

Heat Transfer Performance of a Channel Flow with Copper Porous Material (Effect of Flow Passage)

Roger A. LARRABEE*, Mami YAMAMOTO*, Takumi BAN*, Kyoji INAOKA**, Mamoru SENDA**

(Received October 21, 2016)

Heat transfer experiments and pressure loss measurements have been performed for the case in which a copper porous media, Celmet[®], was inserted into an air channel flow in order to clarify its performance for enhancing convective heat transfer. The aim of this paper is to explore the effect of a flow passage, given by changing the height of the porous media attached to the lower wall, on heat transfer enhancement and pressure loss characteristics. Copper fiber layers of different height were also introduced for comparison with the results of the Celmet[®]. It was found that the given flow passage remarkably decreased the pressure drop produced by the porous media, although the ratio of the pressure drop reduction for Celmet[®] was found to be lower than that for the copper fiber layers. The ratio of maximum of the heat transfer enhancement compared to the normal channel flow was approximately 11 for the Celmet[®] block, which was approximately 1.5 times larger than that of the copper fiber block. The flow passage was found to decrease the heat transfer enhancement ratio. Since the decrease in heat transfer was small for the Celmet[®], including all of the passage cases, total performance of Celmet[®] as a heat transfer enhancing device was found to be more effective than that of the copper fiber layers.

Key words : heat transfer, heat transfer enhancement, pressure loss, fiber layer, porous metal

キーワード : 熱伝達, 伝熱促進, 圧力損失, 繊維層, 多孔質金属

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)

Roger A. LARRABEE*, 山本 麻微*, 伴 拓実*, 稲岡 恭二**, 千田 衛**

1. はじめに

気液間の熱交換においては、気相側伝熱面の低い熱伝達率をどう増大させるかが課題である。多くの場合、気相側の伝熱面積を増やす工夫がなされるものの、得られる伝熱促進比は数倍にとどまり、液相側の熱伝達率には及ばないのが現状である。

著者らは、空気流路において、一桁高い熱伝達促

進手法の開発¹⁾をめざして、アルミ繊維層を伝熱面に設置する場合の伝熱促進効果を調査してきた²⁻⁴⁾。これまでに、アルミ繊維層が持つ高い熱伝導性と微細な繊維表面からの熱伝達を利用すれば、何も設置しない場合と比べて伝熱促進比が最大約 8 倍に達すること²⁾、また、繊維の異方性を利用して繊維軸を伝熱面に垂直に配置すれば、伝熱促進比はさらに

* Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

**Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-0774-65-6460, E-mail: dup0588@mail4.doshisha.ac.jp

増大し、最大約 20 倍に達すること³⁾を明らかにした。この値は工業的に使われている一般的な伝熱フィン（例えばコルゲートフィン）に対し、一桁高い伝熱促進比を誇る³⁾。しかし同時に、格段に高い圧力損失、すなわちポンプ動力を必要とし、これをどう低減するかが、この種の多孔質金属を熱交換用途に用いる際の最大の課題にもなっている。

Tzeng ら⁵⁾は、多孔質体ヒートシンクの側方、上方のすき間が熱伝達にどう影響するかを調査している。しかし、圧力損失については触れていない。Gallego と Klett⁶⁾は、カーボン多孔質体の貫通孔による圧力低減効果を調べている。応用性は高いものの、孔径や位置などパラメータが多く、流れがやや複雑であり、より基礎的な検討が望まれている。

本研究では、上記の観点から、まず、対向壁面との間に流れのすき間を与える基礎的な場合に注目する。すなわち、伝熱面に設置する多孔質体の高さを変え、対向壁側にできるすき間を変化させる場合について、圧力損失の低減効果と熱伝達率を測定した。多孔質金属には、異なる高さのサンプルが製作できる銅セルメット⁷⁾に注目した。また、銅繊維層についても同じ高さのサンプルを作り実験し、それらの結果を比較し、すき間の影響を検討した。

