

赤外線ランプ方式熱真空加熱試験装置による 宇宙往還機高温結合部供試体加熱試験*

高崎 浩一^{*1} 大竹 邦彦^{*1} 遠藤 修司^{*1}

Vacuum Radiant Heating Simulation Test of a Reentry Vehicle Hot Section Model*

Koichi TAKASAKI^{*1}, Kunihiko OHTAKE^{*1}, Shuji ENDO^{*1}

ABSTRACT

In the Structural and Material Research Center of National Aerospace Laboratory, the vacuum heating test equipment using the infrared lamp was newly developed, and the heating test of water-cooled specimen and C/C composite plate with thermal protection attachment were carried out. The test results showed that the performance of the heating test equipment was around $260\text{kw}/\text{m}^2$. Also it was confirmed this test equipment could perform a step input into the infrared quartz lamp that was useful for system identification. In this paper, the outlines of the development of an infrared quartz lamp heating system and results of its heating tests are shown.

Keywords: thermal structure, radiant heating test, temperature measurement.

概 要

航空宇宙技術研究所構造材料総合研究グループ熱構造研究グループにおいて、我々は新たに赤外線ランプを用いた真空加熱試験装置を製作し、その基本性能の確認のための予備加熱試験、および再突入機高温結合部分を模擬した供試体に対する真空下の加熱試験を行った。その結果、加熱試験装置の性能は最大約 $260\text{kw}/\text{m}^2$ と推算された。また、赤外線ランプの速い応答性によりシステム同定に有用なステップ状入力が容易に行える事を確かめる事ができた。本報告では今回の試験装置開発の経緯と、各加熱試験結果について報告、考察する。

1. はじめに

国内外において宇宙往還機やスペースプレーンの開発のための技術研究が近年行われている。その中で、大気圏における超音速飛行、及び大気圏への再突入の飛行を行う機体に生じる強い空力加熱を模擬するための加熱試験装置については、海外においては1960年代から超音速飛行及び大気圏再突入時の極超音速域を想定した加熱試験が複数行われてきた。^{1),2),3),4)}

特に宇宙往還機が地球大気圏に再突入するような場合、マッハ数20以上、空力加熱率が $400\text{Kw}/\text{m}^2$ 以上の厳しい熱環境に耐える事が要求される。しかしながら、国内においては強力な熱流束が入力する耐熱構造に関するデータを得るために十分な性能を發揮できる地上試験装置が少なく、開発のための技術データに乏しいのが現状である。筆者らは、過去複数の加熱試験装置を試作し、各種の加熱試験を行い試験装置及び試験実施についてのノウハウ獲得に努めてきた。^{5),6)}

* 平成12年11月14日受付 (Received 14 November 2000)

*1 航空宇宙技術研究所 構造材料研究グループ

本報告では、耐熱部分構造の高熱負荷環境下における熱応答特性試験のために新たに製作した赤外線ランプ方式による熱真空加熱試験装置および本装置を用いた加熱試験の内容と結果について述べる。

2. 熱真空加熱試験装置の概要

今回製作した熱真空加熱試験装置の特徴は新たに導入した赤外線ランプと、それを用いて真空化で加熱を行なうための石英ガラスベルジャーであり、より実際の環境に近く熱伝達を同定し易い真空条件下において、供試体に対してより操作入力に対する追従性の良い加熱を与える事が可能となっている。以下、装置の全体構成と各部分の詳細について述べる。

2.1 全体構成

熱真空加熱試験装置の全体構成を図1に、概観を図2に示す。装置は石英ガラスベルジャー、赤外線ヒータ、真空チャンバ、パワーコントローラ、冷却系、及び計測系から成る。

本装置の主な設計仕様を以下に示す。

- 石英ガラスベルジャー 直径600mm, 700mm長
- 赤外線ヒータ本体
Research Inc. 製5208-10 36kW/480V
- クォーツランプ
Q6M/T3/Cl/HT 6管/各ヒータ

- 真空チャンバ

800mm直径,

真空度：大気圧 \sim 0.67Pa(0.005Torr)

2.2 真空チャンバ

本試験に使用された真空チャンバはステンレス鋼SUS304製の内径800mm、長さ800mm、肉厚7mmの円筒形で、一端は肉厚25mmの平板の扉で密閉され、もう一端は後述の石英ガラスベルジャーを取り付ける構造となっている。真空度は、日本真空技術製PVD-360真空ポンプにより約0.67Pa(0.005Torr)までの真空度を達成することができる。チャンバの壁面と扉には観測用の窓と電力及び冷却水の導入、熱電対の取り出しのためのフランジ付き開口部が設けられている。

2.3 石英ガラスベルジャー

真空環境下に赤外線ランプを設置して加熱することはランプ冷却方法の問題から実質困難なため、真空チャンバに取り付ける石英ガラスベルジャーを新たに作成して設置した。石英ガラスベルジャーの断面図及びその寸法を図3に示す。ベルジャーは底の張りだし部分を押しあわせる形でOリングを介して金具を用いて真空チャンバに取り付けられる。このベルジャーの外側からランプによる加熱を行う。加熱面の肉圧は5mmである。このベルジャーに用いられた石英ガラスは東芝セラミックスT-1030で、その入

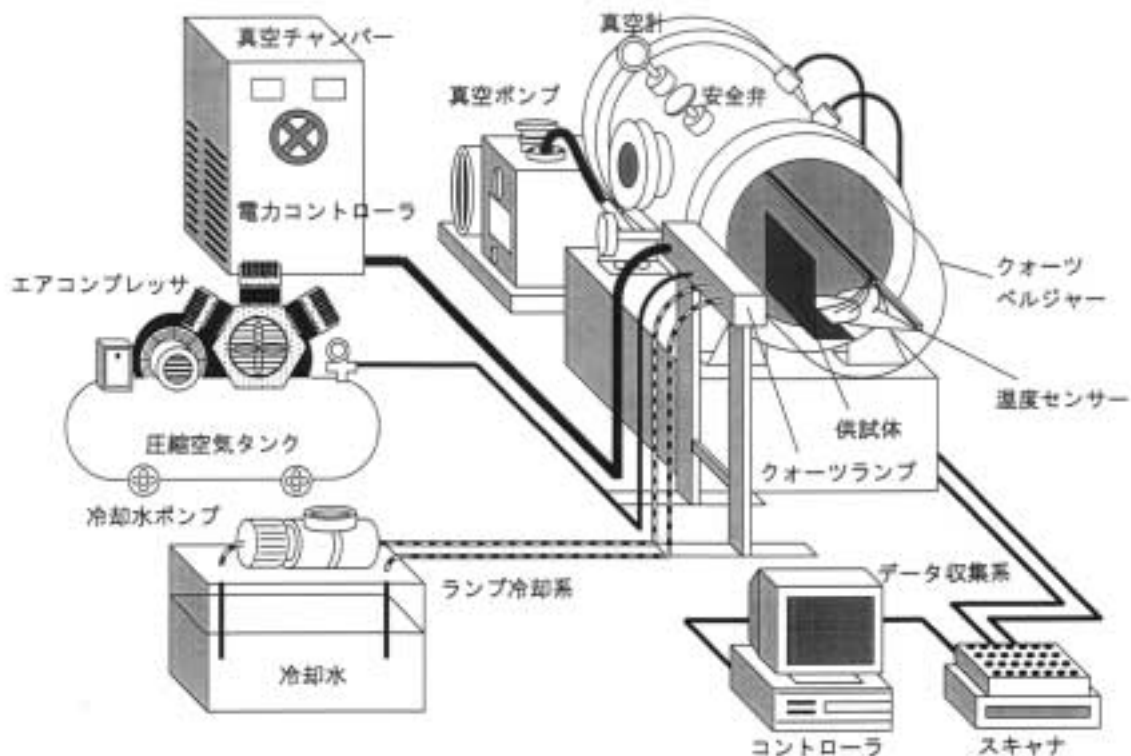


図1 熱真空加熱試験装置の全体構成図



図2 熱真空加熱試験装置の概観

射波長に対する透過率特性を図4に示す。赤外域を含む各波長に対する透過率は良好であるが、この図において注意すべき点として、赤外領域では波長 $2.7\mu\text{m}$ 付近において吸収率が大きく最大値は60%となっている。図4を元に、標準入力時のフィラメント温度 3200K のランプから $400\text{kw}/\text{m}^2$ の熱流束が入射した時にどれだけのエネルギーの割合がベルジャーに吸収されるか、黒体放射のプランクの式から概算したところ、約6%となった。これはベルジャーからの熱放出と熱伝導が無いという危険側の仮定であっても毎秒約 2°C の温度上昇にとどまる。また、グラフの平坦な部分では、実際使用するベルジャーの測定結果によれば透過率が約94%であり、別データからみて透過率が肉厚に依存しない事から、残りの失われたエネルギーはほぼ全て反射と考えられ、吸収される割合は少ない。両者と考え合わせると、通常予想される試験時間(300秒以内)であれば、ベルジャーの過熱の危険は少ないと考えられる。

