

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05844

研究課題名(和文)アルミファブリックの創製と伝熱促進

研究課題名(英文)Production of aluminum fabric for heat transfer enhancement

研究代表者

稲岡 恭二 (Inaoka, Kyoji)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：60243052

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：熱交換器の伝熱促進用要素として、アルミ素線から機織りによりアルミ織物を製作した。アルミ織物から製作した波型アルミ織物フィンに流路に設置する場合の伝熱促進と圧力損失を調査した。波型アルミ織物フィンは、何も設置しない場合に対して平均約14倍の高い熱伝達率を示し、また必要な送風動力は不織布で製作した繊維層より小さく、一般的な多孔質体に対して広い範囲で適用可能であることが分かった。また、圧力損失低減の検討において、バイパス流の利用は熱伝達の低下を招くこと、しかし多孔質体の通過距離を短くすることで、熱伝達率を維持しながら送風動力を低下させることが可能であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Aluminum fabrics have been made from aluminum fibers in order to create new elements for heat transfer enhancement. Heat transfer experiment and pressure drop measurement have been done for the channel flow with corrugated aluminum fabric fins to investigate their performance. It was found that the average heat transfer coefficient caused by the insertion of the corrugated aluminum fabric fins attained 14 times higher value than that of no-insertion case. Also it was found that the pumping power required by the insertion of those fins showed smaller than those of fiber layers used previously, therefore, these new elements suggested to be used for wider range of heat transfer applications. As for the pressure loss decrease, the use of the bypass flow turned to be undesirable due to the severe decrease in heat transfer, however, shortening the porous body distance showed possibility to decrease the pressure loss maintaining high heat transfer enhancement.

研究分野：熱工学，伝熱工学

キーワード：熱伝達 熱交換 伝熱促進 多孔質体 アルミ繊維 異方性 配向

1. 研究開始当初の背景

現在、エネルギーの利用のいっそうの高効率化が強く求められている。エネルギー利用においては、エネルギー変換、熱交換、排熱回収など、多くの場面で熱流体を介した移動現象が深く関わっている。熱を作動流体にいかによりよく伝えるか、熱伝達率の促進技術の開発・高度化は古くからあり、しかし現代においても変わらぬ重要な課題である。

熱交換においては、これまで拡大伝熱面（フィン）が適用され、熱交換面積を増やす工夫がなされてきた。しかし、その性能もここ 20 年来飽和状態にある。熱利用効率をさらに上げるには、次なる高性能フィン要素を開発する必要がある。本研究は、エネルギー利用過程に必須な熱交換時における効率を、アルミ繊維の異方性に注目し飛躍的に向上させようとするものである。実用的な側面からは、熱交換に要する動力を抑える要請があり、その基礎知見や技術も求められている。本研究では動力低減の検討も行った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下の3点である。

(1) まず第1に、これまでの知見を踏まえ、アルミ繊維の熱伝導異方性を人為的に操作・利用できるような新たな熱交換方法を見出すこと。

(2) 上記の方法によって開発したアルミ繊維に基づくフィンを対象として伝熱実験と圧力損失測定実験を実施し、これまでのフィンを超える（通常の流路に対し一桁高い）伝熱促進比を達成できるかどうか調査すること。

(3) 最後に実用上の問題として、多孔質体フィンを用いる場合の多くは高い圧力損失が伴うことから、圧力損失低減のための基礎知見を得ること。

3. 研究の方法

(1) 日本の機織り技術を念頭に、アルミ繊維織物の製作方法を調査・検討した。まず、アルミ繊維の素材、直径をパラメータとし、機械織り、手織りの可能性を検討した。次に、製作可能な異方性の範囲について、経糸と緯糸の本数をパラメータとして試作を試行錯誤しながら検討した。また、アルミ繊維から伝熱実験に供するフィンを製作した。これまでの知見を参考に、高性能コルゲート形状を選択し、波型アルミ繊維フィンの製作方法について検討した。また、流路に設置するためのフィンの接合法を開発した。

(2) 伝熱実験装置を行う吹出式ダクト流路を製作した。図1は製作したテスト部（高さ 10 mm、幅 50 mm、長さ 50 mm）の流れ方向断面図である。下壁全面に配したヒータで加熱した熱が伝熱シートを介し設置するフィンに伝わり、作動流体である空気に伝達される。ヒータ裏面の温度を測定し、加熱熱流束を空気と壁面の温度差で除し、局所熱伝達率を測

定した。テストサンプルの姿勢を 90 度毎に変更し、必要に応じて 4 方向、2 方向の平均を行った。また、テスト部にはサンプルの上流と下流に静圧孔を設け、圧力損失差を測定し、無次元化して流路摩擦係数を求め総合性能を比較した。伝熱実験では、空気の断面平均速度を変更し、テスト部の相当直径を代表長さとするレイノルズ数を 1000 から 3000 の範囲で 3 通りに変更した。

