

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 1 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560210

研究課題名（和文）ファインメタル熱交換器による排熱回収促進

研究課題名（英文）Promotion of exhaust heat recovery by fine-metal heat exchanger

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

研究成果の概要（和文）：熱交換器の性能向上を目的として、繊維状金属（アルミニウム繊維層）を流路に設置する場合の伝熱促進と圧力損失を調査した。アルミニウム繊維層の軸を伝熱面に対して垂直方向とする異方性を利用すれば、何も設置しない場合に対して目標値の 10 倍を超える約 20 倍もの高い熱伝達率が得られることが明らかとなった。この伝熱促進は、大きな圧力損失を必要とするが、現在の一般的なフィンに対し一桁高い値である。

研究成果の概要（英文）：Heat transfer experiment and pressure loss measurement have been done for the channel flow with aluminum fiber layers in order to investigate their effectiveness as an insertion device to improve the heat exchanger's performance. It was found that the aluminum fiber layers with their axes mainly perpendicular to the wall showed quite high heat transfer performance, that is, heat transfer of twenty times as large as that of the non-insertion case was obtained. This heat transfer enhancement means one-order high value compared to the conventional fins, although much high-order large pressure loss should be paid.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱交換器，繊維状金属，伝熱促進，圧力損失，拡散接合法

## 1. 研究開始当初の背景

エネルギーを有効に利用するには、目的に応じた各熱流体機器の利用効率を上げると同時に、これまで見逃していた排熱エネルギーを回収し利用する必要がある。回収・利用効率を上げるには、排熱回収熱交換器の高効率化が必須である。本研究では、利用されずに捨てられている各種の排熱を念頭に、それらを回収し利用促進に資する新規な熱交換器要素について開発・研究を行った。本熱交換

要素の特徴は、熱交換面に拡散接合法を用いてファインメタル（繊維状金属）を設置することにある。熱交換面の熱を金属繊維の高い熱伝導性により熱交換流体に積極的に伝え、加えて繊維の配向方法を最適化し流路の圧力損失の増加を抑え、高い熱交換性能を実現する。研究期間中に、熱交換面の伝熱量を、設置しない場合との比で 10 倍まで高めることを到達目標とした。

## 2. 研究の目的

本研究では、極めて高い熱交換性能を発揮する熱交換器要素の開発を目的とした。図1に試作テスト部の一例を示す。本研究で扱う繊維状金属は、金属を細線状に加工したものを集め、加圧して形状を整えたものであり、いわゆる多孔質性を持つ。これを熱交換流路に敷き詰め、流体のより近くで受熱と放熱が可能である。すなわち、伝熱面の熱は高い熱伝導性をもつ金属繊維を通して流路の各所に移動し、流体により多くの熱を伝える。多孔質金属を熱交換に利用する報告はこれまでもあるが、ほとんどが発泡体、もしくは焼結体により製作されたもので、繊維状金属の報告例はこれまで見あたらない。繊維状金属は、弾力性に富み既存の伝熱管に設置できるメリットを有する点で、適用性を調べることは工学上有意義である。

本研究では、流路内にファインメタルとしてアルミニウム繊維層を設置し、局所熱伝達率と流路の圧力損失を測定した。熱伝導の異方性にも注目し、繊維軸の配向を伝熱面に対して平行になるように設置する場合と、垂直になるように設置する場合の2種類に変更する場合について熱伝達率に及ぼす影響を調べた。この種の物体を伝熱領域に設置する際には、伝熱面と物体との接触熱抵抗によって熱交換性能が変化すると報告があるが、その影響は不明である。本研究では、伝熱面に対し、アルミニウム繊維層を代表的なろう付けによって設置する場合と分子的に拡散接合して設置する場合、それらを用いない設置方法について実験を行い熱伝達と流路の圧力損失に及ぼす影響についても検討した。



図1 ファインメタルと熱移動の模式図

## 3. 研究の方法

本研究では、ファインメタル（アルミニウム繊維層）の製作方法から実験結果の取得まで、下記に示す課題に対し研究を進めた。

- ①ファインメタルの製作方法と拡散接合法の検討
- ②熱交換基礎実験装置の設計と製作
- ③熱交換実験：熱交換量と圧力損失のデータ取得、金属繊維材料、密度、流量に対する検討
- ④詳細熱交換実験：拡散接合、ろう付け接着

