

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04308

研究課題名（和文）多孔体の多機能性創出による熱輸送方向自律可変型・抗重力対応・新熱輸送物理の確立

研究課題名（英文）Development of a new heat transport mechanism with autonomously variable heat transport direction by creating multi-functionality of porous materials

研究代表者

渡邊 紀志（Watanabe, Noriyuki）

名古屋大学・未来社会創造機構・特任講師

研究者番号：60569979

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）：本研究では、多孔体の毛細管力による多機能性を新たに創出することにより、熱交換器などの吸熱側と排熱側の役割が、熱的条件に応じて自律的に可変することができる無電力駆動の新熱輸送技術を実験的に実証した。多孔体はある熱輸送方向では駆動力として作用し、逆の熱輸送方向では逆止弁として働くことにより、バルブなどの駆動部を一切用いることなく、自律的に熱輸送方向を切替えられる無電力の熱輸送を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エネルギー資源の乏しい我が国では、エネルギーの有効利用の観点から、排熱を含めた未利用熱エネルギーの有効活用は重要な課題である。熱エネルギーの有効活用において、高効率で省エネな熱輸送技術は欠かせない。今日までに様々な無電力駆動の熱輸送技術が確立されているが、いずれの技術においても機器の吸熱側と排熱側の役割が固定されているため、空調用ヒートポンプなどの双方向熱輸送を必要とするシステムなどに適用する場合には、電動バルブや中間熱交換器などの機器が必要となる。本提案の自律型の双方向熱輸送技術を用いることで、無電力で簡素な熱輸送技術を実現することができるため、脱炭素化への貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：By creating new multifunctionality through the capillary force of a porous material, a new type of heat transport mechanism that the role of heat receiving part and the heat dissipation part of a heat exchanger can be autonomously switched according to the thermal condition was developed. The porous material acts as a driving force in one direction of heat transport, and acts as a check valve in the opposite direction of heat transport, so that the heat transport direction can be switched autonomously without using a valve.

研究分野：熱工学

キーワード：相変化 多孔体 ループヒートパイプ ループサーモサイフォン

### 1. 研究開始当初の背景

エネルギー資源の乏しい我が国では、エネルギーの有効利用の観点から、排熱を含めた未利用熱エネルギーの有効活用は重要な課題である。熱エネルギーの有効活用において、熱エネルギーの高効率で省エネな熱輸送技術は欠かせない。今日までに、電力を一切使用しないで自然の物理法則を駆動力とする熱輸送技術が提案されている。その例として、重力水頭差を駆動力とするループサーモサイフォン (LTS) や多孔体の毛細管力を駆動力とするループヒートパイプ (LHP) などが挙げられる。いずれも相変化を利用した高効率で無電力の熱輸送技術である。LTS 技術は、ボトムヒート (排熱側が吸熱側より重力方向に対して高い位置にある場合) のみ、熱を輸送することができ、且つ、大容量の熱輸送に適している。一方で、宇宙分野で開発された LHP 技術は、重力の影響を受けにくい毛細管力を利用しているため、LTS では熱輸送が困難であったトップヒート (吸熱側が排熱側より重力方向に対して高い位置にある場合) でも熱を輸送することができる。ただし、いずれの技術においても機器の吸熱側と排熱側の役割は固定されているため、熱を一方向のみにしか輸送することができない。そのため、システムの省エネ化や簡素化を目的に、空調用ヒートポンプなどの双方向に熱輸送を必要とする機器にこれらの無電力駆動の熱輸送デバイスを搭載する場合には、熱輸送方向に一致したデバイスを設けるとともに、バルブや中間熱交換器などで制御する必要があり、結果的に目的を達成することができない。したがって、吸熱側と排熱側の役割が、熱的条件に応じて自律的に可変することができる無電力駆動の熱輸送デバイスの開発が求められる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、多孔体の毛細管力による多機能性を新たに創出することにより、吸熱側と排熱側が熱的条件に応じて自律的に可変する無電力駆動の熱輸送技術を確立することである。本熱輸送技術の概念図を図 1 示す。吸熱と排熱を兼用する熱交換器を重力方向に対して上下に配置し、上側の熱交換器が吸熱をする場合、多孔体の毛細管力は駆動力として作用し、下側の熱交換器に熱を輸送する。一方で、下側の熱交換器が吸熱をする場合、多孔体の毛細管力は逆止弁として働き、吸熱した熱は時計回りで上側の熱交換器に輸送される。多孔体の細孔が小さくなるにつれて駆動力が増加するが、逆止弁効果が強くなり自律的な双方向の熱輸送の実現が困難となる。したがって、提案する自律型双方向熱輸送技術を確立するためには、多孔体の毛細管力による多機能性 (駆動力と逆止弁) を解明する必要がある。本研究では、多孔体の多機能性を解明するとともに、提案する自律型双方向熱輸送技術を実験的に実証することを目的とする。