このベルジャーに用いられている石英ガラスの注意すべき特性として失透現象と呼ばれる物がある。これは表面に不純物が付着したまま加熱した場合に起きる、石英ガラスがアモルファス状態から安定な結晶状態への遷移する現象である。この反応は特にアルカリ/アルカリ土類の金属化合物が付着したまま加熱した場合に反応が顕著となる。よって、常に表面を清潔に保ち、取り扱いは素手で行わないように注意する必要がある。

2.4 赤外線ヒータ

本加熱装置に用いられた赤外線ヒータの概略図を図5に示す。ヒータはResearch Inc.製High Density Infrared Heater Model5208-10⁸⁾であり、アルミニウム製の筐体内に6個のコーツランプを内蔵し、反射板を水冷、ランプ前面の石英ガラス窓とコーツランプ本体及び結合端子の冷却を乾燥空気にて行う。使用されているコーツラン

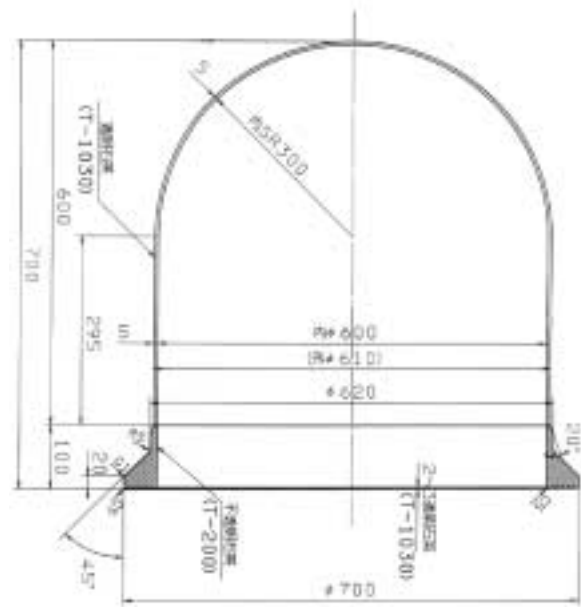
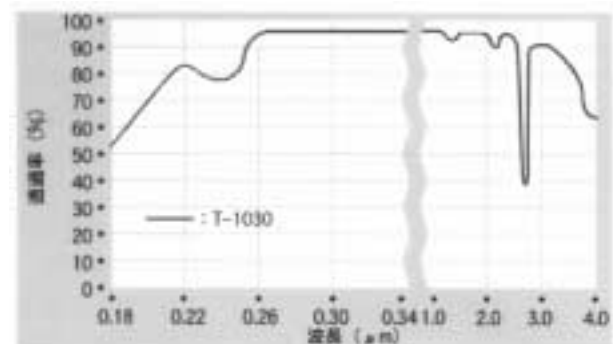


図3 石英ガラスベルジャーの断面図

図4 石英ガラスT-1030の透過率のスペクトル特性¹⁾

プは1管あたり6kw, 全体で36kwの出力を発生する。図6に示されるように、時定数は1秒以下と前世代の赤外線ランプ5)と比べて非常に高速である。(図においてコーツランプのみ時間軸の単位がsecondsになっていることに注意)このことにより、供試体の伝熱特性の同定に有用であるステップ状入力を容易に行う事が可能になる。本試験で用いたのと同様の赤外線ランプによる加熱試験法については文献4に詳しく記述されている。このような赤外線コーツランプによる加熱の利点は、先述した非常に良い制御追従特性の他に、制御に電力を使用するため安定した加熱特性が得られること、対象物の物性の依存性が電磁波加熱に比べて少ないこと、また今回新たに作成した試験装置のような真空環境下での加熱が、今回の試験のようにベルジャーを使用する事で部分構造については比較的容易に行えることが挙げられ、結果伝熱数学モデルの同定のための熱力学的に単純な状態を得ることができる。ヒータに用いられるコーツランプ単体の概観を図7に、コーツランプの放

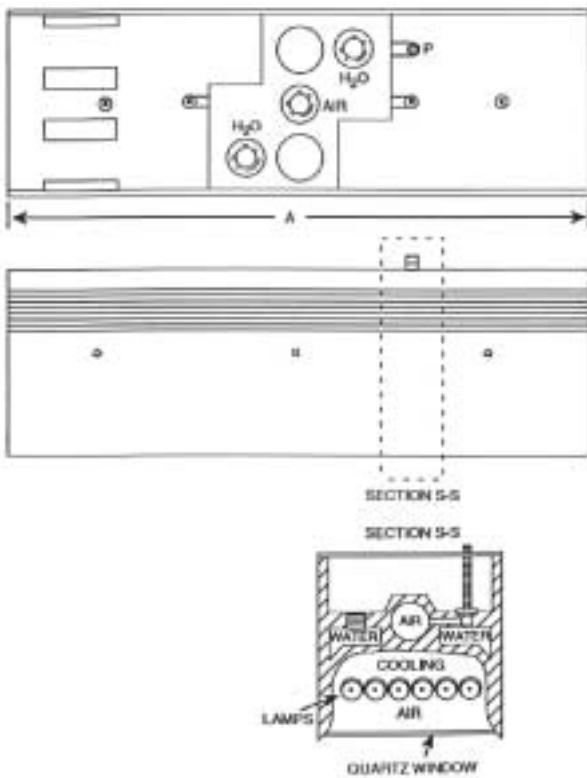


図5 赤外線ヒータの概略図⁸⁾

射スペクトル特性を図8に示す。

2.5 電力設備、パワーコントローラ

前記の赤外線ヒータを制御するためにResearch Inc.製電子式パワーコントローラModel664F⁹⁾も同時に導入された。関連してランプに供給する電圧を確保する三相400V 2000KVAの電源装置も導入された。パワーコントローラの概観を図9に示す。

このような赤外線ランプ用の電子式パワーコントローラの採用している出力電圧の制御法には、交流電圧の各サイクルの始まりにOn/Offを決定するゼロクロス制御と、交流電圧の半サイクルの間のOn/Offの時間比率を調整する位相制御とがある。本装置に用いられているのは後者で、電力制御に伴う電磁ノイズが少量発生するものの、前者に比べてパワーコントローラ入力値に対する分解能が高く、短時間変動の少ない加熱制御が可能になっている。

電力制御素子には半導体スイッチング素子の一種であるサイリスタが一對で使用されている。素子自体の電力損失はヒータに比べて非常に小さく、フィンを用いた自然空冷のみで対応できる。

