

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 10 月 1 日現在

機関番号：51401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820071

研究課題名(和文) 超流動ヘリウムの機能性流体としての医療分野への応用とマイクロ熱流動機構の解明

研究課題名(英文) Study of micro heat transfer mechanism of superfluid helium as functional fluid for application to the field of medicine

研究代表者

野澤 正和 (NOZAWA, Masakazu)

秋田工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：60447183

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：超流動ヘリウム冷却の医療分野への応用に関する検討を行った。凍結外科用クライオプローブを模擬した同心二重円管流路を作成し、伝熱特性を明らかにした。実験は、二重円管流路の外管壁面に取り付けた温度センサおよび圧力センサを用いて、熱侵入を模擬したヒータを加熱し、液体窒素が流動する際の温度・圧力変動を計測した。温度測定により、熱伝達率と流量の関係を明らかにすることができた。管内の流動状態の変化により熱伝達特性が変わることを確認できた。また、圧力測定より、約200 Hzにピーク周波数をもつ振動を伴って流動していることが分かった。

研究成果の概要(英文)：The application of superfluid helium to the field of medicine was investigated. Some concentric bi-cylindrical channels which imitate the cryoprobe for the cryosurgery were turned out and the heat transfer characteristics were clarified. In the experiments, the temperature and pressure variation in the liquid nitrogen forced flow during heating was measured. The relation between the heat transfer coefficient and flow rate could be clarified by the temperature measurements. In the small flow rate, the heat transfer coefficient hardly changed. On the other hand, in the large flow rate, the heat transfer was promoted with the increase of the flow rate. In the pressure measurements, it was found that the liquid nitrogen forced flow had the pressure oscillation. The peak frequency of the pressure oscillation was about 200 Hz. However, as the flow rate increased, the peak frequency was vanished.

研究分野：低温工学

キーワード：極低温流体 伝熱・流動特性 マイクロチャネル

1. 研究開始当初の背景

凍結外科療法は、癌腫瘍の細胞を凍結ストレスにより壊死・破壊する手技である。手技が簡単で安全であることや、術後の機能障害が少ないことから、癌の外科手術における有力な手法の一つである。実際に、皮膚癌や前立腺癌等におけるの施術例が報告されている。しかし、過冷凍による健全な近傍臓器や組織への損傷のおそれがあり、凍結外科療法用機器の更なる改善が求められている。凍結外科療法では、クライオプローブを用いて、極低温温度に冷却されたプローブ先端部を患部に接触させることにより施術を行う。従って、クライオプローブの性能改善のためには、プローブ先端部の「伝熱特性の改善」及び「小型化」が求められる。

クライオプローブに関する研究動向に関しては、国内においては、プローブ先端部にアイスボールを形成するタイプや、ペルチェ素子を用いるタイプの機器が開発されている。国外においても、米国では、凍結保存をはじめとして、低温技術の医療への応用が盛んであり、クライオプローブを製造・販売しているメーカーも存在する。プローブ先端部を極低温状態にする技術としては、アルゴンやヘリウムガスをジュール・トムソン効果により冷却し、極低温を得る手法が取られている。しかし、ジュール・トムソン効果を利用する際には、気体を約 300 気圧まで上昇させる必要があるため^[①]、結果として、機器の構造を頑強にする必要があり、プローブ先端部に用いる金属も比較的肉厚にしなければならない。現在、プローブ先端部の直径が 1.6 mm のプローブが開発されているが、凍結外科療法の更なる発展のために、より先端形状の細いプローブが求められる。

2. 研究の目的

以上の研究動向から、「伝熱特性が良好」且つ「先端部の形状が従来よりも細い ($\phi 1$ mm 以下)」クライオプローブが求められる。本研究では、これらの要求を満たすために、液化温度の最も低い液体ヘリウムの液体相の一つである、He II を作動流体として用いるクライオプローブの開発を行うための、極低温流体の伝熱特性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 極低温流同心二重円管流路の製作。

