複合材料の有効熱伝導率導出に関する 数値シミュレーション

Computer Simulation for Estimating the Effective Thermal Conductivity of Composite Materials

横田仁志*、太田弘道*、柴田浩幸**

Hitoshi Yokota, Hiromichi Ohta, Hiroyuki Shibata

定常状態における有効熱伝導率が既に系統的に計算されている一方向繊維強化複合材料について繊維と直行する方向と平行な方向の非定常状態における熱拡散率を有限要素法を用いて求めた。レーザーフラッシュ法による測定から得られる見かけの熱伝導率と有効熱伝導率との関係について検討し、両者が一致する条件を求めた。

The effective thermal diffusivity of unidirectional fiber composites, of which effective thermal conductivity under the steady heat flow condition have been already investigated systematically, under the unsteady transverse and parallel directional heat flow condition were determined by a finite element method. The relation between the effective thermal conductivity and the apparent thermal conductivity of the composites measured by the usual laser flash technique was discussed and the condition that the former agreed with the latter was determined.

[Keywords: composite, fiber, laser flash, thermal conductivity, FEM]

1. はじめに

高温、高圧、酸化性雰囲気などの過酷な環境での使用を目的とする材料の開発が進められる中で、個々の材料特性を組み合わせ、高性能な物性を持つ複合材料へのアプローチがなされている。異種材料がマクロ的に複合しているため、例えば熱伝導率のような材料物性値を予測する際に単純な複合則のみでは求まらない場合が多い。そこで、いくつかの物性値の測定法が考案され、数値計算によって求められた物性値と比較されている。複合材料の熱伝導率一般に関しては、山田ら[1]による非定常応答に関する広範な研究、荒木、多田ら[2-4]による分散系複合材料に関する研究があり、最近も本紙に山田[5]による詳細なレビューが報告されている。本研究では、代表的な非定常法として

レーザーフラッシュ法による測定を取り上げて検討を行なった。この点についても既に山本ら[6]の繊維強化複合材料に関する研究、山根ら[7]の積層複合材料および母相中に柱状材料を埋め込んだ材料についての報告がある。著者ら[8-10]はレーザーパルスに対する非定常理論温度応答を熱伝導方程式から導出し、得られた温度応答から熱伝導率を求め、実際に測定される熱伝導率が定常状態に対して定義される熱伝導率と一致する条件を考察する手法を示している。しかし、これらの研究はHanら[11]の定常状態の熱移動解析から繊維複合材料の有効熱伝導率を導出した研究と比較すると、網羅している範囲の点からは、必ずしも充分なものではない。この点を踏まえ本研究では繊維複合材料に関して各相の比熱容量を考慮し、高体積分率での数値計算が可能になるように繊維の配列方法を工夫して、多種類の配列に対して広い体積分率範囲での系統的な検討を行った。

2. 数値計算方法

本シミュレーションでは有限要素法によって一方向繊維強化複合材料の見かけの熱伝導率と有効熱伝導率

* 茨城大学工学部物質工学科、〒316-8511 日立市中成沢町
4-12-1、Department of Materials Science, Faculty of
Engineering, IBARAKI University, 4-12-1 Nakanarusawa,
Hitachi, 316-8511, FAX:0294-38-5226
E-mail: yokotah@ipc.ibaraki.ac.jp, ohta@ipc.ibaraki.ac.jp
** 東北大学素材工学研究所、〒980-8577 仙台市青葉区片平
2-1-1、Institute for Advanced Materials Processing,
TOHOKU University, 2-1-1 Katahira, Aobaku, Sendai,
980-8577, FAX:022-217-5211
E-mail: shibata@ibis.iamp.tohoku.ac.jp

Fig.1 Schematic diagram of uni-directional fiber reinforced composite.

を計算した。なお、本論文では非定常熱伝導より求まる熱伝導率を見かけの熱伝導率、定常熱伝導より求まる熱伝導率を有効熱伝導率と定義する。Fig.1に示すように一方向に配向した繊維強化複合材料のうち繊維と垂直な方向と平行な方向に熱流を与えた場合の熱伝導率を計算した。計算には汎用の有限要素法プログラムMARC(日本マーク(株)製)を用いた。有限要素法の要素の形状は四角形要素を用い、要素の作成にはプリプロセッサプログラムMENTAT(日本マーク(株)製)を用いた。繊維の比熱と熱拡散率をそれぞれ変化させた。繊維の体積分率が35%~85%の領域での計算を行った。なお、母相と繊維間の熱抵抗を無視した。

