

急速輻射加熱構造物試験装置と二三の 試験結果について

植 村 益 次
砂 川 惠
井 山 向 史

A Rapid Radiant-Heating Equipment and Some Results of Measurements on Heat Transfer Rate and Heating Capability

By

Masuji UEMURA, Megumi SUNAKAWA,
and Hisashi IYAMA

Abstract: The outlines of the rapid radiant-heating equipment on a large scale of 200 kW, which was installed recently in the Department of Structures, Aeronautical Research Institute, University of Tokyo, by the grant-in-aid for the scientific research of the Ministry of Education are described at first in this paper.

The important requirements in the design of this equipment were as follows:

- (1) rapid heat transfer rate not less than 20 Btu/ft²sec with large heat-generation and small thermal inertia, and maximum attained temperature not less than 800°C and maximum rate of temperature rise not less than 70°C/sec for thin plate or shell structures,
- (2) easy controllability in heating,
- (3) non-medium heat transfer so as to make the measurements easy,
- (4) high safety, and
- (5) low cost.

Taking into account the above requirements, the infrared radiant-heating method with the automatic control system of electronic analogue computer was adopted for this equipment.

Next, some results of measurements on (1) the distribution of heat transfer rate resulting from the radiation and (2) heating capability of this equipment are described. That is to say, as expected in the design, the heat transfer rate, the maximum temperature and the maximum rate of temperature rise attained to 20 Btu/ft²sec, 1,100°C and 90°C/sec, respectively, for 18/8 stainless steel plate blackened with Co₂O₃ paint (0.5 mm in

plate-thickness) under the maximum supplied power, 200 kW, in the case where the distance between the furnace and the plate was 100 mm. Accordingly, it was found that the equipment had enough performance and capacity for the use in the structural experiments at elevated temperature.

概 要

東京大学航空研究所航空力学部構造関係研究室に設置された 200 kW 急速輻射加熱構造物試験装置について、その機能と性能の概要を述べ、平面型対向加熱器を用いて行った q (熱流入速度) 分布および加熱能力に関する二三の測定結果を示した。

本装置の設計仕様の要点は次の如くである。

- (1) 熱源の熱発生量が大きく、熱慣性が小で急速な加熱が行え、高温が得られること。熱発生量は $20 \text{ Btu/ft}^2 \text{ sec}$ 、通常の薄板あるいは薄殻構造加熱の場合の温度上昇率 70°C/sec および最高到達温度 800°C 以上を目標とする。
- (2) 加熱制御容易なること。
- (3) 試験体に接触せずに熱伝達が可能であること。
- (4) 安全なること。
- (5) 低廉なること。

以上の諸点を検討の結果、相似型電子計算機の手法によって自動制御を行う赤外線ランプによる輻射加熱方式が採用された。

試験の結果、本装置は最大出力時において $q_{\text{center}} = 20 \text{ Btu/ft}^2 \text{ sec}$ 、18/8 鋼板 (0.5 t) を用いた場合の最大温度上昇率 90°C/sec 以上および最高到達温度約 $1,100^\circ\text{C}$ が期待されるなど設計仕様を十分に満足し、各種構造物の加熱実験に極めて有用であると考えられる。

I. ま え が き

超音速飛行に伴う空力加熱および内蔵する推進剤の高温燃焼ガスが、飛行体構造、燃焼室および排気管などの強度および剛性に与える影響は、飛行体自身の性能、空力特性および空力弾性問題とも密接に関連し、航空工学における重要な一研究問題である。そして、航空機および航空機等における薄板および薄肉殻体構造の熱変形、熱歪曲および熱応力問題は、合理的な耐熱構造や遮熱構造の追求とともに、早急な解明が望まれている。

東京大学航空研究所では、上述の諸問題の実験的研究のため、文部省機関研究費の援助を受け、池田教授・吉村教授をはじめ構造強度関係研究者が中心となり、輻射加熱による 200 kW の大型急速加熱構造物試験装置を試作し、松下通信工業株式会社の尽力により整備を終った。

加熱方式として赤外線ランプによる輻射加熱方式を採用したのは、(1) 熱源の熱発生量が大きく、熱慣性が小で急速な加熱が行え、高温が得られること、(2) 制御容易なること、(3) 試験体に接触せずに熱伝達が可能なること、などの諸点を考慮して決定されたものである。

本報告では、まずこの試験装置の概要を説明し、次にその性能についての二三の基礎的測定結果を述べる。

II. 装置の概要

本装置を製作するに先だち、その基礎的資料を得るための準備的研究をかねて、筆者らは出力 20 kW の小型構造要素輻射加熱装置を試作し、良好な結果を得た [1].

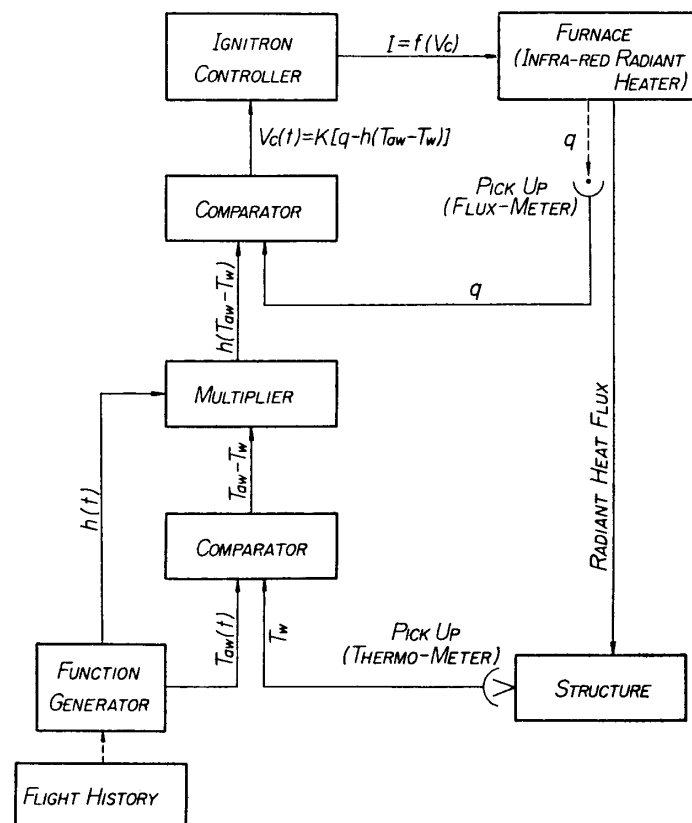
本装置は、上記装置より得られた資料を基礎にして、諸外国における同種装置の調査結果 [2] をも参照して設計されたもので、高速飛行体の構造模型あるいは構造要素に、飛行中に起るのと相似な時間的に変化する加熱状態を与えることができる。

超音速飛行体あるいはロケット燃焼室周りの構造表面は、次式 [3] で与えられる関係式の下に飛行中あるいは燃焼中に加熱される。

$$q = h(T_{aw} - T_w), \quad (1)$$

ここに、 q : 単位面積単位時間当りの熱流入速度, h : 熱伝達係数, T_{aw} : 断熱壁面温度, T_w : 構造表面温度。

本装置は加熱源として赤外線ランプを使用し、飛行径路等を想定すれば h および T_{aw} は時間の函数として与えられるので、加熱を相似型電子計算機の手法により自動的な制御を行い、(1) 式の関係を実量的に常に満足するような熱発生を行うようになっている。すなわち、(1) 式および第 2.1 図において、 h および T_{aw} は飛行状態あるいは燃焼状態によって求められるので、時間の函数としてあらかじめ函数発生器に設定して発生させる。 T_w は

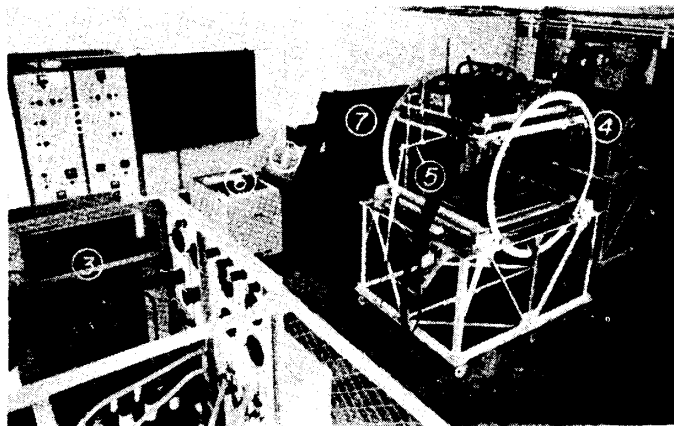


第 2.1 図 急速輻射加熱装置の系統図。

試験体にとりつけた温度計で電圧の形で測定される。そして、比較器においてまず $(T_{aw} - T_w)$ の演算を行った後に乗算器で $h(T_{aw} - T_w)$ が作られ、次の比較器に入る。ここでは、熱輻射計で測定した加熱器からの q と乗算器からの $h(T_{aw} - T_w)$ とを比較し、その差に対応する信号電圧 V_c をイグナイトロン制御器に与える。イグナイトロン制御器の出力電圧は V_c によって変化し、加熱器に流入する電流が制御されるので、 $V_c=0$ すなわち (1) 式の $q=h(T_{aw}-T_w)$ の関係が常に成立するように自動的な制御が行われる。

本装置は上述の制御回路を2系統並列に用意し（以下 CH-1 および CH-2 と略記する）、空間的に2点での制御を行うことができる。

なお、上記熱入率制御方式のほかに温度制御方式も可能であり、また手動制御に切替えることもできる。



- ① 制御卓
- ② 制御架
- ③ 電力部
- ④ 加熱器
- ⑤ 熱輻射計
- ⑥ 計測記録卓
- ⑦ 構造試験用鉄塔

写真 1. 装置の全景

本加熱装置は次のものより構成される（写真 1）。

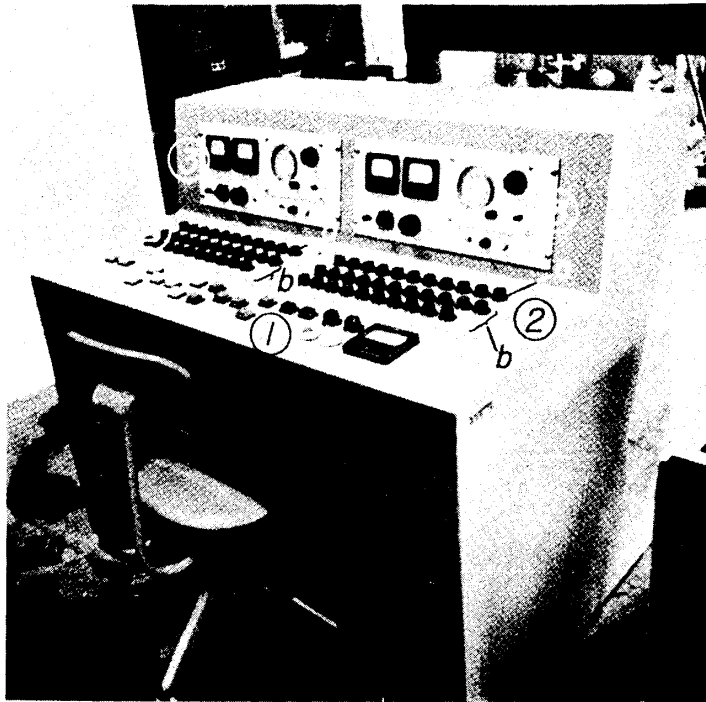
- (1) 制御卓
- (2) 制御架
- (3) 電力部
- (4) 加熱部（炉）
- (5) 変換器（熱輻射計および温度計）
- (6) 計測記録卓

