

## 多孔質媒体の流動抵抗と熱伝達特性

近藤, 哲也  
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

福田, 研二  
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

長谷川, 修  
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

中川, 清  
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

<https://doi.org/10.15017/17685>

---

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告．9（1），pp.57-63，1987-07-25．九州大学大学院総合理工学研究科  
バージョン：  
権利関係：



## 多孔質媒体の流動抵抗と熱伝達特性

近 藤 哲 也・福 田 研 二  
長谷川 修・中 川 清

(昭和62年3月31日 受理)

### Flow Resistance and Heat Transfer Characteristics of Porous Media

Tetsuya KONDOH, Kenji FUKUDA  
Shu HASEGAWA and Kiyosi NAKAGAWA

An experimental study on the flow and heat transfer characteristics of porous media has been made.

Two foamed metals and four packed wires are used as tested porous media and air as cooling fluid.

The experiment is performed by a steady method and a pressure loss and a volumetric heat transfer coefficient of porous media are obtained. The experimental data about heat transfer characteristics are rearranged by making use of the characteristic length which is obtained from the experimental results of the pressure loss. By using  $l_3=1/b$  as the characteristic length, the Nusselt number  $Nu_3^*$  is proportional to the Péclet number  $Pe_3^*$ .

#### 1. 緒 言

多孔質媒体は化学工学の分野において広く使用されており、その流動抵抗と熱及び物質伝達に関する研究は古くから行なわれている。また、エネルギー変換工学の分野においても、例えば、西ドイツのペブルベッド型原子炉<sup>2)</sup> (炉心は約10万個の直径6cmの黒鉛の球で構成されている。)、高温熱交換器の性能改善<sup>3),4)</sup>、スターリング機関の再生器<sup>5)</sup> など多方面に利用されている。

ところで、これらの多孔質媒体は二種類に大別することができる。つまり、粒状 (球、円柱など) の個体を多数つめて一つの多孔質媒体を構成する場合と、発泡金属や金網のような非粒状の多孔質媒体の場合である。前者は、比較的容易に多孔質媒体の幾何学的形状から直接その代表長さを求めることができるが、後者は困難である。

非粒形の多孔質媒体の流動抵抗と熱伝達に関する主な研究は、El-Wakil ら<sup>6)</sup> が slit-and-expanded aluminum foil を用いて、浜口ら<sup>5),7)</sup> が積層された金網を用いて、浜口ら<sup>8)</sup> がニッケル製の発泡金属を用いて行なっている。浜口ら<sup>5),7),8)</sup> は金網の代表長さとして、定常流の圧力損失については金網の目開き、非定常流の

それについては金網の線径、さらに熱伝達については金網の線径をとって整理しており、また発泡金属の代表長さとして、圧力損失については平均孔径、熱伝達については平均線径をとって整理している。一方、El-Wakil ら<sup>6)</sup> は、圧力損失特性より求まる長さの次元を持つ量  $\delta^*$  を代表長さにとり、圧力損失と熱伝達を整理している。この方法は、多孔質媒体の幾何学的形状から代表長さを求めることが困難である、発泡金属や金網の代表長さを求める有力な手段であるばかりでなく、粒状の多孔質媒体をも含むより一般的な、圧力損失及び熱伝達特性の整理ができる代表長さを決定できる可能性があることで注目される。

以上のことに鑑み、本研究では、研究量が少ない多孔質媒体である二種類のニッケル製発泡金属と四種類の金網とは異なるが千鳥状に配列積層されたステンレス針金格子を用いて、定常法による圧力損失と熱伝達の実験を行ない、圧力損失特性より定義される代表長さをを用いて熱伝達特性の整理を行なった。

