

試料移動法による高温放射率の測定*

佐野政明*¹, 石田清道*¹, 三保和之*²,
濱村修*³, 小林諭*³

Measurement of high temperature emissivity using the moving specimen method

SANO Masaaki *¹, ISHIDA Kiyomichi *¹, MIHO Kazuyuki *²,
HAMAMURA Osamu *³, KOBAYASHI Satoshi *³

Abstract

In this paper we propose a new technique for the measurement of high temperature emissivity. The method employed here is based on the moving specimen method, and the new technique applied to graphite specimens in several states of surface roughness. We observed that emissivity depends on the roughness of the surface and is influenced by the time constant of the emissivity sensor.

Keywords: emissivity, high temperature, measurement

概要

空気加熱等によって高温になる構造物の設計に不可欠な熱物性値の一つである放射率を、試料移動法によって測定する方法を確立した。

計測値の補正法を明確にし、高中低の3領域の値を評価できる事を示した。

1. まえがき

当所と宇宙開発事業団は、宇宙往還技術試験機(HOPEと略称する)の共同開発を行っている¹⁾。

HOPEは、大気への再突入時に、空力加熱を受けるため耐熱構造開発の一環として、試料移動式の放射率測定装置^{2), 3)}を導入し、種々の試料を用いて放射率の測定^{4), 5)}を行った。

本報告は、測定装置の特性を明らかにし、十分信頼できる測定法を提案した。

本測定は、科学技術庁科学技術振興調整費知的基盤整備の一環として、工業技術院計量研究所を中核として行

われた「機能材料の熱物性値計測技術と標準物質に関する研究」の中の「高温放射率の測定法の開発」の一部として実施された。

2. 測定原理

試料移動法は、直径の数倍程度以上の深さを持った円筒型をした黒鉛製の炉(以後円筒炉と言う)の中に試料を入れ加熱すると、円筒炉壁と試料の間で輻射と反射を繰り返し試料が黒体状態に近づくが、その状態の赤外エネルギーと試料を円筒炉の出口まで瞬時に移動したときの赤外エネルギーとの比から放射率を測定する方法である。

* 平成12年9月11日受付 (received 11 September 2000)

*¹ 航空宇宙技術研究所

*² 宇宙開発事業団

*³ (株) A. E. S

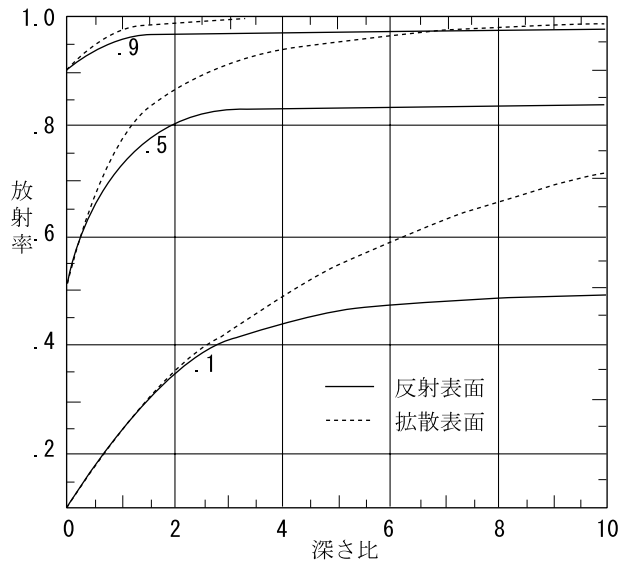


図1 円筒炉内の放射率

円筒炉深さを円筒炉半径で除した値（以後、深さ比と言う）と、見かけの放射率の関係は図1の様に説明されている⁶⁾。図1によれば見かけの放射率は、円筒炉の深さ比が大きき拡散が大きき程、黒体状態に近づき正しい放射率の値が測定出来る事が解る。しかし、本測定に用いた装置は、深さ比がほぼ10程度であり、また、測定物の全てが高い放射率を持っていて、拡散特性が良いと予想される材料でもないため、円筒炉内の試料が黒体状態とは言い難い場合もあり、正確に見かけの放射率を算定しないと測定精度が低下する。

