

ISSN 0452-2982
UDC 629.7.023.8
536.21
536.331

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-738

ノーズキャップ取付金具の熱伝導特性試験

遠藤修司・大竹邦彦

1999年5月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

ノーズキャップ取付金具の熱伝導特性試験*

遠藤修司**, 大竹邦彦**

Thermal Conduction Characteristic Tests of a Nose Cap Fitting *

Shuji ENDO ** and Kunihiko OHTAKE **

ABSTRACT

Heating tests of a model of a nose cap fitting were carried out in order to understand the behavior of thermal conduction of the nose cap fitting of hypersonic re-entry vehicles. The model was constructed of materials equivalent to those used for the nose cap fitting of the Hypersonic Flight Experiment (HYFLEX) vehicle, and was of the same size. The model was heated using a xenon lamp heating system. Tests were carried out in a vacuum, and the temperature history at selected locations on the model were measured with thermocouples. It was observed that the temperature of the main structure of the airframe hardly rose, when the temperature of the back surface of the nose cap reached its peak value.

Keywords: nose cap fitting, thermal conduction, temperature measurement, high heat flux

概 要

宇宙往還機のノーズキャップ取付金具部の熱伝導特性を把握するために、取付金具を模擬した供試体を製作して、加熱試験を行なった。供試体は極超音速飛行実験 (HYFLEX) 機のノーズキャップ取付金具と同じ大きさに同等の素材で製作したものをを用いた。供試体の加熱はクセノンランプ加熱装置を用いて行なった。試験は真空中で実施し、熱電対を用いて、供試体の各部位の温度履歴データを取得した。ノーズキャップを模擬したカーボン/カーボン複合材平板の裏面の温度が最大になるときは、機体主構造部材を模擬したアルミニウム合金平板の温度は殆ど上昇しておらず、その温度上昇にタイムラグがあることが観測された。

1. 緒 言

有翼宇宙往還機は、地球へ帰還する大気圏再突入時に極めて高い温度環境に曝される。再突入時の機体の外表面の温度は、機首および翼前縁部が最も高く、1,700 程度の高温に達する。この高温から機体主構造を防御するた

めには熱防御構造の適用が必要不可欠となる。熱防御構造は、空力加熱による厳しい高温環境から機体内部の主構造の温度を、その材料の耐熱使用限度以下に、例えばアルミニウム合金であれば 180 以下に抑え込む断熱性能が要求される。

有翼宇宙往還機 HOPE の開発研究の一環として行なわ

* 平成 11 年 2 月 12 日受付 (received 12 February 1999)

** 構造材料総合研究グループ (Structures and Materials Research Center)

れた極超音速飛行実験（HYFLEX）機の機首部の熱防御構造¹⁾を例にとれば、ノーズキャップと呼ばれる大気圏に再突入する先端部分は、それ自体で高温に耐えるカーボン / カーボン複合材（以後、C/C材と略す）のホットストラクチャであって、アルミニウム合金の機体主構造とは耐熱セラミックスと耐熱合金より成る取付金具を介して結合される構造である。このような熱防御構造様式において、熱防御部材から主構造に荷重を伝達する役割を担う取付金具は、また、主構造への熱の伝導経路にもなっている。したがって、取付金具を通しての熱の流入に対する検討は熱防御構造の設計に当たって極めて重要である。

そこで、本研究では、熱防御構造の取付金具すなわち、熱防御部材と機体主構造との結合部の熱伝導特性に関する基礎データを取得するため、また、その実測データを熱応答数値シミュレーションの精度の検証に資するため、HYFLEX機のノーズキャップと主構造の結合部を模擬した供試体を製作し、その加熱試験を行なって供試体各部位の熱応答を測定した。本試験は、再突入の加熱条件を模擬した環境内での試験を意図したものではなく、可能な高熱負荷の下で、試験環境条件をきちっと押さえた加熱試験を実施することにより、質の高い熱応答データを取得することを目的としたものである。

試験は、まず、供試体の加熱面であるC/C材平板を均一に加熱できるような加熱の条件を選定するための予備

試験を実施した。次いで、このデータを基に加熱の条件を設定し、実際の供試体の加熱試験を行なって熱応答データを取得した。本報告では、加熱試験の概要とその結果について述べる。

2．供試体

供試体は実機のノーズキャップ取付金具と同じ大きさに同等の素材で製作したものをを用いた。ノーズキャップを模擬したC/C材平板に取付金具を組合わせた供試体の形状と寸法を図1に示す。取付金具は、図に示すように、C/C材平板に接するセラミックワッシャ、2枚のラミネートシム、チタン合金製支持部材、および、主構造部材を模擬したアルミニウム合金平板に接するポリイミドワッシャの各部品から構成される。供試体を構成するこれらの部品の材質とその熱物性値を表1に示す。取付金具とC/C材平板あるいはアルミニウム合金平板との結合は鉄基耐熱合金 INCOLOY MA956 製のボルトおよびナットを用いている。ボルトの締付けトルクは $65 \pm 5 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ である。図1の中の記号T1, T2, …, T11は温度の計測点を示す。温度はガラススール被覆のK熱電対を用いて計測した。図2に熱電対を取付けた側、すなわち図1のAの方向から見た温度計測点の位置を、また、表2にC/C材平板の裏面を基準に計測した各熱電対の取付け位置までの距離を示す。供試体の外観写真を図3に示す。

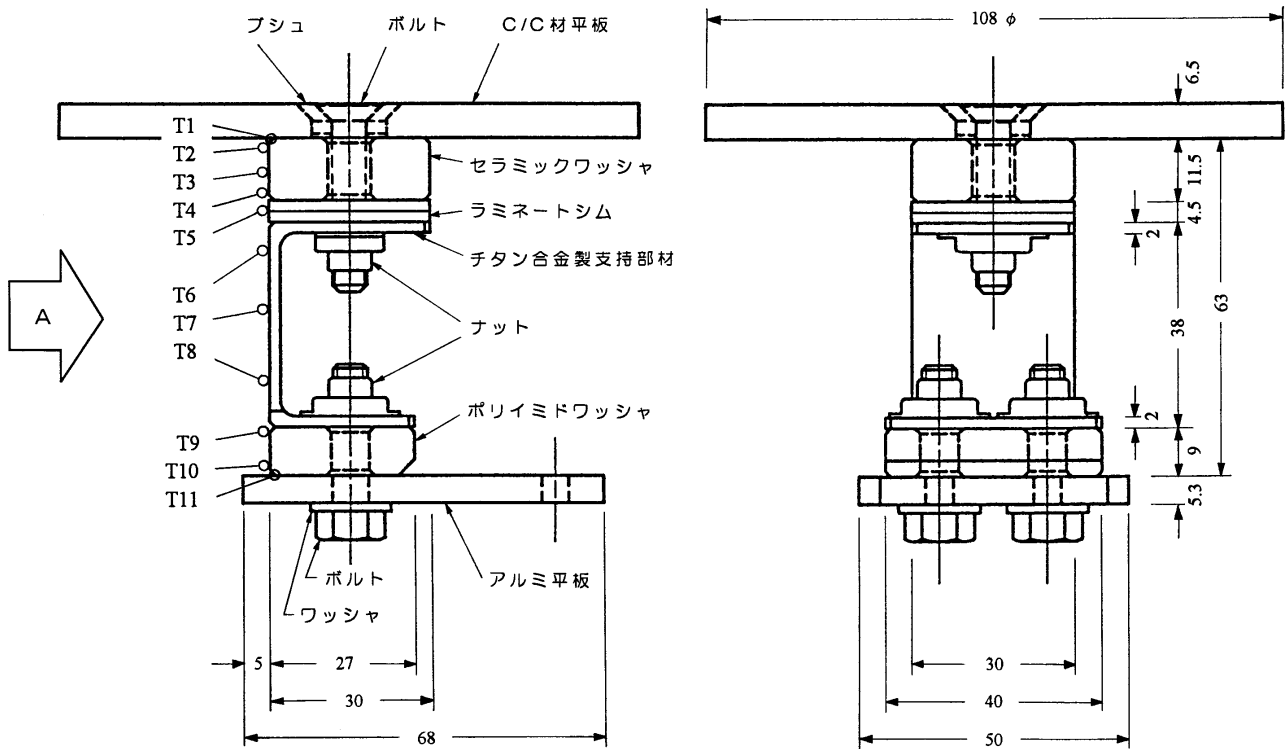


図1 供試体の形状と寸法

表 1 構成部品の材質と熱物性値

部品名称	材 質	温度 K	比熱 kJ/(kg K)	密度 kg/m ³	熱伝導率 W/(m K)		温度伝播率 × 10 ⁻⁶ m ² /s	
					面内方向	厚さ方向	面内方向	厚さ方向
C/C材平板	C/C複合材	773	1.56	1620	42	8.2	16.6	3.24
セラミック ワッシャ	MASERITE S (実測値平均)	600	0.76	2550	1.465		0.756	
ラミネート シム	AISI 302 (MIL-HDBK-5E)	700	0.57	7920	21.1	-	4.67	-
チタン合金 製支持部材	TI-6AL-4V (MIL-HDBK-5E)	478	0.61	4430	8.6		3.18	
ポリイミド ワッシャ	NL-PIG-13 (実測値平均)	400	0.83	1950	0.69	0.46	0.426	0.284
アルミ合金 平板	7075-T7351 (MIL-HDBK-5E)	311	0.85	2800	157		66	