#### 2. 実験装置及び実験方法

##### 2.1 実験装置

Fig. 1 に実験装置の概略図を示す。供試多孔質媒  $\delta$  は本論文では第3章の (7) 式の  $l_2$  に相当する。

体は50×50 mmの矩形流路の入口に取り付けられ、この矩形流路はさらに直径140 mm、厚さ4 mmの銅管内に設置されている。矩形流路と銅管の間には断熱材をつめ、さらに断熱材の間には熱損失を補償するヒーターが取り付けられている。供試多孔質媒体は50×50 mm、厚さ10 mmの直方体で、Fig. 1 に示すように相対する二面には銅製の電極が銀ろう付けされており、試験部のアスベスト積層板にはめ込み、ねじどめされている。多孔質媒体の加熱はこの電極に直接通電することにより行なった。

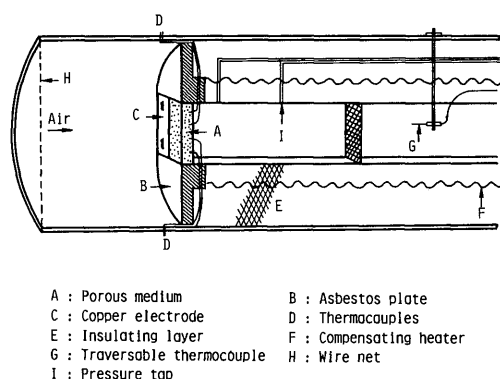


Fig. 1 Experimental apparatus.

本研究では、多孔質媒体として、二種類のニッケル製発泡金属（住友電工（株）製、商品名セルメット）と四種類の積層された針金（本論文では、これを針金格子と称することにする。）を用いた。この針金格子は、Fig. 2 に示すように、SUS304製の針金をピッチ  $p$  で一列に並べ、これを厚さ方向にピッチ  $t$  で千鳥状に配列したものである。針金は両側面の真ちゅう板に銀ろう付けされ、さらにこの板に銅電極をろう付けした。これら多孔質媒体の仕様を Table 1 及び Table 2 に示す。

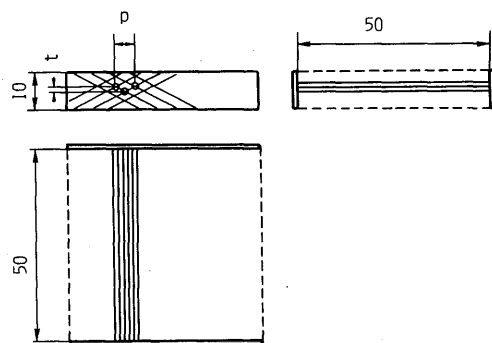


Fig. 2 Dimensions of the packed wire.

Table 1 Specification of foamed metals.

Foamed metal No.	Fractional void volume $\epsilon$ (—)	Number of cell (1/inch)
#2	0.952	11~17
#4	0.965	26~35

Table 2 Specification of packed wires.

Packed wire type	$p \times t$ (mm)	Number of wire (—)	Fractional void volume $\epsilon$ (—)	Diameter of wire (mm)
E	2×1	250	0.868	0.58
F	3×1	170	0.946	0.45
G	2×1	250	0.921	0.45
H	1.5×1	330	0.895	0.45

多孔質媒体の温度分布を測定するために、多孔質媒体の中心と裏面に計16点、線素径0.1 mm のクロメル—アルメル熱電対をスポット溶接で取り付けた。冷却流体としては空気をブロウで吸引することにより流し、実験装置の入口での混合平均温度および多孔質媒体の下流側での混合平均温度（半径方向にトラバースできるシース熱電対Gを使用）を測定した。空気の流量はロータメーターで測定した。流れ方向の圧力分布は、矩形流路の部分に設けた6ヵ所の圧力タップで精密微差圧計により測定し、これらの測定点を通る直線を最小二乗法で求め、これより、多孔質媒体の出口面での圧力を求めた。そして、大気圧とこの多孔質媒体出口面での圧力の差より、多孔質媒体の圧力損失 $\Delta p$ を求めた。

