

氏 名	たつもと ひでき 達 本 衡 輝
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第44号
学位授与の日付	平成14年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	エネルギー科学研究科エネルギー応用科学専攻
学位論文題目	Heat Transfer from Flat Plates in Pressurized He II (加圧超流動ヘリウム中の平板発熱体における熱伝達特性)
論文調査委員	(主 査) 教授 塩 津 正 博 教授 岩 瀬 正 則 助教授 白 井 康 之

論 文 内 容 の 要 旨

超流動ヘリウム (He II), 特に大気圧下の加圧 He II は優れた冷却特性をもつ量子流体であり, 核融合炉や加速器などの大型超伝導マグネットの冷媒として期待されている。本研究論文は, 従来, 熱が1次元的に輸送される場合の特性しか解っていなかった加圧 He II の, 2次元・3次元的な熱流動現象について, 広いプール He II 中並びに種々の形状のダクト中においた平板発熱体からの熱流動現象を, 実験・解析的に論じた結果をまとめており, 13章からなっている。主な内容は以下のとおりである。

第1章は序論で, 通常液体とは全く異なった超流動ヘリウムの物性や, 熱輸送特性とそれを記述する2流体モデルについての概要。これまでの実験的及び解析的研究の歴史を説明し, 超伝導マグネットの He II 冷却設計のデータベースとして, 実際のマグネット冷却流路におけるような2次元・3次元的な熱流動現象解明の必要性を指摘し, これを研究の目的としている。

第2章で, 第3章～7章までの研究に用いた実験装置とデータ処理方法について, 加圧超流動状態を実現するクライオスタットや過渡実験のデータ処理方法を中心に説明している。

第3章で, 種々の寸法の平板発熱体から広い He II プール中に, 熱が3次元的に伝わる場合の定常熱伝達と臨界熱流束を測定し, 定常臨界熱流束の平板寸法依存性を明らかにし, 実験結果の表示式を提示している。

第4章で, 種々の支持角度を持つ平板発熱体の He I および He II 中の定常熱伝達および定常臨界熱流束を実験的に求め, それらの方向依存性を明らかにしている。

第5～8章では, 熱が2次元的に拡大あるいは縮小して流れる場合の熱伝達を実験的に取り扱っている。第5章で, 熱が加圧 He II の入った側面断熱方形ダクト一端においた平板発熱体から, 発熱体巾より大きな断面積をもつダクト中に拡がる場合について, 第6章で, ダクト断面積が途中で急に拡大する場合について, 第7章でダクト内に種々のオリフィスを設けた場合について, それぞれ定常熱伝達を実験的に求め, 流路拡大・縮小率の影響を明らかにし, 実験結果を記述できる表示式を提示している。また, 第8章では, 発熱体がダクト一端ではなくダクト中央部内壁にある場合について, 定常熱伝達を流路ギャップを変化させて測定し, 熱が発熱体から直角方向に曲がりながらダクト両側に拡大・縮小して流れる場合の現象を明らかにし, 実験結果を記述する表示式を提示している。第6章の流路断面積が途中で変化する場合, 第7章の流路内にオリフィスがある場合及び第8章の発熱体がダクト中央部の内壁にある場合については, さらに, 発熱体に定常臨界熱流束より高い波高値をもつステップ状熱入力加わった場合の非定常熱伝達についても実験を行っている。こうした場合, 定常熱伝達曲線の外挿線上に有限の寿命を持つ準定常状態が存在してから発熱体温度が急上昇し, 膜沸騰に移行することを明らかにし, 寿命とステップ熱流束の関係に対する流路の拡大・縮小率や流路ギャップ等の影響を明らかにし, その機構について考察を行っている。

