

# ロケット搭載アンテナの飛しょう中の VSWR 特性

林 友直・長谷部 望\*・座間 知之\*\*

## VSWR Characteristics of Rocket-borne Antenna during Powered Flight

By

Tomonao HAYASHI, Nozomu HASEBE and Tomoyuki ZAMA

**Abstract:** VSWR characteristics of rocket-borne telemetering antennas in VHF-, UHF-band during rocket powered flight are presented.

Increase of VSWR at VHF antenna was detected, when the second stage was burning. It has become clear that the level down of the ground receiver resulted not only from the scattering and attenuation effects, but also from the impedance deviation effects of the antenna by exhaust plume.

### 概 要

VHF 帯および UHF 帯ロケット搭載テレメータ送信アンテナのロケット飛しょう中の VSWR (電圧定在波比) 特性測定結果について述べる。

VHF 帯アンテナでは, エンジン燃焼中に VSWR 悪化が認められ, 地上局における受信レベルの低下の原因がロケット火焰による散乱, 減衰による効果ばかりでなく, 搭載アンテナの特性悪化も含まれることが判明した。

### 1. はじめに

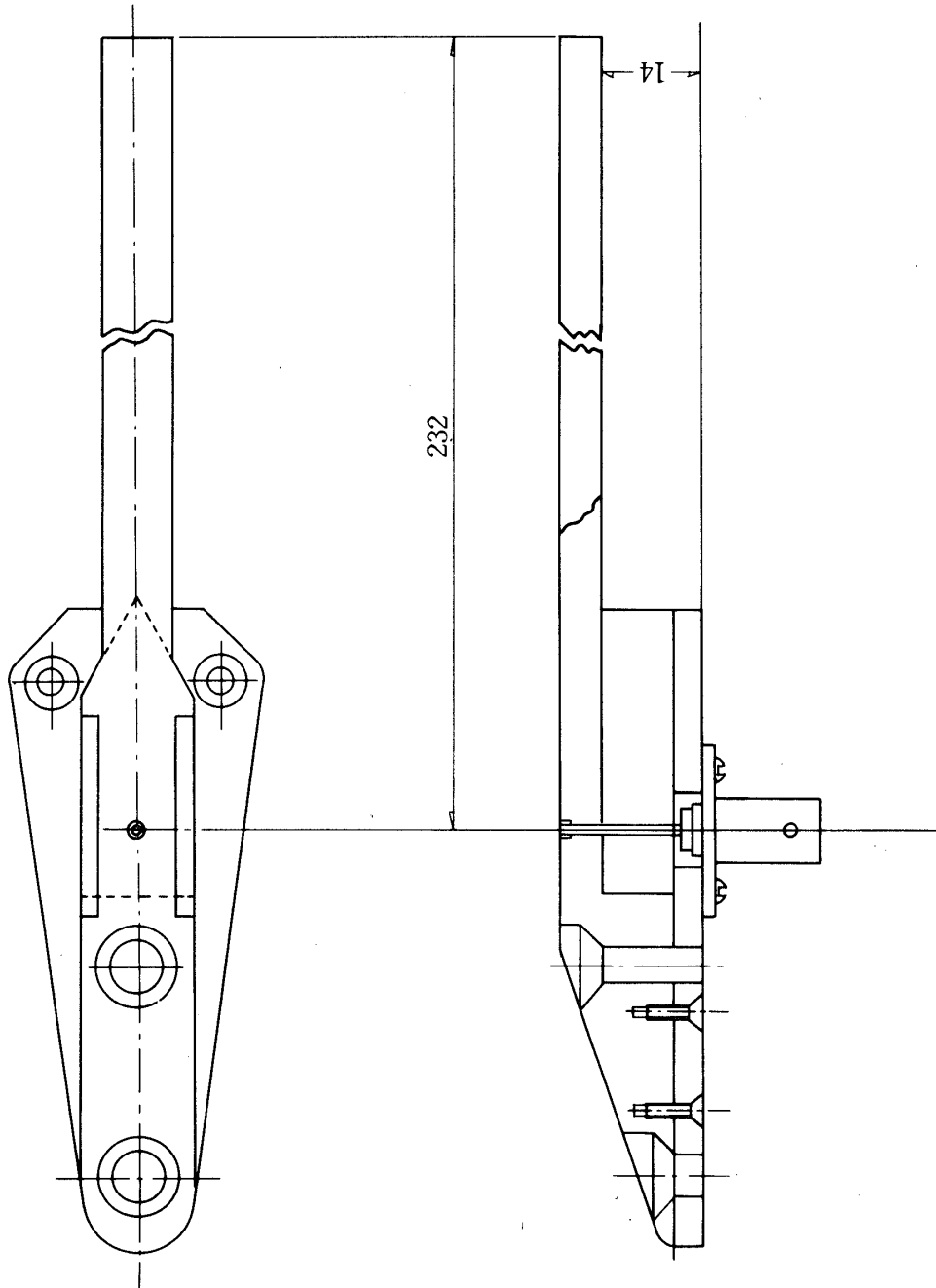
ロケットに搭載されたテレメータ送信機やレーダトランスポンダから送信された飛しょう中の電波は地上局で受信され, 受信レベルが記録される。そして, その受信レベルから搭載送信機や搭載アンテナが正常に動作していたことの確認や, 回線設計が充分であったかどうかの確認が行われる。