2. 実験方法および実験方法

2.1 実験装置ならびに多孔質体

実験は Fig. 1 に示す吹出式のダクト流路で行った。ブローアで室内の空気を吸入しテスト部に導く。テスト部手前には、十分な長さの助走区間を設けてある。

Fig. 2 にテスト部の流れ方向断面図を示す。テスト部は高さ $H=10$ mm、スパン方向幅 50 mm の矩形断面であり下壁に流れ方向長さ $L=50$ mm の加熱部を持つ。すなわち本実験の伝熱面積は $A=2500$ mm² である。伝熱実験においては、熱は厚さ 20 μ m のステンレス箔に通電し、等熱流束加熱条件（約 700 W/m²）で与えた。ここで熱は伝熱シートを介し、厚さ 1.5 mm の銅製基板に伝わる。この基板の流路側の面がいわゆる壁面に相当する。テスト部の主要な壁面は断熱性のある厚さ 20 mm のアクリル部材で製作しており、特に伝熱面と対向する上壁側は厚さ

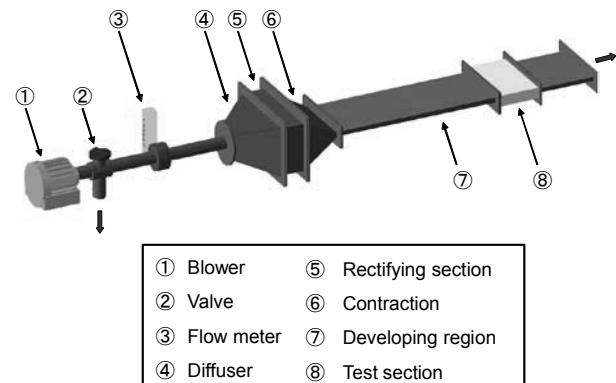


Fig. 1. Schematic view of an experimental apparatus.

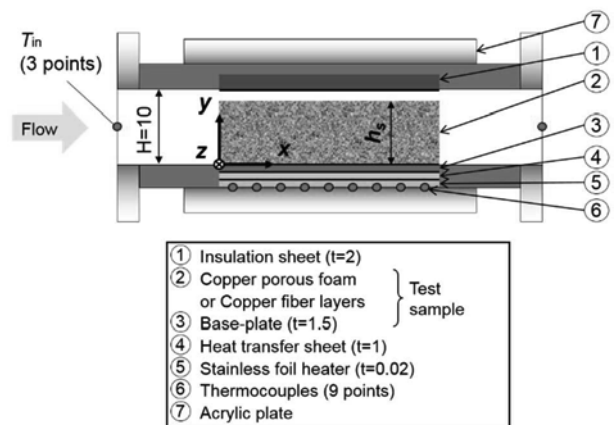
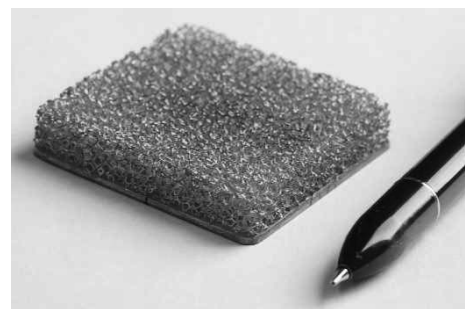
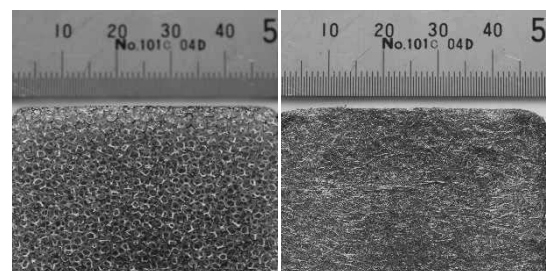


Fig. 2. Test section with porous material.



(a) Celmet[®] sample with 1.5 mm base plate, 95% porosity.



(b) Surface image of Celmet[®] (left) and fiber layers (right).

Fig. 3. #2 Celmet[®] sample used in this study.

Table 1. Specifications of porous media tested in this study.

