

地上燃焼実験における温度測定

—主としてMロケットについて—

秋 葉 鏡二郎・加勇田 清 勇・中 部 博 雄
橋 本 保 成・神 谷 保 羅

本報告は昭和40年から現在に至るまでの約7年間にわたるおもに能代実験場におけるMロケットの地上燃焼実験時の温度測定に関するものである。以下これに対し採用した温度測定法および測定上の諸問題と測定結果に大別して記述することとする。

1. 測定法および問題点

測定系として一般にいわれる温度測定法には接触方式と非接触方式の2種類に大別されるが、ここにのべる地上燃焼実験における温度測定は大部分が接触方式で大型エンジンの開発およびその地上燃焼実験という観点から以下の様な温度測定系を使用した。

i) 機械的切換増幅方式

機構としては機械的切換方式による多点測定器である。この方式は昭和39年~42年頃まで使用された。この機械的多点測定器の長所短所について下記の様な項目が列挙される。

A. 長所

- (i) 機構が示すように44点までの測定点が測定できる。
- (ii) 当時エレクトロニクスキャンナより信頼性があった。
- (iii) 測定結果として得られたデータの基準値とするために0°Cと300°C~1,000°Cの較正電圧がサンプリングの最初の二つに入る様になっていること。

B. 短所

- (i) 機械的切換方式のためサンプリングレイトが小さいこと。
- (ii) 切り換え時に起きる電氣的ノイズが他の計測系に影響を与えること。
- (iii) 機械的に切り換えを行なっているためロータリ接点の摩耗によって接触抵抗値が大きくなりS/Nが悪くなることなどが挙げられる。

前記の短所の項のサンプリングレイトを上げる問題については測定点数の少ないときはチャンネルを並列に使用することによってレイトを上げることができる。

第1図に測定系ブロック図を、第1表に主要な仕様を第2図に測定部の写真を示す。

以上の様な短所もあったがこの型は相当長い期間使用された。

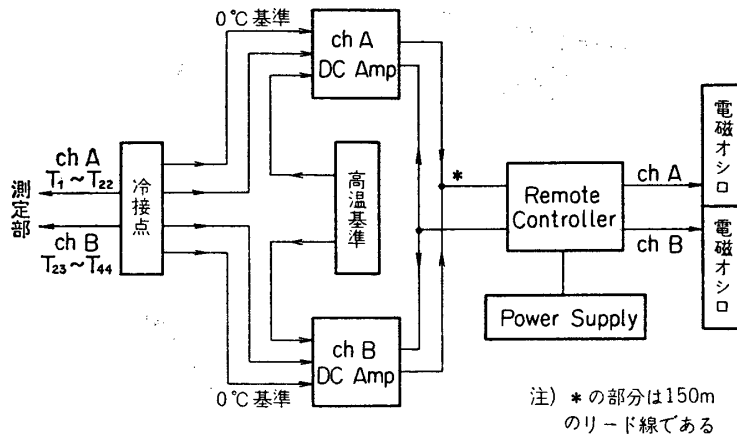
その後老朽化のため現在は使用されていない。

ii) 連続直流増幅方式

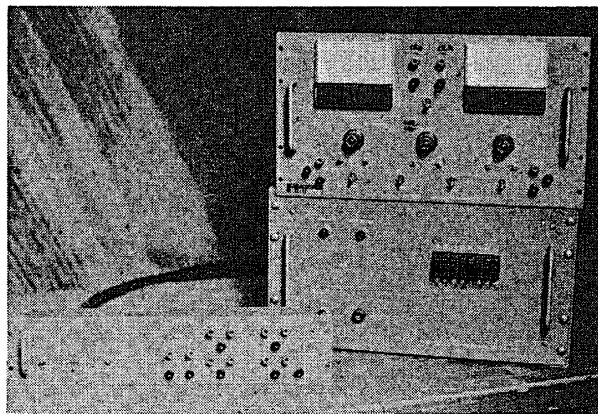
昭和42年12月のM-20-3の地上燃焼実験より応答性のよい連続測定可能な直流増幅器を採用した。

第 1 表 各増幅器の主な仕様

項目	増幅器名	機械的切換方式	連続方式	C. P. U 方式 (温度増幅部)
入力方式		不平衡	不平衡, 平衡	平衡
入力インピーダンス (kΩ)		13	5 (不平衡のとき)	200
出力インピーダンス (Ω)		20	35	150
増幅率 (倍)		200	200	100 と 500
周波数特性 (kHz)		0~0.2(切換えなしのとき)	0~10.0	0~10.0
増幅方式		チョッパ方式	直結型直流増幅	直結型直流増幅



第 1 図



第 2 図 機械的切換え増幅方式 (増幅器と遠隔操作部)

この増幅器の長所短所を列挙すると以下のとおりである。

A. 長所

- (i) 応答性が良いこと。

(ii) 機械的スキャナのような電氣的ノイズがないこと。

B. 短所

(i) 測定点数の多い測定ができないこと。

本方式による測定系ブロック図を第 3 図に、主要な仕様を第 1 表に、増幅部の写真を第 4 図にそれぞれ示す。

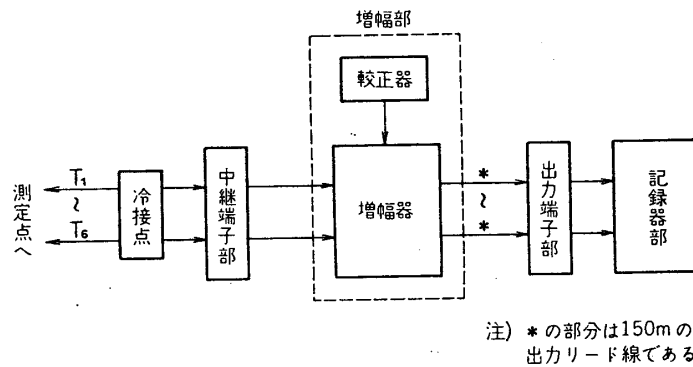
iii) エレクトロニクススキャナによるデジタル測定系

多くの点数が測定できしかもスキャンングレイトを高くできる測定系としてはエレクトロニクススキャナがこの目的にかなっている。

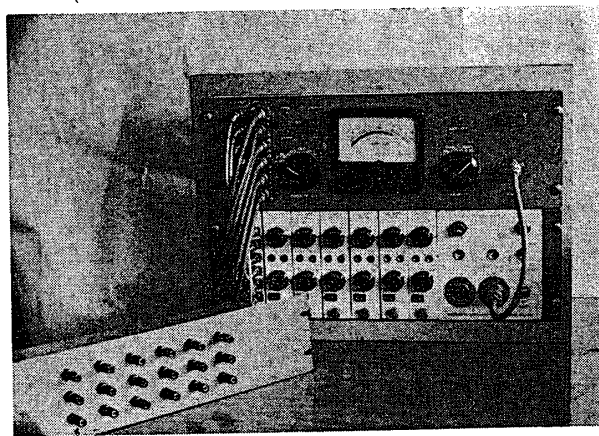
この場合測定値をデジタル電圧計で測定し、数值的後処理を容易にすることができるのも便利である。