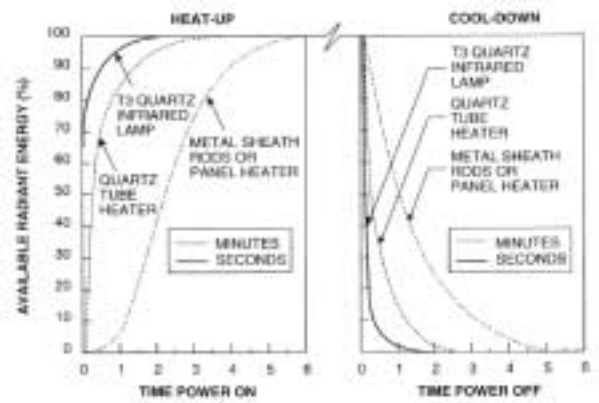


図6 コーツランプの応答特性⁸⁾

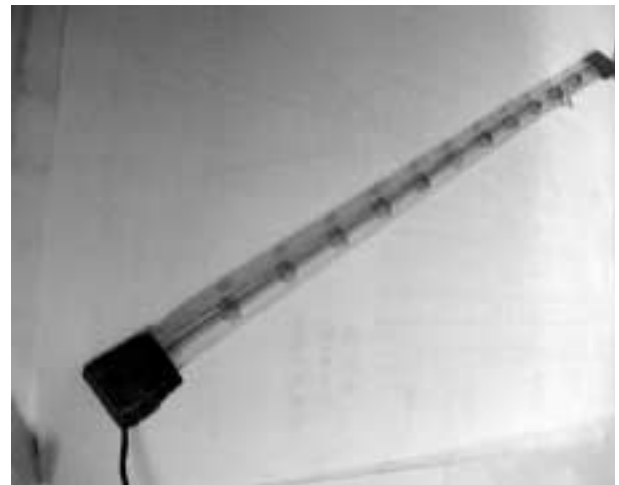


図7 コーツランプ単体の概観

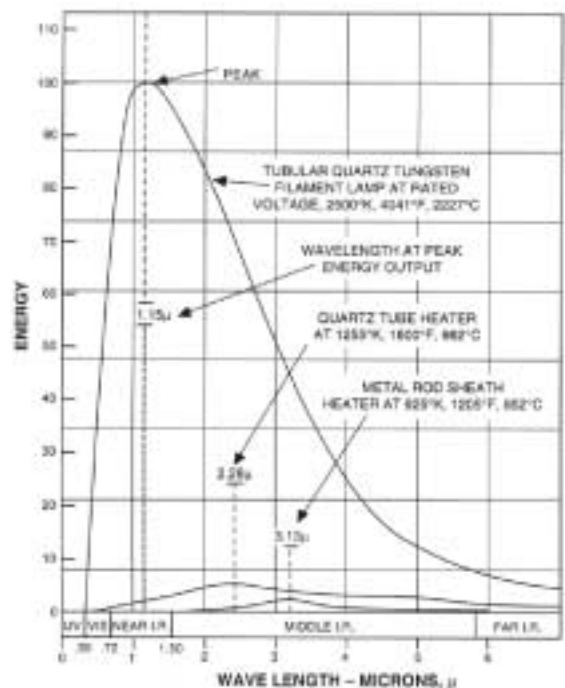


図8 コーツランプの放射スペクトル特性⁸⁾

図9 パワーコントローラーの概観⁹⁾

2.6 冷却系

ランプの反射板とクォーツランプ本体及び端子は冷却が必要であり、前者は水冷、後者は空冷により行われる。供試体側を冷却する場合は主に水冷を用いる。水冷冷却系の構成は容量約35ℓの水タンクと電動ポンプ（丸山製作所20-RXAS-150TE）、供試体に連結する配管、その間に設置するデジタル流量計（エステックLF10-PTN、計測範囲1.5-20ℓ/min）である。赤外線ランプは、その本体が水冷、及びクォーツランプ単体と結合端子が強制空冷される仕様になっている。空気の供給源はコンプレッサ（日立ベビコン7.5P-9.5、最大吐出空気流量840ℓ/min）を用い、ランプへの配管の途中に空気乾燥機（明治機械製作所DRC-4B）と油分除去フィルター（明治機械製作所MAO-06G及びMAA-06G）を配置している。赤外線ランプの冷却空気排出口にはK型熱電対を設置し、冷却空気出口温度は各測定中においてリアルタイムでモニターされる。ランプ反射板冷却系は、タンク容量を除いて供試体冷却系とほぼ同様の仕様である。

2.7 計測系

供試体の温度は、高温が予想される領域にはガラス繊維で被覆された素線直径0.25mmのK型熱電対を、それ以外はテフロン樹脂で被覆された素線直径0.2mmのK型熱電対を用いて計測された。図10に計測系の概観を示す。真空チャンバ内で計測を行なう場合、熱電対は供試体と反対側の端の直径1.6mmのソケットコンタクトに接続された後、真空チャンバ壁のフランジ付き開口部に設けた24極の端子（日電アネルバ954-7972）に差し込まれ、真空チャンバ外の補償導線と結線される。補償導線はデータロガー（日本電気三栄DE-1000）に接続され、図10右のパーソナルコンピューターを用いてデータロガーを制御、データを



図10 計測装置の概観

収集する。このデータロガーは最大每秒60チャンネルのデータ取り込み処理能力を有する。

3. 強制水冷供試体に対するランプ加熱試験

3.1 使用供試体

前章にて述べたクォーツランプ加熱装置を用いてある供試体を加熱試験する場合、試験実施前に加熱装置がパワーコントローラー入力値に対応してどの程度の放射出力を有するかをあらかじめ把握しておく必要が生じる。この目的のため、水冷供試体を用いた大気中試験が行われた。水冷供試体は予想される加熱領域全体の流入熱量を測定するカロリメーターとしての役割を持たせる。入力熱流束よりも表面からの対流及び放射熱損失が非常に小さい点、および真空中での供試体の水冷が難しい点から、大気中試験でも問題ないと判断した。試験装置の概略図を図11に、本試験にて使用した供試体の全体図を図12に示す。供試体の材質はアルミニウム合金で、平面形は一辺300mmの正方形である。内部の空洞はアルミニウム薄板により細分化され、入り組んだ流路となっており、内部流との接触面積を増やす事により効果的に熱交換を行える構造となっている。供試体の赤外線ランプ側の面には、吸収率を増大させかつ安定させるために耐熱黒色塗装を施した。図11におけるヒータ前面と供試体の加熱面との距離は100mmに設定した。供試体への冷却水入力管及び出力管部分にはK型熱電対が、その先端が水流の中心部分に直接接触する形で装着され、これら2点の温度差と単位時間当たりの冷却水流量から供試体に入力された熱量を推算した。

3.2 試験方法、結果及び考察

供試体への加熱は以下の手順により行なった。

- 1) 赤外線ランプへのパワーコントローラー入力値をあらかじめ設定した一定値に変化させる。同時に計測を開始する。
- 2) あらかじめ設定した時間に達した時点で加熱を終了す

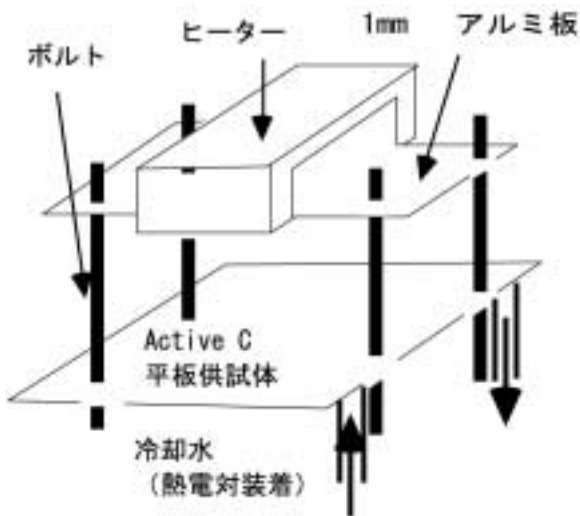


図11 試験装置の概略図



図12 強制水冷供試体

る。この際、加熱時間は冷却水入出力温度差が一定となる状態が充分持続するだけの長さに設定する。

- 3) 加熱終了後あらかじめ設定した時間に達した時点で、計測を打ち切る。

全試験結果のうち、赤外線ランプパワーコントローラー入力値100%、加熱時間120秒の試験例の供試体への冷却水入出力温度履歴を図13に示す。グラフからは入出力の水温が全体的に上昇している現象が見られるが、これは供試体温度及び水タンク内の水温度も同時に上昇しているためである。これらは算出される加熱率に対して誤差の要因となりうるが、文献6の試験結果から、入出力の温度差が一定値と判断できる時間範囲のデータを用いて算出しても差し支えないと考えられる。このように加熱時間範囲の後半の