Name	Height mm	Porosity %	Contact Method
CT10	10	96.7	Brazing
CT8	8	95.7	Brazing
CT5	5	96.2	Brazing
CT3	3	95.6	Brazing
FL10	10	86.3	Diffusion Bonding
FL8	8	82.9	Diffusion Bonding
FL5	5	83.9	Diffusion Bonding
FL3	3	83.6	Diffusion Bonding

2 mm の断熱シートを設置し熱の逃げを防いでいる。座標系の原点は、加熱面上流端の流路中央におき、下流に向かって x 軸、高さ方向に y 軸を与える。

Fig. 3 は実験対象とした銅多孔質体の写真である。Fig. 3(a)は銅製基板に接合した様子、(b)は左が銅セルメット®であり、右が比較に供した銅繊維層である。また Table 1 に両サンプルの諸元を示す。銅セルメット®は住友電工社製⁷⁾であり、シリーズ中の #2 を実験に供した。その平均孔径は 1.9 mm、セル数は 1 インチあたり 11~16 個で、シリーズの中では比較的大きな空隙を持つ。比表面積は 1 m³ あたり 1000 m² であり、空隙率は 95.6~96.7% である。銅セルメット®と基板はロウ付けで接合し、実験では基板接合面が流路内面と滑らかに一致するように設置した。一方の銅繊維層は直径 30~300 μ m の銅繊維を層状に重ね合わせて整形して製作した。基板には拡散接合しており、空隙率は 82.9~86.3% である。多孔質体の底面は、いずれも加熱部と同じ大きさで、流路高さ H (=10 mm) に対し、その高さ h_s をそれぞれ 3, 5, 8, 10 mm の 4 通りに変えて実験した。以下では、各場合の呼称を、銅セルメット®には CT、銅繊維層には FL に続き、高さ h_s の数値を付して示す。

2.2 伝熱実験ならびに圧力測定実験

伝熱実験では、加熱箔の裏面に 5 mm ごとに配置した熱電対 9 点の温度を測定した。これをいわゆる伝熱面の局所壁面温度 $T_w(x)$ とし、式(1)のように加熱熱流束 q_w を流体の入口温度 T_{in} との温度差で除

して、見かけの局所熱伝達率 h_x を求めた^{2,4)}。

$$h_x = \frac{q_w}{T_w(x) - T_{in}} \quad (1)$$

ここで、使用した熱流束は、加熱熱流束からテスト部下面へ逃げる熱伝導損失を計算し差し引いた。実験は同じ条件で 3 回行い、その平均値を考察の対象とした。なお、本実験で測定した熱伝達率に含まれる不確かさ (95%包括度) は、流速が最も高い条件で $\pm 6.3\%$ であった。

以下で用いる平均熱伝達率 h_m はテスト部長さ L にわたる平均値であり、式(2)により求めた。また、平均ヌッセルト数 Nu_m は、式(3)のとおり h_m に流路水力直径 D をかけ、空気の熱伝導率 λ で除して求めた。

$$h_m = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx \quad (2)$$

$$Nu_m = \frac{h_m D}{\lambda} \quad (3)$$

後の考察では、伝熱性能を式(4)で表す移動単位数 NTU を用いて議論する。

$$NTU = \frac{Ah_m}{\rho \dot{V} C_p} \quad (4)$$

ここで、 ρ は空気の密度、 \dot{V} は単位時間あたりの体積流量、 C_p は空気の定圧比熱である。NTU は無次元量であり、いわば空気が持つ熱輸送能力に対する熱伝達能力を示す。伝熱実験では断面平均速度 U_m を変え、式(5)で定義されるレイノルズ数 Re が 1000, 1350, 2300, 3000 になるよう変えて行った。

$$Re = \frac{U_m D}{\nu} \quad (5)$$

ここで、 ν は空気の膜温度での動粘性係数である。

また、多孔質体のそれぞれ 40 mm 上流と下流に静圧孔を設け、圧力損失 ΔP を測定した。圧力計の測定分解能は 0.1 Pa であり、圧力損失に含まれる不確かさ (95%包括度) は、多くの条件において 1%未満であった。 ΔP をもとに流路摩擦係数 f とポンプ

動力 P をそれぞれ式(6), 式(7)で求め考察に供した.

$$f = \Delta P \frac{D}{L(\rho U_m^2 / 2)} \quad (6)$$

$$P = A_c U_m \Delta P \quad (7)$$

ここで, A_c は矩形流路の断面積である.