## 2.2 実験方法

Fig. 1 に示すように、多孔質媒体より下流側の矩形流路と外胴の銅管の間には断熱材及び補償用ヒーターが設けてあるため、この部分での熱損失はほとんどない。しかし、多孔質媒体に銀ろう付けされた銅電極からの熱伝導による熱損失は避けられないので、予備実験を以下のような方法で行ない、熱損失をあらかじめ見積った。

まず、多孔質媒体の周辺部（電極との接合部付近）の温度を代表温度とし、これを一定にして、空気流量に対する加熱量の関係を求める。これらのデータを代表温度をパラメータにして、横軸に空気流量、縦軸に加熱量を取りプロットし、これを直線近似したときの空気流量がゼロの場合の加熱量は、すべて熱伝導による損失とみなすことができると考えられる。このようにして得られる熱量を $Q_{loss}$ とすると、多孔質媒体の単位体積当たりの正味の加熱量 $q$ は次式で与えられる。

$$q = \frac{IV - Q_{loss}}{AH} \quad (1)$$

これより、体積熱伝達係数 $\alpha_v$ は次式で与えられる。

$$\alpha_v = \frac{q}{T_s - (T_{in} + T_{out})/2} \quad (2)$$

熱伝達の実験は、加熱量を一定にし、空気流量を順次変化させる方法で行なった。測定は実験装置全体が充分定常状態になっていることを確認した後、行なった。

## 3. 代表長さの検討

多孔質媒体の圧力損失は、低流量域では速度に比例し、高流量域では速度の二乗に比例することが知られている。例えば、粒子の充填層に対する Ergun<sup>1)</sup> の式は次式で与えられる。

$$\frac{\Delta p}{H} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu u_m}{d_p^2} + 1.75 \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{\rho u_m^2}{d_p} \quad (3)$$

ここに、 $d_p$  は粒子の等価直径である。(3) 式は一般に

$$\frac{\Delta p}{H} = a \mu u_m + b \rho u_m^2 \quad (4)$$

または

$$\frac{1}{\mu u_m} \frac{\Delta p}{H} = a + b \frac{\rho u_m}{\mu} \quad (5a)$$

$$\frac{1}{\rho u_m^2} \frac{\Delta p}{H} = a \frac{\mu}{\rho u_m} + b \quad (5b)$$

と書け、(4) 式の右辺の第1項は粘性エネルギー損失、第2項は運動エネルギー損失に相当する。

ところで、(3) 式と (4) 式を比較すると

$$a = 150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{1}{d_p^2} \quad (6a)$$

$$b = 1.75 \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{1}{d_p} \quad (6b)$$

となり、(4) 式の係数 $a$ は(長さ)<sup>-2</sup>、係数 $b$ は(長さ)<sup>-1</sup>なる次元を有するので、 $a, b$ を組合わせることにより、次の3つの長さの次元を有する量が、多孔質媒体の圧力損失特性から定義できる。

$$l_1 = \frac{1}{\sqrt{a}}, \quad l_2 = \frac{b}{a}, \quad l_3 = \frac{1}{b} \quad (7)$$

$l_1, l_2, l_3$  を用いて (5b) 式を無次元化すると、各々の代表長さに対して次式を得る。

$$\frac{f_1^*}{2} = \frac{1}{Re_1^*} + \phi \quad (8)$$

$$\frac{f_2^*}{2} = \phi^2 \left( \frac{1}{Re_2^*} + 1 \right) \quad (9)$$

$$\frac{f_3^*}{2} = \frac{1}{\phi^2} \frac{1}{Re_3^*} + 1 \quad (10)$$

ここに,

$$f_i^* = \frac{\Delta p}{\rho u_m^2/2} \left( \frac{l_i}{H} \right), \quad (i=1, 2, 3) \quad (11)$$

$$Re_i^* = \frac{\rho u_m l_i}{\mu}, \quad (i=1, 2, 3) \quad (12)$$

$$\phi = \frac{b}{\sqrt{a}} \quad (13)$$

である。(8), (9), (10) 式は, 多孔質媒体の摩擦係数  $f_i^*$  が, (7) 式で与えられる代表長さ  $l_i$  で定義されるレイノルズ数とパラメータ  $\phi$  の関数として表わされることを示している。