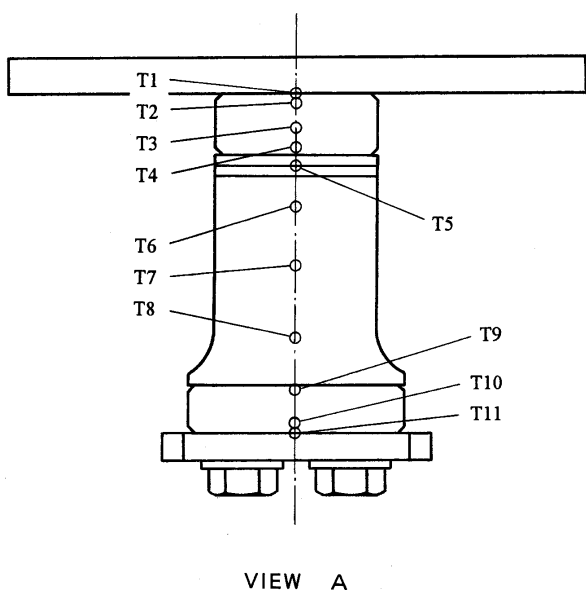


図 2 温度計測点の位置

表 2 温度計測点の位置

計 測 点	計測点 記 号	C/C材平板裏面からの 距離 (mm)
C/C材平板 / セラミックワッシャ界面	T1	0.0
セラミックワッシャ上部	T2	1.5
セラミックワッシャ中部	T3	6.5
セラミックワッシャ下部	T4	10.5
ラミネートシム	T5	13.5
チタン合金製支持部材上部	T6	21.0
チタン合金製支持部材中部	T7	32.0
チタン合金製支持部材下部	T8	46.5
ポリイミドワッシャ上部	T9	54.5
ポリイミドワッシャ下部	T10	61.5
ポリイミドワッシャ / アルミ合金平板界面	T11	63.0

3. 試験装置および試験方法

高熱負荷環境下での供試体各部位の温度履歴データを取得するため、試験は、超高温材料研究センターが所有する極超高温酸化/揮散試験機(ウシオ電機 製造)を用いて実施した。以下、試験装置と試験方法の概略について述べる。

3.1 試験装置

極超高温酸化/揮散試験機についてはすでに詳細な報告²⁾があるので、ここでは本加熱試験に関連して簡単に述べる。本試験機は、材料の高温下での酸化状態や、高真空下での加熱におけるアウトガスの状態を試験する装置であって、出力 30 kW のクセノンランプ加熱装置、光

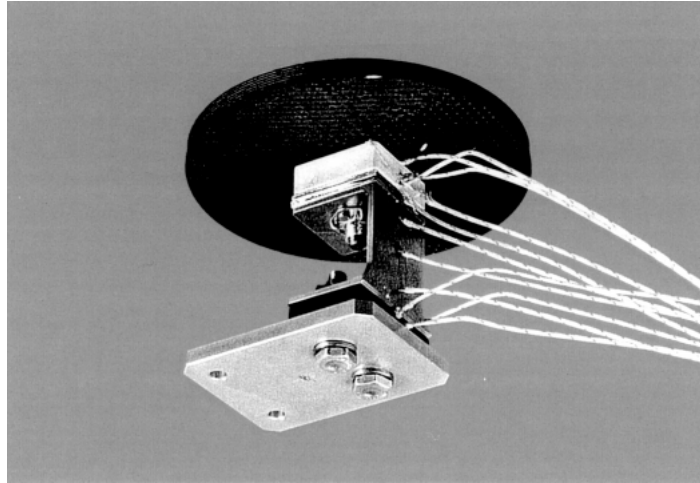
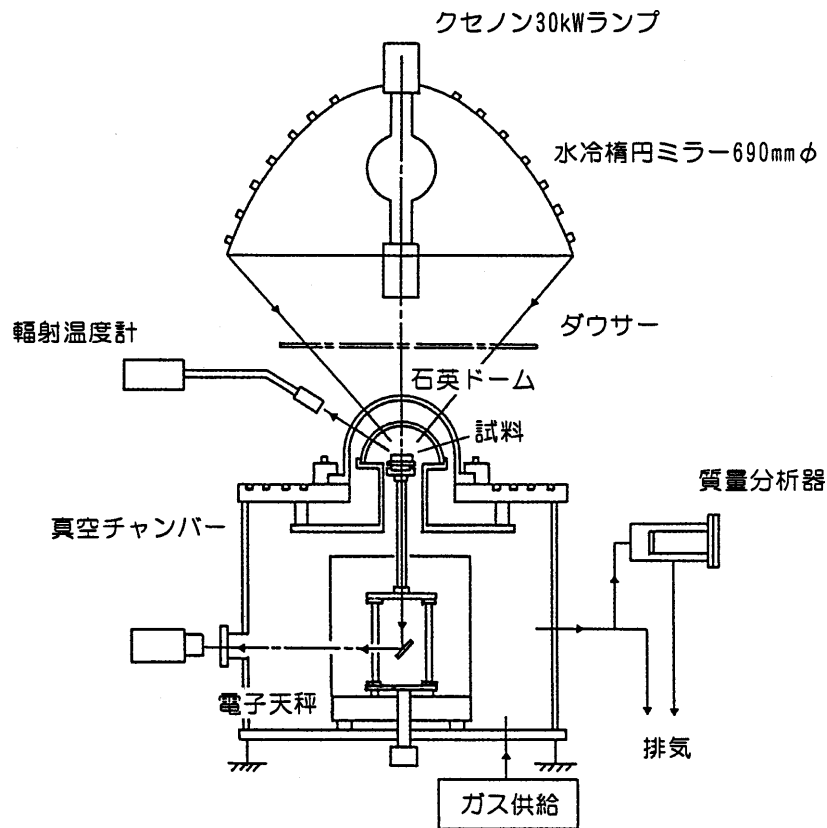


図3 供試体の外観

図4 試験装置の概略²⁾

伝送系を形成する水冷楕円ミラー、および大気から 10^{-6} Torrまでの真空中に排気できる真空チャンバーから構成され、クセノンランプからの光エネルギーを光学ミラーで試験材料の表面に集光し、試験材料表面の56 mm の領域を 2.5 MW/m^2 の高密度の光エネルギーで加熱することができる。真空チャンバーの上端には石英製のドームが取付けられており、試験材料はこのドーム内に置かれ、真空チャンバーの外部にあるクセノンランプにより大気側から石英ドームを透して加熱される。また、真空チャン

バーには温度計測、重量測定、ガス分析が同時に行なえるデータ処理系が備えられている。試験装置の概略を図4に示す。

なお、加熱率の測定には、熱流束計（米国メドサム社製GT-50-16-2-492T）を使用した。この熱流束計は、センサーハウジングの外形寸法が6.35 mm と小型かつ軽量で、センサーとしてガードン・ゲージを用い、 500 kW/m^2 までの高熱流束を測定することができる。センサーの熱流束の吸収率は0.92である。使用した3本の熱流束計

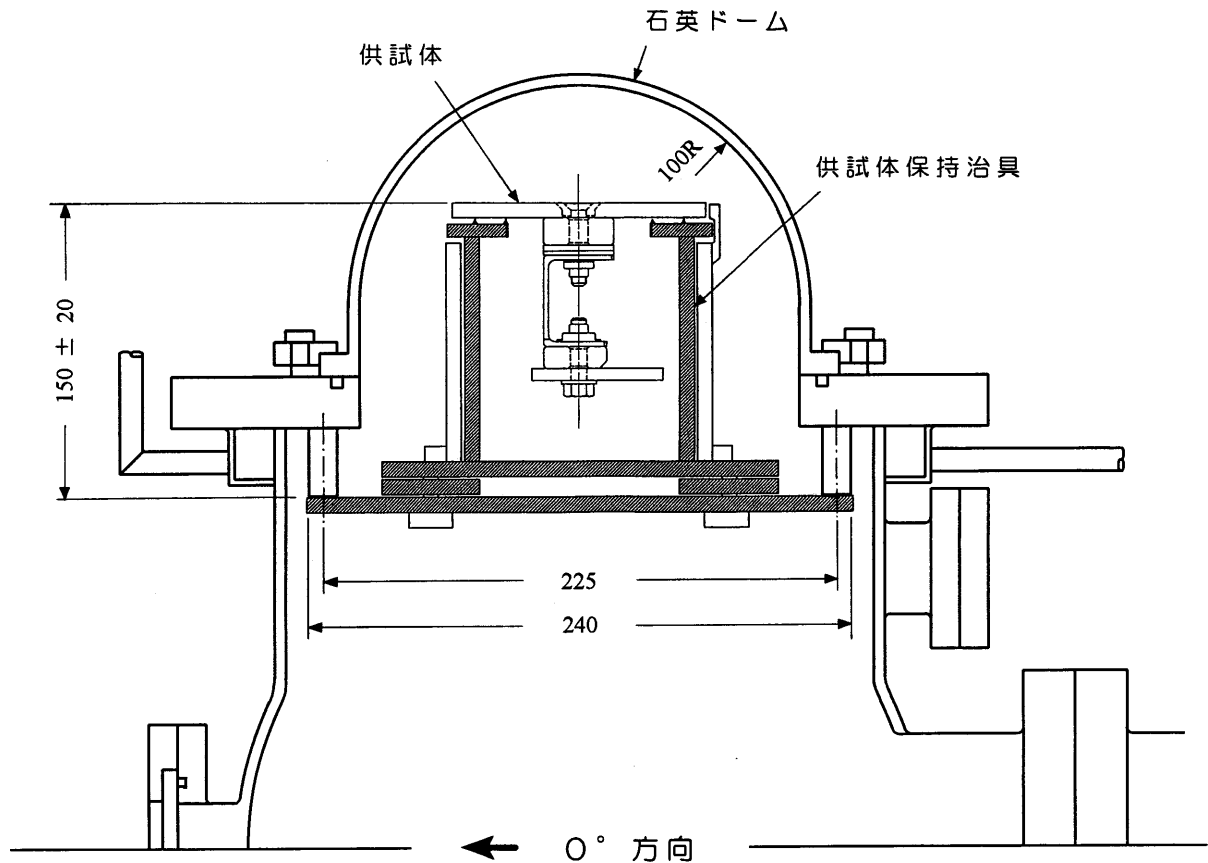


図5 試験装置と供試体保持治具とのインタフェース

は、定格の 500 kW/m^2 の吸収熱流束に対して、それぞれ 9.82, 9.95 および 9.74 mV の電圧を出力する。出力電圧は吸収熱流束に対して直線的に変化する。