3. 結果および考察

3.1 圧力損失

断面平均速度に対する圧力損失の変化を Fig. 4 に示す. Fig. 4(a), (b)は, それぞれ銅セルメット®, 銅繊維層の結果を示す. 圧力損失は流速の増加とともに増大する. 銅セルメットの圧力損失は, 銅繊維層に比べて一桁小さく, 多孔質体の中でも圧力損失が比較的小さいことが特徴である^{2,3,8}. 各場合を概観すると, 圧力損失はすき間により大きく低減することが分かる. その低下具合を両者で見比べると, 圧

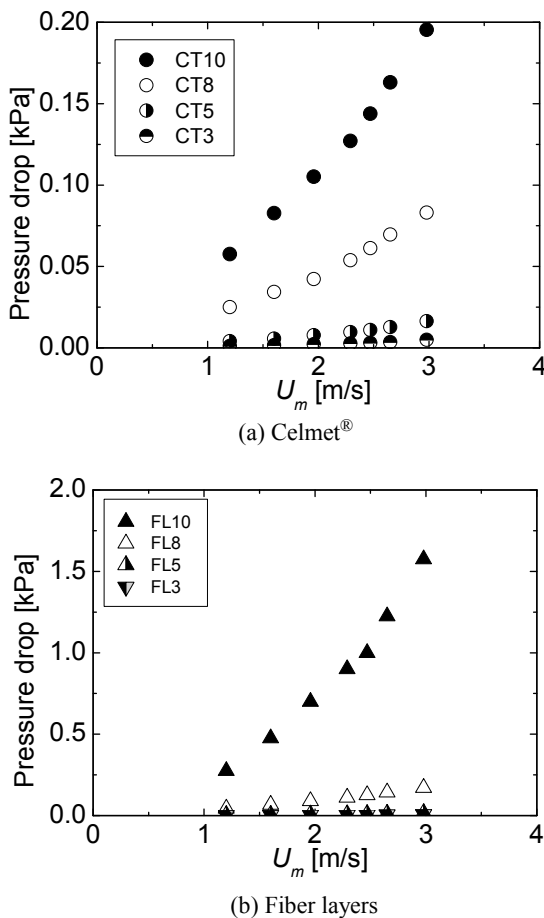


Fig. 4. Pressure drop caused by each sample.

力損失の値が大きい銅繊維の低下割合が極めて大きい. 流れの多くが, 抵抗の大きい銅繊維層を迂回し, すき間に流れていることが推察される. 値と低下割合が小さい銅セルメットにおいても, すき間が 2 mm ある CT8 では, 圧力損失は CT10 の半分以下に抑えられる. すき間を 5 mm とした CT5 では, CT10 に対し 8%程度にまで低下し, CT3 ではわずか 3%程度にまで低下し, すき間の圧力損失低減効果が明らかになった.

3.2 局所熱伝達率

見かけの局所熱伝達率の流れ方向分布を示す. 銅セルメットの結果はそれぞれサンプル高さ h_s ごとにまとめ, Fig. 5(a)~(d)に四つのレイノルズ数 Re に対しプロットのシンボルを変えて示した. 同様に, 銅繊維層の結果は主に三つのレイノルズ数 Re に対して Fig. 6(a)~(d)に示している. 各図の(a)には, 基板のみを設置した場合の結果を参考として白抜きでプロットし比較できるようにしてある.

両図より, 各サンプル高さにおいて, Re の増加とともに熱伝達率の値は増大することが分かる. 熱伝達率の最大値は, 両者ともに(d)のサンプル高さ h_s が 10 mm の場合に得られ, 銅セルメット®では約 440 W/(m²K), 銅繊維層では約 290 W/(m²K)であった. 銅セルメット®の最大値は, 銅繊維の約 1.5 倍に達し, サンプルの空隙率が高いにもかかわらず熱交換が良好であることが明らかになった.