さきに, この受信レベルデータから, 主に, ロケットエンジン燃焼中の受信レベルの低下に注目して報告を行った [1] [2]。その結果, 高度 40~60 km 付近でロケットの火焰に

---

\* 東京大学生産技術研究所

\*\* 宇宙開発事業団



第1図 VHF アンテナ構造図

よる影響が顕著に認められ、VHF 帯で大きく、UHF 帯、Lバンド、Cバンドになると影響が少なくなることが判明した。

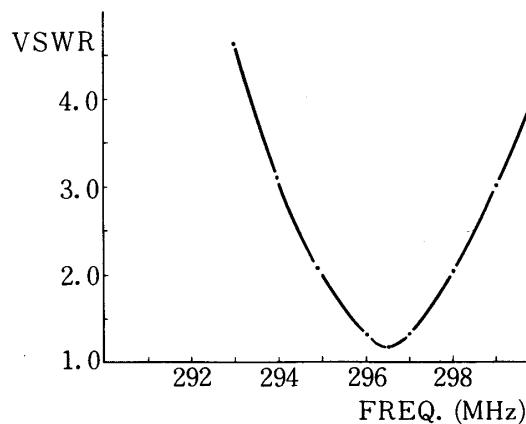
本報告においては搭載アンテナに定在波比 (VSWR) 測定器を取付けて、飛しょう中の VSWR を測定し、ロケットのエンジン、スピンモータ、姿勢制御エンジン等の作動中にアンテナが受ける影響を観測しようと試みた一連の実験結果について述べる。現在までに L-3 H型 2機、M-3 C型 2機、M-3 H型 3機に搭載した 300 MHz 帯と 915 MHz テレメータ送信アンテナについて測定を行った。また、1 段式ロケット S-310 型にも 300 MHz 測定器を搭載したが、この場合、VSWR の変化はほとんど認められなかったため本文では省略した。

本文においては、まず 2 周波帯の搭載アンテナの構造と特性を記述し、VSWR 測定器の構成を説明する。次いで、3 種類のロケットに搭載したアンテナの VSWR 特性測定結果を示して考察を加える。UHF 帯アンテナはロケット飛しょうにともなう温度、振動等の環境条件に対し安定した電気特性を保持した。VHF 帯アンテナは温度、振動、衝撃によりその特性を変化させたが、地上局との通信には十分なレベルを確保した。

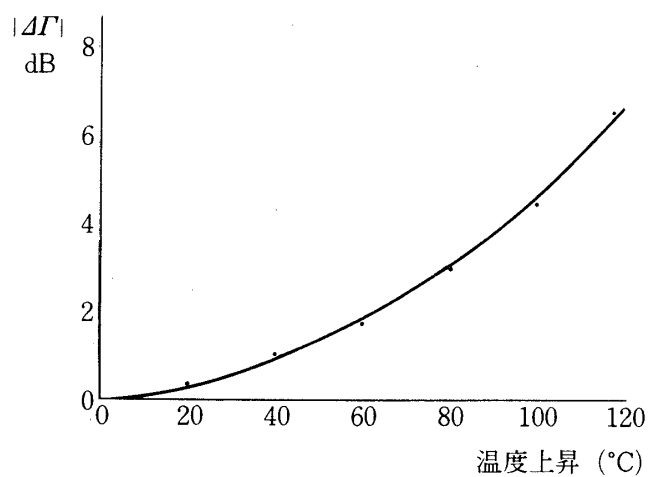
## 2. アンテナの構造と特性

第 1 図には、ロケット搭載 300 MHz 帯テレメータアンテナの構造図を示した。第 2 図には、その VSWR 特性の一例を示した。第 2 図にあるように、VHF 帯テレメータアンテナは伝送線路形アンテナと呼ばれるタイプで放射抵抗が低く [3]、これを 50  $\Omega$  同軸給電線と整合をとっているため狭帯域である。したがって、当然温度変化、衝撃、振動等ロケットには不可避な外部環境変化に影響される。しかし、low profile であり、場所をとらない、全方向性に近い指向性を有する等の利点があって長年使用されて来た。