3.2 試験方法

図5に試験装置と供試体保持治具とのインタフェースを示す。試験は、先ず、供試体の加熱面であるC/C材平板を均一に加熱できるような加熱の条件を選定するための予備試験を行ない、加熱の条件設定の後に、実際の供試体の加熱試験を実施した。

3.2.1 予備試験

予備試験では、加熱装置の光伝送系の光軸と供試体保持治具の中心とが一致するように供試体保持治具の位置を調整し、また、加熱率の同一投入電力に対する再現性、加熱率の分布、および加熱率の時間的変動を把握し、これらが許容の範囲に収まるように条件設定を行なった。以下に、その概略を述べる。

光伝送系光軸に対する供試体保持治具位置の調整

供試体保持治具の中心にステンレス板を置き、クセノンランプ光を照射し、ステンレス板にできる加熱痕の中心を光軸位置と見なして、数回の加熱を繰返し、加熱痕と供試体保持治具の中心とが一致するように供試体保持

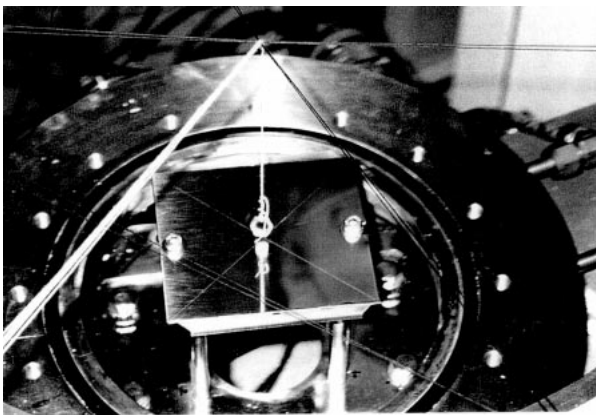
治具の位置を調整した。光軸に対する保持治具位置の調整の状況および位置調整後の加熱によりステンレス板にできた加熱痕の様子を図6にそれぞれ示す。

加熱率の再現性の確認

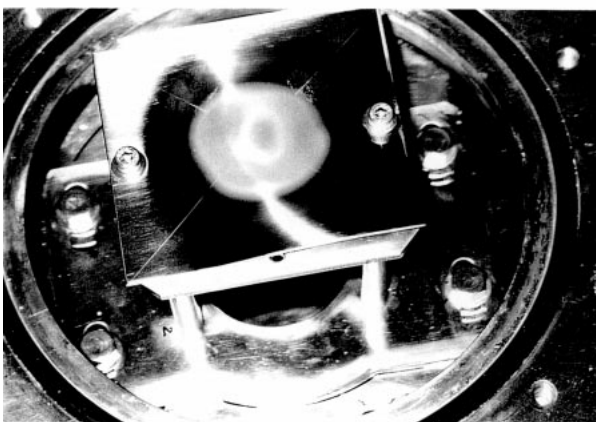
供試体保持治具中心を光軸に一致させた後、3本の熱流束計を、それぞれ光軸中心、光軸中心より10 mm、および20 mmの位置に配置固定できる熱流束計固定用ステンレス板に取付け、それを供試体保持治具の中心に設置し、クセノンランプの電流値を400 A、供試体保持治具底面からの加熱面すなわち、熱流束計固定用ステンレス板の外表面までの高さを127.4 mmとし5回の加熱を行なって、試験装置の加熱率の再現性および3本の熱流束計の出力のバラツキの程度を確認した。加熱率の測定は、クセノンランプ点灯後、ランプ光の安定のため一定時間経過した後に行なった。試験結果を表3に示す。表中の加熱率の値は測定した20秒間の平均値である。また、S1、S2およびS3は、3本の熱流束計を個々に区別して表わすために、各々の熱流束計に付した呼称である。同一投入電力に対するランプ光の再現性は、試験番号Y1、Y2およびY3の測定結果に見られるように、3回の試験の繰返しで $\pm 2 \sim 3\%$ 程度のバラツキであり、ランプ光の再現性は比較的良好であることが判った。また、3本の熱流束計の位置を順次取替えて各位置で1回ずつ測定した試

表 3 加熱率の再現性

試験番号	加熱率 (kW/m ²)		
	光軸中心	中心より10mm	中心より20mm
Y1	(S1) 293.31	(S2) 245.30	(S3) 201.24
Y2	(S1) 297.66	(S2) 264.98	(S3) 210.65
Y3	(S1) 295.86	(S2) 254.02	(S3) 201.51
Y4	(S2) 292.99	(S3) 262.50	(S1) 208.44
Y5	(S3) 279.28	(S1) 252.91	(S2) 190.69



(a) 光軸に対する保持治具位置調整の状況



(b) 位置調整後のステンレス板の加熱痕

図 6 光軸に対する供試体保持治具位置の調整

試験番号 Y4 および Y5 の測定結果ならびに最初の 3 回の試験の測定結果から、同一測定位置に対する 3 本の熱流束計の出力のバラツキは、それらの平均値に対して最大で $\pm 5\%$ 程度となり、個々の熱流束計による出力のバラツキは小さいことが確認された。

加熱率の面分布の均一性の確認

まず、加熱面の位置すなわち、供試体保持治具底面からの加熱面高さ、の高低が加熱率の分布に与える影響を見るため、熱流束計を光軸中心、光軸中心より 10、20、および 30 mm の位置に熱流束計固定板を用いて設置し、この固定板の表面すなわち、加熱面、の保持治具底面から

の高さを、それぞれ 147.4、161.7、および 157.2 mm と順次変えて、ランプ電流 400 A で加熱し、それぞれの加熱面高さに対する加熱率を測定した。その結果、加熱面高さ 147.4 mm では、加熱率の測定値の平均は 185.12 kW/m^2 と高い値を示したものの、加熱率測定位置間のバラツキは $\pm 15\%$ と大きかった。加熱面高さ 161.7 mm では、加熱率のバラツキは $\pm 9\%$ 弱と小さくなったが、加熱率の平均値も 159 kW/m^2 と小さくなった。加熱面高さ 157.2 mm では、加熱率の測定値平均は 173.9 kW/m^2 と比較的高く、しかも加熱率測定位置間のバラツキは $\pm 6\%$ 程度と小さい結果が得られた。この結果により、以後、供試体保持治具底面からの加熱面の高さの設定は 157.2 mm に固定した。この加熱面高さで、クセノンランプ電流を 500 A に上げて加熱した結果は、加熱率の測定値が平均で約 250 kW/m^2 、加熱率測定位置間のバラツキが $\pm 7\%$ と、いずれも良好な値を示した。次いで、この加熱条件で、加熱平面内の光軸の点を中心として、図 5 に示した 0° の方向と、それを基準に 90° および 180° の方向の加熱率分布をそれぞれ測定した。表 4 に試験結果を示す。光軸を中心として 20 mm の領域の平均加熱率は 256.4 kW/m^2 、40 mm の領域の平均加熱率は 255.5 kW/m^2 、60 mm の領域の平均加熱率は 247.4 kW/m^2 であり、測定全数の加熱率平均値に対する各測定位置での加熱率測定値のバラツキは、 0° および 180° の方向では光軸中心より 20 mm の位置で $\pm 5\%$ 以内であったが、30 mm の位置では 15% を示した。 90° 方向でも光軸中心より 20 mm の位置では 5% 程度であった。これらの結果から、光軸中心より 40 mm の領域でほぼ均一な加熱が実現されていることが判った。

加熱率の時間的変動幅の確認

実際の供試体の加熱試験は、後述するように、真空中で行なわれる。また、供試体の加熱面には熱流束計を直接埋め込んで取付けるわけにはいかないため、試験時は供試体加熱面への入射熱流束を直接に測定することはできない。そのため、実際の試験では、供試体加熱部の外周端部の近傍、光軸中心から 60 mm、保持治具底面からの高さ 152.4 mm の位置にモニタ用の熱流束計を取付け、

表4 加熱率の分布状況

単位：kW/m²

0° 方向			↑	262.03 (+ 5.90)	20 mm	180° 方向							
			↓	263.46 (+ 6.48)	10 mm								
30mm	20mm	10mm	光軸中心	10mm	20mm	30mm	227.02 (- 8.25)	256.05 (+ 3.48)	255.25 (+ 3.16)	252.35 (+ 1.99)	254.56 (+ 2.88)	244.83 (- 1.05)	211.29 (- 14.61)

