非定常温度・低圧環境下における繊維質断熱材の熱伝導挙動^{*1}

Thermal Characteristics of a Fibrous Insulator under Unsteady Temperature and Low Pressure Environments

奥 山 圭 一^{*2,*3}・座 古 勝^{*3}

Keiichi OKUYAMA and Masaru ZAKO

Key Words: Composite Material, Heat Transfer, Spacecraft, Testing, Design

Abstract: Re-entry vehicles must possess a heat shield system, comprising an ablator, fibrous insulation, and so on, that can be attached to their body surface. Under atmospheric pressure, a high effective thermal conductivity value may be applied to the development of certain heat shield systems. The fibrous insulation employed by this design approach is thick and heavy. In this study, it was shown that the effective thermal conductivity measured by steady measuring methods, such as the guarded hot plate (GHP) method, could be applied to detailed temperature forecasting of an aluminum silica fibrous insulation material under a re-entry environment. Furthermore, this study clearly showed that effective thermal conductivity forecasting of the insulation material can be realized for both the viscous-flow (10^5 Pa) and the Knudsen-flow regions (100 Pa). The results demonstrated that the forecasting method of the heat conduction of the fibrous insulator was good; this enabled establishment of a thin insulator.

記 号 の 説 明

d_g : collision diameter for air (m)
 d_{fiber} : fiber diameter (m)
 f_g : gas conduction correction factor
 L : mean distance between fibers (m)
 N : Avogadro constant (1/mol)
 P : pressure (Pa)
 R : gas constant (J/mol/K)
 T : temperature (K) $T_1 > T_2$
 ρ_{fiber} : fiber density (kg/m^3)
 ρ_{ins} : porosity fibrous insulator density (kg/m^3)
 λ_{eff} : effective thermal conductivity (W/m/K)
 λ_g : gas conductivity in porosity fibrous insulator (W/m/K)
 ω : mean free path (m)

1. は じ め に

宇宙往還機の外壁は、空力加熱の機内侵入を防ぐ目的で、熱防御システムで覆われる。熱防御システムは、空力加熱による高い表面温度に耐え、かつ内部の構造体と搭載機器とを許容温度範囲内に抑える熱防御と断熱の両機能を有したもので、セラミックタイル、カーボン・カーボン複合材やアブレータなどの熱防御材や空隙率の大きな繊維質断熱材(以下、繊維質断熱材)などから構成される。

月や他惑星からの帰還軌道、また地球周回軌道から大気圏に再突入する宇宙往還機の環境は、低温から超高温、極

低圧から大気圧まで急激に変化する。この大気圏再突入環境を地上実験設備で完全に模擬することは困難であるから、設計は解析的手法でも実施し、保証する必要がある。

繊維質断熱材の有効熱伝導率は、雰囲気温度や圧力に依存して変化する。この有効熱伝導率の温度や圧力依存特性は、ガス分子の熱力学的な挙動、構成繊維の材質や径、また断熱材の成形法や厚さなどの違いによって異なるため複雑である。

繊維質断熱材の有効熱伝導率は、保護熱板(GHP)法、熱流計法、平板比較法のような定常法を用いて測定される例が多い。室温以上の環境下における定常法を用いた有効熱伝導率の測定は、高温の測定装置の中に被測定物を入れ、被測定物と装置との熱流束が一定となった状態で実施される。熱線法のような非定常測定法の場合でも、被測定物表面と周囲との熱流束はほぼ一定に維持される。このように、有効熱伝導率の測定は装置と被測定物との熱流束が一定となる熱平衡状態になるまで待つ必要があるため、一つの温度条件に費やす測定時間は長い。

一方、大気圧以上のガスの熱伝導率は圧力に依存しない。しかし、圧力の減少に伴って、ガスの平均自由行程(mean free path)が繊維質断熱材の平均繊維間隔(mean distance between fibers)や熱伝導率測定装置の容器サイズ相当になると、ガスの熱伝導率は圧力に依存して減少を始める。再突入時における宇宙往還機周辺の雰囲気圧力は極めて低く、この環境下にあるガスの平均自由行程は大きいので、繊維質断熱材の有効熱伝導率は圧力に依存して変化するようになる。再突入環境のように、温度や圧力が急激に変化する環境において、繊維質断熱材の有効熱伝導率を測定することは容易でない。さらに、熱平衡状態で測定した有効熱伝導率を用いて予測した再突入環境における断熱材の

