

ISSN 0452-2982  
UDC 621.365.58  
536.62  
536.53

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-716

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

遠藤 修司・大竹 邦彦

1997年8月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY



# 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\*

遠藤修司\*<sup>1</sup>・大竹邦彦\*<sup>2</sup>

## Design and Performance Tests of High-frequency Induction Heating Equipment for Thermostructure Testing\*

Shuji ENDO \*<sup>1</sup> and Kunihiko OHTAKE \*<sup>2</sup>

### ABSTRACT

A Pilot heating equipment, using high-frequency electromagnetic induction, was developed as an experimental tool for studying the thermomechanical behavior of aerospace structures under high heat flux loading, and performance tests were carried out to confirm the heat output of the equipment. A water-cooled type specimen made of SUS 304 stainless steel was used in the tests. The specimen had a hemispherical shape of 50 mm in radius. In the tests, the specimen was heated both in atmospheric air and vacuum, and the temperature of cooling water was measured at the inlet and outlet points to estimate the heat output of the equipment. The test results proved that the designed heat output requirement was satisfied, and the heat output was 6.98 kW in atmospheric air, and 7.26 kW in vacuum. Considering the heating surface area of the specimen, these values of heat output corresponded to the heat flux of 700 kW/m<sup>2</sup> and higher.

In this paper, the outline of induction heating is first briefly given, then the configuration and the basic design specification of the induction heating equipment are described. The temperature measuring system used in the tests is also explained, and the method for measuring temperatures of the specimen in an electromagnetic field resulting from the induced current, using thermocouples, is described. Finally, the performance tests are discussed in detail together with the results of measurement.

**Keywords:** thermostructure test, heating equipment, induction heating, high heat flux, high-frequency power, temperature measurement, electromagnetic field

### 概 要

航空・宇宙機の耐熱構造の基礎的な実験的研究を行なう装置として高周波誘導加熱方式によるパイロット加熱装置を試作し、その熱出力性能を把握するための性能評価試験を行なった。用いた供試体は水冷式で、形状は半径50mmの半球面体、材質はステンレス鋼である。供試体は大気圧および真空中で加熱され、熱出力を算定するために、冷却水の入口および出口の温度が計測された。試験の結果は、設計性能を満足するものであり、熱出力は大気圧で6.98kW、真空中で7.26kWであった。これらの熱出力値は、供試体の加熱面積を考慮すると、700kW/m<sup>2</sup>以上の熱流束に相当した。

本報告では、はじめに、高周波誘導加熱の概要と、試作した誘導加熱装置の構成および基本性能について

---

\* 平成9年6月18日受付 (received 18 June 1997)

\* 1 機体部 (Airframe Division)

\* 2 構造力学部 (Structural Mechanics Division)

述べる。次いで、本誘導加熱装置で採用した温度計測系と、誘導加熱され電磁環境下にある供試体の温度を熱電対を用いて計測する一つの方法を紹介する。最後に、誘導加熱装置の熱出力性能を確認するために行なった性能評価試験と、その結果について述べる。

## 1. 緒言

近年、宇宙往還機やスペースプレーンの開発に備えた技術研究が盛んに行なわれている。これらの機体を実現するための技術的課題の一つとして、大気圏再突入時や超音速巡航時の空気力学的加熱から機体を防護し、しかもペイロードの確保のため軽量化が要求される耐熱構造様式の技術を確立することが挙げられる。例えば、スペースシャトルでは、大気圏再突入から高度 70 ~ 80 km までの速度はマッハ 25 程度にもなり、大気中をこのような高速で飛行するため、強い空気力学的加熱を受け、機首の淀み点での空力加熱率は約  $420 \text{ kW/m}^2$  にも達し、輻射平衡温度は 1463 K を超える厳しい熱環境に遭遇する<sup>1)</sup>。このような高い熱負荷での機体構造の熱応答特性に関する技術データは、わが国では実際の飛行の経験がほとんど無く、また、機体構造要素に高加熱率で熱を負荷的的確な評価を行なえる本格的な地上試験装置を持たないことなどから、極めて不足している。

筆者らは、耐熱構造の高熱負荷環境下における熱応答特性の研究の基礎的段階として、高周波誘導加熱方式による熱構造試験用のパイロット加熱装置を試作し、運転可能範囲を把握するための実験や、供試体への熱入力の計測を実施し加熱装置の熱出力性能を評価する試験、また、大気圧および真空の雰囲気中で高温かつ強い電磁界環境での供試体の温度計測などを実施してきた。本報告では、高周波誘導加熱装置の概要と、その性能試験の実施に当たって筆者らが採用した電磁界環境内での温度計測法、および性能試験とその結果について述べる。

なお、本稿は、“パイロット高周波熱負荷装置について”と題して航技研ニュース<sup>2)</sup>に掲載した記事を、全体に詳しく書き直し、報告書としてまとめたものである。

## 2. 熱構造試験用加熱装置

試作した加熱装置の加熱方式として採用した高周波誘導加熱の概要と、装置の全体としての構成について述べる。

### 2.1 高周波誘導加熱

高周波誘導加熱<sup>3)</sup>は、加熱用コイルを流れる高周波電流の作る交番磁界により、被加熱物内に発生する電界が

誘起する誘導電流のジュール熱による被加熱物自体の発熱を利用した加熱方式である。被加熱物の中を流れる誘導電流は、表面に近いほど大きく、内部に行くにしたがって減少する。この傾向は加熱用コイルを流れる高周波電流の周波数が高いほど顕著である。この現象は表皮効果と呼ばれ、高周波誘導加熱の特質の一つである。高周波誘導加熱は原理的に加熱の対象となる被加熱物が金属などの導電性抵抗体に限られるが、次に挙げるような多くの特徴を持つ。

- (i) 誘導加熱は誘導電流のジュール熱によって被加熱物を自己発熱させるのであるから、被加熱物を急速に加熱することができる。
- (ii) したがって、電力の熱変換効率が良好である。
- (iii) また、加熱源としての高温発熱体を必要としない。
- (iv) 表皮効果の特性により、周波数、加熱電力、加熱時間を適切な値に選定すれば、被加熱物の表面近傍のみを加熱することができる。
- (v) 加熱用コイルを適切に設計することによって被加熱物の形状や局所的な加熱に対応できる。
- (vi) 真空雰囲気中での被加熱物の加熱に対しても、障害となる放電現象を考慮して加熱用コイル部の高周波電圧を適切な値に抑えれば、比較的容易に対応できる。

これらの特徴に着目して、筆者らは高周波誘導加熱方式による熱構造試験用のパイロット加熱装置を試作した。

### 2.2 加熱装置

高周波誘導加熱方式を採用して試作した熱構造試験用のパイロット加熱装置の構成を図 1 に、概観を図 2 に示す。図に見るように、装置は全体として、高周波電源装置、整合トランス、加熱用コイル、冷却系、真空槽および計測系から成っている。本加熱装置の入力電力容量は 25 kVA である。装置の主要な設計仕様を表 1 に示す。高周波誘導加熱では用途に応じて、どのような周波数の高周波を選択するかが重要であるが、本加熱装置は被加熱物すなわち加熱の対象となる供試体を表面加熱することを目的とすることから、発振周波数の基本仕様を 100 kHz 以上とした。また、加熱用コイルの出力の基本仕様は半径 50 mm の半球面体形状のステンレス製供試体を対象に 5 kW 以上とした。高周波電源装置は高周波電力の発生源であって、電圧 200 V、周波数 50 Hz の 3 相交流を受電し変圧器で高電圧に昇圧した後、整流回路により直流電圧