以下簡単にこれらを説明するが、各構成要素の諸元および性能は必要最小限のものに止める。

2.1. 制 御 卓（写真 2）

制御卓は、加熱制御のために h および T_{aw} の時間変化関数を発生するとともに、装置全体の電源並びに準備状況を確認して動作指令を与え、かつ動作状況を監視するもので、次のものから構成されている。

- | | |
|-------------------|---|
| i) 筐 体 | 1 |
| ii) 操作盤 | 1 |
| iii) 任意関数発生器 (FG) | 1 |



- ① 操作盤
- ② 任意函数設定部
a: h 用, b: T_{aw} 用
- ③ 任意函数発生部

写真 2. 制 御 卓

任意函数発生器は、 h および T_{aw} の両者を時間函数として別箇に発生するものを一組としてそれぞれ両チャンネルにある。

2.1.1. 操 作 盤

操作盤の各要素を機能毎に分類すると次のようになる。

- a) 各機器に AC 100 Volt を供給し、確認する部分。
Main 100 V, Computer 100 V, CH-1 100 V, CH-2 100 V.
- b) イグナイトロン制御器 (IC) の電源を確認する部分。
CH-1 100 V, CH-2 100 V, Main 3,300 V, OCB 3,300 V, CH-1 420 V, CH-2 420 V.
- c) 各機器の準備完了を確認する部分。
CH-1 IC, CH-2 IC, Computer, Recorder, CH-1 FG, CH-2 FG.
- d) 各機器の動作指令とそれを確認する部分。
Computer COMP. or RESET (動作時以外は常に入力リレーを遮断した RESET の状態におく), Recorder Start or Stop, Start, Stop.
- e) 動作状況を確認する部分。
CH-1 および CH-2 の Controlled Current を監視する電流計。

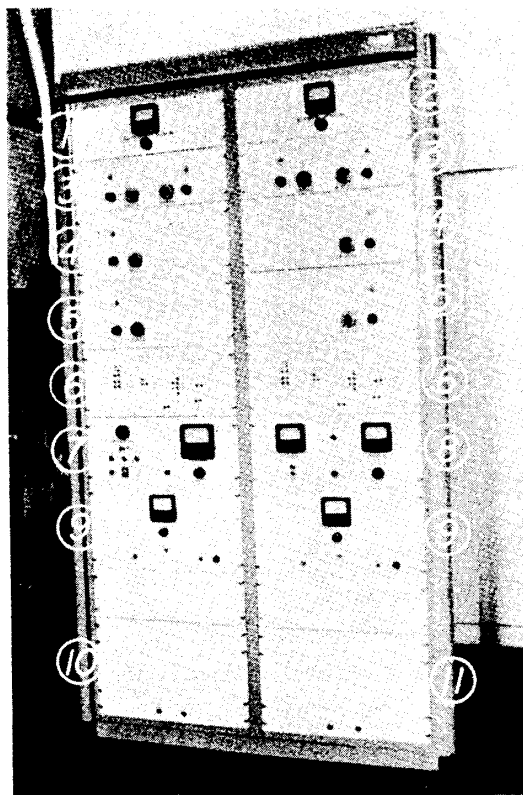
2.1.2. 任意函数発生器 (Function Generator)

本器は函数発生ポテンショメータの各タップに、 $h(t)$ および $T_{aw}(t)$ の両函数の各区間の分岐点に対応する電圧を設定し、ブラシを一定速度で駆動することによって、折れ線で近似した任意の函数波形を発生する装置である。1 基の諸元および性能は次のごとくである。同時に設定する 2 函数の区間数は h が 10, T_{aw} が 20 であり、したがって設定点は h が

11, T_{aw} が 21 となり, また出力電圧範囲は 0~10 Volt で, 設定精度は 0.2% (フルスケール) である. 設定電圧の校正は, 切替スイッチにより精密ポテンショメータ設定の基準電圧と比較して行う. sweep 速度は, 10, 20, 40, 80 秒/フルスケールおよび 1, 2, 4, 8 分/フルスケールの 8 段階に切換えることができ, sweep の状態は 0~100 の目盛のついた目盛盤に示される. 起動は制御卓操作盤の起動スイッチにより, 1 周して目盛 100 で自動的に停止するが, 制御卓操作盤の停止スイッチで手動停止もできる. リセットは手動で目盛盤の指針を零点に復帰させて行う.

2.2. 制 御 架 (写真 3)

制御架は, 任意函数発生器からの信号と熱輻射計および温度計など変換器からフィードバックされた信号とに基づき計算をして, それぞれ熱入率制御方式かまたは温度制御方式かにより, イグナイトロン制御器へ制御信号を送るものであり, 次のものから構成されている.



- ① 低圧電源 A
- ② " B
- ③ 比較増幅器 A_1, A_2
- ④ 計測増幅器 A_3
- ⑤ " A_4
- ⑥ 制御回路結線用パネル
- ⑦ 計算操作盤
- ⑧ 電源操作盤
- ⑨ サーボ乗算器
- ⑩ 高圧電源 A
- ⑪ " B

写真 3. 制 御 架

i) 筐 体	1
ii) 制御回路結線用パネル	2
iii) 比較増幅器 A_1, A_2	各 2
iv) 計測増幅器 A_3, A_4	各 2
v) サーボ乗算器	2
vi) 計算操作盤	1
vii) 電源操作盤	1

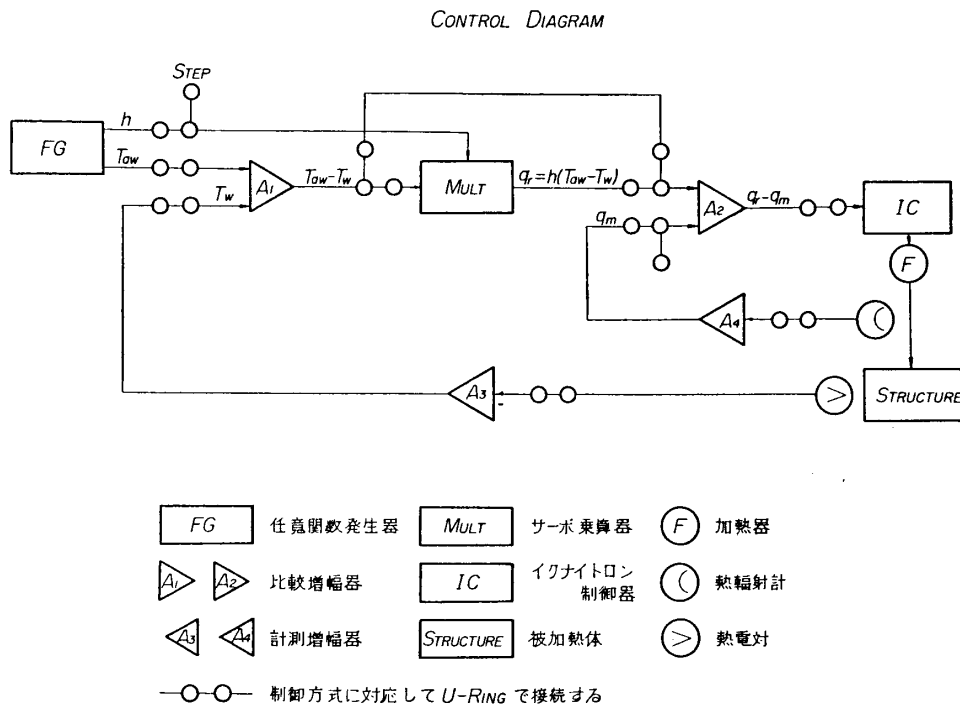
viii) 低圧電源 A, B 各 1

ix) 高圧電源 A, B 各 1

本装置は同一の系統が 2 チャンネル並列に入っているのので、1 チャンネルのみについて説明する。

2.2.1. 制御回路結線用パネル

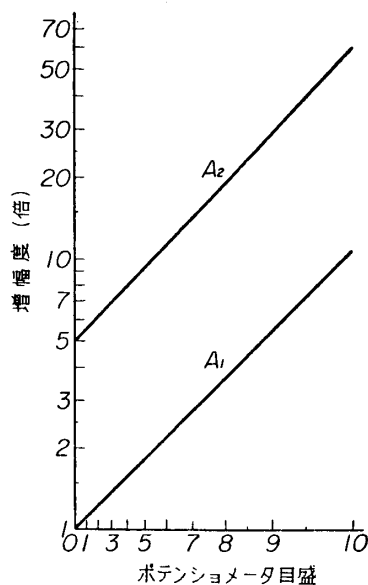
第 2.2 図に示すときのもので、パネル面に構成されている「CONTROL DIAGRAM」の各要素の入力および出力を U リングの挿入により接続し、所要の制御系を組みあげることができる。



第 2.2 図 制御回路結線用パネル。

2.2.2. 比較増幅器 A_1, A_2

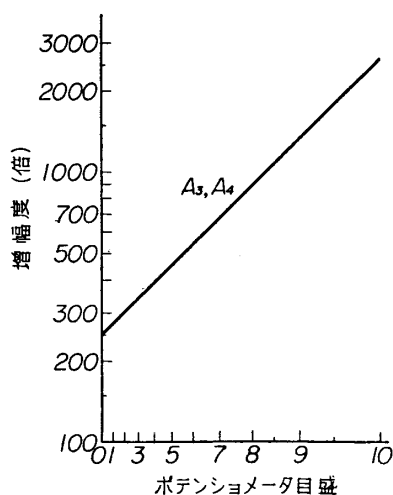
アナログ計算機用加算器を用い、 A_1 および A_2 は入力抵抗を除きその回路は全く同じで、二つの入力信号の差を増幅するものである。 A_1 は T_{aw} に対応する任意関数発生器（または Step 電圧）の出力と T_w すなわち計測増幅器 A_3 の出力との差を増幅し、サーボ乗算器（または比較増幅器 A_2 ）に与える。 A_2 は $q_r = h(T_{aw} - T_w)$ すなわちサーボ乗算器（または比較増幅器 A_1 ）の出力と実際に q を測定して得られる計測増幅器 A_4 の出力との差を増幅しイクナイtron制御器に与える。 A_1 および A_2 の出力電圧はそれぞれ最大 ± 10 Volt および最大 ± 50 Volt であり、増幅度可変範囲はそれぞれ 1~11 倍および 5~60 倍であり第 2.3 図に示す。直線性および周波数特性は両者共同一で、それぞれ 1% 以内および 5 KC (−3dB) である。



第 2.3 図 比較増幅器の増幅度.

2.2.3. 計測増幅器 A_3 , A_4

アナログ計算機用演算増幅器で、 A_3 および A_4 はその構成および仕様は全く同一で、特に微小直流入力信号の増幅用として設計されたものである。 A_3 は T_w すなわち実測した熱電対の出力を増幅し比較増幅器 A_1 に入れる。 A_4 は q_m すなわち実測した熱輻射計の出力を増幅し比較増幅器 A_2 に入れる。両者の出力電圧は最大 ± 10 Volt で、増幅度可変範囲は 250~2,500 倍 (第 2.4 図) である。直線性は 1% 以内、周波数特性は 100 c/s (-3 dB) である。



第 2.4 図 計測増幅器の増幅度.

