

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04319

研究課題名（和文）分散JT効果の解明とJT冷凍機の冷却特性向上に関する研究

研究課題名（英文）Investigation of distributed Joule-Thomson effect and improvement of the cooling characteristics of Joule-Thomson cryocooler

研究代表者

島崎 毅 (Shimazaki, Takeshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：90357202

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、ジュール・トムソン（JT）冷凍機の冷却特性と動作安定性を向上させるために、分散JT効果の特性把握と、その特性を利用した対向流熱交換器を開発することである。分散JT効果とは、長尺の配管内流れで発生する連続的な圧力損失に起因するJT効果である。“点”で起こるJT効果に比して一般的ではないが、条件によりJT冷凍機の特性を向上させる可能性が指摘されている。高温側流路のインピーダンスを高めた対向流熱交換器を試作しヘリウム4を動作流体に使用し10 K程度で特性を評価した。JT弁と熱交換器の両方の機能を兼ね備えた対向流熱交換器として機能することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

長尺細管で生じる圧力損失に起因する分散JT効果を利用した対向流熱交換器は、JT冷凍機で問題になることの多い配管閉塞の懸念を低減し、また冷却特性を向上させる選択肢になり得る。JT冷凍機は、その冷却原理と構造から他の原理に基づく冷凍機と比較して小型化が可能で振動が少なくまた、寒冷発生部を冷凍機の本体から遠方に設置することもできるといった特徴を持つ。高感度センサーや電子デバイスの冷却や、液化機などで広く利用されている。今後は極低温技術の活用が急速に進むエネルギー分野での普及も期待されるので、JT冷凍機の動作安定性と特性の向上は意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to understand the characteristics of the distributed Joule-Thomson (JT) effect and to design a counterflow heat exchanger that utilizes it. These are expected to improve the cooling characteristics and operating durability of JT cryocoolers. The distributed JT effect is the JT effect owing to the continuous considerable pressure loss occurring during flow through a long pipe. Utilization of the effect is rare comparing to that of the JT effect arises in a short flow passage; however, its utilization may improve the properties of JT cryocoolers under certain conditions. The counterflow heat exchanger is developed with a flow path made from a long capillary with high flow impedance. The properties of the developed counterflow heat exchanger are evaluated using helium-4 as the working fluid at approximately 10 K. The heat exchanger is then confirmed to function as a counterflow heat exchanger as well as a JT impedance for fluid expansion.

研究分野：低温工学

キーワード：分散ジュール・トムソン効果 対向流熱交換器 圧力損失 機械式冷凍機 JT効果 Joule Thomson effect ヘリウム 水素

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ジュール・トムソン (JT) 効果は、流体の流れに対して抵抗となる JT 弁 (絞り弁、細孔、細管、多孔質等) などを通して流体を自由膨張させた際に、流体の温度が変化する現象である。通常、JT 冷凍機では、条件を整えた上で、構造としては短い流路に相当する JT 弁を使用している。これに対し、これまで余り利用されてこなかったが、長尺の細管など比較的長い流路で生じる圧力損失に起因し連続的に起きる、分散 JT 効果の利用が注目されている [1]。JT 冷凍機において、JT 弁の手前に設置され、JT 膨張前の流体の予冷に使用される対向流熱交換器を分散 JT 効果が発現する構造にすることで、JT 冷凍機の冷却特性や配管閉塞への耐性を向上させることが提案されている [2]。しかし、そのような対向流熱交換器の特性の予測や設計に必要な分散 JT 効果の理解や特徴の把握は十分ではなかった。そこで、本研究では、分散 JT 効果の理解とその効果を組み込んだ対向流熱交換器開発のための研究を行った。