2.1 繊維と垂直な方向の熱伝導率の計算

2.1.1 計算モデル

Fig.2に繊維と垂直な方向の温度応答を求めるための一方向繊維複合材料の模式図を示す。繊維と平行な方向の温度分布は一樣と考えられるので、2次元伝熱解析を行った。繊維の配置を正方配列と千鳥配列の2種類、各配列毎の繊維の体積分率(V_f)を母相が繊維と繊維

の間に入る最大の値とその約半分の値の2種類とした。千鳥配列では繊維相互の角度(γ)を30, 45, 60度の3種類とした。正方配列では $V_f = 35, 75\%$ 、千鳥配列では $\gamma = 30$ 度の時 $V_f = 35, 75\%$ 、 $\gamma = 45$ 度の時 $V_f = 35, 70\%$ 、 $\gamma = 60$ 度の時 $V_f = 40, 85\%$ とした。X軸方向の四角形要素数は常に20とした。伝熱方向(Y軸方向)の繊維数が4又は8の場合の計算モデルについて計算を行った。また各物性値について、繊維の熱伝導率/母相の熱伝導率(λ_f/λ_m) = $10^{-2}, 10^{-1}, 10^0, 10^1, 10^2$ 、繊維の比熱容量/母材の比熱容量(C_{pf}/C_{pm}) = 0.5, 1.0, 2.0、繊維と母材の密度は共に1.0とした。

2.1.2 有効熱伝導率の計算

定常状態における試料中の温度分布から有効熱伝導率 λ_e を求めた。境界条件はFig.2に示す $Y=0$ での温度を100K、 $Y=1$ での温度を-100K、左右部は対称性から断熱とした。境界上、即ち $Y=1$ でのノードと境界から1つ内側のノードの温度から境界における温度勾配を求め、この温度勾配と各要素の熱伝導率の値から各ノードに流入する熱流束を次式のフーリエの法則を用いて求めた。

$$q_n = -\lambda \frac{\partial T}{\partial Y} (n = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

ここで、 n は境界上の各ノードの番号である。単位胞全体を流れる熱流束は各ノードの熱流束を表面に対して次式のように積算することにより導出した。

$$q = (q_1 + q_N) \frac{\Delta X}{2} + \sum_{m=2}^{N-1} q_m \Delta X \quad (2)$$

Fig.2 Schematic diagram for a coordinate system employed in this work; a) rectangular pattern (number of fiber, $n_f=8$), b) rectangular pattern ($n_f=4$), c) staggered pattern ($n_f=8$), d) staggered pattern ($n_f=4$).

ここで ΔX はモデル中の四角形要素の一辺の長さである。さらにこの熱流束から有効熱伝導率 λ_e を次式により導出した。

$$\lambda_e = \frac{q}{\Delta T/d} \quad (3)$$

ここで q は要素を流れる熱流束、 ΔT は上下面の温度差、 d は試料の厚さである。また、結果をHanら[11]の解析的に得られた値と比較し一致することを確認した。

2.1.3 見かけの熱伝導率の計算

非定常状態の温度応答から見かけの熱伝導率 λ_a を求めた。上下左右各面は断熱とした。上面に短時間で一定の熱量を与えた時の下面の平均温度応答曲線から $t_{1/2}$ 法[12]により見かけの熱拡散率 α_a を求め、この値から次式により見かけの熱伝導率 λ_a を導出した。

$$\alpha_a = \frac{0.1388d^2}{t_{1/2}} \quad (4)$$

$$\lambda_a = \alpha_a \rho C p_{all} \quad (5)$$

$$= \alpha_a \rho (V_m C p_m + V_f C p_f) \quad (6)$$

ここで、 d は試料の厚さ、 $t_{1/2}$ は下面の温度が最高温度の半分になるまでの時間、 ρ は比熱、 $C p_{all}$ は試料全体の定圧比熱、 V_m と V_f はそれぞれ母材と繊維の体積分率、 $C p_m$ と $C p_f$ はそれぞれ母材と繊維の定圧比熱である。

2.2 繊維と平行な方向の熱伝導率の計算

2.2.1 計算モデル

Fig.3に繊維と平行な方向の温度応答を求めるための一方向繊維複合材料の模式図を示す。試料内部では繊維が規則正しく充填され並進対称性が成立するので、

Fig.3 Translational symmetrical model of uni-directional fiber reinforced.