最初予備的段階としてデータをオンラインでさん孔テープに打ち出し、あとにこれを処理するという方法を用いた。これによる一応の結果は良好であったが、パンチ速度がおそくサンプルレイトは上げられず、次の中央処理計算機を用いたシステムの前段階としてのチェックに止まった。この段階でのデジタル装置の写真を第 5 図に示す。

新しく設置された通称 TVC 動特性計測装置はこれまでの装置の欠点をほぼ除去できるも



第 3 図



第 4 図 連続測定用直流増幅器

のである。

この装置のチャンネル数としては 69 でこのうち 40 チャンネルが温度用に使用されることになっており残りのチャンネルは推力、内圧、その他に使用される仕組みになっている。

スキャン周波数については 10~100 Hz まで可能であるがセンサの応答性も考慮し温度に関しては普通 10 Hz としている。

この測定系の詳細は本号該当項目を参照されたい。

温度計増幅器の仕様については第 1 表に示す。

受感素子

温度検出部は主として NiCr-Ni 熱電対を使用した。

最初昭和 40 年頃に使用された熱電対は 0.5φ の 2 芯シールドのより線になっていた。この熱電対を用いて測定されたエンジンとしては M-10-1 より M-20-2, 3 エンジンくらいまででそれ以後はおもにサーモシートやサーモコアックスを使用して測定されるようになってきた。

前者はシートにはりつけられたリボン状熱電対で後者は細いパイプ状針金内にセラミックで同軸状に埋め込まれた細い熱電対で先端が受感部になっており、これには非接地型と接地型の 2 種がある。

熱電対の取付方法としては M-10-1 の様に肉厚が 10 m/m 以上ある厚肉エンジンはカシメによった。しかし M-40-2 の本体の様に実機用チャンバになると肉厚も 5 m/m 以下という薄肉チャンバになるため熱電対の取付にはいろいろな工夫がこらされた。

たとえば薄い銅板に熱電対をスポット溶接し、この銅板を耐熱材を塗った磁石でエンジン本体に密着させるという方法も用いたことがある。また NiCr-Ni サーモシートはこの様な点の測定には適しているが、しかし最高温度が接着剤の許容温度となってしまう欠点もある。

サーモコアックスは応答性の観点からのみいうならば接地型の方が良いのであるが、測定ラインのアースが任意にできないという欠点がある。

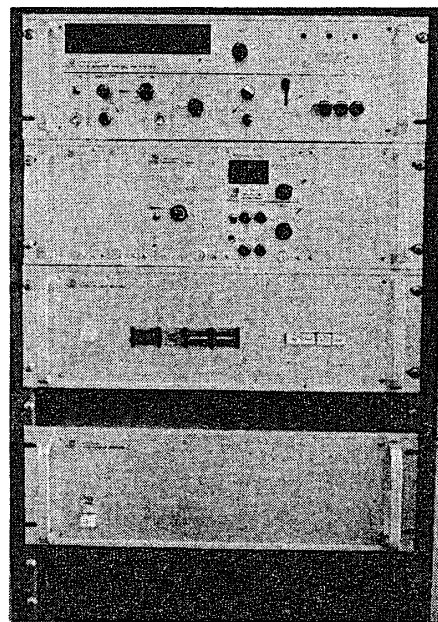
接地型センサの場合増幅器の入力の片側をアースにとるとロケットボディ材料に関する熱起電力の影響が入り大きな誤差原因となるので注意を要する。

2. その他の測定上の問題点

i) 真空燃焼の場合

2 段目から上のエンジンの燃焼実験は真空槽を使って行なわれたためいくつかの問題点があった。

真空槽内から槽外に検出器の出力を取り出すときに槽内外に温度差ができ測定誤差が生じ



第 5 図 デジタル計測装置

ない様にした。また真空装置では燃焼末期の火炎噴射逆流防止装置が初期においては貧弱なため燃焼終了時の温度測定においては火炎の影響を受けてノズル周りの温度上昇がかなりあり、現在も多少この影響が見られるので特にノズル周りの測定点は外からの熱の影響をなくするため耐熱布を巻き、さらに輻射の影響をなくするためアルミ箔を巻くこともある。

最終段の燃焼実験は真空スピン燃焼実験のためこの場合の測定はスリップリングを通して行なわれる。この際、スリップリングのチャンネルによって測定点数に制約を受けることやスリップリングの接触抵抗が問題になってくることも考えられるので将来は多チャンネルの電磁カップリング方式テレメータ装置が望ましい。

3. 測定結果について

小型エンジンから L 型、M 型エンジンに至るまで合計 35 機の地上燃焼時の温度測定を行なったが、ここでは全機について測定結果をのべるのをさけ実際の飛しょう機体として使用された M 型エンジンと 2, 3 の小型エンジンの 1 部の測定結果についてのべる。

L 型エンジンについては宇宙研報告地上燃焼実験特集号第 4 巻 (昭和 43 年 12 月) を参照されたい。

ここに記述する順序は地上燃焼実験年代の古い順としないで実際の飛しょう時における 1 段目からの順とした。

これらの測定位置については毎回一定した個所を測定したのではなく、そのつど興味あるところおよび設計上問題になる様な個所、またはその様な時間範囲を選んで測定した。また 2 段目から上のエンジンの燃焼実験は真空スピン燃焼実験からの制約もあった。

真空燃焼試験としてはこのほかに M-4S の 3 段目に取り付けられたレトロモータの燃焼ガスによって姿勢制御接手部材料に塗布した耐熱剤の性能を調べるためにレトロモータを真空中で燃焼させて温度測定も行なった。

1) M-10 [I] エンジンの温度測定について

M-10 エンジンの燃焼実験は昭和 40 年 5 月と同年 11 月にそれぞれ厚肉チャンバと薄肉チャンバで行なわれている。

ここでは M-10-2 は実機構造であるが、チャンバ材である HT-200 を損傷することを懸念しチャンバ温度の測定を行なわなかったためノズル回りについてはまったくこれと変わらないという理由で M-10-1 について述べる。

