

フォトサーマル赤外検知法による高温遮熱皮膜(TBC)及び傾斜機能材料(FGM)の熱物性値測定

80122134 佐野彰彦 指導教員 長坂雄次

1. 緒言

遮熱皮膜(TBC: Thermal Barrier Coatings)や傾斜機能材料(FGM: Functionally Graded Materials)は、ガスタービン翼や燃焼器等の高温にさらされ、かつ高い熱応力を受ける部材において利用が進められている。これらの材料は、高温環境下での連続使用による経年劣化も報告されている。従って、使用条件下における熱物性値の変化を知ることは、その設計や寿命予測において重要となる。また、TBC や FGM の性能劣化による遮熱効果の定量的な評価手段はなく、定期点検での目視検査が主である。そのため、定量的な非破壊検査の開発が期待されている。本研究では、非接触・非破壊で測定可能なフォトサーマル赤外検知法を室温から 1273K において TBC, FGM の熱物性値測定に適用し、検討を行った。

2. 測定原理

フォトサーマル赤外検知法では、強度を正弦波変調したレーザーで試料表面を加熱する。すると、試料表面の温度は変調周波数と同じ周波数で変化し、その周期は加熱光源に対し、ある位相遅れを伴う。この位相遅れを、ある変調周波数範囲で測定して得られる周波数 - 位相遅れ曲線について逆問題を解析することで、試料内部の熱伝導率、温度伝導率を独立に求めることが原理的に可能である。本測定法の特徴として、試料表面の温度変化を赤外放射の強度変化として検知している為、試料に対して非接触で測定ができること、また変調周波数に応じて熱拡散長を変化させることが可能なため、試料内部の熱物性値を非破壊で求められることである。

試料表面上の温度変化の位相遅れ $\Delta\phi$ は以下のように表わされる。

$$\Delta\phi = F(f : a_s, \lambda_s, l_s, \beta_s) \quad (1)$$

a_s : thermal diffusivity of sample, m^2/s

λ_s : thermal conductivity of sample, $W/m/K$

l_s : thickness of sample, m

β_s : absorption coefficient, m^{-1}

3. 測定装置

Figure 1 に本研究の実験装置図を示す。試料表面を加熱するための光源には、波長 810nm、ファイバー端で最大出力 30W の半導体レーザーを用いている。レーザー光は試料全面に照射され、試料表面の温度変化を 2 枚の ZnSe 平凸レンズで集光し赤外検出器で測定している。信号はプリアンプを介し電気信号に変換され、ファンクションジェネレーターからの変調信号と共にロックインアンプに入力され、位相差を検出している。また、試料を任意の温度に加熱するため、最高 1273K 程度まで加熱可能な赤外線ゴールドイメージ炉を設置している。試料は空気中にあり、SUS304 製の試料ホルダーにのせ、炉の中心に位置するように 2 本の SUS304 製の棒により支えられている。試料の前後には SUS304 製のラディエーションシールドが各 4 枚ずつ設置してあり、試料温度をできるだけ一定に保つようにしている。試料の温度は、試料基板裏面の R 熱電対により測定している。

4. 測定試料

今回測定したのは、Round Robin FGM 試料(PSZ(安定化 ZrO₂)/ NiCrAlY: 同一 sample を異なる方法で測定し、標準値

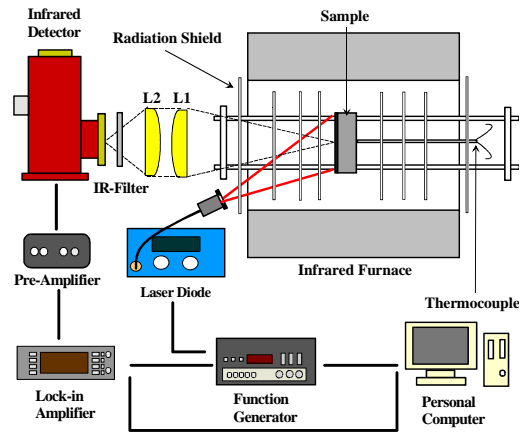


Figure 1 Experimental system.