2.2.4. サーボ乗算器

本器は制御系において、比較増幅器 A_1 からの出力 ($T_{aw} - T_w$) と任意函数発生器からの出力 (h) との積を出力として出す装置であり、サーボ増幅器、2 相サーボモータ、タコジェ

ネレータ, 2 連中間タップ付精密ポテンショメータおよび高精度の歯車より構成されている。精度は $\pm 0.5\%$ 以上, 周波数応答は 5 c/s (10% 振幅) であり, サーボ増幅器の増幅度は約 80 dB である。

以上の要素は 1 チャンネルのみについて述べたが, 両チャンネルに共通な要素として次の各項がある。

2.2.5. 計算操作盤

各増幅器の「COMPUTE」および「RESET」を行いかつ動作状態を点検するための装置と, 高圧電源からの安定化した $\pm 50 \text{ Volt}$ を用いる直流電圧発生器 (出力は制御回路結線用パネルに出ている) とから構成されている。

2.2.6. 電源操作盤

制御架の電源 AC 100 Volt のスイッチおよび電源電圧ならびに各直流高圧を監視する装置と, 制御架全体の調整準備が完了したことを制御卓に知らせる装置とから構成されている。

2.2.7. 低圧電源 A, B

A はトランジスタ安定化回路が 3 組入っており, その 1 組は任意函数発生器の函数設定用として DC 10 Volt を, 他の 2 組はそれぞれ DC 12 Volt を発生し計測記録卓の前置増幅器用として DC 24 Volt を供給する。B はトランジスタ安定化回路が 2 組入っており, CH-1 および CH-2 の各計測増幅器初段ヒータ電源として DC 12 Volt を供給する。両者の性能は全く同一で, 電源は AC 100 Volt , 出力電流は最大 1 Amp , 出力電圧は DC $9 \sim 13 \text{ Volt}$ の可変範囲を有しその変動率は電源電圧 10% 変化に対して 0.1% , リップルは 10 mV 以下である。

2.2.8. 高圧電源 A, B

高圧電源 A および B で直流安定化電源を構成し, 各増幅器, サーボ乗算器および計測記録卓に供給する $\pm 300 \text{ Volt}$ (各最大 1.2 Amp) および $+60 \text{ Volt}$ (最大 40 mA) と, 計測記録卓主増幅器校正電圧および STEP 電圧用としての $\pm 50 \text{ Volt}$ (各最大 40 mA) とを発生する装置であり, 電圧変動率は電源電圧 10% 変化に対して 0.1% である。また, 本装置各真空管のヒータートランスおよびリレー用電源回路も内蔵されている。

2.3. 電力部

電力部は, AC $3,300 \text{ Volt}$ を変圧器により AC 420 Volt (210 Volt) に降圧し, 制御架からの信号によって加熱器への電力を制御して供給するもので, 次のものから構成されている。

- i) 電源設備 1
- ii) イグナイトロン制御器 2

2.3.1. 電源設備 (写真 4)

3 相 AC $3,300 \text{ Volt}$ を, 2 台の単相 100 kVA 変圧器で 2 系統に分けて AC 420 Volt (210 Volt) に降圧し, 2 基のイグナイトロン制御器に電力を供給するものである。最大出力電流は 238 Amp (420 Volt) あるいは 476 Amp (210 Volt) である。

2.3.2. イグナイトロン制御器 (写真 5)

制御架からの $0 \sim 50 \text{ Volt}$ の制御信号によって, 電源設備から加熱器へ供給する電力を $0 \sim 100 \text{ kVA}$ の範囲内で連続的に制御する装置が 2 基ある。制御回路の原理については既に準

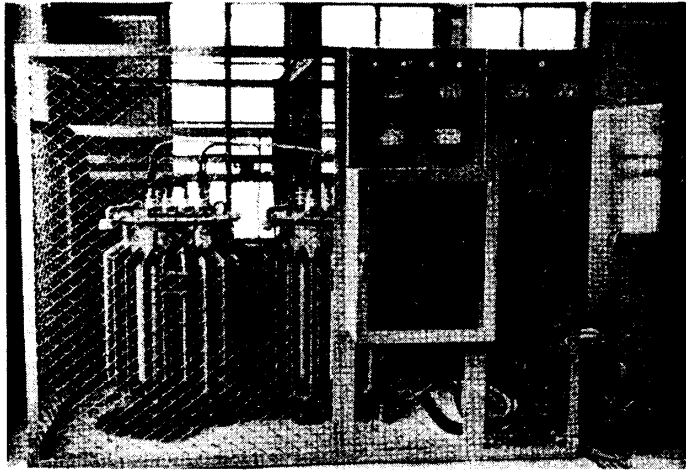


写真 4. 電 源 設 備

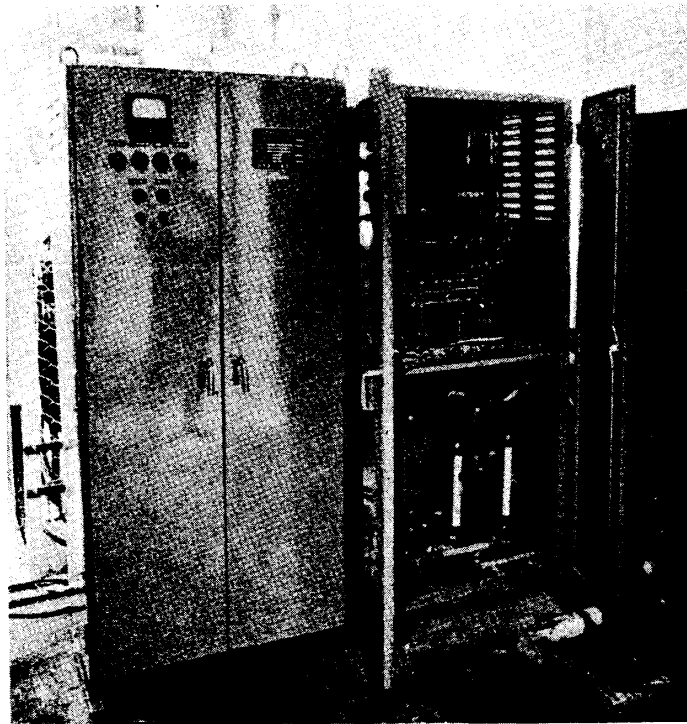
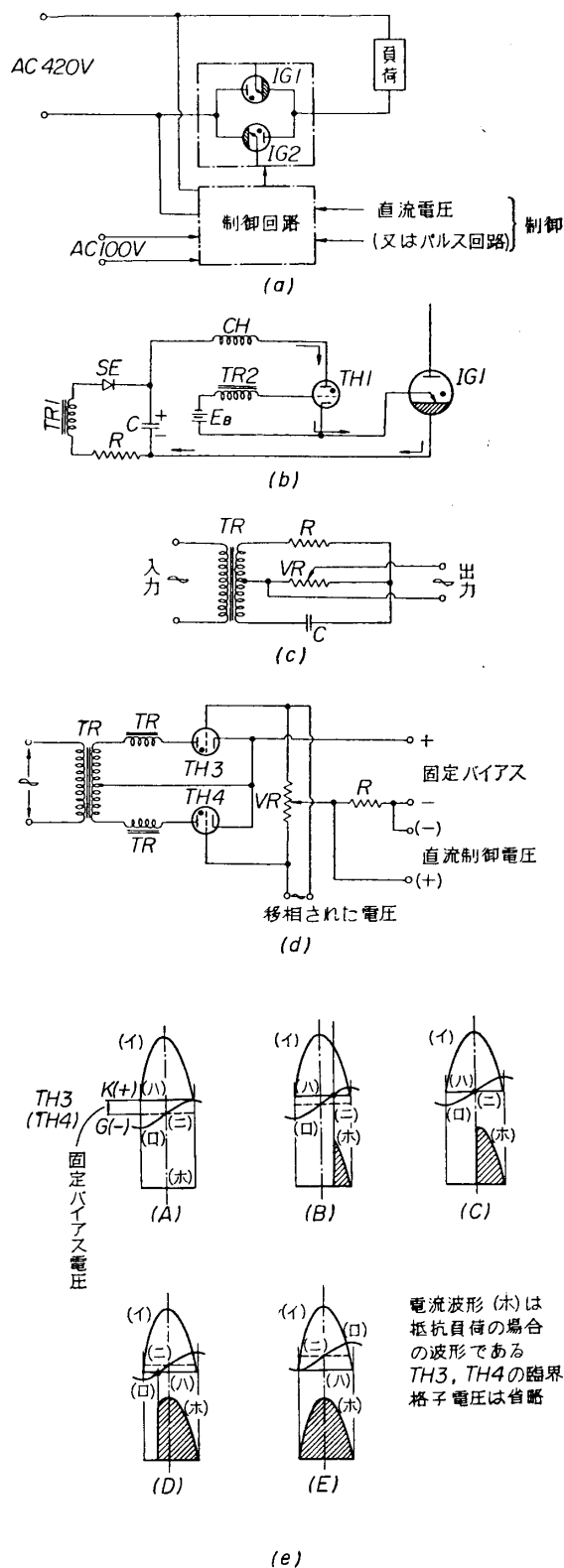


写真 5. イグナイトロン制御器

備的な小型加熱器の場合について報告した[1]が簡単に再録する。

本器は交流 50c/s の各サイクルにおいて、その点弧すべき位置を比較増幅器 A_2 からの入力電圧で定まるサイラトロン回路のパルス位相で与え、入力電圧に相当する出力電流を連続的に発生するようになっている。この方式は可飽和コリアクトル方式に較べ応答時間も早く、急速な過渡的加熱状態をシミュレートするのに適している。制御回路の原理は次の通り



である。

a) 点弧回路: 負荷回路に逆並列に接続した2本のイグナイトロン IG 1, IG 2 (第 2.5(a) 図) およびイグナイトロンを点弧させるサイクロン TH 1, TH 2 の対称なる一対の回路から構成されている。その中の IG 1 グループについて述べる (IG 2 は全く同一)。第 2.5(b) 図は IG 1 グループの点弧回路の原理回路である。すなわち, TH 1 の格子-陰極間に常時 E_B なる負のバイアス電圧が印加されているので, TH 1 は放電しない状態にある。また陽極-陰極間にはコンデンサ C の充電電圧が印加されている状態にある。このような状態にあるとき IG 1 の陽極に正の交番電圧が加わったとすると, キックトランス TR 2 に負のバイアス電圧 E_B に打ち勝つキック電圧を発生せしめれば TH 1 は導通し, コンデンサ C の電荷は CH \rightarrow TH 1 \rightarrow IG 1 の順に流れ放電する。このときイグナイトはイグニッションするので IG 1 は通電となる。TR 2 に発生せしめるキック位相を, 次に述べるように IG 1 の交番電圧位相の適当なところで発生させれば, IG 1 の通電の時期を制御することができる。

b) 位相制御回路: 本回路は, 点弧回路で述べたキック電圧の位相をイグナイトロン電圧位相に合わせてそのキック位相を制御する回路である。第 2.5(c) 図は一般に用いられている CR の位相回路であって, 入力電圧位相 (IG 1, IG 2 と同相) に対し出力電圧位相を 90° 遅らせるよう抵抗 R により調整されている。また VR は移相された出力電圧の大きさを変化せしめるようになっている。第 2.5(d) 図の TH 3, TH 4 の回路はキック電圧位相を変化させる回路である。

c) 直流固定バイアス回路: 本回路は定電圧放電管による固定バイアス回路で, TH 3, TH 4 の格子-陰極間に負のバイアスを加えている。この負のバイアス電圧と直流制御電圧は第 2.5(e) 図のごとくなる。いま直流固定バイアス電圧に対し打ち消すように直流制御電圧を加えると, イグナイトロンの負荷電流は (a) の斜線波形のごとく変化する。(A) 図の (a) の直線は直流制御電圧が零の場合であって負荷の電流も零であるが, (E) 図の (a) の直線は直流固定バイアスを十分打ち消して TH 3 (TH 4) の格子を (+) にして, (d) の波形に対して移相された電圧波形を (E) 図のごとく合わせることになるので負荷電流は最大になる。このように直流制御電圧を制御することによってイグナイトロンの通電の位相が制御される。すなわち, 負荷電流を零より最大まで連続的に変化させる。