2. 研究の目的

本研究では、JT 冷凍機の冷却特性と動作安定性を向上させるために、分散 JT 効果の特性を把握し、その特性を利用した対向流熱交換器を開発する。極低温域での利用を想定し、実験では機械式冷凍機で 10 K 程度まで冷却したヘリウムを試験流体として使用した。通常対向流熱交換器と比較して、高温側流路のインピーダンスを数桁高くなるよう設計し、熱交換器と JT 弁の両方の機能を兼ね備えた対向流熱交換器を試作した。JT 弁は一般的に開口部が微細で、ヘリウムに僅かに混入した不純物の凝固による閉塞が常に懸念される。JT 弁の機能を対向流熱交換器に統合し JT 弁を省略できることは JT 冷凍機の動作安定性の向上につながる。対向流熱交換器の構造は、長尺細管をヘリカル状に巻いて高温側流路とし、それを低温側流路となる直管に挿入したヘリカル・イン・チューブを採用した。この構造は他の構造に比べて高温側流路のインピーダンスの調整範囲を広く設定でき、また熱交換器を小型化し易い。対向流熱交換器の設計及び試作後の特性評価に必要な測定系として、圧力損失測定系と対向流熱交換器試験系も構築した。

3. 研究の方法

(1) インピーダンスの検討

分散 JT 効果に対向流熱交換器で利用するためには、高温側流路に通常対向流熱交換器よりも大きなインピーダンスを持つように調整し、十分な圧力損失を得る必要がある。しかし、目標とすべき具体的な値は、流量、温度分布など複数のパラメータに依存するので、実測無しに状態を仮定し解析だけから導出すると不確かさが大きくなる。そこで、以前に標準用抵抗温度計を極低温域で校正するために製作した JT 冷凍機で実測した動作特性を解析し、本研究において目標とすべきインピーダンスを導出した。

(2) 圧力損失測定系と対向流熱交換器試験系の構築

円形断面の流路内で生じる圧力損失を与える相関式は、ヘリカル状に巻かれた流路も含め多数の先行研究で提案されている [3]。使用にあたっては、適用条件が定められている式も多く慎重に選定する必要がある。一方で、相関式で算出される圧力損失が実測値と乖離することも珍しくない。本研究では、細管で生じる圧力損失を設計段階でより正確に把握するため圧力損失測定系を製作した。

また、試作した対向流熱交換器の熱交換器としての特性を調べるために、機械式冷凍機で冷却を行う既存のクライオスタットを改造し、対向流熱交換器試験系を製作した。

(3) 試作した対向流熱交換器の特性評価

対向流熱交換器試験系を使用し機械式冷凍機で予冷したヘリウムを試験流体として、試作した対向流熱交換器の熱交換器としての特性、分散 JT 効果について温度分布、圧力分布を測定した結果を基に解析した。

4. 研究成果

(1) インピーダンスの検討

分散 JT 効果に対向流熱交換器で利用するために必要な高温側流路のインピーダンスの導出では、以前に製作した JT 冷凍機を使用した。この JT 冷凍機は、ヘリウムの希少な安定同位体であるヘリウム 3 を動作流体に使用し、最低温度として 0.5 K 近傍までの冷却が可能な装置である。可変インピーダンス JT 弁と対向流熱交換器を備えたいわば“点”で JT 効果を起こす従来型であるが、可変インピーダンス JT 弁を備えているので、運転中にインピーダンスを操作でき、冷却特性への影響を調べる測定に適していた [4]。なお本研究でヘリウム 3 は、この JT 冷凍機を使用したインピーダンスの導出のみで使用した。これ以外の実験と解析では、ヘリウムとしては、ヘリウム 3 よりも入手と取扱いが容易なヘリウム 4 を使用した。本研究では無次元数を使用して解析を進めるので、この点は研究の遂行において特段の不具合にはならない。解析の結果、分散 JT 効果を効果的に利用するためには、本研究で用いる JT 冷凍機の規模で、これまでよりも 50 倍前後、高温側流路のインピーダンスを大きくする必要があることが分かった。この値は実測する前の段階での解析による見積りよりもかなり大きかった。加えて、流量や圧力、JT

流路全体への流体の封入モル数などの具体的な運転パラメータの組み合わせと操作範囲などの目安も得る事ができた。これらのデータは、後に対向流熱交換器試験系を用いた試験を効率的に進める際の参考になった。ヘリウム液化機など JT 効果を利用する大型極低温機器では、ヘリウムの流れが乱流になる条件で運転されることが普通で、知見も多い。一方、本研究で扱った小型の JT 冷凍機においては、ほぼ層流状態で運転されていることも装置の特徴として挙げられる。この領域での実験データの解析は小型 JT 冷凍機が今後更に普及する上でも貴重な情報になる。

