

高温放射率計測装置の構造と性能*

石田清道^{*1}、佐野政明^{*2}
松崎貴至^{*1}、三保和之^{*3}
濱村修^{*4}

Construction and Performance of an Emissivity Measurement System for High Temperature Materials

Kiyomichi ISHIDA^{*1}、Masaaki SANO^{*2}
Takashi MATUZAKI^{*1}、Kazuyuki MIHO^{*3}
Osamu HAMAMURA^{*4}

Abstract

Emissivity is one of the most important parameters necessary for the evaluation of high temperature behavior of refractory materials used in aerospace applications. An emissivity measuring apparatus (emissimeter) has been introduced for the development and testing of thermal protection system (TPS) materials. It can determine the emissivity under very high - temperature condition up to 2773K. Built in data reduction procedures were examined and a correction method was consequently necessitated in order to obtain valid results, thus it was devised. Analysis based on this method showed reasonable result on a graphite specimen.

In this paper, an outline of the apparatus and measurement principle are given first and a series of verification work mentioned above is described.

Keywords: Design, Testing, Heat Transfer, HOPE, Emittance

概要

宇宙往還機等の耐熱材料評価試験において表面温度の評定や内部への入熱量の推定を精度よく行うためには、高温での放射率を正確に知ることが極めて重要である。この放射率を試料移動法により試験温度範囲 1073K から 2773K まで計測する高温放射率計測装置が平成 5 年に導入された。本装置により求められた放射率の値は、供試体の材質によっては装置の特性により、必ずしも満足した結果が得られないため補正が必要となった。そこで計測結果の精度向上を図るため、供試体に熱電対を埋め込みその計測値から放射率を算出する補正方法を考案した。その結果、比較的放射率の高い材料においてはほぼ妥当な値が求められ、放射率計測試験結果の精度向上の見通しが得られた。本報告は、装置の計測原理、装置構造の詳細な説明、データ補正方法及び解析結果等について述べる。

* 平成 9 年 4 月 2 日 受付 (received 2 April 1997)

* 1 空気力学部 (Aerodynamics Division)

* 2 構造力学部 (Structural Mechanics Division)

* 3 宇宙開発事業団 (National Space Development Agency of Japan)

* 4 (株) エイ・イー・エス (Advanced Engineering Services)

1. まえがき

HOPE(H- Orbiting Plane:H- ロケット打上げ型無人有翼往還機)等の宇宙往還機用熱防御材料においては、熱放射が主要な熱放出の機構であり、再突入飛行経路の設定やアーク加熱風洞等での耐熱材料評価試験において、表面温度の評定や内部への入熱量の推定を精度よく行うためには、耐熱材料の高温での放射率を正確に知ることがきわめて重要である。アメリカにおいては、宇宙開発の始まった1960年代よりこの分野の研究がNASA(National Aeronautics and Space Administration)の主導により活発に促進され、多くの成果が得られた(文献1 - Chap. 3の参考文献リスト参照)。我が国においても、HOPE開発の進展に伴い国産TPS(Thermal Protection System)材料の放射率把握の重要性が認識され、アーク加熱風洞での防熱材料・コーティングシステム等の加熱評価試験の精度を向上させ、往還機耐熱材料開発の指針とする目的で高温放射率計測装置(Thermogage社製Emissiometer)が導入された^{2),3)}。

試料移動法を採用している本装置の放射率計測方法の仮定の一つに、伝熱円筒炉内で加熱されている供試体が疑似黒体状態に置かれることが挙げられる。しかし、供試体の材質によっては、本装置の特性により必ずしもその仮定が満たされず、満足した結果が得られないため補正を行うこととなった。特に拡散反射的性質の強い材料では、この傾向が強く現れ補正が必要となった。そこで計測結果の精度向上を図るため、供試体に熱電対を埋め込みその計測値から、疑似黒体に対する補正、供試体の射出時の温度低下に対する補正及び装置の時定数に対する補正等の各補正方法を考案した。補正方法を検証するために行ったIG-110黒鉛材の計測結果から、比較的放射率の高い材料においてはほぼ妥当な値が得られた。

本報告は、計測原理、装置の構造、各種のデータ補正について述べるとともに、IG-110黒鉛材を用いた解析結果及びグラフアイト標準供試体の計測結果等を示す。

2. 記号

E	: 放射エネルギー	[kW / m ²]
E_b	: 供試体温度 T_{tc} に対応した黒体炉の放射エネルギー	[kW / m ²]
E_{b1}	: 疑似黒体状態の放射エネルギー	[kW / m ²]
E_e	: 非疑似黒体状態の放射エネルギー	[kW / m ²]
E_{e1}	: 供試体の黒鉛炉端位置 ($l/r = 0$) における放射エネルギー計出力	[mV]
E_{ir}	: 供試体の黒鉛炉中央位置 ($l/r = 10$) における放射エネルギー計出力	[mV]
E_{tc}	: 供試体の黒鉛炉中央位置 ($l/r = 10$) における	

	放射エネルギー	[kW / m ²]
l	: 黒鉛炉深さ (供試体移動距離)	[mm]
l/r	: 黒鉛炉深さと半径の比	
r	: 黒鉛炉半径	[mm]
T	: 試験設定温度	[K]
T_{ir}	: 供試体温度の赤外線温度計計測値	[]
T_{tc}	: 供試体温度の熱電対計測値	[]
T_w	: 供試体表面温度 (試験設定温度)	[K]
	: 反射率	
	: 吸収率	
	: 放射率	
a	: 見掛けの放射率	
	: ステファン・ボルツマン定数	[5.67×10^{-11} kW / m ² K ⁴]

3. 高温放射率計測装置

3.1 高温放射率計測装置の計測原理

放射率の計測法は種々あるが以下に示すように分類される。

(1) 放射測定法 (Radiometric Emission Measurement Methods)

試料表面からの放射エネルギーと同一温度及び波長での黒体空洞から放射される放射エネルギーを測定し、その比より放射率を求める方法で、組込黒体法、反射鏡法及び試料移動法等がある。

(2) 反射測定法 (Reflection Measurement Methods)

特定波長帯の入射光の試料表面からの反射量より反射率を求め、これより分光反射率を求める方法で、加熱空洞法、積分球法、積分鏡法等がある。

(3) 熱量測定法 (Calorimetric Emission Measurement Methods)

試料からの熱損失が放射のみによるとして、半空間に失われる熱量より半球全放射率を求める方法である。

これらの測定方法のうち、高温放射率計測装置(以下、本装置という。)は試料移動法により計測を行う。これは黒体空洞の内部に置かれている試料(疑似黒体試料)を黒体空洞から急速に引き離し、試料を疑似黒体状態から孤立状態へ瞬間的に移行させ、孤立状態での放射エネルギーと疑似黒体状態の試料から放射される放射エネルギーの比から放射率を求める方法である。

以下に本装置に準じて計測原理を示す。図1と図2に本装置とグラフアイト製伝熱円筒炉(以下、黒鉛炉という。)部の構成をそれぞれ示す⁴⁾。絶対零度以上の全ての物体は、絶えず放射熱エネルギーを放射している。そして物体の単位面積から単位時間あたりに放射される放射エネルギー(放射熱流束)と放射率の関係は、以下に示すステファン・ボルツマンの法則によって表される。

$$E = T_w^4 \dots\dots\dots (3.1)$$

本装置の測定法では、黒鉛炉中央で加熱されている供試体が疑似黒体状態であること及び射出中の供試体に温度低下がないものと仮定している。供試体はグラファイト製供試体ホルダに固定され、電力供給装置より2本の電極を介して加熱された黒鉛炉の中央に配置される。温度 T_w に加熱された供試体は、黒鉛炉内で熱平衡疑似黒体状態(1.0)となり疑似黒体放射が観測される。ここで(3.1)式より以下の式が成立する。

$$E_{b1} = T_w^4 \dots\dots\dots (3.2)$$

E_{b1} は黒鉛炉中央における単位面積 単位時間あたりの放射エネルギー(放射熱流束)である。この状態の供試体をエアシリンダにより急速に黒鉛炉先端まで射出すると(射出時間約130msec.)、非疑似黒体状態の供試体自身から熱的に放射される放射エネルギーが観測される。ここで、移動が瞬間的に行われ供試体の温度低下は無いものと仮定すると(3.1)式より、

$$E_e = T_w^4 \dots\dots\dots (3.3)$$

となる。 E_e と E_{b1} は黒鉛炉先端位置における非疑似黒体状態の放射エネルギーと供試体の放射率である。放射率は供試体の非疑似黒体状態の放射エネルギーと疑似黒体状態の放射エネルギーの比をとり求める。温度 T_w における供

