【論文】

光加熱を用いる炭素繊維強化炭素複合材料の 二次元温度伝導率成分測定法

Method to Measure Thermal Diffusivity Coefficients of 2 Dimensions for Carbon Fiber Reinforced Carbon Composites by Use of Light Heating

松島 栄次*

Eiji Matsushima

炭素繊維強化炭素複合材料 (C/C 複合材料) は高温で使用する構造材料として発展が期待される先進複合材料である。C/C 複合材料は異方性材料であり、その温度伝導率は 2 階テンソル量 (温度伝導率成分) となる。異方性材料を対象とした温度伝導率測定法は、異方性の主軸方向が既知であることを前提とするものが多い。本研究は、主軸方向が未知である温度伝導率成分を測定することを目的として、有限要素法による近似解を測定原理とする測定法を開発する。本報では、室温において、光加熱される C/C 複合材料に対する二次元熱伝導実験による温度変化から温度伝導率成分を決定することにより、測定法の健全性を実証する。

Carbon fiber reinforced carbon composites (C/C composites) have been important structural materials at high temperatures. C/C composites are anisotropic solids and their thermal diffusivity is 2nd-order tensor of which components are called thermal diffusivity coefficients. The objective of study is to evaluate thermal diffusivity coefficients for an anisotropic material of which diad axes (such that a rotation of 180 degrees about them brings the structure into a position congruous with its original one) are unknown using stepwise light heating method in which the finite element method (FEM) is used for data reduction. This report describes experiments conducted to confirm a principle for the anisotropic material at room temperature and thermal diffusivity coefficients measured for metals and C/C composites which are cut from a plate at some angles with the direction of fiber.

[Keywords: C/C composites, thermal diffusivity, method to measure, finite element method]

1. はじめに

炭素繊維強化炭素複合材料 (C/C 複合材料) は、炭素繊維、炭素材料および気孔により構成される。それは異方性材料であり、Carslaw と Jaeger[1]によれば、温度伝導率が 2 階テンソル量 (温度伝導率成分) となる。その温度伝導率評価方法は、構成要素の温度伝導率を測定し、その分布を観測して有効温度伝導率を算出する方法[2]と、有効温度伝導率を測定する方法がある。本研究では後者について検討する。

佐藤ら[3]は、レーザーフラッシュ法を用いて、三次元繊維 C/C 複合材料に対して繊維と平行方向の温度伝導率を測定している。入澤ら[4]は、フィルム状炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を炭素化した C/C 複合材料を作成し、その面方向の熱伝導率をレーザーフラッシュ法により測定して

いる。これらは、異方性の主軸方向における温度伝導率を測定し、座標変換により温度伝導率成分を評価するものであり、主軸方向が既知であることを前提とする。栗原ら[5]は、レーザースポット周期加熱法を用いて、温度の観測位置を増やすことにより、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) における面内方向の熱的異方性を評価する装置を開発している。根本[6]は、レーザパルス状点熱源加熱法を用いて、雲母材の主軸温度伝導率および主軸角を同時に測定している。これらは、異方性材料の主軸方向が未知の場合において、温度伝導率成分を評価するものである。

今後、C/C 複合材料の応用範囲が拡大され、繊維織物における繊維の配向方向が複雑になることが予想される。その際、主軸方向を特定して温度伝導率を測定することが困難になり、栗原ら[5]や根本[6]の研究は重要になるものと考えられる。そこで、本研究では、ステップ状加熱法[7]を用いて、温度の観測位置を増やすことにより、温度伝導率成分を測定することを目的とする。なお、ステップ状加熱法は、荒木ら[8]により溶融塩の測定に適用されて以降、C/C 複合材料に応用される研究例はなく、それにより温度

* 大阪工業大学工学部機械工学科,
〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1.
Dept. of Mechanical Engineering, Fac. of Engineering, Osaka
Institute of Technology, 5-16-1 Asahi-ku, Osaka 535-8585.
FAX: 06-6957-2134, E-mail: eiji.matsushima@oit.ac.jp

伝導率成分が測定される研究例もない。

本報では、二次元温度伝導率成分を測定することを目的として、有限要素法による近似解を測定原理とし、ステップ状光加熱を用いた温度伝導率成分測定法を開発する。そこで、Ti と C/C 複合材料に対する室温における熱伝導実験により観測される温度の時間変化を一次元熱伝導に対する厳密解と比較して、温度伝導率を決定する方法と、それを二次元熱伝導に対する近似解と比較して、二次元温度伝導率成分を決定する方法の健全性を実証する。

Fig. 1 Principle to measure a thermal diffusivity.