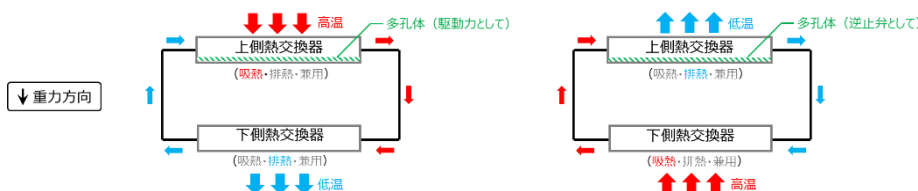


図 1 提案する自律型双方向熱輸送技術の概念図

### 3. 研究の方法

提案する多孔体の多機能性を利用した熱輸送概念 (図 1) の実証を目的に、実証試験装置を設計、製作した (図 2)。本実証試験装置の熱輸送流路内部には、流動方向を制御するためのバルブなどの駆動部は一切取り付けられていない。上側熱交換器の内部のみに、ステンレス製の多孔体 (数マイクロオーダー) が封入されており、下側熱交換器は円管流路のみで構成されている。上下の熱交換器は、円管流路のみで結ばれている。熱輸送媒体には、熱的要求 (輸送熱量と温度) に応じてエタノールや水、アセトンなどを選定した。双方向の熱輸送を実証するために各熱交換器には温熱源としてヒータ、または冷熱源としてチラー水が循環しているブロックが取り付けられており、瞬時に温熱と冷熱を切り替えられる仕組みとなっている。また、各熱交換器には吸熱量や排熱量を計測するためのセンサーが取り付けられている。

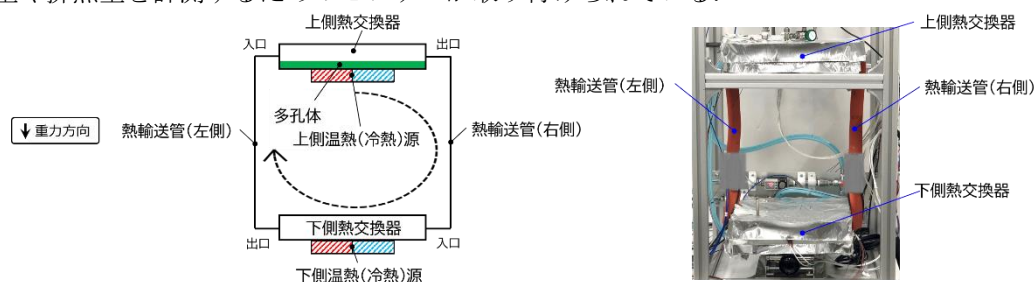


図 2 提案する自律型双方向熱輸送技術の実証試験装置

#### 4. 研究成果

(1) 上下の熱交換器への入熱/放熱条件を瞬時に入れ替えることにより、自律的に熱輸送方向が切替わるときの各部温度の代表的な時系列結果を図3に示す。図3において時刻0~700秒までは、下側の熱交換器に温熱源として200W入熱し、上側の熱交換器には冷熱源としてチラー水(40°C一定, 0.6 l/min)を設定した場合の準定常動作挙動である。

