

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04220

研究課題名(和文) 極低流速域における相変化熱伝達特性の解明と自励振動熱輸送デバイスへの応用

研究課題名(英文) Elucidation of phase change heat transfer characteristics in the extremely low flow velocity region and application to self-excited oscillating heat transfer devices

研究代表者

宮田 一司 (Miyata, Kazushi)

福岡大学・工学部・准教授

研究者番号：00610172

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、小型高性能の熱輸送デバイスとして宇宙空間をはじめとした機器保守の困難な場所での利用が期待されている自励振動ヒートパイプ(PHP)の未解明の動作原理を明らかにすることを目的として行われました。まず、PHP内の作動流体の流れに特徴的な速度変化を伴う相変化熱伝達について、熱伝達率を計測してその特性を明らかにしました。また、PHP内の作動流体の複雑な流動を再現・予測するシミュレーションモデルを開発し、既存の実験結果の再現に成功しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙空間などに代表される機器の保守が非常に困難な環境において、機器の発熱や受熱を除去できる信頼性の高い熱輸送デバイスの開発が求められており、自励振動ヒートパイプはその候補です。これまでは流体の自励振動現象が生じるメカニズムが未解明で、開発・設計に資する知見が整備されていませんでした。本研究で開発された自励振動現象を再現・予測するシミュレーションモデルにより、自励振動中の圧力場などが可視化され、実用化に向けた大きな前進が期待されます。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to clarify the unexplained operating principle of the pulsating heat pipe (PHP), which is expected to be used as a compact, high-performance heat transport device in places where equipment maintenance is difficult, such as in outer space. First, we measured the phase change heat transfer coefficient during the velocity change, that is a characteristic flow of the working fluid in PHP, and discussed on the data. We also developed a simulation model that reproduces and predicts the complex flow of working fluid in PHP, and succeeded in reproducing the existing experimental results.

研究分野：熱工学

キーワード：非定常相変化二相流 自励振動ヒートパイプ シミュレーション 極低流速相変化熱伝達

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自励振動型ヒートパイプ(熱輸送デバイスの一種、略称:PHP)は、可動部がないため信頼性が高いとして、宇宙空間をはじめメンテナンスが困難な場所での冷却デバイスとしての活用が期待されている。しかしながら、PHPの動作原理すなわち作動流体の相変化による自励振動流動現象の発生原理は未だ明らかになっておらず、開発や設計に必要な知見はほとんど確立されていない。

2. 研究の目的

本研究では、PHP内の作動流体の流れに特徴的な速度変化を伴う相変化熱伝達について、熱伝達率の計測を行い、定常流の熱伝達率と比較して特性を明らかにし、PHPのシミュレーションに組み込む方法を検討する。また、PHPの動作を再現・予測できるシミュレーションモデルの開発を行い、速度変化を伴う相変化流れの解析手法を提案し、さらにPHPの動作に影響を与える様々な設計パラメータの影響を調べることを目的とする。

3. 研究の方法

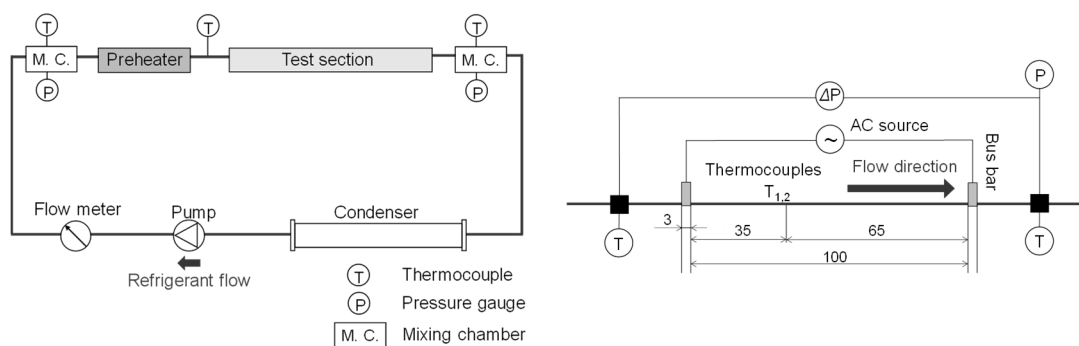
(1)低質量速度における熱伝達特性を把握するため、実験装置を製作し、熱伝達率の測定を行った。実験装置の概略を図1に示す。実験では、PHP内の流れで特徴的な、流速が過渡的に変化する際の沸騰熱伝達率について計測を行い、定常流の熱伝達率との比較を行った。流量は、循環ポンプを外部信号で制御して変化させた。