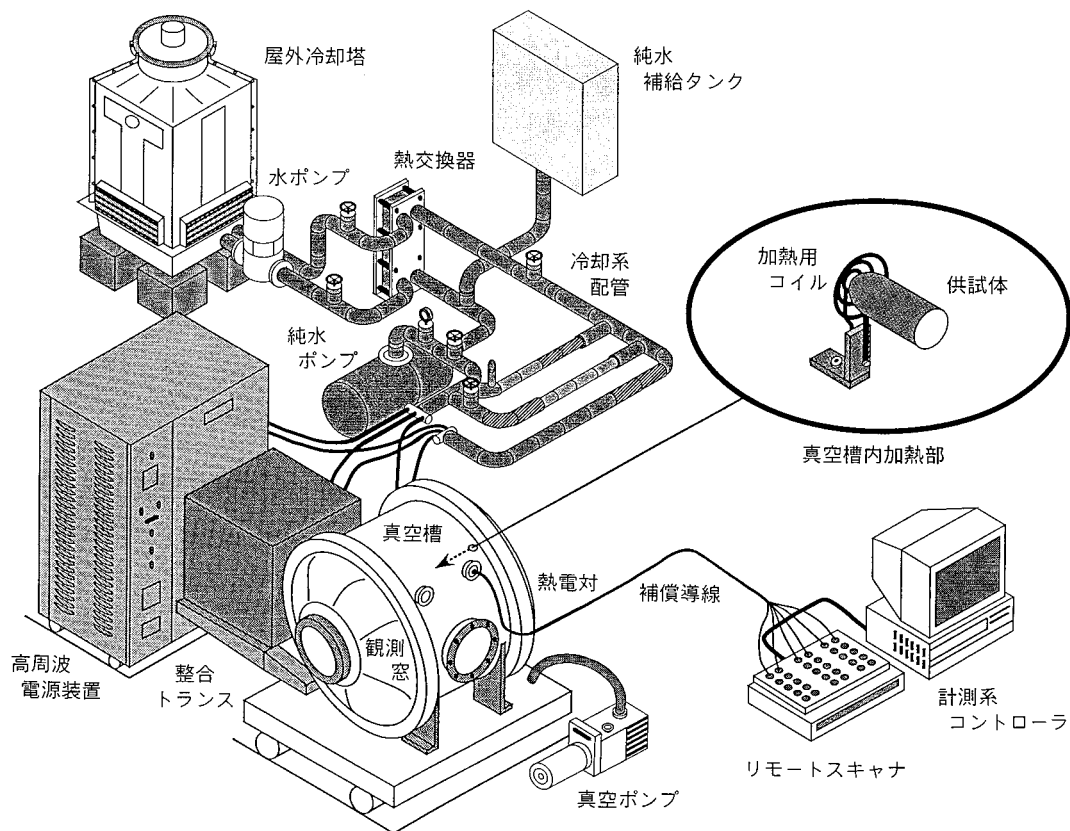


図1 熱構造試験用加熱装置の構成



図2 熱構造試験用加熱装置の概観

に変換して真空管を用いた高周波発振回路で高周波電力を発生させる。この発振回路で用いられる真空管は、発振作用を行なうことを目的とするので、一般に発振管と呼ばれており、以下、本文でも発振管の語を使用する。供試体の種類や加熱用コイルの性能などにもよるが、本高周波電源装置は、例えば、発振管の陽極電圧が8.5 kV、陽極電流が2.1 A、したがって、直流入力が17.9 kWのとき、発振周波数185.7 kHz、発振出力13.0 kWの高周波を発生する。発振出力は直流入力の73%程度であり、この種の高周波誘導加熱装置としてはごく普通の値である。この発振管の熱損失による温度上昇を抑えるために発振管は強制水冷されている。なお、本高周波電源装置の発振回路には、電磁環境下での温度計測を考慮に入れて、外部からの直流信号を受けてその信号電圧が5 Vのときは発振、0 Vのときは発振中の発振管の格子電圧をカットオフして発振を停止する機能が搭載されている。この機能を用いての電磁環境下における温度計測については3.2節で触れることにする。整合トランスは高周波電源装置と加熱用コイルを結合して高周波電力を供試体負荷に合わせて効率よく加熱用コイルに伝送することを目的としている。加熱用コイルは真空槽内に置かれ、槽外の整合トランスと真空槽壁を貫通するフランジ(ICF 152日電バリアン)付き開口に挿入固定される水冷構造の気密同軸端



表 1 熱構造試験用加熱装置の主な仕様

入力電源	入力電力 相数および周波数 電圧 雰囲気温度	25 kVA 3 相, 50 Hz 200 V 5°C ~ 35°C 以下
整流回路	整流方式 制御方式	3 相全波整流方式 (SR) サイリスター位相制御方式 (SCR)
発振回路	高周波出力電力 発振方式 発振周波数 発振回路方式 発振管冷却方式 陽極電圧 陽極電流 格子電流 発振管繊維条電圧 発振管形式	15 kW 連続 自励式 100 kHz 以上 (150 ~ 200 kHz 推奨) コルピッツ発振方式 水冷 MAX. 8.5 kV MAX. 2.7 A MAX. 700 mA 5.7 V RS3020 CJ (SIEMENS)
冷却水	発振管冷却水量 CT1 次冷却水 CT2 次冷却水 加熱コイル・気密端子	約 12 l/min 約 4 l/min 約 6 l/min 約 2.5 l/min
加熱用コイルシステム	コイル出力 コイルインピーダンス コイル電圧 コイル電流 使用可能真空度 コイル位置調整代	5 kW 以上 (SUS 製 100φ 半球面体に対して) 約 0.18Ω 約 230 V 以下 (対放電考慮) 約 220 A 以下 10 <sup>-2</sup> Torr 上下 100 mm, 水平 60 mm, 回転約 ± 20°
接地 (アース)	第 1 種接地で使用	

子により接続されている。ところで、本装置の真空槽の運用真空領域は中真空(1 ~ 10<sup>-3</sup> Torr 未満)の範囲に含まれるが、この中真空の状態は放電現象が極めて発生しやすい領域である<sup>4)</sup>。したがって、真空中の加熱において、加熱用コイル端子間の高周波電圧値をある限界値を超えて高くすると、加熱用コイルと供試体の間や加熱用コイル支持具の狭い間隙部などで放電現象を起こすことになる。放電が、グロー放電の形態に留まっているうちは良いが、グロー放電からコロナ放電あるいは火花放電に移行すると、加熱用コイルや供試体を損傷するばかりでなく、ときには危険な事態を招くことにもなる。整合トランスおよび加熱用コイルは、これを防止するために加熱用コイルの電圧値が約 230 V 以下になるように、設計調整されている。なお、10<sup>-5</sup> Torr 程度以下の高い真空度になると放電は生じにくくなり、真空は優れた絶縁耐力を持つといわれている。供試体を加熱するための加熱用コイルは、伝送された高周波電流によって時間的に変化する

磁界を作り出す。供試体は、この磁界の変化によって供試体内部に誘起される誘導電流のジュール熱で、加熱されることになる。加熱用コイルを流れる高周波電流は最大 220 A にも達するので、加熱用コイルはそれ自体の損失による温度上昇を抑えるために水冷されている。冷却系は加熱用コイルを含む高周波誘導加熱装置と供試体とをそれぞれ独立に冷却する二つの系統から構成される。冷却水は、水質が悪いと流路内壁に水垢が付着し冷却効果を低下させるなどの障害を起こすので、純水(脱イオン水)が用いられる。高周波誘導加熱装置の冷却水は純水補給タンクに溜められステンレス製多段渦巻ポンプ(荏原 50 MDP353.7)で発振管、整合トランスの一次コイルと二次コイル、気密同軸端子、加熱用コイル支持具および加熱用コイルなどに供給され、これらを冷却する。発振管への冷却水供給圧力は 0.392 MPa(4 kgf/cm<sup>2</sup>)、流量は 12 l/min である。供試体を冷却する供試体冷却系は、加熱装置の冷却系とは別に、純水補給用ポリタンク、ステンレ