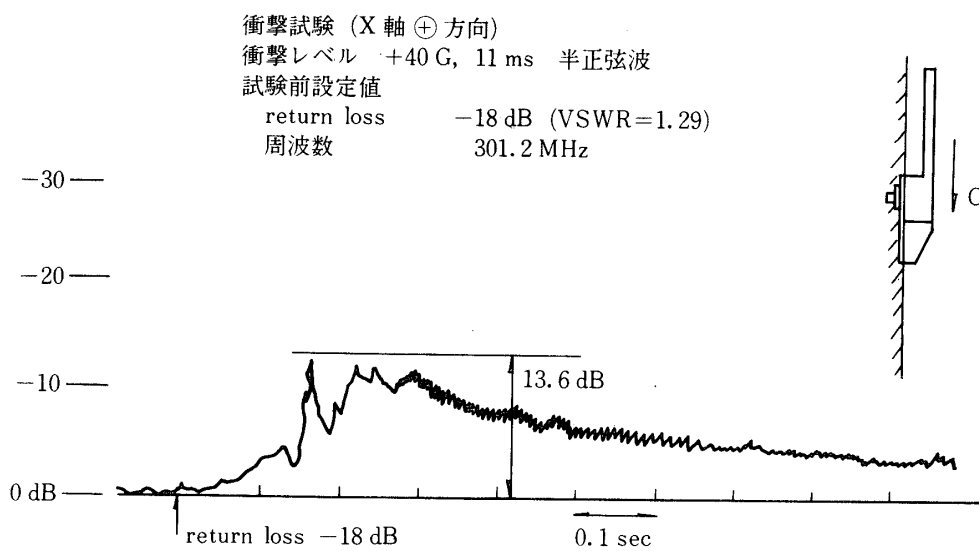
第 3 図には、アンテナを常温より 120°C まで上昇させたときの反射係数の変化  $|\Delta\Gamma|$  をプロットした。図から、温度 100 度上昇にともない、アンテナの反射係数が 4 dB 増加することがわかる。第 4 図にはアンテナの軸方向に衝撃を加えたときの反射係数の変化を示した。