(i) 測定方法

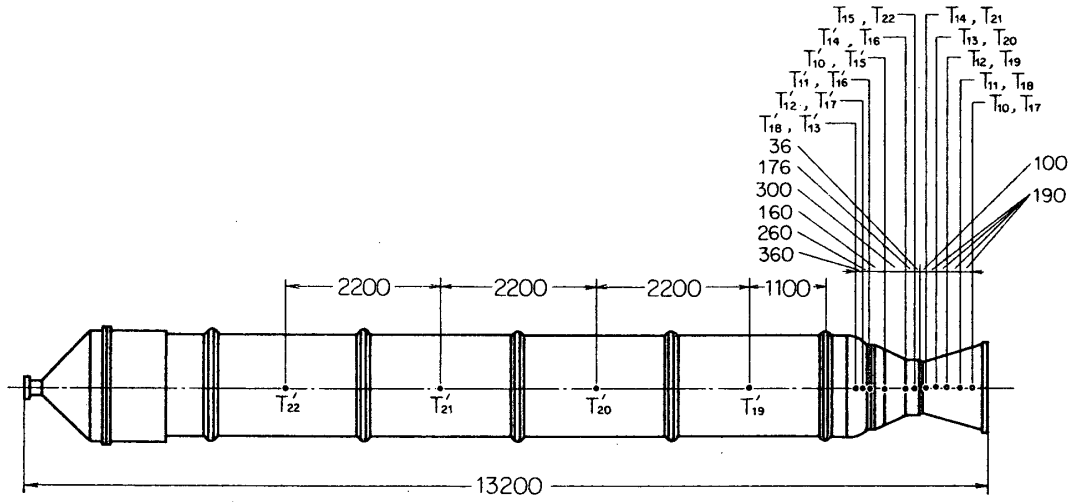
熱電対としては 0.5ϕ の 2 芯シールドの NiCr-Ni の熱電対をエンジン本体およびノズル回りに第 6 図および第 7 図に示す様な状態でカシメ機械的切換方式の増幅器を使用して測定された。

(ii) 測定結果

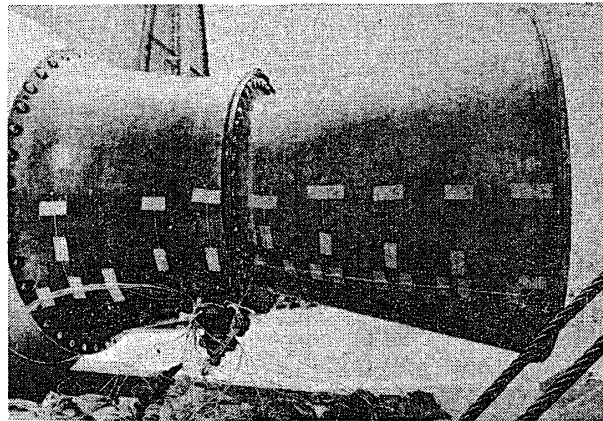
結果としては正常であった。

M-10 エンジンは飛しょう時にはチャンバ壁に緊急破壊装置用雷管を取り付るためチャンバ壁の温度測定は特に重要である。

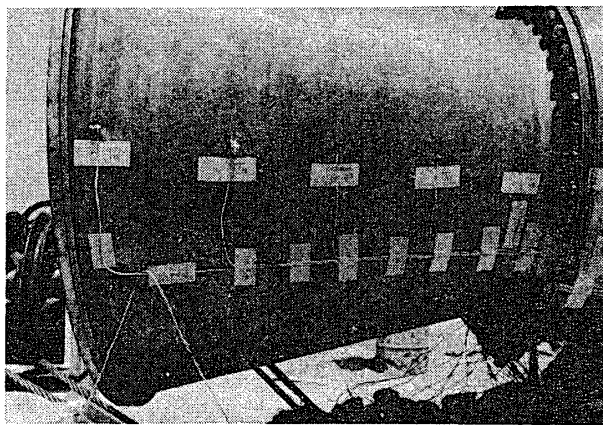
しかし測定された値は厚肉チャンバの壁温なので実機の薄肉チャンバに対して修正する必



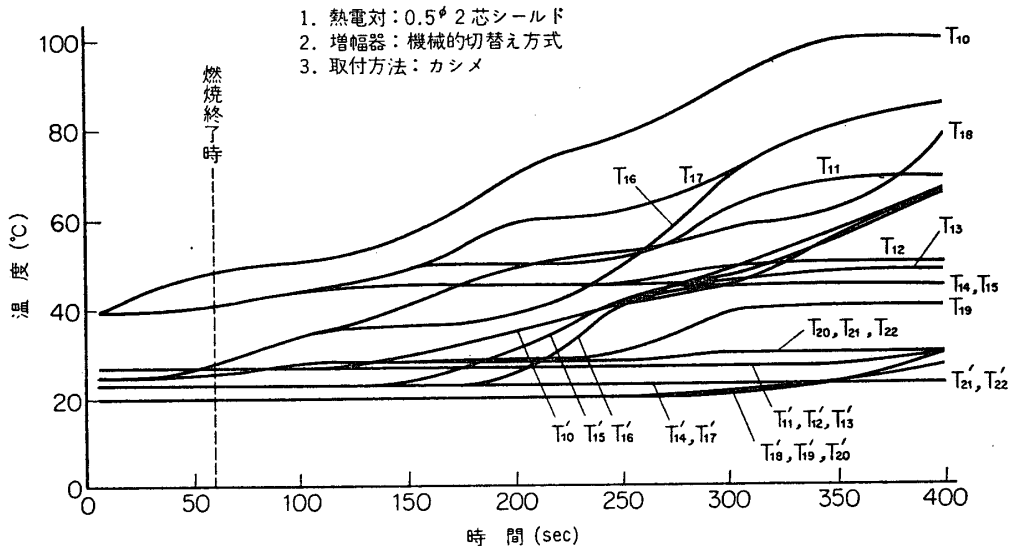
第 6 图 M-10-1 温度测定位置



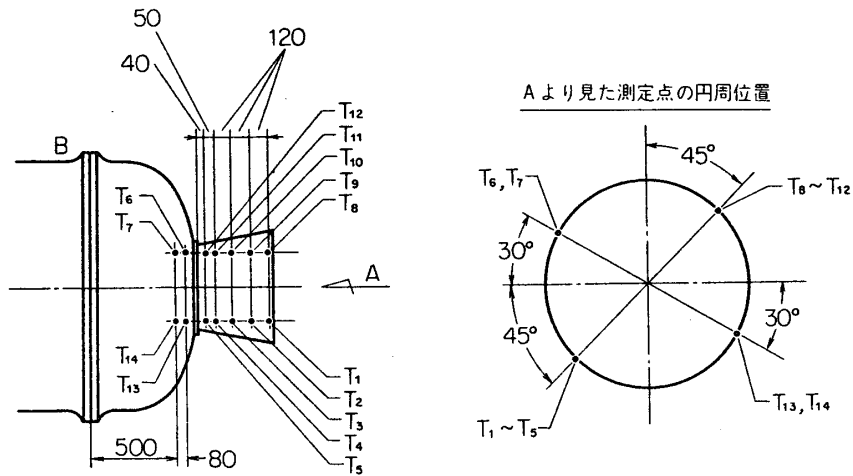
第 7 图(上)



