B233

液柱マランゴニ対流振動流遷移のモデル化 Modeling of Transition Mechanism to Oscillatory Marangoni Convection in Liquid Bridge

○正 小宮 敦樹 (JAXA) 正 松本 聡 (JAXA) 依田 真一 (JAXA)

Atsuki KOMIYA, Satoshi MATSUMOTO, and Shinichi YODA

Japan Aerospace Exploration Agency, Sengen 2-1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8505, Japan

This paper describes a novel model of transition mechanism from steady to oscillatory thermocapillary flow in liquid bridge configuration. The velocity distribution on free surface of high Prandtl number (Pr) fluid is mainly considered in this transition model. In order to evaluate the model, two-dimensional calculations with the wide range of liquid bridge size have been done. The thermophysical properties of $Pr = 67$ fluid (5cSt Silicone oil) are used for the calculations. The results indicate that the velocity distribution on free surface is affected by the difference of inner flow pattern, which depends on the liquid bridge size. This result finally derives a novel parameter which indicates the transition phenomena with wide range Pr number fluids.

Key Words: Marangoni Convection, Surface Tension, Transition Mechanism, Liquid Bridge

1. 緒言

無重力無振動環境下では温度勾配による表面張力差に起因されるマランゴニ対流 (Thermocapillary convection) が顕在化する。ハーフゾーン法と呼ばれる液柱形状で生じるマランゴニ対流は、上下ディスク間の温度差を拡げてゆくと二次元定常流から三次元振動流に遷移することが知られており、実験結果から振動流遷移条件が整理されているとともに⁽¹⁾、その振動流遷移のメカニズムについても多くの議論がなされている⁽²⁾。従来の振動流遷移条件は下式(1)で定義されるマランゴニ数 (Ma 数) が臨界値 Ma_c を超えると遷移するとされてきた。

$$Ma = \frac{\sigma_T \Delta T \cdot L}{\mu \alpha} = Re \cdot Pr \quad (1)$$

ここで、 σ_T は表面張力温度係数を、 ΔT は上下ディスク間の温度差、 L は代表長さ、 μ は流体の粘度、 α は熱拡散率である。これまでの研究で、高 Pr 数流体 ($Pr > 10$) と低 Pr 数流体 ($Pr < 0.1$) では振動流遷移は異なる様相を示すことが数値計算により明らかとなってきたのに対し、遷移の臨界条件はともに Ma_c で記述されている。また、高 Pr 数流体のみにおいても、近年の宇宙実験結果から図1に示すような振動流遷移の液柱サイズ依存性が呈され、遷移が従来の Ma 数では記述できないことを示している。

著者らはこれまでに熱物性値の温度依存性を考慮した数値計算を行い、液柱サイズが内部流動に影響を及ぼすことを示してきた⁽³⁾。本報ではさらに高 Pr 数流体の自由表面流速分布に着目し、内部流動および表面流速を考慮した振動流遷移モデルを検討し、新たな振動流遷移パラメータを提案した。

Fig.1 Dependence of Critical Marangoni Number on the Size of Liquid Bridge

2. 計算モデル

本研究では二次元定常状態における流れ場のみを比較するため三次元計算は行わず、液柱内の軸対称二次元領域を計算の対象とした。計算格子には不等間隔のスタaggerド格子を用いて支配方程式を離散化した。連続の式およびN-S方程式の解法にはHS-MAC法を用い、圧力・速度補正を行っている。本計算ではサイズ依存性を考慮することから全支配方程式を有次元で表記し、アスペクト比 ($As=L/r$) 一定のもと計算した。また流れ場をより正確に求めるため、計算を行う際に必要とされる諸熱物性値に関しては、温度依存性が顕著な動粘度 ν を温度の関数とした⁽⁴⁾。従来の定義で定まる Ma 数を一定とし、液柱サイズを変えた計算を行った。計算条件を下表1に示す。

Table1 Summary of Calculation Conditions

r [mm]	ΔT [K]			
	$Ma=25000$	$Ma=37500$	$Ma=50000$	$Ma=75000$
1.5	53.33	80	106.67	---
2.0	40	60	80	---
3.0	26.67	40	53.33	80
5.0	16	24	32	48
10.0	8	12	16	24
15.0	5.33	8	10.67	16
20.0	4	6	8	12
50.0	1.6	2.4	3.2	4.8