このとき、熱はLTSの動作原理で下側の熱交換器から上側の熱交換器へ輸送されており、下側の熱源温度は92°C程度で一定となった。時刻700秒にて上下の熱交換器への入熱/放熱条件を入れ替えると、上側の熱源温度は上昇し、時刻5400秒で準定常(105°C)となった。このとき、熱はLHPの動作原理で上側の熱交換器から下側の熱交換器へ輸送されている。また、時刻5400秒で、上下の熱交換器への入熱/放熱条件を入れ替えると、下部の熱源温度は一旦133°Cまで上昇するが、その後徐々にサブクール液が上側の熱交換器から下側の熱交換器に供給されるため、下側の熱源温度は徐々に低下し、初期の準定常状態と同じ92°C程度となった。このように、吸熱側と排熱側の熱的条件に応じて自律的に可変する無電力駆動の熱輸送技術を実験的に実証した。

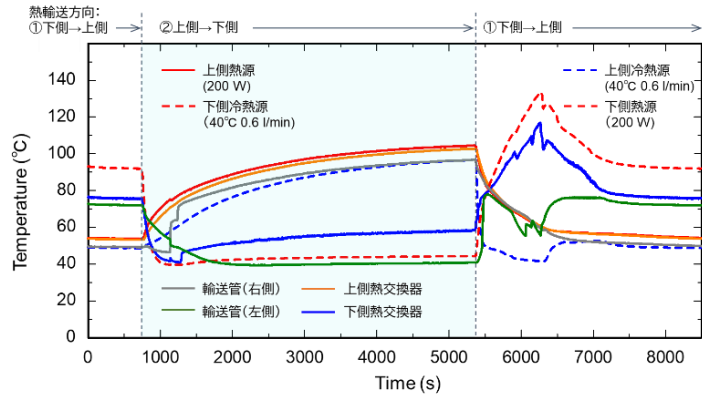
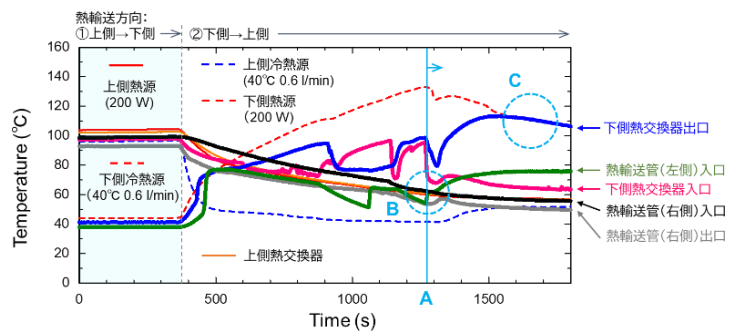