Fig. 5 と Fig. 6 において, 縦軸の値に注意しながら(d)から(c), (b), (a)と順に見ていくと, すき間を大きくするに従って, 熱伝達率の値が低下することが分かる. 銅セルメット®については, Fig. 5(c)より, 高さ 8 mm の値は 10 mm の場合と比べてさほど低下しないものの, Fig. 5(b), (a)など高さが 5 mm 以下になると低下幅が大きくなる. 他方, 銅繊維では, Fig. 6(c)において, Fig. 6(d)の値の約 1/3 程度に低下しており, すき間による低下幅が極めて大きいことが分かる. Fig. 4(b)において, すき間によって大幅な圧力低下が見られたのと同じく, 熱伝達率の値も急激に小さくなることが分かる. 空隙率が小さいこともあり, 抵抗が大きい多孔質体を通る流れが減り,

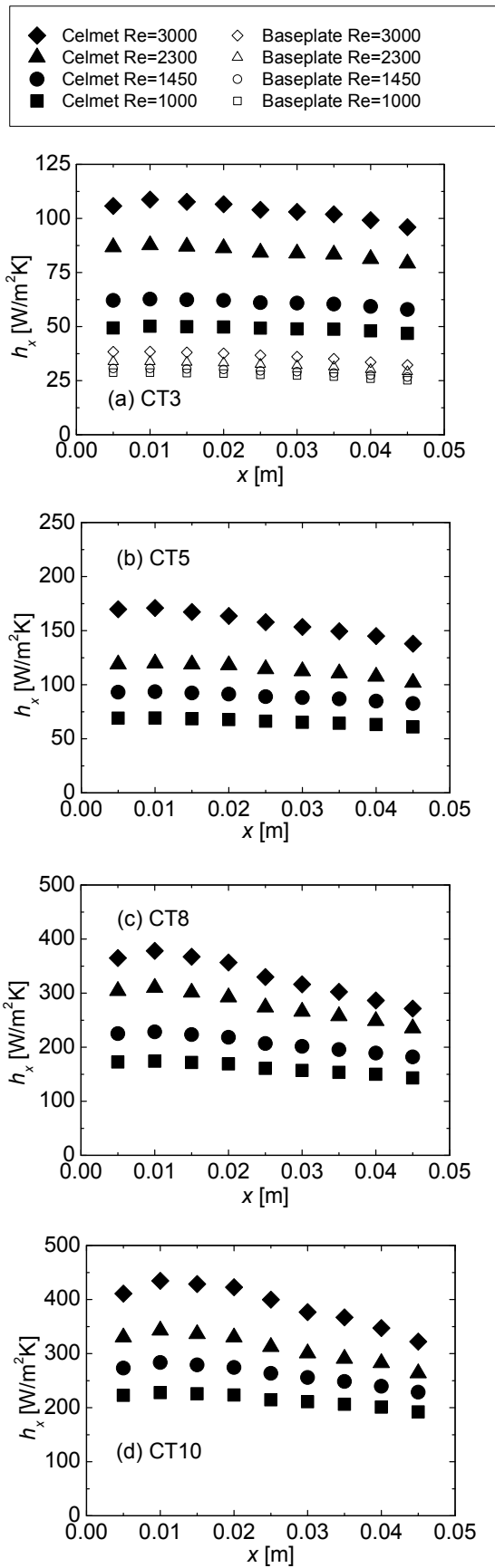


Fig. 5. Local heat transfer coefficient for the Celmet®.

