

低 Pr 液柱マランゴニ対流に関する研究

千葉工業大学 佐々木宏衛

宇宙航空研究開発機構 松本聡、大平博昭、益子岳史、依田眞一

AES 依田英里香

九州大学 今石宣之

千葉工業大学 茂木徹一

Study of Marangoni Convection in Low Prandtl Liquid Bridge

Hiroei Sasaki, Chiba Institute of Technology, 2-17-1, Tsudanuma, Narashino

Satoshi Matsumoto, Hiroaki Ohira, Takeshi Mashiko and Shinichi Yoda, Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1, Sengen, Tsukuba

Erika Yoda, Advanced Engineering Services, Co.Ltd, 1-6-1, Takezono, Tsukuba

Nobuyuki Imaishi, Kyushu University, 6-1, Kasugakouen, Kasuga

Tetsuichi Motegi, Chiba Institute of Technology, 2-17-1, Tsudanuma, Narashino

E-Mail: sasaki.hiroei@jaxa.jp

Abstract: The experimental study on thermocapillary convection in the liquid bridge of low Prandtl number fluid was carried out. The half-zone liquid bridge of molten tin was used as test configuration. So detect the transition process of oscillatory flow of Marangoni convection in relatively high Marangoni number of 430. In addition to gather from experimental results that oscillation mode.

Key Words: Thermocapillary Flow, Low Prandtl Number Fluid, Oscillatory Flow

1.はじめに

マランゴニ対流は、半導体や合金の製造法であるフローティングゾーン法 (FZ 法) など、自由表面を有すると共に、自由表面での温度差による表面張力差が生じる為に発生する。液柱マランゴニ対流は、その表面張力差による駆動力を、徐々に大きくすると、表面流速が増加し流れのパターンが遷移することが、従来から知られている。このマランゴニ対流の三次元振動流が、成長縞の原因となっている。これは、結晶の品質を損なうものであり、マランゴニ対流の抑制、または制御するために、その現象の解明が望まれている。

液体金属に代表される低 Pr 数流体は、融点が高くて、表面酸化防止の為に、超高清浄に保つ必要がある等の実験的困難さと、不透明流体であることによる、流れの直接的観察が困難さから、流れ場の把握が非常に難しい。これらのことから、低 Pr 数流体 ($Pr < 1$) における、二次元軸対称定常流から、三次元定常流への遷移 (Ma_{c1} : 第一臨界マランゴニ数) と、更に大きな温度差で振動流へと遷移する (Ma_{c2} : 第二臨界マランゴニ数) 現象の研究例が少ないのが現状である。

これまでの研究として、Croell ら⁽¹⁾による半導体結晶中の、不純物縞の乱れからの間接的な観察や、Kou ら⁽²⁾による、液柱スズの表面温度振動の検出報告例などが散見されるが、振動流遷移条件や、遷移後の流れの形態は未だ不透明な部分が多い。

本研究は、 $Pr=0.01$ である溶融 Sn を用いた、ハーフゾーン液柱マランゴニ対流の、振動流遷移点よりはるかに強い流れにおける遷移挙動と、その振動流

モード構造を熱電対により温度場観察し解明することを目的として実験を行った。

2.実験

実験では試料となる試験流体の酸化を防ぐために、高真空のチャンバー内 ($< 10^{-5}$ [Pa]) に設置した Fe 製のディスク間に直径 6 [mm] で高さ 3 [mm] の液柱を形成した。液柱の半径を代表長さとした場合のアスペクト比 (As) は 1.0 となる。液柱の上下間に温度差を印加することで表面張力差を誘起し、マランゴニ対流を発生させた。その温度差を大きくすることでマランゴニ駆動力を増大させ、定常流から振動流へと遷移させた。内部流動を推測する為の温度場の計測は、Fig.1 のように、液柱下面を支える下部ディスクに熱電対を挿入し、液柱とディスクとの接触面での温度場を計測し、温度変化を検出した⁽³⁾。

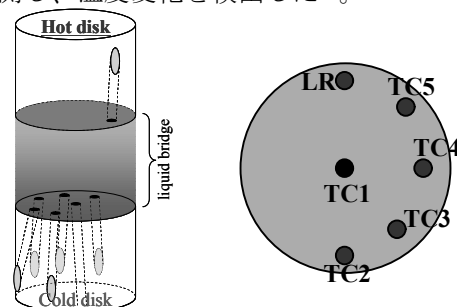


Fig.1 Measurement system and measuring point.