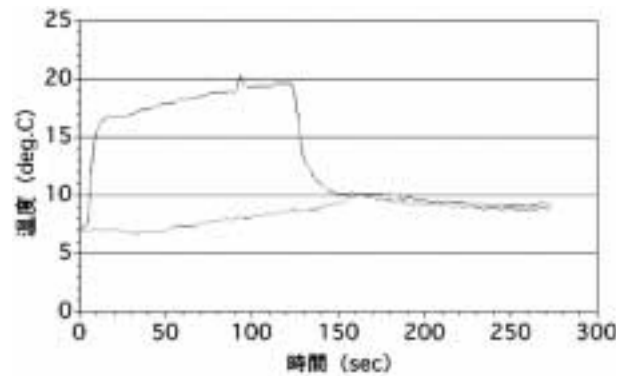


図13 強制水冷供試体加熱試験結果

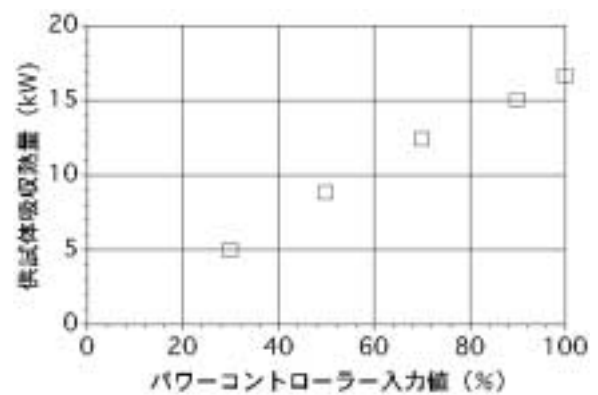


図14 パワーコントローラーの入力値と吸収熱量

冷却水入出力温度差を用いて算出した、パワーコントローラーへの各入力値に対する吸収熱量を図14に示す。使用したパワーコントローラーの仕様には、その入力値に対する加熱量出力の関係については記されていないものの、ほぼ比例関係である事が図から読み取ることができる。(赤外線ランプの仕様では、出力は印加電圧の1.54乗に比例する。)この点に関しては、さらに追試を行い関係を明らかにする必要がある。本試験の結果、供試体の吸収した熱量はパワーコントローラ出力最大時に約17kwと算出された。

4. 高温結合部構造を想定した供試体の加熱試験

本試験の目的は、大気圏再突入時に非常に強い空力加熱を受ける宇宙往還機の前縁部から内部構造への熱伝達現象を把握するためのデータ取得にある。まず前縁部から受けた熱が結合部品を伝わっていく状況を観測しデータ取得すること、次に結合部間の伝熱経路(熱伝導、接触熱伝達及び放射熱伝達)による違いを分離することである。後者については熱伝導と前縁背面からの放射熱伝達とを結合金具を覆う断熱プロテクタの有無により切り分けを行った。

上記の点から、供試体の温度自体が非常に高くなることもあり、空気による対流の影響は無視できないものとなる。よって、この加熱試験は石英ガラスベルジャーを利用した

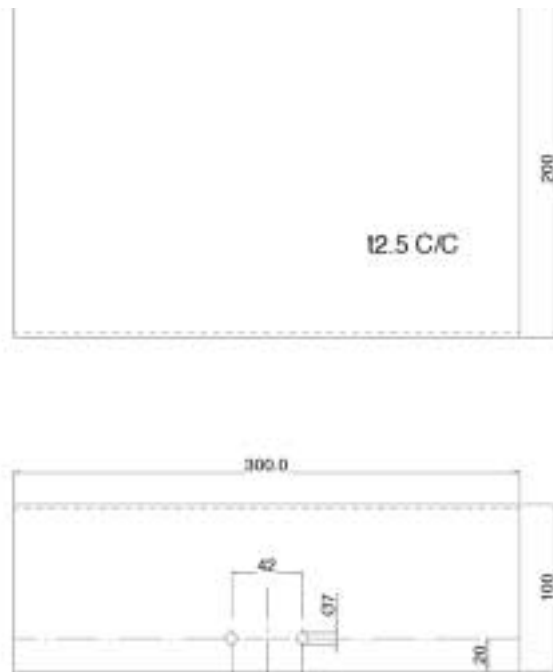


図15 C/C複合材供試体形状

真空化で行なう必要性が生ずる。

4.1 使用供試体

本供試体は、宇宙往還機主翼前縁部部分構造を念頭に置いたもので、C/C複合材薄板（2.5mm厚）と、それを主構造に結合する金具からなる。C/C複合材の表面には50 μ m厚のSiCコーティングが施されている。今回の試験では、用いられたC/C複合材に関しては赤外線吸収に関する表面処理は行われていない。C/C複合材部分は一辺300mmの正方形を端から100mmの部分で直角に折り曲げた形状に加工し、面積の広い面を加熱し、他方の面に結合金具を取り付ける仕様になっている。本試験にて使用したC/C複合材供試体の概要図を図15に示す。図上側の平面図の面に輻射加熱を受ける形となる。結合金具は2種類あり、C/C複合材と結合されている側のフィッティングと呼ばれる金具は、材質はInconel-600である。その外側に結合されている側はラグと呼ばれる金具であり、2024アルミニウム合金製である。各金具に使用されているファスナの径と材質は、C/C複合材とフィッティング間が1/4"径MA956、フィッティングとラグ間が1/4"径Ti-6Al-4V、ラグと主構造間がM10Ti-6Al-4Vである。ファスナの締め付けトルクは供試体の損傷を避けるために一般的なファスナ結合の6割程度の0.25kg・mとした。ピン結合部は供試体自重によるモーメント荷重が生ずるが、この荷重と熱伝達係数との定量的関係については今後の課題とする。結合金具の概要図を図16、図17に示す。

供試体のC/Cスキン部分が直角に折れ曲がった形状を

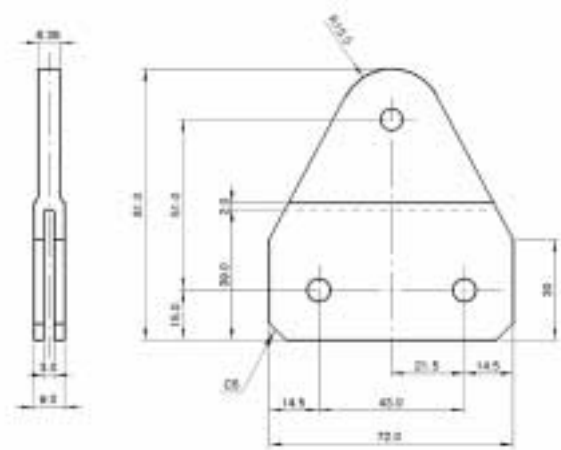


図16 フィッティング金具形状

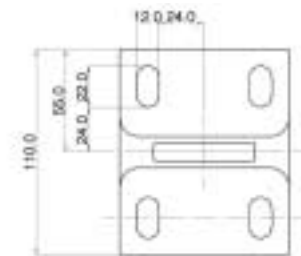


図17 ラグ金具形状

しているのは、第1に結合部分に直接輻射を受けないようにするため、第2に輻射を受けるスキン部分から裏面への輻射熱伝達の影響を考慮するため、第3に供試体の製作費用の削減のためである。本試験の後に供試体のFEM数学モデルを構築して伝熱解析及び同定を行う関係上、このような単純な形状でも十分に試験目的は達成できる。