(2)PHP内の作動流体の流れを再現可能なシミュレーションモデルを開発し、PHP内で生じる熱輸送現象のシミュレーションを行う。PHPの作動流体の流路は閉じた系であり、運転時間の経過に伴い温度・圧力とともに変化する作動流体の物性も計算可能とする必要がある。また、ランダムな核沸騰現象もモデル化して組み込むことで、シミュレーション上で実際に近い動作を発生させる。

4. 研究成果

(1)低質量速度条件において、質量速度を過渡的に低下させながら測定した沸騰熱伝達率を図2に示す。図の横軸の質量速度は、試験部上流の質量流量計による計測値そのものではなく、流量計の計測値からPHP用に開発したシミュレーションモデルを応用して熱伝達率の計測位置での質量速度を計算したものである。図2の上図の縦軸の乾き度についても、シミュレーションを利用して非定常計算で求めた値である。質量速度の減少速度ごとにプロットを変えて実験結果と比較している。実験の結果、質量速度が過渡的に低下する場合であっても、熱伝達率は、その計測点の質量速度を正確に計算すれば、質量速度の低下速度の影響を受けず、定常流の計測で得られる熱伝達率と一致することが確認された。すなわち、PHPのモデル化において、流体と流路壁の温度差を決定するために必要な熱伝達率は、定常流に対する熱伝達率予測整理式を用いることが可能であることが明らかになった。

(2)PHPのシミュレーションモデルの概要を図3に示し、シミュレーションに用いた支配方程式を式A-Cに示す。本研究においては、連続の式、式Aとエネルギー保存の式、式Bを計算する際は流体とともに移動する検査体積を用いて計算し、運動量保存の式、式Cを計算する際に検査体積を流路に固定する独自の方法を採用している。この方法により、急激な膨張と収縮を繰り返すPHP内作動流体の流れを予測することを可能とした。シミュレーションによる予測を既存の実験研究と比較すると、作動流体の速度が定量的に近い値を示した。このことから、本モデルにより、PHPの作動流体の流れが予測可能であることが示された。