(2) 圧力損失測定系と対向流熱交換器試験系の構築

ヘリカル状に巻かれた長尺細管内の流れは遠心力による流路断面内二次流れが発生し、直管に比べて熱伝達が促進されまた、圧力損失が増大することが知られている [3]。流路断面形状、レイノルズ数やディーン数など無次元数で相関式の適用範囲を定めている場合が多いが、実際の熱交換器では製作過程で流路断面やヘリカル形状が変形するなどもあり実測で適応状況を確認することが望ましい。本研究では、長尺細管で生じる圧力損失を測定するため、圧力損失測定系を製作した (図 1)。管径を変えた試験細管 (図 2) で生じる圧力損失を室温及び、液体窒素温度 (77 K) で測定した。室温においては窒素またはヘリウムを、試験細管の温度を液体窒素温度まで下げた場合は、ヘリウムを試験細管に流して生じる圧力損失を測定した。レイノルズ数が 1 から 1000 程度の範囲で、本研究における実測値と、広く使われている Manlapaz and Churchill [5] の提案する相関式による算出値を比較したところ、両者の差は概ね $\pm 20\%$ 程度の範囲に収まる事が分かった。この結果を念頭に対向流熱交換器を設計し試作した。

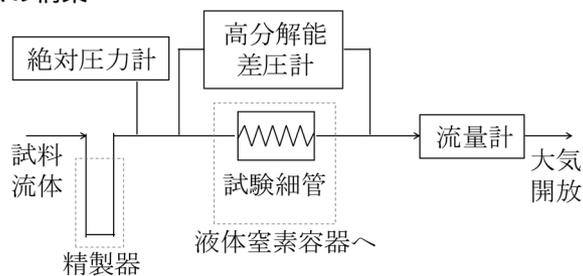


図1 圧力損失測定系模式図

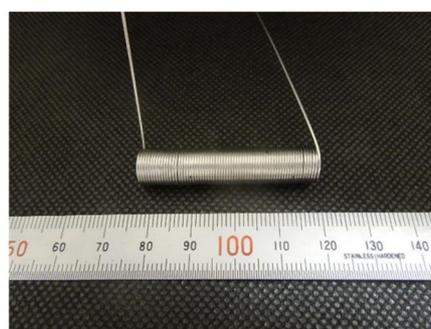


図2 ヘリカル形状に巻いた試験細管 (内径0.3 mm)

試作した対向流熱交換器の特性評価のために、対向流熱交換器試験系も製作した。図 3 に、既存クライオスタットの空きスペースに追加する形で製作した、対向流熱交換器試験系の冷却部の模式図を示す。機械式冷凍機で 10 K 程度に冷却される冷却ステージ (直径 240 mm) の下部に、試験対象となる試作した対向流熱交換器を着脱式のフランジ接続にて取り付ける構造とした。フランジ部は極低温域でも気密性を確保できる金属線シールを採用した。室温部に設置したガスハンドリングシステムより、加圧し精製器で不純物を除去したヘリウム 4 を、機械式冷凍機で 10 K 程度まで予冷した上で対向流熱交換器の高温側流路に相当する細管に供給する。高温側流路入口と出口には、それぞれ圧力・温度測定治具が取り付けられている。この治具を介して、高温側流路の入口と出口の圧力を圧力導管を通じて室温部まで導き、室温部に設置した差圧計で圧力損失を測定した。入口と出口でのヘリウムの温度は測定用治具に取り付けた温度計で測定する。適切に設計された JT 冷凍機の対向流熱交換器の場合、高温側流路入口から出口に至る間に流体の温度は、低温側流路を逆方向に流れる低温の流体に冷却され低下する。高温側流路出口から出たヘリウムは、ポットに流入する。ポットに入った低温のヘリウムは、流れの向きを逆に変え、対向流熱交換器の低温側流路を図 3 でポットから冷却ステージの方向に、高温側流路を流れるヘリウムを冷却しながら、ガスハンドリングシステムに組み込まれたドライポンプで排気される。低温側流路の入口と出口の温度は、それぞれに取り付けた温度計で測定する。一方、低温側流路を流れるヘリウムの圧力は、流路配管径が 14 mm 以上と本研究においては十分太く圧力損失は高温側流路に対して無視できる程度に小さいと見なせるので、室温部に設置した圧力計で測定した値を解析に使用した。ポットから排気されたヘリウムは、ガスハンドリングシステムで加圧、精製された上で再び高温側流路に供給される。ヘリウムは試作した対向流熱交換器を含む閉流路を循環する。