の検討

⑤熱交換機構のモデル化と数値シミュレーション

⑥最適熱流動の機構解明とまとめ、実用化に向けた課題抽出

本成果報告書では、注目したファインメタルと熱交換実験に使用した装置、実験方法の概要（②～④の概要）について以下に示す。

実験用に吹出し式流路を製作した。図2にテスト部の概要を示す。流路の下壁を伝熱面とし、厚さ  $20\mu\text{m}$  のステンレス箔を貼り、通電により等熱流束加熱する。ステンレス箔の裏面に熱電対を14箇所配置して、局所壁

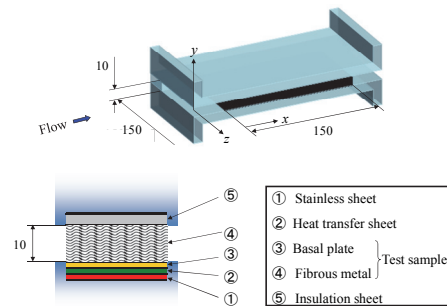
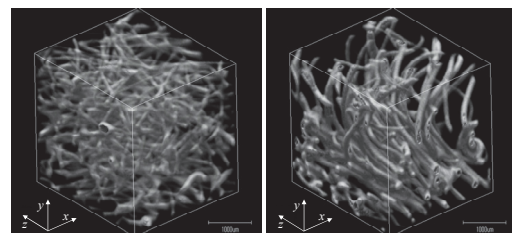


図2 実験に用いたテスト流路

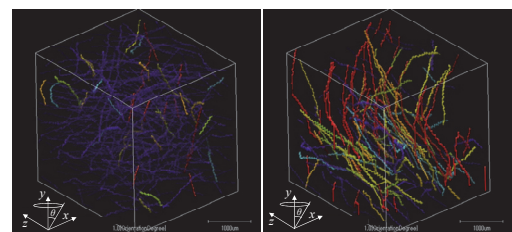


図3 アルミニウム繊維層のSEM写真



[X86.9+]

[Y82.8-]



-0.5 S 1

図4 X線イメージ(上)と配向度Sの大きさ(下)  
左：X配向[X86.9+]、右：Y配向[Y82.8-]

面温度を測定し、熱伝達率を求めた。テスト部前後に圧力孔を設け、圧力損失を測定した。図3に注目したアルミ繊維層のSEM画像を示す。アルミ繊維は熔融紡糸法を用いて作り、素線径約 $100\mu\text{m}$ の円形に近い断面を持つ。それを不織布状にし、層状に折り畳み重ね、流路の大きさ（高さ $10\text{mm}$ 、幅 $150\text{mm}$ 、長さ $150\text{mm}$ ）に合わせ形を整え成形加工した。

アルミ繊維層のテストサンプルは、繊維の配向、空隙率、基板への設置方法を変更した（サンプルの呼称をその順番に表記する）。配向は図4に示すように、アルミ繊維の軸方向を伝熱面と平行な面内に設置するX配向と、伝熱面と垂直な面内に設置するY配向の2種類を実験した。空隙率は比較的近い $81.5\% \sim 82.8\%$ の範囲内（その値を付して表記）とし、また、基板への設置は2種類とし、ロウ付け接合を“-”，分子拡散接合を“+”を付して表記する。