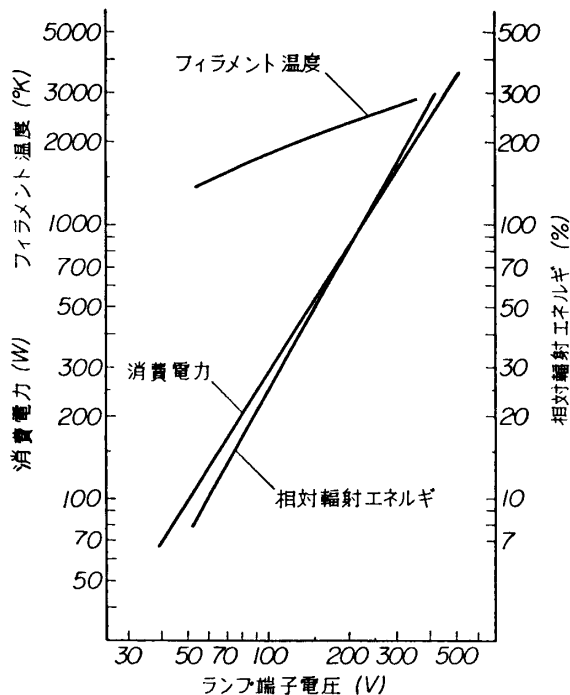
2.4. 加熱部 (炉)

加熱部は, 電力部から供給される電力を赤外線ランプによって赤外線輻射に変換し, 任意関数発生器に設定したプログラムにしたがって, 構造模型または構造要素を加熱する装置で, 次のものが既に構造物の強度研究用に製作されている。

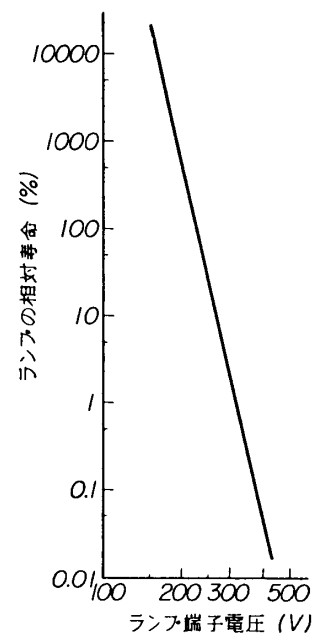
- | | |
|---------------|---------|
| i) 平面型対向加熱器 | 1 |
| ii) 円筒型内向加熱器 | 1 |
| iii) 円筒型外向加熱器 | 1 (計画中) |

2.4.1. ランプ

ランプは PHILIPS 社製 (TYPE 13195X) で, 消費電力 1 kW (定格電圧 225 Volt, 電流 4.5 Amp) である。管は $10 \pm 0.5\phi$ 透明石英管で電極はニッケル, 全長約 345 mm, 発熱長



第 2.6 図 石英赤外線ランプの特性.



第 2.7 図 ランプの相対寿命.

約 267 mm であり、色温度 2,400°K、寿命 5,000 時間である。松下通信工業株式会社研究所において再検討したランプの特性および相対寿命の実験結果を第 2.6 図および第 2.7 図に示す。第 2.7 図から高圧での使用による寿命の低下は著しいことがわかる。

2.4.2. 平面型対向加熱器 (写真 6)

金めっきした 18/8 耐熱鋼製の平面状反射板面にランプを配列した加熱器が 2 基対向しており、片面または両面からの加熱ができる。試験体との距離は調節可能であり、また加熱器全体を傾斜させて使用することもできる。1 基の諸元および性能を第 1 表に示す。

2.4.3. 円筒型内向加熱器 (写真 7)

円筒型反射板の内面にランプを配列したものであり、その諸元および性能を第 2 表に示す。本加熱器を使用する場合、加熱器の内部に挿入した試験体をその外側から加熱するのであるが、変位およびひずみなどの測定が多少不便になる場合があるので、さらに次項のごとき加熱器を計画中である。

2.4.4. 円筒型外向加熱器 (計画中)

円筒型反射板の外面にランプを配列したもので、円筒型試験体の内部に挿入し、試験体とその内側から加熱する装置である。その諸元および性能を第 2 表に示す。

2.5. 変換器

変換器は、加熱器の熱輻射量ならびに被加熱物の温度を電圧に変換し、フィードバック信号として制御架に送るものであり、次のものから構成されている。

- i) 熱輻射計および支持金具 2
- ii) 熱電対 若干

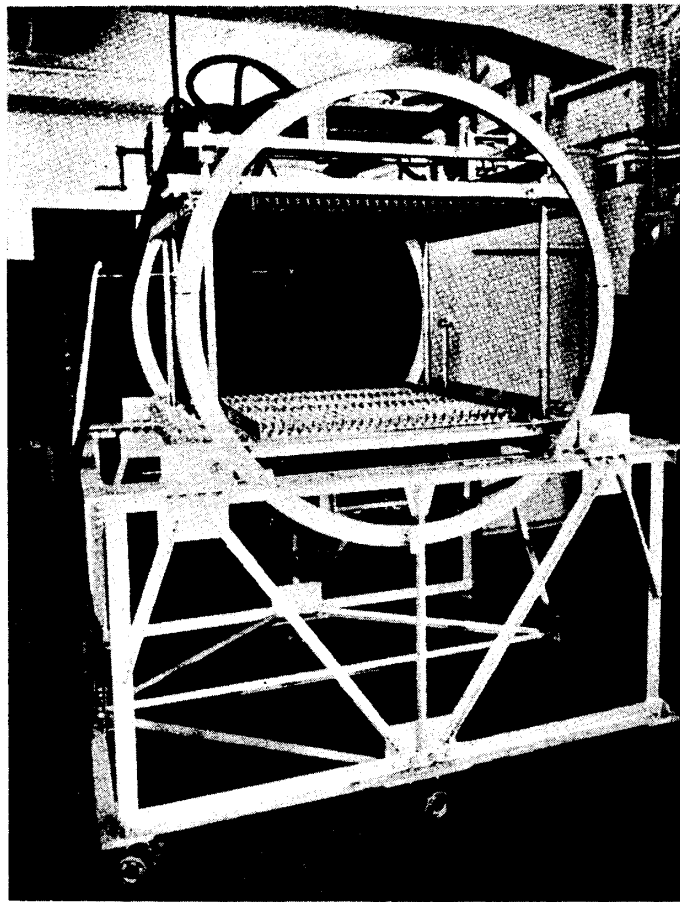


写真 6. 平面型対向加熱器

第 1 表 平面型加熱器

反 射 板 面 積	836×940 mm ²
有 効 発 熱 面 積	800×810 mm ²
ランプ 数	80(27×2+26, 3 列)
最大幅射量	22 W/cm ²
最大加熱時間	2 min (22 W/cm ²), 5 min (11 W/cm ²)
加熱器： 中心の高さ	1,450 mm
高さ調整	±310 mm (中心より)
角度調整	±90° (水平より)
移動	可能 (台車ストッパ付)

2.5.1. 熱輻射計および支持金具 (写真 8)

本検出器は、第 2.8 図のごとく円形箔状のコンスタンタン受熱面とその中心につけたクロメル線とで熱電対を構成し、受熱面中心と水冷して温度一定に保った周辺部との温度差によ

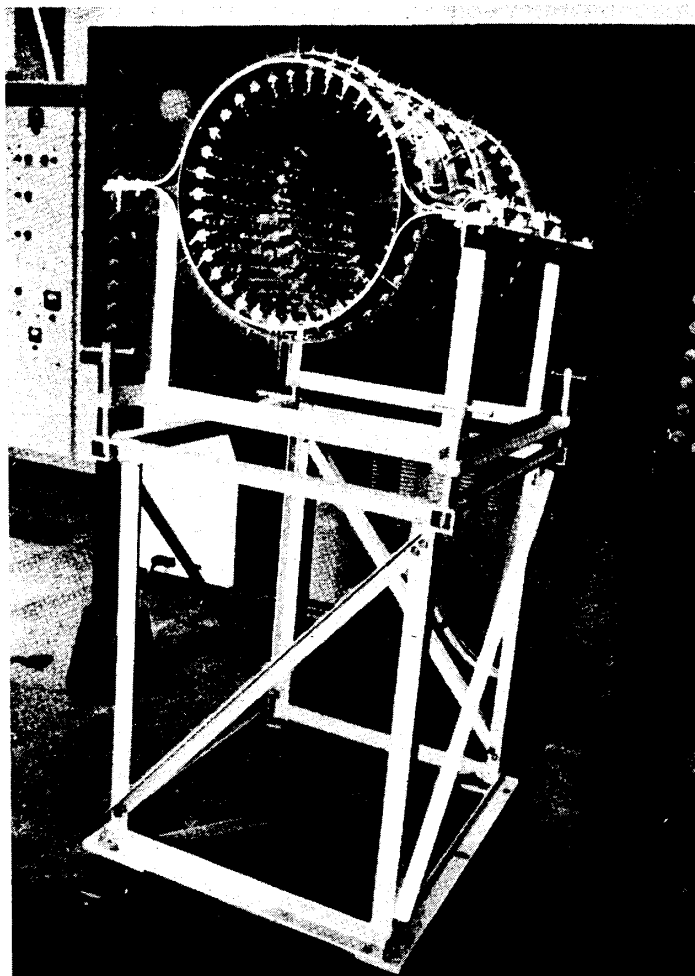
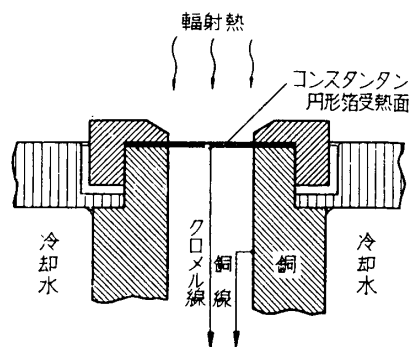
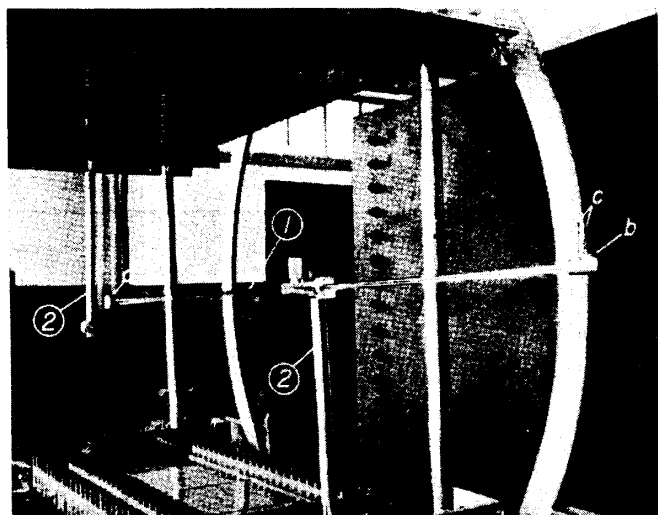


