

Heat Transfer Enhancement by means of Anisotropy of Aluminum Fiber Layers

Keisuke OKAZAKI*, Masaaki SAKAGAMI**, Mamoru SENDA* and Kyoji INAOKA*

(Received on December 19, 2012)

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. The present paper aims to reveal the effect of thermal anisotropy of aluminum fiber layers on the heat transfer enhancement between two orientation cases, that is, fibers axes parallel and perpendicular to the heat transfer wall. 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 corrugated fins, although much high-order large pressure loss should be paid.

Key words : Heat transfer, Heat exchangers, Heat transfer enhancement, Anisotropy, Aluminum fiber

キーワード : 熱伝達, 熱交換器, 伝熱促進, 異方性, アルミニウム繊維

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

岡崎 圭佑, 阪上 雅昭, 千田 衛, 稲岡 恭二

1. はじめに

排熱回収熱交換器の高効率化はエネルギーの有効利用の観点から重要である。熱は面を通して移動するため、伝熱面を少しでも大きくすることを念頭に、これまで様々な形状の拡大伝熱面（フィン）の要素開発が進められてきた。著者らは、拡大伝熱面の一つとして、不織アルミニウム繊維層（以下、アルミ繊維層と呼称する）を利用したフィンに注目している。これはアルミ繊維層を流路内に設置するもので、伝熱面の熱を高い熱伝導性を持つアルミ繊維層を通じて流路内の隅々まで移動させ、作動流体とより多くの場所で熱交換させ、結果として伝熱面の熱伝達

促進を狙うものである。このアルミ繊維層は弾力性に富み、既存の伝熱管にも適用できるメリットを有するなど、基本的な熱伝達特性を調べることは工学上有意義と思われる。しかしながら、熱伝達促進に関する他者の研究例は僅かに一例¹⁾があるのみである。

著者らは前報²⁾において、アルミ繊維層を配置した流路の局所熱伝達率と圧力損失を実験的に測定し、局所熱伝達率が何も設置しない場合と比較して最大約8倍に達し、この値は他者の代表的な発泡金属より高く、このアルミ繊維層が伝熱促進上極めて有効であることを明らかにした。

*Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto 610-0321

**Taisei Kogyo co., ltd., 26-1 Ikedakita cho, Neyagawa, Osaka 572-0073

Telephone: +81-774-65-6463, Fax: +81-774-65-6802, E-mail: kinaoka@mail.doshisha.ac.jp

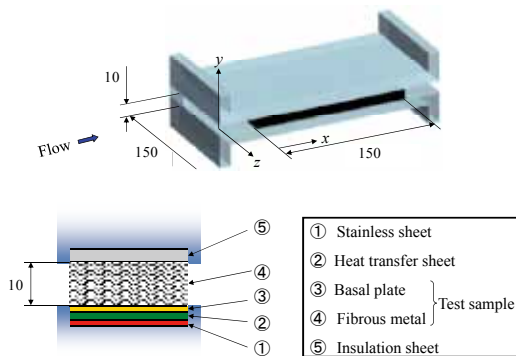


Fig. 1. Schematic view of a test section.

アルミ繊維層には熱伝導の異方性を持つ特徴があり、これがこれまで多くの研究例がある発泡金属と異なる点と考えられる。このアルミ繊維層の熱伝導の異方性については、菅原ら³⁾と春木ら⁴⁾が実験的に調査し、繊維軸方向の熱伝導率がそれと垂直方向の値に対して一桁高いことを明らかにしている。この優れた熱伝導異方性を熱伝達問題に適用すれば、更なる伝熱促進が得られるものと期待されるが、これまでその方向の検討は残念ながら行われていない。

そこで本論文では、アルミ繊維層の軸配向を伝熱面に対して垂直になるように設置する場合の実験を新たに行い、軸配向を伝熱面に平行に配置した前報の結果と比較し、異方性が伝熱促進率に及ぼす影響について調べた。また、代表的なフィンとして工業的によく使用されているコルゲーテッドストレートフィン⁵⁾の伝熱促進と比較し、アルミ繊維層を設置して得られる伝熱促進の特徴について整理することとした。

2. 実験方法

2.1 実験装置およびテストモジュール

実験は吹出し式流路を用いて行った。Fig. 1 にテスト部の概要を示す。Fig. 1 に示すように流路の下壁を伝熱面とし、厚さ 20 μm 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、局所壁面温度を測定した。また、テスト部前後に圧力孔を設け、圧力損失を測定した。座標系の原点を伝熱実験の加熱上流端



Fig. 2. SEM image of aluminum fibrous metal.