試体の放射率は(3.2)及び(3.3)式より以下の式で求められる。

$$= E_e / E_{b1} \dots\dots\dots (3.4)$$

本装置では供試体の非疑似黒体状態及び疑似黒体状態の放射エネルギーは放射エネルギー計で計測する。

3.2 高温放射率計測装置構成

図1に示す本装置の構成を以下に示すように分類して述べる。

- (1) 電力供給装置,黒鉛炉及び各種高温度計等の本装置本体部
- (2) 温度制御用ラップトップ・コンピュータ,制御用高温度計及びデータ収録装置等のデータ計測装置
- (3) 空気圧縮機及び窒素ガスポンプ等の空気及び窒素ガス供給装置
- (4) 冷却水循環ポンプ及び冷却水タンク等の冷却水循環装置

3.2.1 高温放射率計測装置本体部

本体は装置架台の上に載せられ支持部を含めたおおよその寸法は、幅 3.3m,奥行き 73cm,高さ 66cmである。長さ 254mm,半径 25.4mmの黒鉛炉は両端で2本の銅製電極を介して 48kW 電力供給装置に取り付けられている。図2に黒鉛炉,エアシリンダ,銅サイトチューブ及び温度制御用高温度計等の黒鉛炉部構成を示す。黒鉛炉内の

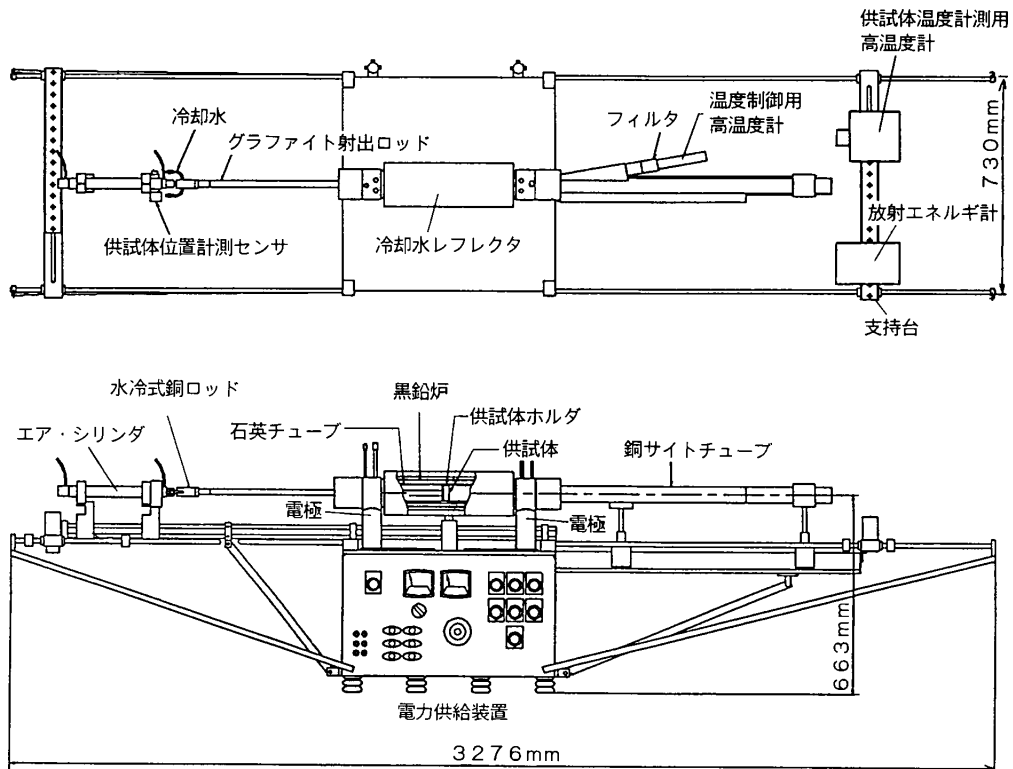


図1 高温放射率計測装置概略図

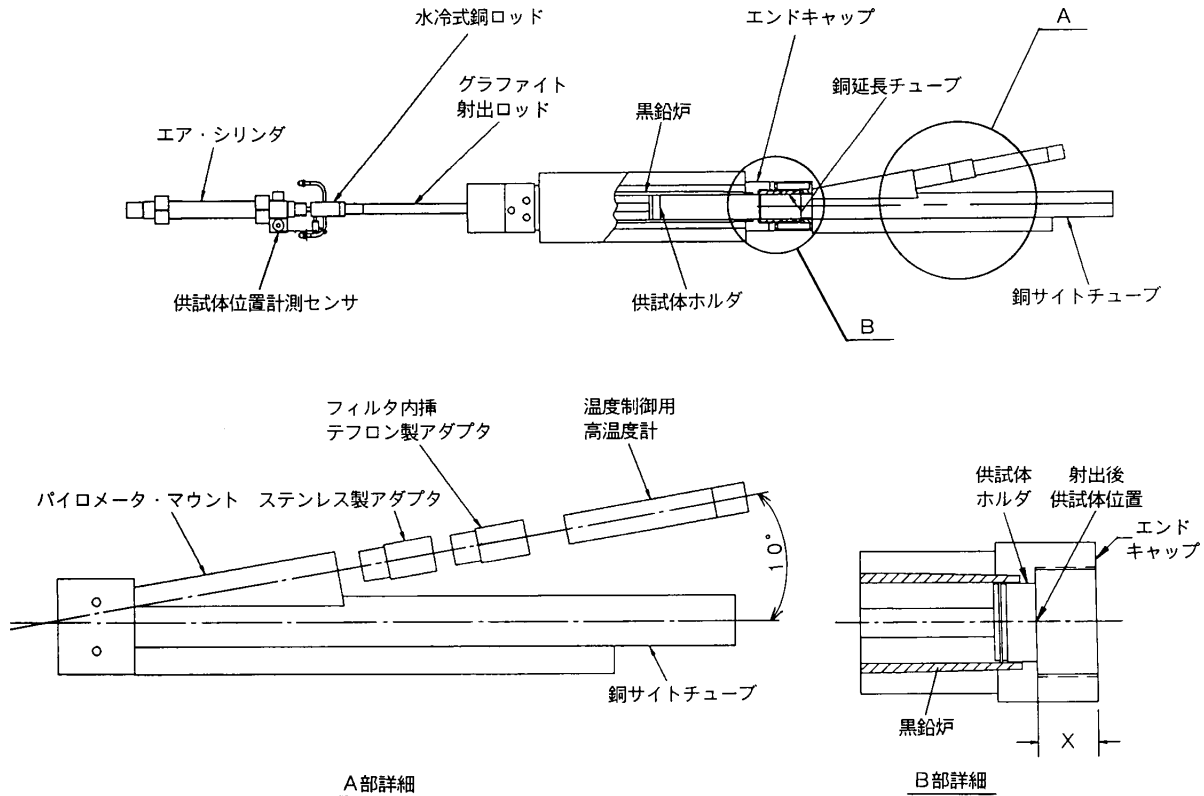


図2 高温黒鉛炉部構成図

グラファイト製射出ロッド(以下,射出ロッドという。)先端には,供試体を収めた供試体ホルダが射出ロッドに対して垂直に取り付けられ,後端には水冷式銅製ロッドを介してエア・シリンダに接続される。エンドキャップにねじ込まれた銅延長チューブには銅サイトチューブが差し込まれ,この銅サイトチューブには黒鉛炉の中心軸に対し約10度の角度でパイロメータ・マウントが設けられている。このマウントには,ステンレス製及び試験領域に応じたフィルタが内挿されているテフロン製の2つのアダプタを介して,温度制御用高温計(サーモゲージ社7000-1)が差し込まれている。この高温計7000-1は黒鉛炉先端の温度を計測し温度制御を行うが,銅延長チューブ内面が鏡面であるとその反射の影響を受ける。より正確な温度制御を行うためその内面は,高吸収率を持つカムファー(樟脳)の煤で様にコーティングされている。図中(B部詳細)に示しているエンドキャップ端から供試体ホルダ前面までの距離(X)は,射出完了時,供試体ホルダと銅延長チューブとが接触・破損しないための調整量 $38.1 \pm 0.25\text{mm}$ である。また,銅サイトチューブ前面(図1の右側)の高温計用支持台には,並列に供試体温度計測用高温計(マイクロン社M90-V,以下,赤外線温度計という。)及び放射エネルギー計(サーモゲージ社5000-1)が,供試体に対し垂直になるように装着されている。図3にカバーを外した状