2. 測定原理

図1に、前面 (Front) が加熱され、左面 (Left)、右面 (Right) および後面 (Back) の温度が観測される測定原理図を示す。光源はランプのフィラメント (白色螺旋形状) 2個である。直方体試料 (灰色と黒色の縞模様) は、その前面のみに光が照射されるように、試料支持部品 (灰色) により囲まれる (図では、試料が現れるように、上部品が上側に、右前部品が右側にずらされている)。温度は、加熱面を除く3面の中心座標を中心とする直径4mmの円形面積 (試料前面の丸印) における平均値として赤外線温度計 (白色と灰色の2色) 3個により観測される。光は試料支持上 부품の前面側にある穴から入射し、上部品上側にある穴から光検出素子 (白色) に導かれ、光強度の時間変化が観測される。この光強度の時間変化にしたがって加熱される系に対する熱伝導現象から温度伝導率が決定される。その熱伝導方程式の解から計算されるひとつの位置における温度の時間変化において、ひとつの時刻における温度に対するその他の時刻における温度の比は、加熱強度に関係なく、温度伝導率の関数となる。したがって、最適化法を用いて、材料の温度に対する観測値と、厳密解あるいは近似解による解析値との差が最小になるように、温度伝導率が決定される。最適化法には逐次シンプレックス探索法[9]を用いる。

2. 1 一次元熱伝導 (厳密解)

2. 1. 1 順解析

測定対象に対して、次の仮定をする。(a) 熱伝導は材料厚み方向の一次元現象である。(b) 熱物性は均質かつ等方性である。(c) 初期温度は材料内とその周囲で一様である。(d) 境界は材料前面と後面であり、それらは周囲から断熱される。(e) 表面熱流束は材料前面に一様に分布し、時間に対して階段関数状に変化する。この場合、熱伝導方程式は、

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

である。また、初期温度は、

$$[T]_{t=0} = 0, \quad (2)$$

であり、境界条件は、

$$\left[k \frac{\partial T}{\partial y} + q_0 \delta(y) q_e(t) \right]_{y=0} = 0, \quad \left[k \frac{\partial T}{\partial y} \right]_{y=l_y} = 0, \quad (3)$$

である。さらに、表面熱流束は、

$$q_h(y, t) = q_0 \delta(y) q_e(t) j, \quad (4)$$

と表せる。ここで、 q_e は光検出素子で観測される光強度の時間変化である。式(1)の厳密解は、 y 軸に垂直な一面 ($y = \psi$) に瞬間熱源 ($t = \tau$) が発生する場合のGreen関数[1],

$$G(y, t; \psi, \tau)$$

$$= \frac{1}{l_y} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\beta_n y) \cos(\beta_n \psi) e^{-a \beta_n^2 (t - \tau)} \right\}, \quad (5)$$

を用いて、

$$T(y, t) = \frac{q_0}{\rho c} \int_0^t [\delta(\psi) q_e(\tau) G(y, t; \psi, \tau)]_{\psi=0} d\tau, \quad (6)$$

と表される。ただし、座標系の原点は材料前面とし、

$$\beta_n = \frac{n\pi}{l_y}, \quad (7)$$

(a) Test section with sectional views from top

(b) Test section with sectional views from front

(c) Measuring system

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus. 1, luminous source; 2, sample; 3, sample support; 4, conduit tube of light; 5, light sensor; 6, infrared sensor at left, right, front and back; 7, thermocouple; 8, transformer; 9, digital multi-meter; 10, personal computer; V_a , voltage of light sensor; V_i , Voltage of transformer at left; E_l , E_r , E_f and E_b , amperage of infrared sensor at left, right, front and back.