Table 1 Specification of FGM samples.

Sample number	FGM				
	No.1	No.2	No.3	No.4	
Component	PSZ / NiCrAlY (wt%)	100/0	80/20	20/80	0/100
Thickness	400 μm				
Production process	Spark plasma sintering				

Table 2 Specification of TBC samples.

Sample number	TBC	
	No.5	No.6
Component	PSZ	NiCrAlY
Thickness	150 μm	130 μm
Production process	Plasma spray	

を得る。静岡大学、産業技術総合研究所、航空宇宙技術研究所、慶応大学にて測定。)の各成分の単層試料と、TBC の Top coating-PSZ(安定化 ZrO₂)と Bond coating-NiCrAlY の単層試料を測定した。Table 1, 2 にそれぞれの成分等を示す。

5. 3 次元熱伝導の影響緩和

5-1. 加熱径の拡大

フォトサーマル赤外検知法の理論では、熱の移動は光軸と同じ 1 次元方向のみと仮定している。そのため熱拡散長の大きくなる低周波領域でこの仮定が崩れ、3 次元熱伝導の影響が信号に表れていた。1 次元性を確保するための解決策としては、試料全面をできるだけ均一に加熱することが挙げられる。そこで、従来の測定では最大 600mW の半導体レーザーを用いて 2mm 程度であった加熱径を試料径である 30mm 程度まで広げても信号強度を確保できる最大出力 30W の半導体レーザーを導入し、3 次元熱伝導の影響緩和を図った。

5-2. Glassy Carbon の測定

温度伝導率標準物質候補の Glassy Carbon(10mm x 30mm, 厚み 750 μm)を加熱径 15mm(30W レーザー)と従来の加熱径 2mm(600mW レーザー)において室温で測定を行い、1 次元性

を確保できているか比較した。加熱径 15mm では 5 回測定を行った。Figure 2 にその測定結果の 1 例を示す。Figure 2 において、加熱径 15mm による位相遅れ曲線は、推奨値を用いて描かせた 1 次元理論曲線に近づいている。0.5Hz 以下では、理論曲線よりも位相遅れ曲線が低下しており全周波数領域では完全に 1 次元性を確保できなかったが、その効果は確認できた。また、結果を解析し推奨値と比較したところ、加熱径 2mm の時は偏差が温度伝導率 23%、熱伝導率 42%であったのに対し、加熱径 15mm の時は温度伝導率 7.7~9.7%、熱伝導率 5.5~7.9%となり、3 次元性の影響を大幅に取り除くことができた。

測定における精度を評価するために、位相差曲線での周波数方向および位相差方向の誤差要因を検討した。その結果、周波数方向は $\pm 3\%$ 、位相差方向は Glassy Carbon の 5 回の測定により $\pm 0.29^\circ$ とした。位相差曲線を周波数方向と位相差方向に変化させ、再度解析を行った結果、測定精度は温度伝導率 $\pm 5\%$ 、熱伝導率 $\pm 8\%$ と見積もられた。

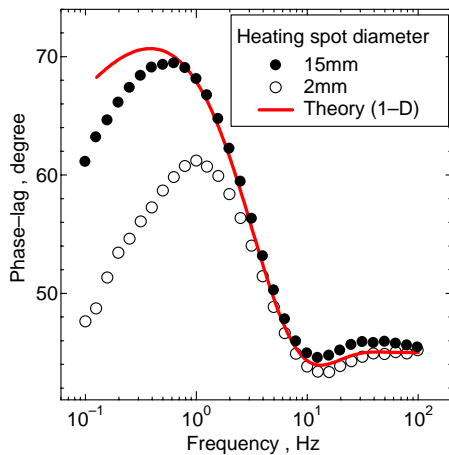


Figure 2 Frequency vs. phase-lag data of glassy carbon.