スポンプ(丸山製作所 20-RXAS-150 TE), 流量調整用バルブおよびデジタル流量計(エステック LF 10-PTN ; 計測範囲 1.5 ~ 20 l/min)などから構成される。なお, 供試体冷却系の真空槽入口直前および出口直後のテフロンプレートホースには熱電対が挿入されており, 冷却水の供試体入口温度および出口温度がそれぞれ計測されるようになっている。用いた熱電対は供試体温度計測用と同一の線径 0.2 mm の K 熱電対で, ホース壁の挿入孔との間隙はシリコン系液状ガスケット(スリーボンド 1211)でシールされ, 固定されている。加熱装置および供試体の冷却のために温められた冷却水は屋外冷却塔と接続されているそれぞれの熱交換器(アルファ・ラバル M 3-FGL)を通ることによって再び冷却されて繰返し循環される。真空槽(富士真空(株))はステンレス鋼 SUS304 で作られた内径 1,000 mm, 長さ 600 mm, 肉厚 8 mm の円筒型で, 両端は外側に球面状に膨らんだ形の扉で密閉される構造となっており, 真空ポンプ(日本真空技術 PVD-360)によって  $10^{-2}$  Torr (= 1.33322 Pa =  $1.31579 \times 10^{-5}$  atm) の程度の真空度を達成することができる。槽壁面および両端の扉には観測用の窓のほか, 電力および冷却水の導入や, 熱電対などの計測線の取出しのためにフランジを取付けた開口部が幾つか設けられている。供試体の温度計測は簡便で精度が高く, 筆者らが以前から使用して使い慣れている熱電対による方法を採用している。計測系についての詳細は次章に述べる。

### 3. 計測系

本加熱装置で採用した温度の計測系と電磁環境下での熱電対による温度計測について述べる。

#### 3.1 計測系と計測装置

供試体の温度は, テフロンで被覆された線径 0.2 mm の K 熱電対を用いて計測する。計測系の概観を図 3 に示す。真空槽内の熱電対はその出力端に直径 1.6 mm のソケットコンタクトを接続した後, 真空槽壁のフランジ付開口に取付けた 24 極の端子(日電アネルパ 954-7972)に差込むことにより槽外の補償導線と結線され, パーソナルコンピュータ(日本電気 PC-9801)で制御されたりモトスキャナ(多チャンネルデータロガー; 日本電気三栄 DE 1000)に接続される。この計測系は上記のパーソナルコンピュータおよびリモートスキャナのほかに専用の温度・電圧スキャナユニット(DE 10-202)および NEC-9801 専用のデータ収録プログラム(DE 10-701)から成っていて一台のユニットで最大毎秒 60 チャンネルのデータ取込み処理能力を有している。



図 3 計測系の概観

#### 3.2 交番磁界中での熱電対による温度計測<sup>5)</sup>

ところで, 本加熱装置に採用した高周波誘導加熱方式では, 供試体は交番する強い磁界の中に置かれることになるので, 温度計測のために供試体に取付けた熱電対も必然的に同様の強い磁界の中に置かれることになる。このため, 熱電対には電磁誘導により誘起される電界に対応して誘導起電力が発生する。この起電力は, 熱電対が测温接点と基準接点との温度差にほぼ比例して発生する熱起電力に対し外部擾乱として強い影響を及ぼし, 温度計測に大きな誤差を与えることになる。测温対象の供試体からの輻射エネルギーを光学的に供試体から離れた検出素子に集束させることによって供試体の温度を計測する輻射式の温度計を用いれば, この高周波による誘導障害の問題は避けられる。しかし, 高周波誘導加熱では加熱用コイルが供試体の加熱面を覆うように, しかも近接して取付けられるため, この方法で真空槽内の供試体の細々とした部位の温度を計測するには, 加熱用コイルが供試体测温面と温度計間の光路の妨げとならないような工夫が必要であり, また, 真空槽壁の観測窓の大きさや位置も光路に制約を与えるため, その温度計測はかなり困難とならざるをえない。

さて, 熱電対によって, 誘導加熱される供試体およびその周辺の温度を正確に計測するためには, 次のような方策が考えられる。

- (i) 熱起電力が磁界および電界の影響を受けない熱電対の素線材料を開発する。
- (ii) 熱電対を磁界および電界から遮蔽する。
- (iii) 温度計測の瞬間だけ加熱装置の発振出力を停止させ, 磁界および電界を消失させる。

この中で, 比較的实现が容易と考えられるのは(iii)の方策であろう。しかし, この方法は, 短時間といえども加熱を中断するのであるから, 厳密にはその間に供試体は冷

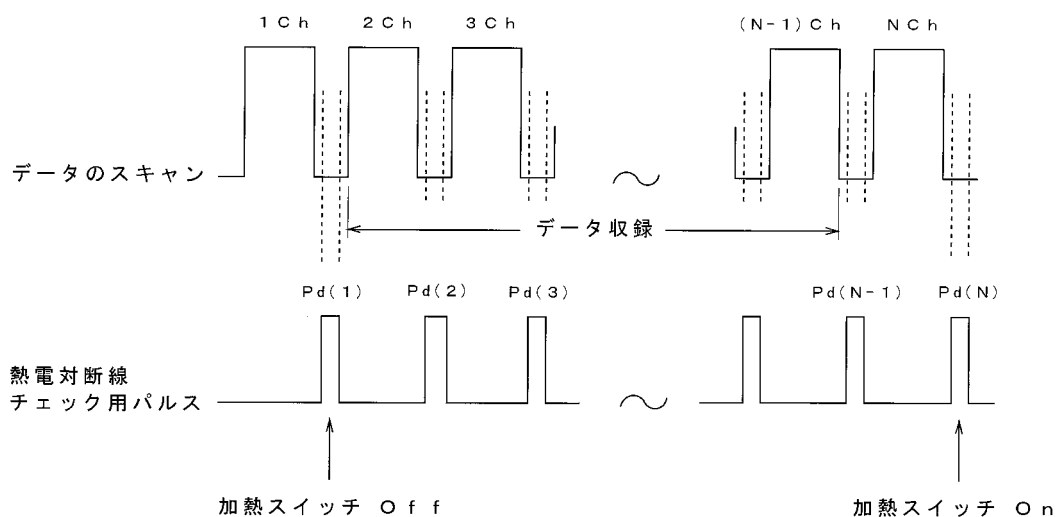


図4 発振出力開閉制御の概念図

却される。したがって、本方法で真温度と実用上見做しうる計測結果を得るためには次の2点に留意することが極めて重要となる。

- (a) 温度計測に要する時間を極力短くする。
- (b) 計測の開始直前および終了直後にタイミング良く高周波の発振を停止および開始させ、加熱装置の発振停止時間を可能な限り短くする。

幸い、近年のコンピュータおよび計測機器の高度化によって、データロガーのデータ取込み処理能力は著しく向上しており、既述のように、本加熱装置の計測系に採用したリモートスキャナにおいても1台のユニットで最大毎秒60チャンネルの処理能力を有している。したがって、上記(a)項の計測時間の問題は、ここでは殆ど考慮する必要はないであろう。一方、(b)項の発振停止時間の問題を解決するには多少の工夫が必要である。加熱装置の高周波電源装置の発振回路に、外部からの信号を受け、その信号電圧が5Vのときは発振、0Vのときは発振中の発振管の格子電圧をカットオフして発振を停止する機能を搭載したことは2.2節ですでに述べた。この機能を用いて発振中の加熱装置の発振出力の開閉を行なうには、高周波電源装置の外部信号入力端子にOn-Offスイッチを取付け、直流5Vを信号として入力できるように配線し、そのOn-Offスイッチを操作すればよい。しかし、これを手動で操作していたのでは、(b)項の要求を満足させるのは殆ど不可能で、効率良く発振停止時間を短くするには温度計測系に連動させてOn-Offスイッチを自動的に作動させることがどうしても必要となる。

そこで、筆者らは、前節に述べた計測系において、リモートスキャナが熱電対の断線チェックのため各チャンネルのデータの計測後に約1ms間熱電対に流す0.5mAのパルス状の電流を利用して、計測系に高周波誘導加熱装

