

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 4 日現在

機関番号：12102
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23760763
 研究課題名（和文） 超流動ヒートパイプを応用した新しいタイプの衛星搭載用磁気冷凍機の開発
 研究課題名（英文） Development of nove type of Adiabatic Demagnetization Refrigerator for space using by superfluid heat pipe
 研究代表者
 高田 卓（SUGURU TAKADA）
 筑波大学・システム情報系・助教
 研究者番号：30578109

研究成果の概要（和文）：超流動ヒートパイプを応用した断熱消磁冷凍機(ADR)の開発の為、超流動ヒートパイプの基礎研究から実機検証までを行った。超流動ヒートパイプにおける充填物の影響、臨界熱流量の差異、入熱方法の影響、重力方向依存性等について調べた。また、本方式を採用した ADR 用の常磁性塩ユニットを製作し、従来型との比較を行った。ここで超流動ヒートパイプは従来型に比べ 2 桁以上高い実効的熱伝導率を得、その有効性を示した。今後、さらに精度の高い臨界熱流量の予測を可能にする詳細な伝熱機構についての調査、ADR の冷凍サイクルの試験が課題として残った。

研究成果の概要（英文）：The fundamental study of superfluid heat pipe and the test of application for the salt pill of Adiabatic Demagnetization Refrigerator were carried out. The characteristics of Superfluid heat pipe was investigated such as the effect of geometry, difference of critical heat input, effect of heat area, effect of gravity. And the applicable test model of salt pill with superfluid heat pipe for ADR was fabricated and compared with the past model using by copper heat exchanger. The superfluid type has much higher effective thermal conductivity than two order of the past model. The remained task is the precise prediction of critical heat flux of superfluid heat pipe and the test of fridge cycle of ADR.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：超流動、磁気冷凍

1. 研究開始当初の背景

近年目覚ましい発展を遂げる超伝導検出器を天文科学衛星に搭載するため、0.1K 級冷凍機が求められている。そこで、重力の影響を受けない、長寿命、高信頼性などの宇宙利用に最適である磁気冷凍機、特に断熱消磁冷凍機（以下 ADR）の開発が必要であり、小型化、性能向上が不可欠である。ADR は磁気熱量効

果を用いた冷凍機である。常磁性塩の電子スピンを外部磁場で制御することでエントロピーを変化させる。気体冷凍における圧縮、膨張がそれぞれ励磁、消磁に対応し、冷凍が可能になる。

極低温領域においては、使用可能な常磁性塩の熱伝導が著しく悪く、冷凍サイクルが長時間になり、冷却能力を制限している。これまでの改善方法では、常磁性塩を封入する容

器に、熱交換用に高純度の無酸素銅を多数配し、その間に常磁性塩を析出させることで、見かけ上の熱伝導率を向上させる方法が取られていた。しかしながら、次の点で問題が残されていた。

- ・常磁性塩を封入する容器に、熱交換器の銅が容器の内容積の 30%を超えるため、エントロピーを運ぶ担い手である常磁性塩の充填率が低下する。冷凍能力を確保するためには、大きな超伝導磁石を使う必要がある。
- ・複雑な形状の中で、ボイド無しに常磁性塩の結晶を析出させるため、高度な製作技術と長時間を要する。
- ・熱交換器の製作には、高度な機械工作の技術が求められるため、技術者の技量に左右されてしまう。

そして、何よりも大きな問題は、多大な労力を伴う上記の問題への対処を行っても、過去の方法では僅か数%の冷凍能力増大しか見込めないことにある。

そこで、これまでとは異なる新しい方法による飛躍的進歩が求められている。申請者は、これまでの He II の熱流動の研究から、超流動ヒートパイプを応用した熱交換方法を着想した。次の点から数十～100%程度の冷凍能力向上、または小型化に寄与すると予想される。

