

審査の結果の要旨

氏名 丹下 学

本論文は「Highly subcooled boiling on heated elements with small thermal capacities (微小発熱体上の高サブクール沸騰)」と題し、全4章からなる。論文は微小流路内強制流動沸騰を用いた電子機器の冷却を背景に、微小発熱体上における高サブクール沸騰の伝熱特性と気泡挙動を解明し、冷却デバイスの設計に指針を与えることを目的としている。

近年の電子機器や光学機器の発熱量増加を背景とし、比較的小さなシステムの冷却に沸騰を利用することが試みられている。高効率化や小型化への要請から、沸騰は微小流路内における強制流動沸騰の形で利用されるが、微小流路内では、沸騰気泡が充満することにより、圧力損失が増加するだけでなく、伝熱面上に乾き面ができることで冷却機器を焼損させる恐れのあることが指摘されている。そこで、気泡微細化沸騰という現象を微小流路内沸騰に適用することを提案し、実際の冷却デバイスを理想化した実験系で先行実験を行った。気泡微細化沸騰とは、高熱流束、高サブクール条件で発生する沸騰で、伝熱面上の気泡が激しく凝縮することによる気泡の微細化を特徴とし、気泡の凝縮が伝熱面上に直接サブクール液を供給し高い熱伝達が得られることも知られている。実験の結果、高い除熱性能を保ちつつ、気泡の微細化によって気泡の閉塞およびドライアウトを回避できる可能性を示した。しかし、流動沸騰における沸騰気泡は流れ場の影響を大きく受けるため、気泡の微細化がどのような温度場で起こるのか特定することは難しく、また、実際の小型冷却システムのように伝熱面の熱容量が小さい場合に沸騰現象が異なるかどうかを知る必要がある。

これを踏まえ、本論文では、微小発熱体における伝熱特性と沸騰気泡挙動との関係と、気泡が微細化される条件の解明を目的として、加熱細線上の高サブクールプール沸騰実験を行った。続いて、そこで得られた結果を元にして、より理想的な状況での単一気泡の挙動解明を目的として、MEMS技術を用いた人工伝熱面で微細気泡が発生する条件を実験的に探索した。

第1章は「Introduction (序論)」であり、研究の背景として沸騰の産業的応用、沸騰熱伝達の特徴、及び沸騰気泡の描像について概観し、気泡微細化沸騰に関する関連研究をまとめている。また、気泡微細化沸騰の有用性を示すために行った微小流路内高サブクール沸騰の実験結果を、研究を行う動機として示してから、本研究の目的を述べている。

第2章は「Subcooled boiling on heated wires (加熱細線上のサブクール沸騰)」であり、サブクール液中における加熱細線上の沸騰実験の結果と考察を示している。サブクール度の増加とともに限界熱流束は上昇するが、高サブクール度領域においてその上昇傾向が鈍ることを明らかにした。先行研究によって報告されている銅ブロック系のように、沸騰曲線に核沸騰と気泡微細化沸騰の境界を示す兆候は確認されなかったため、その原因について伝熱面の熱容量と限界熱流束機構の点から考察をしている。また、高速カメラを用いた観察により、微細気泡の射出メカニズムが、一次気泡が球形を保ちつつ成長し気泡の上部が大きく変形することによるものであることを捉えている。微細気泡の生成、射出が伝熱に与える影響を定量的に評価するため、マクロな実験データから細線周りの熱伝達について解析を行い、微細気泡が確認される領域において微細気泡の担う熱伝達が大きいことを明らかにしている。

第3章は「Isolated bubbles during subcooled boiling (サブクール沸騰における孤立気泡)」であり、沸騰を模擬した理想的な環境における単一気泡の生成を人工伝熱面によって実現し、気泡の成長崩壊を観察して微細気泡の射出が起こる条件を探索している。まず、薄膜ヒータと水素トリガーにより過熱液層と気泡核の生成を独立に制御できるよう設計された人工伝熱面について説明をし、実験手順を示している。次に、気泡生成直後における壁面温度分布の測定結果を示し、気泡底部での三相界線の移動を捉えたことを述べている。また、様々な条件での実験結果を発泡形態のマップとしてまとめ、高サブクール条件における発泡の様子を4種類に分類して過熱液層の厚さとの関係を考察している。特に、高熱流束で加熱時間が長い場合には、気泡がすばやく大きく成長しサブクール液中に蒸気塊を取り残すことで、細線上沸騰で確認されたのと同様の微細気泡が発生することを捉え、気泡挙動を示している。

第4章は「Conclusion (結論)」であり、本研究で得られた結果を総括し、微小流路内高サブクール沸騰の利用に対し設計指針を与えている。

先に述べたような背景から、高サブクール沸騰において気泡の微細化がどのような条件で起こりうるのかを示し、その気泡の微細化がどのようなメカニズムで起こるかを明らかにしたことの意義は大きい。特に、孤立気泡の発生制御を可能にする人工伝熱面を設計し、サブクール度・熱流束・発泡までの加熱時間、という基本的なパラメタによって微細化条件を実験的に明らかにしたという点で非常に優れた論文である。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。