(昭和55年1月7日受理)

一軸配向繊維集合体の繊維軸に垂直方向の有効熱伝導度の評価*

静岡大学工学部 野 飼 享

ESTIMATION OF THE EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY PERPENDICULAR TO FIBER AXES OF UNIDIRECTIONALLY ORIENTED FIBER ASSEMBLY

By Tooru Nogai

(Faculty of Engineering, Shizuoka University,
Hamamatsu City, Shizuoka Pref., Japan)

This paper describes the procedure to calculate the effective thermal conductivity of unidirectionally oriented fiber assemblies. The procedure takes account of not only the heat conduction but also the heat radiation with the use of shape factors described in the previous paper. Numerical computation gave the following conclusions:

- (1) The temperature distribution in a fiber assembly is linear if the heat transfer in the assembly takes place only by heat conduction. But if the heat radiation works, the distribution becomes nonlinear in the region, where the heat radiation is effective.
- (2) The results of the numerical computation for the effective thermal conductivity of a fiber assembly show that the present method can well reproduce the dependence of the effective thermal conductivity on the volumetric ratio of fiber in the assembly.

(Received January 7, 1980)

1. はじめに

繊維集合体は固体相である繊維と気体相である空気との複合体であるため、一般の単一固体物質内の熱移動が伝導伝熱のみによって生ずるのに対し、繊維集合体では伝導伝熱ばかりでなく、放射および対流に依存する伝熱現象によっても行われ、全体として非常に複雑な伝熱機構となる。したがってその見掛けの熱伝導率すなわち有効熱伝導度も非常に複雑な特性を示すものと考えられ、従来より多くの研究者たちによって解明が進められた。たとえば仲ら^{1,2)}は繊維集合体の構造をモデル化し、渡辺³⁾らの解析を応用して繊維の異方性を考慮した熱伝導率を求めている。しかし仲らの研究は繊維そのものの熱伝導率を決定することを第1の目的としているため、繊維集合体としての伝熱機構の解明としては不十分であると思

われる。またN.E.Hager *et. al.*⁴⁾や前報⁵⁾は集合体内の放射伝熱の解析を、J.D.Vershoor *et. al.*⁶⁾は集合体内の気体の熱伝導率に対する影響について発表している。繊維集合体内の対流伝熱に関する研究は少なく、D.K.Joshi *et. al.*⁷⁾および著者ら⁸⁾の研究が見られる程度である。

以上のように繊維集合体の伝熱特性はかなり明確にされてきているが、放射および対流伝熱の影響がより大きく現われる体積率の低い場合に関しては必ずしも十分に解明されているとは言い難い。そこで本研究ではこのような観点から、体積率が小さく、対流伝熱が生じない条件での熱移動を取扱い、伝導および放射伝熱による繊維集合体の有効熱伝導度の評価を、前報⁵⁾で詳述した放射伝熱に対する形態係数を考慮して、行うことを目的とし、本報ではそのモデル解析について述べる。

2. 有効熱伝導度の概念

金属やガラスなどの単一固体物質内の熱移動は伝導伝

* この報文を「繊維集合体の有効熱伝導度に関する研究 (第2報), Studies on the Effective Thermal Conductivity of Fiber Assemblies (Part 2)」とする。

熱のみによって生じ、次式で表わされる：

$$q = -\lambda \text{ grad } T \quad (1)$$

ここで q は熱流束、 T は温度、 grad は勾配を表わし、比例定数 λ を熱伝導率と呼び、物質によって決まる物性値である。しかし繊維集合体は前述のように固体相と気体相の複合体であるため、伝導伝熱に加えて放射および対流による熱移動が同時に起る。そのため式(1)は繊維集合体に対して簡単に適用することができない。