#### 4. 実験結果及び考察

##### 4.1 圧力損失特性

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 に, それぞれ多孔質金属 # 2, # 4, 針金格子 E, F, G, H の場合の圧力損失の実験結果を, 横軸に  $u_m$ , 縦軸に  $(1/u_m)(\Delta p/H)$  をとって示している。図中の実線は, 実験点を最小二乗法で近似した直線であり, これらの図より, 多孔質金属及び針金格子の圧力損失は, 一般的な形として (4) 式で表わされることが分かる。また, Fig. 3, Fig. 4 を比較すると, 多孔質金属 # 4 は # 2 に比較して約 4 ~ 5 倍ほど圧力損失が大きく, 近似直線の勾配も大きいことが分かる。Table 1 に示すように, 多孔質金属 # 2, # 4 は空隙率がほとんど同じであるにもかかわらず,

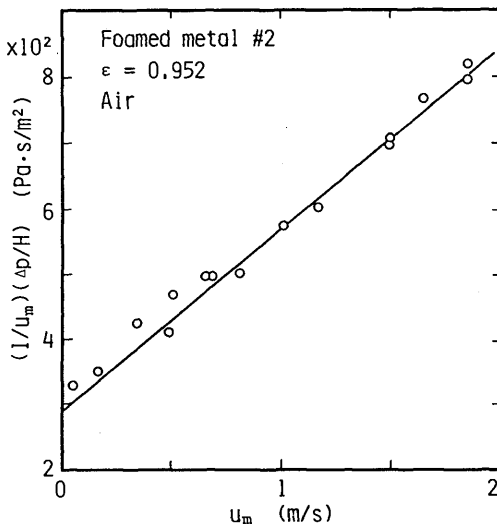


Fig. 3 Pressure drop (Foamed metal #2)

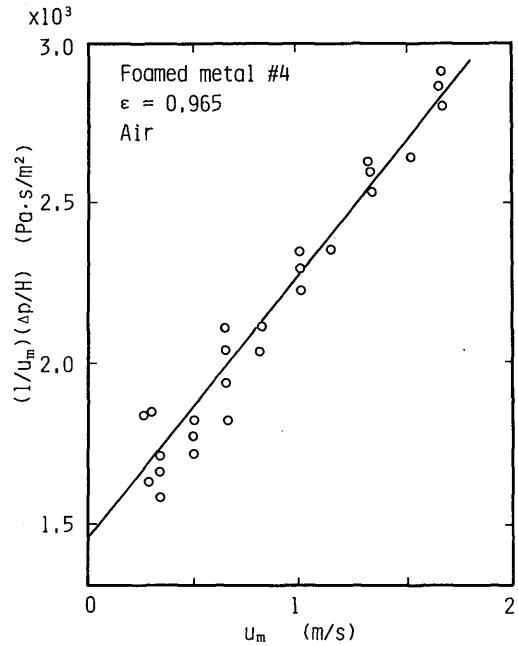


Fig. 4 Pressure drop (Foamed metal #4)

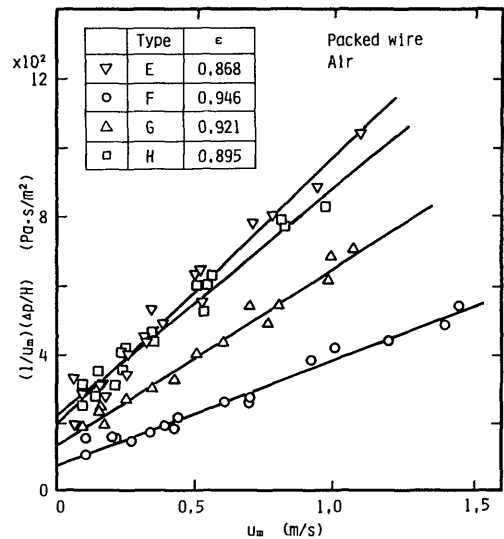


Fig. 5 Pressure drop (Packed wire)