である。

2. 1. 2 逆解析

ひとつの位置における温度に対する観測値 $T_e(y, t_i)$ と解析値 $T_a(y, t_i)$ との差から計算される標準偏差 s_T ,

$$s_T^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \{T_e(y, t_i) - T_a(y, t_i)\}^2, \quad (8)$$

が最小になる温度伝導率が決定される。ここで、 t_i と m は、それぞれ、温度の記録時間と記録数である。

2. 2 二次元熱伝導 (近似解)

2. 2. 1 順解析

測定対象に対して、次の仮定をする。(a) 熱伝導は材料幅方向と厚み方向の二次元現象とする。(b) 熱物性は均質な異方性とする。(c) 初期温度は材料内とその周囲で一様である。(d) 境界は材料左面、右面、前面および後面であり、それらは周囲から断熱される。(e) 表面熱流束は材料前面に一様に分布し、時間に対して階段関数状に変化する。この場合、熱伝導方程式は、

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \frac{\mathbf{q}}{\rho c} = 0, \quad \vec{\nabla} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

である。ここで、

$$\frac{\mathbf{q}}{\rho c} = -\mathbf{a} \vec{\nabla} T = - \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} \\ a_{yx} & a_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad a_{xy} = a_{yx}, \quad (10)$$

であり、温度伝導率を対称2階テンソル量とする。また、初期温度は、式(2)と等しく、境界条件は、

$$[\mathbf{q} \cdot \mathbf{n} - \mathbf{q}_h \cdot \mathbf{n}]_{\text{boundary}} = 0, \quad (11)$$

となる。一方、表面熱流束は、

$$q_h(x, y, t) = q_0 \{u(x, 0) - u(x, l_x)\} \delta(y) q_e(t) j, \quad (12)$$

と表せる。ただし、座標系の原点は、材料左前の角とする。式(9)の熱伝導方程式を、有限要素法 (FEM) のひとつである Galerkin 法により空間に関して離散化し、Crank-Nicolson 差分により時間に関して離散化する[10]。要素は三角形1次要素である。順解析における要素数は512、節点数は289および時間増分は1/6sである。

2. 2. 2 逆解析

ひとつの位置における温度に対する観測値 $T_a(x, y, t_i)$ と解析値 $T_a(x, y, t_i)$ との差から計算される標準偏差 s_T を、

$$s_T^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \{T_e(x, y, t_i) - T_a(x, y, t_i)\}^2, \quad (13)$$

とする。前面が加熱される実験に対して計算される左面 $((x, y) = (0, l_y/2))$ 、右面 $((x, y) = (l_x, l_y/2))$ および後面 $((x, y) = (l_x/2, l_y))$ における標準偏差、左面が加熱される実験に対して計算される右面、前面 $((x, y) = (l_x/2, 0))$ および後面における標準偏差の総和が最小になる温度伝導率成分が決定される。

Fig. 3 Observed range of vision by an infrared sensor.

3. 実験方法と試料

3. 1 実験方法

図2に、左面が加熱され、右面、前面および後面の温度が観測される実験系統図を示す。実験装置には、変圧器、試験部および測定系がある。試験部は、光源、試料、クロメル/アルメル熱電対 (JIS 規格 K 型熱電対)、光検出素子および赤外線温度計により構成される。光源はハロゲンランプであり、そのフィラメントは螺旋形状 (図1 参照) で外径が7.4mmで長さが20mmである。K 型熱電対は直径1.6mmの金属シース接地形であり、その先端が試料支持下部品から1mmだけ突出している。試料は、K 型熱電対によって支持され、試料支持部品と接触する部分は熱電対先端のみである。光検出素子はシリコンフォトダイオードで

あり、それにより光強度の時間変化が観測される。図3に、赤外線温度計の観測視野を示す。その観測視野は、先端から200mmの距離で直径4mmの円形面積となる。赤外線温度計は、試料の右面、前面および後面の温度を観測するよう固定部品により配置され、その出力電流は、0~1350℃の温度範囲が4~20mAとなるように調整されている。測定系は、デジタルマルチメータとパーソナルコンピュータで構成される。光検出素子の出力電圧と赤外線温度計の出力電流は、1/6s間隔で観測され、それぞれ、分解能が0.1μVと0.1μAのデジタルマルチメータに170.5s間 (記録数2¹⁰個) 記録される。K 型熱電対の温度は、10s間隔で観測され、温度の分解能が0.1Kのデータロガーに記録される。実験では、まず、光源への負荷電圧を0Vに保ち、試料の温度が定常となる状態 (定常状態) を観測する。次に、負荷電圧を変化させずに、試料の初期温度 (初期状態) を観測する。そして、負荷電圧を階段関数状 (ステップ状) に増加 (変圧器の電圧を0Vから80V程度に増加) させて、試料の温度が初期温度から変化する状態 (加熱状態) を観測する。なお、光検出素子と赤外線温度計により観測される初期状態における光強度と温度の標準偏差は、それぞれ、25pWと0.27K (電流値、3.2μA) である。また、ひとつの試料に対して、前面を加熱する実験と左面を加熱する実験は、それぞれ、3回繰返される。その際、赤外線温度計の位置は変更されない。

Fig. 4 Sample of C/C composites.