第 2 図 VHF アンテナ VSWR 特性

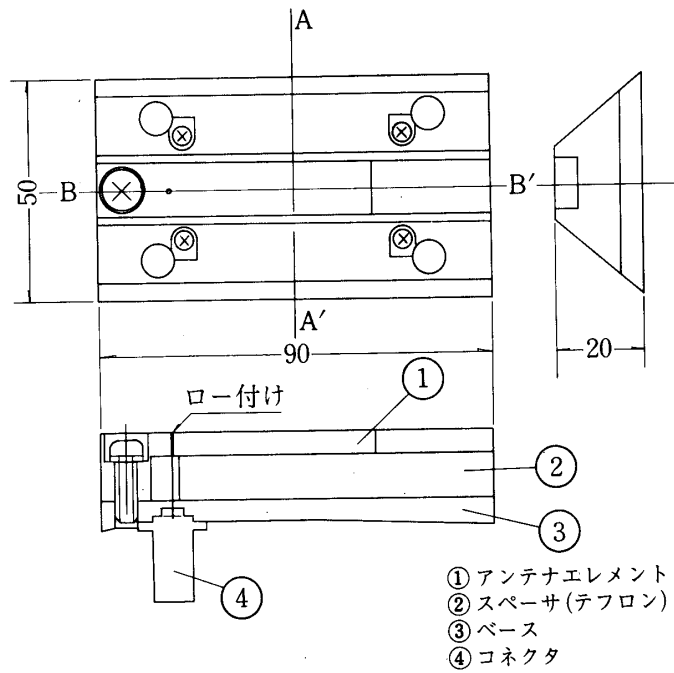


第3図 温度上昇による VHF アンテナの反射係数の変化

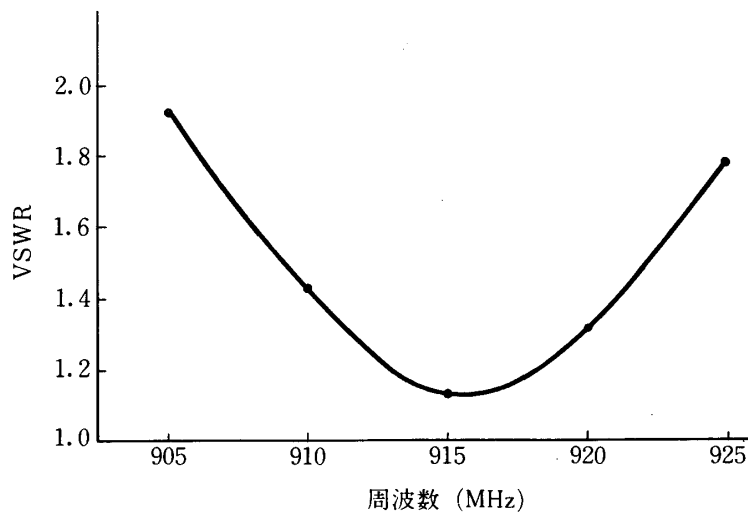


第4図 衝撃試験による VHF アンテナの反射係数の変化

光頭値で 13.6 dB 悪化している。なお、衝撃を加えたとき、試験器とアンテナとの位置関係が変化したため、約 3 dB データが偏位している。このアンテナの機械共振周波数は約 70 Hz にあり、この周波数でアンテナを振動させると、反射係数は整合点を中心にはほぼ 0 dB まで変化することがわかっている。



第5図 UHF アンテナ構造図



第6図 UHF アンテナ VSWR 特性

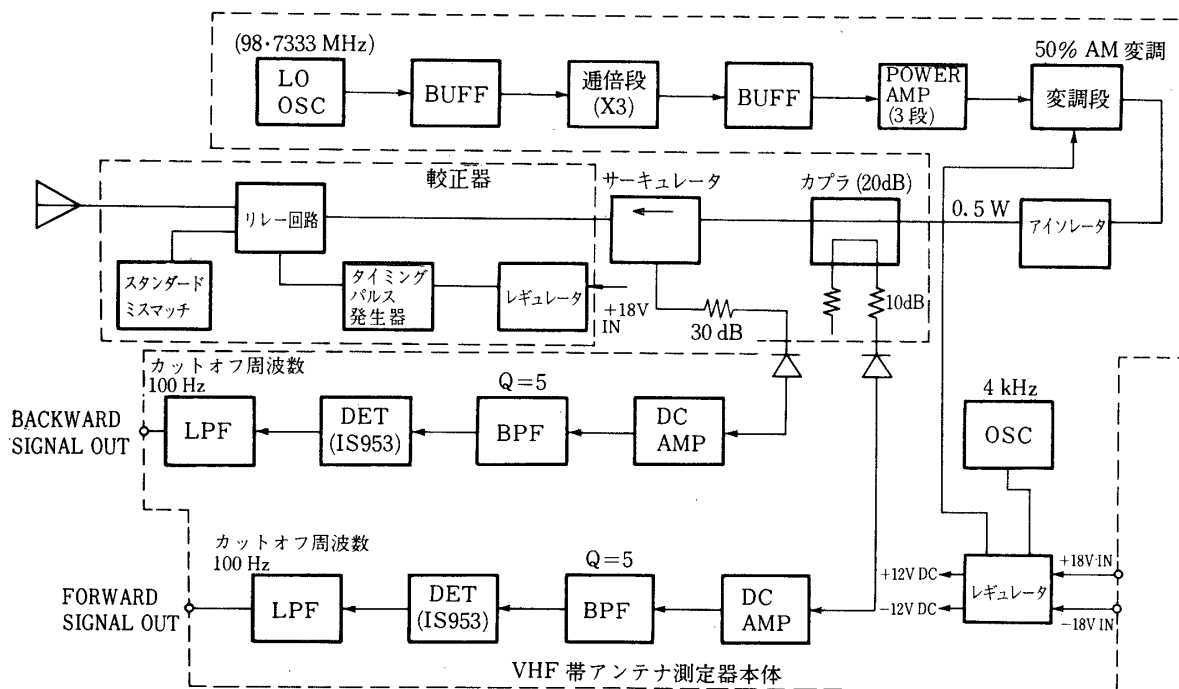
UHF 帯テレメータアンテナは周波数が 915 MHz であり, VHF 帯の約 1/3 の波長となるため, 共振の Q が低くなってブロードな特性を示す. 第 5 図は, UHF 帯テレメータアンテナの構造を示した. 第 6 図には, その VSWR 特性の一例を示した. このアンテナは素子と台座との間にテフロンを挿入した構造になっており, 振動や温度変化に対しても充分安定した特性を有している.