#### 4. 研究成果

本研究の主な成果を以下に記す。特に目的とした10倍を超える結果が得られた点について注目し、その概要を示した。

##### (1) 伝熱特性と圧力損失特性

図5に局所熱伝達率の流れ方向分布の一例を示す。アルミ繊維層を使用した場合に加え、未設置のプロットも●印で示してある。アルミ繊維層を設置することにより、大きな

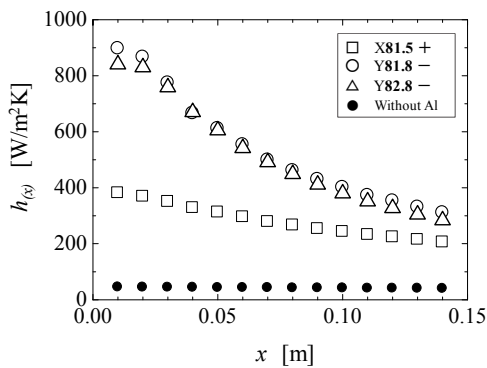


図5 局所熱伝達率分布

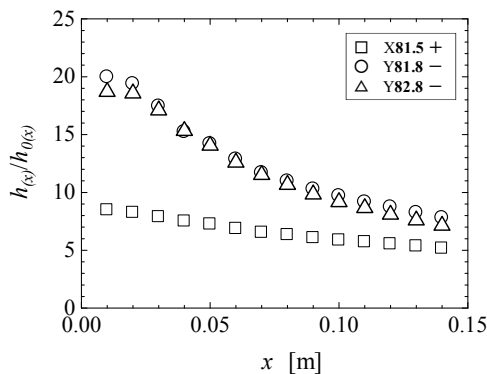


図6 局所熱伝達促進率分布

熱伝達率が得られること、下流に向かうにつれて次第に低下することが分かる。これらをアルミ繊維層を設置しない滑面の熱伝達率で除した伝熱促進率を図6に示す。Y配向の[Y81.8-]の伝熱促進率は、上流位置で最大で20倍を達成した。伝熱促進率は下流に向かって次第に低下するが、最下流でも最大で約8倍となり、高い伝熱促進効果が保たれることが分かる。図7に圧力損失のレイノルズ数に対する変化を示す。アルミ繊維層の設置により、圧力損失はレイノルズ数の増加とともに増大する傾向を持つことが分かる。

##### (2) 繊維層の異方性の影響

異方性について見ると、図6のY配向のサンプル[Y81.8-]の伝熱促進率が最上流位置で20倍に対し、X配向のサンプル[X81.5+]は8倍にとどまり、Y配向の伝熱促進量はX配向のその約2.3倍に達し、異方性の影響が顕著であることが分かる。サンプル[X81.5+]は拡散接合であるが、ロウ付け接合より若干伝熱促進量は低い。また、図7のサンプル[Y81.8-]の圧力損失は、サンプル[X81.5+]に対し若干低い程度で、繊維の配向の圧力損失への影響は小さいと考えられる。

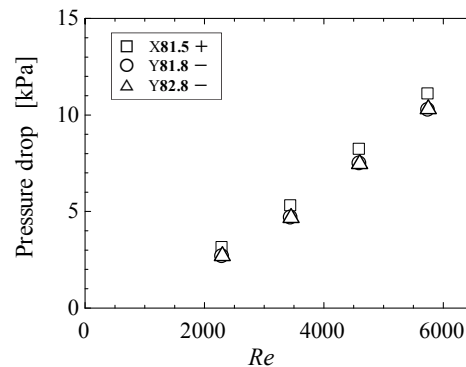


図7 圧力損失分布

##### (3) 他フィンとの比較ならびに総合性能評価

図8に、工業製品にしばしば使用されるコルゲートフィン(SFT-2)（伝熱工学資料の算出式から求めた）と平均熱伝達率を比較した。コルゲートフィン(SFT-2)の伝熱促進率が1.7倍程度であり、アルミ繊維層の値は代表的なフィンと比較して一桁高い熱伝達率が得られる特徴があることが見出された。

伝熱促進と圧力損失のデータをもとに総合的な性能評価を行った。図9に平均ヌッセルト数とポンプ動力の関係を示した。なお、横軸のポンプ動力は $\text{ReCp}^{1/3}$ で示してある。何も設置しない平滑流路を●印（ただし、平均ヌッセルト数は測定値を用い、圧力損失は測定不能であったため、圧力損失係数はDeanの式から求めてある）で示した。アルミ繊維層は、コルゲートフィン(SFT-2)と平滑流路のポンプ動力に対し、格段に大きいポンプ

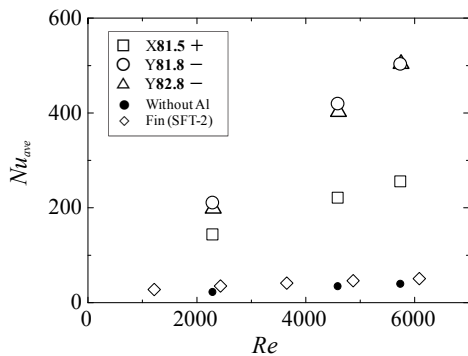


図8 平均熱伝達率 (平均ヌセルト数)