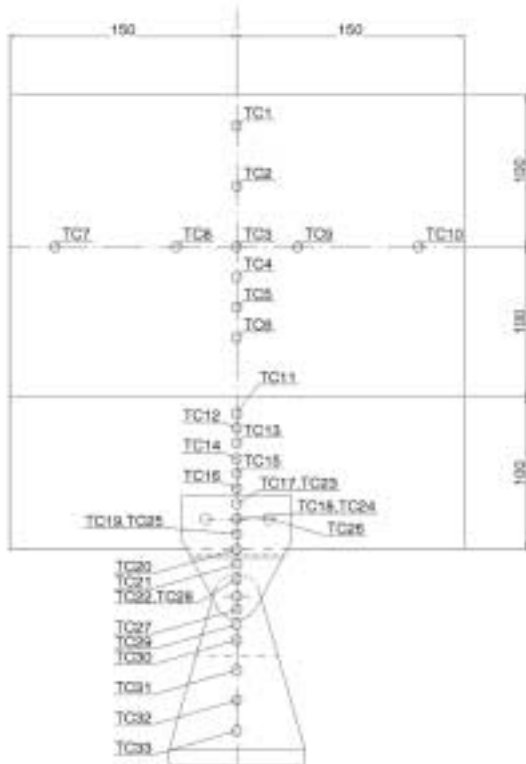


図18 熱電対設置位置の概略図

4.2 熱電対設置状況

前記の供試体に、C/C複合材内には素線直径0.25mmのガラス繊維被覆K型熱電対を19点、結合金具部分には同様の熱電対を7点、テフロン被覆の素線直径0.2mmのK型熱電対を7点を設置し、計33点となった。設置方法は、C/C複合材部分は直径1mm、深さ約1mmの穴を開け、耐熱性無機接着剤(東亜合成化学工業アロンセラミック)を流しこんだ後、素線先端を溶着した状態で差し込んで固着した。結合金具部分は、その表面に素線を直接スポット溶接し、表面を耐熱性無機接着剤で保護した。供試体の熱電対設置位置を図18に示す。

4.3 試験方法

C/C複合材供試体にフィッティング及びラグ結合金具が取り付けられ、真空チャンバ内にあらかじめ設置された取り付けアングル金具にクランプで固定された。その位置は赤外線ランプ表面と供試体C/C複合材薄板表面とその中心線が一致するように設置され、両者の距離は110mmとした。供試体設置状況を図19に示す。熱電対の一端は、先述のように直径1.6mmのソケットコンタクトに接続された後、真空チャンバ壁のフランジ付き開口部に設けた端子に差し込まれ、真空チャンバ外の補償導線と結線された。本章の始めて述べたように、各試験ごとに結合金具を覆う断熱プロテクタの設置・取り外しを行なう事により熱伝導と前縁背面からの輻射熱伝達との切り分けを行った。本試験の加熱量の時間暦は、3.1節の強制水冷供試体



図19 供試体設置状況

を用いた加熱試験と同様、以下の手順で行なった。

- 1) 赤外線ランプへのパワーコントローラー入力値をあらかじめ設定した一定値に変化させる。同時に計測を開始する。
- 2) カウント開始後あらかじめ設定した時間に達したら、加熱を終了する。この際、設定時間は供試体C/C複合材薄板の温度が一定となる状態が充分持続するだけの長さ設定する。
- 3) 加熱終了後あらかじめ設定した時間に達したら、計測を打ち切る。真空チャンバ内の真空度は試験開始時6.7Pa(0.05Torr)、試験終了時20Pa-40Pa(0.15-0.3Torr)を記録した。温度測定間隔は2秒間とした。この値は、供試体の予想熱流束に対する温度変化率からみて十分短いサンプリング周期であり、後に行われる、供試体のFEM数学モデルによる解析及び同定作業に対応できるものと考えられる。本試験は計6日間にわたり計10回、パワーコントローラー入力50~100%、加熱時間60~180秒の範囲で実施された。本試験は真空環境下で行なわれるために供試体の冷却が行われていない事と、試験ごとに内部をチェックしチャンバ内を再び真空にする事が必要である事から、一回の試験にかかる時間が先の強制水冷供試体の加熱試験に比べ大幅に長くなり、平均2~3時間を要する。

4.4 加熱試験結果

得られた試験データの全体は付録2にまとめて掲げることとした。ここでは試験データの中から本試験の特徴的な部分について抜き出して説明する。試験データは加熱量、加熱時間、結合金具を輻射熱から保護する断熱材プロテクタの有無によって分けられる。又加熱を始める前の真空チャンバ内の圧力は27Pa(0.2Torr)以下と設定した。予備的なもの、データ取得がうまく行われなかったものを除いた、各加熱試験の設定項目の内容を表1に示す。

表1 加熱試験の条件

番号	試験番号	出力	加熱時間	温度分布 プロテクタ有り
1	T1006221	50%	120sec	測定ポイント無し
2	T1006222	50%	120sec	測定ポイント有り
3	T1006223	50%	180sec	測定ポイント有り
4	T1006224	50%	180sec	測定ポイント無し
5	T1006231	100%	180sec	6.71% < TC17 10.67% < TC18 有り
6	T1006232	100%	180sec	測定ポイント無し
7	T1006234	100%	180sec	6.71% < TC17 30.67% < TC18 有り