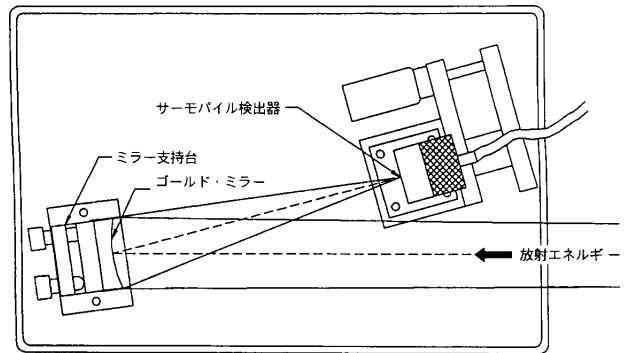


図3 放射エネルギー計構成図

態の放射エネルギー計を示す⁴⁾。この放射エネルギー計は,供試体表面中央から垂直方向に放射される直径3mm程度の領域の放射エネルギーをゴールド・ミラーで集光後,サーモパイル検出素子で計測する。

放射エネルギー計の諸元は,温度計測範囲 1073~2773K,検出素子サーモパイル及び波長領域 0.2~9.0 μm である。また赤外線温度計 M90-V は,温度計測範囲 1073~3273K 及び波長領域 0.65 μm である。

加熱は電力供給装置より2本の電極を介して黒鉛炉両端に電圧をかけ,その抵抗熱を利用して行う。黒鉛炉は熱を持ち,供試体ホルダに固定され黒鉛炉中央に配置されている供試体が加熱され始める。試験設定温度(T)に

加熱された供試体は、黒鉛炉内で熱平衡疑似黒体状態に置かれる。この時の供試体温度を供試体に埋め込んだ熱電対と赤外線温度計で計測する。その後、放射エネルギー計を設置し供試体をエア・シリンダにより黒鉛炉中央から先端まで急速に射出する。この両位置での放射エネルギーを放射エネルギー計で計測し、その比をとり試験設定温度 (T) の垂直放射率を求める。

3.2.2 データ計測装置

図4に黒鉛炉温度制御装置及びデータ収録装置の系統図を示す。

(1) 黒鉛炉温度制御装置

黒鉛炉温度制御装置は、温度制御用ラップトップ・コンピュータ(タンディ社 1100FD)、温度制御用高温度計及びデジタル温度コンピュータ制御モジュール(サーモゲージ社 A/D・D/A コンバータ)で構成されている。このシステムは温度制御のみを行い試験データの蓄積は行わない。

デジタル温度コンピュータ制御モジュールは、黒鉛炉の温度制御機器として使用されている制御用高温度計のアナログ信号を受け、デジタル信号に変換後、RS232 シリアル・ポートを介してコンピュータに送る。さらにコンピュータからの 0 - 5 Volt デジタル制御信号を受け、アナログ信号に変換後、黒鉛炉のパワー・コントローラを駆動している。

制御用高温度計 7000 - 1 の諸元は、温度計測範囲 1073 ~ 2773K、検出素子シリコン及び波長領域 0.7 ~ 1.1 μm である。

(2) データ収録装置

データ収録装置には横河電機製 ORM1200 オシログラフィックレコーダを使用し、放射エネルギー計(放射エネルギー履歴)、供試体位置センサ(供試体軌跡)及び熱電対(供試体温度)の各出力をメモリに取り込み後、フロッピ・ディスクに記録する。赤外線温度計の出力は射出前に電圧値を確認するために使用する。なお、図中のパーソナル・コンピュータは計測試験終了後、計測データの補正に使用する。

3.2.3 空気及び窒素ガス供給装置

図5に空気及び窒素ガス供給装置系統図を示す⁴⁾。窒素ガスは流量調整器で 0.85m³/h に設定後、黒鉛炉両端のエンド・キャップ上部に設けられたガス導入口から流入し、黒鉛炉内部を通り、銅サイトチューブから流出する。この窒素ガス流は、黒鉛炉加熱開始前から計測試験終了後、冷却終了直前まで流し続けられ、グラフィットで製作されている黒鉛炉、射出ロッド及び供試体ホルダを高温加熱による酸化から防いでいる。これにより黒鉛炉内部の測定雰囲気は窒素ガス雰囲気となる。

空気圧縮機により圧力 950kPa に圧縮された空気は、圧力調整器を介して 240kPa に減圧されエア・シリンダ作動用制御弁(4方弁)に供給される。トリガスイッチを押すと制御弁が作動し、エア・シリンダが黒鉛炉中央に置かれた供試体を急速に黒鉛炉先端まで射出する(射出時間約 130msec.)。供試体はトリガスイッチを押している間はその位置に留まり、離すと再び制御弁が作動し逆方向の空気流が流され黒鉛炉中央に引き戻される。