そこで繊維集合体内の熱移動について以下のように考える。伝導、放射および対流伝熱によって、繊維集合体内の単位面積を単位時間内に通過する熱量をそれぞれ q_d 、 q_r および q_v (それぞれの伝熱機構の熱流束成分) とすると、全熱流束 q_t は

$$q_t = q_d + q_v + q_r \quad (2)$$

で表わされる。ここで式(1)を参考にして、各熱流束成分がすべて熱流方向の温度勾配に比例すると考えると、次式で表わされる：

$$\left. \begin{aligned} q_d &= -\lambda_d \text{ grad } T \\ q_v &= -\lambda_v \text{ grad } T \\ q_r &= -\lambda_r \text{ grad } T \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし λ_d 、 λ_v および λ_r はそれぞれの比例係数を表わす。全熱流束に対しても同様に考えると

$$q_t = -\lambda_e \text{ grad } T \quad (4)$$

で表わされる。ここで λ_e は比例係数である。

式(4)で表わされる係数 λ_e は熱移動が伝導のみによらない場合に対しても、伝導伝熱と同様の取扱いをして定義されるため、『有効熱伝導度』または『見掛け熱伝導率』と呼ばれ、集合体などの熱移動特性の評価に、熱伝導率と同じ概念で用いられる。式(3)および式(4)を式(2)に代入して整理すると次式となる：

$$\lambda_e = \lambda_d + \lambda_v + \lambda_r \quad (5)$$

したがって λ_d 、 λ_v および λ_r はそれぞれ有効熱伝導度の伝導伝熱成分、対流伝熱成分および放射伝熱成分を表わすことになる。

3. モデル解析

3.1 繊維集合体の構造のモデル化

本研究で用いる繊維集合体は2枚の平行平板にはさまれ、円形断面で太さ一様の構成繊維の軸が平板および互いに平行にそろえられ、軸方向に無限にのびているものとする(解析においては有限長さとする)。また熱は繊維軸に直角な方向のみに流れ、軸方向の流れは無視される。したがってその構造は図1(a)に示されるようになる。この図は繊維軸に直角な方向の断面を表わし、軸は紙面に直角な方向にのび、熱は紙面に平行で軸に直角な方向(矢印方向)に流れる。なお繊維軸は隣合う軸と一定距離

Fig. 1 Structural model of a fiber assembly

(a) represents the idealized structure of a fiber assembly. Circles denote the cross-sections of fibers constructing the fiber assembly, and they are arranged parallel to each other, and holding the constant distance s to the adjacent fibers. (b) represents the structural model of a fiber assembly. Rectangles denote the cross-sections of fibers having the same heat resistance as the fibers in (a). The arrow shows the heat flow direction. d is the diameter of fibers.

s を保つ千鳥配列をしているものとし、熱流に直角な面内で温度は一樣であるとする。

さて解析において放射伝熱を考慮するため、繊維集合体内の温度分布を求める手法をとる必要がある。繊維断面が円形では複雑になる。そこで本報では国井⁹⁾や渡辺³⁾らの解析モデルを参考にして、図1(b)に示されるように繊維断面を、その断面内の熱抵抗と同じ熱抵抗を有する矩形断面に置き換える。そして原構造と同じく、熱は平板および矩形断面軸に直角な方向のみに流れ、軸方向の熱流はないものとする、すなわち熱流に直角な面内では温度が一樣であるとする。

本報では図1(b)を繊維集合体の構造モデルとし、熱流方向に直角な平面の温度を求め、その時の熱流束を式(4)に代入することによって繊維集合体の有効熱伝導度 λ_e を決定する。

3.2 構造モデルの伝熱解析

図1(b)の繊維集合体の構造モデルにおいて、図示されているように上方より下方へすなわち重力方向に熱が流れる場合、対流伝熱は生じない。したがって熱は繊維および空気の伝導伝熱、繊維表面、加熱面および冷却面による放射伝熱によって伝えられる。

構造モデルの仮定より、加熱面などに平行な面内で温

Fig. 2 The appearance of the structural model

The temperature of the isothermal plains containing the surfaces of the rectangular fiber cross-sections and facing on the heating and the cooling plates are represented T_{2i-1} and T_{2i} respectively. The layer containing the fibers between the isothermal plains T_{2i-1} and T_{2i} is named the fiber layer, and the other layer not containing the fibers between the plains T_{2i} and T_{2i+1} is named the air layer, where i is the number of the fiber layer from the heating plate. The temperature of the heating and cooling plates are represented T_H and T_C respectively.