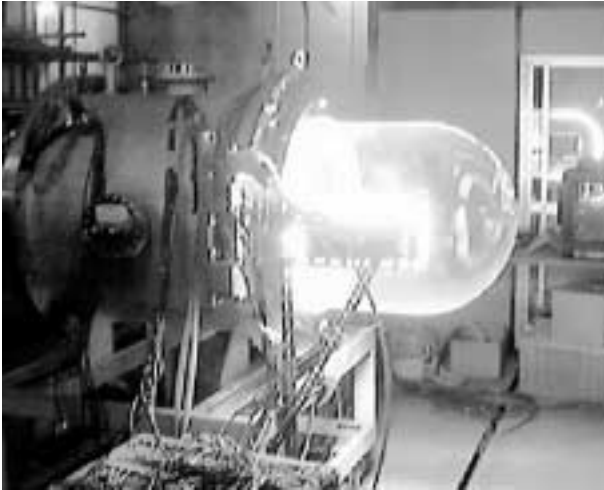


図20 加熱試験中の全体画像図

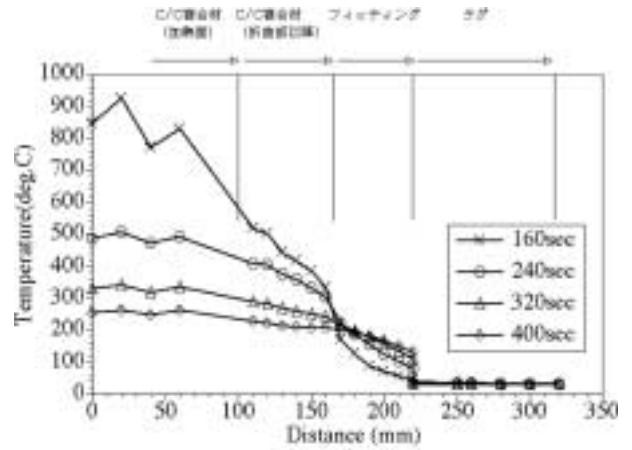


図22 各時間での基準点からの距離に対する温度分布

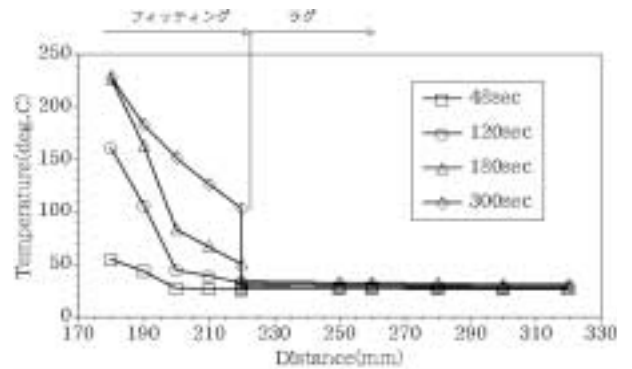


図23 結合金具部分の温度分布（プロテクタ有り）

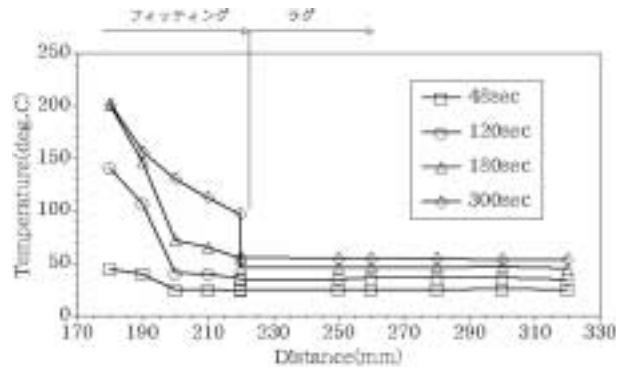


図24 結合金具部分の温度分布（プロテクタ無し）

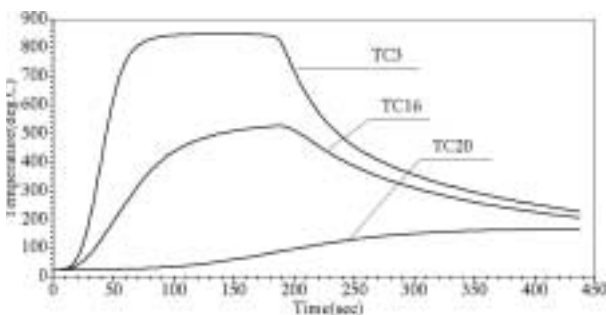


図21 各点の温度履歴

加熱試験中の全体画像を図20に示す。試験No.5の温度-時間データを図21に示す。この試験は加熱秒数180秒、プロテクタありの条件である。180秒後では、ランプC/C薄板のうち、赤外線ランプ中心点に向かい合う部分の、温度の時間変化は少なく、入射熱流速と放射熱流速とがほぼバランスして見える。このことは後の入射加熱量評価に利用される。図22は供試体中央に沿った温度分布を時間をパラメータとしてプロットしなおしたものである。C/C材とフィッティング金具との間には温度勾配の不連続があるが読み取れる。一方フィッティングとラグの間には明瞭な温

度不連続がある。結合ピンを介した熱伝導が小さいためと推測する。図23は温度の低い結合金具部分の温度を拡大したものである。(試験No.5) 加熱中ラグは温度上昇がほとんど無い。図24はプロテクタのない試験(試験No.7)の同一部分の温度分布グラフで、ラグ部分も加熱中温度上昇しているのが認められる。これはC/C高温部から輻射でラグに伝わる熱の大きさの差によると推測する。すなわちプロテクタは直接の輻射熱をほぼ遮断しているように見える。

4.5 試験結果からの加熱密度の推算

供試体表面の実際の最大加熱密度を推定するために、図21において加熱時間後半部の、C/C複合材薄板温度が輻射平衡に近い状態の部分のデータを用い、輻射平衡時の関係式((1)式, 図25参照)から、供試体表面への熱流束を推算した。

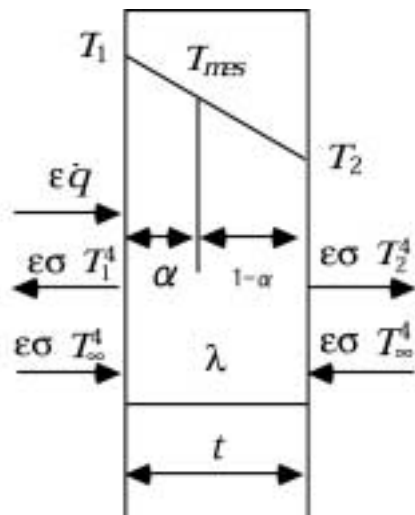


図25 表面に熱流束を受ける薄板の熱収支

$$\frac{\lambda (T_1 - T_2)}{t} = \epsilon \sigma (T_1^4 - T_\infty^4)$$

$$T_{mes} = (1 - \alpha) T_1 + \alpha T_2$$

$$q = \epsilon \sigma (T_1^4 - T_\infty^4) \quad (1)$$

- T_1 : 表面温度
- T_2 : 裏面温度
- T_∞ : 周囲温度 (300K)
- T_{zmes} : 測定温度
- λ : C/C複合材熱伝導率 (積層方向)
- t : C/C複合材板厚
- σ : ステファン・ボルツマン定数
- ϵ : C/C複合材表面放射率
- α : 熱電対測定点板厚方向無次元位置

その結果、パワーコントローラー入力値100%時の最高温度1200Kの場合、供試体表面吸収熱流束は最大約240kw/m²の値を得た。(ε=0.9, λ=8.1W/m・K, α=0.5) 本加熱試験装置及び加熱試験結果については、後に行われる数学モデルを用いた熱流束同定作業、及びより正確なランプ加熱量の真空下での測定試験法の実施が望まれる。

5. まとめと今後の課題

赤外線ランプと石英ガラス製ベルジャーを組み合わせた熱真空加熱装置を新規に作成し、予備試験として水冷供試体を用いた加熱量試験を行った。合わせて、本試験を通じて新たに製作された熱真空加熱試験を用いた加熱試験を宇宙往還機主翼前縁部分構造を念頭に置いた供試体を用いて行った。その結果、ヒーター基から受けた熱流束は供試体表面において最大点で約240kw/m²と推算された。

本試験装置は今後の機体空力加熱模擬試験に対して、最も熱流束の大きい機体先端部分構造に対しても有用な結果を出しうると考えられる。

6. 参考文献

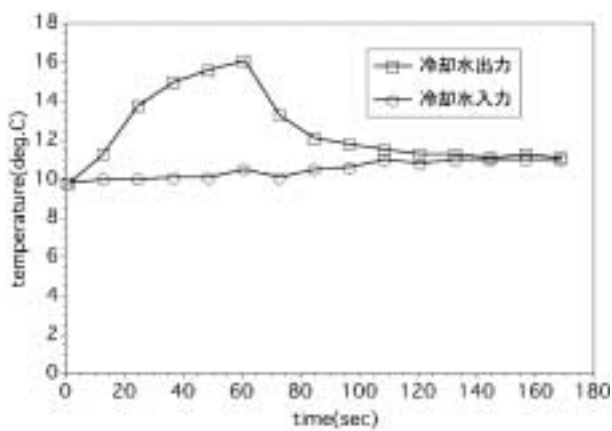
- 1) R. A.Fields, A.Vano:Evaluation of an infrared heating simulation of a Mach 4.63 flight on an X-15 horizontal stabilizer, NASA TN D-5403, 1969
- 2) NASA YF-12 flight loads program, NASA TM-X-3061, 1974.
- 3) W. G.Beasley:Space Shuttle entry thermal testing techniques, AIAA PAPER 78-1628
- 4) Thomas J.Horn, W. Lance.Richards, Leslie Gong: A technique for transient thermal testing of thick structures, NASA TM-4803, 1997
- 5) 小川 鑛一, 遠藤 修司:FRPロケットノーズコーンの赤外線輻射による加熱実験, NAL TR-185, 1969
- 6) 遠藤 修司, 大竹 邦彦:熱構造試験用高周波誘導加熱装置の試作および性能評価試験, NAL TM-716, 1997
- 7) 東芝セラミックス:石英ガラス製品紹介カタログ, 1996
- 8) RESEARCH Inc. : Model 5208 High Density Infrared Heater User's Manual, 1993
- 9) RESEARCH Inc. : Power Controller Model 664F, 664G, and 664K User's Manual, 1994

付録 1.