^{*1} ©2004 日本航空宇宙学会
平成 16 年 4 月 7 日原稿受理

^{*2} 川崎重工(株) 航空宇宙カンパニー

^{*3} 大阪大学大学院

温度は、実際の再突入環境下における温度に一致するか否か良く判っていない。したがって、繊維質断熱材の設計は、低圧環境下と比較して高めの有効熱伝導率を与える高信頼度の大気圧、熱平衡状態下の測定値を用いて実施される場合がある。この設計手法は、繊維質断熱材を厚めに設定する手法であり、熱防御システムを重めに設定する手法である。

本研究は、解析的手法による繊維質断熱材の最適厚さ設定や軽量化に資するため、先ず「定常法」で測定した繊維質断熱材の有効熱伝導率が、非定常温度環境下でも適用可能であることの確認を目的とした。また、非定常温度環境、大気圧および低圧下における繊維質断熱材の有効熱伝導の予測式を構築する必要がある。現在までに、大気圧環境下における繊維質断熱材の有効熱伝導率の予測式は明確化されているものの、低圧環境下におけるそれは十分に判っていない。したがって、本研究は、繊維質断熱材の有効熱伝導率の予測手法確立に資するため、低圧環境下において熱伝導挙動に強く影響を与える因子把握も目的とした。

2. 低圧下における繊維質断熱材の熱伝導特性

室温、大気圧下にあるガスの平均自由行程 ω は、繊維質断熱材の平均繊維間隔 L と比較して十分に小さい。この領域は、ガス分子が繊維質断熱材の繊維に衝突することなく、ガス分子同士が粘性を持った流体のように衝突し合う粘性流 (viscous flow) の領域である。

圧力の減少に伴って、ガスの平均自由行程が大きくなり、やがてその大きさは繊維質断熱材の空隙幅相当となる。この領域は、ガス分子同士の衝突確率がガス分子と繊維との衝突確率と比較して無視できるほど小さいクヌーセン流 (Knudsen flow) の領域である。

ガス平均自由行程 ω (m) は、(1) 式で与えられる¹⁾。

$$\omega = \frac{RT}{\sqrt{2} \pi N P d_g^2} \quad (1)$$

ここで、 R は普遍気体定数で 8.314 (J/mol/K)、 T は温度 (K) であり、 N はアボガドロ数で 6.02×10^{23} (1/mol)、 P は圧力 (Pa) であり d_g はガスの有効衝突直径 (m) である。本研究

では、空気の有効衝突直径として 3.65×10^{-10} (m) を用いた¹⁾。(1) 式より、空気の平均自由行程は、(2) 式で求めることができる。

$$\omega = \frac{2.05 \times 10^{-5} T}{P} \quad (2)$$

また、繊維質の繊維質断熱材の平均空隙幅 L (m) は(3) 式で求めることができる²⁾。

$$L = \sqrt{\frac{\pi \rho_{\text{fiber}} d_{\text{fiber}}^2}{\rho_{\text{ins}}}} \quad (3)$$

ここで、 ρ_{fiber} は繊維の真密度 (kg/m^3) であり、 ρ_{ins} は繊維質断熱材の嵩密度 (kg/m^3)、 d_{fiber} は繊維直径 (m) である。

宇宙往還機の繊維質断熱材として多用されているアルミナ・シリカ繊維の繊維質断熱材の特性を第1表に示す。

第1表の特性を(2)式に代入して求めた圧力と空気分子の平均自由行程との関係を第1図に示す。

また、第1表の特性を(3)式に代入して求めた断熱材の平均空隙幅は 3.4×10^{-5} (m) である。第1図より、約 10 (kPa) における空気分子の平均自由行程は平均空隙幅の約 2% 程度であり、この圧力付近から平均自由行程は空隙幅と比較して無視できない大きさとなる。空気分子の平均自由行程は、約 1 (kPa) で空隙幅の約 20%、約 200 (Pa) で空隙幅と同等となり、さらに約 100 (Pa) では約 2 倍となる。

3. 非定常加熱実験の装置、条件および供試体

粘性流領域とクヌーセン流領域の両領域における非定常温度環境下での熱伝導挙動を知することは、宇宙往還機の繊維質断熱材設計にとって重要である。

第1表に示したアルミナ・シリカ繊維質断熱材中の空気分子の流動は、大気圧下 (1×10^5 Pa) において粘性流であり、

第1表 アルミナ・シリカ繊維の繊維質断熱材の特性

Material		Alumina-Silica fiber
Material density ρ_{fiber}	kg/m^3	2900
Material diameter d_{fiber}	μm	4
Packing density ρ_{ins}	kg/m^3	130