今、ある温度において黒体状態にある物体の赤外エネルギーを E_b 、円筒炉中央における試料の赤外エネルギーを E_c とすると、円筒炉内の見かけの放射率は、 E_c / E_b で示す事が出来る。次に、円筒炉出口での赤外エネルギーを E_o とすると、円筒炉内と出口にある試料の赤外エネルギーの比は、 E_o / E_c であるから、放射率 ε は、

$$\varepsilon = \frac{E_c \cdot E_o}{E_b \cdot E_c}$$

で示される。

黒体状態を現実に作り出すのは困難であるため、本試験では、放射率 = 0.99 が保証された黒体炉を用いて E_b を求めた。

3. 試料

試料は、黒鉛（米国ピュアオイルカンパニー社製黒鉛 POCO - 10 相当）で製作した。表面加工は、

A) 機械加工（機械加工後は、無研磨）

B) 鏡面加工（機械加工後、2000番のエメリー紙で水研ぎ研磨）

とした。それぞれの表面粗さを図2、図3に示す。

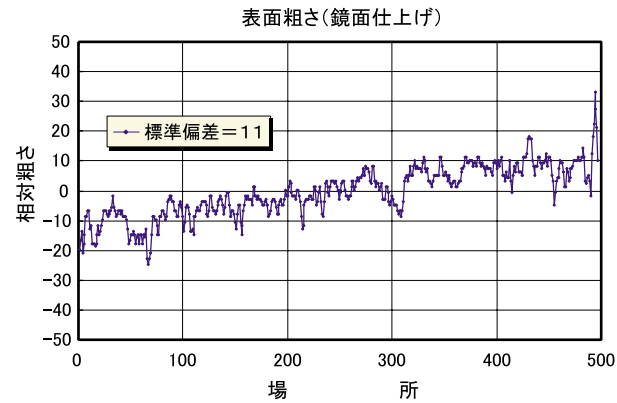


図2 鏡面仕上げ表面粗さ

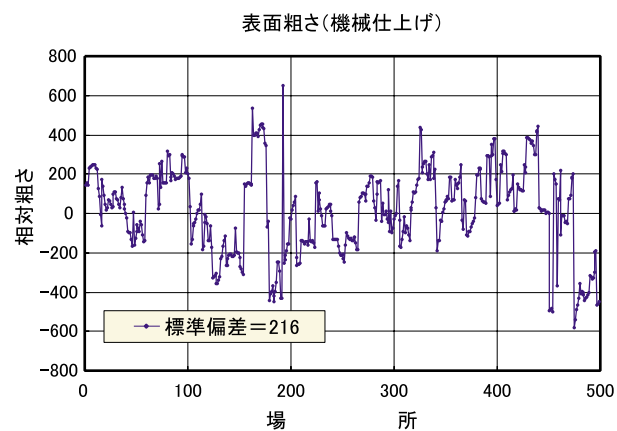


図3 機械仕上げ表面粗さ