度は一樣であるので、図2に示すように、加熱面側に向いている矩形繊維表面を含む等温面の温度を T_{2i-1} 、冷却面側に向いている繊維表面を含む等温面の温度を T_{2i} 、加熱面および冷却面の温度をそれぞれ T_H 、 $T_C (=T_{2n+1})$ とする。ここで隣合う等温面の間に繊維が存在する層を繊維層と呼び、この層内では空気と繊維の伝導伝熱により熱が伝えられる。また繊維が存在しない場合、その層を空気層と呼び、この層内では空気のための伝導伝熱によって熱が伝えられる。さらに繊維層上面は加熱面およびこの層より上にある繊維層下面の繊維表面からの熱放射を受け、繊維層下面は冷却面およびこの層より下にある繊維層上面の繊維表面へ熱放射を送る。

なお図2中の各記号は次式で与えられる定数を表わす：

$$\left. \begin{aligned} s &= \frac{0.95231 d}{\sqrt{\xi}} & l &= \frac{\pi d}{4}, & L &= \frac{\sqrt{3}}{2} s \\ L_0 &= \frac{s-nL}{2} \left(> \frac{d}{2} \right), \\ n &= \left[\frac{c}{L} \text{より小さい最大の整数} \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで d は繊維直径、 c は加熱面と冷却面との距離、 ξ は次式で定義される体積率⁸⁾をそれぞれ表わす。

$$\xi = \frac{M}{\rho_f V_{af}} \quad (7)$$

ただし V_{af} は繊維集合体の見掛けの体積、 M はその質量、 ρ_f は構成繊維の密度を示す。

3.2.1 伝導伝熱成分の評価

前述のように、繊維層と空気層とでは伝導伝熱が異なるので、それぞれ別個に評価しなければならない。

(a) 繊維層内の伝導伝熱

図2に示される奇数温度面から偶数温度面の間では、前述のように繊維と空気の伝導伝熱によって熱が伝えられる。したがってこの二つの温度面間すなわち繊維層での伝熱は渡辺⁹⁾らの解析と同様の取扱いができ、次式で表わされる：

$$q_{doi} = \left\{ \lambda_a \left(1 - \frac{d}{s} \right) + \lambda_f \left(\frac{d}{s} \right) \right\} \left(\frac{T_{2i-1} - T_{2i}}{l} \right) \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (8)$$

ここで q_{doi} は繊維層内を伝導伝熱によって流れる熱流束、 λ_a および λ_f は空気および繊維の熱伝導率である。

(b) 空気層内の伝導伝熱

図2に示される偶数温度面から奇数温度面への熱移動は空気のための伝導伝熱によって行われるので、式(1)を適用することができ、次式が得られる：

$$q_{aei} = \lambda_a \cdot \frac{T_{2i} - T_{2i+1}}{L-l} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n-1) \quad (9)$$

ここで q_{aei} は空気層内を伝導伝熱によって流れる熱流束を表わす。ただし T_H 面(加熱面)と T_1 面との間および T_{2n} 面と T_{2n+1} 面(冷却面)の間では、式(9)の L を L_0 と置きかえて計算することにより、 q_{deo} および q_{den} が決定される。

なお空気の熱伝導率 λ_a は、繊維が存在することにより自由気体における値を補正しなければならない⁶⁾が、空気が大気圧であるとするので繊維の存在はほとんど影響せず、それ故本報では自由気体における値を使用する。