第1図 繊維間距離、および平均自由行程の圧力依存性

第2図 酸化・揮散装置の概要

第3図 加熱実験供試体

第2表 酸化・揮散実験装置を用いた加熱実験条件

No.	Heating test condition				
	Gas	Pressure (Pa)	Surface heat flux (MW/m ²)	Side wall heat flux (MW/m ²)	Duration (sec)
1	Air	1×10^5	0.05	0.02	38
2	Air	1×10^5	0.05	0.02	142
3	Air	1×10^5	0.11	0.05	121
4	Air	100	0.05	0.02	24
5	Air	100	0.05	0.02	126
6	Air	100	0.11	0.05	113
7	Argon	1×10^5	0.05	0.02	36
8	Argon	1×10^5	0.05	0.02	120
9	Argon	1×10^5	0.11	0.05	123

100 (Pa)においてクヌーセン流である。本研究は、大気圧 (1×10^5 Pa) および 100 (Pa) の圧力下に置いたアルミナ・シリカ繊維質断熱材を非定常加熱し、その内部温度挙動を調べた。

3.1 加熱実験装置 加熱実験は、(株)超高温材料研究センター (Japan Ultra-High Temperature Materials Research Center, JUTEM) の酸化・揮散実験装置 (oxidation-sublimation testing machine)³⁾ に、供試体を設置し、最大出力 30 (kW) の太陽光に近いスペクトル分布を持つクセノン・ランプの均一光を、金メッキした回転楕円面ミラーで集光し、材料表面を非定常加熱した。この装置は、温度環境を室温から 2573 (K) の超高温まで、また雰囲気圧力を宇宙空間のような極低圧から大気圧まで調整可能で、かつ雰囲気ガスも通常空気、酸素分圧を変えた空気、さらに窒素やアルゴンなどの不活性ガスの使用も可能である。酸化・揮散実験装置の概要を第2図に示す。

3.2 非定常加熱実験条件 酸化・揮散実験装置を用いた加熱実験条件を第2表に示す。加熱実験条件は、大気圧下および低圧下における非定常的な多孔質系断熱材内部の温度変化を取得できるものである。また、雰囲気ガスと

して空気の他にアルゴンガスも用いた。大気圧、室温下における空気の熱伝導率は、アルゴンガスの約 1.5 倍であるため、両者の内部温度の変化を比較することで、繊維質断熱材中のガスによる熱伝導成分が有効熱伝導率に対してどの程度寄与しているかを明確にできる。

3.3 供試体とその3次元熱数学モデル 加熱実験に用いた供試体の概要を第3図に示す。第3図は、有限要素法で熱解析に使用した3次元熱数学モデル (表面要素分割図) である。供試体は、5層構造で、第1層 (加熱面)、第3層および第5層は 30 mm × 30 mm × 厚さ 3 mm の SiC 製薄板である。SiC は高温高圧下でホットプレス成形したホットプレス炭化珪素 (Hot-Pressed SiC) で、良好な機械的特性を有すると共に、急激な加熱に対する耐熱衝撃性にも優れている。この SiC の赤外線放射率は 0.85、太陽光吸収率は 0.9 である。第2層目と第4層目は、30 mm × 30 mm × 厚さ 30 mm の第1表の特性を持つアルミナ・シリカ繊維質の繊維質断熱材である。このアルミナ・シリカ繊維質断熱材の赤外線放射率は 0.85、太陽光吸収率は 0.95 である。第1層 SiC 薄板裏面と第2層断熱材表面との間 (熱電対 No. 1)、第2層断熱材の中心 (同 No. 2)、また、第4層断

第4図 アルミナ・シリカ繊維質断熱材の内部温度履歴 (実験条件: Air, 1×10^5 Pa)

第5図 アルミナ・シリカ繊維質断熱材の内部温度履歴 (実験条件: Air, 100 Pa)

第6図 アルミナ・シリカ繊維質断熱材の内部温度履歴 (実験条件: Argon, 1×10^5 Pa)

熱材裏面と第5層 SiC 薄板表面との間(同 No. 3)の計3カ所に $0.2 \text{ mm } \phi$ の K 型熱電対を挟み入れて温度測定した。熱電対 No. 1, 熱電対 No. 2 および熱電対 No. 3 の位置は、それぞれ第1層 SiC 表面の加熱中心から 3 mm, 20 mm (第2層断熱材表面から 17 mm), 66 mm の深さにある。