圧力損失が両者で大幅に異なる。このことは, 多孔質金属の繊維が # 4 の方が細かく, そのため, 単位体積中の多孔質の表面積 (比表面積) は # 4 の方が大きく

**Table 3** Characteristic length and parameter  $\phi$  of the tested porous media.

Porous media Item	Foamed metal		Packed wire			
	#2	#4	E	F	G	H
$\epsilon$ (—)	0.952	0.965	0.868	0.946	0.921	0.895
$a$ (m <sup>-2</sup> )	$1.503 \times 10^7$	$7.628 \times 10^7$	$1.090 \times 10^7$	$3.342 \times 10^6$	$6.480 \times 10^6$	$9.173 \times 10^6$
$b$ (m <sup>-1</sup> )	$2.501 \times 10^2$	$7.148 \times 10^2$	$7.454 \times 10^2$	$3.083 \times 10^2$	$5.174 \times 10^2$	$7.387 \times 10^2$
$l_1$ (m)	$2.579 \times 10^{-4}$	$1.145 \times 10^{-4}$	$3.029 \times 10^{-4}$	$5.470 \times 10^{-4}$	$3.928 \times 10^{-4}$	$3.302 \times 10^{-4}$
$l_2$ (m)	$1.664 \times 10^{-5}$	$9.371 \times 10^{-6}$	$6.839 \times 10^{-5}$	$9.225 \times 10^{-5}$	$7.985 \times 10^{-5}$	$8.053 \times 10^{-5}$
$l_3$ (m)	$3.998 \times 10^{-3}$	$1.399 \times 10^{-3}$	$1.342 \times 10^{-3}$	$3.244 \times 10^{-3}$	$1.933 \times 10^{-3}$	$1.354 \times 10^{-3}$
$\phi$ (—)	0.0645	0.0818	0.226	0.169	0.203	0.244

なり、圧力損失も大きくなったと考えられる。さらに、針金格子の場合、F, G, H は針金の線径が等しいため、針金の本数の比が比表面積に比例し、かつ圧力損失は比表面積の二乗に比例するため、針金の本数の二乗が圧力損失に大きく影響すると考えられる。本研究の場合、

$$N_F^2 : N_G^2 : N_H^2 = 1 : 2.2 : 3.8$$

であり、各々の場合の圧力損失比に関連している。

上述のように、本研究で用いた非粒形多孔質を含んだ多くの種類の多孔質媒体の代表長さとしては、前述の (7) 式より定義される代表長さ  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  のいずれかを用いることが考えられる。