置の発振出力の開閉を制御する機能を付加することのできる“On-Offスイッチ制御器”を試作し、これを用いることで計測系からの信号によりOn-Offスイッチを制御し温度計測の瞬間だけ加熱装置の発振出力を停止させることを実現し、高周波による誘導障害のない状態での温度計測を可能にした。図4は計測系に付加された誘導加熱装置の発振出力の開閉を制御する方法の概念図である。いま、リモートスキャナの1Chのデータをスキャンした後に発せられる熱電対断線チェック用パルスをPd(1)と表わすこととし、順次同様に、2Chに対応してPd(2)、3Chに対応してPd(3)、・・・、NChに対応してPd(N)と表わす。計測すべき温度データは2Chから(N-1)Chに収録されるものとする。データ収録の最初のチャンネルの一つ手前の1Chで、それに対応するパルスPd(1)を増幅し、これをトリガ信号として電磁リレーを作動させ、高周波電源装置の外部信号入力端子のOn-Offスイッチをオフにし、高周波の発振を自動停止させる。こうして磁界および電界を消失させた状態での温度データが2Ch以降(N-1)Chまで収録される。そして、データ収録の最後の(N-1)Chの次のNChで、これに対応して発せられる断線チェック用パルスPd(N)を増幅し、これをトリガ信号として電磁リレーを作動させ誘導加熱装置の外部信号入力端子のOn-Offスイッチをオンとし、高周波誘導加熱装置の発振回路を自動的に再発振させる。図5は、これらの一連の制御機能を実現するために、実際に試作した“On-Offスイッチ制御器”の回路図で、一对のフィルタ回路、一对の信号増幅回路、フリップフロップ回路およびリレードライブ回路から構成される。フリップフロップ回路の一方の入力端子に、熱電対断線チェック用パルスPd(1)をフィルタ回路および信号増幅回路を通して発振停止用トリガ信号として入力し、同様に、他方の入力端子に、熱



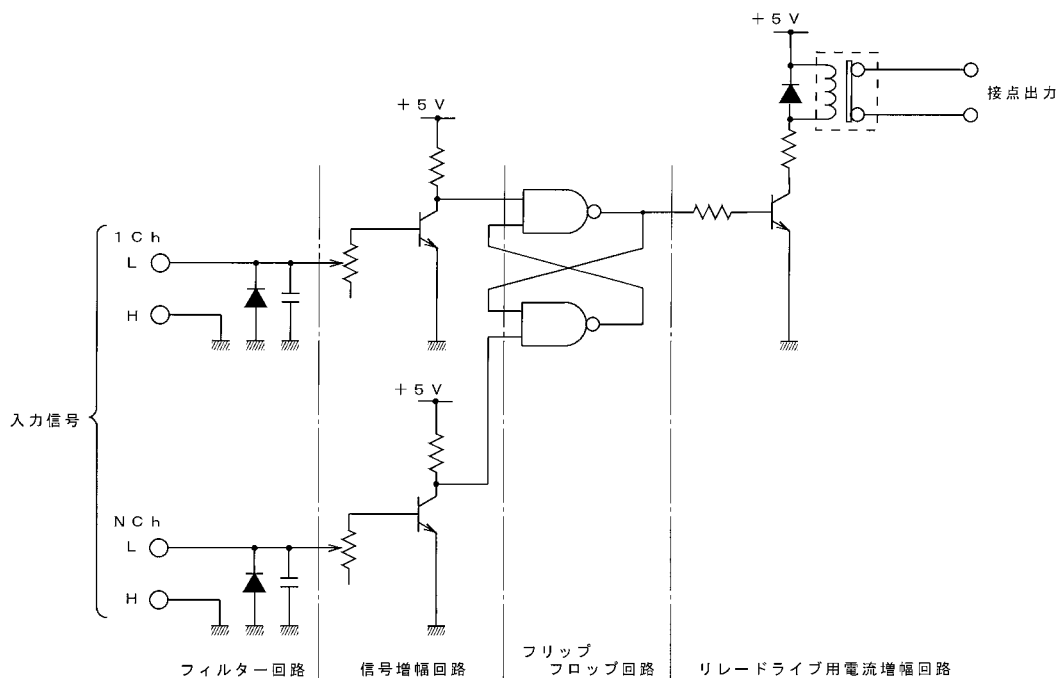


図5 “On-Offスイッチ制御器”の回路図

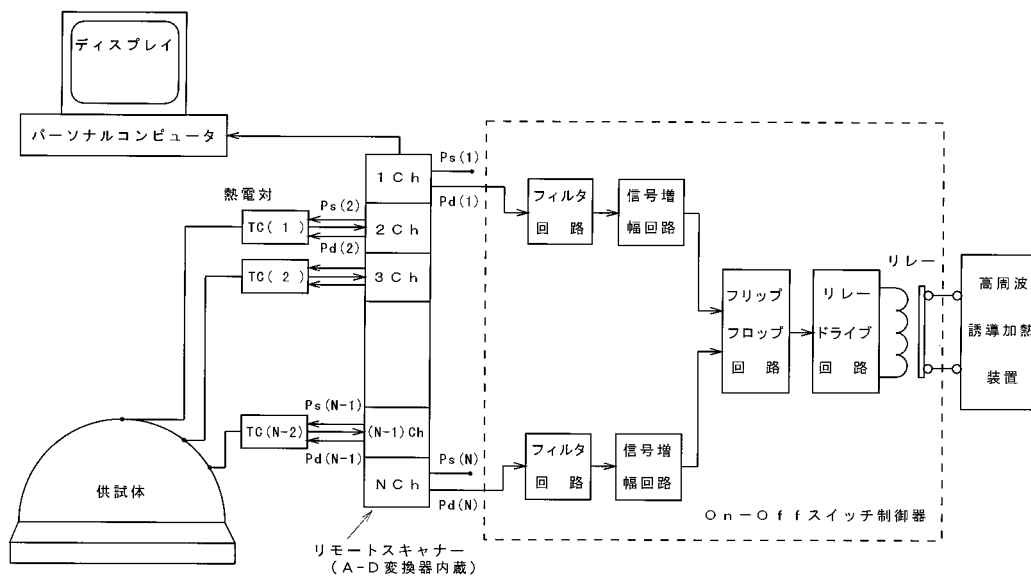


図6 “On-Offスイッチ制御器”を組込んだ温度計測システムのブロック線図

電対断線チェック用パルスPd(N)をフィルタ回路および信号増幅回路を通して発振開始用トリガ信号として入力する。したがって、温度計測データのスキャン開始直前にリモートスキャナが発するパルスPd(1)によって、フリップフロップ回路の出力がオン状態になってリレードライブ回路を作動させ、リレーが誘導加熱装置の外部信号入力端子のOn-Offスイッチを開き、誘導加熱装置の発振出力を自動的に停止させる。この状態で、各熱電対の温度計測データのスキャンと断線チェックが順次行なわれ、最後の熱電対の温度計測データの読取り直後に発するパ

ルスPd(N)がフリップフロップ回路に入力され、オン状態にあるフリップフロップ回路の出力をオフ状態に反転させてリレードライブ回路の作動を停止させる。その結果、リレーの作動が停止して、誘導加熱装置の外部信号入力端子のOn-Offスイッチが復帰し、誘導加熱装置の発振出力が自動的に再開されることになる。図6は、前節に述べた計測系に、この“On-Offスイッチ制御器”を接続し、高周波誘導加熱装置によって加熱される供試体およびその周辺の温度を計測する「温度計測システム」のブロック線図である。