なお供試体が黒鉛炉端に留まっている間、窒素ガス流は遮断され供試体の対流による冷却を防いでいる。また

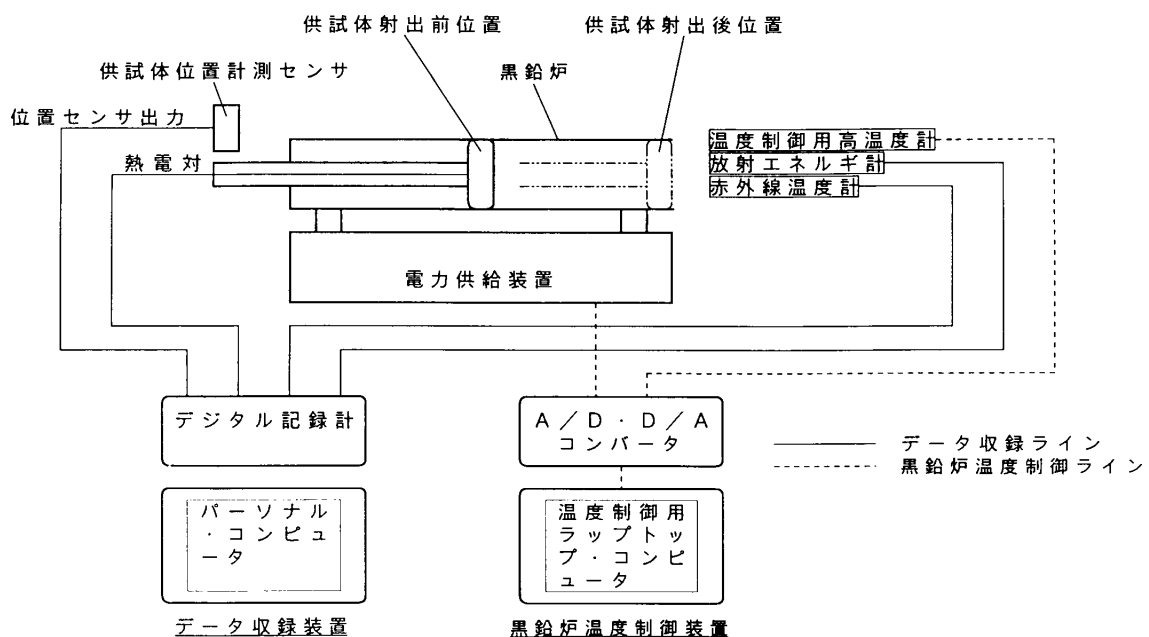


図4 データ計測装置系統図

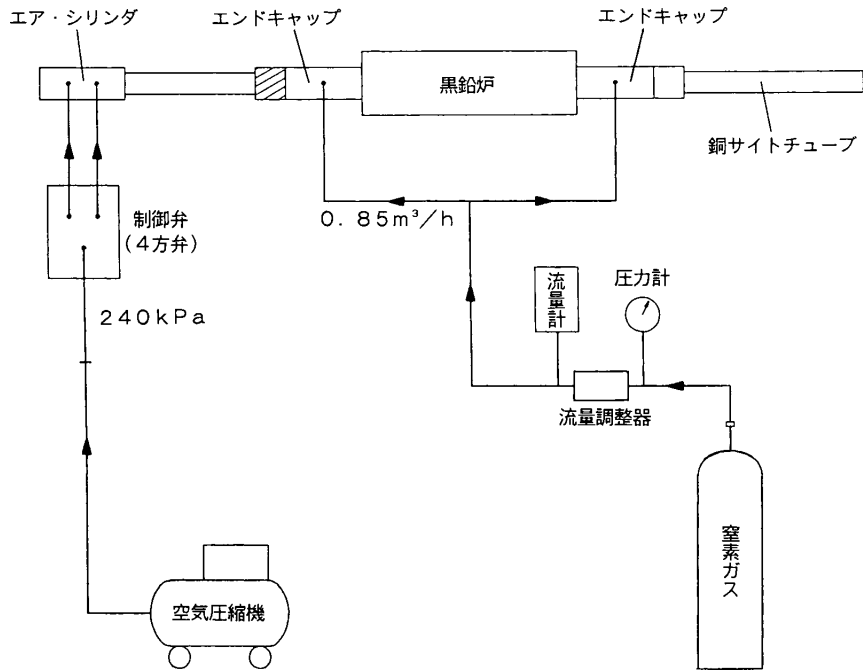


図 5 空気及び窒素ガス供給装置系統図

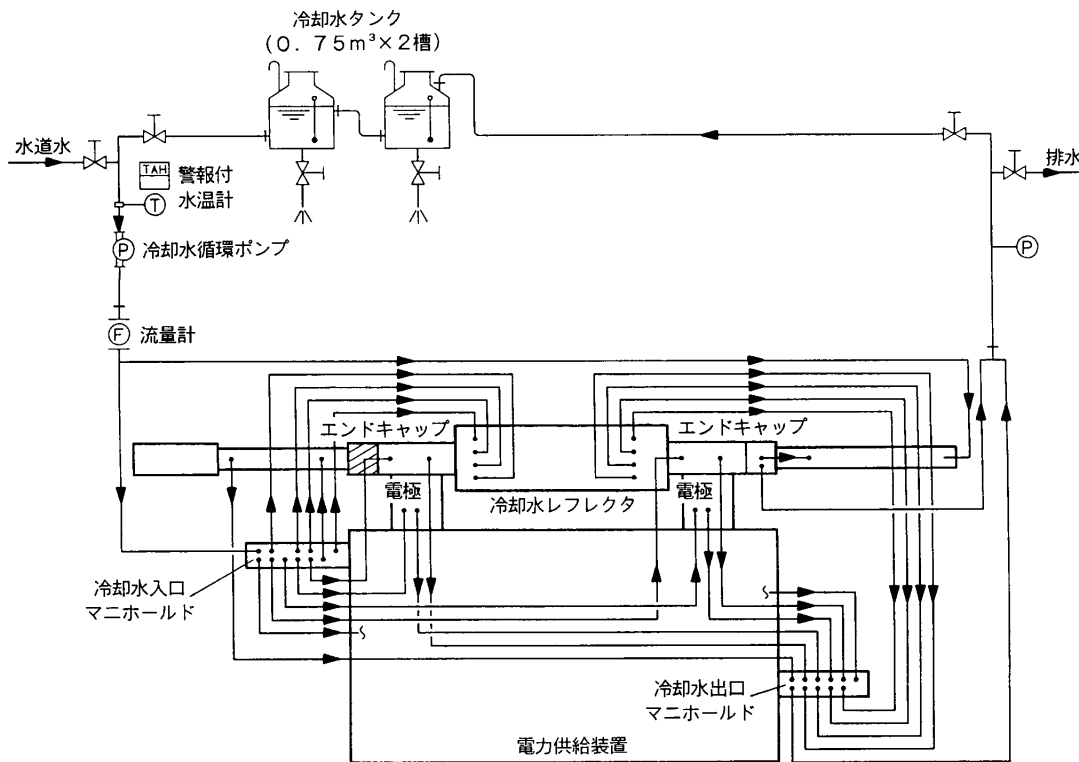


図 6 冷却水循環装置系統図

コンピュータによるCPU温度自動制御も一時的に停止する。

3.2.4 冷却水循環装置

図6に冷却水循環ポンプ及び冷却水タンク等で構成される冷却水循環装置系統図を示す⁴⁾。容量0.75m³の冷却水タンクが2槽設置されている。タンク内に貯水されている冷却水は循環ポンプにより冷却水入口マニホールドに流入し、エンドキャップ、電極、黒鉛炉外側に設置されている冷却水レフレクタ及び銅サイトチューブ等の高温にさらされる各部の冷却を行い装置の損傷を防いでいる。その後、冷却水は出口マニホールドを介して冷却水タンクに戻される。水温が上昇した場合は水道水を導入し下げることが可能で、暖まった余分な冷却水はタンクドレン弁により排出する。また、水温が65 以上になると警報が鳴る冷却水温度計が冷却水タンクと循環ポンプとの間に設置されていて、本装置が危険な状態であることを知らせる。

3.3 供試体と供試体ホルダ

図7に示すように円盤形状に加工された直径43.0mm、厚さ3.5mmの供試体は、グラファイト・フェルト断熱材と共に前後に2分割されたグラファイト製供試体ホルダの間に固定される⁴⁾。この寸法は本装置に付属された供試体ホルダに対するもので、供試体の標準寸法となっている。また、供試体の寸法は前部ホルダの格納用溝の直径により決まり、新たに設計・製作すれば他の寸法の供

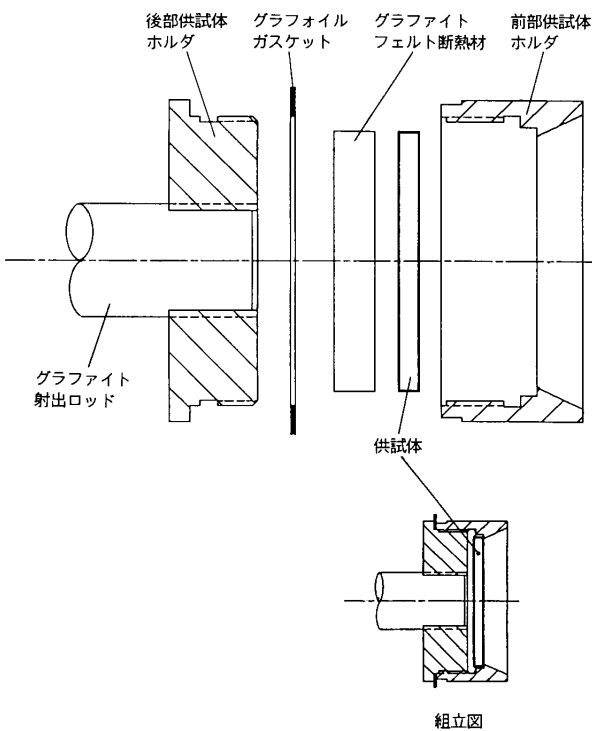


図7 供試体及び供試体ホルダ

表1 放射率計測用の各高温温度計

	温度制御用 高温温度計	放射エネルギー計	供試体温度計 測用高温温度計
型式	サーモゲージ 7000 - 1	サーモゲージ 5000 - 1	マイクロン M90V
温度計測範囲	1073 ~ 2773K	1073 ~ 2273K	1073 ~ 3273K
検出素子	シリコン	サーモパイル	シリコン
波長領域	0.7 ~ 1.1 μm	0.2 ~ 9 μm	0.65 μm
応答時間	5 μsec	40msec(時定数8msec)	0.5sec