### 3. VSWR 測定器

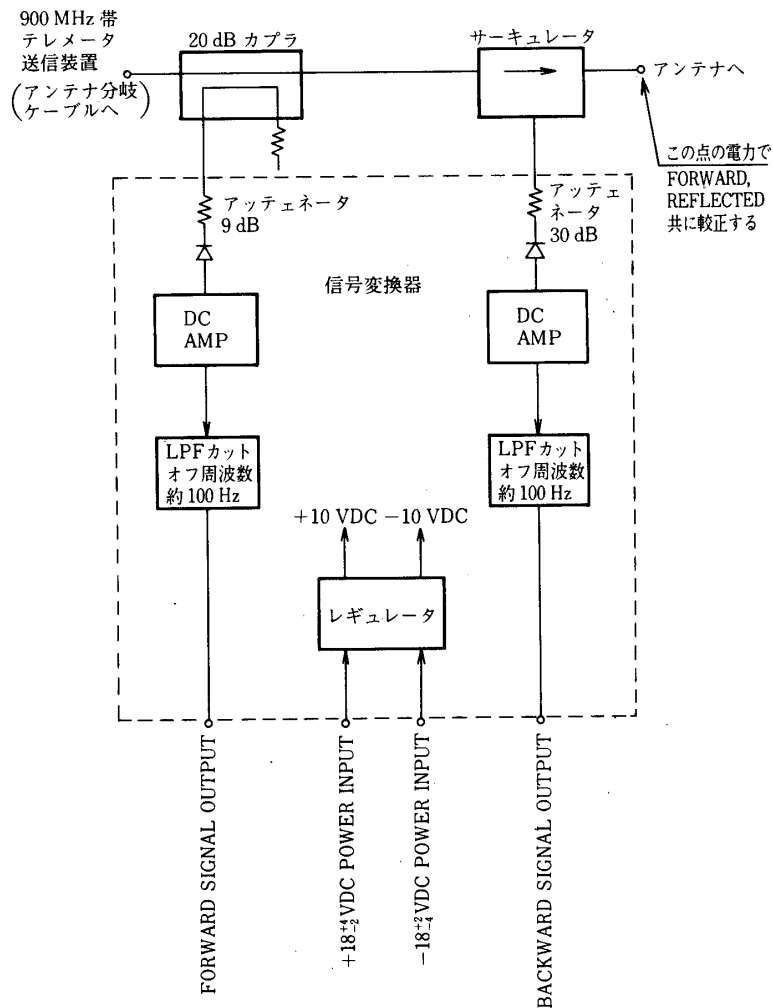
第 7 図には, VHF 帯テレメータアンテナの VSWR 測定器系統図を示した.

(AM 4 kHz) の発振器出力はアイソレータ, 方向性結合器, サーキュレータを介してアンテナへ供給される. 入射電力は 20 dB 方向性結合器を用いて取り出し, 検波後テレメータへ入力される. 反射電力はサーキュレータを用いて取出した反射波を同様検波してテレメータへ入力する. これらの電圧値はテレメータを介して地上局へ伝送され, 入/反射電力比から VSWR に換算される. また, 測定値の信頼性を高めるため, 被測定アンテナと VSWR が 3 の標準負荷と切換えてデータ内に較正値を挿入している. この較正器は M-3 H-3, M-3 C-4 に搭載された.

第 8 図には, UHF 帯テレメータアンテナの VSWR 測定器の系統図を示す. このアンテナは VHF 帯アンテナのように VSWR 測定のために搭載されたものではなく, 現用の 915 MHz テレメータ送信アンテナに 20 dB 方向性結合器とサーキュレータを接続して入・反射