- ・測定全数の加熱率の平均値は247.43kW/m²
- ・数値は各測定位置における全測定数の平均値
- ・ () 内の数値は加熱率平均値に対するバラツキ

その測定値から供試体加熱面への入射熱流束を推定する方法が採用される。

そこで、本予備試験では、最終的な加熱の条件設定として、真空中での加熱による加熱率の時間的変動を把握することと、同時にモニタ位置での加熱率測定値と加熱面中心領域での加熱率測定値との関係を知るために、真空雰囲気中での加熱率の測定を行なった。熱流束計は、今までと同様に、真空チャンパー内の供試体保持治具上に熱流束計固定板を用いて光軸中心と光軸中心から 20 mm の位置になるように設置し、さらにモニタ用の熱流束計を光軸中心から 60 mm の所定の位置に取付けた。また、クセノンランプと加熱面である熱流束計固定板との間にランプ光を遮断するシャッターを配置した。そして、真空チャンパーを所定の真空度に排気して、クセノンランプに一定電力を投入し、ランプ点灯後、400、450、500 および 600 秒経過時に、それぞれ 20 秒間シャッターを開放し加熱率を測定した。試験結果を表 5 に示す。表中の () 内の数値は加熱率の平均値に対するバラツキを示している。また、“金網” とあるのはメッシュ 50 の金属製の網のことで、低加熱率での加熱を実現するために、ランプと加熱面との間に置き、加熱面への入射加熱率を低く抑え込むために用いたものである。なお、メッシュとは 1 インチの長さの間にある網の目の数をもって網目の大きさを表わす単位である。この表に見られるように、同一測定位置に対する加熱率の時間的変動は ± 4 % 以内と小さな値であり、加熱率の時間による変動は小さいことが確認された。次に、これらのデータから、モニタ位置での加熱率測定値と加熱面の中心領域での加熱率測定値との関係を見いだすための手掛かりとして、加熱率の光軸中心での測定値と光軸中心から 20 mm の位置での測定

値との比、およびモニタ位置での測定値との比をそれぞれ算出してみると表 6 のようになる。各測定位置での加熱率の値は各時間毎の測定値の平均値を用いた。表中、 q_0 は光軸中心での加熱率、 q_{20} は光軸中心から 20 mm の位置での加熱率、 q_m はモニタ位置での加熱率である。各試験ケース毎の q_{20}/q_0 および q_m/q_0 の値は、試験の加熱条件の違いがあるにもかかわらず、それぞれ大略一定と見なせる値を示している。すなわち、光軸中心の加熱率と光軸中心から任意の位置の加熱率との比は、クセノンランプの出力の大きさには依存せず、光軸中心からの距離にだけ依存して定まると云うことである。さて、 q_m/q_0 の値の平均値は 0.2771 であるから、この値をもちいれば、モニタ位置での加熱率と光軸中心での加熱率との関係は次式で与えられることになる。

$$q_0 = 3.61 q_m$$

この式から、モニタ位置での加熱率を測定すれば、光軸中心の加熱率の値をおおよそ推定することができる。

なお、ここで注意すべきは、ここまで述べてきた加熱率の測定値は、当然のことではあるが、供試体に輻射されるクセノンランプ光の輻射熱流束そのものではなく、熱流束計に入射した熱流束の値であることである。したがって、熱流束計で測定した加熱率の大きさ q は、熱流束計受感部の輻射吸収率を ϵ と記せば、クセノンランプ光の輻射熱流束を E として、次の形で与えられる。

$$q = \epsilon E$$

今回の試験の場合、使用した熱流束計受感部の輻射吸収

表 5 真空中加熱率時間変化

試験番号	熱流束計位置	熱流束計配置方向	ランプ電流 (A)	金網	加熱率 (kW/m ²)					備考
					400 sec	450 sec	500 sec	600 sec	平均値	
Y16	中心	0°	500	無	281.76 (+3.69)	270.85 (+0.32)	262.58 (-3.37)		271.73	高加熱
	20mm				275.16 (-0.56)	278.28 (+0.56)	278.28 (+0.56)		276.72	
	モニタ				76.82 (-0.51)	77.41 (+0.26)	77.40 (+0.25)		77.21	
Y17	中心	0°	500	無			280.52 (+1.70)	271.15 (-1.70)	275.84	高加熱
	20mm						267.65 (+0.09)	268.15 (+0.09)	267.90	
	モニタ						74.57 (-0.64)	75.53 (+0.64)	75.05	
Y18	中心	180°	500	無	291.27 (+1.23)	289.53 (+0.62)	285.04 (-0.94)	285.13 (-0.91)	287.74	高加熱
	20mm				253.69 (-1.04)	256.08 (-0.11)	257.04 (+0.27)	258.64 (+0.89)	256.36	
	モニタ				74.10 (-0.78)	74.62 (-0.08)	74.82 (+0.19)	75.19 (+0.68)	74.68	
Y19	中心	0°	500	有	83.63 (-0.12)	83.73 (-0.00)	83.54 (-0.22)	84.01 (+0.34)	83.73	低加熱
	20mm				79.42 (-0.61)	79.73 (-0.23)	80.19 (+0.35)	80.30 (+0.49)	79.91	
	モニタ				21.79 (-1.30)	21.99 (-0.40)	22.20 (+0.55)	22.33 (+1.14)	22.08	
Y20	中心	0°	500	無	286.06 (-1.88)		280.61 (+2.71)	270.95 (-0.83)	273.21	高加熱
	20mm				265.72 (-0.45)		266.56 (-0.13)	268.46 (+0.58)	266.91	
	モニタ				74.97 (-0.82)		75.51 (-0.11)	76.29 (+0.93)	75.59	
Y23	中心	0°	600	無	355.50 (-0.13)			356.42 (+0.13)	355.96	高高加熱
	20mm				386.87 (+1.37)			376.41 (-1.37)	381.64	
	モニタ				99.36 (-0.25)			99.85 (+0.25)	99.61	
Y24	中心	0°	680	無	439.08 (-0.06)			439.52 (+0.06)	439.34	極高加熱
	20mm				470.12 (+1.06)			460.22 (-1.06)	465.17	
	モニタ				123.97 (-0.29)			124.70 (+0.29)	124.37	
Y25	中心	0°	500	無	258.50 (-0.43)		260.08 (+0.18)	260.25 (+0.25)	259.61	高加熱
	20mm				294.71 (+2.36)		288.93 (+0.36)	280.07 (-2.72)	287.90	
	モニタ				76.75 (-0.63)		77.36 (+0.16)	77.61 (+0.48)	77.24	

表 6 q_{20}/q_0 および q_m/q_0 の値

試験番号	q_{20}/q_0	q_m/q_0
Y16	1.0184	0.2841
Y17	0.9712	0.2721
Y18	0.8909	0.2595
Y19	0.9544	0.2637
Y20	0.9769	0.2767
Y23	1.0721	0.2798
Y24	1.0588	0.2831
Y25	1.1090	0.2975
平均値	1.0065	0.2771

率は、0.92 であるから、式 の関係は次のようになる。

$$q = 0.92 E$$

さて、ここで、クセノンランプ光が、後述の実際の供試体の加熱面である C/C 材平板を、加熱率 E で照射する場合を考えてみる。このとき、C/C 材平板の吸収する熱流束を q_{cc} 、その輻射吸収率を e_{cc} と表わせれば、 q_{cc} は式と同様の形に次のように書き表わせる。

$$q_{cc} = e_{cc} E$$

したがって、熱流束計による加熱率の測定値 q と C/C 材平板の吸収熱流束 q_{cc} との間には次の関係があることが判る。

$$q_{cc} = (e_{cc}/e) q$$

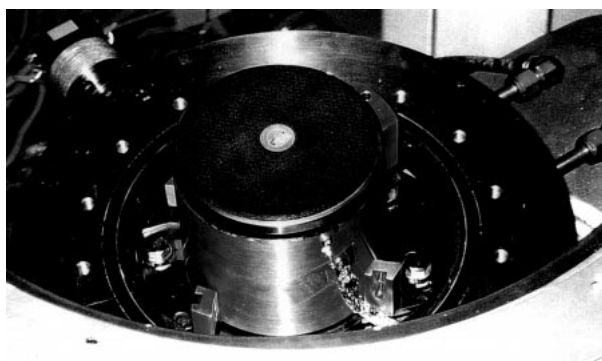
C/C 材平板の輻射率の大きさは 0.85 程度であるから、上式は次のようになる。

$$q_{cc} = 0.924 q$$

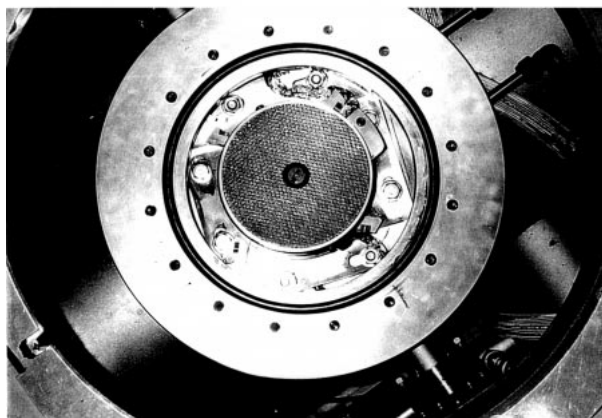
この式により、実際の供試体の加熱試験において、C/C材平板への入射熱流束のおおよその大きさを算定することができる。