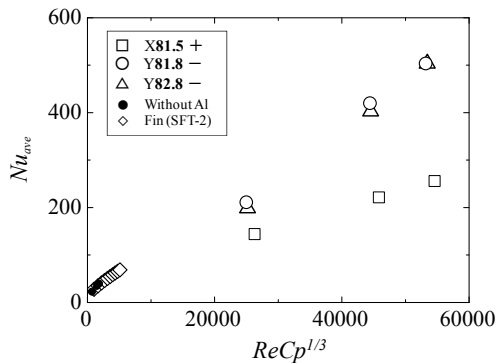


図9 平均熱伝達率とポンプ動力の関係

動力を必要とすることが見て取れる。これは、アルミ繊維層の圧力損失の値が、コルゲートフィン (SFT-2) の数千倍に達し、極めて大きいためである。一方、伝熱量に注目すると、ポンプ動力とは桁数が異なるものの、アルミ繊維層による伝熱促進量が大きいことが確認される。熱伝達率に及ぼす異方性の影響が大きいので、Y 配向のサンプル [Y81.8-] およびサンプル [Y82.8-] の総合性能は X 配向のサンプル [X81.5+] の約 2 倍高いことが分かる。データの詳細は示していないが、ロウ付け接合の場合の伝熱促進率は分子拡散接合より若干ながら高く、しかし、圧力損失も僅かに増大するため、総合性能の観点からは概ね同等の性能を示すことも見出された。また、発泡アルミについても調査を進め、その伝熱促進率は、異方性を利用しないアルミニウム繊維層より高いが、異方性を利用し伝熱促進を 20 倍に高めた繊維に比べて低いことも明らかになった。

#### (4) まとめと今後の課題

本研究で試みたアルミニウム繊維層による伝熱促進は、平滑流路に対して極めて大きなポンプ動力が必要となる点で、例えば空調用の熱交換フィンには適さないものと考えられる。しかしながら、コルゲートフィンの伝熱促進量が平滑面に対して約 1.7 倍程度にとどまることを踏まえると、動力を要してでもアルミニウム繊維層の異方性を使えば平滑面の約 20 倍の伝熱促進を得ることが可能

であり、一桁高い伝熱促進が必要となる場、あるいは、例えば水などの液体が使えない熱交換用途への適用可能性が十分にあることが分かった。なお、課題⑤については、熱伝導物体を設置した流路の熱流動解析を実施し、熱移動経路や作動流体が及ぼす影響について調べることができた。今後、現象を支配している物理的なパラメータについて整理・検討していく。課題⑥については、ファインメタルを適用した応用製品を念頭においた実用研究、開発研究を開始したところであり、本研究で得た約 20 倍もの伝熱促進成果を活かし発展させる所存である。

#### 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)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ①岡崎圭佑, 阪上雅昭, 千田 衛, 稲岡恭二, 不織アルミニウム繊維層の異方性を利用した熱伝達促進, 同志社大学理工学研究報告, 査読無, 54 巻 1 号 (2013), 1-6.
- ②岡崎圭佑, 山本光佑, 阪上雅昭, 千田 衛, 稲岡恭二, アルミニウム繊維層を設置した流路の熱伝達と圧力損失特性, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 79 巻 800 号 (2013), 649-659. 10.1299/kikaib.79.649.
- ③谷 賢治, 岡崎圭祐, 千田 衛, 稲岡恭二, 繊維状金属を設置した流路の熱伝達と圧力損失特性, 同志社大学理工学研究報告, 査読無, 53 巻 3 号 (2012), 71-76.

[学会発表] (計 3 件)

- ①今井啓太, 岡崎圭祐, 阪上雅昭, 千田 衛, 稲岡恭二, アルミニウム繊維層の異方性を利用した熱伝達促進 (発泡体との比較), 2013 年 7 月 27 日, 同志社大学エネルギー変換研究センター2012 年度研究成果報告会, 京田辺市 (発表予定).
- ②今井啓太, 岡崎圭祐, 千田 衛, 稲岡恭二, アルミニウム繊維層を利用した伝熱促進, 2013 年 5 月 31 日, 第 50 回日本伝熱シンポジウム, I314, 仙台市.
- ③岡崎圭祐, 山本光佑, 阪上雅昭, 千田 衛, 稲岡恭二, アルミ繊維を設置した流路の熱伝達, 2012 年 7 月 28 日, 同志社大学エネルギー変換研究センター2011 年度研究成果報告会, 京田辺市, 49-54.

#### 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