第 7 図 VHF 帯アンテナ測定器系統図



第 8 図 UHF 帯アンテナ測定器系統図

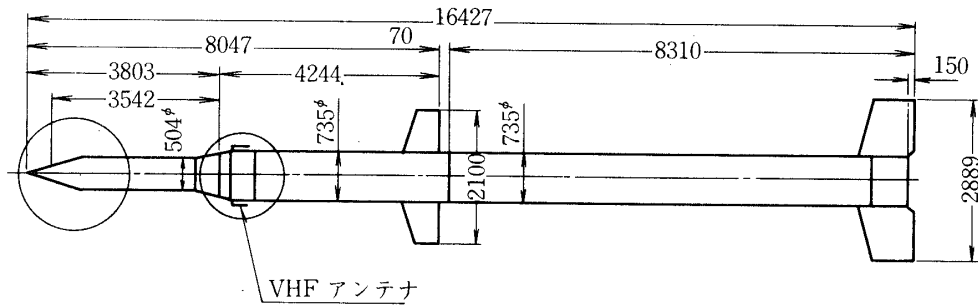
電力情報を取出し、テレメータへ入力して地上へ伝送する。このアンテナはロケット胴部に取付けた 4 本の円偏波励振アンテナのうち的一本である。その励振回路はケーブルを利用した 2 分配回路と移相回路を組み合わせで出来ており、分配回路は方向性を有しない。このため 4 本のうち 1 本のアンテナに VSWR の変化が起ると、その影響が残りのアンテナ端に現れる。

#### 4. 実験結果

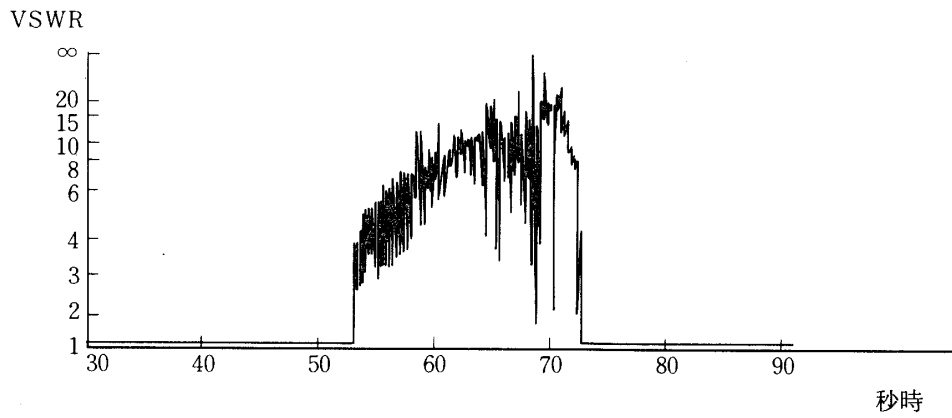
##### 4.1 VHF 帯テレメータアンテナ

##### 4.1.1 L-3H 型ロケット

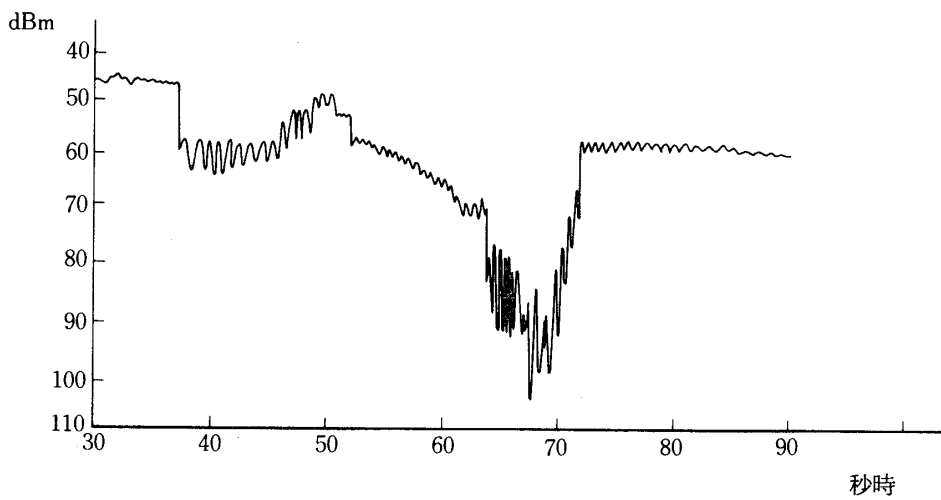
このロケットは高度 200 km に到達する多目的観測ロケットで、第 9 図に示すごとく 3 段式になっており、VSWR 測定器は第 2 段目に搭載した 2 本のテレメータ送信アンテナのう