3.2.2 放射伝熱成分の評価

前報⁶⁾で述べたように、2枚の平行平板にはさまれた繊維集合体内に生ずる放射伝熱は、加熱面と冷却面との間、平板(加熱または冷却面)と繊維との間および繊維と繊維との間の3種の形態をとる。これらの放射伝熱を支配する因子の一つとして形態係数があるが、この値については前報⁶⁾で詳しく解析を試みた。そしてその結果、前二者の形態係数に比して後者すなわち繊維間の形態係数ははるかに小さく、無視しても差支えないことがわかった。そこで本報では、加熱面と冷却面との間および加熱または冷却面と繊維との間の放射伝熱を取扱い、その評価を試みる。

(a) 加熱面と冷却面間の放射伝熱

加熱面と冷却面間の放射伝熱は前報で詳述したように、加熱面からの熱放射が繊維に妨害されずに冷却面に到達できる割合を求めることにより決定できる。そして前報での数値計算の結果、この2平面間の放射伝熱に対する形態係数 F_1 は次式で与えられる：

$$F_1 = \xi^{-1.07} \times 3.01 \times 10^{-5} \quad (10)$$

それ故この2平面間の放射伝熱による熱流束 q_{rp} は

$$q_{rp} = \sigma F_1 \epsilon_H \epsilon_C (T_H^4 - T_C^4) \quad (11)$$

で与えられる¹³⁾。ここで ϵ_H および ϵ_C は加熱面および冷却面の放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$) である。

なお式(11)は繊維集合体内の温度分布とは無関係に、 T_H および T_C のみによって定まるので、他の伝熱機構と独立に評価することができる。

(b) 加熱面または冷却面と繊維との放射伝熱

加熱面と繊維または繊維と冷却面との間の放射伝熱は、上述の場合と同様に、加熱面からの熱放射が他の繊維に妨害されずに対応する繊維(または繊維から冷却面)へ到達できる割合を求めることによって決定できる。この場合の放射伝熱に対する形態係数については、上述の場合と同様に前報で詳述された方法によって決定することができる。そこでいま、加熱面と i 番目の繊維層(上面温度 T_{2i-1} 、下面温度 T_{2i}) との間の形態係数を f_{2i-1} とすると、この両者間の放射伝熱は次式で表わされる¹³⁾：

$$q_{r2i-1} = \sigma f_{2i-1} \epsilon_H \epsilon_f (T_H^4 - T_{2i-1}^4) \quad (12)$$

ここで ϵ_f は繊維の放射率である。またこの繊維層と冷却面との間の形態係数を f_{2i} とすると、これらの間の放射伝熱は次式で表わされる¹³⁾：

$$q_{r2i} = \sigma f_{2i} \epsilon_f \epsilon_C (T_{2i}^4 - T_C^4) \quad (13)$$

3.2.3 温度分布の評価

前述のように、本報では繊維集合体内の熱移動に対して、繊維および空気の伝導伝熱のほかに放射伝熱を考慮しているため、繊維集合体内の各等温面を通過する熱流束は一定ではない。したがって繊維集合体内を通過する全熱流束、すなわち加熱面が供給する全熱流束を各等温面の温度を決定することにより求めなければならない。

いま加熱面から見て j 番目にある繊維層(上面温度 T_{2j-1} 、下面温度 T_{2j}) を考える。この層の上面が受けとる熱流束を q_j とすると、これは加熱面からこの繊維層への放射伝熱 q_{r0j} と、この層より一つ上にある $j-1$ 番目の層の下面(温度 T_{2j-2}) とこの層とにある空気の伝導伝熱 q_{dej} の和で表わされる：

$$q_j = q_{r0j} + q_{dej} \quad (14)$$

上式の各熱流束に式(12)および式(9)を適用すると、次式が得られる：

$$q_j = \sigma f_{2j-1} \epsilon_H \epsilon_f (T_H^4 - T_{2j-1}^4) + \left(\frac{\lambda_a}{L-l} \right) (T_{2j-2} - T_{2j-1}) \quad (15)$$

したがって T_{2j-1} に関する4次方程式となり、これを解くことにより T_{2j-1} が決定される。ただし本報での数値計算においては T_{2j-1} を与え、それによって q_j を決定する手法を用いる。