(a) 全体の概略

(b) テストセクション

図1 実験装置

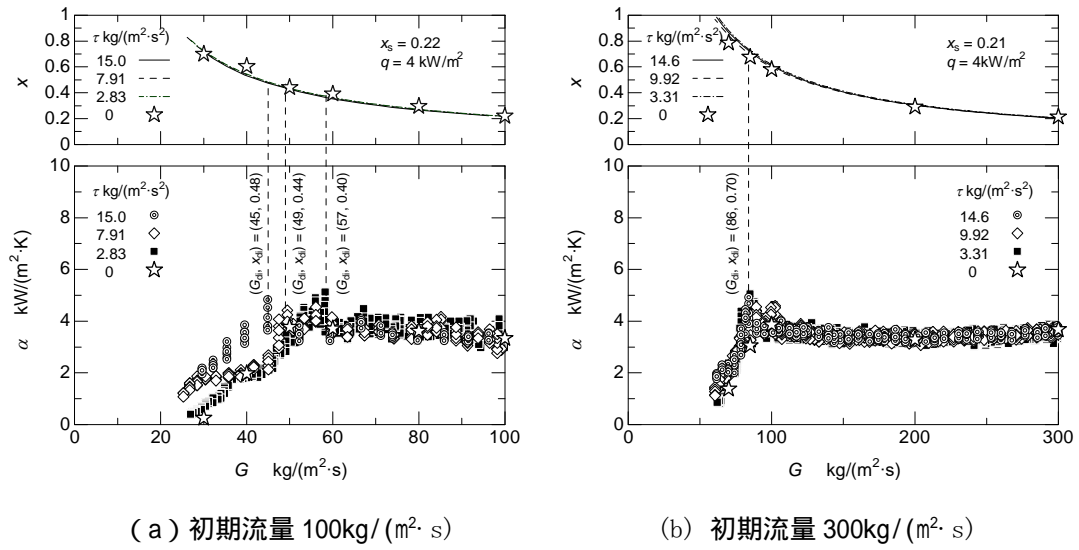


図2 流量が過渡的に減少する過程の沸騰熱伝達率

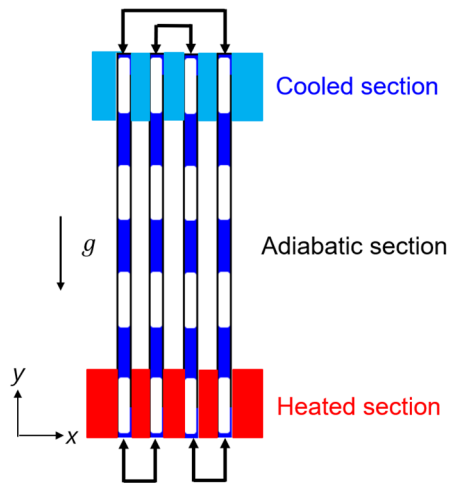


図3 PHPシミュレーションモデルの物理的概略

A: $\frac{d}{dt}(\rho V) = 0$

B: $\frac{dh}{dt} = \frac{4q}{\rho D}$

C: $\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u^2) = -\frac{\partial P_f}{\partial z} - \rho g \sin \theta - \frac{\partial P}{\partial z}$

シミュレーション結果の例として、低熱負荷時の振動流の流速変化の様子および高熱負荷時の脈動循環流の速度変化の様子を図4に示す。振動流とは、PHP内で流れの向きが変わる流れであり、脈動循環流は、PHP内で作動流体は大きな速度変化を伴いながらも一方向に循環する流れである。熱輸送性能は脈動循環流の方が高いとされる。本シミュレーションにより熱負荷の増大とともに振動流から脈動循環流へ遷移することが予測され、遷移条件は既存の実験結果とよく一致した。また、シミュレーションにより振動流から脈動循環流への遷移条件に与える設計パラメータの影響を検討しており、図5には例として流路内径の影響を示している。図に示すように、流路の内径が小さいほど循環流を生じ易いことが予測されている。また、実際の動作を予測するために重要な以下の2点(a),(b)をシミュレーションモデル内に組み込み、様々な動作環境で計算可能なモデルへと発展させた。