第9章では, He II の熱流動をより詳細に解析するため開発した二流体モデルと超流動乱流理論に基づく計算コード“SU-

PER-2D”について説明している。

第10章～12章では、定常及び非定常熱流動の数値解析を行って上述の実験結果と比較検討し、定常臨界熱流束解析結果が実験結果と10%以内で一致すること、非定常熱流動の解析結果は非常に現象が速い場合を除いて準定常状態の寿命の実験結果を記述できることを示し、このコードの有効性を確認している。数値解析により、流路が途中で拡がる場合には、拡大箇所 He II に渦が発生し、この渦が熱輸送を阻害するため等価熱伝導率が一次的に熱が伝わる場合に比べ減少すること、また、非定常の場合、ステップ高さが定常臨界熱流束より僅かに高い場合にはこの渦の影響を受けるが、ステップ高さが高くなるに従い渦の成長以前に温度分布が発達し膜沸騰に移行するようになるため、準定常状態の寿命は1次的となること等を明らかにしている。

第13章は、本論文で得られた成果を総括して結論としている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、加圧超流動ヘリウム（加圧 He II）冷却された超伝導マグネット冷却流路内における熱流動現象の解明を目標として、広いプール中および2次元な拡がりや収縮を持つダクト中における平板発熱体からの熱伝達を実験的・解析的に研究した成果をまとめたものであり得られた主な成果は次のとおりである。

1) 実際の大型超伝導マグネット導体に近い大きさから小さなものまで、種々の寸法の平板発熱体からの加圧 He II 中の定常熱伝達を実験的に求め、3次元な熱の拡がりの影響を明らかにし、実験結果の表示式を提示している。また、加圧 He II 中の定常熱伝達の方法依存性についても、平板発熱体の支持角度には殆ど依存しないことを明らかにしている。

2) 加圧 He II の入った側面断熱方形ダクト一端においた平板発熱体から、発熱体面積より大きい断面積をもつダクト中に熱が拡がる場合の定常熱伝達および定常臨界熱流束を測定し、ダクト内への熱の拡がりの影響を評価し、実験結果を記述できる表示式を提示した。

3) ダクト断面積が途中で拡大、または、収縮する場合の定常熱伝達および定常臨界熱流束を求め、流路の拡大・縮小率の影響を評価し、実験結果を記述できる表示式を提示した。また、発熱体に定常臨界熱流束より高い波高値をもつステップ状の熱入力を与えた場合の非定常熱伝達についても実験を行った。この場合、定常熱伝達曲線の外挿上に有限の寿命をもつ準定常状態が存在してから発熱体温度が上昇し、膜沸騰に移行することを明らかにした。ステップ高さが非常に大きい場合については、伝熱面近傍で熱伝達現象が決まり流路の拡大・縮小の影響は受けないが、ステップ高さが低くなるにつれて現象が定常状態に近くなり熱流の拡大・収縮の影響が顕著に現れることが示された。

4) ダクト中央部内壁に加熱部を設けた場合の定常および非定常熱伝達を、流路ギャップを種々に変化させて測定し、熱が加熱部から直角に曲がりながらダクト両側に拡大・縮小して流れる場合を実験的に求め、超伝導マグネット冷却流路内における流路ギャップの影響を明らかにし、実験結果を記述できる表示式を提示した。種々の流路ギャップをもつ流路内の準定常状態の寿命とステップ熱流束の関係を明らかにした。

5) 二流体モデルと超流動乱流モデルを基にして He II 2次元熱流動解析コード“SUPER-2D”を開発し、定常および非定常の2次元熱流動解析を行い、上述の実験結果と比較検討を行い定常臨界熱流束が10%以内で一致すること、非定常熱流動の解析結果は現象が非常に速い場合を除いて準定常状態の寿命の実験結果を記述することができることを示し、この解析コードの妥当性を明らかにしている。数値解析により熱が拡がる場合では拡大箇所 He II に渦が発生し、この渦が熱輸送を阻害するために等価熱伝導率が1次的に熱が伝わる場合に比べて減少することを示した。ステップ熱入力を加えた場合、ステップ高さが定常臨界熱流束より僅かに高い場合にはこの渦の影響を受けるが、ステップ高さが高くなるに従い渦の成長以前に温度分布が発達し膜沸騰に移行するようになるため、準定常状態の寿命は1次的となること等を明らかにしている。

以上要するに、本論文は加圧超流動ヘリウムの2次元・3次元熱流動特性について、定常熱流動及び過渡熱流動の両面から実験的並びに理論的に明らかにしたものであり、得られた成果は学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値のあるものと認める。また、平成14年1月22日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。