さて繊維層内では繊維および空気の伝導伝熱のみによって熱移動が行われるので、 T_{2j-1} 面が受けとった熱流束 q_j が式(8)に従って T_{2j} 面まで流れる：

$$q_j = \left\{ \lambda_a \left(1 - \frac{d}{s} \right) + \lambda_f \left(\frac{d}{s} \right) \right\} \left(\frac{T_{2j-1} - T_{2j}}{l} \right) \quad (16)$$

この T_{2j} 面が受けとる熱流束 q_j は式(15)で与えられるので、上式により T_{2j} が決定できる。この q_j は T_{2j} 面とこの層より下にある $j+1$ 番目の繊維層の上面(温度 T_{2j+1}) との間にある空気層の伝導伝熱と、 T_{2j} 面から冷却面への放射伝熱によって伝えられるので、式(9)および式(13)に従って次式が成立する：

$$q_j = \sigma f_{2j} \epsilon_f \epsilon_C (T_{2j}^4 - T_C^4) + \left(\frac{\lambda_a}{L-l} \right) (T_{2j} - T_{2j+1}) \quad (17)$$

ここで q_j は与えられるので T_{2j+1} が決定される。このように式(15)～(17)を順次繰返し適用していくことによって、繊維集合体内の温度分布が決定される。

上述の繰返し計算は長時間を要するので、図3に示すフローチャートに従って電子計算機により行った。すなわち、式(6)で与えられる各定数を計算した後、 T_1 の温度(1番目の繊維層の上面温度)を次式で仮定する：

$$T_1 = T_H - k \Delta T \quad (18)$$

Fig. 3 Flow chart for numerical computation of the heat flux and the effective thermal conductivity.

ここで k は任意の整数, ΔT は温度間隔 (本報では 10^{-10} K とした) を表す。この値を式 (15) に代入することにより第 1 繊維層が受けとる全熱流束 q_1 が決定する。この q_1 を式 (16) に、つぎに式 (17) へ順次代入することにより、温度 T_2 および T_3 が決定し、さらにこれらの値を式 (15) に代入することにより q_2 が求められる。この計算を順次繰返すことにより温度分布が得られるが、その結果より求まる冷却面温度 T_{2n+1} が設定された温度 T_c と等しいかどうかを判定する。もし両者が一致すれば、得られている温度分布が求めるものであり、もし一致しない場合には、式 (18) の k を変更して同様の計算を繰返し、両者が一致するまで繰返し計算を行う。

上述のようにして温度分布が確定すると、加熱面が繊維集合体に放射および伝導伝熱によって供給する全熱流束 q_H が次式から求められる：

$$q_H = \sigma \epsilon_H \epsilon_f \sum_{j=1}^n f_{2j-1} (T_H^4 - T_{2j-1}^4) + \left(\frac{\lambda_a}{L_0 - l} \right) (T_H - T_1) \quad (19)$$

したがって繊維集合体内を通過する全熱流束は上式より得られる q_H と、式 (11) によって別個に計算される加熱面と冷却面間の放射熱流束 q_{rp} の和で与えられ、この値を式 (4) に代入することにより、繊維集合体の有効熱伝導度 λ_e が求められる：

$$\lambda_e = (q_H + q_{rp}) \left(\frac{c}{T_H - T_c} \right) \quad (20)$$

4. 計算結果および考察

前報⁵⁾で詳述された形態係数の評価法に基づいて、加熱面 (または冷却面) と繊維との間および加熱面と冷却面との間のそれぞれの形態係数を決定し、これらの値を用いて 3.2 で述べた手順により有効熱伝導度を算出し考察する。なお平板の寸法は実験装置との対応上、有効寸法として一辺が 0.212 m の正方形、その平板間の距離を 0.03 m とする。また両平板および繊維の放射率を 0.94 および 1.0、繊維直径を 11.3 μ m、繊維の熱伝導率を 0.163 W/(m $\cdot$ K) とする。