#### 4. 性能評価試験と結果

本加熱装置を用いて、半球面体の形状を持つ供試体を加熱し、加熱装置の熱出力および供試体の温度を計測した。以下、その結果について述べる。

##### 4.1 供試体

供試体の被加熱部分は半径 50 mm の半球面体で、内部には供試体自体の冷却のために、供試体の裏面全体に広がる球面状の冷却水流路が設けられている。流路の入口側および出口側の各端末にはホース口がそれぞれ取付けられており、これを用いて 2.2 節に述べた供試体冷却系と接続される。図 7 に供試体の形状および寸法を、図 8 にその概観を示す。被加熱部分の材質はステンレス鋼 SUS304 である。冷却水は半球面体の中心軸上に取付けられた管状の流路入口より流入し、半球の中心軸と動径とのなす角、すなわち、天頂角が  $0^\circ$  (半球の頂点)、 $30^\circ$  および  $45^\circ$  の位置からそれぞれ供試体裏面全体に広がる球面状流路に直接噴射され放射状に通水される。供試体の外表面には温度モニタ用としてテフロン被覆された線径 0.2 mm

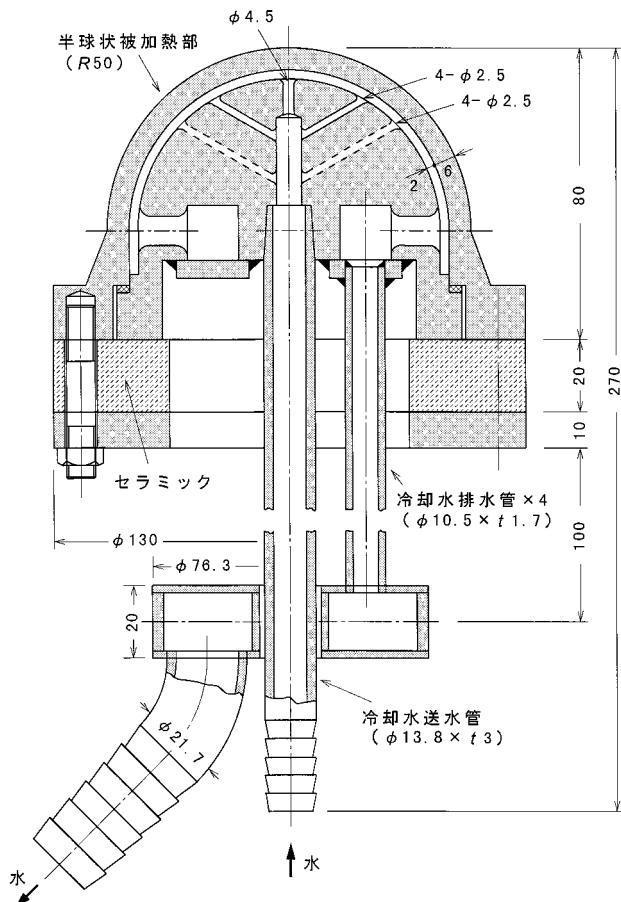


図 7 供試体の形状および寸法

の K 熱電対が何点か取付けてある。これらのうち主要な熱電対は、図 9 に示すように、半球の頂点に 1 点、天頂角が約  $60^\circ$  の緯線上で、半球が水冷同軸端子と真向かう位置を基準に測った方位角が  $90^\circ$ 、 $180^\circ$  および  $270^\circ$  となる位置にそれぞれ 1 点ずつの 3 点、半球部底辺の下部に位置する上支持部に 1 点、セラミック ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) の断熱材を挟んでその下方に位置する下支持部に 1 点の計 6 点である。

##### 4.2 加熱用コイル

加熱用コイルは、供試体の形状や材質あるいは加熱温度範囲など、試験の目的に応じ、それに適した設計・製作が行なわれる。本試験で用いた加熱用コイルは、図 10 に示すように、上述の供試体の形状に合わせて半径 50 mm の半球面体を覆える形状となっている。材質は電気銅 C1100 である。図に見るように、コイルの表面は電気絶縁体で被覆されシリコンワニスで塗り固められた放電防止構造となっている。コイルの巻数は 4 である。コイル導体の断面形状は矩形で、内部は空洞になっており冷却水の流路となっている。

##### 4.3 試験方法

上に述べた供試体および加熱用コイルに合わせて高能

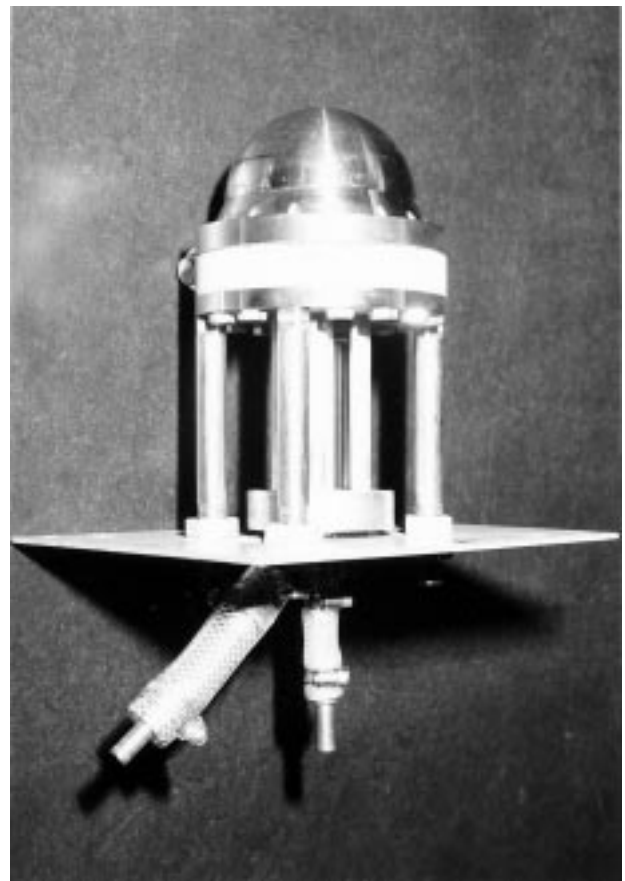


図 8 供試体の概観

率にしかも安定して作動するように調整された熱構造試験用加熱装置を用いて、その半球面体の供試体を加熱し、供試体の冷却水の流量と温度上昇を計測して加熱装置の熱出力（供試体へ吸収される熱量）を算定する。試験は