3.結果および考察

温度差を徐々に大きくし、温度差 ΔT が 48 [K] 以上拡大した時の三次元振動流の挙動を詳細に解析

した。この ΔT が、48 [K] の時の Ma 数は 430 であり、アスペクト比(As)が 1.0 の時の振動流開始臨界 Ma 数 66.5 の約 6 倍という大きな駆動力の領域である。 Ma 数の定義を以下に示した。

$$Ma = \frac{\left| \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right| \Delta T}{\mu \kappa} L$$

Fig.2 に、TC1 での温度時系列データを示した。Fig.2-(A),(B),(C)は、それぞれ Ma 数が 430、455、466 に相当する。Fig.2-(A)の温度振動を FFT 解析すると、その振動周波数は約 0.25 [Hz] である。同様に、Fig.2-(B),(C)を周波数解析したところ、(C)は約 0.3 [Hz] の特定周波数を検出できたが、(B)においては特定周波数が検出出来ず、約 0.2 [Hz] から約 0.3 [Hz] の間で、あらゆる周波数が混在した状態となっていた。

次にそれら(A),(B),(C)の前後の状態を知るべく、詳細な周波数解析を試みたところ、Fig.3 のような結果が得られた。Fig.3 は、Fig.2-(A)の $Ma=430$ の時点から、Fig.2-(C)の $Ma=466$ に至るまでの、温度振動を周波数解析し、 Ma 数の上昇と共に並べたものである。この結果から、Fig.3 の領域(a)においては、約 0.25 [Hz] の特定周波数を見出すことが出来たが、領域(b)においては約 0.2 [Hz] から約 0.3 [Hz] の間でピークが乱立した結果となっていた。しかし、その後続く領域(c)では、0.3 [Hz] の特定周波数が出現する結果となった。

次に、液柱外周部に位置する TC2 での温度振動を TC1 と同様に解析し、その振動周波数解析結果を Ma 数の上昇と共に並べたものを Fig.4 に示す。

Fig.4 の領域(a)では、約 0.25 [Hz] と約 0.83 [Hz] の特定周波数を検出したが、領域(b)においては 0.2 [Hz] 付近と、0.8 [Hz] 付近にピークの集合が見られるものの、明瞭な特定周波数は見られなかった。しかし、その後続く領域(c)では、0.3 [Hz] と 0.83 [Hz] に特定周波数が出現する結果となった。また、Fig.4 の結果を通して、約 0.25 [Hz] 付近と約 0.83 [Hz] 付近の二つの周波数が同時に検出されたことから、振動流の重畳⁽⁴⁾が見られたものと考えられる。

これらの振動周波数遷移の挙動は、定常的振動からその駆動力をさらに増大させた場合の、振動モード構造が変化する過渡期を実験的に捉えたのではないかと考えられる。

また、TC1 から TC5 における振動流の位相差を検証し、そのモード構造を推測した。その結果、構造はモード III であり、0.25~0.3[Hz] における挙動は「rotation」、0.83[Hz] における挙動は「swing」ではないかと考えられた。

4.まとめ

低 Pr 数流体のマランゴニ対流についての実験的研

究を行った。アスペクト比 1.0 の液柱における $Ma=400$ 以上での振動流挙動を温度場計測より捉え、詳細に解析した。その結果、振動流の重畳を捉え、振動周波数遷移の過渡期と思われる現象を実験的に捉えた。

参考文献

- 1) Croell: Mat. Res. Bull., 24 (1989)770.
- 2) S.Kou et al., J. Crystal Growth, 222 (2001)135.
- 3) NASDA Technical memorandum, Annual Report of Marangoni Convection Modeling Research, NASDA-TMR-030004E, (2003) 157.
- 4) H.Sasaki et al., Space Utiliz Res, 21 (2005)124.

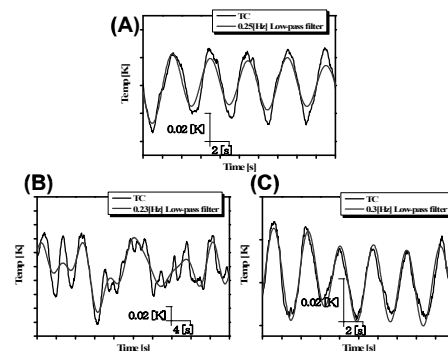


Fig.2 Time variation of temperature measured by TC1.

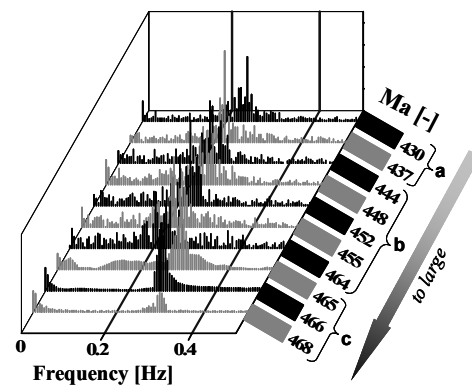


Fig.3 Fourier analyses of temperature oscillation in TC1.

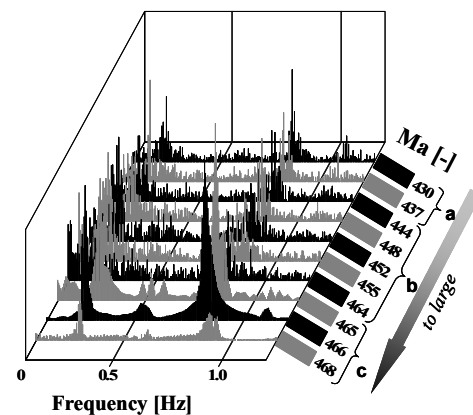


Fig.4 Fourier analyses of temperature oscillation in TC2.