試体でも試験可能であり、現在、既に供試体直径 20mm 及び 30mm 用の供試体ホルダが準備されている。

3.4 装置性能と基本特性

3.1項から3.3項まで述べてきた装置性能と基本特性をここにまとめる。また、表1に放射エネルギー計、温度制御用高温温度計及び赤外線温度計の諸元を示す。

- (1) 計測方法：試料移動法
- (2) 測定温度範囲：1073K ~ 2773K
ただし、供試体に熱電対を埋め込んでいる場合は、1073Kから熱電対の測定温度範囲による。
- (3) 波長範囲：全波長(0.2 μm ~ 9 μm)
- (4) 測定方向性：供試体に対して垂直方向
(全垂直放射率)
- (5) 測定雰囲気：窒素ガス雰囲気
- (6) 供試体寸法(標準)：直径43.0mm、厚さ3.5mm
直径20mm及び30mmも試験可能。
- (7) 繰り返し試験による計測精度：±2% (目標)

4. データ解析技術

4.1 本装置の改良

本装置により求められた放射率の値は、供試体の材質によっては装置の特性により、必ずしも満足した結果が得られないため補正を行う必要が生じた。既製のシステムではこれに対処できないため、データ収録装置の更新及び熱電対による供試体の温度計測ができるように装置の改良を行った。

(1) データ収録装置の更新

本装置の導入時、計測データの取得にはX-Yペンレコーダを使用していた。このX-Yペンレコーダには、射出前後の放射エネルギーの履歴及び供試体の軌跡が射出時間に対し記録され、その線図を直接読みとり放射率を計算により求めていた。この方法では、

読み取りには個人差があり正確な放射率が算出できない。

本装置の放射率計測法の仮定の一つに、黒鉛炉中央で加熱されている供試体が疑似黒体状態(1)に

置かれることが挙げられる。しかし、黒鉛炉の深さ(l)と半径(r)の比(l/r)が10であっても、供試体の材質が物体表面に入射された入射エネルギーの強度が全ての方向に一樣な反射を起こす拡散反射の性質の強い材料や放射率の低い材料においては、見掛けの放射率を1と見なすことはできない。本装置も $l/r = 10$ である($l = 25.4\text{mm}$, $r = 25.4\text{mm}$)。そのような本装置の特性により拡散反射の性質の強い材料や放射率の低い材料の計測値は補正を行う必要がある(4.3 項(1)疑似黒体に対する補正(図10) 参照)。

以上のような問題点が指摘されたが、試験データの全てがアナログ量であり対処不可能であった。これらの問題点を解決すべく新たにデジタル記録計を導入した。

(2) 熱電対による供試体温度計測

材質によっては必ずしも疑似黒体放射をしない供試体の温度計測においても、従来、放射率を1($=1$)として計測を行う赤外線温度計の指示値を読みとっていた。この方法ではその指示値と供試体の実温度とに差が生じる。特に、拡散反射の性質の強い材料や放射率の低い材料では、一層この傾向が強くと推定された。そこで供試体の温度計測をできるだけ正確に行うため供試体に熱電対を埋め込み計測する方法と、従来から行っていた赤外線温度計による方法とを併用することとした。この2つの方法により得られた計測値に差が生じた場合は、放射率の算出時に補正值として用いる。熱電対は新たに中空式射出ロッドを製作しその中を通すようにした。

4.2 放射率データ導出手法

図8に放射率の算定となる放射エネルギーの計測位置を示す。供試体ホルダに固定された供試体は、電力供給装置より2本の電極を介して加熱された黒鉛炉の中央(射出前位置・ E_{ir} 計測位置)に配置される。試験設定温度(T)に加熱された供試体は、黒鉛炉内で熱平衡疑似黒体状態となる。ここで疑似黒体状態の放射エネルギー(E_{ir})が観測される。この状態の供試体をエア・シリン

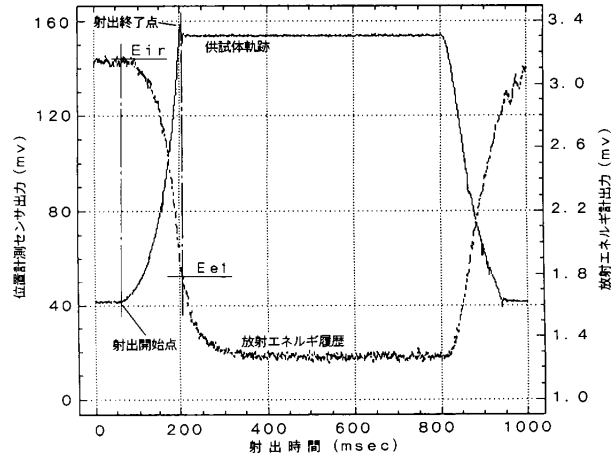


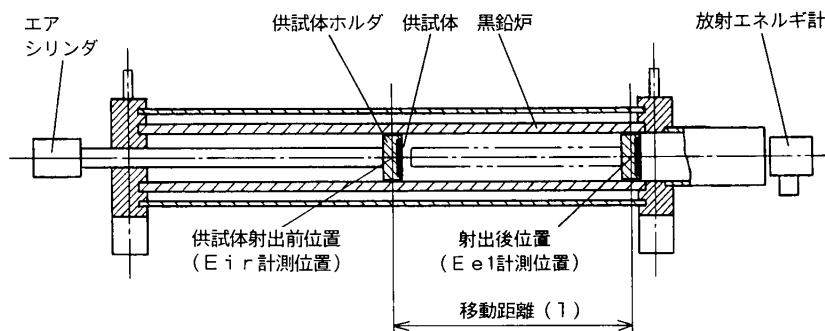
図9 放射率計測例

ダにより急速に黒鉛炉先端(射出後位置・ E_{e1} 計測位置)まで射出すると、非疑似黒体状態すなわち供試体自身から熱的に放射される放射エネルギー(E_{e1})が観測される。この両位置での放射エネルギー E_{ir} 及び E_{e1} を放射エネルギー計で計測する。

図9に放射率計測例を示す。データ収録装置のメモリに取り込んだデータをアナログ波形で再生記録したもので、供試体の射出時間に対し放射エネルギーの履歴及び供試体の軌跡を示している。疑似黒体状態の放射エネルギー E_{ir} は位置計測センサ出力が立ち上がる直前(射出開始点)に対応する放射エネルギーを、また射出完了時(非疑似黒体状態)の放射エネルギー E_{e1} は位置計測センサ出力が最大値となる点(射出終了点)に対応する放射エネルギーをそれぞれ放射率の算定点とした。放射率()は、非疑似黒体状態の放射エネルギー(E_{e1})と疑似黒体状態の放射エネルギー(E_{ir})との比(E_{e1}/E_{ir})により求める。

4.3 データ評価(放射率計測データの補正)

物体が外部から熱(赤外線)を受けると、放射、反射、吸収の3つの現象が発生する。そして物体に向かってき



$$l = 25.4\text{mm} \quad r = 25.4\text{mm} \quad l/r = 10$$

図8 放射エネルギーの計測位置(放射率の算定数)

た熱に対しそれぞれの現象で消費された熱を放射率 ϵ , 反射率 ρ , 吸収率 α の各割合で示すと ,

$$\epsilon + \rho + \alpha = 1 \dots\dots\dots (4.1)$$

の関係が成り立つ。

計測の原理は(4.1)式の関係に基づいている。吸収率(α)は熱を受けた物体の膨張及び相の変化等に使われる熱量で、時間が経てば一定になりほぼ無視できるほどの値であり、放射率+反射率 1となる。ここで反射を取り除けば放射が計れる。本装置はこの反射を取り除く方法として試料移動法を採用している。黒鉛炉中央に配置された供試体が黒鉛炉を介して加熱され始めると両者はそれぞれ互いに熱交換を行うが、黒鉛炉の深さと半径の割合(l/r)が大きいほど完全な反射となり、黒体状態に近づく。この近似的な黒体状態の供試体を黒鉛炉端まで瞬時に移動させると供試体と黒鉛炉壁との反射がなくなり、供試体自身から熱的に放射される放射エネルギーが観測される。

放射率(ϵ)は黒体状態の放射エネルギー(E_b)と同一温度(T)に保持された非黒体状態の放射エネルギー(E_e)の比

$$\epsilon = E_e / E_b \dots\dots\dots (4.2)$$

で表される。 E_b はプランクの式によって計算される放射エネルギー密度分布を、波長 λ について0から無限大まで積分することによって求められ、ステファン・ボルツマンの式

$$E_b = \sigma T^4 \dots\dots\dots (4.3)$$

に帰着する。

一方、 E_e は物体固有の放射エネルギー密度分布を持つこと、またその計測は有限の波長域でしかできないことにより、 E_b ほど簡単には求められない。そこで、できる限り正確に E_e を求める補正方法を本装置に則して以下に示す。