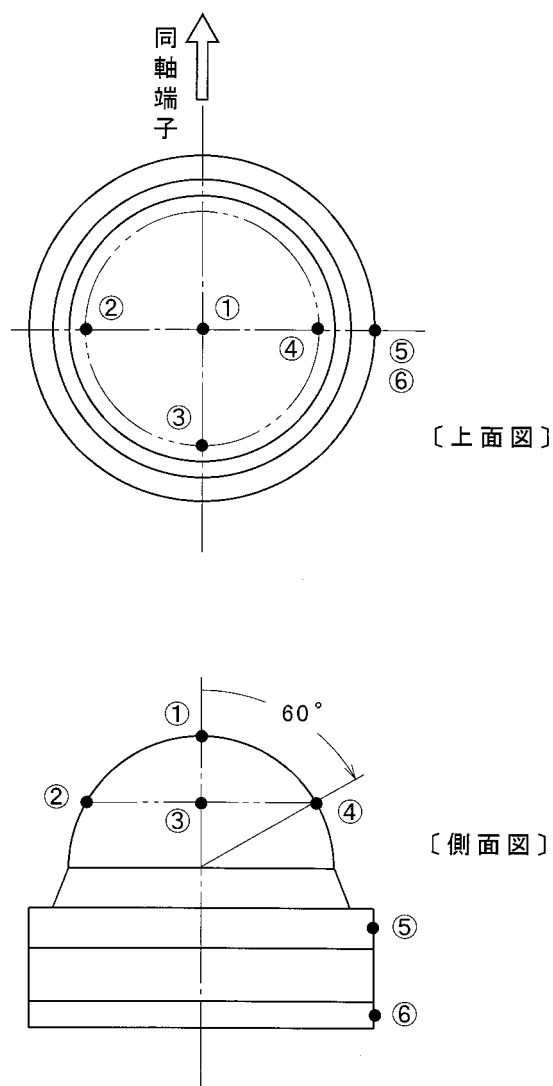


図9 熱電対の取付け位置



図10 加熱用コイル

大気圧および所定の真空雰囲気中の二つの場合についてそれぞれ行なった。これは加熱装置の熱出力および供試体の温度に対する大気自然対流の影響をそれぞれ調べるためである。試験の方法は次のとおりである。まず、供試体を真空槽の中に置き、加熱用コイルをコイル支持金具に取付ける。供試体と加熱用コイルの位置関係を、予め定めた試験条件の間隙になるように、供試体の位置とコイル支持金具を調整し固定する。供試体に取り付けられた熱電対の出力端には、前もってソケットコンタクトを繋いでおき、先に、3章に述べた温度計測系に接続する。次いで、供試体の冷却水流路の入口側および出口側の各ホース口と真空槽のフランジ付開口に取り付けた対応するホースコネクタとをテトロンブレッドホースによって繋ぎ供試体冷却系と接続する。そして、加熱装置に規定の流量の冷却水を、また、供試体には試験条件として設定された流量の冷却水を通水循環させる。冷却系に水漏れの無いことを確認し、大気圧の試験であれば、この状態で、真空中の試験であれば、真空槽の扉を閉めて真空ポンプを起動し、真空槽を大気圧から所定の真空度まで排气する。次いで、計測系および誘導加熱装置を起動準備状態にし、加熱開始の時刻に合わせて、加熱装置の発振管の陽極電圧を設定値まで速やかに上昇させ、供試体を所要の試験条件で加熱する。同時に、一定の時間間隔で供試体の冷却水の入口温度と出口温度および供試体の温度を計測する。この計測をしばらく続行して定常状態での冷却水の入口および出口の温度データを取得する。さて、高周波誘導加熱で供試体に発生する熱量のうち外部への放熱損失を除いた、供試体の加熱に必要な正味の熱量が、損失なく冷却水の温度を上昇させるのに使用されていると考えるならば、その熱量、すなわち、熱構造試験用加熱装置の熱出力  $Q$  は次のように表わされる。

$$Q = (1/60)\rho Lc \Delta\theta \text{ [kW]} \quad (1)$$

ここに、

$\rho$  : 冷却水の密度 [kg/l]

$L$  : 冷却水の単位時間の容積流量 [l/min]

$c$  : 冷却水の比熱 [kJ/(kg·K)]

$\Delta\theta$  : 冷却水の温度上昇 [K]

いま、冷却水の密度および比熱として  $\rho = 1$  [kg/l] および  $c = 4.187$  [kJ/(kg·K)] の値をそれぞれ採用するならば、熱構造試験用加熱装置の熱出力は冷却水の流量と温度上昇から次式によって算出されることになる。

$$Q = 0.0698L \Delta\theta \text{ [kW]} \quad (2)$$

試験は、真空槽内の圧力が大気圧および 0.4 Torr のそれぞれの場合に対して、供試体に流れる冷却水の流量をそ



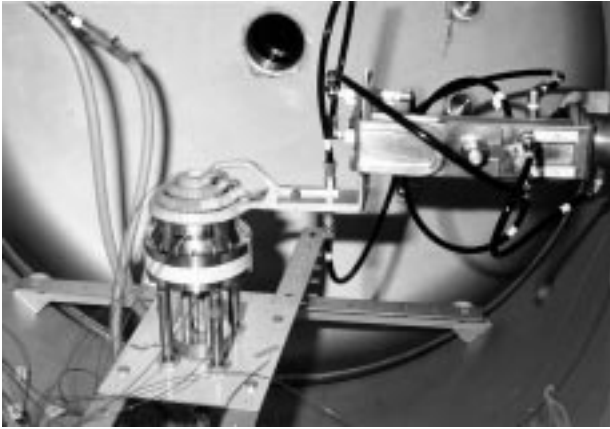


図 11 大気圧での試験の状況

それぞれ 4.7 l/min, 9.3 l/min および 20 l/min に調節し、それら三つの場合についてそれぞれ行なった。供試体と加熱用コイルの間隙は 4 mm とした。加熱に際して、高周波誘導加熱装置の発振管の陽極電圧は、真空雰囲気中での試験における電極間のコロナ放電防止の観点から定められた許容最大値の 8.5 kV に設定した。この時の陽極電流は 2.1 A, したがって発振管への陽極入力 は 17.9 kW である。この設定陽極電圧 8.5 kV での真空中の加熱では、供試体や加熱用コイルの付近でグロー放電は発生したもの、コロナ放電は発生しなかった。図 11 に大気圧での試験の状況を示す。

4.4 試験結果と考察

図 12 に、冷却水の供試体入口温度  $\theta_{in}$ , 供試体出口温度  $\theta_{out}$ , および出入口温度差, すなわち, 供試体の温度上昇  $\Delta\theta (= \theta_{out} - \theta_{in})$  の時間的变化を示す。図の(a)は大気圧での試験結果, (b)は真空中での試験結果であり、それぞれ上から冷却水流量が 4.7, 9.3 および 20.0 l/min の場合を示してある。これらの図において、大気圧と真空中とで、同じ冷却水流量に対する  $\theta_{in}$  および  $\theta_{out}$  の計測値を比べてみると、初期温度(≈室温)の違いを考慮に入れば、その大きさに大差はなく、時間的变化もほぼ同様の傾向であることが判る。図に見るように、入口および出口温度は加熱開始後 8 分を経過しても僅かに上昇を続ける傾向にあるが、出入口温度差は、流量が 4.7 l/min および 9.3 l/min の場合でそれぞれ 1 分, 20.0 l/min では 30 秒を経過すると、ほぼ一定となっている。これらの計測値と式(2)を用いて、熱構造試験用加熱装置の熱出力の値を計算した結果を表 2 に示す。同じ冷却水流量に対し、熱出力の値は大気圧でも真空中でもほぼ同じ大きさで、顕著な差異は認められない。このことは、大気圧での試験において、供試体表面からの対流による熱損失は少なく、供試体表面の周囲が空気あるいは真空のいずれの状態であっても、そのことが供試体半球部の裏面を境界として冷却

