

## 第6章 結論

### 6-1 まえがき

電子デバイス等の冷却技術、また来たるべき二十一世紀に実現が予想される宇宙ステーションのエネルギーシステムについては、信頼性が優先されるため、伝熱制御技術の確立の必要性があるが、電場による伝熱制御は制御方法が他の能動的方法と比較して、電圧の大小のコントロールにより簡単に行うことができるため、技術的に実用化される大きな可能性を持っている。このように、電場の効果による様々な現象は、伝熱の分野で広範囲にわたって応用されることが期待できる。

本研究では、これら電場の効果の基礎研究として、特に沸騰現象の本質的な基礎現象の解明のため、気泡下部液膜内圧力時間変化、気泡下部液膜厚さの時間変化、気泡形状時間変化の計測を行った。これらの実験結果から、静的な沸騰モデルとして既に確立した Zuber モデルをもとに次の様な全く新しい動的な沸騰モデルを作成した。

『上昇蒸気流と液体界面に生じる Helmholtz 不安定波により、気泡下部縦断面方向曲率が増加する。曲率の変化により気泡下部液膜内圧力が変化し、気泡下部への液体の供給または排出が生じ、気泡下部液膜厚さが周期的に時間変化する。Helmholtz 不安定波で現れる液膜厚さが薄い時にのみ、沸騰による熱伝達が生じるため、単位時間あたりの液膜厚さが薄くなる回数に比例して、平均熱流束がかわる』

このモデルは Helmholtz 不安定波 1/4 波長分だけで沸騰現象を説明するため、上向き面、下向き面などの多様な沸騰面における沸騰現象を統一的に説明することができる。

具体的には限界熱流束近傍の核沸騰において、

『伝熱面過熱度の上昇に伴い、気泡が合体し、横方向の直径が Taylor 不安定波長の 1/2 に至るまでより大きな気泡へと成長する。沸騰は主に気泡下部気液界面によって起こり、気泡内部には上昇蒸気流が生じる。このため気泡側面には Helmholtz 不安定波が生じる。これにより次の様な現象が現れる。

1. Helmholtz 不安定波によって生じた気液界面の波と気泡下部液膜の気液界面とが気泡下部縁において接点を成す。この接点における角度に応じて、気泡垂直方向断面の気泡下部縁における曲率が増加する。
2. 水平半径方向における、気泡垂直方向断面の気泡下部縁における曲率が増加する事により、接点近辺の表面張力に差が生じる。
3. 表面張力の差は気泡下部液膜内と気泡外液体の間に圧力差を生み出す。
4. 圧力差によって、気泡下部液膜への液体供給及び排出が、Helmholtz 不安定

周期で交互に生じる。

5. 気泡下部液膜への液体供給及び排出により、気泡下部液膜厚さは Helmholtz 不安定周期で変動する
6. 気泡下部液膜厚さは Helmholtz 不安定周期で変動するため、熱流束は気泡下部液膜厚さに反比例して変動する。とくに Helmholtz 不安定周期毎に気泡下部液膜厚さがごく薄くなる領域が存在し、沸騰による熱伝達はこの時に生じている。

これは沸騰熱流束の時間的変化を実験的、理論的に明らかにした、全く新しい研究である。このモデルを用いる事により、電場による沸騰熱伝達促進及び制御効果を初めて説明する事ができた。この電場を用いた技術は、省エネルギーの推進を目的とし、電場を用いて Helmholtz 不安定をコントロールする事により沸騰熱伝達を促進及び制御するものである。EHD 的な伝熱の基礎的な解明は、今後の技術的応用に重要な役割を担うことは確かである。

## 6-2 各章のまとめ

**第1章「沸騰限界熱流束のメカニズムに関する研究の目的と内容」**では、これまでの沸騰に関する研究と工業的な実用化の流れについての概略を述べ、沸騰メカニズムを探る新たな伝熱制御技術の必要性を示した。今後の研究の方向性として重要な伝熱制御技術については、上昇蒸気流と液体界面に生じる Helmholtz 不安定をコントロールする事が有効であり、特に EHD 的な伝熱促進方法が、その発展の可能性の大きい事を示した。

**第2章「沸騰限界熱流束近傍の気泡下部液膜内圧力変動の測定」**では、沸騰限界熱流束発生メカニズム解明の重要なステップとして、沸騰限界熱流束近傍の蒸気柱下部液膜圧力変化の測定を、新しく作成した微小高速応答圧力センサーで行った。核沸騰領域から限界熱流束に至るまで、沸騰蒸気泡下部には常に薄い液膜が存在する事が知られており、その液膜への液体流動が沸騰のメカニズム解明、さらには沸騰限界熱流束発生メカニズムの解明には不可欠である。本研究では、新しく作成した微小高速応答圧力センサーを沸騰伝熱面内部に埋め込み、沸騰限界熱流束近傍の気泡下部液膜内圧力変動の測定を行った。

**第3章「沸騰限界熱流束近傍の気泡下部液膜厚さ変動の測定」**では、第2節～第4節までは、柱状静電容量プローブを用いた気泡下部液膜厚さの絶対値の測定について述べた。液膜厚さの絶対値測定は、気泡下部液膜への液体流動が沸騰のメカニズム解明、さらには沸騰限界熱流束発生メカニズムを解くカギと考えられる。第5節には、気泡形状の時間変化と、液膜厚さの時間変化の同時計測について述べた。針状静電容量プローブを用い、気泡下部液膜厚さの変化を測定すると同時に、高速度ビデオカメラを用いて気泡形状変化を撮影し、気

泡形状変化と気泡下部液膜厚さの変化の関係を明らかにした。なお解析結果については第4章に述べた。第6節では液膜内圧力の時間変化と、液膜厚さの時間変化の同時計測について述べた。液膜内圧力測定には第3章で用いた微小高速応答圧力センサーを用い、液膜厚さ測定には第4章、第2節～第4節で用いた柱状静電容量プローブを使用した。

**第4章「沸騰限界熱流束のメカニズムのモデル化」**では第4章、第5節及び第6節の結果から、気泡形状変化、気泡下部液膜内の圧力変化、気泡下部液膜厚さの変化の関係を説明した。この関係を元に、次の様な定性的なプール沸騰限界熱流束近傍の沸騰メカニズムのモデルを作成した。

『上昇蒸気流と液体界面に生じる Helmholtz 不安定波により、気泡下部縦断面方向曲率が変化する。曲率の変化により気泡下部液膜内圧力が変化し、気泡下部への液体の供給または排出が生じ、気泡下部液膜厚さが周期的に時間変化する。Helmholtz 不安定毎現れる液膜厚さが薄い時にのみ、沸騰による熱伝達が生じるため、単位時間あたりの液膜厚さが薄くなる回数に比例して、平均熱流束がかわる』

このモデルにより、この沸騰メカニズムのモデルを用いて、沸騰限界熱流束の増大を目指した。特に伝熱制御技術として、上昇蒸気流と液体界面に生じる Helmholtz 不安定をコントロールする事が有効であり、EHD 的な伝熱促進方法が、有効であり、その発展の可能性の大きい事を示した。

**第5章「沸騰熱伝達の EHD 的研究」**では電場を用いた沸騰伝熱促進の技術を示す。蒸気泡上部から電場を与える事により、上昇蒸気流と液体界面に生じる Helmholtz 不安定周期を短くすることができ、これによって沸騰伝熱促進できる。本研究では、この効果第4章で示した新しい沸騰メカニズムを用いて説明し、実験結果との一致することを示した。