第 7 图(下) M-10-1 热电对取付位置



第 8 図 M-10-1 測定結果



第 9 図 M-20-2 温度測定位置

要がある。

第 8 図は温度測定結果である。

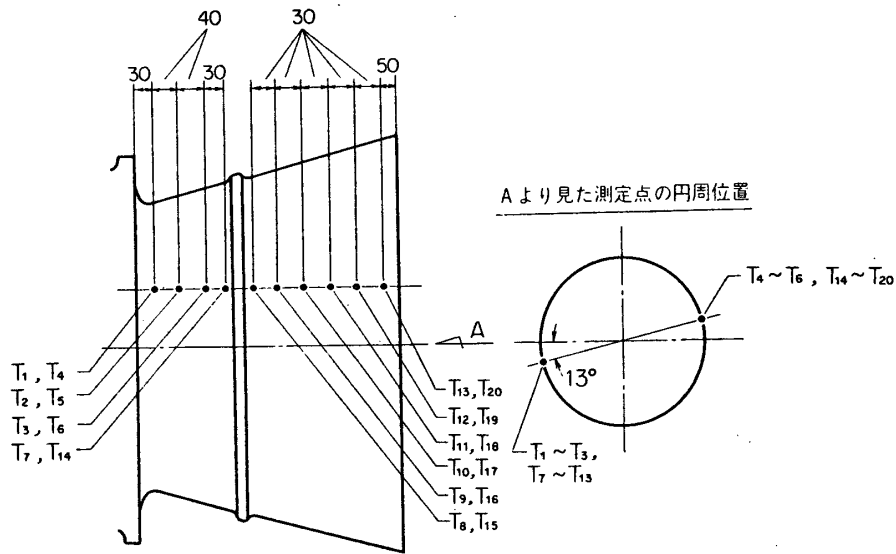
2) M-20 [2] エンジンの温度測定について

飛しょう体と同型の設計によるものとして昭和 42 年 8 月に M-20-2, 昭和 42 年 12 月に M-20-3 の実験が行なわれた。

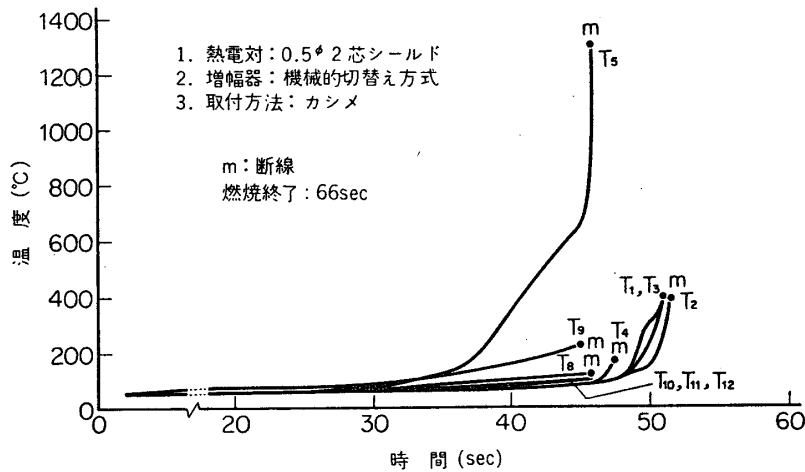
すなわち M-20-3 の燃焼実験は M-20-2 の燃焼中にノズルグラファイトの部分が焼損するという不具合が生じたため再び行なわれたものである。

(i) 測定方法

M-20-2 については第 9 図に示す様な個所に M-20-3 については第 10 図に示す様にノズル回りを重点的に M-10 に使用したのと同じ熱電対を同じ要領で取り付け測定された。



第 10 図 M-20-3 温度測定位置



第 11 図 M-20-2 測定結果

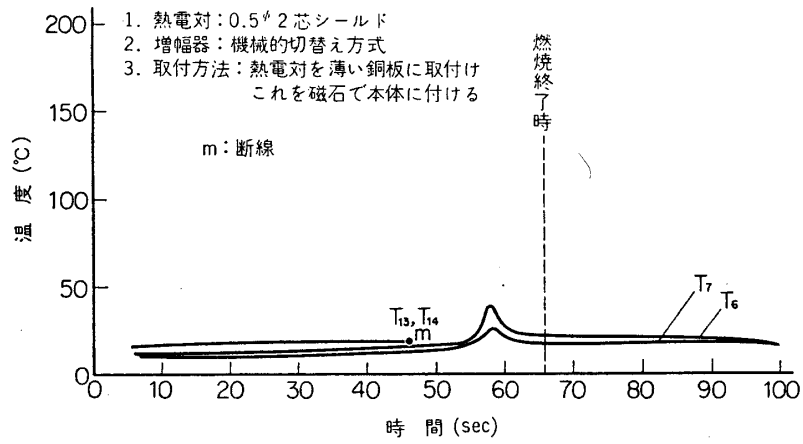
(ii) 測定結果

温度測定結果から見ると M-20-2 においては着火後 50 秒前後でノズル回りの熱電対が焼損したようにみられる。しかしエンジン本体には異常な個所は認められなかった。また M-20-3 の測定結果は正常であった。

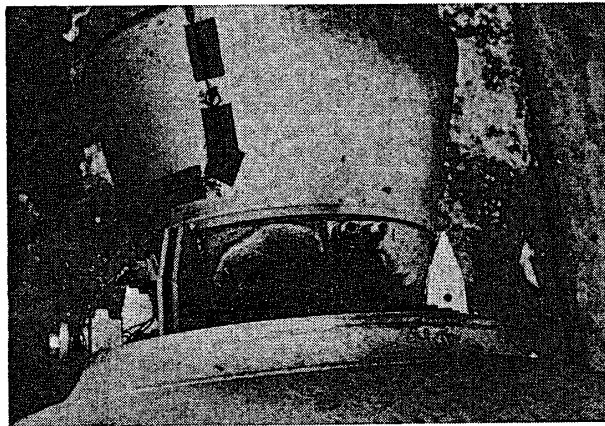
第 11, 12 図に M-20-2 の測定結果を第 13 図に M-20-2 の焼損したノズルの写真を第 14, 15 図に M-20-3 の測定結果を示す。なお、燃焼条件としては真空中で行なわれるべきであるが当時大型真空燃焼試験装置がなかったので、両機種とも大気圧下で実験された。