六角形の領域内での解析に帰着される。更に、計算を簡略化するために六角形領域を各辺に内接する円で近似し、繊維中心を軸とする円筒形とした。円筒形モデルは、Fig.4に示される軸に沿った断面の二次元軸対称モデルに還元される。繊維の体積分率を最密充填率に近い値の90%とその約半分の値の40%の2種類、繊維長さとし繊維半径の比 $l/p=4,8$ の2種類とした。各物性値については2.1.1と同様とした。

2.2.2 有効熱伝導率の計算

繊維と平行な方向の熱伝導の場合、定常に対して定義される有効熱伝導率 λ_t は以下のような複合則から求まることが知られている[13,14]。

$$\lambda_t = V_m \lambda_m + V_f \lambda_f \quad (7)$$

ここで V_m と V_f はそれぞれ母材と繊維の体積分率、 λ_m と λ_f はそれぞれ母材と繊維の熱伝導率である。

2.2.3 見かけの熱伝導率の計算

非定常状態の温度応答から見かけの熱伝導率 λ_a を求めた。上下左右各面は断熱とした。左面のみ温度を与えた時の右面の平均温度応答曲線から $t_{1/2}$ 法により見かけの熱拡散率 α_a を求め、この値から(4)~(6)式により見かけの熱伝導率 λ_a を導出した。

3. 計算結果及び考察

3.1 繊維と垂直な方向の熱伝導

母材の熱伝導率に対する定常熱伝導から求めた有効熱伝導率の比 λ_t/λ_m および母材の熱伝導率に対する非定常熱伝導から求めた見かけの熱伝導率の比 λ_a/λ_m を母相と繊維の熱伝導率比 λ_f/λ_m に対してプロットした結果をFig.5~8に示す。例えばFig.5(a)に示す正方配列の繊維数4本の場合、 $V_f=75\%$ では $\lambda_f/\lambda_m=10^2$ の時 λ_t/λ_m と λ_a/λ_m の差は約5%であるがFig.5(b)の繊維数8本の場合1%程度に減少し、ほぼ一致していると見なせる。これは千鳥配列のいずれの場合でも認められる。これ

Fig.4 Two dimensional axial symmetrical model for FEM analysis in axial heat flow.

Fig.5 Effect of thermal conductivity for fiber on effective thermal conductivity and apparent thermal conductivity in transverse heat flow; rectangular pattern ($\gamma=45$ deg), (a) $n_f=4$, (b) $n_f=8$.

Fig.6 Effect of thermal conductivity for fiber on effective thermal conductivity and apparent thermal conductivity in transverse heat flow; staggered pattern ($\gamma=30$ deg), (a) $n_f=4$, (b) $n_f=8$.

Fig.7 Effect of thermal conductivity for fiber on effective thermal conductivity and apparent thermal conductivity in transverse heat flow; staggered pattern ($\gamma=45$ deg), (a) $n_f=4$, (b) $n_f=8$.

Fig.8 Effect of thermal conductivity for fiber on effective thermal conductivity and apparent thermal conductivity in transverse heat flow; staggered pattern ($\gamma=60$ deg), (a) $n_f=4$, (b) $n_f=8$.

Fig.9 Effect of thermal conductivity for fiber on theoretical thermal conductivity and apparent thermal conductivity in axial heat flow; (a) $l/p=4$, (b) $l/p=8$.

らのことから非定常測定法の一つであるレーザーフラッシュ法で繊維と垂直な方向の熱伝導率を測定する場合、熱伝導方向の厚さが繊維数8本程度であれば得られる見かけの熱伝導率の値を有効熱伝導率として見なせることが定量的に確認された。また、母相と繊維の熱容量比の影響は熱伝方向の繊維数の違いよりも少なかった。

3.2 繊維と平行な方向の熱伝導

母相の熱伝導率に対する非定常状態の計算から求めた見かけの熱伝導率の比 λ_{app}/λ_m を母相と繊維の熱伝導率比 λ_f/λ_m に対してプロットした結果をFig.9に示す。また図中に(7)式の複合則から求まる値を λ_t/λ_m として示した。繊維長さ l と繊維半径 r の比 $l/p=4$ の場合、低体積分率では λ_f/λ_m によって λ_{app}/λ_m と λ_t/λ_m の値に差が生じ

ており母相と繊維の熱容量比の影響が見られるが、高体積分率ではほとんど変わらない。 $l/p=8$ の場合、低体積分率でも高体積分率でも両者の値の差は5%以下でほとんど一致している。現実の材料では通常 l/p の値は数10以上であり、このことは $l/p=8$ 程度の条件において見かけの熱伝導率を有効熱伝導率の値と見なせることを示している。