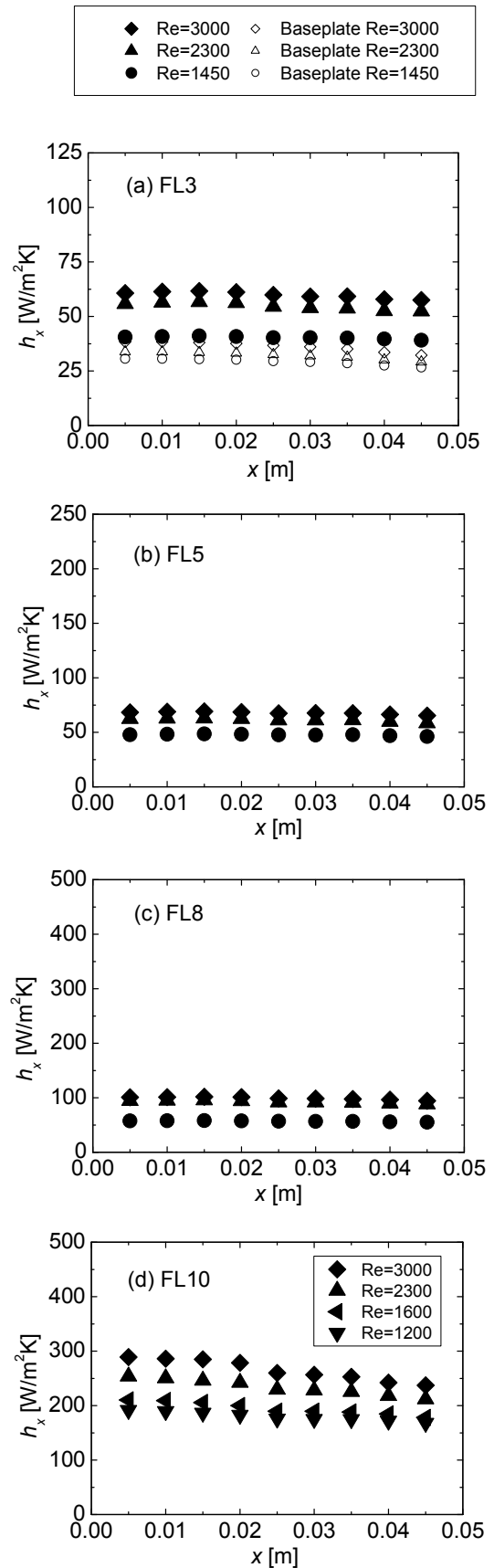


Fig. 6. Local heat transfer coefficient for the fiber layers.

すき間に流れが流入し、圧力が低下すると同時に熱伝達を上げる有効な流れが失われ、熱伝達が著しく低下するものと考えられる。以上のように、すき間が熱伝達率の低下に及ぼす影響は、銅繊維の方が大きいことが明らかになった。

3.3 伝熱促進比

Fig. 7に、銅セルメット®と銅繊維層の各場合で求めた平均熱伝達率 h_m を、基板のみを設置して得た値 h_{0m} で除した伝熱促進比について、高さ h_s を横軸にとり整理して示した。プロットとしては区別して記していないが、各高さ h_s におけるそれぞれ四つ、三つのプロットは、Fig. 5とFig. 6の両図で掲載した異なる Re 数を示している。 Re 数が高いほど伝熱促進比が高くなることを踏まえると、両者の中でも最大値は銅セルメット®CT10であり、 Re 数が3000の場合に得られることが分かり、その値は約11である。銅繊維層の結果を白抜きのプロットで示している。高さ h_s が10 mmの促進比の値は8未満であり、銅セルメットの値は銅繊維層より大きく、その高い伝熱特性が確認できる。

銅セルメット®の値はすき間のある場合には高さが8 mmでは約9に留まるものの、高さが5 mmでは4程度まで低下する。すき間が増えると伝熱促進比は低下するが、 Re 数によっては直線的には減じないようである。一方、銅繊維層の値は高さが8 mmの場合で3程度まで急激に低下する。以上のように銅セルメット®の低下幅は銅繊維より緩やかである。

3.4 伝熱性能

Fig. 8に平均ヌッセルト数 Nu_m のポンプ動力 Re^3f に対する変化を示す。なお、平均ヌッセルト数 Nu_m は式(3)で求めてあり、ポンプ動力は式(7)のように、測定した圧力損失に単位時間あたりの体積流量をかけて求められるが、既報^{2,4,8)}と同様に断面平均速度の3乗と管摩擦係数 f を利用して無次元の形 Re^3f で表現してある。