実験は、第1層目の SiC 薄板表面を酸化・揮散実験装置で加熱し、断熱材内部の温度上昇は前記3本の熱電対で計測した。第4層の断熱材と第5層の SiC 薄板は、供試体から外部への熱流出の抑制機能があり、その効果は熱電対 No. 3 の計測値から評価できる。熱電対 No. 1 および No. 2 の計測値から、第2層断熱材の温度時間履歴を知ることができる。

第2表の表面加熱率(surface heat flux) $q_{\text{sur}} (\text{W/m}^2)$ は、カロリーメータで測定したコールドウォール加熱率で、熱解析の境界条件である。供試体側面の加熱率 $q_{\text{sid}} (\text{W/m}^2)$ は、表面加熱率 q_{sur} 、供試体表面とクセノン・ランプとの形態係数 ϕ_1 と、側面とクセノン・ランプの形態係数 ϕ_2 との比から(4)式に従って求めた値である。形態係数比 ϕ_2/ϕ_1 は、約 0.4 である。

$$q_{\text{sid}} = q_{\text{sur}} (\phi_2/\phi_1) \quad (4)$$

4. 測定結果、解析結果と考察

4.1 測定結果 酸化・揮散実験装置で加熱した第2層断熱材内部の温度として熱電対 No. 2 の測定結果を第4図から第6図に示す。各条件間の測定値の比較を容易にするため、全ての測定した温度から初期温度を差し引いた。即ち、初期温度を 273 K (0°C) とした。

4.2 解析結果と考察 熱解析は、供試体(第3図)と周囲環境との熱交換を模擬できる3次元熱数学モデルを用いて実施した。熱解析の目的は、第4図から第6図の内部温度の時間履歴に一致するアルミナ・シリカ繊維質断熱材の有効熱伝導率を同定することで、熱解析には ANSYS を用いた。熱解析の変数は、温度依存性を持った有効熱伝導率である。熱解析は、アルミナ・シリカ繊維質断熱材内の測定値(熱電対 No. 2)と解析値とが一致するまで、ANSYS に入力する有効熱伝導率を変更し、熱解析を繰り返した。測定値と解析値が一致した場合、ANSYS に入力した有効熱伝導率をアルミナ・シリカ繊維質断熱材の有効熱伝導率に同定した。

条件1から9における熱電対 No. 1 および No. 2 の測定値と解析値との比較を第3表に示す。解析値は、同定した有効熱伝導率を用いたものである。

第4図から第6図、第3表より、解析値は測定値に良く一致することが判る。

大村らは、繊維の配向方向が断熱材の厚さ方向と面内方向とが異なる繊維質断熱材の大気圧下における有効熱伝導率や比熱容量について詳細な研究を実施している。大村らは、アルミナ・シリカ繊維質の繊維質断熱材の大気圧下における有効熱伝導率 $\lambda_{\text{eff}} (\text{W/m/K})$ を(5)式⁴⁾で、また温度 T_1 と $T_2 (T_1 > T_2)$ との間の真比熱 $C_{\text{st}} (\text{kJ/kg/K})$ が(6)式⁵⁾で与え

第3表 アルミナ・シリカ繊維質断熱材内部温度の測定値と解析値との比較

No.	Temperature at Heating end			
	Measured value		Calculated value	
	Thermo couple No.		Thermo couple No.	
	No.1 (K)	No.2 (K)	No.1 (K)	No.2 (K)
1	561	337	555	340
2	877	629	883	619
3	1108	835	1113	831
4	468	329	473	325
5	925	641	932	630
6	1131	803	1126	807
7	546	345	548	346
8	893	637	921	627
9	1132	843	1128	842

られることを明確にした。

$$\lambda_{\text{eff}} = 3.1 \times 10^{-5} \rho_{\text{ins}} + \frac{1.65 \times 10^{-8}}{\rho_{\text{ins}}} T^3 + \lambda_g \quad (5)$$

$$C_{\text{st}} = -8.75 \times 10^{-2} + 1.57 \times 10^{-1} \ln(T_1) + 1.57 \times 10^{-1} \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (6)$$

