

## 学位論文題名

## 液滴の過渡表面張力対流に関する研究

## 学位論文内容の要旨

流体の流動現象は人為的に力を加えて流動させる強制対流の他に温度差や流体内の濃度差によって生じる密度差に重力、遠心力、コリオリの力等が働いて生ずる自然対流や、磁力、表面張力などのさまざまな力が引き起こす対流もある。これらの現象において系の規模が小さくなる(毛細管、液滴、泡等)と、表面張力が液滴内流動に大きな影響を与えるようになってくるが、近年の工業技術の向上により、液滴を用いる機器において液滴径が微細化され、その影響評価の重要性が高まってきた。また、宇宙技術の進歩により微小重力環境の利用が期待されているが、このような場においては流体内流動に表面張力の影響が非常に大きいことは良く知られており、重要な研究課題となっている。

本論文では、液滴内流動に対する表面張力の影響を解明することを目的とし、加熱条件を変えて、各種の系においての過渡解析を行った。以下に各章の要約を示す。

第1章では、緒言として本研究の背景および目的を明らかにし、本研究に関連する従来からの研究についてとりまとめ、本論文の概要を示した。

第2章では、数値解析を行うにあたり、その支配方程式、初期条件および境界条件について述べ、また適切なパラメータの選定について説明した。

第3章では、第2章に述べた支配方程式を解くために本研究で用いた数値解法と解析に用いた境界条件について述べた。

第4章では、下記のような液滴内過渡表面張力対流に対する種々の加熱条件およびパラメータの影響についての数値解析を行い、その影響を調べた。

- (1) 液滴下方からの平行なふく射加熱ビームによる定常熱流束加熱・冷却
- (2) 定温度熱源から放射された平行に入射するふく射エネルギーによるふく射加熱
- (3) 放物面鏡により集光された太陽エネルギーによるふく射加熱
- (4) 支持棒で懸架あるいは支持した液滴の定常ふく射加熱

(1) a. 表面張力支配( $Ra=0$ )の場合、流動形態はマランゴニ数によらず一つのセルを持つ循環流となることが分かった。この表面張力による流動速度は、マランゴニ数が大きくなるにつれて大きくなっていく。渦の中心は、表面における速度が最大となる付近で形成されており流れの発達と共に移動する。渦は、基本的に被加熱部である下から上に移動するが、マランゴニ数が大きい場合には液滴の上方までいったん移動して下降するのがみられる。最終的には、液滴の表面近傍の中心付近に位置する。

b. 温度場に関しては、マランゴニ数の大きさにより2つの形態に分けられる。マランゴ

ニ数が小さい( $Ma < 10^3$ )場合、伝導が支配的であり、マランゴニ数が大きい( $Ma \geq 10^3$ )場合、流動が支配的である。熱の輸送に関し流動が支配的である場合には液滴内部に流れによって熱が運ばれるため、液滴内の各部分での温度差が小さくなっているが、定常に達するまでに要する時間はマランゴニ数の大きさによらずほぼ同じである。液滴の表面温度は、マランゴニ数が小さい場合、加熱物と非加熱部とで大きな温度差がつくが、マランゴニ数が大きくなると表面張力対流が強くなり内部混合を促進するために温度差は小さくなり、表面温度も均一化されるために、マランゴニ数が小さい場合に比べて温度が低くなる。

c. 冷却した場合の違いは、液滴に発生する表面張力対流の循環方向が逆になるということ、それにともない熱の輸送経路が異なるために液滴の温度変化および温度差が加熱に比べ大きいことが分かった。しかし、温度変化の速度はあまり変わらない。

d. 重力場の影響については、浮力と表面張力との比 $Ra/Ma$ の値により評価できる。 $Ra/Ma \leq 1$ の時には、 $Ra=0$ の表面張力支配時と同様の形態を示している。しかし、 $Ra/Ma > 1$ になると、浮力による流動が表面張力による対流にオーバーラップして現れてくる。

e. プラントル数の影響については、プラントル数が大きい場合温度場に対して流動が支配的となるため、流れの発達を若干促進しているのが分かる。しかし、温度場に与える影響は時間が経過してもあまり見られない。プラントル数が小さい場合は、伝導が支配的になるため流れの発達を抑制するために、液滴加熱面である下方表面の温度が高くなっている。

(2) 加熱条件を片面一定熱流束加熱・全面对流伝熱冷却条件から片面一定温度熱源によるふく射加熱・全面ふく射冷却に変更することによる差異はあまりなく、定性的傾向は同じである。一定温度の熱源で加熱すると、また放熱も液滴温度の4乗で効いてくるため、液滴表面の4乗平均温度の昇温は、マランゴニ数が大きくなると遅くなる。液滴の平均温度の昇温速度は、マランゴニ数に増加にともない入熱量および放熱量が増加するため、マランゴニ数によらずほぼ同じである。また、定常に達するまでに要する時間はマランゴニ数が大きくなるほど短くなる。

