

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03914

研究課題名（和文）飛躍的な熱伝達を達成する焼結型多孔質伝熱管の伝熱メカニズムの解明と応用研究

研究課題名（英文）Elucidation of the heat transfer mechanism and applied research of sintered porous heat transfer tubes for achieving dramatic heat transfer

研究代表者

榎木 光治（Enoki, Koji）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：40719407

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：金属繊維でできた多孔質を伝熱管に焼結結合させたものは、乾燥空気をを用いた実験において、熱伝達率がおよそ1000倍向上する。多孔質体の空隙率は80%程度、管内径は20mm程度、充填長さは25mmである。伝熱管の乾燥空気入口温度を315℃とし、管外を15℃で冷媒を用いて沸騰冷却すると、乾燥空気は15℃まで冷却され、温度差300℃を充填長さ25mmで達成する。実験的研究では、多孔質体内の空気の温度や流速分布の測定は困難であるが、数値シミュレーションによりこれを再現することに成功した。これにより、実験では得られない情報を基に、伝熱メカニズムのおおよその解明に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空気など密度の低い流体の熱伝達率は、密度の高い液体などの流体と比較すると劣る。そのため、現在使用されずに捨てられている工場廃熱などの300℃以下の熱エネルギーは、大規模な熱交換器を使用しなければ有効利用できないという社会的な問題がある。この問題を科学技術で解決することは、脱炭素社会を構築する上で非常に意義のある研究である。今回の研究成果は、これまでコストパフォーマンスの面から捨てられていた熱エネルギーを省スペースで回収する可能性を示した。また、粘度の低い液体でも同様の効果が確認されていることから、廃熱回収だけでなく、高効率な熱交換器としても利用できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In experiments using dry air, a heat transfer tube sinter-bonded with a porous material made of metal fibers shows an approximately 1000-fold improvement in heat transfer rate. The porosity of the porous body is about 80%, with an internal diameter of the tube around 20mm and a filling length of 25mm. When the inlet temperature of the dry air in the heat transfer tube is maintained at 315°C and the outside of the tube is cooled with a coolant at 15°C to achieve boiling cooling, the dry air is cooled to 15°C, achieving a temperature difference of 300°C over a 25mm filling length. While it is difficult to measure the temperature and flow velocity distribution within the porous body in experimental studies, successful replication has been achieved through numerical simulation. This has allowed for a preliminary elucidation of the heat transfer mechanism based on information that could not be obtained experimentally.

研究分野：熱工学

キーワード：多孔質 焼結 伝熱 熱交換器 廃熱 排熱

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国における一次エネルギーの実に 60%以上が、熱エネルギーとして大気中に廃棄されている現状を鑑みると、未利用の熱エネルギーを回収し、再利用する仕組みの構築が急務である。未利用の熱エネルギーを回収し、再利用するためには、工場等で排気される 200 ~ 400 程度の排熱を効率的に熱交換する技術や設備が必要となる。しかしながら、従来の技術では熱交換の効率に制約があり、長さ 3 ~ 5m 程度の伝熱管を多数配置する必要があり、その結果、伝熱管を含む熱交換器やそれを設置する施設の維持に多大な電力消費を要していたため、これまでは熱エネルギーを排熱としてそのまま大気中に捨てていた。

この問題を解決するためには、熱エネルギーおよび熱交換に関する先進的な研究テーマの設定が不可欠である。そこで、金属繊維でできた多孔質を伝熱管に焼結結合させた伝熱管を用いた実験的研究において、乾燥空気の熱伝達率がおよそ 1000 倍向上することを確認した。図 1 は何も充填していない伝熱管の内部を示し、図 2 は同じ伝熱管内にアルミ繊維多孔質体を充填した例である。このように、金属繊維多孔質体を焼結した伝熱管を用いることで、これまで廃棄されていた熱エネルギーを回収できる可能性が高まることが示された。

この研究成果は、エネルギー効率の向上と脱炭素社会の実現に向けた重要な一歩であり、省スペースでの廃熱回収が可能となることを示している。これにより、熱エネルギーの有効利用が進み、持続可能なエネルギー利用の一助となることが期待される。



図 1 内径 18mm の伝熱管



図 2 内径 18mm のアルミ繊維多孔質体を充填した伝熱管

2. 研究の目的

本研究では、伝熱管の内部に充填させた金属繊維で構成される多孔質部からなる熱交換器を用いる。伝熱管と多孔質部は熱伝導率の高い同一素材のアルミを用いることで軽量化を実現し、これらは焼結結合するため接触熱抵抗が極小化される。このため、伝熱管から伝わる熱をほぼ損失無く多孔質部に伝えることが可能である。例えば、内径 18mm 程度の伝熱管内に 25mm 程の焼結繊維部を充填させることで、管内を流れる乾燥空気の熱伝達率は相変化熱伝達率と同等レベルまで引き上げることができ、25mm の充填長さで 300 程度の温度変化を実現できることが実験的に明らかになっている。

一方、この多孔質体を用いた場合、多孔質金属の空隙率や繊維径を変化させることで伝熱特性を正確に予測することは依然として困難である。これら多孔質体のパラメータを変化させた場合においても、様々な廃熱の形態に適応させるためには、伝熱管内の熱伝達率を正確に予測し、伝熱管の出口温度を正確に制御する必要がある。つまり、金属繊維多孔質体を用いた伝熱管を最適に設計するためには、熱伝達の整理式や数値シミュレーションの構築が必要となっている。