ここで、 λ_g は、断熱材中のガス伝熱成分(W/m/K)である。熱解析を行うにあたり、アルミナ・シリカ繊維質断熱材の嵩密度は130(kg/m³)、比熱容量は(6)式に従った。(5)式の右辺の第1項は繊維の熱伝導成分を、第2項は放射伝導成分を、第3項はガスの熱伝導成分を示す。繊維質断熱材の内部では、対流による伝熱が発生する可能性がある。ただし、アルミナ・シリカ繊維質断熱材は、修正レイリー数が臨界値以下であるため、対流伝熱は発生しない⁴⁾。大村らは、大気圧・空気雰囲気において、(5)式で予測した有効熱伝導率が計測値に良く一致することを確認している。ただし、(5)式は圧力依存性を考慮していないため、圧力が変化する再突入環境における有効熱伝導率の予測に使用することはできない。

繊維質断熱材中のガスの熱伝導成分 λ_g は、(7)式に従って求められることが知られている⁶⁾。

$$\lambda_g = \lambda_g(T) \left[\frac{L}{L + \omega} \right] \quad (7)$$

ここで、 $\lambda_g(T)$ は温度依存性のあるガスの熱伝導率(W/m/K)である。本研究では、温度依存性の大気圧下(1×10⁵ Pa)における空気とアルゴンの熱伝導率⁷⁾を用いた。

粘性流領域の空気の平均自由行程 ω は、平均空隙幅 L と比較して十分に小さいので、空気分子の熱伝導率は $\lambda_g \approx \lambda_g(T)$ となる。

(7)式を(5)式に代入したアルミナ・シリカ繊維質断熱材の有効熱伝導率の予測式を(8)式に示す。

$$\lambda_{\text{eff}} = 3.1 \times 10^{-5} \rho_{\text{ins}} + \frac{1.65 \times 10^{-8}}{\rho_{\text{ins}}} T^3 + \lambda_g(T) \left[\frac{L}{L + \omega} \right] \quad (8)$$

(8)式を用いて、第1表の各実験条件におけるアルミナ・シリカ繊維質断熱材の有効熱伝導率を予測した。予測結果を第7図から第9図に示す。第7図から第9図には、3次元熱解析で同定した有効熱伝導率も示す。これらの図から、実験条件1と2、実験条件4と5、また実験条件7と8は、加熱時間以外の実験条件が同じであるにも関わらず、同定した有効熱伝導率に差が生じていることが判る。この差は、約400(K)で0.01(W/m/K)以下である。この差は、供試体内部温度の測定精度、また熱解析による温度予測精度などを高めることによってさらに小さくすることが可能と考えられ、今後の課題である。

(8)式で予測した有効熱伝導率 λ_{eff} と、3次元熱解析で同定した有効熱伝導率 λ'_{eff} との関係を(9)式に示す。

$$\lambda'_{\text{eff}} = \zeta \lambda_{\text{eff}} \quad (9)$$

ここで、 ζ は λ_{eff} と λ'_{eff} との比で、第4表に示す。

第7図から第9図、第4表より、大気圧下(1×10⁵ Pa)における空気雰囲気中、アルゴン雰囲気中での λ_{eff} と λ'_{eff} は概ね一致することが判る。しかし、空気雰囲気、100 Paにおける λ_{eff} と λ'_{eff} とはあまり一致しておらず、この傾向は繊維とガスによる伝熱が支配的となる低温領域が顕著である。繊維の伝熱成分が圧力に依存しない傾向があることから、 λ_{eff} と λ'_{eff} とを一致させるためには、(8)式の右辺第3項(λ_g 項)に修正を加える必要があると理解できる。

そこで、式(8)の右辺第3項を式(10)のように見直した。

$$\lambda_g = \lambda_g(T) \left[\frac{L}{L + \omega} \right] f_g(P) \quad (10)$$

ここで、 $f_g(P)$ は、ガス伝熱成分を補正する係数(gas conduction correction factor)で、圧力依存性がある。(10)式を(5)式に代入して求めたアルミナ・シリカ繊維質断熱材の有効熱伝導率推算式を(11)式に示す。(11)式の $f_g(P)$ が1.0の場合、(8)式と(11)式の予測値は同じ値になる。

$$\lambda_{\text{eff}} = 3.1 \times 10^{-5} \rho_{\text{ins}} + \frac{1.65 \times 10^{-8}}{\rho_{\text{ins}}} T^3 + \lambda_g(T) \left[\frac{L}{L + \omega} \right] f_g(P) \quad (11)$$

(11)式を用いて予測した有効熱伝導率を第7図から第9図に示す。第8図より、 $f_g(P)$ を1.5として(11)式で予測した空気雰囲気、100 Paの有効熱伝導率は、熱解析で同定した有効熱伝導率に比較的良く一致することが判る。