写真 7. 円筒型内向加熱器

第 2 表 円筒型加熱器

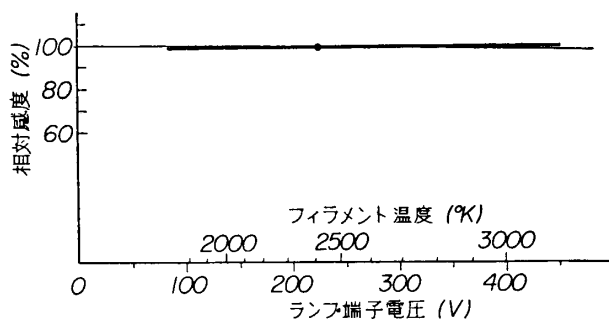
	円筒型内向加熱器	円筒型外向加熱器
反射筒内（外）径	410 ϕ	300 ϕ
ランプ中心径	346 ϕ	364 ϕ
被加熱体許容最大（小）径	280 ϕ	430 ϕ
反射筒長	675 mm	760 mm
有効発熱長	530 mm	530 mm
ランプ数	72(36 \times 2 列)	60(30 \times 2 列)
最大輻射量	22 W/cm ²	22 W/cm ²
最大加熱時間	1 min (22 W/cm ²) 2.5 min (11 W/cm ²)	3 min (22 W/cm ²) 7.5 min (11 W/cm ²)
加熱器： 中心の高さ 高さ調節 移動	1,450 mm \pm 50 mm (中心より) 可能 (台車ストップ付)	



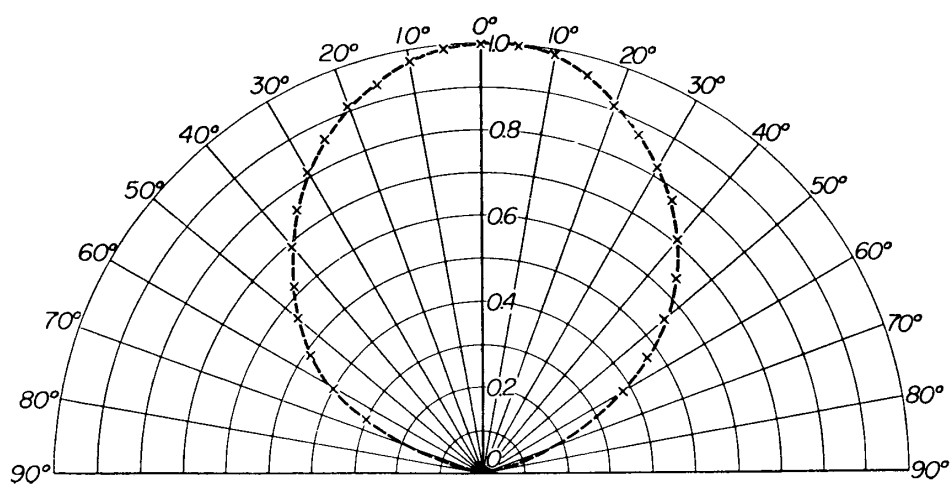
第2.8図 熱輻射計の構造.

- ① 熱輻射計
 a: 受熱面 (熱電対ユニット)
 b: 信号出力端子
 c: 冷却水導管
- ② 熱輻射計支持金具

写真8. 熱輻射計および支持金具



第2.9図 熱輻射計の相対感度特性.



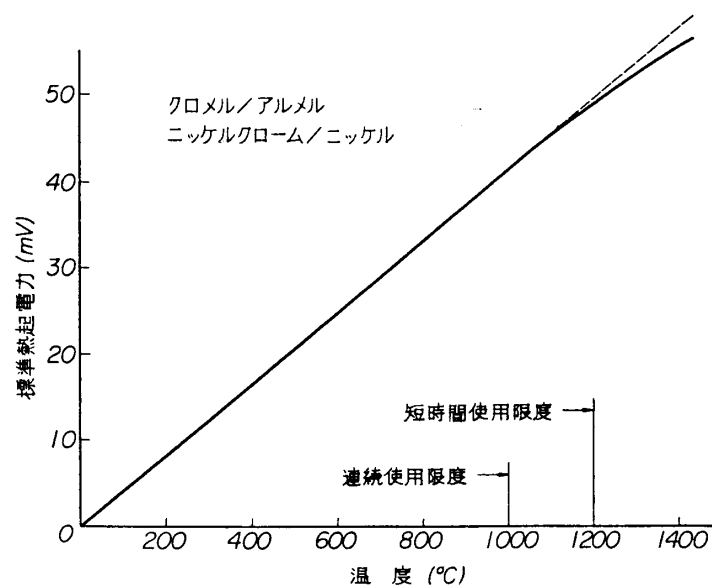
第2.10図 熱輻射計の方向特性.

って出力電圧を得るもので、時定数は受熱面の寸法および箔材料の温度伝導率で決定される。本装置で使用するものは、感度 1.74 mV/W/cm^2 ，許容最大輻射量 25 W/cm^2 ，時定数 0.1 sec ，直線性 2% 以内であり， 0.5 l/min 以上の冷却水を必要とする。発熱体（ランプのフィラメント）の温度変化に対する熱輻射計の相対感度およびその方向特性を第 2.9 図および第 2.10 図に示す。相対感度は，黒体炉で検定した標準パイロメータと本輻射計とを並べてランプの下に置き，各印加電圧（色温度）に対する両者の相対値を求め，その値を $V=225 \text{ Volt}$ に対応する色温度 $2,400^\circ\text{K}$ の場合を基準にして示したものであり，方向特性は，ランプの真下で輻射計を水平の位置より左右に傾斜させた場合の，その指示の変化を示したものである（松下通信工業株式会社研究所において測定）。

支持金具は，熱輻射計の受熱部を加熱器の任意の位置に固定するもので，加熱器の支持わくに着脱できる。

2.5.2. 熱電対

クロメル/アルメル熱電対およびニッケルクローム/ニッケル熱電対を用いる。その標準熱起電力を第 2.11 図に示す。両者はほとんど同一である。ただし，使用限度は線径によって多少の差がある。

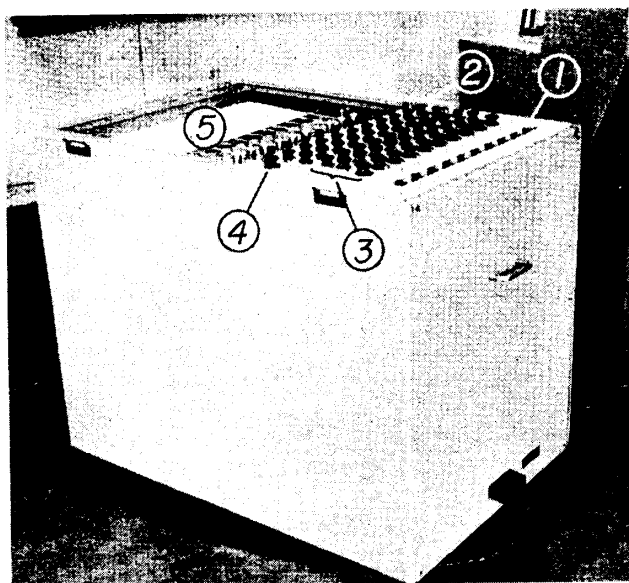


第 2.11 図 熱電対の標準熱起電力，冷接点 0°C 。

2.6. 計測記録卓（写真 9）

計測記録卓は，本急速加熱装置の動作状況（電源電圧，熱輻射等）ならびに被加熱体の状況（温度，変位，ひずみ等）を記録するもので，次のものから構成されている。

- | | |
|-----------|----|
| i) 筐体 | 1 |
| ii) 前置増幅器 | 10 |
| iii) 主増幅器 | 10 |
| iv) 較正器 | 1 |
| v) ペン記録装置 | 1 |



- ① 信号入力端子
- ② 前置増幅器
- ③ 主増幅器
- ④ 校正器
- ⑤ ペン記録装置

写真 9. 計測記録卓

第3表 計測記録卓の総合性能

チャンネル数	10
感度	1~100 mV/cm (前置増幅器連続可変) 1.25, 2.5, 5, 12.5 V/cm (主増幅器4段切換)
精度	3% 以上
直線性	2.5% 以内
周波数特性	20c/s (-3 dB)
記録紙速度	0.25, 0.5, 1, 2.5, 5, 10, 25, 50, 100 mm/sec (9 段切換)
記録紙幅	±20 mm
マーカ	5, 30 sec およびチェックマーカ

その総合性能を第3表に示す。

2.6.1. 前置増幅器

トランジスタチョップによる全トランジスタ式増幅器で、10チャンネルが計測記録卓内部に組込まれ、パネル面で操作できるようになっている。入力電圧および出力電圧はそれぞれ最大 ± 100 mV および最大 ± 5 Volt, 増幅度可変範囲 0~2,500 倍, 直線性 2% 以内, 周波数特性 20c/s (-3 dB), 電源電圧 10% 変化に対する出力変動 1% 以下である。

2.6.2. 主増幅器

アナログ計算機用演算器の出力段がペンガルバノメータを駆動できるようにしたもので、10チャンネルが計測卓内部に組込まれ、パネル面で操作できるようになっている。入力電圧および出力電圧は共に最大 ± 50 Volt で、増幅度は 1, 2, 4 および 10 倍の 4 段切換になっている。直線性 1% 以内, 周波数特性 5 kc (-3 dB), 電源電圧 10% 変化に対する出力変動 1% 以下である。

2.6.3. 較正器

変換器（熱輻射計，熱電対）の出力電圧に相当する直流電圧を発生し，前置増幅器および主増幅器を通してペンガルバノメータの振れを較正するものである．出力電圧は $DC \pm 0.5$, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30 および 40 mV の 10 段切換で，負荷が前置増幅器 1 チャンネルの場合の精度は 1% 以上である．なお，主増幅器のみを使用する場合に対して，出力電圧 ± 25 Volt の較正器も用意されている．

2.6.4. ペン記録装置

総合性能は既に述べたので，本装置に使用しているペンガルバノメータ（渡辺測器 GIII～30）の仕様についてのみ記す．感度 2.5 mm/1 mA，周波数特性 30 c/s (± 0.5 dB)，直線性 2.5% で，ペン長 130 mm，最大振幅 ± 20 mm である．