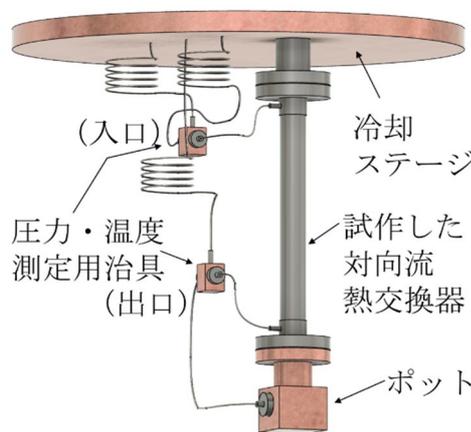


図3 対向流熱交換器試験系冷却部

(3) 試作した対向流熱交換器の特性評価

高温側流路として内径 0.12 mm の細管を組み込み試作した対向流熱交換器を評価した結果を図

4に示す。JT弁を使用せずに対向流熱交換器だけで必要な圧力損失を生じさせ、分散JT効果と熱交換器内の熱交換により、ヘリウムの圧力と温度をJT弁を使用した場合と同等程度下げることができている。図4では対向流熱交換器を流れるヘリウムの状態を、各測定点で測定した温度と圧力から求め、圧力-比エンタルピー図上で示した。図上でシンボルに併記した数字で、対向流熱交換器のどこに対応するヘリウムの状態を示している。各測定点温度での等温線と、飽和液線、飽和蒸気線も描いてある。ヘリウムの状態は、流れに伴い圧力-比エンタルピー図上

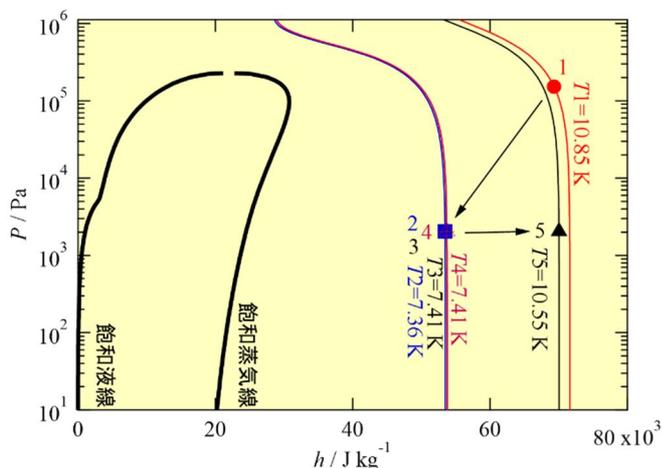


図4 対向流熱交換器を流れるヘリウムの状態

を反時計回りに変化していく。点 1:高温側流路入口、点 2: 高温側流路出口、点 3: ポット、点 4: 低温側流路入口、点 5: 低温側流路出口である。観測された具体的な温度と圧力で説明する。高温側流路入口；点 1 において、ガスハンドリングシステムから供給され機械式冷凍機で予冷された温度 10.85 K、圧力 153 kPa のヘリウムは、高温側流路を流れる間に、低温側流路をポットから冷却ステージへと逆方向に流れる、より低温のヘリウムとの熱交換、及び分散 JT 効果により高温側流路出口；点 2 において温度 7.36 K、圧力 2 kPa になった。それぞれの変化の幅は、3.49 K 温度が下がり、151 kPa 圧力が下がった。この高温側流路出口において、冷却サイクルの中でヘリウムの比エンタルピーが一番低くなった。試作した対向流熱交換器が JT 弁と熱交換器の両方として機能している事を示す結果である。この高温側流路出口；点 2 を出たヘリウムは、次にポット；点 3 に入り、低温側流路入口；点 4 に至る。そして、低温側流路出口；点 5 から出たヘリウムは、室温部に設置されたドライポンプで排気される。高温側流路出口；点 2 から、ポット；点 3 そして、低温側流路入口；点 4 までのヘリウムの状態の変化は小さく、図 4 では三つのシンボルがほぼ重なった。データの数値でも値が近い事が確認できている。これは、現象として想定されていた事で実際に圧力と温度の測定がこの解析の不確かさの範囲で矛盾なく行えたことを意味する。試作した圧力と温度測定用の治具が意図した通りに機能したと判断できた。本実験では、極低温域で比較的狭い温度範囲での精度の高い温度測定が不可欠であったが、そのための技術を確立できた。今後も類似した要求のある測定で応用できる技術となった。さらに、JT 冷凍機に限らず、希釈冷凍機なども含め、ヘリウムを長期間循環させる冷却装置では、空気や水素などの混入を防ぐ精製器の性能が重要である。本対向流熱交換器試験系では、機械式冷凍機で冷却する冷却ステージに設置する水素捕獲用の精製器を試作した。一か月を超える連続運転でも何の問題なく運転できたことから、精製器についても今後も利用できる技術の獲得になったと考えている。