試験部の概略図をそれぞれ図 1 に示す。試験部は、断熱された $\phi 5$ の外管に、ステンレス製の内管を挿入した二重円管構造になっており、閉端に熱侵入を模擬したヒータを取り付けた。ヒータには銅ブロックにポリエステル被覆付のマンガニン線 ($\phi 0.33$ mm) を巻きつけ固定したものを使用した。内管からヒータまでの距離は 5 mm に固定し、ヒータお

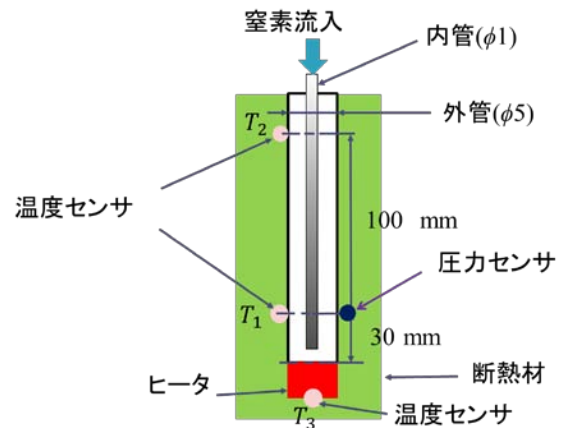


図 1. 試験部の模式図

よびヒータから 30 mm, 130 mm の外管壁に温度センサを取り付けた。また、ヒータから 30 mm の位置に圧力センサも取り付けた。温度センサには金鉄クロメル熱電対を使用し、圧力センサは極低温計測のための圧電型を使用した。断熱材には GFRP を使用した。

(2) 熱伝達率と流量の関係

実験装置の外管部に取り付けた温度センサの計測結果より、外管部を流動する熱伝達率を算出し、流量との関係を明らかにした。熱伝達率 h は、図 2 の流路外管部の下流の温度 T_2 をヒータ温度 T_3 の温度を用いて、

$$h = \frac{q}{T_3 - T_2}$$

と定義する。ここで、 q はヒータからの熱流束となり、本研究では $2.46 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ とした。

(3) 圧力変動と流量および加熱量の関係

圧電型の圧力センサを使用して、液体室素流動時の圧力変動の計測を行った。圧力変動データを高速フーリエ変換による周波数解析を行い、流量および加熱量と圧力振動との関係を明らかにした。

4. 研究成果

(1) 熱伝達率と流量の関係

熱伝達率と圧力の関係を図 2 に示す。縦軸が熱伝達率 h 、横軸が圧力 p (試験部の上流側での静圧) の片対数グラフである。流路の静圧と流量は比例の関係になっていることは予備実験で確認済みである。熱伝達率の傾向は圧力の増加にしたがって緩やかに上昇していることが分かるが、約 113 kPa 以上では、急激に上昇していることが分かる。さらに圧力を増加させると T_2 , T_3 に温度変化が見られなくなったことから熱伝達率が無限

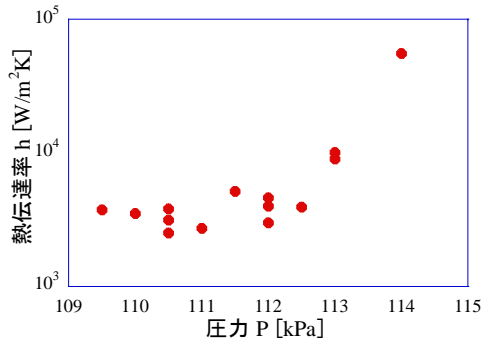


図 2. 熱伝達率と圧力（流量）の関係

大になっている。また、圧力をさらに減少させた範囲では、加熱していない状態でも温度変化が見られた。これは、圧力が小さくなったため流量が減り、管内を十分な量の液体窒素が流動できなかったためと考えられる。ここで、圧力により熱伝達率の傾向が変化した理由として、管内の液体窒素が加熱により蒸発することで、気液二相流の流動状態が変化したことが考えられる。