III. q 分布の測定

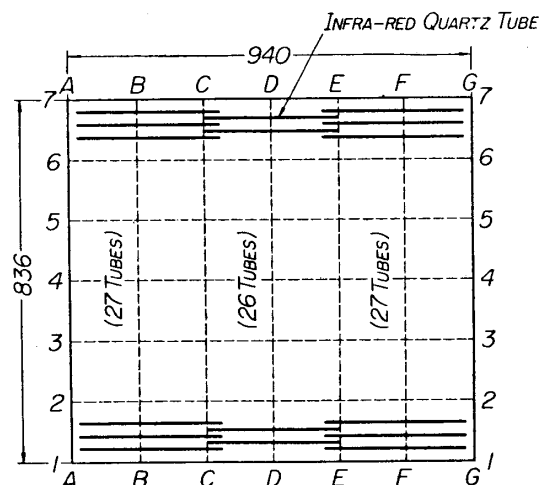
本実験は，200 kW 急速輻射加熱装置の機能の一部を調査するために，平面型対向加熱器より被加熱体への熱流入速度 q を測定したもので，あわせて次の 3 項目を確認するのを目的とした．

- (1) q 分布の対称性．
- (2) ランプ印加電圧 (V) の変化の影響．
- (3) 熱源（配列ランプの中心面）からの距離 (d) の変化の影響．

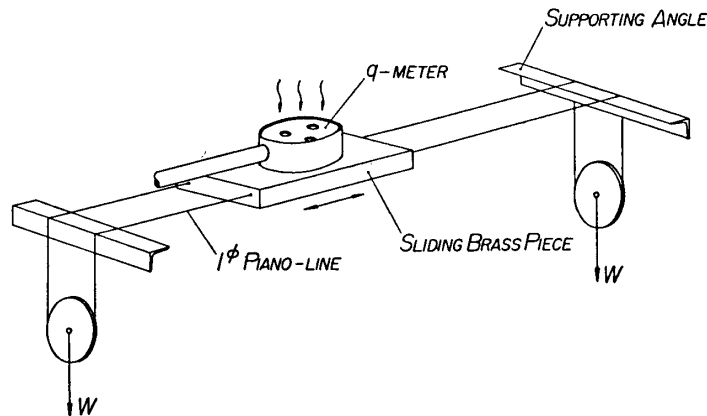
3.1. 実験の概要および予備実験

加熱器は全面に石英赤外線ランプ 80 本を装着した 1 基のみを使用し，これに対向する 1 基は熱吸収を良くするため黒色の Co_2O_3 を塗布した鉄板でおおい，点火炉の反射板および q メータ裏面への反射を防止した．

炉面を第 3.1 図に示すごとく格子状に区切り，その直下を第 3.2 図のごとく q メータを移動させてその出力電圧 V_q を測定する．測定に用いた q メータの感度は 1.74 mV/W/cm^2 ($=7.30 \text{ mV/cal/cm}^2 \text{ sec} = 1.98 \text{ mV/Btu/ft}^2 \text{ sec}$) である．



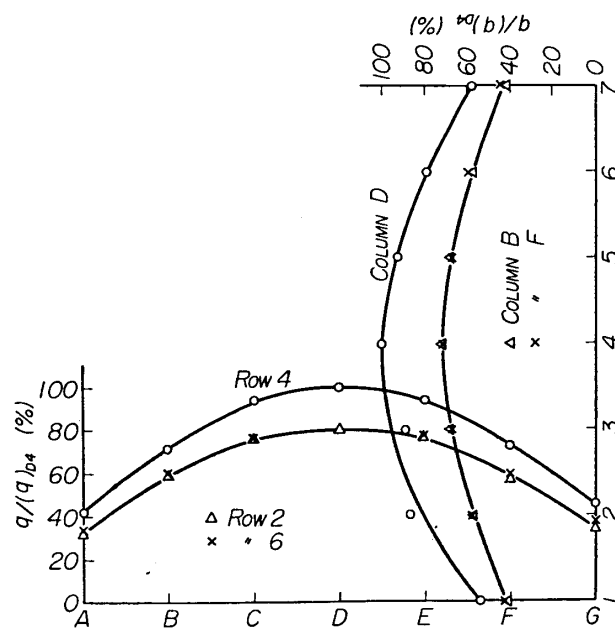
第 3.1 図 平面型加熱器.

第3.2図 q メータの移動装置.

3.1.1. 対 称 性

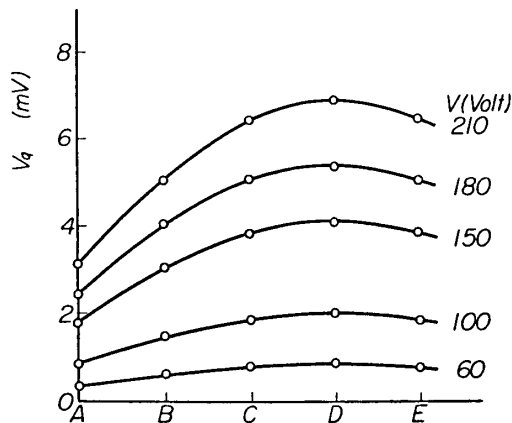
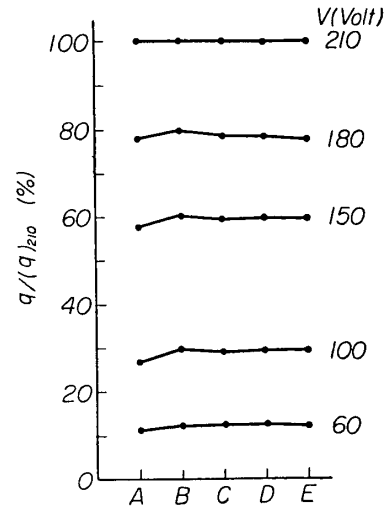
赤外線ランプへの印加電圧を $V = 100$ Volt に設定し、ランプ中心面からの距離が $d = 350$ mm の場合について、面内の q 分布を測定する。

B, D, F の各行および 2, 4, 6 の各列についてそれぞれ数回の q 測定を行った結果を、中央点 (D4 点) の値に対する百分比で第 3.3 図に示す。第 3.3 図より中央点に関して対称に q が分布していることがわかる。

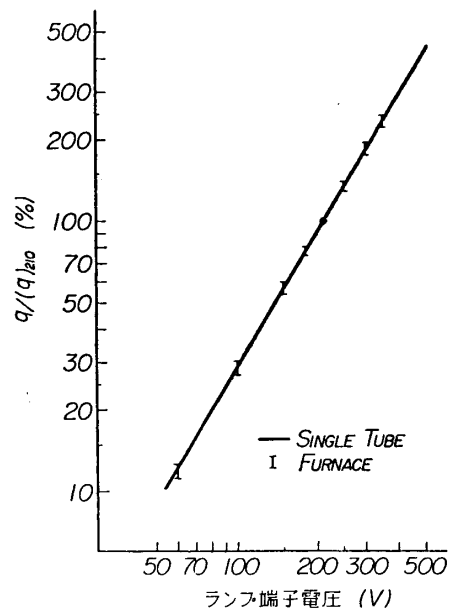
第3.3図 q の分布, $V=100$ Volt, $d=350$ mm.

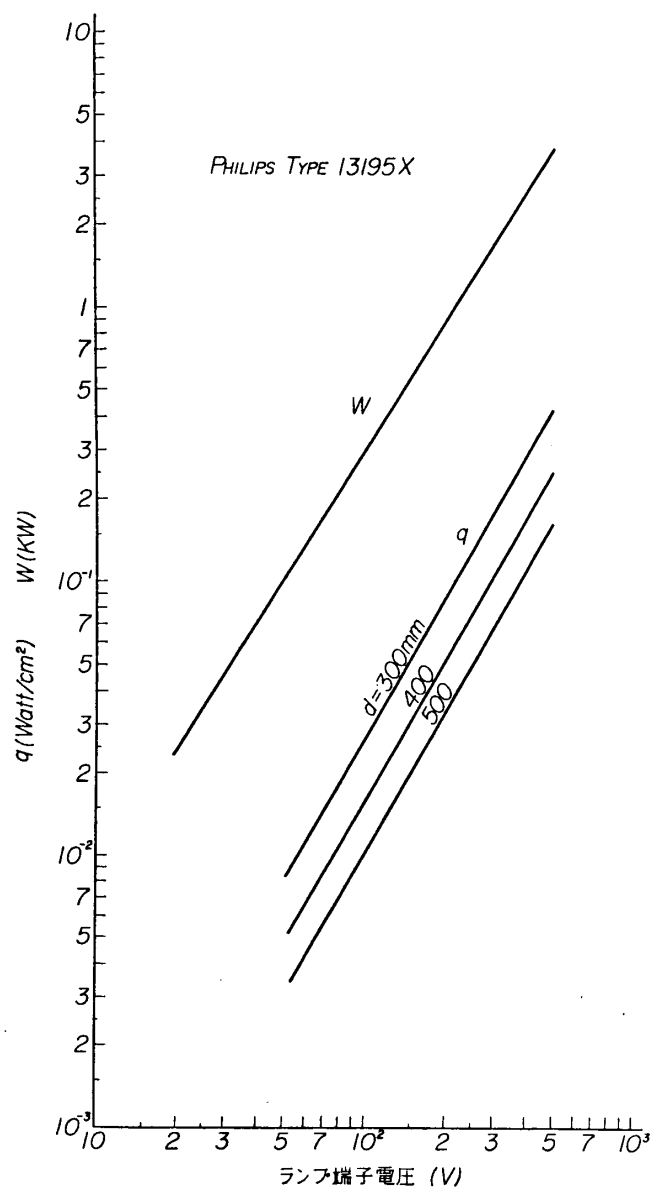
3.1.2. 印加電圧 V の影響

ランプ端子電圧の変化の影響を調べる。ランプ中心面から測定面までの距離は $d=350$ mm とし、端子電圧が 60, 100, 150, 180 および 210 Volt の各場合について測定すると、第 3 列について第 3.4 図が得られる。第 3.4 図において、 $V=210$ Volt の場合を基準にして電

第 3.4 図 第 3 列上の各点の q , $d=350$ mm.第 3.5 図 各点における q の $V=210$ Volt の場合の値に対する百分比, 第 3 列, $d=350$ mm.

圧が変化した場合の q の値の百分比を各点について求めると第 3.5 図が得られる。端子電圧を変化した場合、面内の q 分布は変化せず、かつ各点の q の変化率はほとんど一定で 3% 以内の誤差しかないことがわかる。第 3.5 図を書き変え略一定の q の値を V に対して示すと第 3.6 図になる。第 3.6 図の直線は、ランプ 1 本の特性曲線（第 3.7 図）を $V=210$ Volt の場合を基準にして求めたものであるが、 V を変化させた場合の加熱器全体の q の変化に関する実験結果は、ランプ 1 本の q の電圧特性と極めて良好に一致している。なお、このことは第 4 列および第 5 列における測定結果からも完全に確認された。さらに、中央点の

第 3.6 図 印加電圧による q の変化, $d=350$ mm.