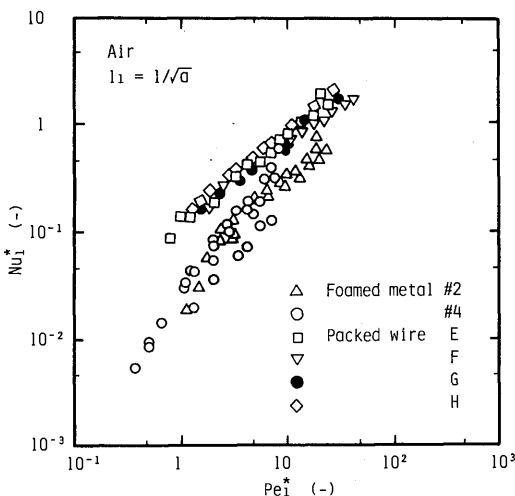
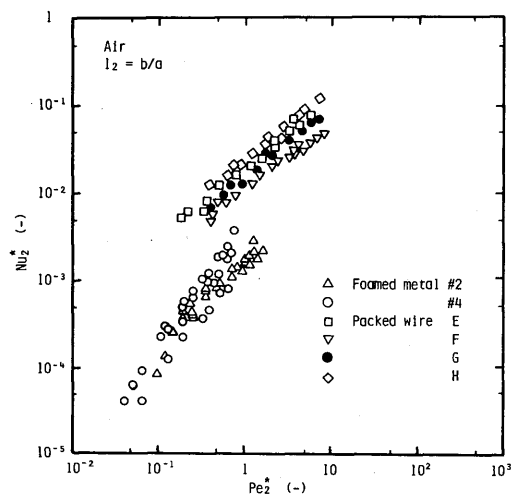
**Table 3** に圧力損失の実験結果より得られた代表長さ  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  および無次元パラメータ  $\phi$  の値を示している。これより、多孔質金属と針金格子の場合ではパラメータ  $\phi$  の値はかなり異なっていることがわかる。

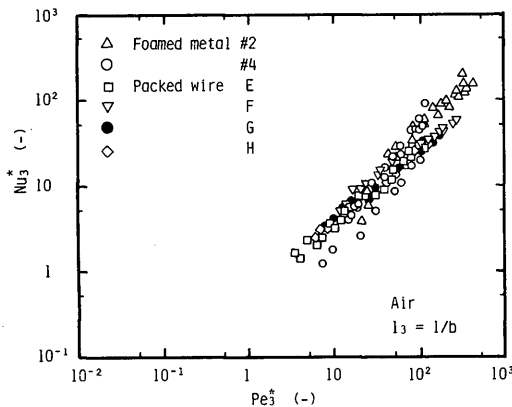
#### 4.2 熱伝達特性

圧力損失と熱伝達の間である関係が成立するならば、熱伝達についても、次の (14) 式で与えられる代表長さ  $l_1$  で定義されるヌセルト数はレイノルズ数 (ペクレ数) とパラメータ  $\phi$  の関数として表わされるであろう。

$$Nu_1^* = \frac{\alpha \sqrt{l_1^2}}{\lambda} \quad (14)$$

**Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8** には、(7) 式で与えられるそ

**Fig. 6** Heat transfer characteristic ( $h$ )**Fig. 7** Heat transfer characteristic ( $l_2$ )

Fig. 8 Heat transfer characteristic ( $l_3$ )

それぞれの代表長さを採用した場合のペクレ数とヌセルト数の関係を示している。まず、Fig. 6 は代表長さとして (7) 式の  $l_1$  を採用した場合であるが、それぞれ多孔質金属及び針金格子単独についてみれば比較的良くまとまっているが、これら二種の多孔質媒体相互の相関は良いとは言えず、Fig. 7 は代表長さとして (7) 式の  $l_2$  を採用した場合であるが、多孔質金属及び針金格子単独でもまとまりが悪い。また、Fig. 8 は代表長さとして (7) 式の  $l_3$  を採用した場合である。Table 3 に示したように、多孔質金属と針金格子とでは 2～4 倍程度異なっているパラメータ  $\phi$  の影響が代表長さ  $l_3$  を採用することによりほぼ消滅し、比較的良くまとまっていることが分かる。

これにより比較的空隙率の大きい多孔質媒体である多孔質金属と針金格子の熱伝達特性は、その圧力損失より定義される代表長さ  $l_3$  を採用すると比較的良く整理することができ、ヌセルト数とペクレ数は比例関係にあることが分かる。しかし、本研究では供試多孔質媒体の種類やデータ数が少なく、最終的な本研究の目的である多種の多孔質媒体に適用できる代表長さの選定及び整理式の導出のためには、更に今後検討を加えていく必要がある。