2. 研究の目的

本研究では、超流動の特性であるフィルムフローを積極的に利用した超流動ヒートパイプを応用して、これまで銅で担っていた熱交換の役割を He II に置き換えるものである。バルクな He II の実効的熱伝導率は銅の 5000 倍にも至る事が知られており、高い効果が期待できる。一般のヒートパイプなどの熱輸送機器においては、表面張力や重力を駆動力に凝縮部から発熱部へと液の供給が行われるが、超流動においては、化学ポテンシャルの差を駆動力として粘性の無い超流動成分のフィルムが、低温部から高温部へと流れる。そして、常磁性塩の発熱・冷却に呼応してその流れの方向が変わるため、励磁・消磁のどちらのタイミングにも熱交換を行うことが出来る。

また、製作方法は簡便であり、容器に常磁性塩のペレット、He ガスを封入し密閉するだけである。常磁性塩を小さなペレット状で封入する事で濡れ表面積が増大でき、効率よく熱輸送が実現する。複雑な容器内に単結晶を作る労力も要らない。He II はフィルムフローという特有の効果の為、極わずかの He

ガスを封入しても薄い液膜で常磁性塩のペレットを包み熱交換可能であるため、容器の数%の空孔さえ He II の流路として空いていれば良く、封入圧が低いために非常に安全である上、常磁性塩を納める超伝導磁石が展開できる磁場領域に対して充填率が向上する。

この方法では、常磁性塩のペレットの個々が励磁に伴って発熱、消磁によって冷却される為、通常のヒートパイプとは異なり、運転のどの過程にあるかによって、凝縮部と蒸発部が入れ替わるような事が起こる。特に3次元的な構造を持つ発熱箇所に対する He II の熱伝達には、これまで知られてきた1次元の熱向流とは異なる熱流動になると予想され、物理的にも興味深い。

また、He II における熱流動問題としても、3次元的に広がった多孔質物質が一様に発熱、または冷却されるという条件は、例がなく、興味深い。この研究の発展として、極低温用熱交換器としての He II 応用を広げる可能性がある。

3. 研究の方法

主に以下の計画を持って、研究を進めた。

- ・超流動ヒートパイプの試験用チャンバー製作(平成 23 年度)
- ・試験用チャンバーを用いた定常熱伝達、非定常熱伝達(平成 23, 24 年度)
- ・フィルムフロー効果の熱輸送限界(平成 24 年度)
- ・ADR用ソルトピルの実機サイズでの実証(平成 23, 24 年度)

当初実験計画で構想されていた、ガス封入量可変の試験用チャンバーでは、スーパーリークや、熱侵入量の評価の困難に直面し計画が難航した事から、ヒートパイプの封じ切りタイプに変更してチャンバーを製作した。

ヒートパイプに常温で 8.5~9 気圧のヘリウムガスを封入し、管外壁から均一に加熱するモードと従来研究通りの端から加熱するモードの比較が出来るセッティングを製作した。また、ヒートパイプ内にソルトピルを模した球形のガラスビーズを挿入する事でヒートパイプ内のフィルムフローの流路形状変化の影響について研究を行った。また、球形のような激しく濡れぶち長さが変わる系に対して、濡れぶち長さ一定のステンレスワイヤを用いる事で、この比較を行った。

さらに、実際に常磁性塩として使われるクロムカリウム明礬を用いて、実機に用いることのできるソルトピルユニットを製作し、実効的熱伝導率を測定し、このシステムの有効性を検証した。

4. 研究成果

まず、製作したヒートパイプにおける管内形状、入熱方法、重力方向が異なる条件における超流動ヒートパイプの熱伝達特性を実験的に明らかにした。以下に、本研究で得られた成果をまとめる。

- ・フィルムフローの臨界流量は他の研究者によって測定された重力駆動における場合と同程度の値であり、同様の温度依存性を示した。ここから、重力ポテンシャルと化学ポテンシャルの駆動では本質的な差異がない事が分かった。