3. 2 試料

等方性材料はチタン (Ti) である。Ti は、JIS 規格の種類が2種 (純度99.42%以上) に準ずる丸棒から切り出された試料である。また、その表面は黒体塗料が塗られる。C/C 複合材料は、日本カーボン (株) 製 CCM-190C である。図4左図のように、炭素繊維は織物面内で直角に交差するように配向される (図では、炭素繊維の線径と織物の厚みが拡大されている) が、厚み方向には配向されない。板材

では、繊維の方向が繊維毎にランダムになるように、炭素繊維繊維物が積層される。したがって、CCM-190Cの熱物性は、繊維面と平行な面(xz面)内で等方性であり、繊維面に垂直な面(xy面)内で直交異方性になるものと考えられる。図4右図のように、試料は、板材から繊維面と前面との角度 θ (0° , 20° , 30° および 45°)をつけて切り出される。ただし、個々の試料は、その製造工程は同じであるが、単一の板材から切り出されたものではない。表1に、試料の寸法と標準偏差 s_L を示す。

Table 1 Size [mm] and the standard deviation, s_L [mm] for samples.

Materials	Values	Width	Thickness	Height
Ti	Average	30.08	30.03	30.06
	s_L	0.005	0.014	0.009
C/C $\theta = 0^\circ$	Average	29.98	29.96	29.78
	s_L	0.065	0.020	0.078
C/C $\theta = 20^\circ$	Average	29.99	30.13	29.98
	s_L	0.070	0.079	0.186
C/C $\theta = 30^\circ$	Average	30.07	30.04	29.93
	s_L	0.073	0.040	0.043
C/C $\theta = 45^\circ$	Average	30.05	30.00	29.98
	s_L	0.046	0.020	0.018

Fig. 5 Temperatures and power of light as a function of time for Ti when sample is heated at front surface. L, R and B are respectively left, right and back surfaces and e means data for experiments.

4. 結果と考察

4. 1 Ti

図5に、前面が加熱される実験で、観測される左面、右面および後面における温度の時間変化（以下、温度履歴という、実線）と光強度の時間変化（点線）を示す。光強度は約10s後に階段関数状に増加するが、その増加前に電気

的雑音と考えられる強度変化と、増加後に振幅が0.07nWで周期が10s程の電源電力変動による強度変化が含まれる。順解析には、増加前後の強度変化も入力される。また、左面と右面における温度には、約130s後に自然対流が原因と考えられる変化[7]が観測されるため、逆解析には0sから85.2s(記録数 2^9 個)の間で観測される温度を入力する。

(a) When sample is heated at front surface

(b) When sample is heated at left surface

Fig. 6 Modified amperage of infrared sensor and modified power of light as a function of time for Ti. F is front surface and a means data for analyses of FEM.

図6(a)に、前面が加熱される実験で、観測される左面、右面および後面における温度履歴（実線）と光強度の時間変化 q_e （点線）を示す。光強度は、階段関数状に増加する前における0sから2.5s(記録数 2^4 個)の平均値が0、増加した後における82.7sから85.2sの平均値が1となるように無次元化され、順解析に入力される。温度履歴は、図5にみられる2K程度の初期温度差を無くして、初期温度

からの温度上昇量が電流値で表され、逆解析に入力される。左面と右面における温度はほぼ等しく、二次元温度伝導率成分の a_{xy} がゼロになることを示す。すべての温度は、光強度増加後から数 s の間、変化しない時間（以下、時間遅れという）があり、その後、下に凸な曲線を描きながら上昇する。左面と右面の時間遅れは、後面のそれよりも短い。また、すべての温度は、数十 s 以後、直線的に上昇することから、試料表面が断熱的であることが確認される[7]。さらに、加熱中における前面温度分布をサーモグラフィで観測し、ほぼ面内は一樣温度分布となることを確認した。図 6(b)に、左面が加熱される実験で、観測される右面、前面および後面における温度履歴と光強度の時間変化を示す。前面と後面における温度履歴はほぼ等しく、前面が加熱される実験における左面と右面のそれらと等しい。右面における温度履歴は前面が加熱される実験における後面のそれと等しい。これは、二次元温度伝導率成分の a_{xx} と a_{yy} が等しいことを示す。図 6 から、Ti が等方性材料であることが確認される。

Table 2 Thermal diffusivity [mm^2/s] on assumption of one dimension, the error [%] from reference [11] [mm^2/s] and the standard deviation, s_D [mm^2/s] for Ti.