Table 1. Specifications of the test samples.

	X81.5+	Y81.8-	Y82.8-
Fiber orientation	X	Y	
Porosity	81.5	81.8	82.8
Installation condition	Diffusion Bonding	Brazing	

の流路中央におき、下流に向かって x 軸、高さ方向に y 軸、スパン方向に z 軸を与える。実験装置についての主な点は前報と同じであるので、ここでは前報と異なる点を中心に記述する。

使用したアルミ繊維層は前報と同様に溶融紡糸法により作られたもので、素線径約 100 μm の円形に近い断面を持つ。それを不織布状にし、層状に折り畳んで重ねた後に流路の大きさ(高さ 10mm、幅 150mm、長さ 150mm)に合うように適度に圧縮し、形を整えた上で成形加工している。電子顕微鏡による繊維の拡大写真の一例を Fig. 2 に示す。

アルミ繊維層のテストサンプルは Table 1 に示すように繊維の配向、空隙率、基板への設置方法を変更した 3 種類を用いた(サンプルの呼称をその順番に表記する)。まず配向については、アルミ繊維の軸方向を主として伝熱面と平行な面内に設置するものと、反対に伝熱面と垂直な面内に設置した 2 種類を用意した。それぞれサンプル X, Y を付して表記する。空隙率は比較的近い 81.5%~82.8% の範囲内とし、その値を付して表記する。基板への設置方法については、一般的なロウ付け接合、分子拡散接合の 2 条件を試みた。前報に習ってロウ付け接合を“-”，分子拡散接合を“+”を付して表記する。

本論文のサンプル Y は、工業上用いられるアルミ繊維層の製作方法を活かして製作することとした。

すなわち、サンプル X の製作過程において、それを流路高さと同じ幅の 10mm ごとに短冊状に切断し、各々を繊維層の軸方向が伝熱面と垂直になるように 90° 回転させた上で、若干の圧力を掛けながら流路幅に合うように形状を整えて製作した。したがって、サンプル Y の全繊維が完全に y 方向に向いている訳ではない。Fig. 3(a)にテストサンプルと同様の方法で製作された二つのサンプルの X 線 CT による繊維の可視化画像を示す。左右の図はそれぞれサンプル X, Y の中心部位に近い 3.5mm 立方の繊維の様子である。この画像から式(1)を用い、 x, y, z の各基準軸に対する配向度 S^0 の値を求めた。

$$S = \frac{1}{2}(3\cos^2\theta - 1) \quad (1)$$

ここで、 θ は繊維軸と各基準軸のなす角度を示している。Fig. 3(b)に y 軸に対する配向度の値を色づけしてイメージとして示す。また、Table 2 に二つのサンプルの各基準軸に対する領域内の全繊維についての平均配向度を示す。配向度が 1.0 に近いほど繊維軸が基準軸方向に向いていることを表し、-0.5 に近いほど逆に軸と垂直方向に向いていることを意味する。これらよりサンプル Y は y 軸配向度が大きく、アルミ繊維の軸が伝熱面に対して垂直方向に並んでいること、いっぽうで、サンプル X は x 軸配向度が大きく、主として伝熱面に対して平行に並んでいることが分かる。

2.2 熱伝達の評価と実験条件

熱伝達の評価には、まず見かけの局所熱伝達率を算出した。これは他者の研究例⁷⁾と同様に、アルミ繊維層をフラットに設置するための基板の熱伝導の影響を含む局所熱伝達率⁸⁾であり、加熱壁面から流体に伝わる熱流束をステンレス箔裏面の局所温度と流体の入口温度の差で除して求めた。なお、使用した熱流束は、ステンレス箔からの加熱熱流束からテスト部下面(流体とは反対方向)へと逃げる熱伝導損失分を差し引いて求めている。またその値に流路のダクト等価直径を掛け熱伝導率で除してヌッセルト数を算出し考察に使用した。