第9図 L-3H-8 全体図

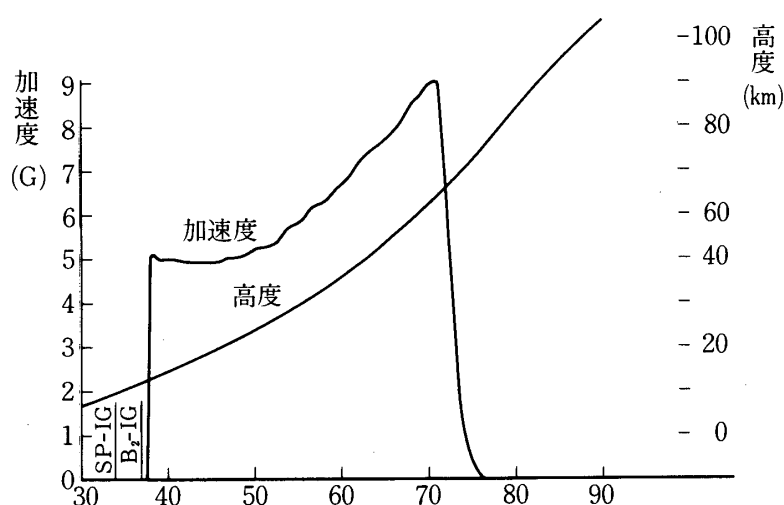


第10図 L-3H-8 VHF アンテナ VSWR 測定値



第11図 L-3H-8 テレメータ受信レベル





第12図 L-3H-8 高度, 加速度変化

ち1本に第8図と同じ構成のVSWR測定器を取付けて測定を行った。

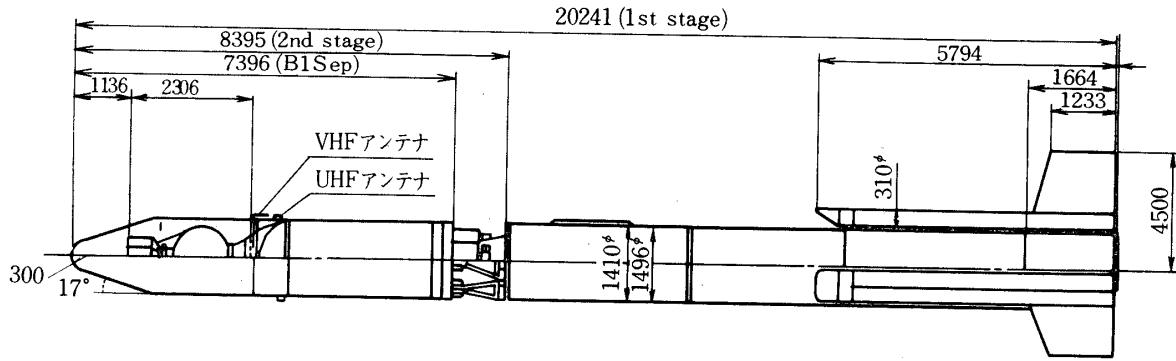
第10図は、L-3H-8号機の発射後の時間に対するテレメータアンテナのVSWR変化を示した。また、第11図にはこのときの受信レベルを示した。図では、とくにアンテナのVSWR変化の顕著な部分を書き出している。発射後53秒まではVSWR変化はほとんど認められず、53~72.5秒までVSWRは大きく悪化している。このときのロケット飛しょう状態を示したのが第12図で、時間に対する高度・加速度が示している。この3つの曲線を比較すると、高度は35~65 kmであること、 $G > 5.35$ で起っていることがわかる。そして受信レベルもVSWRの悪化とともに低下しているのが認められる。なお、受信レベルは第2段エンジン点火とともに低下していることも注目に値する。

この他、L-3H-9号機にも8号機と同じ構成のVSWR測定器を搭載した。しかし、この場合、発射当日になってアンテナのVSWRが悪化し( $VSWR \approx 3$ )飛しょうには大きな影響を与えないためそのまま発射された。テレメータ受信レベルは充分で観測に支障は生じなかったが、VSWRの微細な変化は検出できなかったため省略する。