3. 計算結果

熱物性値の温度依存性が内部流動に及ぼす影響を検討するため、 Ma_c 近傍の $Ma=50000$ における各条件の内部流動分布 (径方向成分) を規格化し、比較を行った。図2に示すように、下部ディスク近傍で加速された表面流が液柱内部に入り込む流れ (リターンフロー) の分布に大きな違いが確認された。これは小径液柱における下部冷却ディスク付近での温度境界層内は温度変化が著しく、それに伴い動粘度も大きく変化し流れのせん断力が増すが、大径液柱では境界層内の温度勾配は小さく動粘度変化が小さいため、内部流動の相似性が崩れたものと考えられる。結果として、内部循環流量に違いが生じていることが考えられる。そこで図3に本計算で得られた液柱サイズと循環流量 q [mm^2/s] の関係をまとめた。本計算は二次元計算なので、相対的な比較のみを行う。

従来の Ma 数定義では、振動流遷移は Re 数の増加、すなわち流速の増加による流体の不安定性が遷移条件となる。

Fig.2 Comparison of Horizontal Velocity Distributions around the Center of Vortex

Fig.3 Relationship between Liquid Bridge Size and Flux of Inner Flow

しかしながら、図3に示されるように、同じ Ma 数においても熱物性値の温度依存性により流量は等しくなく、結果的に Ma 数を用いると小径液柱では不安定性を過小評価されていることになる。また、これらの内部流動の違いが自由表面流速分布および温度分布にどのような影響を与えるかについて検討した。結果を図4に示す。図から明らかなように、温度分布および流速分布にも異なる液柱サイズにおいて相似性は見られないことが明らかとなった。

Fig.4 Comparisons of Dimensionless Distributions on free surface

4. 振動流遷移のモデル化

これらの計算結果から導き出される不安定性評価の推測は、図1にまとめられたサイズ依存性に傾向が一致している。従来の Ma 数定義では、図3より小径液柱では内部循環流量が過小評価されており、図4-b)から分かるように、表面流速の分布は液柱サイズに依存している。これは従来の Ma 数では統一的な振動流遷移条件を記述できないことを示しており、液柱のサイズを考慮した新たな振動流遷移のパラメータを導入しなければならない。そこで、図5に示すように、自由表面を流れが加速される領域 (region 1, 3) と減速される領域 (region 2) に分け、自由表面における正味の加速成分せん断力を検討した。各液柱サイズに

Fig.5 Positive and Negative Acceleration Regions on free surface

おいて図5内の L_n ($n=1,2,3$) を数値計算結果から導出し、そこから得られる正味のせん断力成分を評価した。さらに導出したせん断力成分を式(1)の形で等価に記述するために、有効代表長さ L^* を新たに導入し、その値を推定した。結果を図6に示す。図から明らかなように、従来の Ma 数定義では、図5のような表面流速分布では大径液柱になるほど Ma 数が過大評価されてしまうことになり、流体不安定性によって記述している Ma_c がサイズに依存しない評価をしていないことが明らかとなった。なお、経験的に L および L^* の関係を求めると

$$L^* = L^{0.7} \quad (2)$$

の関係が推定できる。今後は広範囲な Pr 数流体で本計算を行い、有効代表長さ L^* の定量的な評価を行っていく。

Fig.6 Relationship between Liquid Bridge Size and Effective Characteristic Length L^*

5. 結言

本研究では、液柱形状マランゴニ対流における振動流遷移のモデル化を検討するため有次元の数値計算を行い、以下の知見を得た。

- (1) 液柱サイズに対し相似性をもたない内部流速分布が、表面流速・温度分布に影響を及ぼすことを示した。
- (2) 同 Ma 数であっても、小径液柱では内部循環流量が大径液柱よりも多く、不安定性評価の観点では過小評価されていることを示した。
- (3) 従来の Ma 数定義に関して、新たに有効代表長さ L^* の概念を定義し、液柱サイズに依存しない振動条件パラメータを記述した。

参考文献

- (1)河村・他2名, 機論 (B 編), **67**-658(2001), 1466.
- (2)H.C.Kuhlmann et al., J.Fluid Mech, **247**(1993), 247.
- (3)小宮・他2名, Proc. of 40th Heat Trans. Symp., **3**(2003), 609
- (4)小宮・他4名, 日本マシナリ学会第18回学術講演会論文集, (2002), 16