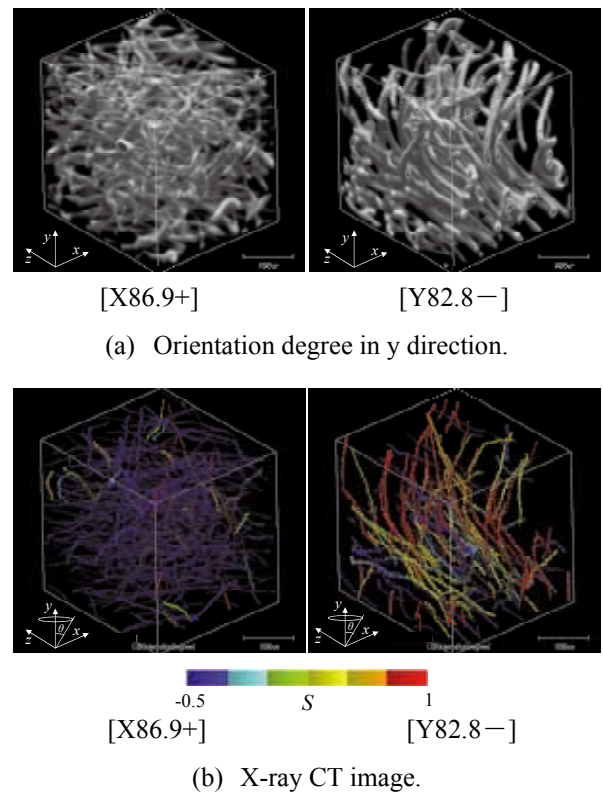


Fig. 3. X-ray CT image of Aluminum fibers for X and Y arrangements.

Table 2. Averaged orientation degree for each axis.

Sample	x	y	z
X86.9+	0.191	-0.306	0.115
Y82.8-	0.106	0.204	-0.310

実験は断面平均流速とダクト等価直径から計算されるレイノルズ数を 2300~5750 に変更して行った。比較に用いたコルゲーテッドストレートフィンの熱伝達特性については、伝熱工学資料の提案式⁵⁾を使用した。また、平滑面の値については、熱伝達率は実験値を、圧力損失は測定限界未満であったので Dean の推定式⁹⁾を用い考察に使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 局所熱伝達率特性と圧力損失特性

Fig. 4にレイノルズ数4600におけるテストサンプルの見かけの局所熱伝達率の流れ方向分布を示す。

図には、アルミ繊維層を設置しない滑面の場合のプロットも●印で示してある。全ての場合において、熱伝達率は下流に向かうにつれて次第に減少することが分かる。

Fig. 4の熱伝達率をアルミ繊維層を設置しない滑面の場合に求めた熱伝達率で除して、局所伝熱促進率としてFig. 5に示す。図においては、繊維層を伝熱面に対して垂直に配したY配向のサンプル[Y81.8-]の伝熱促進率は上流位置において最大で20倍を越えていることが分かる。伝熱促進率の値は下流に向かうとともに低下するものの、最下流においても最大で約8倍となり、依然として高い伝熱促進効果を保つことが分かる。

Fig. 6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、全てのサンプルにおいて、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。

3.2 アルミ繊維層の異方性の考察

Fig. 5より、アルミ繊維層を伝熱面に対して垂直に配したY配向のサンプル[Y81.8-]の伝熱促進率は最上流位置で20倍を超えている。同図より、X配向のサンプル[X81.5+]の伝熱促進率は約8倍にとどまっているため、異方性の効果によりY配向の伝熱促進量はX配向のその約2.3倍に達しており、異方性の影響が顕著であることが分かる。なお、サンプル[X81.5+]は拡散接合であり、ロウ付け接合より若干伝熱促進量は低いことを付記しておく²⁾。また、Fig. 6より、サンプル[Y81.8-]の圧力損失はサンプル[X81.5+]に対し、わずかながら低い。これより、繊維の配向の圧力損失への影響は小さいと考えられる。