- ・超流動ヒートパイプ管内にステンレスワイヤを充填した場合、濡れ周囲長の増加量に比例して臨界熱流量が増加するが、ガラスビーズを充填した場合は臨界熱流量が増加しない。このことから、濡れ周囲長が流れ方向に激しく変化するガラスビーズの場合、フィルムフローの流量が平均濡れ周囲長の最も短いところで制限されてしまい臨界熱流量の増加に寄与しないと考えられる。

- ・ステンレスワイヤを充填した場合においても空隙率が比較的小さい場合においては、濡れ周囲長が増加しても臨界熱流量が増加しない。このときの蒸気流速の比較から、フィルムフローに加えて管内の蒸気流速も臨界熱流量を制限する変数であることが予想される。

- ・管内に充填物が無い場合、端部から入熱した場合と側面から入熱した場合とで臨界熱流量に差異はなかった一方で、管内に充填物があり比較的空隙率が大きい場合には、側面から入熱した場合の方が端部から入熱した場合よりも臨界熱流量が増加することが判った。

- ・Bottom heat modeにおける臨界熱流量はTop heat modeにおける値の約10倍程度であり、液の還流量が増加するためフィルムフローの膜厚も増加することが示唆された。また、このときの臨界熱流量が管内に封入された液量に依存していることが示唆された。

- ・Bottom heat modeにおいて臨界熱流量付近の熱流量を印加した場合に、特徴的な温度振動現象が起きることを発見した。この温度振動はバス温度の低下と共に顕著になることが判った。

次に、断熱消磁冷凍機に組み込める実機サイズで、従来型の銅を熱交換器に使ったものと超流動ヒートパイプの物を製作し、その効果を実効的熱伝導率を計測する事で比較し、以下の事が判明した。

- ・超流動転移点の2.17Kを少し上回る温度で液化が開始されるように、超流動ヒートパイ

プ型を製作したが、2.17K以上では全く効果が表れず、超流動転移して初めて機能する事が分かった。

- ・超流動転移温度以上では、銅熱交換器が2~3倍の熱コンダクタンスであったが、超流動転移後は極めて高い2桁以上の熱コンダクタンスが得られた。

- ・一方で、数mWで臨界熱流束を迎えてしまうため、超流動ヒートパイプ型への使用範囲の存在とその予測の重要性が明らかになった。

以上の結果より、超流動ヒートパイプ型のADR用常磁性塩ユニットは使用範囲に臨界熱流量の制限はあるものの、非常に有用である事が分かった。また、その臨界熱流量は空隙率や濡れ周囲長と密接にかかわっている事が分かった。特に、この臨界熱流量と空隙率の関係については、未だ解明されていない課題が残るが、この部分を明らかにする事で、超流動ヒートパイプのADR利用に最適な形状が求められる。宇宙用ADRを志向する場合、この臨界熱流量の存在は、上段の冷凍機への熱負荷変動を適切に抑える保護装置としても働くため、今後の研究進展により、超流動ヒートパイプ型ADRが組み込まれる貢献は大きい。

また、一方で臨界熱流量を大幅に増加する製作方法を確立する事で、他分野に置いて、銅ヒートリンクの代替素子としての展望も開ける可能性が示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計3件)

①高田 卓、「超流動ヒートパイプ研究の応用検討」、先端的極低温冷却技術調査研究会、2013年3月22日、秋田高専テクノコミュニティ

②石井 聡、高田 卓、村上 正秀、都丸 隆行、村上 巖 (KEK) “長い蒸発部を持った超流動ヒートパイプの臨界熱量”、2012年度秋季第86回低温工学・超電導学会、11/8 2012年、盛岡

③高田 卓、都丸 隆行、岡村 崇弘、木村 誠宏、松村 知岳、羽澄 昌史 他 PB-II Collaboration、POLARBEAR II のため

の 0.1K ADR の開発、日本物理学会秋季大会、
2011 年 9 月 17 日、弘前大学

〔その他〕

筑波大学大学院博士課程システム情報工学
研究科修士論文（2012年度）「超流動ヒ
ートパイプの熱伝達特性に関する研究」石井
聡（研究協力者）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田 卓 (SUGURU TAKADA)

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：30578109