Heated	Observed	Average	Error	s_D	Ref.
Front	Left	12.5	35	0.43	9.25
	Right	8.85	-4.3	0.92	
	Back	9.95	7.6	0.85	
	Average	10.4	13	1.85	
Left	Right	9.63	4.1	0.10	
	Front	12.4	34	0.19	
	Back	9.70	4.9	0.60	
	Average	10.6	14	1.55	

表 2 に、図 6 の温度履歴と一次元熱伝導における厳密解を順解析とする逆解析によって決定される温度伝導率の平均値、文献値との誤差および標準偏差 s_D を示す。表中「Average」行の値は、観測 3 面における温度伝導率の平均値、文献値との誤差および標準偏差である。前面加熱による温度伝導率の平均値、誤差および標準偏差は、左面加熱によるそれらとほぼ等しく、文献値は標準偏差の範囲内にある。ただし、前面加熱で左面観測による温度伝導率と左面加熱で前面観測によるその誤差はその他に比べて大きい。これは、赤外線温度計の観測軸が加熱面側にずれることや観測軸と試料面が垂直ではないことなどが原因であると考えられる。しかし、本報の実験装置は、この誤差の原因を制御できないため、これらを偶然誤差と考える。今後、本方法の精度を向上させるためには、その原因を制御できる実験装置に改良する必要がある。

表 3 には、図 6 の温度履歴と二次元熱伝導における近似解を順解析とする逆解析によって決定される温度伝導率成分とその行列式の平方根 ($|a|^{0.5}$ 、以下、大きさという) を示す。 a_{xy} はほぼゼロとなり、 a_{xx} 、 a_{yy} および $|a|^{0.5}$ はほぼ等しく、表 2 の偶然誤差の範囲内にある。図 6 には、決定される温度伝導率成分によって計算される温度履歴の解析値（破線）も示す。同図から、解析値は観測値と良く一致することと、光強度に含まれる電氣的雑音と電源電力変動による強度変化は、階段状変化に対して 10% 程度の大きさであるため、温度履歴の解析値に影響を与えないことが確認される。

Table 3 Thermal diffusivity [mm^2/s] on assumption of two dimensions, the error [%] from reference [11] [mm^2/s] and the standard deviation, s_D [mm^2/s] for Ti.

Materials	a	Average	Error	s_D	Ref.
Ti	a_{xx}	9.46	2.3	0.47	9.25
	a_{xy}	8.62×10^{-4}		2.5×10^{-4}	0
	a_{yy}	9.75	5.4	0.55	9.25
	$ a ^{0.5}$	9.59	3.7	0.05	9.25

Fig. 7 Temperatures and power of light as a function of time for C/C composite of $\theta = 0$ degrees when sample is heated at left surface.

4. 2 C/C 複合材料

4. 2. 1 $\theta = 0^\circ$

図 7 に、左面が加熱される実験で、観測される右面、前面および後面における温度履歴と光強度の時間変化を示す。光強度は、約 10s 後に階段関数状に増加するが、Ti と同様に増加前に電氣的雑音と考えられる強度変化と、増加後に電源電力変動による強度変化が含まれる。順解析には、増加前後の強度変化も入力される。また、右面と前面における温度には、約 100s 後に自然対流によるものと考えられ

る変化[7]が観測されるため、逆解析には0sから85.2s（記録数2⁹個）の間で観測される温度を入力する。

(a) When sample is heated at front surface

(b) When sample is heated at left side surface

Fig. 8 Modified amperage of infrared sensor and modified power of light as a function of time for C/C composite of $\theta = 0$ degrees.

図8(a)に、前面が加熱される実験で、観測される温度履歴と光強度の時間変化を示す。左面、右面および後面における温度履歴は T_i のそれとほぼ等しいが、それらの時間遅れは T_i のそれより長い。これは a_{xy} がゼロとなり、 a_{yy} が T_i のそれよりも小さくなることを示す。図8(b)に、左面が加熱される実験で、観測される温度履歴と光強度の時間変化を示す。右面、前面および後面における温度履歴は T_i のそれとほぼ等しいが、それらの時間遅れは T_i のそれより短い。これは a_{xx} が T_i のそれよりも大きくなることを示す。また、すべての温度は、数十s以後、直線的に上昇することから、試料表面が断熱的であることが確認される[7]。図

8は、温度伝導率の主軸が式(10)のフーリエの法則において定義される座標軸に一致する異方性材料の性質を示す。

Table 4 Thermal diffusivity [mm^2/s] on assumption of one dimension, the error [%] from reference [12] [mm^2/s] and the standard deviation, s_D [mm^2/s] for C/C composite of $\theta = 0$ degrees.