(3) 太陽集光炉を模擬した放物面鏡による液滴のふく射加熱においては、液滴の径が大きくなるほど、定常に達するまでに要する時間がかかり、液滴内部での温度差も大きい。また、液滴内部の流動速度は液滴径によらずそれほど大きく変化しない。また、表面張力の温度係数が大きいと、同じ径でも表面張力対流が強くなり液滴内部温度差が減少する。一方、液滴表面の非加熱部(放熱部)を内面が反射面の半球鏡で覆うと、温度が全体的に上昇し、液滴内部での温度差が減少する。またこの場合、放物面鏡と半球面鏡のそれぞれの加熱部分に別々の表面張力対流が発生するため、表面張力対流渦が1ヶの放物面鏡のみの場合に比べてより内部混合が促進され、温度差が減少したものと考えられる。

(4) 液滴を支持棒で懸架あるいは支持して全面ふく射加熱した場合、支持棒温度の上昇が液滴表面温度上昇より遅いため、表面張力対流が生じる。この対流は時間経過にともなって次第に減速して行き、ある時刻以降両者の温度が逆転し、これにともなって対流方向の逆転が見られる。液滴に生じる表面張力対流の大きさは、支持棒の熱容量あるいは熱伝導率が小さくなると小さくなるが、これらが小さすぎると上記の逆流後の対流が強くなるのでまた増大する。それゆえ熱容量や熱伝導率の値には、最適値が存在する。液滴の平均温度上昇速度は、支持棒がない場合とあまり差はないが、支持棒の熱容量あるいは熱伝導率が大きいものではその上昇速度が若干遅い。液滴の最高温度(その位置は表面に存在する)は、支持棒の熱容量および熱伝導率が大きくなると、表面張力対流による液滴内部混合により、支持棒がない時よりも低くなる。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 工 藤 一 彦  
副 査 教 授 伊 藤 猷 一  
副 査 教 授 福 迫 尚 一 郎  
副 査 教 授 粥 川 尚 之

## 学位論文題名

### 液滴の過渡表面張力対流に関する研究

火炉バーナ等で使用する微細液滴や、宇宙の微小重力環境の場に置かれた液滴は、その内部流動に表面張力が大きな影響を与えることが知られており、重要な研究課題となっている。

本論文は、液滴内流動に対する表面張力の影響を解明することを目的とし、加熱条件を変えて、各種の系における過渡解析を行ったものである。このため液滴内流動に関し、液滴表面の温度分布によって発生する表面張力分布を考慮した2次元極座標系での支配方程式を立て、下記のような4種類の加熱条件について過渡解析を行った。

- (1) 液滴下方からの平行なふく射加熱ビームによる定常熱流束加熱・冷却
- (2) 定温度熱源から放射された平行に入射するふく射エネルギーによるふく射加熱
- (3) 放物面鏡により集光された太陽エネルギーによるふく射加熱
- (4) 支持棒で懸架あるいは支持した液滴の定常ふく射加熱

この結果以下の結論を得た。

1. 流動形態はマランゴニ数によらず一つのセルを持つ循環流となることが分かった。温度場に関しては、マランゴニ数の大きさにより2つの形態に分けられ、マランゴニ数が小さい( $Ma < 10^3$ )場合伝導が支配的であり、マランゴニ数が大きい( $Ma \geq 10^3$ )場合流動が支配的である。流動が支配的である場合には、液滴内各部分での温度差が小さくなるが、定常に達するまでに要する時間はマランゴニ数の大きさによらずほぼ同じである。液滴の表面温度は、マランゴニ数が小さい場合、加熱物と非加熱部とで大きな温度差がつくが、マランゴニ数が大きくなると表面張力対流が強くなり内部混合を促進するために温度差は小さくなり、表面温度も均一化される。
2. (1)と(2)の加熱条件の差による差異はあまりなく、定性的傾向は同じである。
3. 太陽集光炉を模擬した放物面鏡による液滴のふく射加熱においては、液滴の径が大きくなるほど、定常に達するまでに要する時間がかかり、液滴内部での温度差も大きい。一方、液滴表面の非加熱部(放熱部)を内面が反射面の半球鏡で覆うと、液滴内部での温度差が減少する。
4. 液滴を支持棒で懸架あるいは支持して全面ふく射加熱した場合、支持棒温度の上昇が液滴表面温度上昇より遅いため、表面張力対流が生じる。この対流は時間経過にともなって次第に減速して行き、ある時刻以降両者の温度が逆転し、これにともなって対流方向の逆転が見られる。支持棒の熱容量あるいは熱伝導率の値には、最適値が存在する。液滴の平均温度上昇速度は、支持棒がない場合とあまり差はない。

これを要するに著者は、各種加熱条件下で液滴表面に発生する過渡的な表面張力対流が、液滴の昇温特性に与える影響を数値的に求めることにより、熱工学上有益な多くの知見を得

ており、熱工学の進歩に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。