4.1 温度分布

図 3 のフローチャートに従って、電子計算機により温度分布を計算した結果の例を図 4 および図 5 に示す。これらの図は放射伝熱の影響を見るため、それが大きく現われる条件すなわち体積率 0.001、平均温度 353.15 K (80 $^{\circ}$ C) 温度差 33.12 K における結果であり図 4 は加熱面近傍、図 5 は中間部をそれぞれ示している。ここで縦軸は温度 (K) を、横軸は加熱面からの距離 (mm) をいずれも普通目盛で表わし、点線は熱が繊維集合体内を伝導伝熱のみで伝えられる場合 (Case I)、一点鎖線は加熱面 (または

Fig. 4 The temperature distribution in a fiber assembly neighboring the heating plate

The ordinate denotes temperature, and the abscissa the distance from the heating plate. In this case, the volumetric ratio of a fiber assembly is 0.001, the mean temperature 353.15 K (80 $^{\circ}$ C), and the temperature difference between the heating and the cooling plates 33.15 K.

The dotted line (Case I) shows that heat is transferred in a fiber assembly by heat conduction, the dashed-dotted line (Case II) and the fine solid line (Case III) that the heat radiation is considered between the heating plate and ten and fifty fiber layers respectively, and the thick solid line (Case IV) that the radiative heat transfer is considered between the heating and all fiber layers possible the heat radiation to arrive.

Fig. 5 The temperature distribution in a fiber assembly on the intermediate region

冷却面) と繊維との間の放射伝熱を 10 層 (3.06 mm) まで、細い実線は同じく 50 層 (14.85 mm) まで考慮した場合 (Case II および III)、そして太い実線は熱放射が到達できるすべてを考慮に入れた場合 (Case IV) をそれぞれ表

わしている。

図4より明らかなように、放射の影響を加えるほど加熱面近傍での温度降下が小さくなる。これは設定された加熱面および冷却面温度を保持するために、伝導のみによる場合の伝熱量の一部を放射伝熱が分担すること、そして放射成分を増すほど伝導成分が小さくすなわち小さな温度降下ですむことによる。ただしCase IVではCase IIIより大きな降下を示すが、これは逆に繊維から冷却面への熱放射がCase IVにおいて、加熱面近傍の繊維層から存在するため、その成分を補償するように降下が大きくなるものと考えられる。また伝導伝熱のみの場合は直線的に温度が降下するのに対し、放射伝熱を考慮すると上述のことから上に凸なる曲線を示すが、この曲線部も放射伝熱が考慮される範囲内に限定(Case II)されることとなる。

図5より、中間部近傍では加熱面近傍とは逆に、放射伝熱を考慮すると温度降下が大きくなる。これは加熱面から各繊維層への放射伝熱が順次蓄積され、加熱面近傍より多くの熱量を伝えることが必要となり、そのため伝導のみによる場合より温度降下が大きくなるものと考えられる。さらにCase Iと他の場合の温度曲線が交わる点(図中の●印; Case II: 15 mm, Case III: 15.8 mm, Case IV: 17.4 mm)を越えると、繊維から冷却面への放射伝熱の影響が現われ、徐々にその蓄積された熱が放射により解放されるため、温度降下はCase Iに近づき、冷却面近傍になるとそれより小さくなる。

ここで図5より求められる交差点位置が中間点15 mm(図中の縦軸方向の細い一点鎖線)よりずれるのは、この温度分布が逐次代入法によって求められるため、その計算を行う計算機の計算誤差に基づくものと考えられ、厳密には交差点位置は中間点になければならない。

以上のことは本条件の場合に限らず、図示されていない他の条件(体積率、温度、温度差など)においても定性的には全く同じであることが、計算結果より明らかになっている。

4.2 熱流束

4.1と同様にして計算された熱流束の数値結果の例を図6に示す。計算条件は4.1と同じである。ここで縦軸は熱流束(W/m^2)を普通目盛で、横軸は体積率を対数目盛で表わし、細い実線が伝導伝熱による熱流束成分、点線が加熱面と冷却面との間および一点鎖線が加熱面と繊維との間の放射伝熱による熱流束成分を、そして太い実線が全熱流束をそれぞれ示している。

図6より明らかなように、いずれの放射伝熱流束も繊維集合体の体積率が増加するに従って減少する。これは体積率が増加することによって繊維間の距離が短くなり、

Fig. 6 The heat flux based on each heat transfer mechanism.