(3) 多孔質体の圧力損失低減の検討においては、加工性の良い銅セルメット多孔質体を用いた。伝熱実験と圧力損失測定実験は、波型織物フィンで用いたテスト部で行った。まずセルメット高さを 4 通り（3, 5, 8, 10 mm）に変更し、対向壁との間にバイパス流を作る場合の伝熱性能を調べた。また、全ての流体が多孔質体を通りつづき、その距離を減らす目的で波型形状（S 型セルメット）の伝熱性能を調べた。

4. 研究成果

(1) 図2はアルミ素線（A5052）と素線を使用して製作したアルミ織物の写真である。素線の平均線径は手織りで素線が切断しない下限値 0.16 mm とした。異方性を与えるため、経糸ピッチを 1 インチあたり 108 本、緯糸 6 本とした。なお、試作過程では、素線径、素線強度、紡ぎ方法、機械織り方法、経糸ピッチを検討し、経糸密度を上げる工夫をした。図3はアルミ織物から製作した波型織物フィン（以下 FC フィン）の供試体の一例である。緯糸と平行に山折りと谷折りを繰返し、波ピッチを 4 通り（1.5, 3.0, 6.5, 10 mm）に変更した。波型平板フィン（以下 PC フィン）も製作し結果を比較した。

(2) 図4に波型織物フィン FC シリーズの圧力損失の結果の一例を示す。圧力損失は、波型織物フィン FC1.5v が最も大きく、ピッチの増加とともに低下する。これは織物の量が最も多いためである。波型織物フィンについては織物のいわゆる平面が流れと垂直の場合（以下添字 v で示す）が平行の場合（p で示す）より約 5 倍大きい。FC1.5v の値は、不織布を積層した同程度の空隙率の銅繊維層（CFL）と概ね同程度である。図は省略してあるが、波型平板フィンの値は、織物フィンの約 4 分の 1 程度で、織物フィンとすることで対応の圧力がかかると分かる。

図5に平均熱伝達率のレイノルズ数に対する変化を示す。線で結んだ銅繊維層（CFL）の値と比較すると、波型織物フィンでは FC6.5p と同等の値である。FC6.5p の圧力損失は銅繊維層に対し二桁程度小さいことを踏まえると、波型織物フィンの特徴は、ピッチを選ぶことにより、圧力のある程度抑えつつ、熱伝達を上げる一方策として考えられ、繊維層に比べてより広い用途に適用可能な特徴を持つと考えられる。なお、銅繊維層と

空隙率が同程度の波型織物フィン FC1.5p の値は2倍程度大きい。また、伝熱促進比はFC1.5pで局所最大約16倍、平均値で約14倍を超える良好な値が得られている。

図6に送風動力に対する熱伝達量の総合伝熱性能の一例を示す。実線は平滑面の乱流熱伝達における性能ラインである。熱伝達量を増やすには、送風動力を増す必要があるが、波型織物フィンは実線より高い位置にあり、良好であること、総合性能は、銅繊維層より十分高く、動力を二桁程度抑えることができる。同じ動力を与えるならば、流れと平行な姿勢が有利であること、平行におくフィン群と垂直とするフィン群はそれぞれ曲線上にあり、類似の熱移動現象をもつと示唆される。

(3)銅セルメット多孔質体、ならびに銅繊維層の高さを変更する場合の圧力損失は、流れのすき間ができることで、例えばすき間が2mmで半分程度、5mmで約8%、7mmでわずかに約3%にまで小さくなるのが確かめられた。しかし、熱伝達促進の値も、すき間の影響で大きく低下することが分かった。結果としてこの方法による総合性能は、平滑面の状態より高いものの、すき間流れはバイパス流となって多孔質体との熱伝達を行うことなく下流に進むため、多孔質体の良好な熱伝達特性が効果的に利用できていないものと考えられる。

上の検討結果を踏まえ、銅セルメット多孔質体の流体通過厚さを変更し、圧力損失を低減する検討を行った。作動流体の空気が多孔質体を必ず通過して熱交換し、かつ圧力損失が低下するように多孔質体に流れ方向の溝を設定した。図7は全体形状を流れ方向に対しS字型とする波型多孔質体の供試体の一例である。#2B(ブロック)の平均空孔径は1.9mmでシリーズの中では比較的大きな空孔を持つ。セル数は1インチあたり11~16個、空隙率は約96%である。#3B(ブロック)の孔径は1.3mm、セル数は平均20個である。S字型サンプルは、ブロック体としての全体寸法は同じで4本の細い溝を製作した#2S、#3S、比較的広い5本の溝(相対的に多孔質体幅の細い)の#2SW、#3SWを流路に設置した。ここで、多孔質部分のスパン方向幅は#2の場合を基準に、空孔半径の約7倍、溝幅はその半分とし、流れ方向の通過長さは約10倍とした。