3) M-30 [3] エンジンの温度測定について

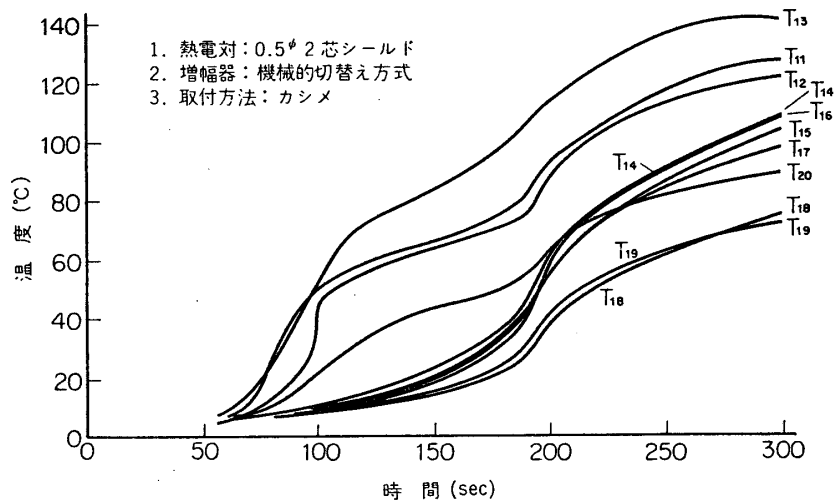
通常の測定個所 (ノズル回りおよびエンジン本体) のほかに飛しょう中に燃焼圧を検出す



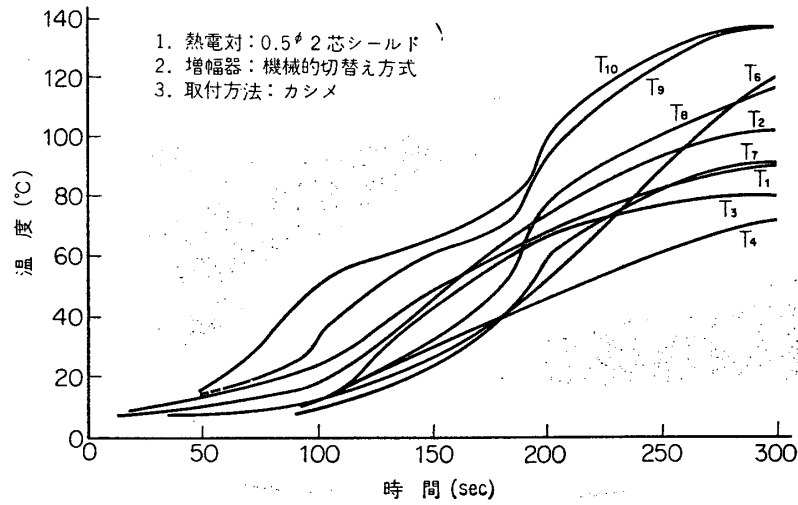
第 12 図 M-20-2 測定結果 (エンジン本体部)



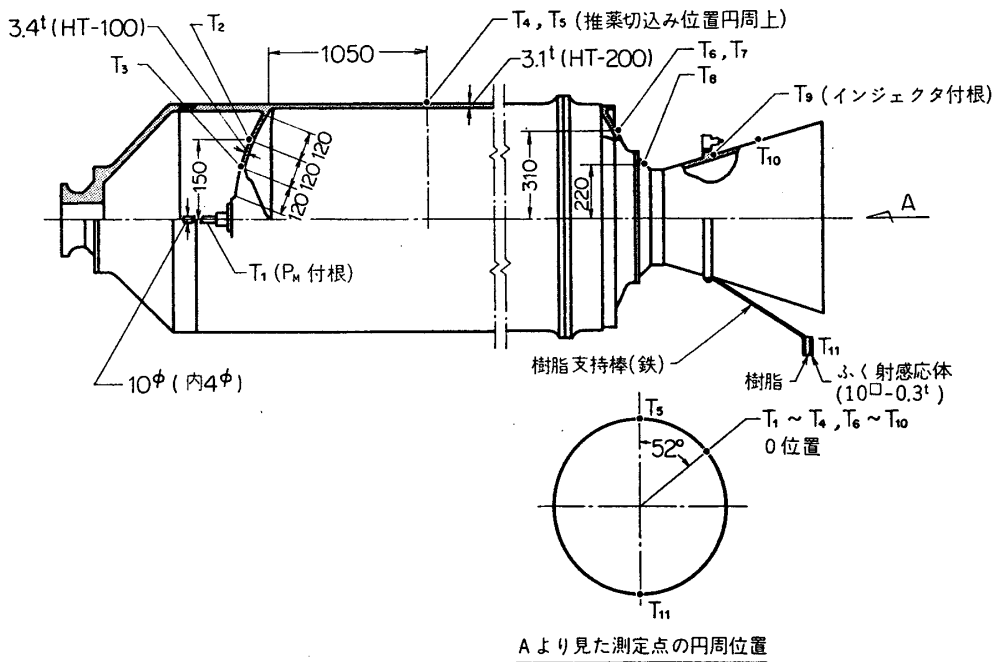
第 13 図 損焼部の写真



第 14 図 M-20-3 の測定結果



第15図 M-20-3 測定結果



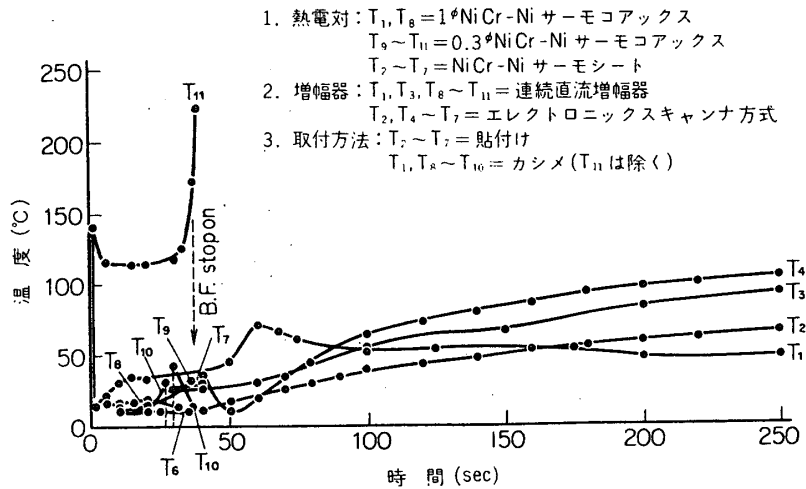
第16図 M-30-2 温度測定位置

るための導圧管壁, TVC インジェクタ付根およびノズル出口付近での輻射熱の測定などが行なわれた。なお, 本実験は真空燃焼実験であった。

(i) 測定方法

熱電対は 1.0φ, 0.3φ のサーモコアックスや 5 mm² のサーモシートなどが用いられ, また温度計測器の方も従来と違って連続測定用直流増幅器とデジタル計測装置とを用いた。測定位置は第 16 図に示す。