Heated	Observed	Average	Error	s_D	Ref.
Front	Left	3.88	12	0.37	3.47 (I)
	Right	3.76	8.4	0.61	
	Back	3.93	13	0.03	
	Average	3.87	11	0.09	
Left	Right	26.5	22	2.0	21.7 (II)
	Front	29.2	35	2.2	
	Back	33.3	54	4.5	
	Average	29.7	37	3.5	

Table 5 Thermal diffusivity [mm^2/s] on assumption of two dimensions, the error [%] from reference [12] [mm^2/s] and the standard deviation, s_D [mm^2/s] for C/C composites.

Materials	a	Average	Error	s_D	Ref.
C/C $\theta = 0^\circ$	a_{xx}	31.9	47	1.00	21.7
	a_{xy}	2.06×10^{-2}		1.7×10^{-2}	0
	a_{yy}	4.19	21	0.22	3.47
	$ a ^{0.5}$	11.6	33	0.25	8.68
C/C $\theta = 20^\circ$	a_{xx}	17.4	-11	0.95	19.6
	a_{xy}	4.54	-23	0.18	5.86
	a_{yy}	4.01	-28	0.16	5.60
	$ a ^{0.5}$	7.00	-19	0.17	8.68
C/C $\theta = 30^\circ$	a_{xx}	13.3	-23	0.44	17.1
	a_{xy}	5.74	-27	0.20	7.89
	a_{yy}	6.56	-18	0.40	8.03
	$ a ^{0.5}$	7.35	-15	0.33	8.68
C/C $\theta = 45^\circ$	a_{xx}	16.0	27	0.44	12.6
	a_{xy}	11.4	25	0.41	9.12
	a_{yy}	16.1	28	1.07	12.6
	$ a ^{0.5}$	11.3	30	0.25	8.68

表4に、図8の温度履歴と一次元熱伝導における厳密解を順解析とする逆解析によって決定される温度伝導率を示す。表5に、図8の温度履歴と二次元熱伝導における近似解を順解析とする逆解析によって決定される温度伝導率成分とその大きさを示す。 a_{xy} はほぼゼロとなり、 a_{xx} (II)、 a_{yy} (I) および $|a|^{0.5}$ はすべて異なる。ほとんどの温度伝導率は文献値よりも大きく、文献値は測定値の標準偏差内にない。そこで、温度伝導率成分の大きさと異方性割合とを区別するため、無次元温度伝導率 a^* 、

$$a^* \equiv \begin{bmatrix} a_{xx}^* & a_{xy}^* \\ a_{yx}^* & a_{yy}^* \end{bmatrix} = \frac{a}{|a|^{0.5}}, \quad a_{xy}^* = a_{yx}^*, \quad (14)$$

を求めると、表 6 となる。無次元温度伝導率成分の文献値は、標準偏差の範囲内にはないが、その誤差は表 2 の偶然誤差の範囲内である。図 8 には、決定される温度伝導率成分によって計算される温度履歴の解析値も示す。同図から、解析値は観測値と良く一致することと、光強度に含まれる電氣的雑音と電源電力変動による強度変化は、階段状変化に対して 10% 程度の大きさであるため、温度履歴の解析値に影響を与えないことが確認される。

Table 6 Thermal diffusivity on assumption of two dimensions, the error [%] from reference [12] and the standard deviation without dimension for C/C composites.