(2) 圧力変動と流量および加熱量の関係

計測結果の一例を図 3 に示す。縦軸は電圧 V 、横軸は時間 t である。センサによって感知された圧力が電圧に変換され出力されている。断続的に大きな圧力変動が発生する。液体窒素は、連続的には流動せず、試験部までの流路からの熱侵入や試験部での加熱により、液体窒素が蒸発する。そのため、蒸気の発生によって液体窒素の流動が阻害され、断続的に流動していると考えられる。これらの振動の周波数を明らかにするために、FFT 解析を行った。その結果を図 4 に示す。縦軸がパワー、横軸が周波数 f の対数グラフである。周波数が上昇するにしたがってパワーが徐々に減少していることがわかるが、周波数が約 200 Hz でピークを持つことがわかる。周波数が 1000 Hz 以上では、パワーはほぼ一定の値を示している。周波数 200 Hz 前後で変化が見られた要因として、管内を流動する液体窒素の気柱振動が考えられる。

次に、管内を加熱し、温度変化がある状態での圧力変動を計測し、非加熱時と比較を行った。FFT 解析結果を図 4 に示す。周波数のピークは、非加熱時と同様に、約 200 Hz に存在することが分かった。加熱時では数十 Hz オーダの周波数成分が減衰し 200 Hz 近傍の周波数成分が増加している。これは加熱による液体窒素の沸騰流の圧力変動を表しており、気泡の挙動による変動を捉えていると考えられる。

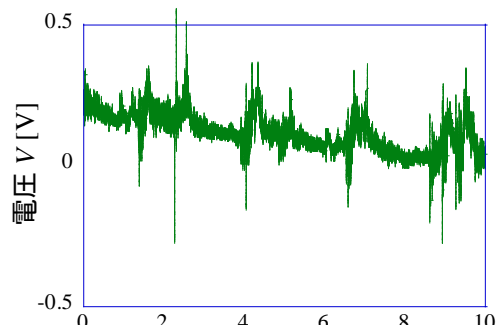


図 3. 圧力変動の時系列データ。圧力 109 kPa

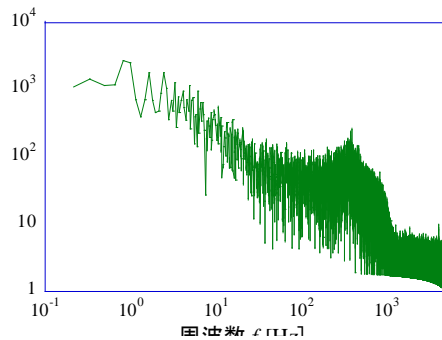


図 4. 圧力変動の FFT 解析結果。非加熱時。圧力 109 kPa

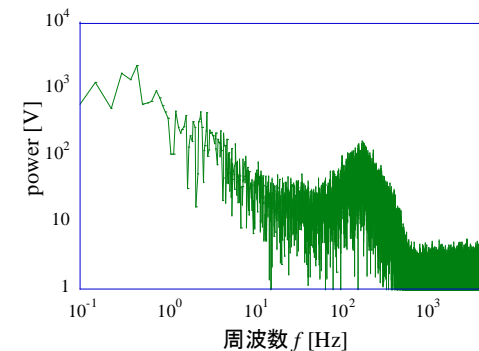


図 5. 圧力変動の FFT 解析結果。加熱時。圧力 109 kPa

以上、本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) チャネル内を流動する液体窒素の熱伝達率は、流量に依存し、気液二相流の流動状態により変化することが確認できた。
- (2) 管内を流動する液体窒素は、断続的に流動することが確認できた。
- (3) 圧力変動の FFT 解析により、約 200 Hz に周波数のピークが確認できた。これは、気柱振動により発生していると考えられる。

<引用文献>

- ①最上ら、「MRI ガイドによる経皮的凍結治療の有用性」、*Medical Imaging Technology* 22

(2004)、 pp. 131-136.

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 1 件)

1. 鈴木智大、赤川祐太、野澤正和、「マイクロチャンネル内を流動する液体窒素の伝熱・流動特性」、東北学生会 第 45 回学生員卒業研究発表講演会、2015 年 3 月 10 日、八戸

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野澤 正和 (NOZAWA MASAKAZU)

秋田工業高等専門学校 機械工学科

准教授

研究者番号：60447183

(2) 研究分担者

なし ()

(3) 連携研究者

なし ()