3.2.2 本試験

予備試験で得た加熱の条件設定データより試験条件を定めて、供試体の加熱試験を行ない、供試体各部位の温度履歴データを取得した。試験は、供試体の熱伝導特性に与える大気による対流熱伝達の影響を排除するため、すべて真空中で行なった。図7に試験装置への供試体の取付け状況を示す。供試体の加熱面を与える輻射加熱率の大きさは、先の予備試験の結果を踏まえ、それぞれ加熱面の中心部領域に、熱流束計での測定値換算で、おおよそ80, 250, および460 kW/m²の3通りの熱流束を与えることにした。これらの値は、C/C材平板へ入射する熱流束に換算すると、式から、それぞれ74, 231, および425 kW/m²程度となる。加熱率の大きさはモニタ位置に取付けた熱流束計でチェックした。なお、本報告では上記の80, 250, および460 kW/m²の加熱率の加熱を、便宜のため、それぞれ低加熱、高加熱、および極高加熱と名付け、以下の記述において、それらの呼称をしばしば用いる。加熱時間は、80 kW/m²の加熱率に対しては50, 100および



(a) 斜め上方から見た状況



(b) 真上から見た状況

図7 供試体の試験装置への取付け状況

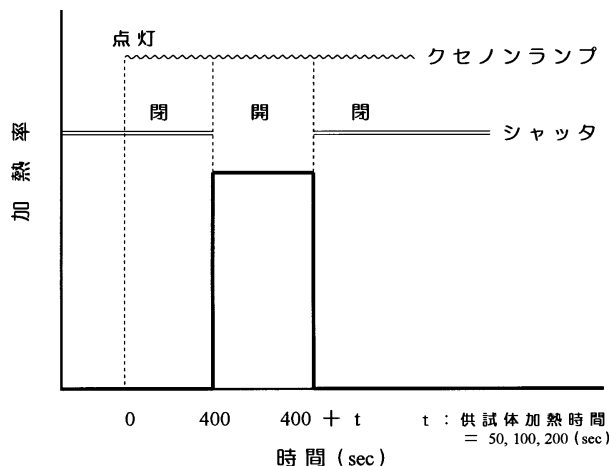


図8 加熱率の時間履歴

300 secに、250 kW/m²に対しては50, 100および200 secに、460 kW/m²に対しては50および100 secに設定した。図8は加熱率の時間履歴を模式的に表わしたものである。なお、試験時間は、加熱開始時刻の30 sec前を基準時刻として、50 secおよび100 secの加熱時間の試験に対してはそれぞれ約400 secおよび450 secとし、200 secおよび300 secの加熱時間の試験に対してはおおよそ550 secとして、その間の供試体の温度データを収録した。

4. 試験結果および考察

加熱試験で実施した試験ケースの一覧を表7に示す。試験番号H3の高加熱試験において、真空度が加熱開始時の 1.0×10^{-4} Torrから加熱終了直前には 1.3×10^{-3} Torrまで低下したため、試験後に供試体の目視検査をしたところ、ラミネートシム部に発泡した樹脂の炭化物が確認された。そのままの供試体を用いて、試験番号U1の極高加熱試験を行なったところ、後掲の図9(U1)に見られるように、与えた熱流量に対する応答としては不自然な供試体の温度上昇が観測された。試験後にラミネートシムの交換を行なった後、高加熱および低加熱の再現性確認試験を行なった。これらの試験での供試体の温度上昇は、最初の試験に比べて、全体に僅かに低めで、また、真空度に若干の低下が認められたが、ラミネートシムには変化は見られなかった。そこで、再び試験番号U1と同じ試験条件で、試験番号U2の極高加熱試験を行なったところ、真空度が加熱開始時の 1.0×10^{-4} Torrから加熱終了直前には 1.8×10^{-3} Torrまで低下した。続いて、加熱時間を長くした極高加熱試験、試験番号U3、を行なったところ、真空度は加熱開始時の 1.0×10^{-4} Torrから加熱終了直前には 4.6×10^{-3} Torrまで低下した。この真空度の低下は再びラミネートシムに使用されている樹脂が分解したことを示唆するものである。試験終了後、供試体を

表 7 試験ケース

試験名称	試験番号	真空度 (Torr)		加熱面 高さ (mm)	ランプ 電 流 (A)	金網	加 熱 時 間 (sec)	備 考		
		加熱開始時	加熱終了直前							
低加熱 試 験	L 1	1.0×10^{-4}		157.2	500	有	50			
	L 2						100			
	L 3						300			
高加熱 試 験	H 1	1.0×10^{-4}					500		無	50
	H 2									100
	H 3	1.0×10^{-4}	1.3×10^{-3}							200
極高加熱 試 験	U 1	1.0×10^{-4} 以下			680	無	50		不自然な温度上昇，試験 後にラミネートシム交換	
	U 2	1.0×10^{-4}	1.8×10^{-3}				50			
	U 3	1.0×10^{-4}	4.6×10^{-3}				100			

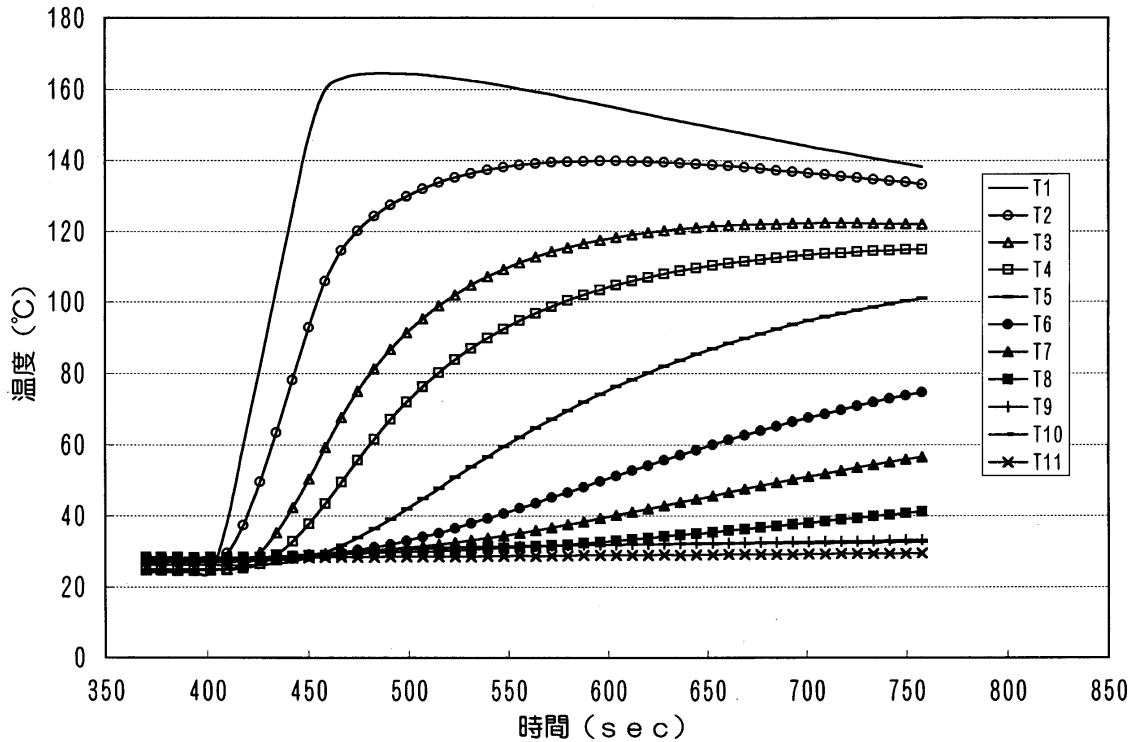


図 9 (L 1) 供試体各部位の温度履歴；加熱率 80 kW/m^2 ，加熱時間 50 sec

分解調査したところ，供試体全体にヤニ状の付着物が確認された。図 9 に試験で得られた供試体各部位の温度履歴を示す。各図において，時間軸の 400 sec の時刻が加熱開始時刻であり，データは加熱前 30 sec から記録されている。また，図中の T1, T2, …, T11 は図 2 に示した供試体各部位の温度計測点であって，T1 はノーズキャップを模擬した C/C 材平板とセラミックワッシャとの界面，T2, T3, T4 はセラミックワッシャ，T5 はラミネートシム，T6, T7, T8 はチタン合金製支持部材，T9, T10 はポ

リイミドワッシャ，そして T11 はポリイミドワッシャと主構造部材を模擬したアルミニウム合金平板との界面の温度の計測点をそれぞれ示している。実施した試験ケースの中で，試験番号 U1 の極高加熱試験における供試体の温度上昇が与えられた熱流量に対する応答として不自然な挙動を示したことは前に述べたが，確かに，試験番号 U1 の極高加熱試験で得られた供試体の温度履歴を表わす図 9 (U1) を見てみると，その温度 - 時間曲線は，ステップ状の加熱に対する応答としては明らかに不自然な形を