図8に圧力損失測定結果の一例を示す。S字型サンプル#2Sの値は、ブロック体#2Bの約半分程度に低減し、幅の広い#2SWはさらにその半分程度であり、多孔質体の通過厚さを小さくするほど圧損は押さえられるものの、すき間流れを与えるほどの効果は得られないことが分かる。図9は平均熱伝達率測定結果の一例である。白塗りがブロック体、黒色がS字型サンプル、半分黒色がSWサンプルである。図の一番下にあるプロットは平滑面の値であり、いずれの場合も大きな伝熱促進が得られると分かるが、注目すべきは#2Sの

値であり、S字型とすることで概ね同等か、もしくは若干ながら平均熱伝達率が増加する様子が見て取れる。平滑面の流路に対する促進比は約11倍に達している。ただし、#2SWの値は#2Sの半分程度であり、S字型において溝形状の調査を行うことも必要であると示唆される。図10は総合伝熱性能の一例である。S字型とすることで、プロットが左上に移動しており、若干ながら熱伝達率が増大し、送風動力が減少し、その有効性が見て取れる。同じ送風動力を与えれば、#2Sが最も良好で、#2Bの約1.2倍の伝熱性能を発揮することが分かる。ただし、溝幅や通過距離に応じて熱伝達性能が変化することも分かり、この点は新たな検討課題である。

以上のように、本研究では、アルミ織物による異方性制御、S字型多孔質体の検討によって、アルミ織物フィンの異方性を制御しながら、平均値で約14倍の伝熱促進を得ることができ、他の多孔質体に対しても、より小さな送風動力の領域のもと、良好な伝熱性能を発揮する多孔質体要素を新たに見出し、その特性を明らかにすることができた。

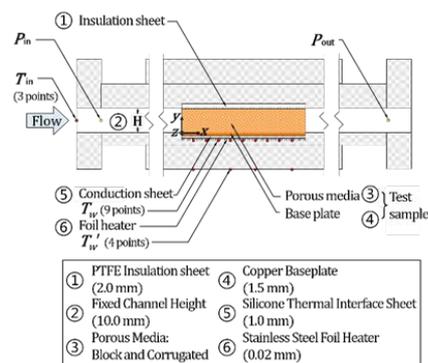


図1 テスト部流れ方向断面図

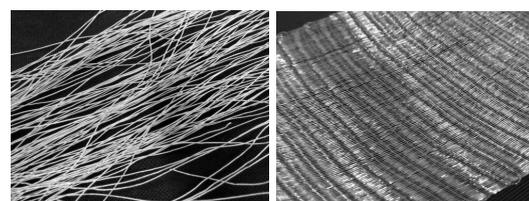


図2 アルミ素線とアルミ織物ファブリック

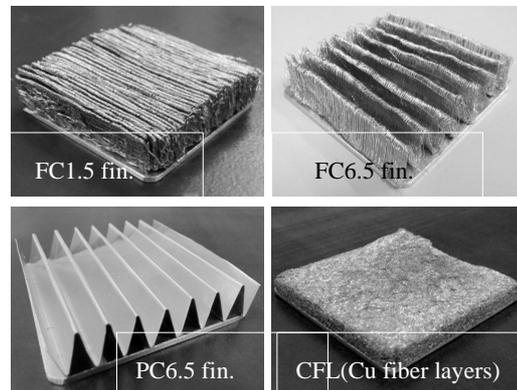


図3 FC波型織物フィンとPC波型平板フィン

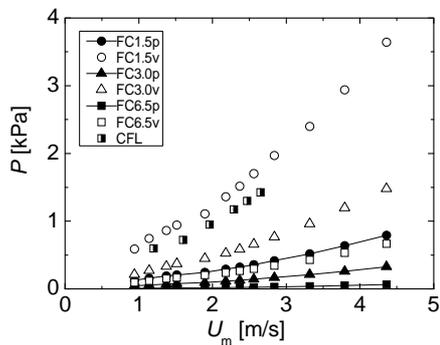


図4 圧力損失の一例 (FC 織物フィン)

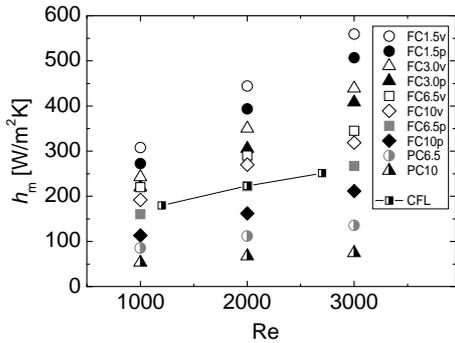


図5 平均熱伝達率 (FC, PC, CFL フィン)