(1) 疑似黒体に対する補正

黒鉛炉中央において加熱されている供試体の放射エネルギー(E_{ir})と射出完了時の放射エネルギー(E_{e1})をそれぞれ放射エネルギー計で計測し、その比(E_{e1}/E_{ir})により求めた値が供試体の垂直放射率であるためには、

黒鉛炉中央に置かれ加熱されている供試体が疑似黒体状態である。

射出中の供試体に温度低下がない。

以上2点の仮定が満たされる必要がある。まず仮定 1 に着目する。

黒鉛炉の深さ(黒鉛炉中央から端までの供試体移動距離)を l , 半径を r とした時、その比(l/r)と見掛け

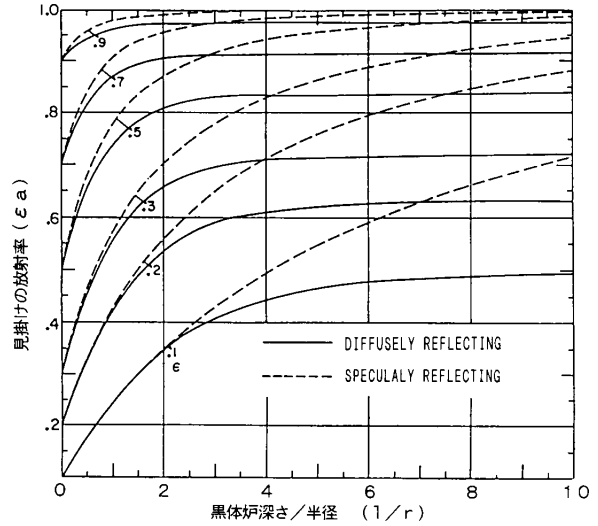


図10 黒体炉の深さと見掛けの放射率の関係

の放射率の関係は図10のように計算される⁵⁾。図より明らかなように放射率が0.9程度と予想される供試体でも、(l/r) = 10程度では見掛けの放射率を1 (=黒体)と見なすことはできない。特に、拡散反射的な性質の強い材料では一層この傾向が強い。本装置も(l/r) = 10であり補正が必要になる理由である。

ある物体の垂直放射率(ϵ)は、本装置では(4.2)式を変形した次式で計算される。

$$\epsilon = \frac{E_{tc} \cdot E_{ir} \cdot E_{e1}}{E_b \cdot E_{tc} \cdot E_{ir}} \dots\dots\dots (4.4)$$

(4.4)式第1項は、温度 T_{tc} における黒体炉の放射エネルギー E_b と本装置で得られる黒鉛炉中央位置($l/r = 10$)の放射エネルギー E_{tc} との比で黒体放射の補正である。本装置は(l/r) = 10であり黒体炉の条件を満たしているが厳密には黒体炉とは言えず、(E_{tc}/E_b) = 1となるため必要な補正值である。

第2項は、見掛けの放射率(Apparent emittance)の補正である。赤外線温度計指示値と熱電対指示値との比で、装置の黒鉛炉空間で発生する見掛けの放射率を基に計測された E_{ir} を、供試体の実温度に対応した放射エネルギー E_{tc} で割った値である。理論的⁵⁾には図10に示す値となる。しかし、本装置では E_{tc} を直接計測できないので、(4.5)式により赤外線温度計で計測した温度 T_{ir} と熱電対で計測した温度 T_{tc} との比の4乗で求める。 T_{ir} は、放射率を1とする赤外線温度計で計測されるため、(4.5)式で求めた値は実際の値より過小な値となる。

$$\frac{E_{ir}}{E_{tc}} = \left(\frac{T_{ir} + 273.15}{T_{tc} + 273.15} \right)^4 \dots\dots\dots (4.5)$$

以上は、黒鉛炉中央位置($l/r = 10$)で計測される。

第3項は、射出前後に測定された各々の放射エネルギーの比により求められる放射率で、図10にも示した見掛けの放射(=反射)を除く過程である。(4.5)式で示した T_{tc} (熱電対で計測した供試体温度)が低下しないと言う仮定の成立性であり、確認を行う必要がある。温度低下に対する補正は(3)項で述べる。

(2) 装置の時定数に対する補正

本装置の放射エネルギー計の時定数は8 msecとなつている。射出完了時の放射エネルギー E_{e1} は時定数の影響を受ける。これを一次遅れを持つ入力と出力を X 及び Y とすると両者の関係は、

$$X \cdot 1 = Y' + 1 \cdot Y \dots\dots\dots (4.6)$$

(Y' は時間に対する1回微分値)

となる。(4.6)式を時間間隔 t で離散化し X を求めると、

$$X_n = Y_n + \frac{t}{\tau} \cdot (Y_n - Y_{n-1}) \dots\dots\dots (4.7)$$

となる。以上を図示すると図11になる。図中の実線は $\tau = 8$ msecの系を通過した出力で、点線は(4.7)式より計算した真の出力である。射出完了時の放射エネルギー E_{e1} は、この実線で示したほど急激な低下はないが真の値との差は大きいと推測される。

図12に時定数補正例として試験温度1073 Kにおける白金供試体の計測結果を示す。図には供試体の射出時間に対し、供試体の軌跡、放射エネルギーの履歴及び時定数補正後の放射エネルギーの値を示す。射出完了時の放射エネルギー計の出力値は補正を行わない場合およそ1.85mVであるが、補正を行うとおよそ1.65mVとなり約10%ほど値の低下が認められた。また補正の有無による値の差異は供試体の材質によって異なり、時定数補正を行っても

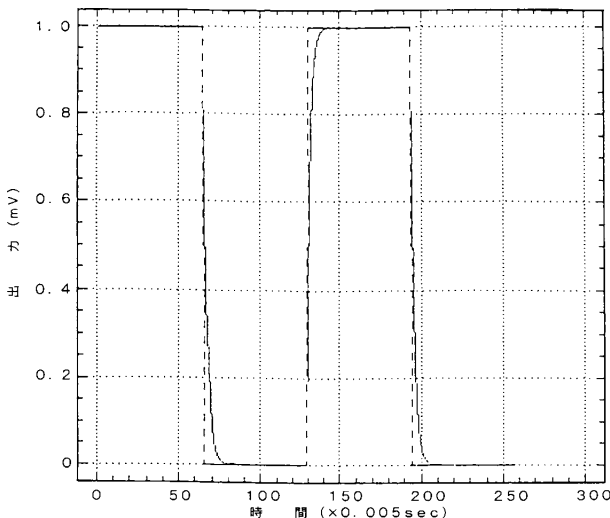


図11 時定数補正の計算例 ($\tau = 8$ msec)

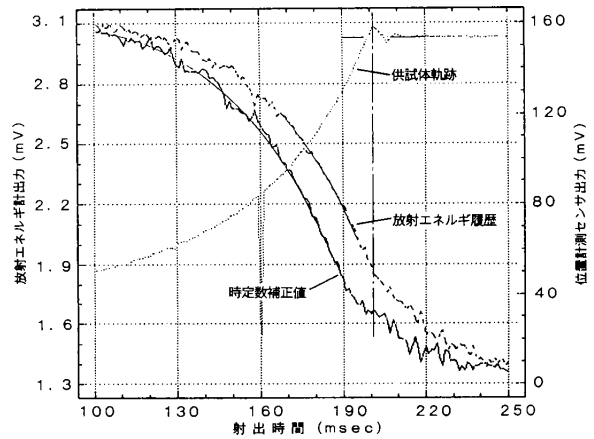


図12 時定数補正例(1073 Kにおける白金供試体)