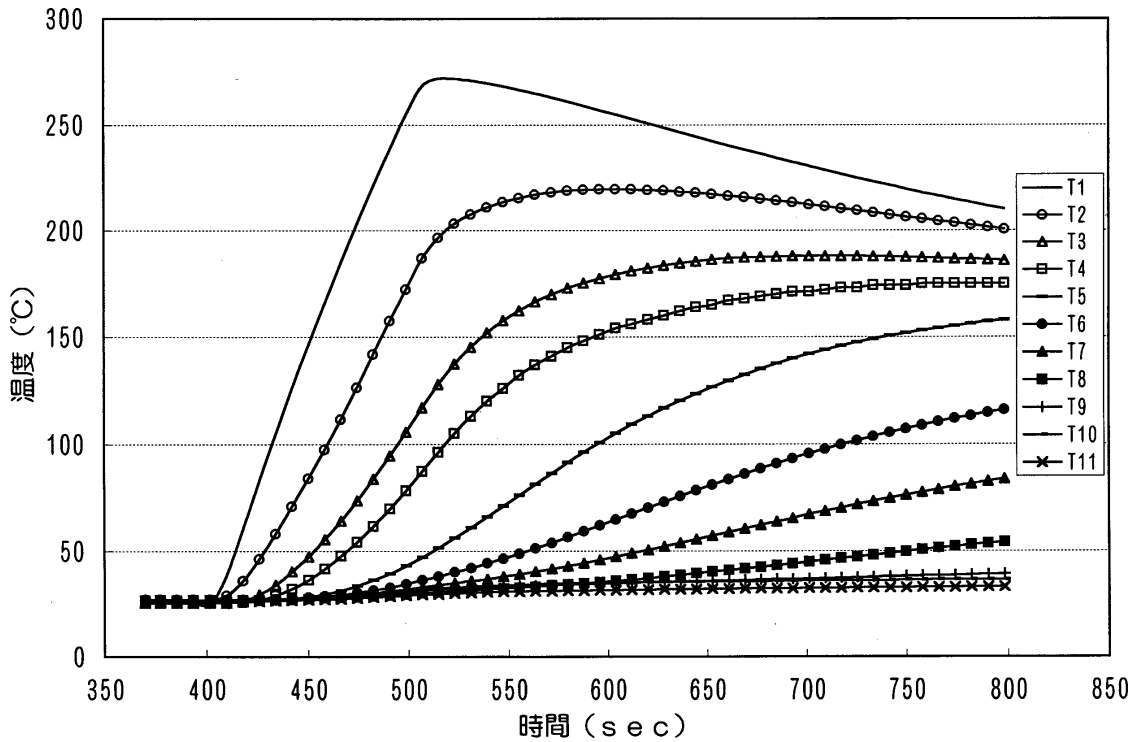


図9 (L 2) 供試体各部位の温度履歴；加熱率 80 kW/m^2 ，加熱時間 100 sec

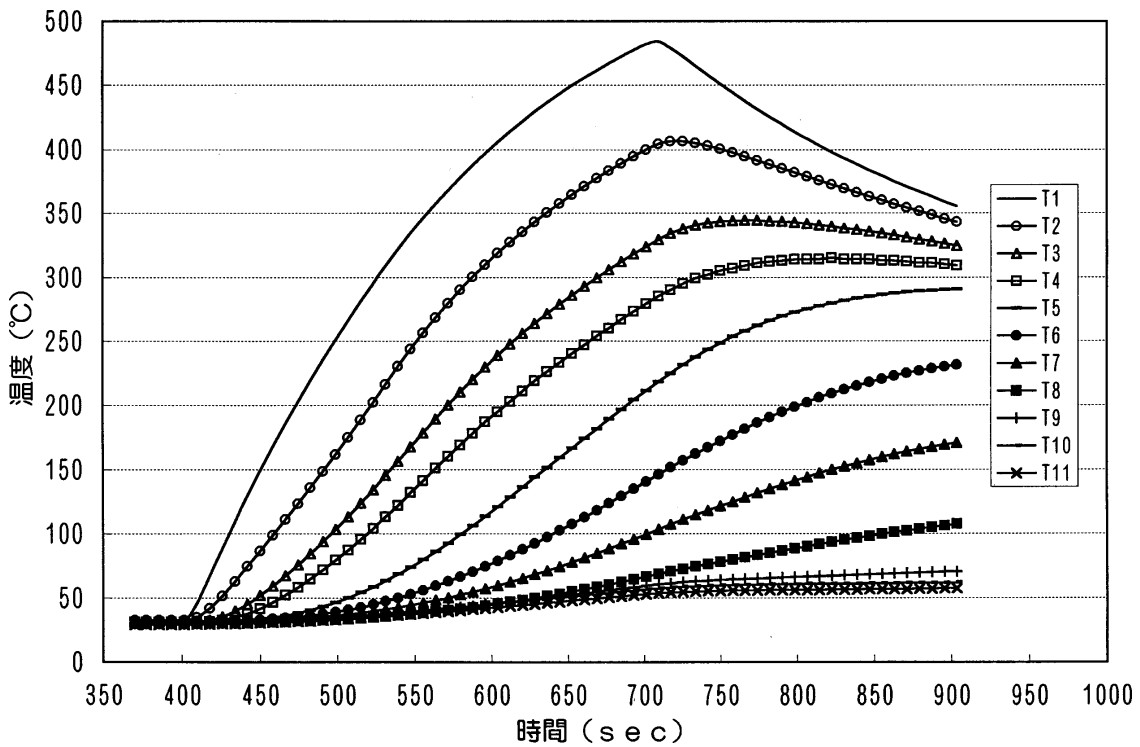


図9 (L 3) 供試体各部位の温度履歴；加熱率 80 kW/m^2 ，加熱時間 300 sec

示している。しかも、その温度上昇の割合は与えられた熱流量に対してかなり低いことが判る。例えば、この試験番号U1の極高加熱試験と試験加熱時間が同じ試験番号H1の高加熱試験の温度上昇を比較してみると、極高加

熱試験は高加熱試験よりも多量の熱流量を同じ加熱時間内に与えられているのであるから、その供試体温度上昇は高加熱試験のそれよりも高い値を示さねばならないのが当然である。それにもかかわらず、図9 (U1)および