6. 測定結果及び検討

6.1 測定結果

FGM の単層試料 4 種類(No.1~No.4)と TBC の単層試料 2 種類(No.5, No.6)を室温から 1273K まで測定を行った。Figure 3 に FGM(No.1~No.4)の室温における温度伝導率を、同試料をレーザーフラッシュ法で測定している産業技術総合研究所(馬場)、航空宇宙技術研究所(吉田)の結果と比較した。また、高温の予備的測定として、Figure 4 に FGM (No.1~No.4)の温度伝導率の温度依存結果および、Figure 5 に TBC (No.5, No.6)の温度伝導率の温度依存結果を示す。

6.2 測定結果の検討

Figure 3 を見ると、NiCrAlY の成分が増えるに従い、温度伝導率の値も大きくなる結果が得られた。吉田と馬場ら(レーザーフラッシュ法)の結果は、5~17%程度で一致している。それに対し、本測定の温度伝導率の結果は、No.1: 22%、No.2: 5%、No.3: 14%、No.4: 15%、で吉田の結果と一致した。

Figure 4, 5 に示したように、フォトサーマル赤外検知法を用いて、FGM, TBC とともに 1273K の高温まで信号を検知することができた。熱物性値の温度依存性は PSZ 成分が多いほど減少傾向となり、NiCrAlY 成分が多いほど増加傾向となった。しかし、1273K において値が大きく減少するなど問題もあり、さらなる高温測定に向け、試料温度の安定性を向上させる等の装置の改善が今後の課題である。

7. 結言

- ✓ 加熱径を拡大することで、3 次元性の影響を大幅に取り除くことに成功した。

- ✓ Glassy Carbon を室温で測定した結果、推奨値との偏差が温度伝導率で 9.7%、熱伝導率で 7.9%となった。
- ✓ Round Robin FGM の測定結果を室温において比較した。レーザーフラッシュ法の結果と温度伝導率、熱伝導率とも 5~22%程度で一致した。
- ✓ FGM, TBC とともに室温~1273K まで予備的測定を行い、信号を検知し、熱物性値の温度依存性を確認することができた。

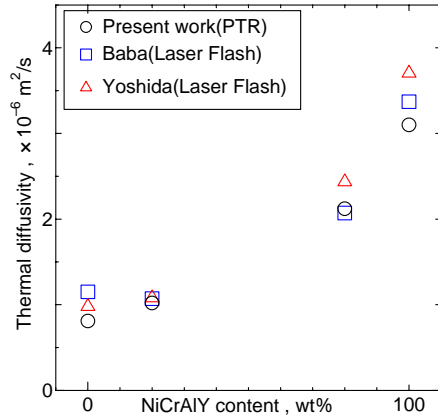


Figure 3 Thermal diffusivity of FGM (PSZ / NiCrAlY) at 300K.

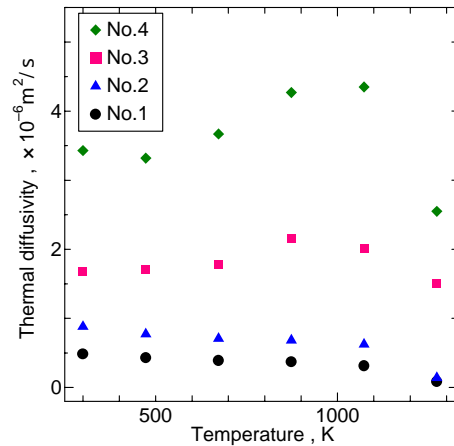


Figure 4 Temperature dependence of thermal diffusivity of FGM (PSZ/NiCrAlY).

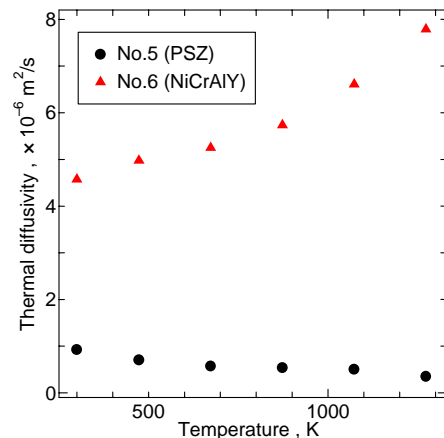


Figure 5 Temperature dependence of thermal diffusivity of TBC.