(ii) 測定結果



第 17 図 M-30-2 温度測定結果

エンジン本体については問題となる様な個所は見られなかった。

測定に関しては火炎逆流防止装置の動作によってノズル回りに取り付けられた熱電対が断線し、それ以後の温度測定が不可能となった。また T_1, T_3 の測定結果より飛しよう中の燃焼圧測定用検出器受感部における耐熱の度合やライニング材外周での温度こう配を推定する手がかりができた。

測定結果を第 17 図に示す。

4) M-40 [4] エンジンの温度測定について

この機種は合計 4 機が地上燃焼実験されているが、ここでは昭和 41 年 12 月に行なわれた M-40-2 と昭和 45 年 3 月に行なわれた M-40-4 について述べる。

M-40-2 は薄肉チャンバのスピンの真空燃焼実験であり、M-40-4 は厚肉チャンバの真空スピン燃焼実験である。

M-40-4 の燃焼時に燃焼ガスより輻射的な熱が人工衛星の部分におよぼす影響を調べる測定も計画された。

(i) 測定方法

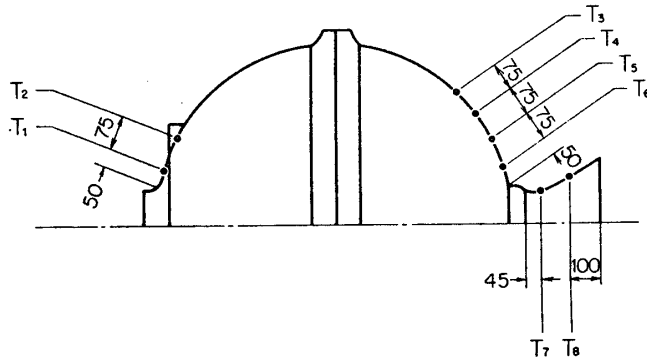
M-40-2 は薄肉のため薄い銅板に 0.5ϕ の NiCr-Ni をスポット溶接したものを耐熱材を塗った磁石で取り付けた。測定位置については第 18 図を参照されたい。

M-40-4 は厚肉チャンバなので 1.0ϕ の NiCr-Ni のサーモコックスを第 19 図に示す様な方法によって取り付けて測定した。また輻射熱を測定する検出部としてはレトロモータの壁面と相似にして $30 \times 60 \times 3t$ のアルミ板を $30 \times 120 \times 2t$ のシリコンゴムでサンドイッチ状にはさみこのアルミ板にサーモコックスを取り付けて測定された。

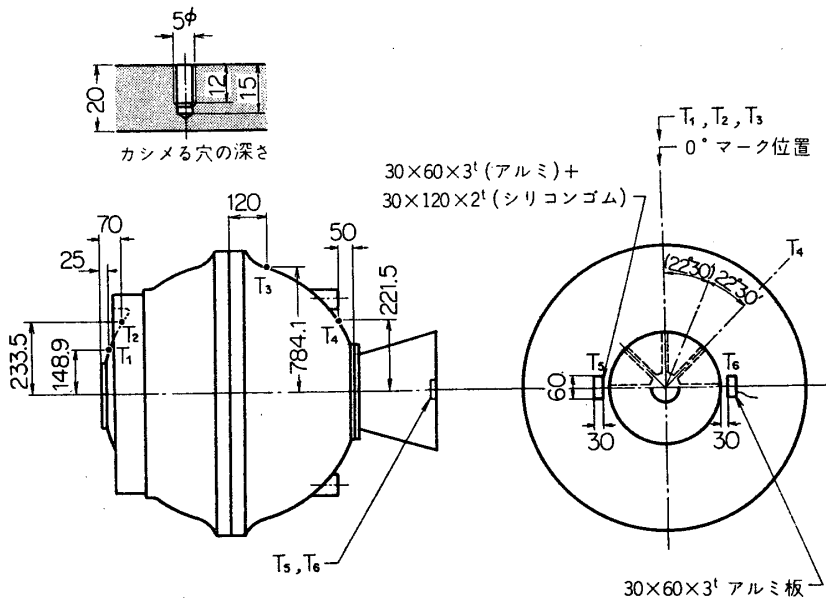
温度計測器として M-40-2 の方は機械的の切換方式による増幅器で M-40-4 の方は連続測定用直流増幅器を使用した。

(ii) 測定結果

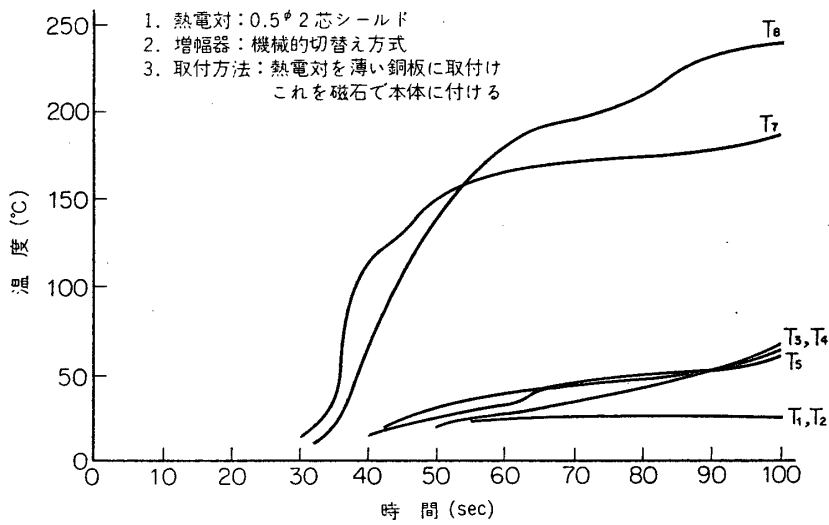
M-40-2, 4 とともに測定結果としては正常であったが、M-40-2 の測定点 T_7, T_8 が燃焼終了