Materials	a^*	Average	Error	s_D	Ref.
C/C $\theta=0^\circ$	a_{xx}^*	2.76	10	0.104	2.50
	a_{xy}^*	1.76×10^{-3}		1.47×10^{-3}	0
	a_{yy}^*	0.363	-9.3	0.014	0.400
C/C $\theta=20^\circ$	a_{xx}^*	2.48	10	0.076	2.25
	a_{xy}^*	0.649	-3.9	0.035	0.675
	a_{yy}^*	0.573	-11	0.035	0.646
C/C $\theta=30^\circ$	a_{xx}^*	1.81	-8.6	0.048	1.98
	a_{xy}^*	0.782	-14	0.012	0.910
	a_{yy}^*	0.892	-3.5	0.026	0.925
C/C $\theta=45^\circ$	a_{xx}^*	1.42	-2.3	0.045	1.45
	a_{xy}^*	1.01	-3.7	0.036	1.05
	a_{yy}^*	1.43	-1.4	0.087	1.45

4. 2. 2 $\theta=30^\circ$

図 9(a)に、前面が加熱される実験で、観測される温度履歴と光強度の時間変化を示す。右面における温度は、数 s の間、時間遅れがあり、その後下に凸な曲線を描きながら上昇し、次に上に凸な曲線を描きながら上昇して、数十 s 以後は直線的に上昇する。左面と後面における温度は、数十 s 程度の時間遅れがあり、その後下に凸な曲線を描きながら上昇し、数十 s 以後は直線的に上昇する。左面と右面における温度履歴は一致せず、等方性材料のそれらとは異なる。これは a_{xy} がゼロにならないことを示す。時間遅れは、右面、左面および後面の順で長くなる。図 9(b)に、左面が加熱される実験で、観測される温度履歴と光強度の時間変化を示す。後面における温度履歴は前面が加熱される実験における右面のそれと同様であり、右面と前面における温度履歴は前面が加熱される実験における左面と後面のそれらと同様である。時間遅れは、後面、右面および前面

の順で長くなるが、それぞれ、前面が加熱される実験における右面、左面および後面の時間遅れよりも短い。これは a_{xx} が a_{yy} より大きくなることを示す。図 9 は、温度伝導率の主軸が式(10)のフーリエの法則において定義される座標軸に一致しない異方性材料の性質を示す。これらの温度履歴と二次元熱伝導における近似解を順解析とする逆解析によって決定される温度伝導率成分を表 5 に、 $\theta=20^\circ$ の結果と合わせて示す。なお、表 5 の文献値は、 $\theta=0^\circ$ の温度伝導率成分に z 軸を中心とする座標変換、

$$a = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 21.7 & 0 \\ 0 & 3.47 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad \dots (15)$$

を適用して算出される値である。 $\theta=20^\circ$ と $\theta=30^\circ$ の試料では、温度伝導率成分とその大きさはすべて文献値よりも小さく、その誤差は標準偏差よりも大きい。 $\theta=20^\circ$ の大きさと $\theta=30^\circ$ のそれは、標準偏差の範囲に共通する値がある。表 6 の無次元温度伝導率成分の文献値は、標準偏差の範囲内にはないが、その誤差は表 2 の偶然誤差の範囲内である。よって、その大きさが試料毎の個体差により異なるものと考えられる。また、図 9 に示す温度履歴の解析値は観測値と良く一致する。

4. 2. 3 $\theta=45^\circ$

図 10(a)に、前面が加熱される実験で、観測される温度履歴と光強度の時間変化を示す。すべての面における温度履歴は、 $\theta=30^\circ$ の C/C 複合材料におけるそれらと同様であるが、左面における温度履歴と後面におけるそれがほぼ等しい。右面の時間遅れは左面（後面）のそれより短い。図 10(b)に、左面が加熱される実験で、観測される温度履歴と光強度の時間変化を示す。すべての面における温度履歴は、 $\theta=30^\circ$ の C/C 複合材料におけるそれらと同様であるが、右面における温度履歴と前面におけるそれがほぼ等しい。後面の時間遅れは前面（右面）のそれより短い。また、後面と前面（右面）の時間遅れは、それぞれ、前面が加熱される実験における右面と左面（後面）のそれらと等しい。これは a_{xx} と a_{yy} が等しくなることを示す。表 5 と 6 に、二次元熱伝導における近似解を順解析とする逆解析によって決定される温度伝導率成分とその無次元数を示す。温度伝導率成分とその大きさはすべて文献値よりも大きく、その誤差は標準偏差よりも大きい。 $\theta=45^\circ$ の大きさと $\theta=0^\circ$ のそれは、標準偏差の範囲内で一致する。表 6 の無次元温度伝導率成分の文献値は、標準偏差の範囲内である。よっ

て、その大きさが試料毎の個体差により異なるものと考えられる。また、図 10 に示す温度履歴の解析値は観測値と良く一致する。

(a) When sample is heated at front surface

(b) When sample is heated at left side surface

Fig. 9 Modified amperage of infrared sensor and modified power of light heating as a function of time for a C/C composite of $\theta = 30$ degrees.