The ordinate denotes the heat flux by normal graduation, and the abscissa the logarithmic volumetric ratio of a fiber assembly. The fine solid line shows the component of heat flux transferred by heat conduction, the dotted and the dashed-dotted lines the components of heat radiation between the heating plate and the cooling plate and between the heating plate and fibers respectively, and the thick solid line the total heat flux transferred in a fiber assembly.

その結果として加熱から冷却面もしくは繊維表面への熱放射が他の繊維によって妨害を受ける割合が増加することによって考えられる。両放射伝熱を比較すると、加熱面から繊維への熱流束が冷却面への熱流束よりかなり大きく、その影響も体積率0.1近辺まで及んでいる。したがって従来あまり考慮されていなかった加熱面から繊維への放射伝熱はかなり大きな影響を持ち、繊維集合体の伝熱特性において十分考慮しなければならないと考えられる。

また伝導熱流束は体積率約0.0015以上で体積率の上昇とともに増加している。これは体積率の増加により、空気より高い熱伝導率を有する繊維の含有率が高くなる結果であると考えられる。体積率0.0015以下では、逆に体積率の低下とともに熱流束は増加している。これは体積率が低下するほど、加熱面から熱放射を受ける繊維層数が減少し、これが妨害繊維の減少による形態係数の上昇を上回るためと考えられる。

したがって上述の二つの伝熱機構の相互効果として、全熱流束は体積率0.05近傍で最小値を持つ。このことは従来からいわれている、繊維集合体の体積率が低下すると有効熱伝導度が高くなる¹⁰⁻¹²⁾という予測と一致する。

4.3 有効熱伝導度

4.2の熱流束を式(20)に代入して、繊維集合体の有効熱伝導度を求めた結果の例を図7に示す。この図の計算条件は図6の場合と同一である。ここで縦軸は有効熱伝

Fig. 7 The effective thermal conductivity of fiber assemblies calculated by the heat flux and Eq. (20).

The ordinate denotes the effective thermal conductivity by normal graduation, and the abscissa the logarithmic volumetric ratio. The dotted line shows that heat is transferred in fiber assemblies by heat conduction, the dashed-dotted line that heat is transferred by heat conduction and radiation between the heating and cooling plates, and the solid line that heat radiation between the heating plate and the fibers is added to the case described above (corresponding to Case IV in Fig. 4).

導度 ($W/(m \cdot K)$) を普通目盛で、横軸は体積率を対数目盛で表わし、一点鎖線が伝導伝熱のみの場合、点線は伝導伝熱に加熱面と冷却面間の放射伝熱を加えた場合 (この成分は繊維集合体内の温度分布には無関係なので、別個に計算して伝導のみの場合に加えることができる)、実線がさらに加熱面 (または冷却面) と繊維との間の放射伝熱を考慮した場合 (4.1 の Case IV に相当) の数値計算結果を示している。

図7より、繊維集合体内の熱移動が伝導伝熱のみに支配されている場合、4.2 で述べた理由により 繊維の含有量の増加すなわち体積率の増加とともに有効熱伝導度が高くなり、高い体積率における従来の評価¹⁰⁾と一致するが、著者らの実測値¹²⁾とは低い体積率で一致しない。そこで加熱面と冷却面との間の放射伝熱成分を加えると図の点線のようになり、実測値と定性的には一致しているが、数値的にははるかに小さい。これに対し加熱面 (または冷却面) と繊維との間の放射伝熱を加えると、図6に示したように体積率が小さいほどこの伝熱による熱流束成分が大きく影響し、図7に示される実線となり、この結果は実測値とかなり良い一致が見られる。