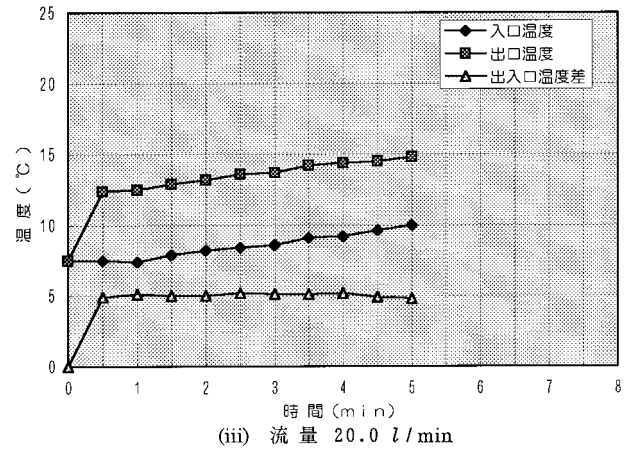
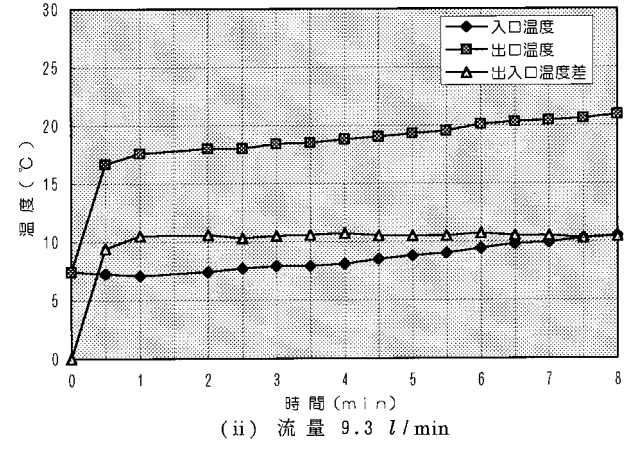
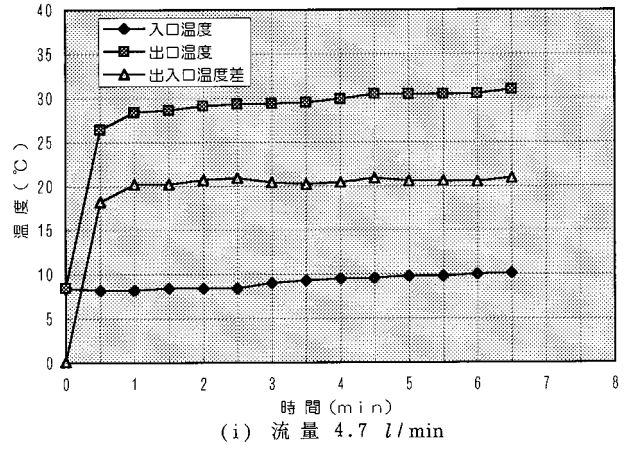
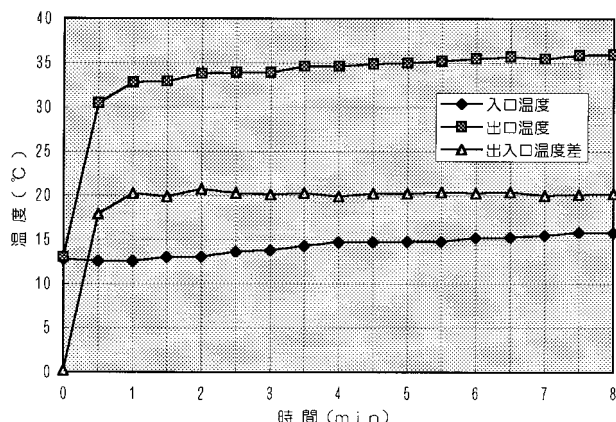


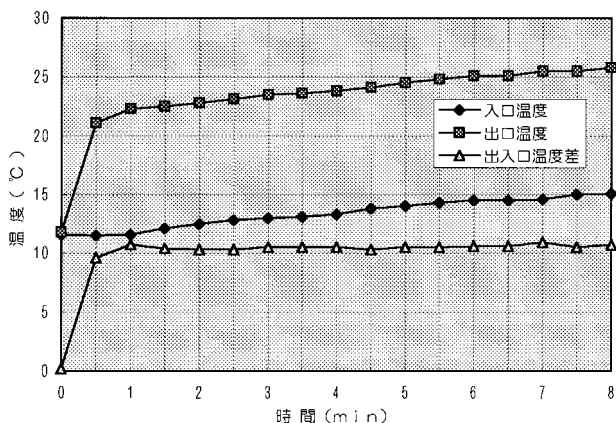
図 12(a) 大気圧での試験結果

水に伝達される熱量の大きさに与える影響は殆ど無いことを意味する。しかし、冷却水流量を増加させると大気圧、真空中いずれの場合においても熱出力の値はそれぞれ微増する。これは、供給している熱量は一定であるから、冷却水流量を増すと、熱出力の計測系から外部へ逃げる熱の量が少なくなることを示している。今回の試験での試験装置や方法そして計測系から考えて、この現象は、本来、供試体出口の直ぐ近くで計測すべき冷却水の出口温度を、温度計測の簡単のために、供試体出口から離れた位置にある真空槽外の大気側のテフロンブレード

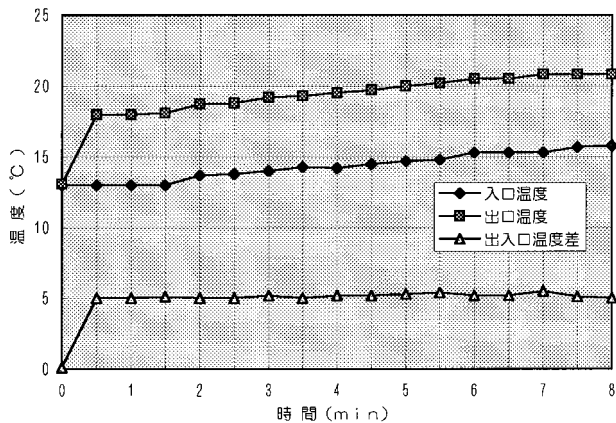




(i) 流量 4.7 l/min



(ii) 流量 9.3 l/min



(iii) 流量 20.0 l/min

図 12(b) 真空中での試験結果

表 2 熱構造試験用加熱装置の熱出力

供試体の 冷却水流量 (l/min)	大気圧		真空 (0.4Torr)	
	出入口温 度差 ( )	熱出力 (kW)	出入口温 度差 ( )	熱出力 (kW)
4.7	20.6	6.76	20.2	6.63
9.3	10.5	6.82	10.6	6.88
20.0	5.0	6.98	5.2	7.26

ホースに挿入した熱電対で計測していることに起因して生じたものと推測される。なぜなら、冷却水の流量を増

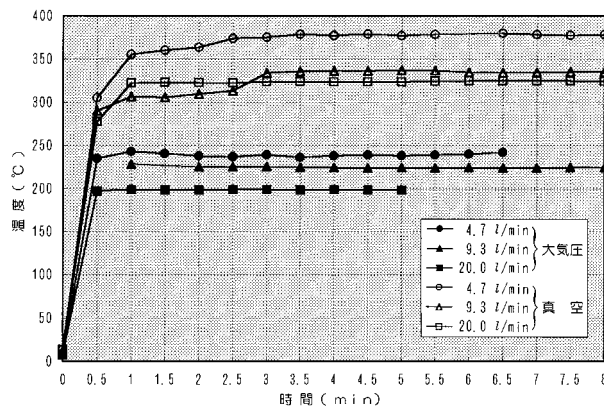


図 13 供試体表面温度上昇の一例；計測点

加させると、流速が速くなるために、入口温度計測点を通り供試体内に流入して加熱された冷却水が供試体出口からテフロンブレードホースを通して真空槽外の出口温度計測点に達するまでに要する時間は、流量の少ない場合に比べて短縮され、その間にホース壁を通して逃げる冷却水の熱の量は少なくなると考えられるからである。したがって、冷却水流量を十分に多くすれば、熱出力の値はある漸近値に落ち着くものと思われるが、流量を上げるよりは出口温度の計測点を供試体出口の十分に近い箇所に移すほうが精度の良い計測を可能とし、また、現実的でもあろう。本試験での熱出力の計測値は、これらの考察から、いずれも真値より低めの値を示していることになるが、誘導加熱装置の熱出力値としては、それらの中で冷却水流量が最も多い 20.0 l/min の場合に得られた結果を採用するのが真値に最も近く合理的である。供試体の表面温度の計測例として、計測点中で最も高い温度を示した計測点の時間に対する温度変化の様子を図 13 に示す。温度上昇を大気圧と真空中とで、例えば、加熱開始 5 分経過後の時点で比較すると、冷却水流量が 4.7, 9.3 および 20.0 l/min のそれぞれの場合に対して、大気圧では 229.6, 217.0 および 190.9°C, 他方、真空中では 363.8, 325.5 および 310.3°C である。いずれの流量の場合も、大気圧での試験による表面温度上昇は真空中での試験のそれに比べて、100°C 以上も低い。これは、大気圧の試験では、供試体を覆う空気存在が、真空中での試験のときよりも、供試体の表面温度を低下させているためと考えられる。ただし、供試体表面からの自然対流による熱放散は、大気圧と真空中との試験の結果から推論して、熱出力の計測結果に殆ど影響を与えない程度の大きさであることはすでに述べたとおりである。また、図から判るように、大気圧、真空中いずれの場合においても冷却水流量を増加させると表面温度上昇は減少する。これは、流量を上げると、流速が速くなり、遅い場合に比べて冷却水の水温が上がらず冷却効果が良くなるためと推察される。