アルミ熱交換ジャケット供試体によるランプ熱量推定試験結果

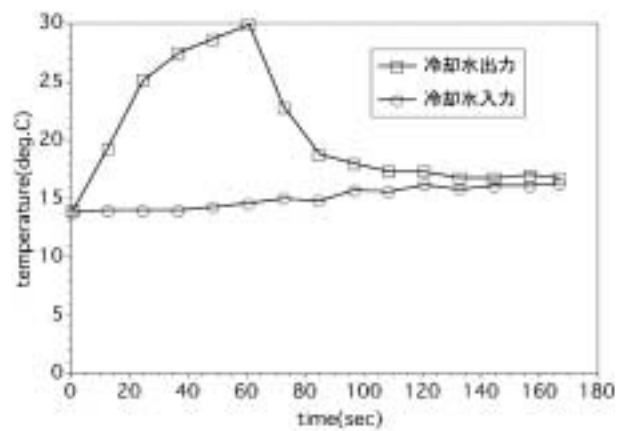
第 1 回測定 T0003081

出力30% 60s
 冷却水流 12.6 l/min
 ランプ // 4.8 l/min
 最大温度差 5.7°C



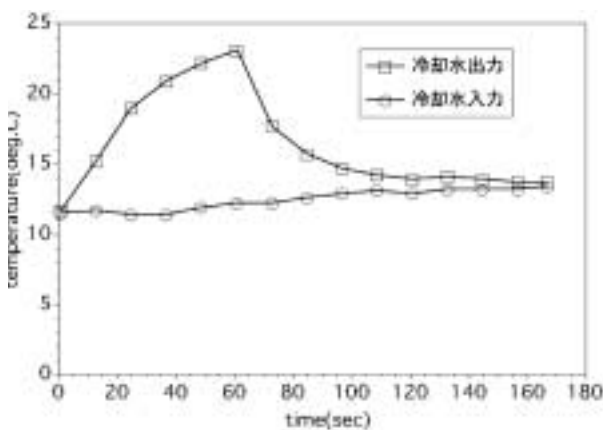
第 3 回測定 T0003083

出力70% 60s
 冷却水流量 12.6 l/min
 ランプ // 4.8 l/min
 最大温度差 14.0°C



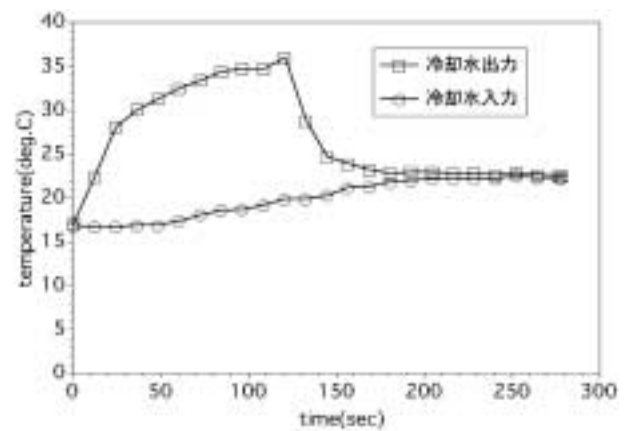
第 2 回測定 T0003082

出力50% 60s
 冷却水流量 12.8 l/min
 ランプ // 4.8 l/min
 最大温度差 9.9°C



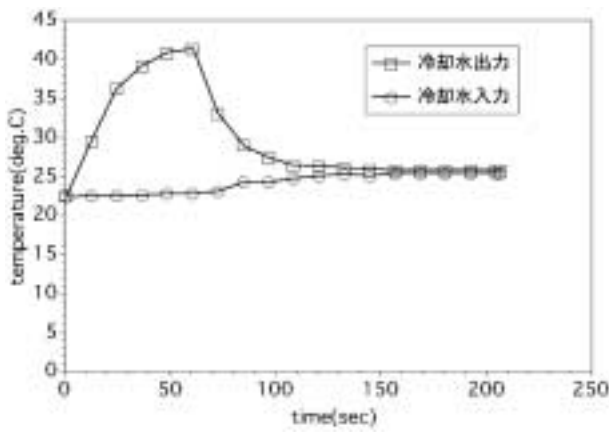
第 4 回測定 T0003084

出力70% 120s
 冷却水流量 12.6 l/min
 ランプ // 4.76 l/min
 最大温度差 14.3°C



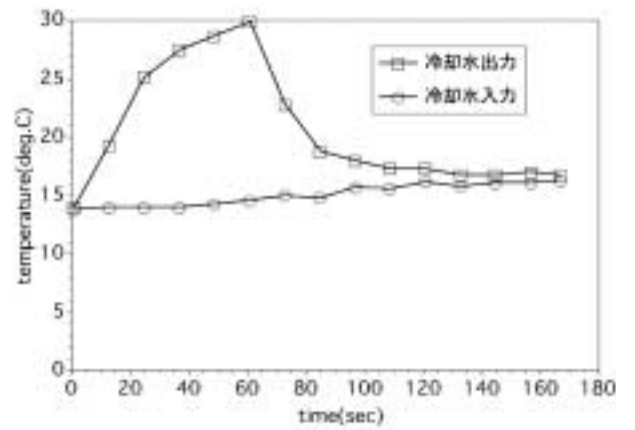
第 5 回測定 T0003085

出力90% 60s
 冷却水流量 12.6 l/min
 ランプ // 4.76 l/min
 最大温度差 17.1°C



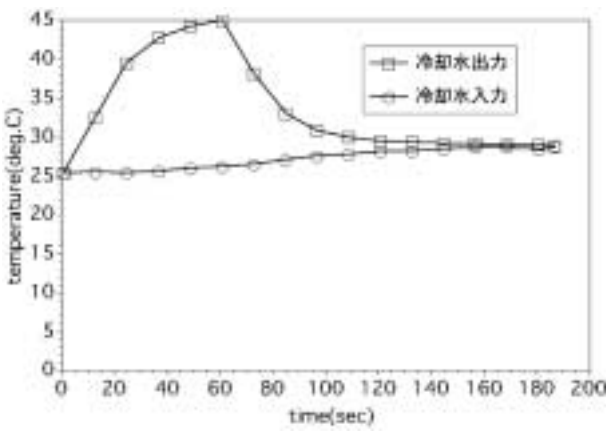
第 7 回測定 T0003087

出力100% 60s
 冷却水流量 22.2 l/min
 ランプ // 4.76 l/min
 最大温度差 11.0°C



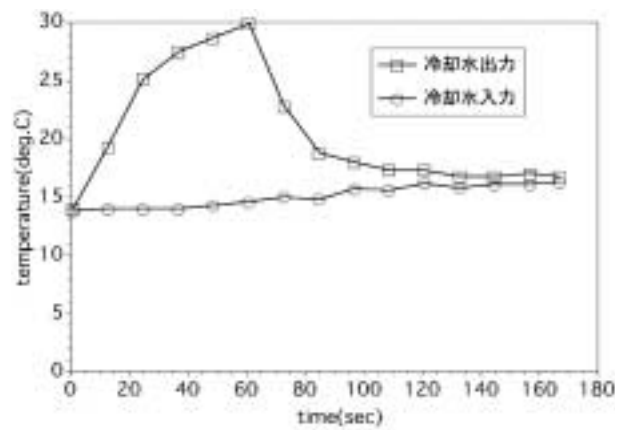
第 6 回測定 T0003086

出力100% 60s
 冷却水流量 12.6 l/min
 ランプ // 4.76 l/min
 最大温度差 18.0°C



第 8 回測定 T0003088

出力100% 120s
 冷却水流量 22.2 l/min
 ランプ // 4.76 l/min
 最大温度差 11.0°C

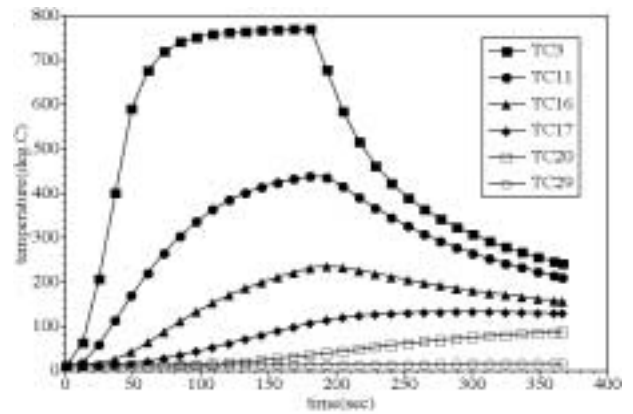
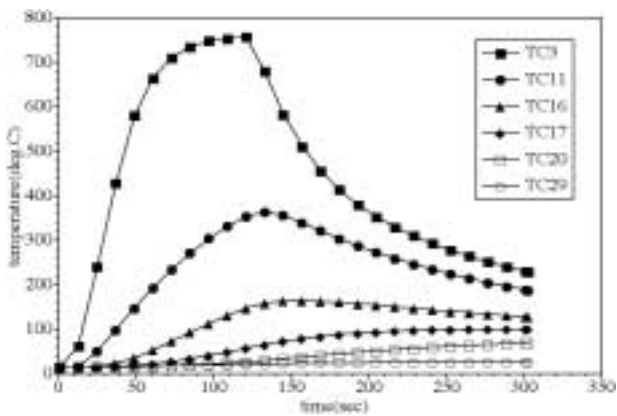


付録 2.