第18図 M-40-2 温度測定位置



第19図 M-40-4 温度測定位置



第20図 M-40-2 温度測定位置

後かなりの時間がたってから 200°C まで温度が上昇しているのは火炎防止装置がまだできてなかったため後燃えによる影響だと思われる。

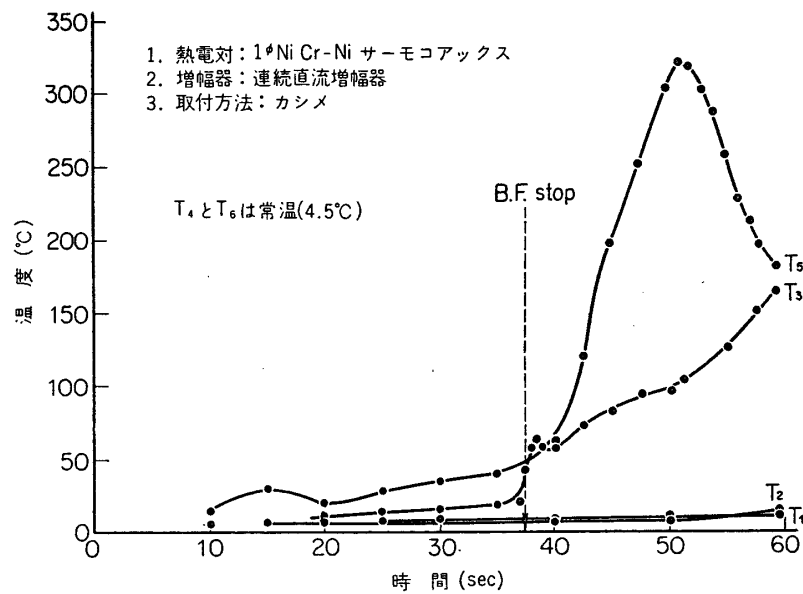
測定結果は第 20 図および第 21 図に示す。

5) M-4S [5] 姿勢制御接手部材料の熱温度試験について

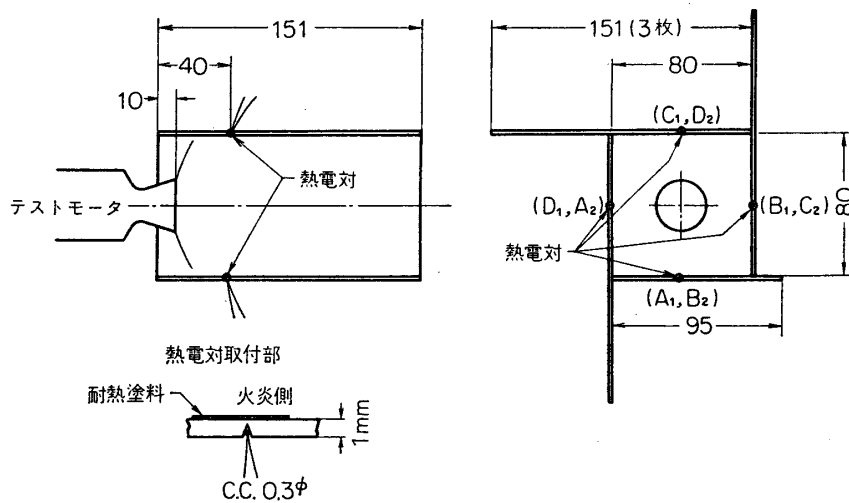
この試験は宇宙研にある密閉式真空テストスタンド [6] を使用して実施された。また試験された材料の種類について第 2 表に示す。

(i) 測定方法

第 22 図に示す様に熱電対を取り付け連続測定用直流増幅器を使用して測定した。なお熱



第 21 図 M-4-4 測定結果



第 22 図 姿勢制御接手部材料の熱試験における温度測定位置

第 2 表 熱温度試験片材料

No	被覆状態	被覆後の寸法
A ₁	なし	2×95×151
A ₂	KE 45 SRTV 0.3 t+ γ 0.2~0.3 t	2.5~2.6×151×151
B ₁	ドータイト 0.1 t (電導塗料)	2.1×151×151
B ₂	同上	2.1×95×151
C ₁	ネオタイト 0.3~0.4 t+ γ 0.2~0.3 t	2.5~2.7×151×151
C ₂	同上	
D ₁	γ 0.4~0.6	2.4~2.6×151×151
D ₂	同上	

電対としては 0.5 ϕ の C-C を使用した。接手部材料として最終的にはを採用した。

(ii) 測定結果

測定結果より判断すると燃焼終了時 5 秒以降急に温度が下がっている材料 (C₂) があるが、これは液体窒素による影響だと思われる。

温度測定結果については第 23, 24 図を参照されたい。

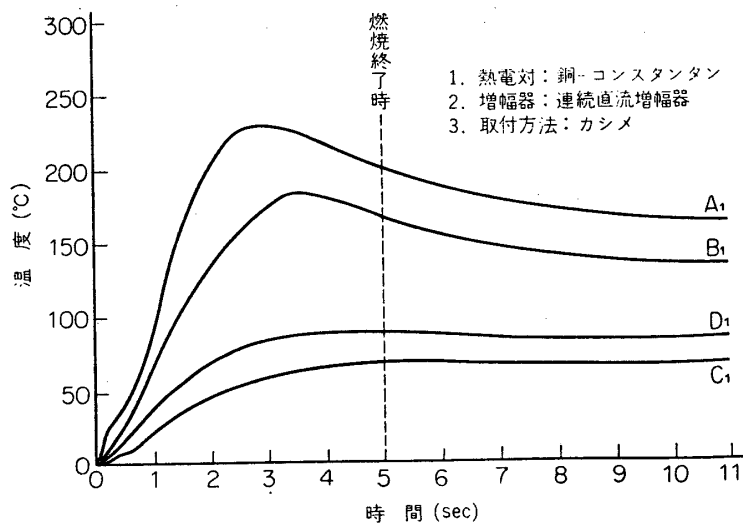
試験後の材料の写真を第 25 図に示す。

6) M-4S [7] 補助ブースタの温度測定について

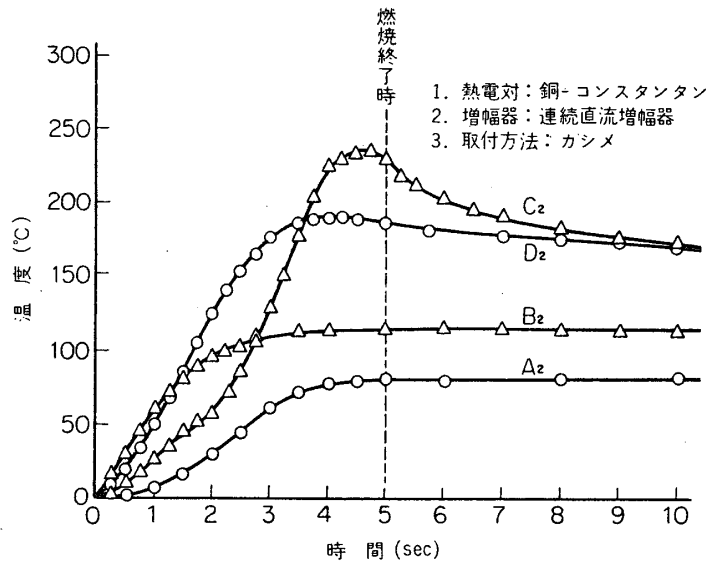
この測定は補助ブースタの燃焼によるチャンバ壁温が M-10 のチャンバ壁にどの程度の熱の影響があるか調べるためになされたものである。