第7図 アルミナ・シリカ繊維質断熱材・有効熱伝導率の(8)式を用いた予測値と3次元熱解析による同定値との比較(条件1, 条件2および条件3)

第8図 アルミナ・シリカ繊維質断熱材・有効熱伝導率の(8)式を用いた予測値と3次元熱解析による同定値との比較(条件4, 条件5および条件6)

第9図 アルミナ・シリカ繊維質断熱材・有効熱伝導率の(8)式を用いた予測値と3次元熱解析による同定値との比較(条件7, 条件8および条件9)

第4表 アルミナ・シリカ繊維質断熱材・有効熱伝導率の(8)式を用いた予測値と3次元熱解析による同定値との比較(条件1から条件9)

Condition	Gas	Pressure	ζ
		(Pa)	
1	Air	1×10^5	0.75
2	Air	1×10^5	1.00
3	Air	1×10^5	1.00
4	Air	100	2.20
5	Air	100	1.60
6	Air	100	1.40
7	Argon	1×10^5	1.10
8	Argon	1×10^5	1.25
9	Argon	1×10^5	1.10

5. 結 言

今回の研究により、以下が判った。

1. 空気ならびにアルゴン雰囲気、大気圧下におけるアルミナ・シリカ繊維質断熱材の非定常的な内部温度の時間履歴は、(8)式、および $f_g(P)$ を1.0として(11)式で予測した有効熱伝導率に基づく熱解析値に良く一致した。ただし、今後、実験条件1と2、実験条件4と5、また実験条件7と8の有効熱伝導率の同定値差を小さくするため、供試体内部温度の測定精度、また熱解析による温度予測精度などをさらに高めなければならない。
2. 上項より、粘性流領域(1×10^5 Pa)におけるアルミナ・シリカ繊維質物の有効熱伝導率予測に、(8)式および $f_g(P)$ を1.0とした(11)式が使用可能と考えられる。(8)式は定常法で測定したアルミナ・シリカ繊維質断熱材の有効熱伝導率測定値に基づくものである。粘性流領域(1×10^5 Pa)において、定常法で測定したアルミナ・

シリカ繊維質断熱材の有効熱伝導率は、非定常温度環境下における内部温度の予測解析に適用できる。

3. また、減圧下(100 Pa)、空気雰囲気におけるアルミナ・シリカ繊維質断熱材の非定常的な内部温度の時間履歴は、 $f_g(P)$ を1.5として(11)式で予測した有効熱伝導率に基づく熱解析値に比較的良く一致した。
4. これにより、クヌーセン流領域(100 Pa)におけるアルミナ・シリカ繊維質断熱材の有効熱伝導率の予測に $f_g(P)$ を1.5として(11)式が適用可能と考えられる。
5. 今回の研究により、アルミナ・シリカ繊維質断熱材の有効熱伝導率の圧力依存特性に大きく影響を与える因子の一つが $f_g(P)$ であることが判った。今後、熱防御システムの薄肉化や軽量化に資するため、アルミナ・シリカ繊維質断熱材の $f_g(P)$ の圧力依存特性を明確にするための研究を継続する必要がある。

本研究の実施にあたり、ニチアス株式会社の大村高弘博士に有益なご指導を頂いた。また、株式会社超高温材料研究センターの方々、特に山田実氏に多大なご支援を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 航空宇宙工学便覧，丸善，東京，1992，p. 13.
- 2) 大村高弘，坪井幹憲：周期加熱法による熱伝導率測定，熱物性，**13**，4（1994），pp. 264-268.
- 3) <http://www.c-5.ne.jp/~jutem-co/index2.html>
- 4) 大村高弘，坪井幹憲，小野寺正剛，富村寿夫：繊維質断熱材の有効熱伝導率に関する研究，九州大学機能物質科学研究所報告，Vol. 16，2002，pp. 13-17.
- 5) 大村高弘，坪井幹憲，富村寿夫：投下法による高温材料の比熱測定技術の開発と各種断熱材の比熱測定，熱物性，**17**，1（2003），pp. 9-17.
- 6) Stewart, D. A. and Leiser, D. B.: Characterization of the Thermal Conductivity for Fibrous Refractory Composite Insulations, Ceramic Insulations, Ceramic Engineering Science Proceedings, Vol. 6, No. 7-8, 1985, pp. 769-792.
- 7) 熱物性ハンドブック，養賢堂，東京，1990，pp. 42-93.