効果がない供試体も見られた。

(3) 射出時の温度低下に対する補正

本装置による放射率計測の仮定の一つに、射出中に供試体の温度低下がないことがあげられる(前述の仮定)。供試体射出時の温度低下量は、供試体に熱電対を埋め込み射出前から完了時までの温度を記録する。この時、供試体の温度に低下が認められた場合、射出直前の温度を T (), 射出完了時の温度を T_n () とすると補正係数は、

$$= \left(\frac{T + 273.15}{T_n + 273.15} \right)^4 \dots\dots\dots (4.8)$$

とした。

熱電対で計測した射出中の供試体の温度に低下が認められた場合の補正値は、(4.4)式で計算された放射率の値()にこの補正係数を掛けて求める。

(4) 円筒炉の熱量分布について

次に、円筒炉内壁の熱量分布について述べる。本装置の黒鉛炉(図8参照)のように、炉の端に出口のある円筒炉の炉壁が一樣な加熱量 q で加熱されているとき、熱放射により図13に示すような熱量分布となる⁶⁾。図は円筒炉の長さ(全長) L と直径 D の比 (L/D) を1とした時の例で、無次元化した円筒炉の長さに対し、円筒炉長手方向の加熱量分布を示す。 q_1 は一樣な加熱量 q で加熱されている円筒炉の長手方向の熱量を示す。この図より壁面の加熱量 q が円周方向及び長手方向共に均一であっても、放射による加熱は円筒炉の中央(円筒炉長さの $1/2$)で最大になり出口で最小になるため、長手方向に温度勾配が生じる様子が分かる。この様なモデルは既に解析されている^{5),6)}。また円筒炉の長さ(長さ)と直径の比 (L/D) の変化に対し、その長さに対応する最大加熱量の変化 (q_{lmax} / q : 円筒炉中央における加熱量 / 一樣な加熱量) を求めると図14のようになる⁶⁾。加熱量は円筒炉が長くなるに従ってほぼ直線的に増加してい

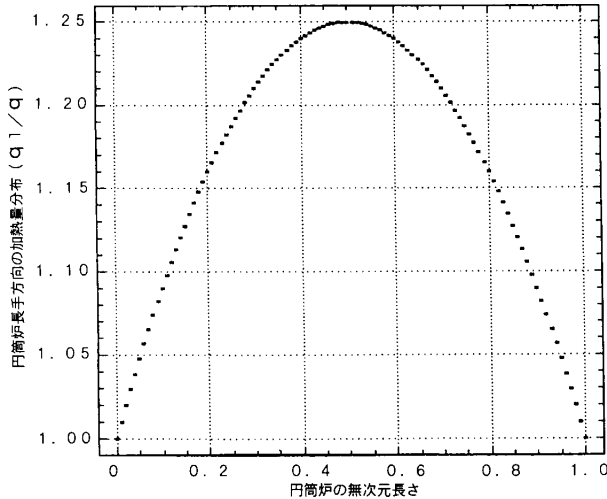


図13 円筒炉内壁の熱量分布計算例

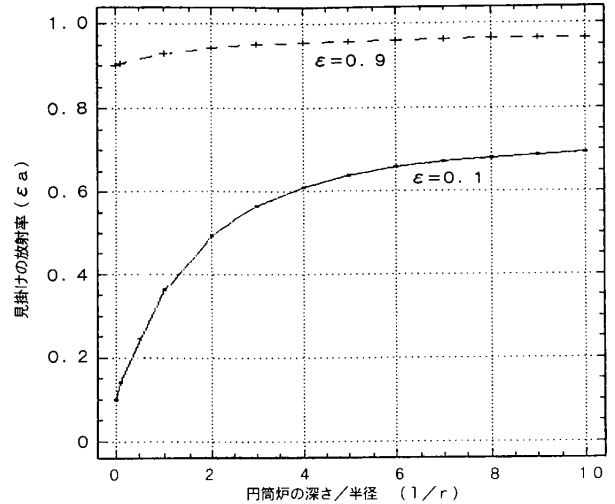


図15 円筒炉の見掛けの放射率の変化

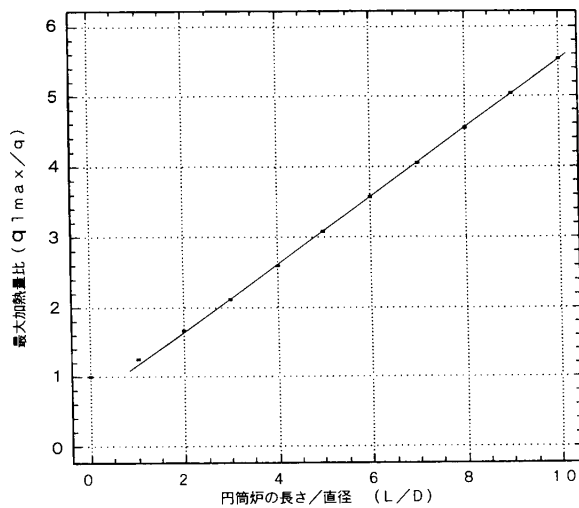


図14 円筒炉の長さに対する最大加熱量の変化

の様子分かる。以上のような現象を基に円筒炉の深さ(深さと半径の比: l/r)に対し見掛けの放射率(ϵ_a)を求めると図15になる⁵⁾。図中の ϵ は真の放射率を表す。放射率の低い物体ほど円筒炉の深さに影響を受ける様子が分かる。

4.4 解析結果例

裏面にR型(白金)熱電対を埋め込んだ東洋炭素製黒鉛材 IG-110 を用いた解析結果例を以下に示す。射出前後の供試体の温度、位置信号及び放射エネルギーの各計測データは、デジタル記録計(共和電業製 DAA-100A データアナライザ)で記録・解析した。供試体の温度として、赤外線温度計の指示値を使用し1074 K及び1573 Kで試験を行った。

(1) 射出中の供試体の温度低下

表2に供試体温度1573 Kにおける熱電対で計測した射出中の供試体の温度記録を示す。表中の供試体の計測温

度はセルシウス温度で示している。射出前の供試体温度は、赤外線温度計の計測値が1573 Kのとき、熱電対の計測値は1579 Kであった。表2から射出中の供試体の温度変化は1 K程のばらつきが見られるが、温度低下のないことが分かる。射出開始及び終了の各位置は供試体位置を表す信号から特定し、射出時間は139 msecであった。また、1074 Kの試験結果においても1573 Kと同様に、射出中の供試体の温度変化は1 K程のばらつきが見られたが、温度低下は認められなかった。

以上のことから、IG-110黒鉛供試体を使用した結果からは、射出中の供試体に温度低下が認められなかった。

(2) 疑似黒体状態の放射率

熱電対による供試体の温度計測値から、射出前の疑似黒体状態の放射率を(4.5)式(T_{ir}/T_{tc})⁴より求めた。熱電対の計測値が正しければ、射出前の疑似黒体状態の放射率は1074 Kの時0.97、1573 Kの時0.98とそれぞれ推定される。黒体炉の真の放射率が0.9の時、見掛けの放射率は0.97と計算されており(図15参照)、これらの推定値はほぼ妥当な値と考えられる。

5. 放射率計測例

放射率の計測例として、本装置に付属されたPOCO製グラファイト標準供試体(直径42.7 mm、厚さ3.2 mm)の全垂直放射率計測結果を図16に示す。本装置とアメリカ・サーモゲージ社により計測された放射率計測結果とを比較し再現性を調べた。アメリカでの計測結果は文献4より引用した。本装置の繰り返し試験による計測精度は±2%を目標としている。この計測試験は本装置導入時に行ったもので、熱電対を用いた温度補正は行っていない。試験温度範囲は1073 Kから2473 Kまで200 K間隔で行った。本装置及びサーモゲージ社の計測結果とも試験温度の上昇と共に低くなっている。また本装置とサー

表 2 射出中の熱電対による供試体温度記録例
(1573 KにおけるIG - 110黒鉛材)