(i) 測定方法

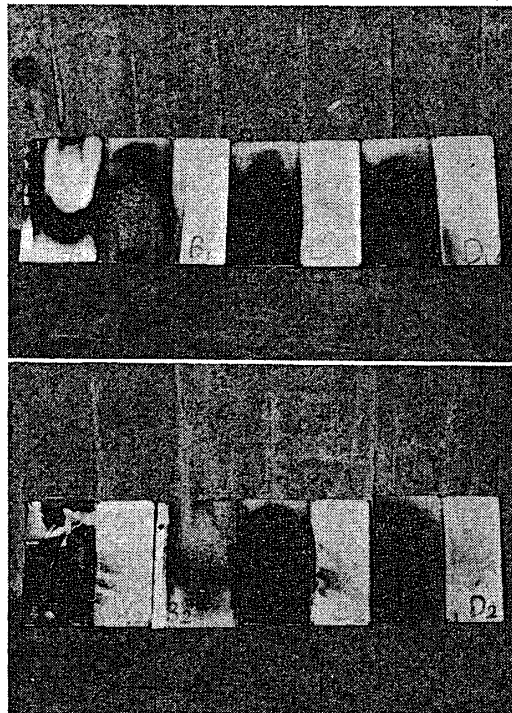
通常熱電対を使用しての測定のほかにチャンバ外壁にサーモペイントを塗布し、この変色状況より温度分布を計測する。



第 23 図 M-4S 姿勢制御接手部材料の熱試験結果



第 24 図 M-4S 姿勢制御接手部材料の熱試験結果

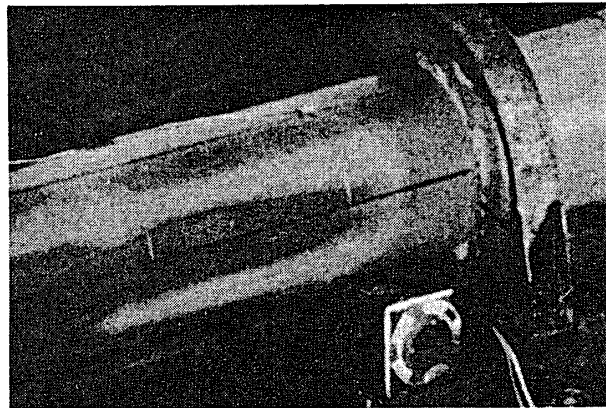


第 25 図 試験後のの材料写真

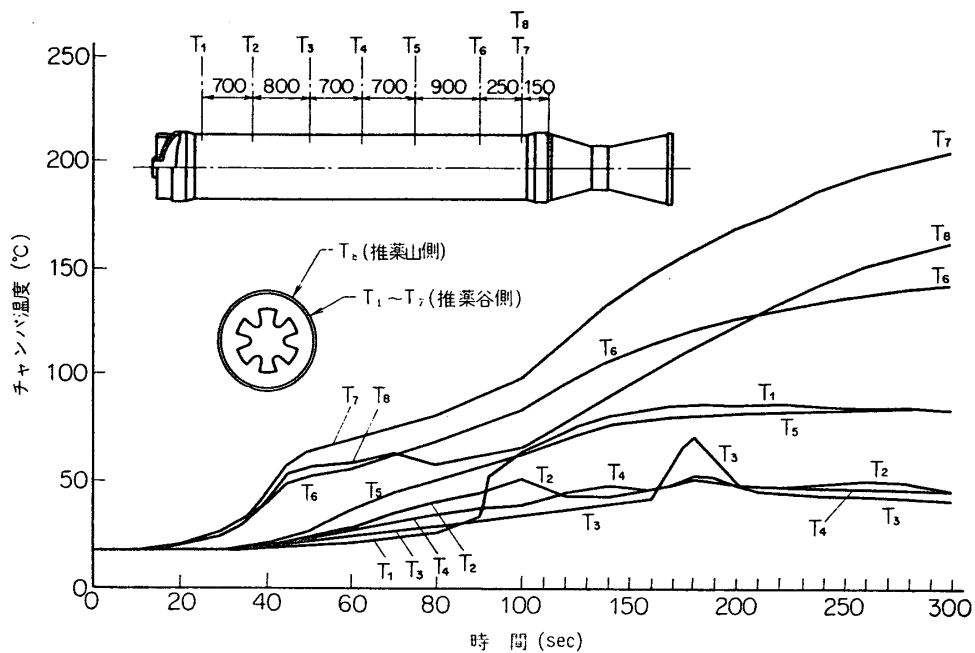
熱電対は 0.5ϕ の A-C で、サーモペイントは (テイカ産業製の R-4) を使用した。

熱電対の方には直流増幅器が使用され、サーモペイントの方は 16 mm 撮影機により記録した。

このサーモペイントは非可逆型であり、 40°C にて黄色から赤色に変色する。



第 26 図サーモペイントの 16 mm 記録



第 27 図 熱電対による温度測定結果

ただし変色には時間おくれがかなりある。

(ii) 測定結果

結果は正常であった。

第 26 図の 16 mm 記録から見る様にサーモペイントは薄肉チャンバの温度測定に対しかなりの情報を提供する。

熱電対による測定位置および測定結果を第 27 図に示す。

すなわち熱電対等により数点の温度が測定されれば、変色状況よりチャンバ外壁面上に大略の等温線がえがかれるわけである。

1972 年 6 月 10 日 新設部(工学)

参 考 資 料

- [1] M-10-1 および M-10-2 地上燃焼実験報告書.
昭和 40 年 9 月 20 日, 昭和 40 年 12 月 27 日.
- [2] M-20-1, M-20-2, M-20-3 の地上燃焼実験報告書.
昭和 39 年 4 月 24 日, 昭和 42 年 12 月 21 日, 昭和 43 年 3 月 7 日
- [3] M-30-2 地上燃焼実験報告書.
昭和 45 年 4 月 20 日.
- [4] M-40-2 および M-40-4 の地上燃焼実験報告書.
昭和 42 年 4 月 17 日, 昭和 45 年 4 月 20 日.
- [5] M-4S 用レトロの燃焼ガスによる CN 接手部材料の熱温度試験結果.
昭和 45 年 12 月 4 日.
- [6] 長友信人: ロケット真空燃焼実験装置, 日本航空宇宙学会誌 Vol-18, No-199, 昭和 45 年 8 月, pp. 22~23.
- [7] M補助ブースタ地上燃焼実験報告書.
昭和 41 年 5 月 3 日