C/C薄肉供試体による加熱試験結果

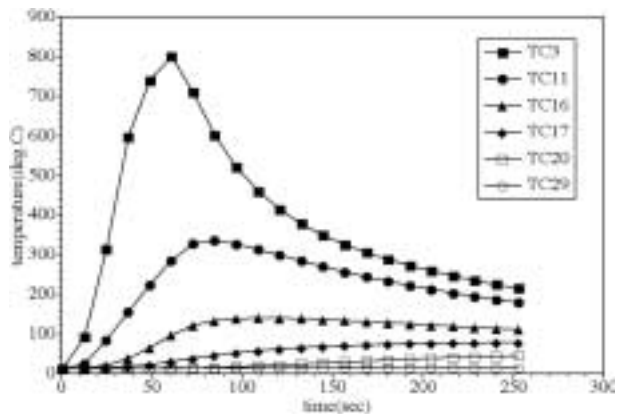
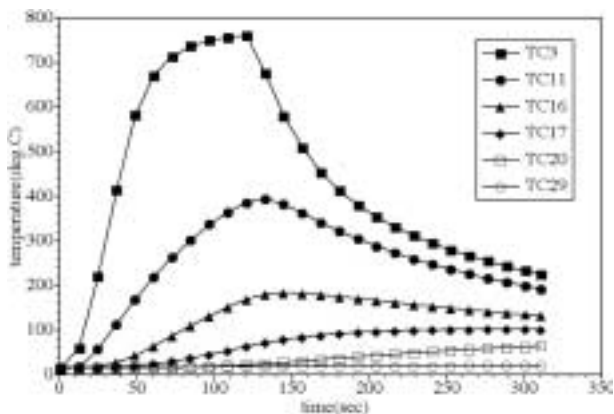
第 1 回測定 T0003221
出力50% 120s
輻射熱伝導防止用プロテクター 無

3 回測定 T0003231
出力50% 180s
プロテクター 有

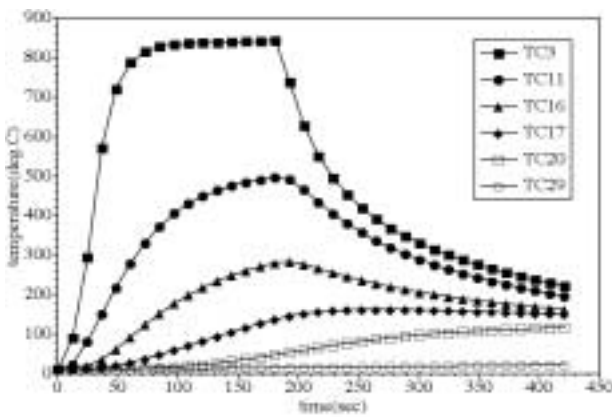


第 2 回測定 T0003222
出力50% 120s
プロテクター 有第

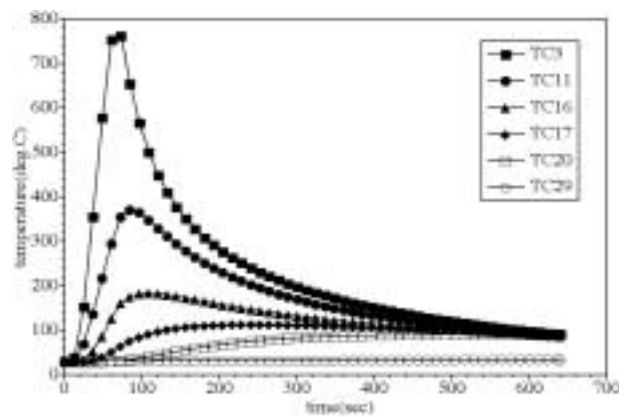
第 4 回測定 T0003232
出力70% 60s
プロテクター 有



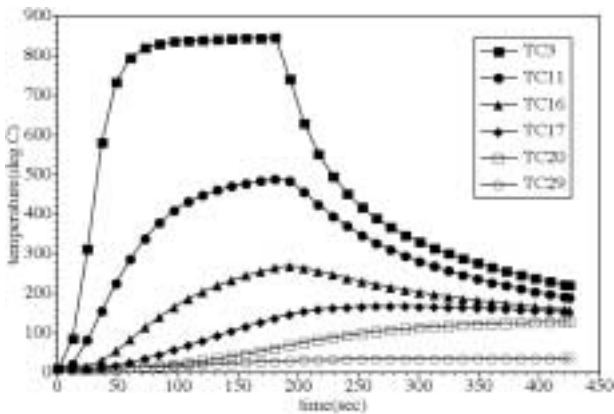
第 5 回測定 T0003233
出力70% 180s
プロテクター 有



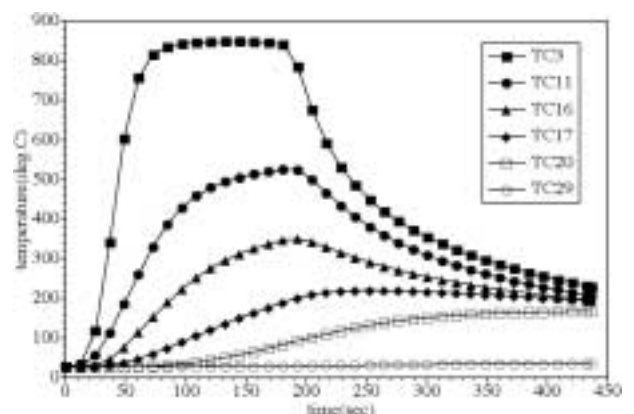
第 7 回測定 T0006211
出力100% 60s
輻射熱伝導防止用プロテクター 有
真空チャンバ内圧力(実験前→後)
測定せず



第 6 回測定 T0003271
出力70% 180s
プロテクター 無



第 8 回測定 T0006231
出力100% 180s
輻射熱伝導防止用プロテクター 有
真空チャンバ内圧力(実験前→後)
0.05TORR→0.3TORR



第9回測定 T0006232

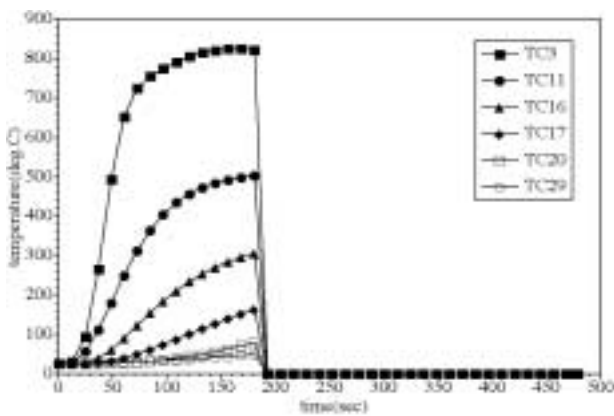
出力100% 180s

輻射熱伝導防止用プロテクター 無

真空チャンバ内圧力(実験前→後) 測定

せず(測定途中, 機器の誤動作により

測定データ消失)



第10回測定 T0006281出力100% 180s

輻射熱伝導防止用プロテクター 無

真空チャンバ内圧力(実験前→後)

0.05TORR→0.15TORR