両図より明らかなように、表面粗さは、標準偏差で約20倍程度異なる。以後、機械加工供試体をA試料、鏡面加工供試体をB試料と言う。

4. 円筒炉

円筒炉内の内壁の温度分布を図4に示す。図の縦軸は、設定温度で無次元化した温度で、横軸は、深さ比である。

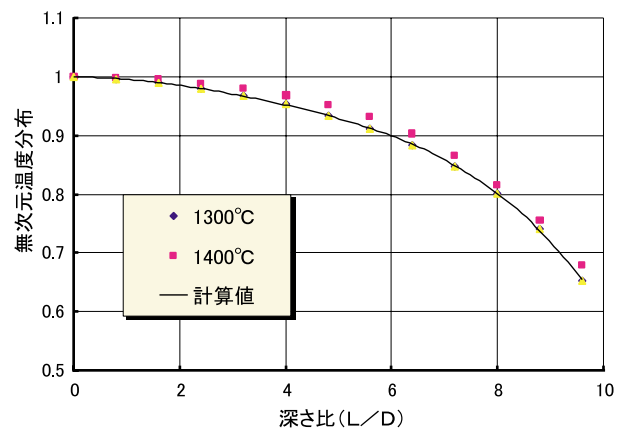


図4 円筒炉温度分布

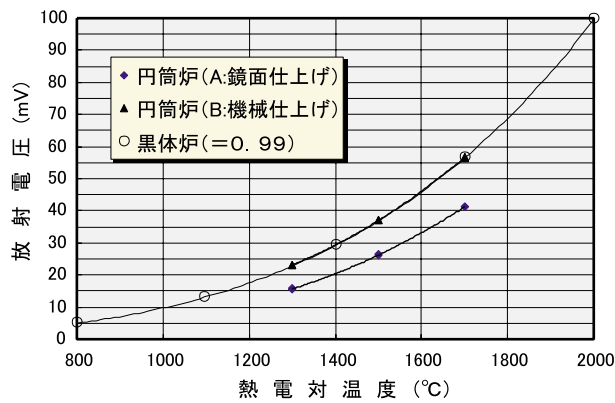


図5 表面仕上粗と放射電圧

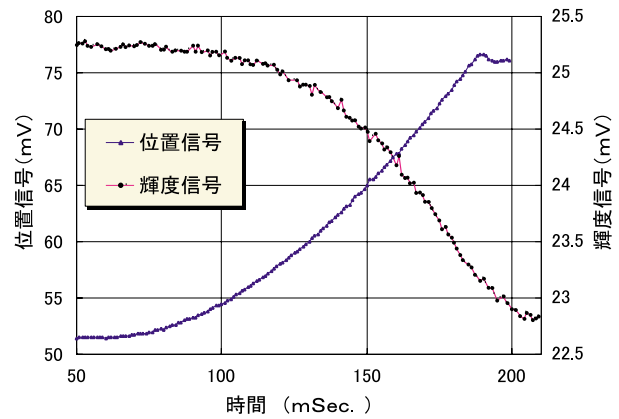


図7 試料位置と輝度電圧

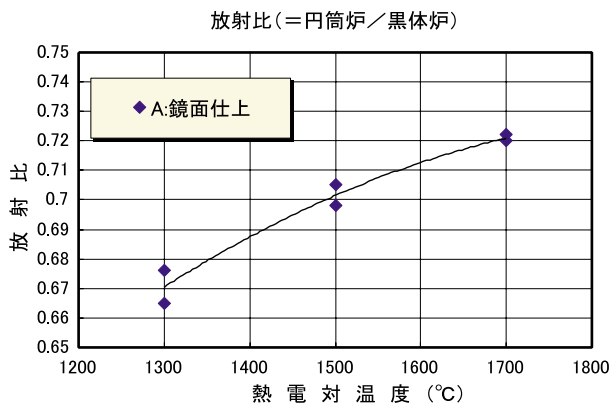


図6 円筒炉の黒体度

表1 放射率の測定値

温度 (°C)	A 試料	B 試料
1,300	0.908	0.97
1,300	0.907	0.97
1,500	0.905	0.96
1,500	0.905	0.96
1,700	0.905	0.95
1,700	0.905	0.95

円筒炉は、理論通りの温度分布をしており、試料は、正確に加熱されている。次に、A、B両試料を装置に入れ、所定の温度に設定した後、赤外エネルギーの測定 (E_c :電圧で表示)を行い、黒体炉の赤外エネルギー (E_b)との比較をした結果を図5に示す。