3. 研究の方法

当初は伝熱メカニズムを予測するために、無次元数を用いた熱伝達整理式を提案していた。しかし、詳細な熱伝達メカニズムを理解するために、実際に使用した伝熱管内の繊維構造を非破壊検査である CT スキャンを用いて CAD データ化し、コンピューター上で数値シミュレーションを実施できるようにした。この過程において、出口温度の予測については、無次元整理式によるものよりも数値シミュレーションの解析値の方があらゆる実験条件において非常に良好な再現性を示した。これにより、その信頼性を基に実験的研究では得られない管内部を流れる流体の温度と速度分布を把握することが可能となった。これは、焼結型金属繊維多孔質体を用いることで熱伝達が飛躍的に向上する理由について、伝熱メカニズムの解明に大いに役立った。

4. 研究成果

図3に、数値シミュレーションにおける解析条件を示す。解析条件は実験条件と同様で、管外部はR600a（イソブタン）の飽和温度で固定し、数値解析を行っている。図4は、実験的研究で得られた結果と、シミュレーション解析によって得られた結果を比較している。図の通り、数値シミュレーションで得られた解析値は実験値と非常に良好な一致を示しており、およそ5%の精度で200以上の温度差が得られる伝熱管の実験結果を解析値で得られた。この数値シミュレーションの精度の高さから、今後は伝熱管の最適設計がコンピューター上で可能になることが示唆され、研究の背景である捨てられていた熱エネルギーの回収に大いに役立つ可能性が研究成果として得られている。

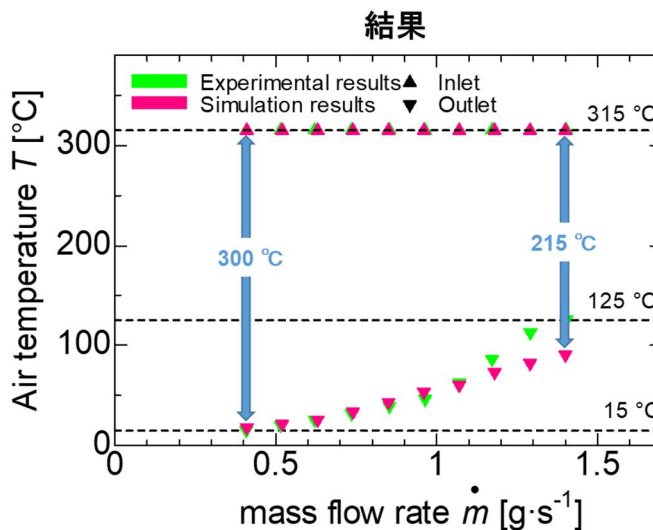
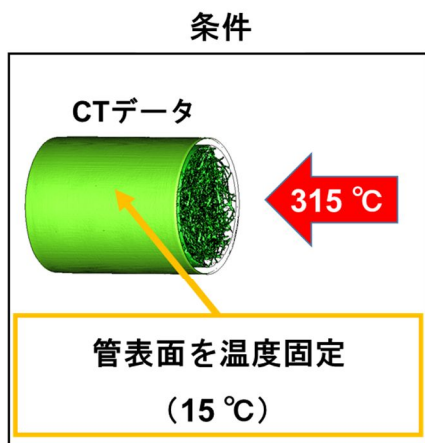


図3 数値シミュレーションの条件
(実験的研究と同じ条件)

図4 実験的研究とシミュレーションの比較

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 1件）

1. 著者名 Watanabe Ren, Kobayashi Takuto, Otomo Yusuke, Akisawa Atsushi, Ueda Yuki, Enoki Koji	4. 巻 196
2. 論文標題 Experimental investigation into the heat transfer and pressure drop performance of sintered high porosity media	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Thermal Engineering	6. 最初と最後の頁 117284 ~ 117284
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.applthermaleng.2021.117284	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 Galicia Edgar Santiago, Otomo Yusuke, Saiwai Toshihiko, Takita Kenji, Orito Kenji, Enoki Koji	4. 巻 11
2. 論文標題 Subcooled Flow Boiling Heat Flux Enhancement Using High Porosity Sintered Fiber	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 5883 ~ 5883
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app11135883	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 0件）

1. 発表者名 望月 建志, 福井 紀彰, 夏村 航太郎, 武内 知也, 榎木 光治
2. 発表標題 金属焼結繊維状多孔質体を用いた車載用空冷熱交換器の空気側の伝熱試験
3. 学会等名 日本冷凍空調学会 年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 夏村 航太郎, 福井 紀彰, 武内 知也, 望月 建志, 榎木 光治
2. 発表標題 金属焼結繊維状多孔質体を用いた管外フィンのシミュレーション解析
3. 学会等名 日本冷凍空調学会 年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福井 紀彰, 夏村 航太郎, 武内 知也, 望月 建志, 榎木 光治
2. 発表標題 金属焼結繊維状多孔質体を用いた車載用空冷熱交換器の空気側の伝熱試験
3. 学会等名 第27回動力・エネルギー技術シンポジウム
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 熱交換器	発明者 榎木光治	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2023-101565	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>従来にない高効率での熱回収が可能な伝熱管の技術を開発 https://www.mmc.co.jp/corporate/ja/news/press/2021/21-1015a.html カーボンニュートラルや持続可能な社会の実現に向けて飛躍的な貢献をする伝熱管の研究開発に成功 https://www.uec.ac.jp/news/announcement/2021/20211015_3775.html Scientists use sintered porous media https://www.eurekalert.org/news-releases/932106</p>

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