4. 結言

一方向に配向した繊維複合材料の繊維と垂直な方向と平行な方向に熱流を与えた場合の熱伝導率を有限要素法を用いて計算した。試料両面の温度を固定した場合の定常状態における試料中の温度分布から有効熱伝導率を、また、非定常状態として試料片面に一定の熱量を与えたときの反対面の平均温度応答曲線から見かけの熱伝導率を導出した。定常状態から求めた有効熱伝導率と非定常状態から求めた見かけの熱伝導率の値を比較した場合、繊維と垂直な方向では両者の値は繊維数が8以上で、また繊維と平行な方向では繊維の長さとの比が8以上で一致した。このような条件の下では非定常測定法による有効熱伝導率の推定が可能であることが明らかになった。

[謝辞]

本研究の遂行にあたり計量研究所計測システム部計測情報研究室の馬場哲也氏には貴重な討論を頂いた。有限要素法の計算には茨城大学学生 横田聡子氏に協力を頂いた。各位に深く謝意を表す。また、本研究の一部は文部省科学研究費補助金(重点領域研究:課題番号10123205)によったことを記し、深く御礼申し上げる。

NOMENCLATURE

λ_f : thermal diffusivity of fiber, m^2s^{-1}
 λ_m : thermal diffusivity of matrix, m^2s^{-1}
 α_a : apparent thermal diffusivity, m^2s^{-1}
 λ_a : apparent thermal conductivity, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
 λ_t : theoretical thermal conductivity, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
 C_{pf} : specific heat capacity at constant pressure of fiber, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
 C_{pm} : specific heat capacity at constant pressure of matrix, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

$C_{p_{\text{all}}}$: specific heat capacity of composite at constant pressure, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
 q : heat flux, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
 ΔT : difference of temperature between rear and back surface of specimen, K
 $t_{1/2}$: time to reach the half of the maximum temperature rise, s
 ρ : density, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
 V_m : volume fraction of matrix
 V_f : volume fraction of fiber
 γ : fiber packing angle, deg
 d : thickness of specimen, m
 p : pitch of fiber, m
 l : length of fiber, m

参考文献

- [1] 山田悦郎、高橋カネ子；第19回日本熱物性シンポジウム論文集、福岡(1998), 263-266.
- [2] 多田泰志、荒木信幸、牧野敦；第15回日本熱物性シンポジウム論文集、富山(1994), 57-60.
- [3] 荒木信幸、橋本光弘、唐大偉、牧野敦、藤本武志；第18回日本熱物性シンポジウム論文集、奈良(1997), 245-246.
- [4] N.Araki, D.W.Tang, A.Makino, M.Hashimoto and T.Sano; Int. J. Thermophysics, **19-4**(1998), 1239-1251.
- [5] 山村力、山根常幸、山田修史、山田純、佐藤春樹、飯島嘉明、米田守宏、丹羽雅子、藤本尊子、日比谷孟俊、山田悦郎；熱物性, **13**(1997), 128-142.
- [6] 山本三七男、馬場哲也、小野晃；第13回日本熱物性シンポジウム論文集、秋田(1992), 33-36.
- [7] 山根常幸、片山真一郎、十時稔；第18回日本熱物性シンポジウム論文集、奈良(1997), 197-200.
- [8] レーザーフラッシュ法等の非定常法による熱伝導率/熱拡散率評価技術調査委員会(委員長：荒木信幸)；平成8年度報告書、日本機械工業連合会・超高温材料研究所(1997), 61-69.
- [9] 柴田浩幸、太田弘道、早稲田嘉夫；第13回日本熱物性シンポジウム論文集、秋田(1992), 395-398.
- [10] 柴田浩幸、早稲田嘉夫、太田弘道；東北大学素材工学研究所集報, **49**(1993), 45-50.
- [11] L.S.Han, A.A.Cosner; J.Heat Trans., **103**(1981), 387-392.
- [12] W.J.Parker, R.J.Jenkins, C.P.Butler and G.L.Abbott; J.Appl.Phys., **32**(1961), 1679-1684.
- [13] J.R.ホールマン；「伝熱工学<上>」(平田賢監訳), 23 (ブレイン図書, 1982).
- [14] 太田弘道、友田陽；日本金属学会報, **29**(1990), 147-154.

[Received Dec, 28, 1998, Accepted Aug, 20, 1999]