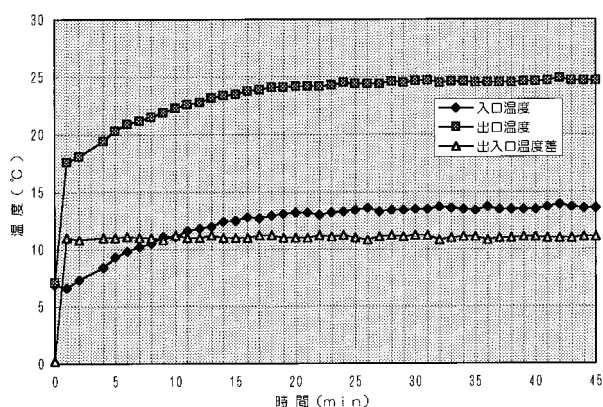


図 14 補充試験の結果；真空，流量 9.3 l/min

本試験による加熱装置の熱出力の算定は，熱の移動が定常状態にあることを前提としている。上の一連の試験では，供試体の冷却水の出入口温度差がほぼ一定値を保って推移していることを確認し，試験開始後 8 分あるいはそれ以内の経過時点の計測で試験を終了している。しかし，本節の冒頭にも述べたように，入口および出口温度は試験終了時においてもそれぞれ僅かに上昇を続ける傾向を示している。このことは，これらの一連の試験の熱移動の状態が実際には定常状態に達していないことを示唆するものであり，もし，試験時間を長く続行したならば，一見，一定値を保って推移し定常値と見られる出入口温度差の値も実際の定常値が別にあるとあって漸次それに収束するのかもしれない。これを確認するために，試験時間を 45 分とした補充試験を実施した。試験は真空中で行ない，供試体冷却水の流量は 9.3 l/min に，供試体は先の試験の時の位置に合わせて真空槽内に再設置し，外の条件は上述の一連の試験と同一に設定した。図 14 に補充試験の試験結果を示す。これを見ると，試験開始後ほぼ 30 分を経過すると冷却水の入口および出口温度はともに定常状態に達し，以後それぞれ 13.6°C および 24.6°C 前後の一定値を保って推移している。したがって，定常状態での出入口温度差は 11.0°C となる。さて，出入口温度差の時間に対する変動を見てみると，試験開始後 1 分には速くも 11.0°C の値を示し，以後，僅かな変動はあってもほぼこの値を保って試験終了時まで推移していることが判る。補充試験のこれらの結果は，冷却水の入口および出口温度が完全に定常状態に至っていないとしても，両者の温度差がほぼ一定値を保って推移するならば，これを以て定常状態の出入口温度差として差し支えないことを示している。したがって，先の一連の試験から得られた高周波誘導加熱装置の熱出力の値は実測値として妥当なものと考えられる。補充試験から得られた熱出力の値は 7.14 kW である。表 2 の，この補充試験と同じ試験条件の，その値は，6.88 kW である。若干，補充試験の結果が高い値を示している。これは，補充試験の実施にあたって，

供試体を真空槽内に再設置したため，供試体と加熱用コイルの相対位置の関係が先の一連の試験の場合と僅かにずれたことが考えられ，このための影響と思われる。

発振管の直流入力に対する高周波誘導加熱装置の熱出力の割合，すなわち，実効出力は，本試験の結果によれば，直流入力 17.9 kW であるから，熱出力を 6.9 kW とし，38.5 % 程度である。鋼管などの溶接に用いられる同じ発振方式の高周波誘導溶接装置では専用機ということもあって 55 % 程度の実効出力があるようであるが，一般の誘導加熱装置では 25 ~ 50 % 程度のものである。したがって，実効出力 38.5 % という値は高い値ではないけれども低くもなく，ごく一般的な値といえる。なお，本試験の熱出力の計測結果は，熱構造試験用加熱装置の熱出力の基本仕様である 5 kW 以上を大気圧および真空中のいずれの場合も満足するものである。また，これらの熱出力値は供試体の加熱面積を半球部表面積の略 60 % と見積もると 700 kW/m<sup>2</sup> 以上の熱流束に相当する。これは，1996 年 2 月 12 日に打上げられた極超音速飛行実験機 HYFLEX のノーズ淀み点で予測された最大加熱率 409 kW/m<sup>2</sup> を上回るものである<sup>6)</sup>。

## 5. 結 語

以上，試作した高周波誘導加熱方式による熱構造試験用パイロット加熱装置の構成および基本性能について紹介した。また，熱電対を用いての電磁環境下における温度計測法，ならびに，本加熱装置の性能を確認するために行なった性能評価試験とその結果について述べた。

誘導加熱される供試体の温度を，熱電対を用いて正しく計測するために，計測系に誘導加熱装置の発振出力の開閉を制御する機能を付加する“On-Off スイッチ制御器”を試作し，その作動確認試験を兼ねて本性能評価試験での温度計測に使用した。その結果，温度計測の瞬間だけ誘導加熱装置の発振出力を確実に停止させることができ，電磁界の影響のない状態での温度計測が実現され，本計測法の有用性が確認された。

性能評価試験での熱出力の計測結果は，半径 50 mm の半球形状のステンレス製被加熱物を対象に 5 kW 以上という基本仕様を大気圧および真空中のいずれの場合も満たすものであった。これらの熱出力の計測値は熱流束に換算すると 700 kW/m<sup>2</sup> 程度の環境を実現したことになる。なお，本試験において，誘導加熱装置は発振管の陽極電圧 8.5 kV，陽極電流 2.1 A，したがって陽極入力 17.9 kW で運転された。加熱装置の実効効率，すなわち，熱出力と陽極入力との比は 38.5 % であった。

最後に，本熱構造試験用パイロット加熱装置の基本設

計の段階から製作，輸送，据付，調整まで，一つのシステムとしてまとめ上げた(株)日立製作所の関係者各位の多大なるご尽力に深く感謝の意を表す。また，(株)明電舎生産技術部の石坂雄二 技師長，(株)守谷商会 第4 営業部の石井 雅 営業課長，および日本電興(株)の技術者の方々には，調整運転の過程で一方ならぬお世話になった。ここに記して，厚く感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 井川日出男；“スペースシャトルの熱環境と防熱材料”，日本複合材料学会誌，第6巻，第3号，昭和55年(1980年)7月31日，pp.83-89。
- 2) 構造力学部熱構造研究室；“パイロット高周波熱負荷装置について”，航技研ニュース No.442，航空宇宙技術研究所，平成8年(1996年)2月。
- 3) 例えば，  
中村 仁；“新版 高周波加熱”，(株)恒星社厚生閣，昭和45年(1970年)5月30日。
- 日本電熱工学委員会編；“工業電気加熱ハンドブック”，(株)電気書院，昭和43年(1968年)10月25日。  
吉村順一；“高周波加熱用電子管発振装置の設計と調整”，(株)誠文堂新光社，昭和42年(1967年)12月15日。  
高橋勸次郎他；“高周波の基礎と応用”，東京電機大学出版局，1991年11月20日。  
Simpson, P. G.; “Induction Heating,” McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1960。
- 4) 林 主税；“工業物理学講座，B・真空工学編-1，真空装置”，日刊工業新聞社，昭和31年(1956年)7月20日。
- 5) 遠藤修司，田中 太；“誘導又は誘電加熱中の温度計測システム”，特許出願明細書，特願平8-148566，平成8年(1996年)5月21日。
- 6) 甲斐高志，山本昌孝，白水正男；“極超音速飛行実験(HYFLEX)機の熱防護系の開発について”，第39回 宇宙科学技術連合講演会講演集，平成7年(1995年)11月1日，pp.305-306。

---

## 航空宇宙技術研究所資料 716号

平成9年8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)47-5911 ㊞182

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, 企画室調査普及係にご連絡ください。



Printed in Japan