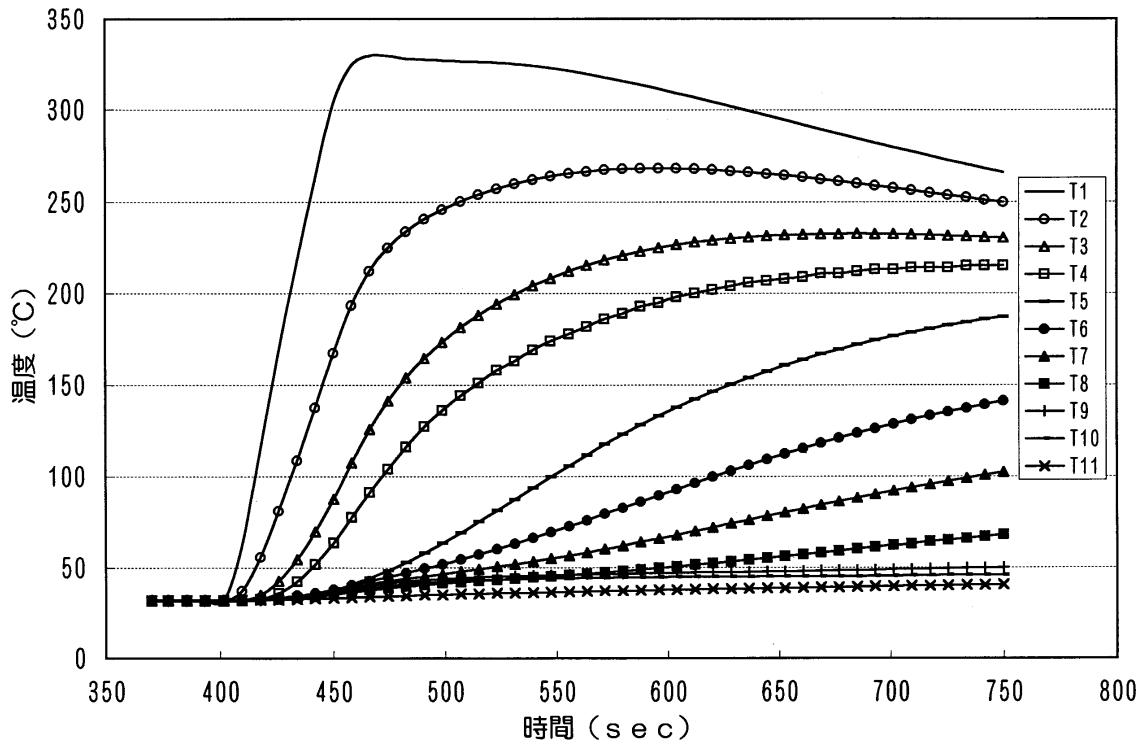


図9 (H 1) 供試体各部位の温度履歴；加熱率 250 kW/m^2 ，加熱時間 50 sec

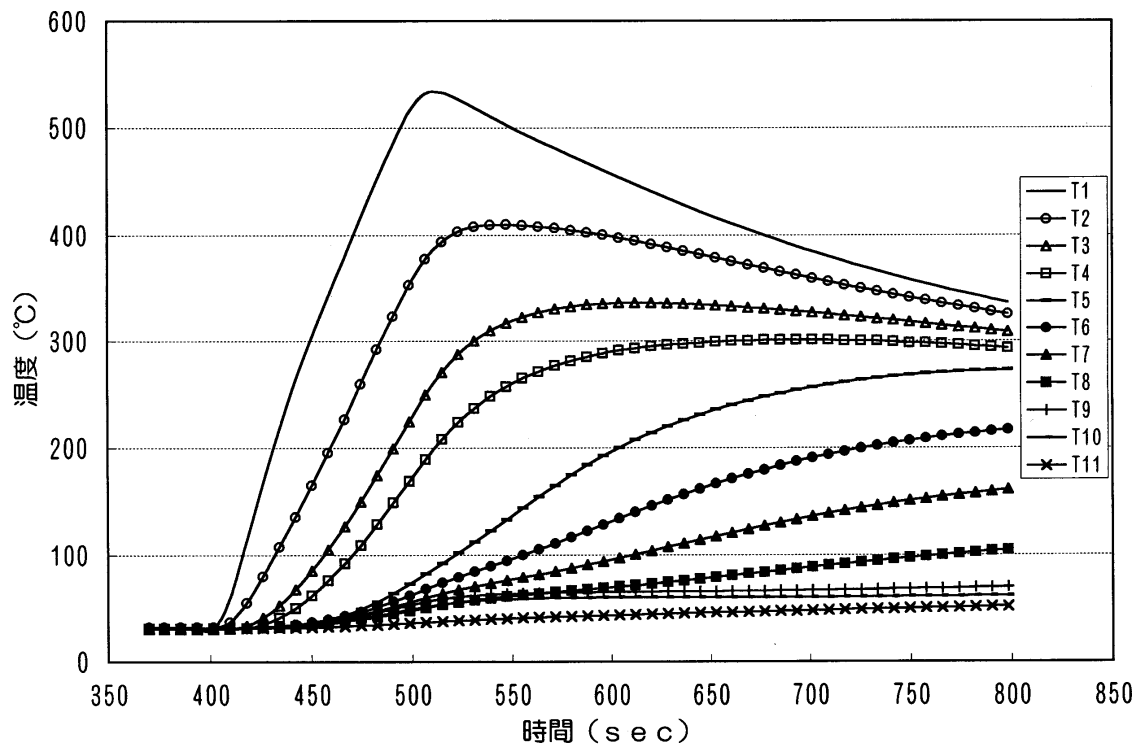


図9 (H 2) 供試体各部位の温度履歴；加熱率 250 kW/m^2 ，加熱時間 100 sec

(H1)を見てみると、極高加熱試験の供試体の温度上昇は、逆に全体にかなり低く、加熱開始後 50 sec 経過時すなわち、加熱終了時点での C/C 材平板裏面の温度を比較してみると、高加熱試験では約 303 であるのに対して、

極高加熱試験では約 229 である。また、この試験番号 U1 の極高加熱試験の前に実施された試験番号 H3 の高加熱試験において、真空度が加熱開始時の 1.0×10^{-4} Torr から加熱終了直前には 1.3×10^{-3} Torr まで低下し、そして、試

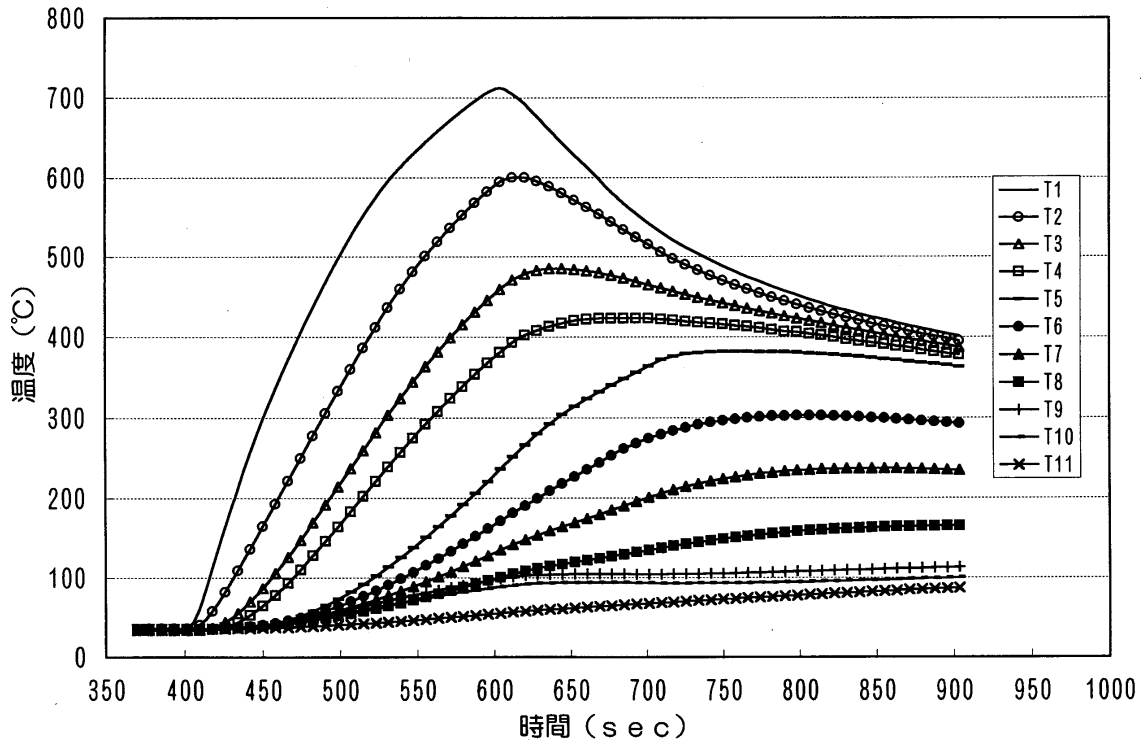


図9 (H 3) 供試体各部位の温度履歴；加熱率 250 kW/m²，加熱時間 200 sec

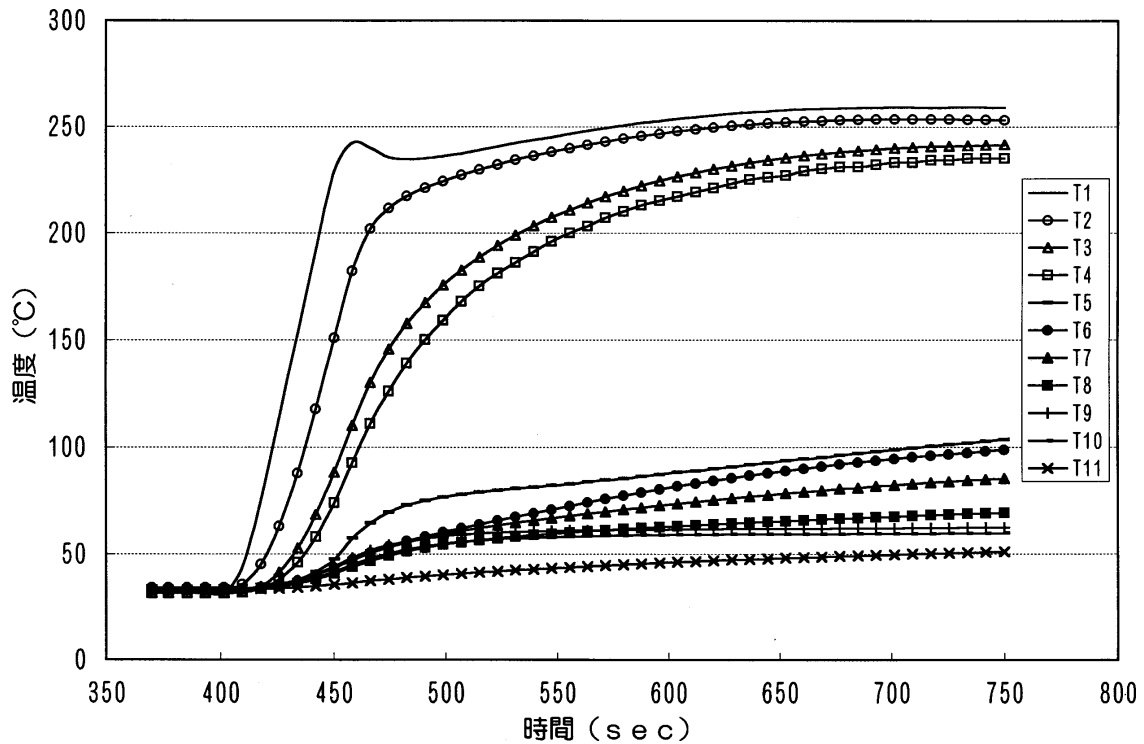


図9 (U 1) 供試体各部位の温度履歴；加熱率 460 kW/m²，加熱時間 50 sec

験後の供試体の目視検査で、ラミネートシム部に発泡した樹脂の炭化物が確認されたことはすでに述べたとおりである。こうした事実から、図9 (U1)の不自然な供試体の温度上昇は、ラミネートシムに用いられている樹脂が

熔融、蒸発そして炭化することで熱を消費し、また、その際に発生したガスが供試体を冷却したことによるものと考えられ、いわゆる樹脂のアブレーション効果に起因したものであろうと推測される。さて、図9の(U1)を除