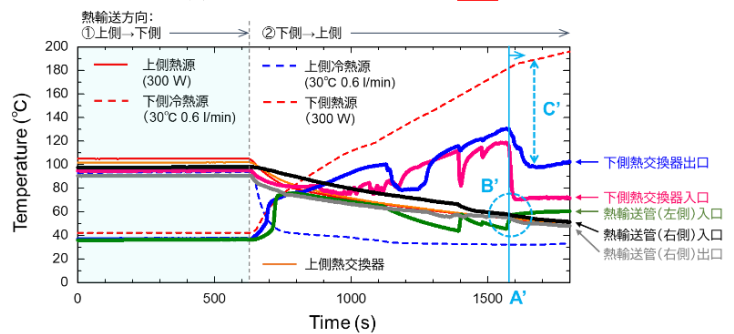
図3 入熱/放熱条件を切替えた場合に自律的に熱輸送方向が切替わる様子

(2) 自律的な熱輸送方向の切替えに成功/失敗した要因について以下の知見を得た。①上側から下側への熱輸送方向から、②下側から上側への熱輸送方向へ切替えた場合に、安定した熱輸送方向の切替えに成功、又は失敗した場合の各部温度の代表的な時系列結果を図4に示す。(図4(a)に示すように、自律的な熱輸送方向の切替えに成功するためには、切替え直前に、蒸気で満たされていた熱輸送管(右側)は、切替え後には徐々に液に置き換わる必要がある。つまり、切替え後に、熱輸送管(右側)の温度は、上側の熱交換器温度の冷却に追従して低下することで、上側の熱交換器の冷却された飽和液が多孔体を介して熱輸送管(右側)に流入しなければならぬ。図4(a)の時刻Aでは、熱輸送管(右側)温度が上側の熱交換器温度に一致したときを示し(図中のB)、その後、下側の熱交換器へ液が供給されることによって、下側の熱源が沸騰冷却(下側の熱源と下側の熱交換器との温度が一致(図中のC))により温度が低下し始めることで自律的な熱輸送方向の切替えに成功した例である。

(2) 自律的な熱輸送方向の切替えに成功/失敗した要因について以下の知見を得た。①上側から下側への熱輸送方向から、②下側から上側への熱輸送方向へ切替えた場合に、安定した熱輸送方向の切替えに成功、又は失敗した場合の各部温度の代表的な時系列結果を図4に示す。(図4(a)に示すように、自律的な熱輸送方向の切替えに成功するためには、切替え直前に、蒸気で満たされていた熱輸送管(右側)は、切替え後には徐々に液に置き換わる必要がある。つまり、切替え後に、熱輸送管(右側)の温度は、上側の熱交換器温度の冷却に追従して低下することで、上側の熱交換器の冷却された飽和液が多孔体を介して熱輸送管(右側)に流入しなければならぬ。図4(a)の時刻Aでは、熱輸送管(右側)温度が上側の熱交換器温度に一致したときを示し(図中のB)、その後、下側の熱交換器へ液が供給されることによって、下側の熱源が沸騰冷却(下側の熱源と下側の熱交換器との温度が一致(図中のC))により温度が低下し始めることで自律的な熱輸送方向の切替えに成功した例である。



(a) 熱輸送方向の切り替えを成功した例



(b) 熱輸送方向の切り替えを失敗した例

図4 自律的な熱輸送方向の切替えに成功/失敗した場合の特徴

一方で、切替えに失敗した例(図4(b))では、下側の熱源の投入熱量は図4(a)よりも100W大きい300Wである。この場合、時刻A'に到達するまでに、下側の熱源温度は図4(a)より速く温度上昇するために、時刻A'以後に液が供給され始めたときには過熱度が大きいために膜沸騰状態となり、結果的に温度は依然上昇し続けるため自律的な熱輸送方向の切替えに失敗した例である。したがって、自律的に熱輸送方向を切替えるためには、時刻A'に到達するまでの時間を短くする必要がある。つまり、投入熱量が増加するにしたがい、逆止弁である多孔体の浸透率を大きくする必要がある。ただし、浸透率を大きくすることで多孔体の細孔径も大きくなる傾向(多孔体の駆動力としての毛細管力が減少する傾向)があるので、上下の熱交換器の距離(水頭差)を毛細管力よりも小さくする必要があることがわかった。以上より、自律型の双方向熱輸送技術を実現するために必要な多孔体の多機能性(駆動力と逆止弁性)について定量的な知見を得ることができた。

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 0件）

1. 著者名 富田 樹、渡邊 紀志、上野 藍、長野 方星	4. 巻 30
2. 論文標題 10 kW 級大容量ループヒートパイプの研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本伝熱学会論文集	6. 最初と最後の頁 13 ~ 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11368/tse.30.13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Noriyuki, Mizutani Takuji, Nagano Hosei	4. 巻 236
2. 論文標題 High-performance energy-saving miniature loop heat pipe for cooling compact power semiconductors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energy Conversion and Management	6. 最初と最後の頁 114081 ~ 114081
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enconman.2021.114081	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Noriyuki Watanabe, Takuji Mizutani and Hosei Nagano
2. 発表標題 Development of miniature loop heat pipe for thermal management of high-heat-flux devices
3. 学会等名 Joint 20th IHPC and 14th IHPS (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊紀志, 水谷琢志, 長野方星
2. 発表標題 高発熱素子冷却用小型ループヒートパイプの熱輸送特性
3. 学会等名 熱工学コンファンレンス2020
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
---------	---------