加熱面と冷却面間の放射伝熱の影響は体積率 0.01 近傍でほとんどなくなるのに対し、加熱面 (または冷却面) と

繊維との間の放射伝熱は理論上かなり高い体積率すなわち約 0.1 近傍まで影響を与える。しかし実際の繊維集合体内における繊維の配列は理論で仮定したほど均一に整っているとは考えられず、したがって放射伝熱は理論で計算される値より小さくなると予想される。それ故、一軸配向繊維集合体の有効熱伝導度を予測する場合、測定技術的な精度などを考慮して 20% の誤差を認めるならば、体積率が 0.01 以上において、堀川¹⁰⁾や渡辺⁹⁾らが提唱している伝導伝熱モデルによる解析でかなりの予測値が得られるものと考えられる。しかし体積率が 0.01 以下では放射の影響が大きくなるため、本報で示したような放射伝熱の厳密な解析が必要であり、その場合前報⁹⁾および本報で述べた手法はその一つの評価法としてかなり良い情報を与え得るものであると考えられる。

5. ま と め

本報において、伝導伝熱のみならず放射伝熱をも考慮した繊維集合体の有効熱伝導度を解析する方法およびその数値計算結果について考察し、つぎの事項が明らかになった。

(1) 繊維集合体内の温度分布は、伝導伝熱のみを考慮した場合直線となるが、放射伝熱を考慮に加えると、その影響が現われ、熱放射が到達できる範囲内において曲線となる。

(2) 繊維集合体内を通過する各伝熱機構の熱流束成分を求めた結果、伝導伝熱による成分は体積率の増加とともに大きく、また放射伝熱成分は体積率の増加とともに小さくなり、これらの相互効果として、繊維集合体内を通過する全熱流束は約 0.05 近傍で極小値を持つ。

(3) 繊維集合体の有効熱伝導度を算出した結果、加熱面 (または冷却面) と繊維との間の放射伝熱を考慮することにより、本報での評価法が発表されている実測値の体積率に対する傾向をかなり良く表示できることが明らかとなった。

最後に、本研究を進めるに当り有益な御助言を頂いた東京工業大学石川欣造教授ならびに静岡大学井原素三教授に感謝の意を表します。なお本報の数値計算に使用した電子計算機は MELCOM-COSMO 700 (三菱電機株式会社製、静岡大学西部地区電子計算機室) である。

本報の内容の一部は繊維学会昭和 53 年年次大会 (昭和 53 年 6 月 12 日) で発表している。

文 献

- 1) 仲 三郎, 鎌田佳伸, 繊維誌, **26**, T43 (1973)
- 2) 仲 三郎, 鎌田佳伸, 吉野次朗, 繊維誌, **30**, T9 (1974)

- 3) 渡辺常正, 衛生工業協会誌, **29**, 433 (1955), **30**, 77 (1956)
 - 4) N. E. Hager Jr., R. C. Steere, *J. Appl. Phys.*, **38**, 4663 (1967)
 - 5) 野飼 享, 織学誌, **36**, T324 (1980)
 - 6) J. D. Verschoor, P. Greebler, *Trans. ASME*, **74**, 961 (1952)
 - 7) D. K. Joshi, S. P. Sukhatme, *Wärme-und Stoffübertragung*, **6**, 183 (1973)
 - 8) 野飼 享, 野沢安治, 鳴海 裕, 織学誌, **33**, T 398 (1977), **34**, T301 (1978)
 - 9) D. Kunii, J. M. Smith, *A.I.Ch.E.J.*, **6**, 71 (1960)
 - 10) 堀川 明, 「基礎繊維工学 (V)」(基礎繊維工学編集委員会), 日本繊維機械学会, p.280 (1971)
 - 11) 若杉松三郎編, 「おしたに技術時報総覧」, 押谷株式会社, p.3
 - 12) 野飼 享, 鳴海 裕, 第7回繊維連合研究発表要旨集, p.53 (1975)
 - 13) 日本機械学会編, 「伝熱工学資料」, 日本機械学会, p.128 (1975)
-