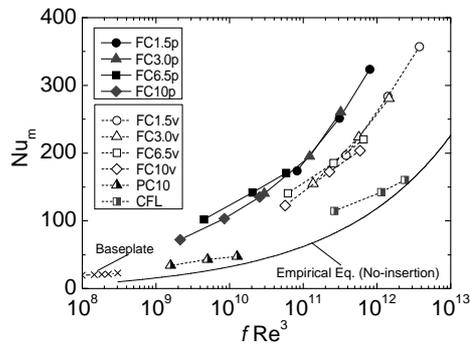


図6 送風動力を含めた総合伝熱性能

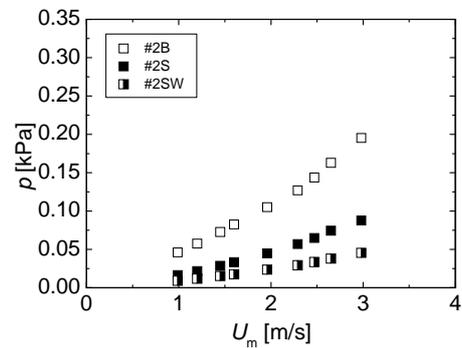


図8 S型銅セルメットの圧力損失

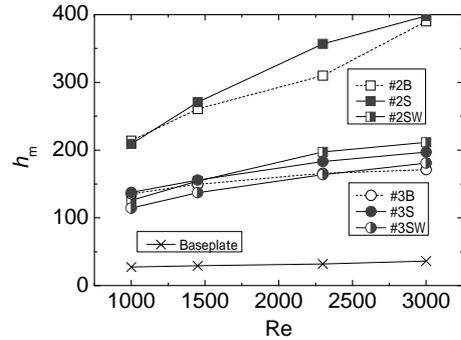


図9 S字型銅セルメットの平均熱伝達率

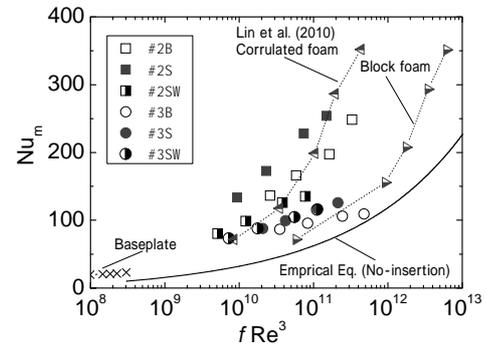


図10 S字型銅セルメットの総合伝熱性能

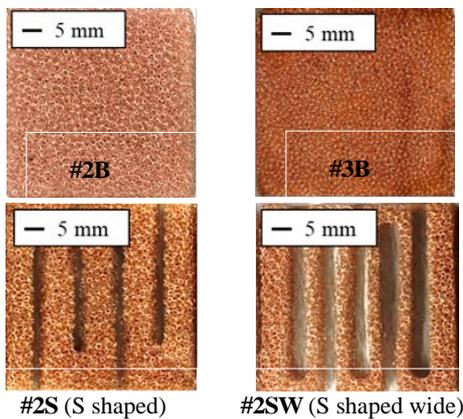


図7 銅セルメットブロック体とS字型サンプル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

R.A. Larrabee, 山本麻微, 伴 拓実, 稲岡 恭二, 千田 衛, 銅多孔質体を設置した流路の伝熱特性 (流路すき間の影響), 同志社大学ハリス理化学研究報告, 査読有, Vol. 57, No. 4 (2017), pp. 76-83.

〔学会発表〕(計4件)

R.A. Larrabee, K. Inaoka, Review of porous media geometry promoting heat transfer performance for heat exchangers, 2016. 03. 08, The 6th International Workshop of Energy Conversion, IWEC2016, Kyotanabe.

R.A. Larrabee, M. Yamamoto, K. Inaoka, M. Senda, Effects of air bypass on heat transfer

performance in a channel flow with metallic porous media, 2016. 11. 02, The 4th International Forum on Heat Transfer and Energy Conversion, IFHT2016, Sendai.

R.A. Larrabee, 山本麻微, 伴 拓実, 稲岡恭二, 千田 衛, 銅多孔質体による熱伝達促進, 同志社大学エネルギー変換研究センター 2015年度研究成果報告会 2016年12月2日, 京都市.

伴 拓実, R.A. Larrabee, 家氏大輔, 稲岡恭二, 千田 衛, アルミニウム繊維織物を設置した流路の熱伝達特性 2017年3月13日, 日本機械学会関西支部第 92 期定時総会講演会, 吹田市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

稲岡恭二 (INAOKA KYOJI)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号 : 60243052