一方で、対向流熱交換器の特性評価を行う中で、対向流熱交換器試験系の限界も顕在化した。機械式冷凍機による予冷後のヘリウムを、熱交換器高温側流路入口の温度で 10 K 程度より下げられなかった。そのため、ヘリウムの相変化（液化）を伴うより低温領域での分散 JT 効果の実験は見送ることになった。液相が存在する場合、分散 JT 効果により対向流熱交換器の熱的特性が向上すると報告がある[6]。相変化を伴う分散 JT 効果の実験は今後は是非取り組みたい。図 4 には飽和液線と飽和蒸気線も描いてある。サイクルに相変化を交えるためには、少なくともサイクルの中で一時的にでもヘリウムの状態が湿り領域に至る程度まで、対向流熱交換器高温側入口に供給するヘリウムの温度を下げる必要がある。現在の対向流熱交換器試験系の設定では、機械式冷凍機への熱負荷が大き過ぎる事が分かった。今後、装置内で現状では不要な配管や配線などを取り外し熱負荷を下げるまた、必要な部分に熱リンクを取り付け温度を下げるなど改造を施す予定である。

参考文献

- [1] Hwang G. and Jeong S., Pressure loss effect on recuperative heat exchanger and its thermal performance, *Cryogenics*, Vol. 50, 13-17 (2010)
- [2] Jeong S., Park C., and Kim K., Design of distributed JT (Joule-Thomson) effect heat exchanger for superfluid 2 K cooling device, 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT 28), IOP Conf. Series: Journal of Physics, Vol. 969, 012084 (2018)
- [3] Ghobadi, M, A review of heat transfer and pressure drop correlations for laminar flow in curved circular ducts, Vol. 37, 815-839 (2016)
- [4] Shimazaki, T., Performance analysis of Pulse tube/³He Joule-Thomson cryocooler for thermometer calibration, Proceedings of the 21st International Cryocooler Conference Vol. 21, 67-76 (2021)

- [5] Manlapaz, R. L., and Churchill, S. W., Fully developed laminar flow in a helically coiled tube of finite pitch, Chem. Eng. Comm., Vol. 7, 57-78 (1980)
- [6] Kim K., Bae J., Jin L., Jeong S., and Choi Y., Experimental and numerical investigations on continuous pressure drop characteristic of tube-in-tube recuperative heat exchanger for 1.8 K cooler, Cryogenics, Vol 118, 103345 (2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 T. Shimazaki	4. 巻 21
2. 論文標題 Performance Analysis of Pulse Tube/3He Joule-Thomson Cryocooler for Thermometer Calibration	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 21st International Cryocooler Conference	6. 最初と最後の頁 67-76
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 島崎 毅、中川久司
2. 発表標題 小型極低温ジュール・トムソン冷凍機用対向流熱交換器試験装置の開発
3. 学会等名 2022年度 計量標準総合センター 成果発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 島崎 毅、中川久司
2. 発表標題 小型冷凍機用熱交換器開発に向けた細管内流れで発生する圧力損失の測定
3. 学会等名 2021年度 計量標準総合センター 成果発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Shimazaki
2. 発表標題 Performance Analysis of Pulse Tube/3He Joule-Thomson Cryocooler for Thermometer Calibration
3. 学会等名 21st International Cryocooler Conference（国際学会）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------