図より、 Nu_m の値は、両者ともにポンプ動力の増加とともに増大することが見て取れる。本実験で使

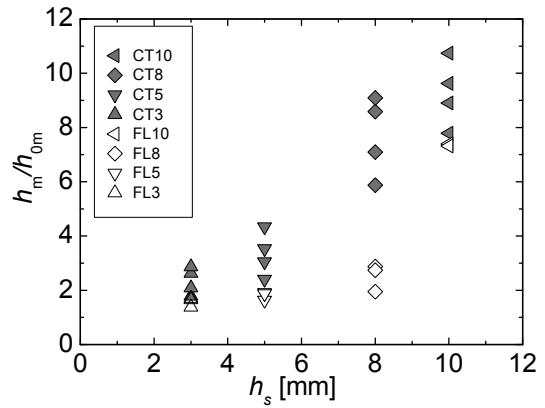


Fig. 7. Heat transfer enhancement ratio for each height.

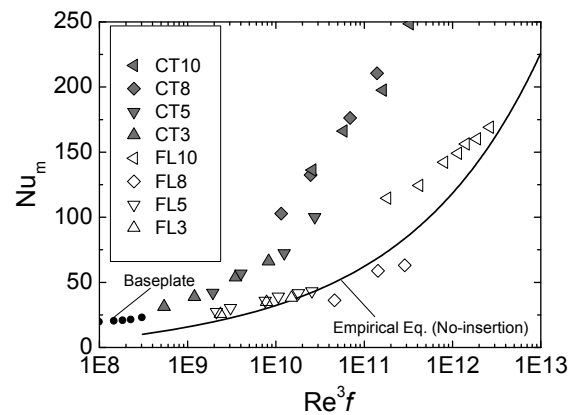


Fig. 8. Mean Nusselt number for the pumping power, Re^3f .

用している銅セルメット®の空隙率は95%と高いにもかかわらず、同じポンプ動力であれば、 Nu_m の値は白抜きで示した銅繊維層のプロットより高く、高い伝熱性能を発揮することが可能である。なお、図中の左下付近の小さな黒丸プロットは、基板のみを設置した滑面ダクトで得られた実験値（ただし、圧力損失は小さいため文献⁹⁾を引用）を示しており、また、実線は円管内乱流の発達流におけるPetukovの経験式⁹⁾を示している。銅セルメット®の結果は、いずれも円管内乱流の実線より上方にあり、同じポンプ動力であれば、熱伝達性能は発達流の滑面と比べても高いことが分かる。

3.5 整理式

以下では、より伝熱性能が高い銅セルメット®について性能予測式を考える。W. Aboelsoudら¹⁰⁾は伝熱性能の評価に移動単位数 NTU を用いて整理し

ている。ここでは、伝熱性能を整理するために、NTUをポンプ動力 P で除した NTU/P の流速に対する変化を調べ、流路高さ H に対する多孔質体高さ h_s の影響を含め整理を試みた。

Fig. 9 は、 NTU/P の平均流速に対する変化を両対数グラフで示したものである。動力あたりの伝熱性能は流速が小さい領域で高い。流速の増加にともない必要なポンプ動力が増大し、このことが常に効くため、銅セルメット®のそれぞれの高さにおいて、値が両対数グラフ上でほぼ直線的に低下することが見て取れる。 h_s が高いほど圧力損失が大きいため、 NTU/P の値は小さくなる。Fig. 10 に、高さ比 h_s/h の影響を考慮し整理した結果を示す。実線は求めた近似式(8)であって、プロットのばらつきはあるものの、平均速度が 1~3 m/s (Re 数が 1000~3000) の範囲で整理式(8)を得ることができた。

$$(h_s/h)^{2.22}(NTU/P) = 36.34U_m^{-2.71} \quad (8)$$

4. 結論

銅セルメット®多孔質体を壁面に設置する場合の伝熱性能を銅繊維層の結果とも比較し実験的に調べた。特に、両多孔質体の高さを変え、流路にすき間を設ける場合の影響について調べた。圧力損失の増加は、流路のすき間により大幅に低減できることが明らかになった。実験例では、圧力損失は二桁程度小さい値になった。一方、銅セルメット®多孔質体を用いる場合の伝熱促進比は、最大で約 11 程度であり、銅繊維の約 1.5 倍に相当することが分かった。しかし、この値はすき間の増加とともに低下することも明らかになった。総合的に見て、本多孔質体はポンプ動力に対する伝熱性能は滑面より高く、銅繊維より高いことが分かった。また、高さの影響を含めた性能予測式を示した。