3.3 コルゲートッドストレートフィンとの比較

ここでは、工業的によく使用されているコルゲートッドストレートフィン⁵⁾（以下、コルゲートフィンと呼称する）と本実験で得た結果と伝熱性能の比較を行った。Fig. 7に扁平水管付きコルゲートフィンの概要を示し、Table 3に代表的なフィンコア寸法を示

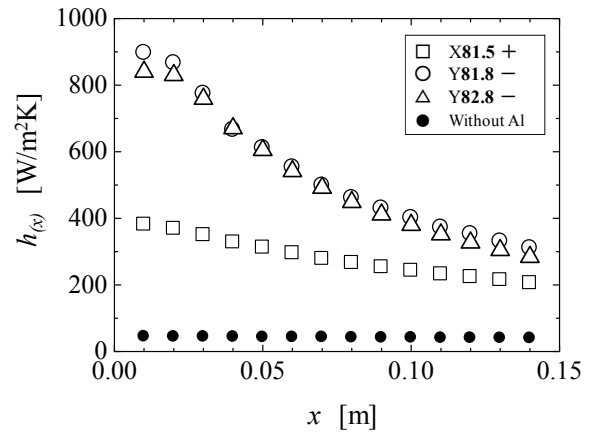


Fig. 4. Distribution of local heat transfer coefficient.

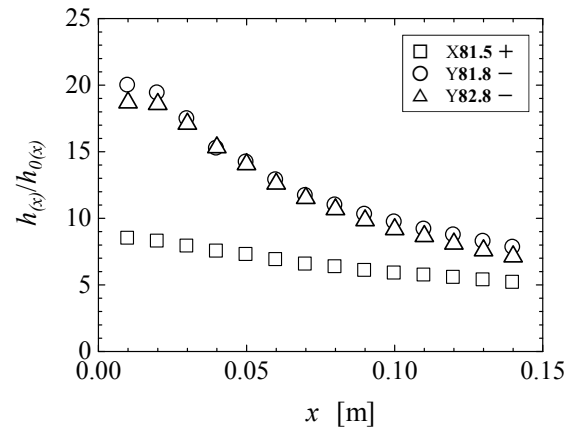


Fig. 5. Distribution of heat transfer enhancement ratio.

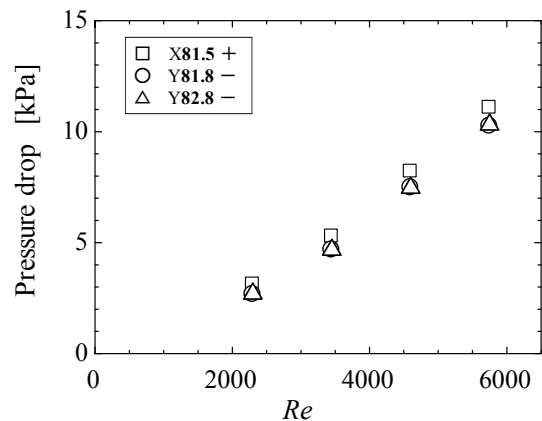


Fig. 6. Pressure drop v.s. Reynolds number.

す。このフィンの平均ヌッセルト数の提案式は式(2)で示されている。

$$Nu_{ave} = 2R \left[1.10 + 0.555 \left(Pr Re \frac{d_c}{L} \frac{1}{4R^2} \right)^{0.55} \right] \quad (2)$$

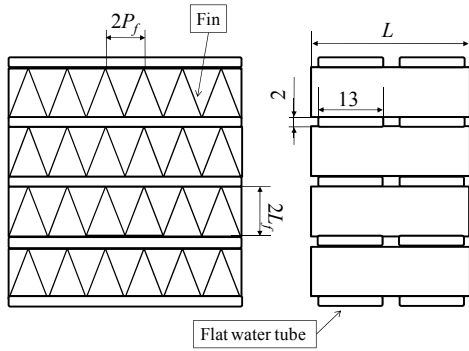


Fig. 7. Heat exchanger with corrugated straight fins.