5. 結論

本報では、Ti と C/C 複合材料に対して、光加熱を用いた熱伝導実験を行い、加熱面を除く 3 面における温度履歴を観測し、温度伝導率測定法の健全性を検討し、以下の結論を得た。

- (1) Ti と $\theta = 0^\circ$ の C/C 複合材料の温度伝導率を一次元熱伝導に対する厳密解を順解析とする逆解析により決定できることを実証した。
- (2) Ti と $\theta = 0^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $\theta = 30^\circ$ および $\theta = 45^\circ$ の C/C

複合材料の二次元温度伝導率成分を二次元熱伝導に対する近似解を順解析とする逆解析により決定できることを実証した。

- (3) 今後、温度伝導率の偶然誤差を小さくし、精度を向上させるため、赤外線温度計における観測視野の位置精度と近似解の精度を改良する必要がある。

(a) When sample is heated at front surface

(b) When sample is heated at left side surface

Fig. 10 Modified amperage of infrared sensor and modified power of light heating as a function of time for a C/C composite of $\theta = 45$ degrees.

NOMENCLATURE

- t : time, s
 (x,y) : coordinates in width and thickness, m
 T : temperature, K
 a : thermal diffusivity, m^2/s
 $\mathbf{a}$: thermal diffusivity tensor of 2 dimensions, m^2/s

a_{xy} : thermal diffusivity coefficients, m^2/s
 k : thermal conductivity, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
 l_x : width of sample, m
 l_y : thickness of sample, m
 q_h : surface heat flux, W/m^2
 q_0 : intensity of q_h , W/m^2
 q_e : observed profile of q_h as a function of t ,
 ρ : density, kg/m^3
 c : specific heat, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 q : heat flux, W/m^2
 j : unit parallel vector to y axis,
 n : unit perpendicular vector on surface,
 τ : time for integral, s
 ψ : coordinate in thickness for integral, m
 $G(y, t; \psi, \tau)$: Green function, K
 $u(x, l_x)$: unit step function,
 $\delta(y)$: delta function,

minimization”, The Computer Journal, **7** (1965) 308-313.

- [10] 矢川元基; 「流れと熱伝導の有限要素法入門」 (1992) 103, 榊風館.
- [11] 「伝熱工学資料改訂第4版」, 日本機械学会編 (1994) 316, 榊丸善.
- [12] 菅原利夫, 田中義和; 「炭素繊維強化炭素複合材料 (C/C コンポジット)」, 繊維学会誌, **49**(5)(1993) 183-189.

[Received Mar. 2, 2020, Accepted July 10, 2020]

参考文献

- [1] H. S. Carslaw, J. C. Jaeger; “Conduction of Heat in Solids”, 2nd ed. (1959) 38, 359, Oxford University Press, New York.
- [2] 横田仁志, 太田弘道, 柴田浩幸; 「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」, 熱物性, **13** (1999) 240-245.
- [3] 佐藤裕, 大竹邦彦, 嶋田徹, 佐藤英一; 「ロケットノズル材料の熱拡散率評価」, 熱物性, **17** (2003) 199-204.
- [4] 入澤寿平, 西村和己, 山本徹也, 牧野雄太, 田邊靖博; 「炭素系廃棄物を用いた C/C コンポジットの熱伝導性」, 第 39 回日本熱物性シンポジウム講演論文集 (2018) 127-129.
- [5] 栗原理也, 長野方星; 「ロックイン・サーモグラフィを用いた高熱伝導炭素系複合材料の熱的異方性評価装置の開発」, 熱物性, **28** (2014) 82-88.
- [6] 根本栄治; 「レーザパルス状点熱源加熱法を用いた異方性非定常対数法による 2 次元雲母材の主軸熱拡散率および主軸角の同時分離測定」, 第 22 回日本熱物性シンポジウム講演論文集 (2001) 419-421.
- [7] 「熱物性資料集断熱材編」, 日本熱物性研究会編 (1983) 15, 榊養賢堂.
- [8] 荒木信幸, 中村佳央, 高野義昭; 「ステップ状加熱法による熔融塩の熱拡散率測定におけるふく射伝熱の影響」, 第 11 回日本熱物性シンポジウム講演論文集 (1990) 263-266.
- [9] J. A. Nelder, R. Mead; “A simplex method for function