本研究で使用した銅多孔質体セルメット®は、住友電気工業株式会社より提供を受けた。同社の西村淳一氏と中山明氏にはサンプルの製作について多大な協力を得た。また、本研究の一部は科学研究費

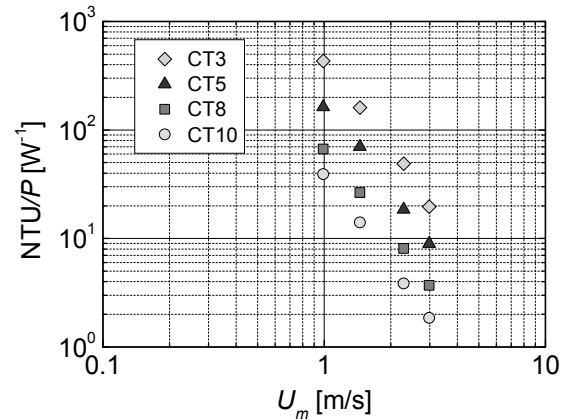


Fig. 9. Variation of NTU/P vs mean velocity U_m for each h_s .

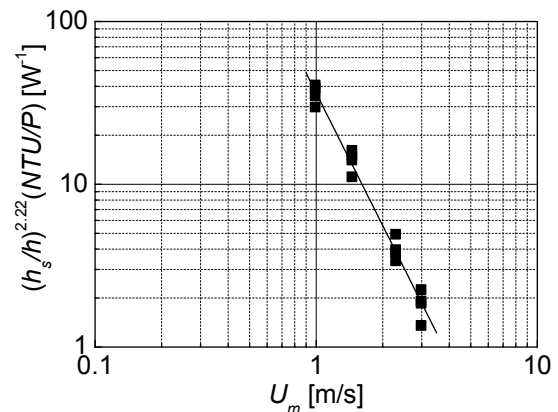


Fig. 10. Variation of NTU/P vs mean velocity U_m .

助成事業（課題番号 15K05844）により行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 稲岡恭二, “織金属繊維層の異方性を利用した対流熱伝達の促進”, 日本機械学会誌, **118**[1160], 423 (2015).
- 2) 谷賢治, 岡崎圭佑, 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, **53**[2], 71-76 (2012).
- 3) 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, **54**[1], 1-6 (2013).
- 4) 今井啓太, 山本麻微, 阪上雅昭, 千田衛, 稲岡恭二, “アルミ発泡体を設置した流路の熱伝達促進 (アルミ繊維層との比較)”, 同志社大学理工学研究報告, **55**[3], 285-290 (2013).
- 5) S.-C. Tzeng, T.-M. Jeng, P. Chou, F.-Z. Tang and Y.-C. Chen, “Study on Heat Transfer Characteristics of Porous Metallic Heat Sink with Conductive Pipe under Bypass

- Effect”, *Heat Transfer - Asian Research*, **38**[3], 149-155 (2009).
- 6) N.C. Gallego and J.W. Klett “Carbon Foams for Thermal Management”, *Int. Seminar on Advanced Applications for Carbon Material*, Jeju Island, Korea. September 12-13 (2002).
 - 7) 住友電工ホームページ <http://www.sei.co.jp/celmet/>, (参照：2016/7/1).
 - 8) K. Imai, M. Yamamoto, M. Sakagami, M. Senda and K. Inaoka, “Heat Transfer Performance of a Channel Flow with Aluminum Fiber Layers: Comparison with Aluminum Porous Foams”, *Proc. 15th International Heat Transfer Conference*, IHTC15-9080 (2014).
 - 9) 日本機械学会，伝熱工学資料改訂第5版，（日本機械学会，東京，2009），p. 45.
 - 10) W. Aboelsoud, W. Wu and L.C. Chow, “Experimental Investigation of Thermal and Hydraulic Performance of V-shape Corrugated Carbon Foam”, *ASME Journal of Heat Transfer*, **136**, 021902-(1-10) (2014).