図からA試料の赤外エネルギー測定値は、黒体炉のそれに一致し ($E_b = E_c$)、円筒炉内でA試料は、黒体状態であることが解るが、B試料は、黒体状態に到達して居ない ($E_b \neq E_c$) ことが明らかになった。図5から円筒炉内にあるB試料の見かけの放射率 ($= E_c / E_b$)は図6の様になる。この値が式(1)の第1項を表している。

以上から、円筒炉内にあるB試料の見かけの放射率は温度によっても、また、表面状態によっても異なる事が明らかになった。

5. 放射率の測定

式(1)の第2項の測定は、図7に測定例を示すように、円筒炉内の所定の位置における試料の赤外エネルギーの比から計算される。

即ち、位置信号電圧(右上がり線)が水平時の赤外エ

ネルギー電圧 (E_c) の平均値で、位置信号電圧が最大になった点の赤外エネルギー電圧 (E_o) を除して第2項を求める。

この (E_o / E_c) が式(1)の第二項の値である。

A、B試料の測定値を表1に示す。

式(1)からA、B両試料の放射率を求め表2及び図8に示す。

図8から放射率の測定値は物質固有の熱物性値と言うより、表面状態によって変化する値として計測されることがわかる。従って、放射率の比較は、何らかの値で表面状態を一致させないと、意味を成さないし、実使用環境状態で計測しないと正確な設計は出来ない。

次に、測定雰囲気ガスを窒素からアルゴンに変えた場合は図9に示す様に計測された。特段に、雰囲気ガスの影響が有るとも言えない。また、白金の放射率は図10の丸印で示す測定値が得られた。白金試料の表面状態は、鑄肌のままであって、鏡面仕上げした試料の0.11程度の値より相当大きな値が測定された。

また、赤外センサーの時定数は、8 mSecであるので、これを補正すると角印の値になり、射出中の赤外エネルギー変化が大きい場合は、測定値に時定数の影響が強くなる。

表2 補正後の放射率

温度 (°C)	A 試料	B 試料
1,300	0.908	0.646
1,300	0.907	0.646
1,500	0.905	0.64
1,500	0.905	0.64
1,700	0.905	0.665
1,700	0.905	0.671

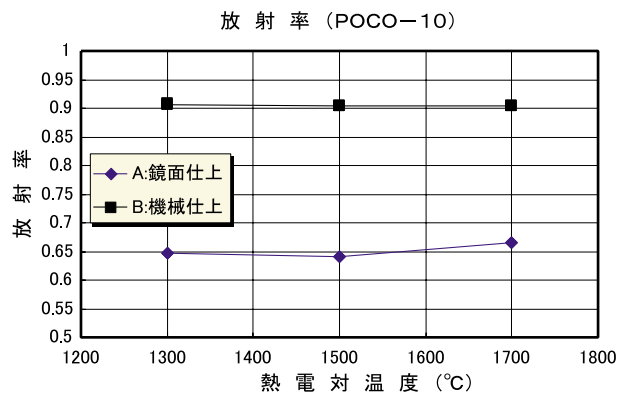


図8 放射率

6. あとがき

試料移動法による放射率の測定技術開発を行い、正確な放射率の測定が可能になった。まとめると、

- (1) 射出前の試料の黒体度を正確に算定できた。
- (2) 放射率は、試料の表面状態に依存する。
- (3) 放射率は、センサー時定数に影響を受ける。

となった。

また、放射率を測定する場合に気づいた点を以下に箇条書きする。

- (1) 赤外エネルギー測定センサーは、経年変化が出る場合があり、定期的に検定する必要がある。
現在の検定温度間隔は、300°Cであるが、測定頻度の高い温度帯では、50°C程度の検定間隔が望ましい。
- (2) 赤外センサーの出力を、検定を受けた黒体炉で基準化していない場合は、機械加工したままの黒鉛試料の赤外エネルギー測定値を、簡易の黒体出力としても大きな誤差は生じない。
- (3) 試料温度の測定は、W型の熱電対を使用すると、赤外線温度計との整合性が良い。
- (4) 試料の移動時間は、130mSec以下で有ること。これ以上の時間では、試料の温度低下が顕著になる。従って、極端に熱容量の小さい物質は、測定時間を早める必要がある。
- (5) 最高の鏡面状態が、最小の放射率となる。

