nu$ が $\log Pr$ の1次関数であると仮定すると、実験結果は

$$Nu = 0.73 Pr^{0.06} Ma^{1/4}$$

が整理出来る。

3-2. 流速分布

シリコーン油にアルミ箔を混入し、下面からのスリット光により流れの可視化を行ない、流速分布を求めた。

$X = -(A1 + A2)/2$ での流速分布をFig.3に示す。深さHの無限水平流体層の自由表面上に一定温度勾配 $(dT/dx)_{z=H}$ がある場合

$$U = -\frac{3\sigma_t H^2}{4\kappa\mu} \left(\frac{dT}{dx}\right)_{z=H} \left\{ \left(z - \frac{1}{2}\right)^2 - \frac{1}{9} \right\}$$

となるが、各Ma数に対する計算結果とそれぞれ破線、一点鎖線、二点鎖線と

Table 1

	A1	A2		A1	A2
△	2	1/3	▲	3	2/3
□	2	2/3	■	3	1
○	2	1	★	3	4/3
●	3	1/3	☆	1	1/3

Fig.2 Result of heat transfer measurement
Nu-Ma relation
(Heating from side walls)

Fig.3 Velocity distribution

示した。それによると実験値は計算値より大きくなる。また、実験値を最小二乗法により2次の関数で表わそうとしたが出来なかった。これらの結果は、浮力による自然対流が伴っているためと考えられる。

3-3. 流れと熱伝達の関係

流体中に屈折率勾配(温度勾配)があると、入射平行光線が曲げられることを利用して($di = \frac{1}{n} \cdot \text{grad}_z n \cdot ds$)、空間の温度勾配を求めることが出来る。Fig.4に流れの様相と、それに対応する平行スリット光が曲げられた状態を示した。高温壁と低温壁との温度差が小さい場合、低温壁中央部の下に流れはなく、低温壁における局所熱流束は両端を除きほぼ一定となる(Fig.4-(a))。また、高温壁における局所Nu数は下方でわずかに大きくなる(Fig.4-(a))。温度差が大きくなると、流れが低温壁下にまで侵入してきて局所熱流束が一定になる領域はなく、低温壁両端での熱流束は非常に大きくなる(Fig.4-(b))。また、高温壁下部での局所Nu数は上部でのNu数に比べ非常に大きくなる(Fig.4-(b))。

Fig.4 Flow pattern and distribution of temperature gradient

4. 下面を加熱した場合

4-1. 熱伝達実験結果

$A1=2.5$ と $A1=5$ の場合について、熱伝達実験を行なった。 $A=2.5$ の場合の熱伝達実験結果をFig.5に示す。下面加熱の場合、側面加熱の場合と異なり、低温壁の大きさ($A2$)により熱伝達の様子が異なる。 $A2$ が大きいとNu数の立ち上がるMa数は小さく、 $Ma^{1/4}$ に比例して増加する領域でのNu数は、 $A2$ が小さい場合に比べ大きい。Nu数が立ち上がる時のRa数は約1300であり、低温壁下に2つのロールが発生する

Fig.5 Result of heat transfer measurement
Nu-Ma relation
(Heating from bottom wall)

Ra 数に対応している (Fig. 6-(d))。

4-2. 流れと熱伝達の関係

低温壁の大きさ ($A2$) により流動状態が異なるために, 熱伝達の様子も $A2$ の値により違って来る。

(i) $A2 = 5/6$ の場合 (Fig. 6-(a), (b)) マランゴニ効果により自由表面上の流体が低温側に引っ張られ, 低温流体が高温壁中央部に降りてくる。それに対応して, 高温壁中央部での熱流束の値は大きくなる。

(ii) $A2 = 20/6$ の場合 (Fig. 6-(c), (d)) 温度差が小さい時はマランゴニ効果による流れのみが存在し, 低温壁の下には流動がない。このため, 低温壁と高温壁の中央部での熱流束は一定となる (Fig. 6-(c))。しかし, 温度差が大きくなり Ra 数が約 1300 になると低温壁の下に2つのロールが発生し, それに応じて低温壁中央部と両端で熱流束は大きくなり, 高温壁中央部と両端での熱流束は小さくなる (Fig. 6-(d))。

Fig. 6 Flow pattern and distribution of temperature gradient

5. 記号 $A1$: アスペクト比 (W/H), $A2$: アスペクト比 (a/H), Nu : ヌセル数 ($gH/\lambda\Delta T$), Pr : プラントル数 (ν/κ)
 Ma : マランゴニ数 ($\sigma\epsilon H\Delta T/\kappa\mu$), Ra : レイリー数 ($\alpha g\Delta TH^3/\kappa\nu$), U : 無次元速度の水平成分 (uH/κ)
 X, Z : 無次元座標 ($x/H, z/H$), Φ : 熱流束, λ : 熱伝導率, κ : 温度伝導率, μ : 粘性係数
 ν : 動粘性係数, α : 体膨張率, $\sigma\epsilon$: 表面張力の温度係数, g : 重力加速度, i : 屈折角度 η : 屈折率

6. 文献 Scriven, L.E. and Sternling, C.V., Nature, 187 (1960), 186