## 5. 結 論

空気を冷却流体として、比較的大きな空隙率を持つ、二種類のニッケル製発泡金属と四種類の千鳥状に配列積層されたステンレス針金格子を用いて、圧力損失と熱伝達特性の実験を行なった。その結果は次のようで

ある。しかし、本研究は更に多孔質としての研究を継続して行なう一段階であり、今後より広い種類の多孔質媒体の圧力損失と熱伝達特性の研究を行なって整理法を検討したい。

(1) 圧力損失は粒子に対する (4) 式でよく表わすことができる。

(2) 圧力損失特性より、(7) 式で与えられる、多孔質媒体の幾何学的形状によらない 3 つの代表長さ ( $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ ) を定義し、これを代表長さとしたヌセルト数とペクレ数との関係を調べた。その結果は、 $l_3=1/b$  を代表長さとすると比較的良くまとまり、 $Nu_3^*$  と  $Pe_3^*$  の間には比例的な関係が得られた。

## 謝 辞

本実験を行なうにあたり、当時四年生の平田養〔現イーグル工業 (株)〕及び修士二年の幸田敏記〔現九州電力 (株)〕両氏のご協力を得た。また、データ整理には修士一年の片上友照君のご協力を得た。ここに記して謝意を表する。

## 主な記号

- $A$  : 多孔質媒体のみかけの断面積 ( $m^2$ )
- $H$  : 多孔質媒体の厚さ (m)
- $I$  : 電流 (A)
- $N$  : 針金の本数 (—)
- $Nu_i^*$  : (14) 式で定義されるヌセルト数 (—)
- $Pe_i^*$  : ペクレ数 (—),  $Pe_i^* = Pr Re_i^*$
- $Pr$  : 流体のプラントル数 (—)
- $Q_{loss}$  : 損失熱量 (W)
- $Re_i^*$  : (12) 式で定義されるレイノルズ数 (—)
- $T$  : 流体の混合平均温度 ( $^{\circ}C$ )
- $T_s$  : 多孔質媒体の平均温度 ( $^{\circ}C$ )
- $V$  : 電圧 (V)
- $d_p$  : 粒子の等価直径 (m)
- $f_i^*$  : (11) 式で定義される摩擦係数 (—)
- $l_i$  : 圧力損失より定義される代表長さ (m)
- $\Delta p$  : 圧力損失 (Pa)
- $q$  : 単位体積あたりの正味の加熱量 ( $W/m^3$ )
- $u_m$  : 空塔速度 (m/s)
- (ギリシャ文字)
- $\phi$  : (13) 式で定義されるパラメータ (—)
- $\alpha_v$  : 体積熱伝達係数 ( $W/m^3^{\circ}C$ )
- $\epsilon$  : 空隙率 (—)

$\lambda$  : 流体の熱伝導率 ( $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$ )

$\mu$  : 流体の粘性係数 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )

$\rho$  : 流体の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

(サフィックス)

$i$  :  $i=1, 2, 3$

$in$  : 入口

$out$  : 出口

### 参 考 文 献

- 1) S. Ergun, Chemical Engineering Progress, 48-2 (1952), p. 89.
- 2) W. マーシャル編, 原子炉技術の発展 (上), 筑摩書房 (1986), p. 245.
- 3) 長谷川, 日本機械学会論文集 (B編), 49-437 (昭58-1), p. 3.
- 4) 越後・吉澤, 日本機械学会誌, 86-780 (昭58-11), p. 1285.
- 5) 浜口ら他 2 名, 日本機械学会論文集 (B編), 49-445 (昭58-9), p. 2001.
- 6) J. P. Chiou and M. M. El-Wakil, Journal of Heat Transfer, (1966), p. 69.
- 7) 浜口ら他 2 名, 日本機械学会論文集 (B編), 48-435 (昭57-11), p. 2207.
- 8) 浜口ら他 2 名, 日本機械学会論文集 (B編), 49-445 (昭58-9), p. 1991.