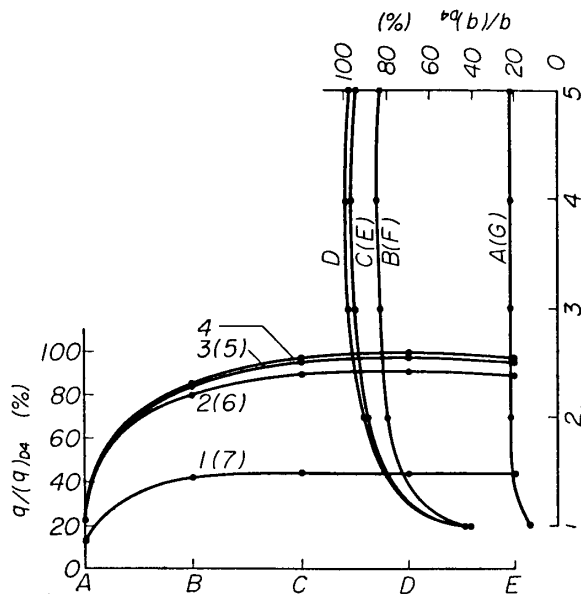
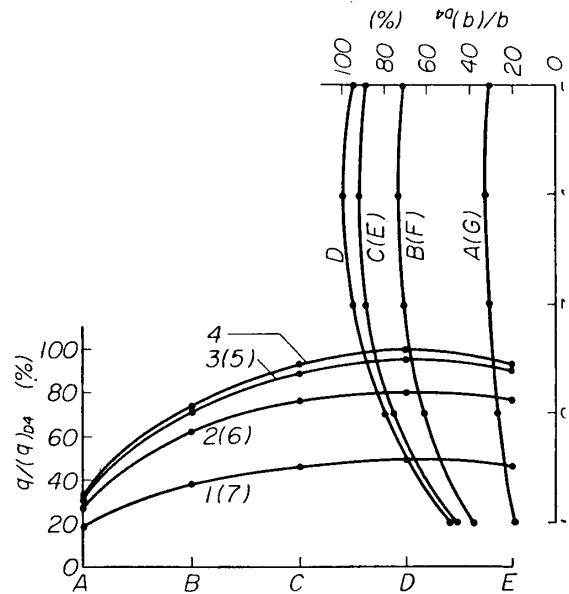
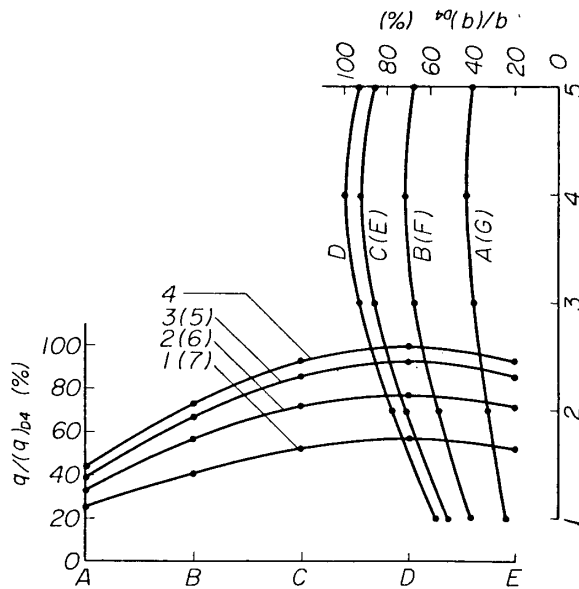
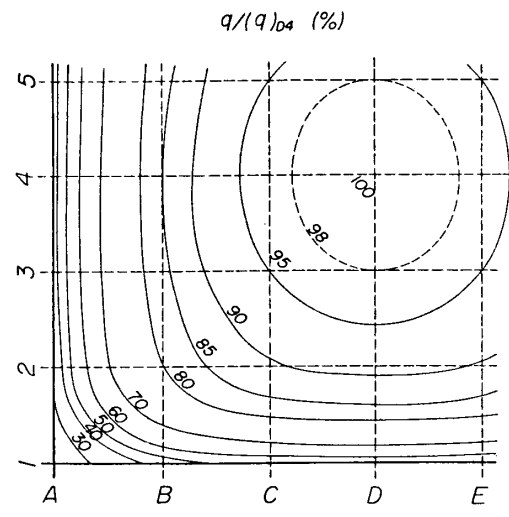
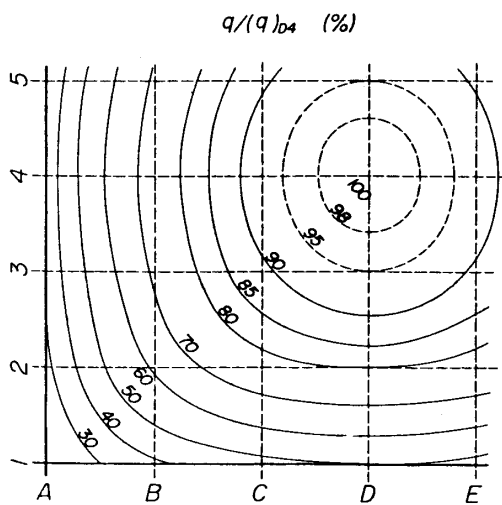
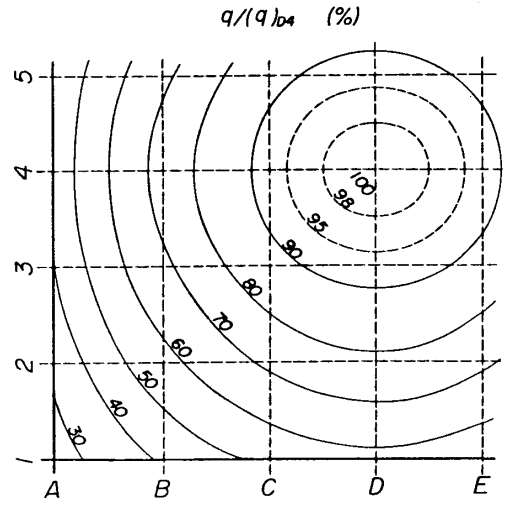


第 3.7 図 ランプの消費電力および熱輻射率の印加電圧による変化。

みについて $V=60, 100, 150, 180, 210, 250, 300$ および 350 Volt の各場合について、別に測定した結果も完全にこの直線上にのるので、同時に示してある。したがって、端子電圧を変化した場合の q の変化は、ランプの特性曲線あるいは第 3.6 図より直ちに求めることができる。ただし、 $V=50$ Volt 以下においては、電極の接触抵抗の影響が顕著になり、各ランプの端子電圧の偏差による輻射量の差が出てきて、正確な測定は不可能であり、また出力も小さく実用上無理と思われる。

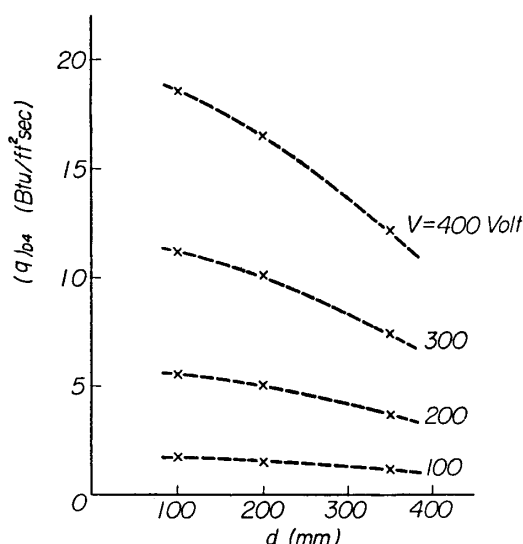
3.2. q 分 布

前節により、 q の面内分布は設計の際意図したように中央点に関して対称であることが確認され、また、端子電圧による q の変化率は単一のランプの特性曲線から求められることが

第 3.8 図 q の分布, $V=100$ Volt, $d=100$ mm.第 3.9 図 q の分布, $V=100$ Volt, $d=200$ mm第 3.10 図 q の分布, $V=100$ Volt, $d=350$ mm.第 3.11 図 q の面内分布, $V=100$ Volt, $d=100$ mm第 3.12 図 q の面内分布, $V=100$ Volt, $d=200$ mm.第 3.13 図 q の面内分布, $V=100$ Volt, $d=350$ mm

わかった。したがって、本実験は、A-A, E-E および 1-1, 5-5 によって囲まれる部分について、測定の便宜上 $V=100$ Volt とし、 $d=100, 200$ および 350 mm の各場合に対して行うことにする。

前節と同様にして測定を行うと、第 3.8~3.10 図が得られる。これらの図から面内の q 分布を求めると、第 3.11~3.13 図となる。図はすべて $(q)_{D4}$ に対する百分比で示してあり、 $(q)_{D4}$ の絶対値は第 3.6 図を用いて第 3.14 図に示してある。 $d=100$ mm, $V=420$ Volt (本装置の最大電圧) とすると、 $(q)_{D4} \doteq 20$ Btu/ft² sec となり、設計値を十分満足している。



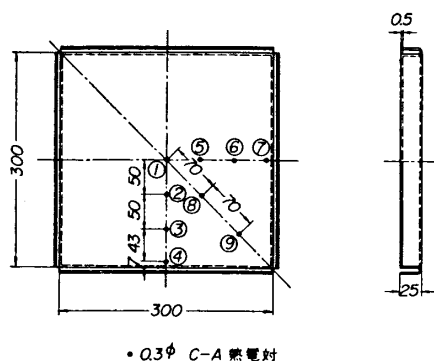
第 3.14 図 ランプ中央面からの距離による $(q)_{D4}$ の変化。

IV. 加熱能力の測定

前述の平面型対向加熱器の加熱能力測定に関する1実験を行った。被加熱体の温度上昇は、加熱器の能力のほか、いろいろの条件、ことにその形状、温度伝導率および受熱面の状態などに大きく依存するが、本測定によって今後の実験に有用な資料が得られた。

4.1. 実験の概要および測定上の二三の注意

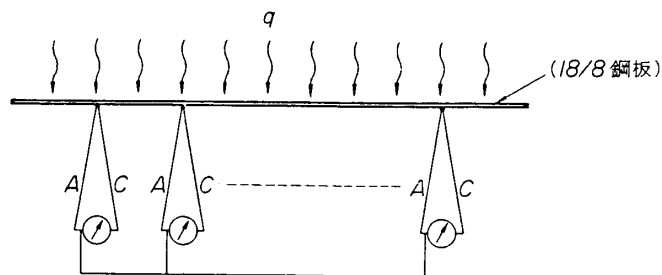
加熱器は前章の q 分布の測定における場合と全く同じ状態で使用した。被加熱体として 18/8 耐熱鋼板をピアノ線で炉の直下につるし、第 4.1 図に示す位置に装着した C-A 熱電



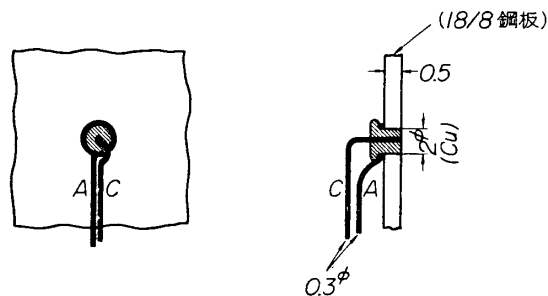
第 4.1 図 被加熱 18/8 鋼板。

対の出力およびランプ端子電圧を 10 チャンネルのペンレコーダで記録する。また、中央点の熱電対の出力はさらに精密電圧計で同時に観測して記録する。鋼板の表面を圧延のままの状態と Co_2O_3 を塗布して黒くした場合の両者について、ランプ端子電圧および炉面から鋼板までの距離を変えて加熱実験を繰返す。

測定に先だち数回の予備実験を行ったが、かかる測定の常として測定値のハムが顕著で、はなはだしい場合は信号と同程度のノイズが混入する。加熱装置および測定機器はすべて厳重にアースをとったが、加熱器の支持架が相当に大きいので完全にポテンシャル零にならず、また信号の最大値が 40 mV 前後と小さいので、試験片と加熱器の支持架と直接導通があると S/N 比が小となるためと思われる。そこで被加熱板と加熱器支持架とを絶縁したところ、ハムを完全に落すことができた。次に、第 4.1 図に示すように 9 点の温度を測定したが、各熱電対を被加熱板において相互に絶縁することができず、またペンレコーダの (一) 側は第 4.2(a) 図のごとく全部共通になっているので、各熱電対の起電力が相互に干渉し、正しい測