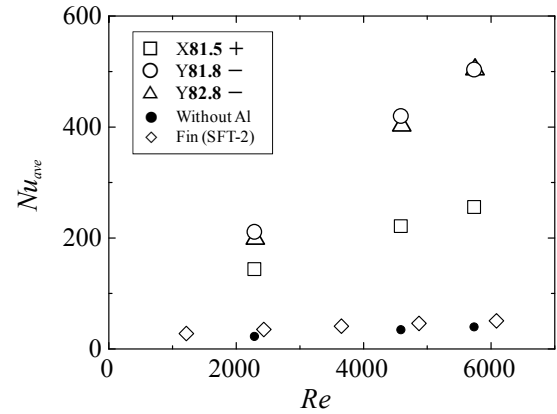
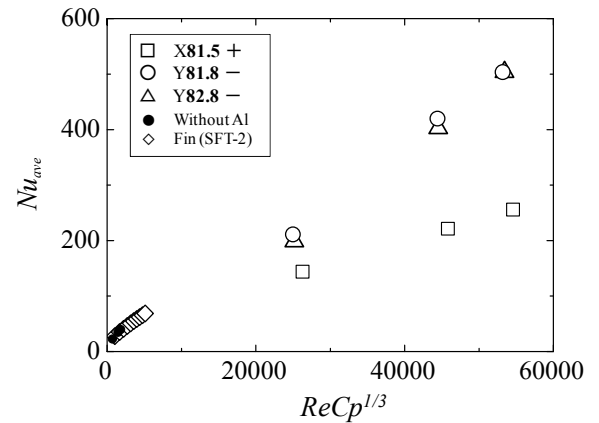
Table 3. Dimensions of corrugated straight fins.

No.	L mm	2P _f mm	d _e mm	2L _f mm	Remarks
SFT-2	32	4.0	3.13	10	2×13水管 2列 200×200
SFT-6	32	3.1	2.43	10	
SFT-7	32	5.0	3.76	10	
SFT-8	32	5.7	4.15	10	

ここで、 R は $2L_f/(2L_f+P_f)$ より定まる定数、 Pr はプラントル数、 d_e はフィン通路の相当直径を示す。平均ヌッセルト数 Nu_{ave} とレイノルズ数 Re で使用する代表長さは d_e 整理されているが、ダクト等価直径に整理し直し比較した。Fig. 8 にアルミ繊維層およびコルゲートフィンの一例としてSFT-2の平均ヌッセルト数とレイノルズ数の関係を示す。なお、平均ヌッセルト数は局所熱伝達から求められるヌッセルト数を平均して求めている。図より、コルゲートフィンの平均ヌッセルト数は平滑流路に対して最大で1.7倍高い値を示すことがわかる。しかし、アルミ繊維層とコルゲートフィン(SFT-2)を比較すると、アルミ繊維層の方が格段に高い値を示すことが明らかであり、アルミ繊維層は工業的によく使用されている代表的なフィンに比べ桁高い熱伝達率が得られる特徴がある。また、アルミ繊維層の異方性の影響は、高レイノルズ数ほど顕著に表れており、X配向のサンプルに対するY配向のサンプルの伝熱促進比は最大で2.0倍にも達する。

3.4 総合性能評価

ここでは、アルミ繊維層およびコルゲートフィン(SFT-2)の平均ヌッセルト数 Nu_{ave} と圧力損失係数 C_p より総合的な性能評価を行った。アルミ繊維

Fig. 8. Relationship between Nu_{ave} and Re .Fig. 9. Relationship between Nu_{ave} and $ReCp^{1/3}$.