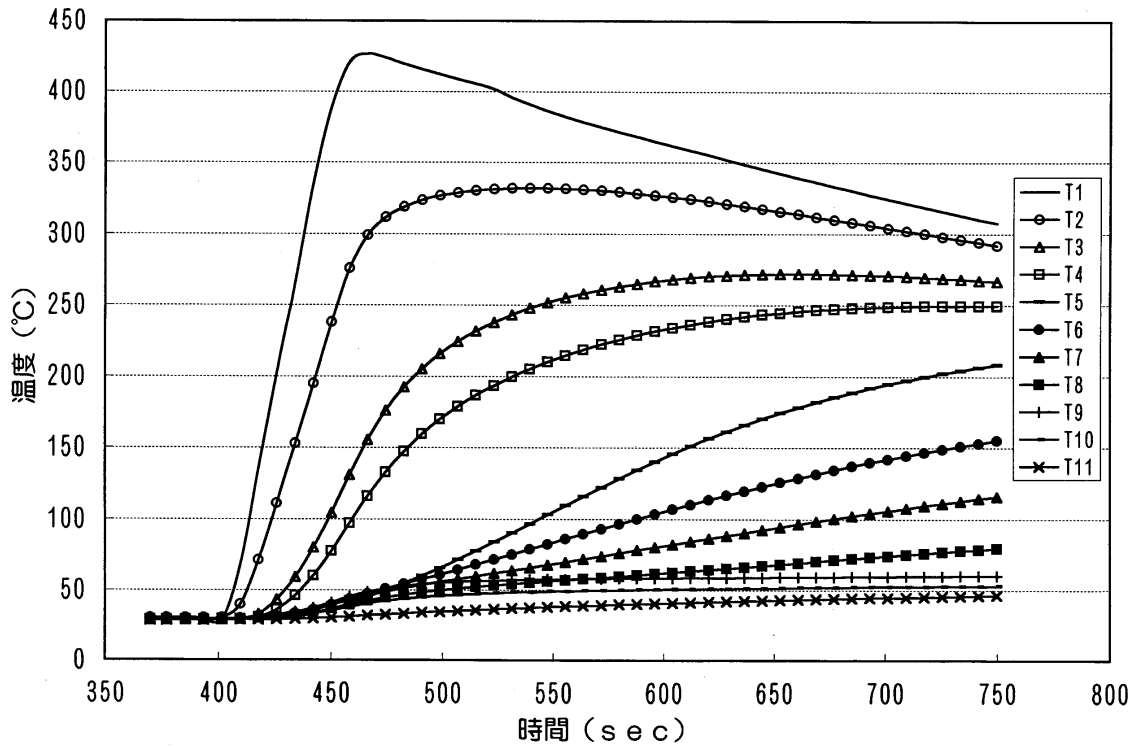


図9 (U 2) 供試体各部位の温度履歴；加熱率 460 kW/m^2 ，加熱時間 50 sec

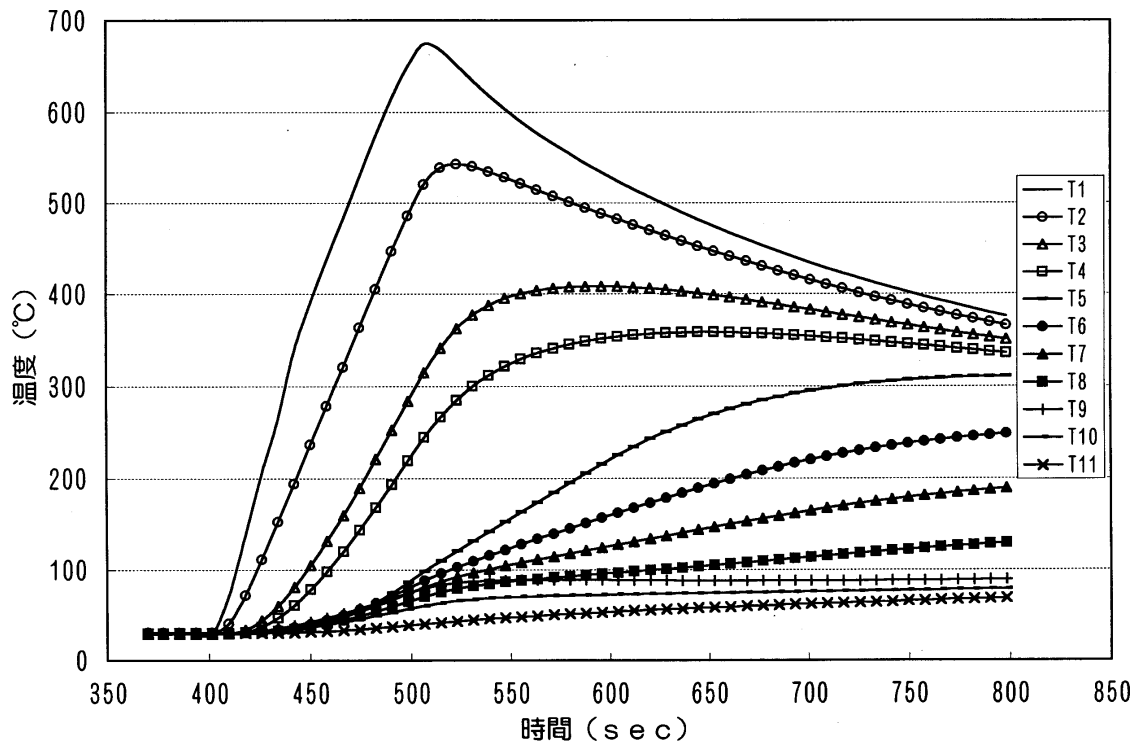


図9 (U 3) 供試体各部位の温度履歴；加熱率 460 kW/m^2 ，加熱時間 100 sec

く各図において、計測点T1の温度とT11の温度、すなわちC/C材裏面の温度とアルミニウム合金平板の温度の履歴を見てみると、いずれの加熱率と加熱時間の場合も、T1の温度は加熱開始後急激に上昇して加熱終了時刻を僅

かに経過した時点で最大となり以後下降に転ずるが、T11の温度は加熱開始時から緩やかにそして僅かに上昇し加熱終了後もそのまま緩やかな上昇を続けている。そして、T1の温度が最大になるときは、T11の温度はまだ殆ど

上昇しておらず、その温度上昇に大きいタイムラグがあることが判る。各部位の温度が最も上昇した加熱率が約 250 kW/m^2 、加熱時間が 200 sec の場合の図 9 (H3) で見てみると、T1 の温度が最大になるのは時刻 602 sec のときでその値は 714 (加熱前 33.3) であるが、このとき T11 の温度は僅かに 54.9 (加熱前 35.2) であり、この時刻から約 300 sec 経過した試験終了時の 904 sec においてそれまで最大の 87.3 となる。試験終了時点で、T11 の温度はなお上昇を続ける傾向にあるが、その温度上昇の速度は温度勾配から見てかなり緩やかであろうことが推察され、 180 のアルミニウム合金の耐熱使用限度には、この試験の加熱条件に限って言えば、まだまだ余裕があることが判る。また、チタン合金製支持部材の T6、T7 および T8 の温度を見てみると、それらがそれぞれ最大となるのは、 766 、 806 および 839 sec の時刻で、それらの値はそれぞれ 382.3 、 302.8 および 236.7 である。これらの温度の値は、いずれもチタン合金の耐熱使用限度内に収まっており、本試験の加熱条件の下では、なお余裕があることが判る。

このように、HYFLEX 機のノーズキャップ取付金具を模擬した供試体は、本試験で与えた熱負荷の下では主構造を想定したアルミニウム合金平板への熱伝導に対して十分な熱抵抗を有していることが判った。しかしながら、実際の再突入時の加熱環境は、加熱率および加熱時間ともども、より過酷であって、前述したように、加熱面である C/C 材表面の温度は 1700 にも達するので、主構造の温度も本試験の結果に比べ、かなり上昇することが考えられる。また、一方、その場合でも、実機主構造は、本供試体のアルミニウム合金平板に比べ、その熱容量が格段に大きいことから、取付金具から伝熱された熱は主構造のより内部に次々と伝播して吸収され、その温度上昇の速度は以外とゆっくりとしたものになることも考えられる。いずれにしても、本試験の結果のみから実際の再突入時の加熱環境での取付金具の熱応答特性を評価することは困難であり、数値シミュレーションなどの手法を用いなくてはならないであろう。これについては、今後

の課題として、本研究で実測した熱応答データの結果とコンピュータによる熱応答数値シミュレーションとを組み合わせ、実測データに裏付けされた信頼性の高い数値シミュレーションによる熱応答特性評価を進めていこうと考えている。

5. 結 言

ノーズキャップ取付金具の熱伝導の様子を把握するために、取付金具を模擬した供試体を用いて、それぞれおおよそ 80 kW/m^2 、 250 kW/m^2 および 460 kW/m^2 の 3 通りの加熱率の下での加熱試験を行ない、供試体各部位の温度データを取得した。

ノーズキャップを模擬した C/C 材裏面の温度が最大になるときは、機体主構造部材を模擬したアルミニウム合金平板の温度はまだ殆ど上昇しておらず、その温度上昇にタイムラグのあることが観察された。本加熱試験の加熱条件に限って言えば、ノーズキャップ取付金具は主構造を模擬したアルミニウム合金平板への熱伝導に対して十分な熱抵抗を持っていることが判った。

今回の試験により、試験環境をきちっと押さえた条件下でのノーズキャップ取付金具の熱伝導特性データを取得することができた。目下、本試験を模擬した数値シミュレーションを実施すべく、熱伝導計算モデルの作成作業を進めている。

なお、本試験は、三菱重工業株式会社 名古屋航空宇宙システム製作所が契約者となり、株式会社超高温材料研究センター 岐阜センターで実施された。ここに関係各位に厚く感謝の意を表す。また、当所 空力特性研究部の藤井 啓介技官には、実験メモの一部を提供して頂いた。記して深く感謝の意を表わす。

参考文献

- 1) 航空宇宙技術研究所、宇宙開発事業団；“HYFLEX/HOPE-Symposium 講演前刷集”，1996年7月24日
- 2) 超高温材料研究センター / ウシオ電機；リーフレット“極超高温酸化 / 揮散試験機”

航空宇宙技術研究所資料 738号

平成 11 年 5 月 発行

発行所 科学技術庁航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話 (0422) 40-3075 ㊦ 182-8522
印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川 2 - 27 - 12

禁無断複写転載

本書(誌)からの複写, 転載を希望される場合は, 管理部
研究支援課資料係にご連絡ください。

Printed in Japan