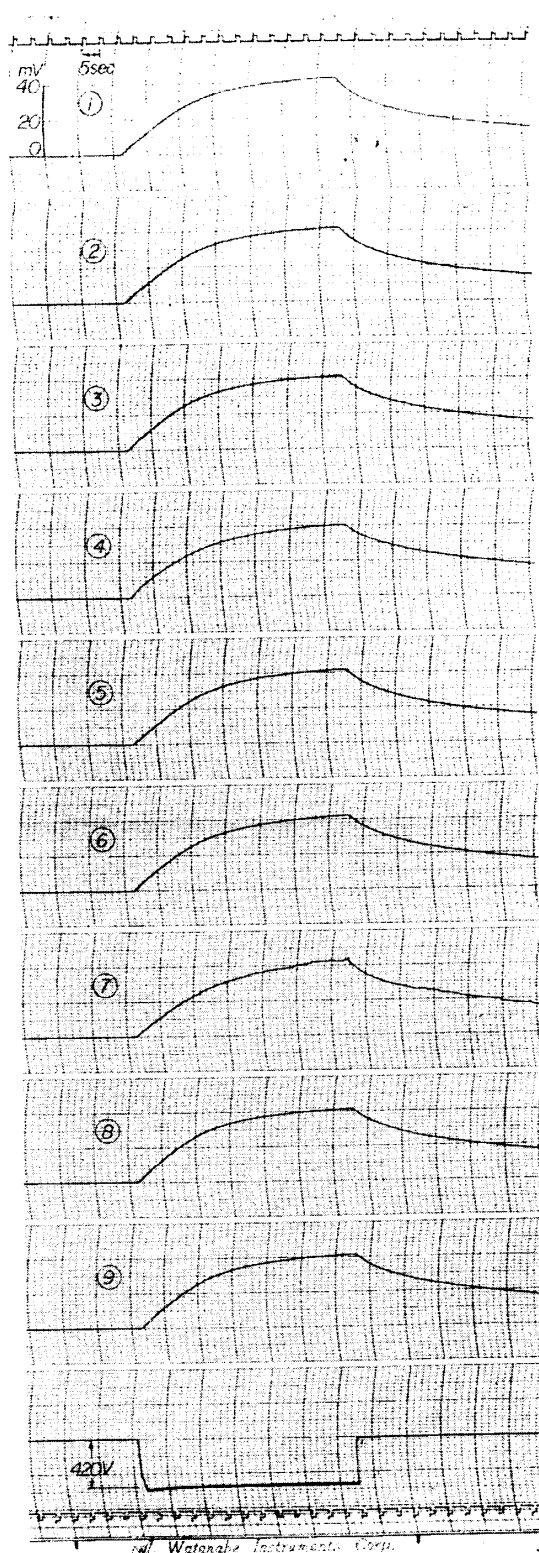
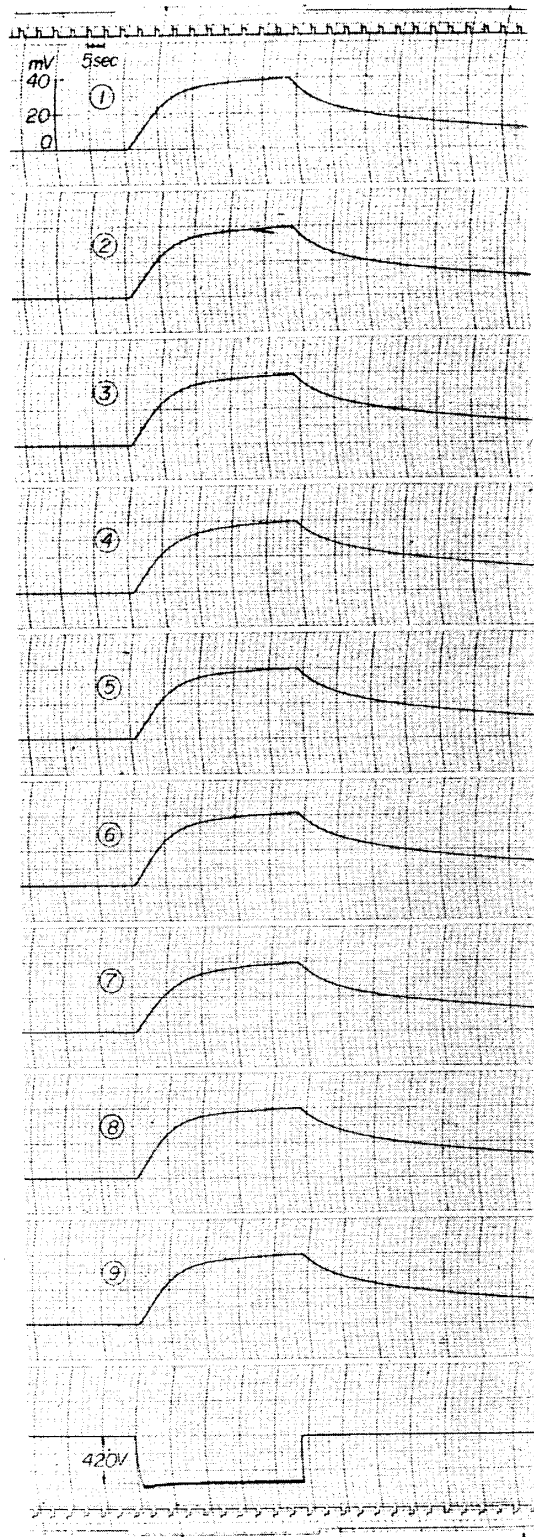
(a)



(b)

第 4.2 図 熱電対の取付方法.

定値が得られないおそれがある。すなわち、各ペンの記録する値は各熱電対の出力自身ではなく、板面内のある点に対する電位を示すことになる。このことは、実験中任意の 1 点の熱電対を切断した場合他の点の測定曲線が段状に変化することより確かめられた。そこで第 4.2(b) 図のごとく、アルメル線を環状にしその中心にクロメル線があるような取付け方法を採用した。すなわち、出力 (一) 側のアルメル線で測定点を遮蔽し、アルメル線およびその外側を共通の (一) にする訳である。この方法で前記の誤差介入を避けることができた。

(a) Co_2O_3 を塗布しない場合(b) Co_2O_3 を塗布した場合

第 4.3 図 熱電対の出力およびランプ端子電圧, $d=100 \text{ mm}$,
熱電対の番号は第 4.1 図を参照.

以上の2点は一見ささいなことであるが、測定精度に大きく寄与した。
実験項目を第4表に示す。

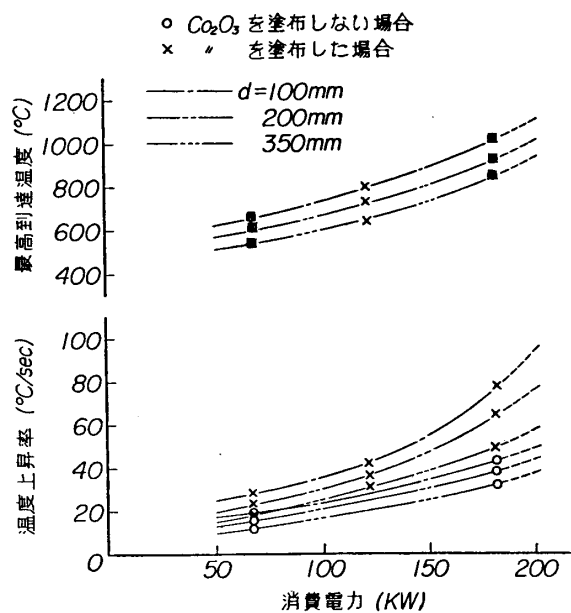
第4表

$d \backslash V$	200	210	300	420
100	●	○	●	○ ●
200	●	○	●	○ ●
350	●	○	●	○ ●

[註] ○ 表面に Co_2O_3 を塗布しない場合
● " 塗布した場合

4.2. 加熱能力

測定記録の一例を第4.3図に示す。図から明らかなように、鋼板の温度はある時間後に大体飽和し、最高到達温度は Co_2O_3 の塗布に関係ないが、加熱初期の温度上昇率は Co_2O_3 の塗布により著るしく増大し、ことに炉面との距離に近いほどその影響ははなはだしい。なお、試験片の形状が炉面に較べて割合小さく、かつ板面内の熱伝導がある上に板厚が薄いので、同一の実験に対する測定値の各点間の差異はほとんど見られなかった。そこで各点での温度上昇率および最高到達温度の平均値を第4.4図に示す。消費電力 182 kW, $d=100$ mm で



第4.4図 平面型対向加熱器の加熱能力、片面加熱、
300×300×0.5 t 18/8 鋼板。

最大温度上昇率 $\approx 77^\circ\text{C}/\text{sec}$ (Co_2O_3 を塗布した場合) および最高到達温度 $\approx 1,000^\circ\text{C}$ が観測された。したがって、最大出力 200 kW の場合にはそれぞれ $90^\circ\text{C}/\text{sec}$ 以上および約 $1,100^\circ\text{C}$ が期待される。なお、この値は $300 \times 300 \times 0.5$ t 18/8 鋼板に対するものであり、被加熱体の材質、寸度および表面の状態などが異なれば当然変化するものである。

V. む す び

本報告では、東京大学航空研究所に設置された 200 kW 急速輻射加熱構造物試験装置について、まずその概略を説明し、次に平面型対向加熱器を用いて、片面加熱の場合の q 分布および加熱能力の一例に関する測定結果を述べた。既に述べたごとく本装置は設計仕様を完全に満足し、各種構造物の加熱実験に極めて有用であると考えられる。

なお、円筒型加熱器の q 分布および加熱能力は、加熱する試験体の寸度のみによってはなはだしく変化し、その都度測定する必要があるので、ここでは触れなかった。

輻射加熱装置を用い、既に二三の実験的研究 [1], [4] を行ったほか現在各種の実験を計画中であるが、本報告では装置の記述のみに止める。

本装置は、当研究所の構造強度関係者が相集い、文部省機関研究費の援助を受けて設置されたものであるが、主として世話をした筆者らに本装置の概要を発表させていただく次第である。

本装置の設計および製作に尽力された松下通信工業株式会社研究所の各位、ことに中村日色課長、渡邊清次技師および北村昭夫技師、ならびに測定実験に協力された当研究所の阿部慎蔵および助川東輔の両君に深く感謝の意を表する。

昭和 38 年 5 月 6 日 航空力学部

文 献

- [1] 植村益次, 砂川 恵, 冬木 稔: 輻射加熱による構造要素試験装置と一実験結果, 日本航空学会誌, 10 (1962), 79.
- [2] 植村益次: 空力加熱による高温構造強度試験装置について, 東京大学航空研究所ロケット研究会ノート, No. 23 (1959).
- [3] Crocco, L.: The Laminar Boundary Layer in Gases, North American Aviation, AL-684 (1948).
- [4] 砂川 恵, 井山向史, 阿部慎蔵: 加熱平板の振動実験, 宇宙科学技術シンポジウム, (1963/1).