層の圧力損失係数 C_p は実験から測定した圧力損失を断面平均流速の動圧で除して求め、コルゲートフィンの圧力損失係数 C_p は、式(3)から定まる抵抗係数 f の4倍として求めた⁵⁾。

$$f \frac{L}{d_e} = 22.95 \left(Re \cdot \frac{d_e}{L} \right)^{-0.91} \quad (3)$$

Fig. 9 に平均ヌッセルト数とポンプ動力の関係を示した。ただし、横軸のポンプ動力は $ReCp^{1/3}$ で示してある。図中には、何も設置しない平滑流路についても●印で示してある。ただし、●印の平均ヌッセルト数は測定値を、圧力損失が小さく測定不能であったため、圧力損失係数 C_p はDeanの式 $C_f = 0.073 Re^{-0.25}$ ($2.0 \times 10^3 < Re < 1.0 \times 10^6$)の4倍として求めた。Fig. 9より、コルゲートフィン(SFT-2)と平滑流路のポンプ動力に対し、アルミ繊維層は格段に大きいポンプ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 C_p 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ため、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[Y81.5+]の約 2 倍高いことが分かる。本報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 (SFT-2) の伝熱促進量が平滑面に対して約 1.7 倍に留まることを鑑みると、特にアルミ繊維層の異方性を使うことによって動力を要してでも平滑面の約 20 倍の伝熱促進することが可能であり、1 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あるものと思われる。

4. 結言

流路内に不織アルミニウム繊維層を設置する場合に注目し、局所熱伝達率と流路の圧力損失を測定し、以下の結論を得た。

- (1) アルミ繊維層の異方性が伝熱促進に及ぼす影響は大きい。
- (2) 具体的な伝熱促進率は繊維軸を伝熱面に垂直に配する場合は滑面に対して、最大約20倍を超え、平行に配する場合の最大約8倍より一桁高い。
- (3) アルミ繊維層の配向が及ぼす圧力損失への影響はさほど大きくない。したがってアルミ繊維層の圧力損失を含めた伝熱性能は、繊維軸を伝熱面に垂直に配する場合が最も高い。
- (4) コルゲートストレートフィンの滑面に対する伝熱促進率は約1.7倍に対し、アルミ繊維層の繊維軸を伝熱面に垂直に配する場合のそれは約20倍に達する。
- (5) アルミ繊維層の圧力損失はコルゲートストレートフィンの数千倍に達するため、伝熱促進率は

高いものの空調用の熱交換フィンとしては適さないと考えられる。

本研究は文部科学省科学研究費基盤研究(C)「ファイナルメタル熱交換器による排熱回収促進 (課題番号 22560210)」により行われた。一部は文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「ゼロエミッション技術を基盤とした環境調和型エネルギーグリッドの最適化研究」の支援を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 小松喜美, 菅原征洋, 佐藤寛才, 藤田 忠, “焼結アルミニウム繊維ヒートシンクの伝熱性能実験”, 日本冷凍空調学会論文集, 26-3, 217-224(2009).
- 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, 13-18(2012).
- 3) 菅原征洋, 吉木祐也, “不織アルミニウム繊維層の有効熱伝導率の大きな異方性”, 日本機械学会論文集 (B 編), 70-696, 2105-2109(2004).
- 4) 春木直人, 堀部明彦, 川本裕太, 稲葉英男, “熱伝導異方性を有する各種金属繊維層の熱伝導特性”, 熱物性, 24-1, 9-14(2010).
- 5) 日本機械学会編, “伝熱工学資料 (改訂第 5 版)”, (日本機械学会, 東京, 2009), pp. 229-231.
- 6) 太田直秀, 小升雄一郎, 西川幸宏, 高橋雅興, “繊維複合材料の曲げ・引張動的粘弾性と X 線 CT による繊維配向評価”, 成形加工, 22, 315-316 (2011).
- 7) D.P. Haack, K.R. Butcher, T.Kim, T.J. Lu, “Novel lightweight metal foam heat exchangers”, Porvair Fuel Cell Technology Inc, USA, 2001.
- 8) 小田 豊, 岩井 裕, 鈴木健二郎, 吉田英生, “多孔質体内熱流動と固体壁内熱伝導の連成解析”, 日本機械学会論文集 (B 編), 69-679, 674-681(2003).
- 9) R.D. Dean, “Reynolds number dependence of skin friction and other bulk flow variables in two-dimensional rectangular duct flow”, Transactions of the ASME Journal of Fluids Engineering, 100, 215-223 (1978).