895:	1.305	1.306	1.305	1.305	1.305
900:	1.305	1.305	1.305	1.305	1.305
905:	1.305	1.305	1.306	1.306	1.305
910:	1.306	1.305	1.306	1.305	1.305
915:	1.305	1.305	1.305	1.305	1.306
920:	1.305	1.305	1.305	1.305	1.305
925:	1.305	1.305	1.305	1.305	1.305
930:	1.305	1.305	1.305	1.305	1.306
935:	1.305	1.305	1.305	1.305	1.305
940:	1.305	1.305	1.305	1.305	1.306
945:	1.305	1.305	1.305	1.305	1.305
950:	1.306	1.305	1.305	1.305	1.305
955:	1.305	1.305	1.305	1.305	1.305
960:	1.305	1.306	1.305	1.305	1.305
965:	1.305	1.305	1.305	1.305	1.305
970:	1.305	1.305	1.305	1.305	1.305
975:	1.305	1.305	1.305	1.305	1.305
980:	1.305	1.305	1.306	1.306	1.306
985:	1.306	1.306	1.306	1.305	1.305
990:	1.306	1.306	1.306	1.306	1.305
995:	1.306	1.305	1.305	1.305	1.305
1000:	1.306	1.305	1.305	1.305	1.305
1005:	1.305	1.305	1.305	1.305	1.305
1010:	1.305	1.306	1.305	1.305	1.306
1015:	1.306	1.305	1.305	1.305	1.305
1020:	1.306	1.305	1.306	1.306	1.305
1025:	1.306	1.306	1.306	1.305	1.306
1030:	1.305	1.306	1.305	1.306	1.305
1035:	1.306	1.305	1.306	1.305	1.305
1040:	1.306	1.305	1.305	1.305	1.306
1045:	1.305	1.305	1.305	1.306	1.305
1050:	1.306	1.306	1.306	1.305	1.306
1055:	1.305	1.306	1.305	1.305	1.306
1060:	1.306	1.306	1.306	1.306	1.306
1065:	1.306	1.306	1.305	1.306	1.306
1070:	1.305	1.306	1.306	1.306	1.306
1075:	1.306	1.306	1.305	1.306	1.306
1080:	1.305	1.306	1.305	1.305	1.305
1085:	1.305	1.306	1.305	1.306	1.306
1090:	1.305	1.305	1.305	1.306	1.306
1095:	1.306	1.305	1.305	1.305	1.306
1100:	1.306	1.305	1.305	1.305	1.306
1105:	1.306	1.306	1.306	1.306	1.306
1110:	1.306	1.305	1.305	1.305	1.306
1115:	1.305	1.305	1.305	1.306	1.306
1120:	1.305	1.306	1.305	1.305	1.305
1125:	1.305	1.305	1.305	1.305	1.305
1130:	1.305	1.305	1.305	1.305	1.305
1135:	1.305	1.305	1.305	1.306	1.305
1140:	1.305	1.305	1.306	1.306	1.306
1145:	1.306	1.305	1.306	1.306	1.305
1150:	1.306	1.305	1.305	1.305	1.305
1155:	1.305	1.306	1.305	1.306	1.305
1160:	1.305	1.306	1.305	1.305	1.305
1165:	1.305	1.305	1.305	1.305	1.306
1170:	1.305	1.305	1.306	1.305	1.305
1175:	1.305	1.305	1.306	1.306	1.305
1180:	1.306	1.305	1.306	1.306	1.306
1185:	1.305	1.305	1.306	1.306	1.305
1190:	1.306	1.305	1.306	1.305	1.306
1195:	1.305	1.306	1.306	1.306	1.306
1200:	1.306	1.306	1.306	1.305	1.305

射出時間
($\times 0.5 \text{ msec}$)

供試体温度
($\times 1000^\circ\text{C}$)

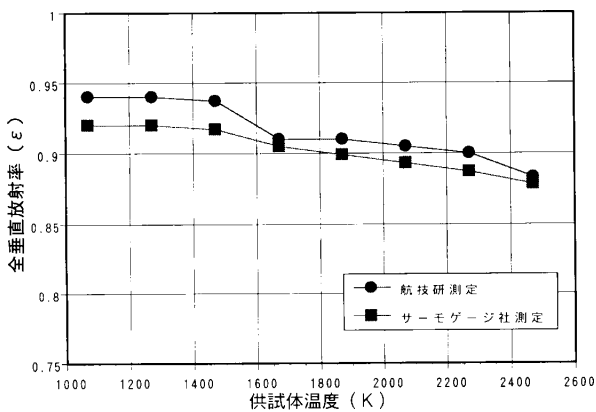


図 16 全垂直放射率計測結果例 (1073 K から 2473 K におけるグラファイト標準供試体)

モゲージ社により得られた放射率はそれぞれ 0.883 ~ 0.940 及び 0.878 ~ 0.920 となり、どの試験温度においても本装置の方が若干高めの値を示した。しかし、同一温度での両者の値はほぼ目標値 $\pm 2\%$ に入り、特に 1673 K 以上の高温域においては再現性よく計測できることを示している。

6. 適用材料

本装置による放射率の計測は供試体に熱電対を埋め込みその計測値から温度補正を行うことにより、拡散反射的な性質の強い材料においても試験可能となった。

適用材料としては、

供試体は黒鉛炉中央から先端まで射出後、再び中央

に引き戻される。この時に受ける2度の衝撃に耐えうる剛性を持つ材料であること。

供試体が薄いと温度低下が起こりやすく正確な放射率が算出できない。そのため、厚みがあり、熱容量が大きく、熱伝導率が低い材料であること。

表面にコーティングが施されている供試体においては、コーティング層が射出の衝撃による剥離を起こさないこと。

等が挙げられる。

一方、放射率の低い金属材料について白金を例に以下に示す。図12より供試体が黒鉛炉先端まで到達する前に、放射エネルギーの降下が鈍ってしまうのが分かる。特に時定数補正值に対しては顕著に現れている。そのため、放射率の算定点の一つである射出完了時の放射エネルギーが高めの値となり、求められた放射率の値も当然高くなる。この現象は供試体位置信号(供試体軌跡)の変化から分かるように、供試体はほぼ様な速度で射出されており、移動量の変化がもたらしたとは考え難い。銅サイトチューブ内面の反射が放射エネルギーに影響を及ぼすことなどが考えられるが、現在、その原因については不明な点も多く調査・検討を進めている。

7. まとめ

宇宙往還機用耐熱材料の放射率計測のために導入された高温放射率計測装置の構造及びデータ解析技術等を紹介した。特に計測結果の精度向上を図るため補正方法を考案した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 本装置による計測結果が垂直放射率であるためには、供試体が黒鉛炉中央で疑似黒体状態である仮定が満たされることである。しかし、拡散反射的な性質の強い材料では、必ずしも疑似黒体状態にならないため補正が必要となった。そこで供試体に熱電対を埋め込みその計測値から各温度補正等を行うことにより、比較的放射率の高い材料においてはほぼ妥当な値が求められ、放射率試験結果に精度向上の見通しが得られた。

(2) 温度補正方法を検証するために行った黒鉛材 IG-110 供試体を使用した計測結果から、疑似黒体状態の見

掛けの放射率はほぼ妥当な値が得られた。また射出中の供試体の温度低下は認められなかった。

(3) 放射率の低い金属材料の放射率計測は、射出終了時の放射エネルギーの降下が鈍り正確な値が求められない。その原因については不明な点も多く調査・検討中である。

(4) グラファイト標準供試体の計測結果から、本装置により求められた放射率は再現性よく計測できることが分かった。

本装置による放射率の計測は、供試体表面中央の直径約3mm程度の領域から垂直方向に放射されるエネルギーを計測して求める。そのため、表面状態(反射特性)への依存性が高く、計測の評価を難しくする最大の原因になっている。計測に使用する供試体の汚染に対する管理・取り扱い等を慎重に行う必要がある。

謝 辞

終わりに、本報告の作成にあたり空気力学部 渡辺泰夫室長から終始貴重な助言を頂いたことを記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Modest, M.F.; Radiative Heat Transfer, McGraw-Hill, 1993, Chap.3.
- 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; アーク風洞の改修と放射率計測, 日本航空宇宙学会誌, 第42巻第482号, 1994年3月
- 3) 石田清道, 松崎貴至, 渡辺泰夫, 芳仲敏成, 濱村修; 高温放射率計測装置について, 第6回傾斜機能材料シンポジウム論文集, 1993年10月
- 4) Thermogage, Inc.; Operation Manual for Model 24 kW and 48 kW Calibration Furnaces.
- 5) Sparrow, E.M. and Cess, R.D.; Radiation Heat Transfer, McGraw-Hill, 1978, Chap.6.
- 6) Siegel, R and Howell, J.R.; Thermal Radiation Heat Transfer, McGraw-Hill, 1972.