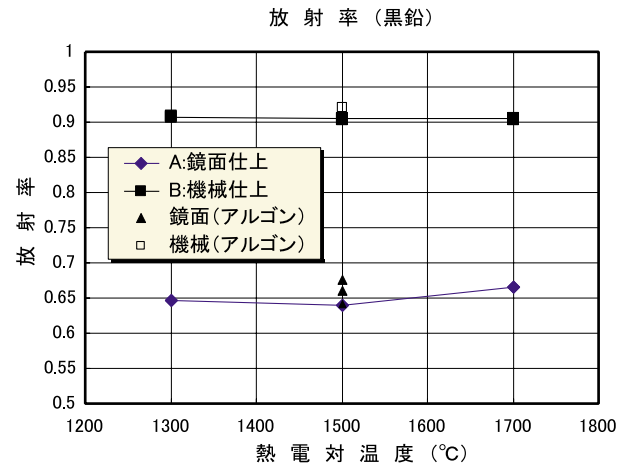


図9 雰囲気の影響

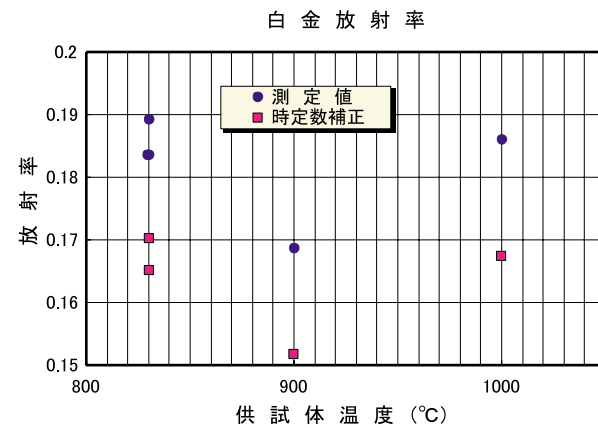


図10 白金の放射率

謝辞

本試験を行うに辺り、計量研究所の小野熱物性部長、京都大学の牧野教授を始め多くの方に有益な助言、指導を戴きました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) NAL/NASDA HOPE研究共同チーム 航空宇宙技術研究所特別資料 SP-23, 「宇宙往還技術試験機の基本構想」1994年2月
- 2) 渡辺泰夫, 松崎貴至, 板垣春昭, 弓立浩三, 芳仲敏成, 瀧口知義, 庄田幸夫, 長谷川清一, 日本航空宇宙学会誌 第42巻第482号, 「アーク風洞の改修と放射率計測」, 1994年3月, PP141~149
- 3) 石田清道, 佐野政明, 松崎貴史, 三保和之, 濱村修 航空宇宙技術研究所資料 TM-715 「高温放射率計測装置の構造と性能」, 1997年7月
- 4) 渡辺泰夫, 石田清道, 佐野政明 日本航空宇宙学会誌 第44巻第511号, 「耐熱タイル表面黒色コーテ

- ィングの放射率」1996年8月, PP495～497
- 5) 石田清道, 佐野政明, 濱村 修, 柵山英明 航空宇宙技術研究所報告 TR-1320, 「耐熱タイル表面黒色コーティングの放射率計測」1997年2月
- 6) R. Siegal, J. R. Howell, 「Thermal radiation heat transfer」, McGraw-Hill, 1972
- 7) Richmond, J. C., Dewitt, D.P., et al, NBS Technical Note No.252, 1969