(a) PHPの起動後、加熱により作動流体の内部エネルギーが増大して圧力が高まる過程で、作動流体の密度が過渡的に変化しても非定常計算が可能なモデルとした。

(b) 加熱区間で生じるランダムな核沸騰現象を簡易的なモデルで組み込むことで、起動時や動作中に気液が極端に偏在するケースに対しても計算が可能なモデルとした。

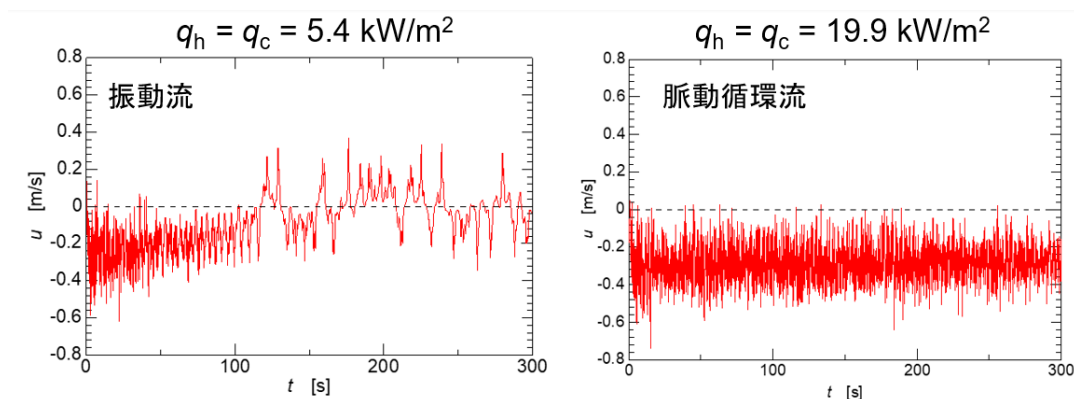


図4 シミュレーションにより予測された振動流と脈動循環流の速度変化の様子

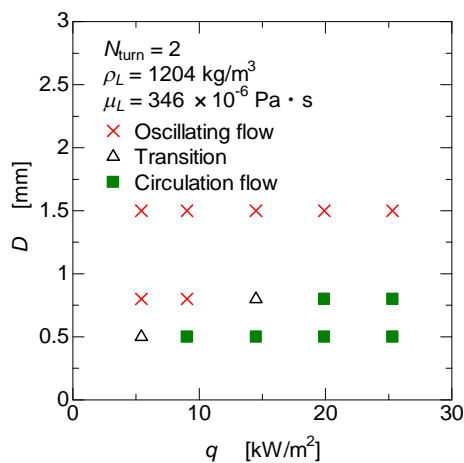


図5 振動流と脈動循環流の遷移境界に与える流路内径の影響

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 黒瀬 築, 登立 航, 松澤 遼, 宮田 一司, 濱本 芳徳	4. 巻 38
2. 論文標題 二並列ミニチャンネル内沸騰流の流量振動発生限界	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本冷凍空調学会論文集	6. 最初と最後の頁 105-113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11322/tjsrae.21-06NK_OK	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 -

1. 著者名 坂井 祥平, 黒瀬 築, 宮田 一司, 濱本 芳徳	4. 巻 38
2. 論文標題 水平ミニチャンネル内の冷媒流量減少過程における過渡沸騰熱伝達特性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本冷凍空調学会論文集	6. 最初と最後の頁 115-122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11322/tjsrae.21-07NK_OA	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kizuku Kurose, Shota Ouchi, Kazushi Miyata
2. 発表標題 Development of simulation model for flow behavior in pulsating heat pipes
3. 学会等名 Second Asian Conference on Thermal Science (2nd ACTS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒瀬 築, 大内 翔太, 宮田 一司, 上野 一郎
2. 発表標題 自励振動ヒートパイプの流動特性に関するシミュレーションモデル
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂井祥平, 黒瀬築, 宮田一司, 濱本芳徳
2. 発表標題 水平ミニチャンネルを流れる冷媒の流量減少過程における過渡沸騰熱伝達
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第74期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大倉熙史, 本田幹, 眞柴佳照, 横谷有右太, 宮田一司, 高尾幸来
2. 発表標題 ミニチャンネル内気液二相流の摩擦圧力損失に及ぼす質量速度の影響
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第74期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂井祥平, 黒瀬築, 宮田一司, 濱本芳徳
2. 発表標題 水平ミニチャンネル内を低質量速度で流れる冷媒の沸騰熱伝達率
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒瀬築, 宮田一司
2. 発表標題 自励振動ヒートパイプの動作に関するシミュレーションの開発
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
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
研究協力者	黒瀬 築 (Kurose Kizuku)		

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
---------	---------