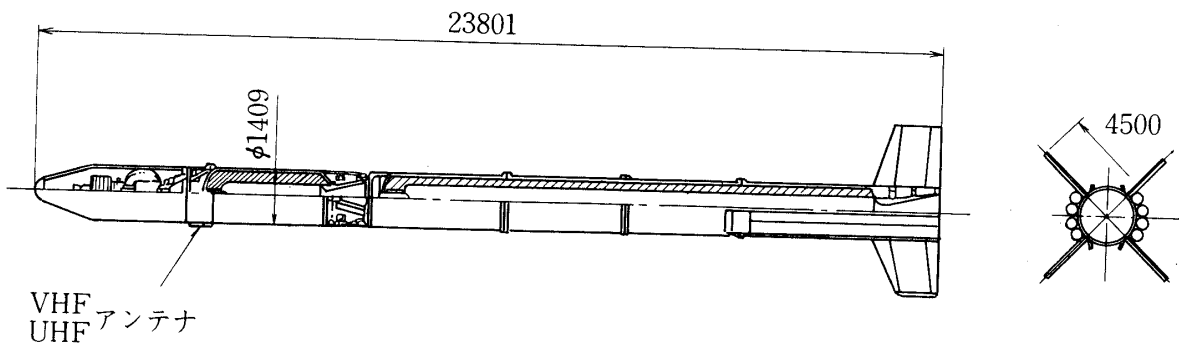
#### 4.1.2 M-型ロケット

このロケットは科学衛星打上げ用3段式ロケットで、その第2段目に第13図(M-3C型ロケット)、第14図(M-3H型ロケット)に示す位置にVSWR測定用300 MHz発振器を有するアンテナを搭載して実験を行った。

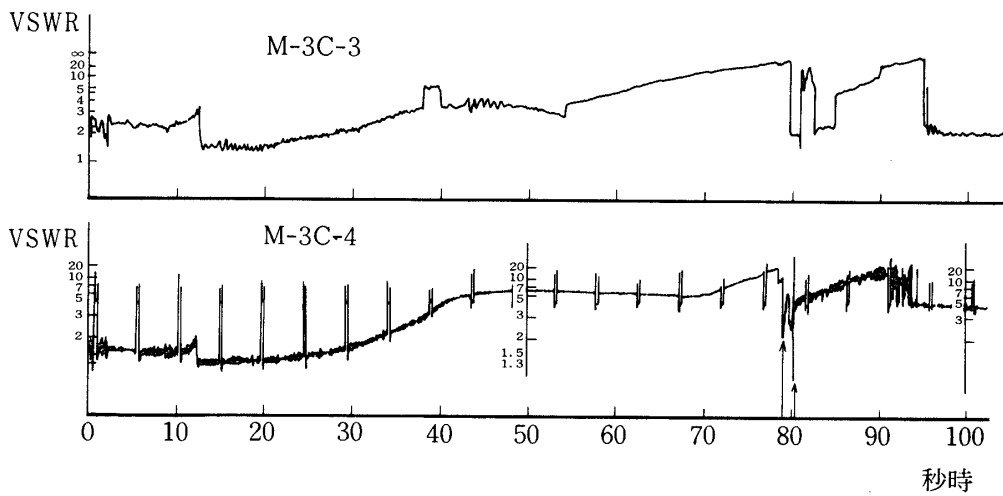
第15図は、M-3C-3, 4号機のVSWR測定結果である。第16図には、4号機の受信レベルを示した。3号機に対しては地上局受信機の都合で受信レベルは記録できなかった。4号機のVSWR測定データ中には $VSWR = 3$ の較正值が約5秒間隔で挿入してあり、測定値の精度向上をはかっている。第17図にはM-3H-1~3号機の測定結果を、第18図にはこれらの受信レベルを示した。第19図にはM-型ロケットの高度、加速度曲線を、第20図には胴体外壁の温度変化を示した。



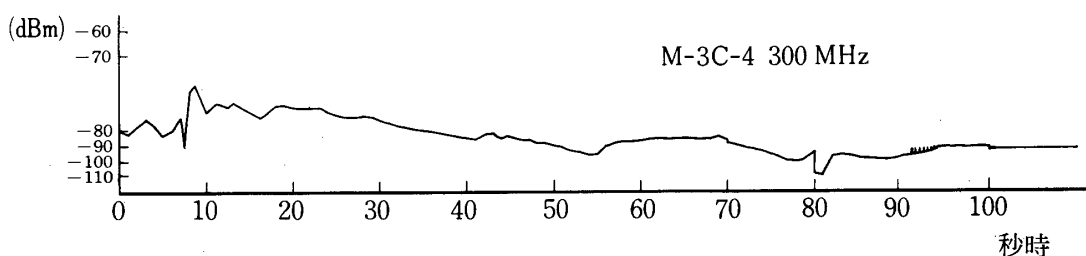
第13図 M-3C-3 全体図



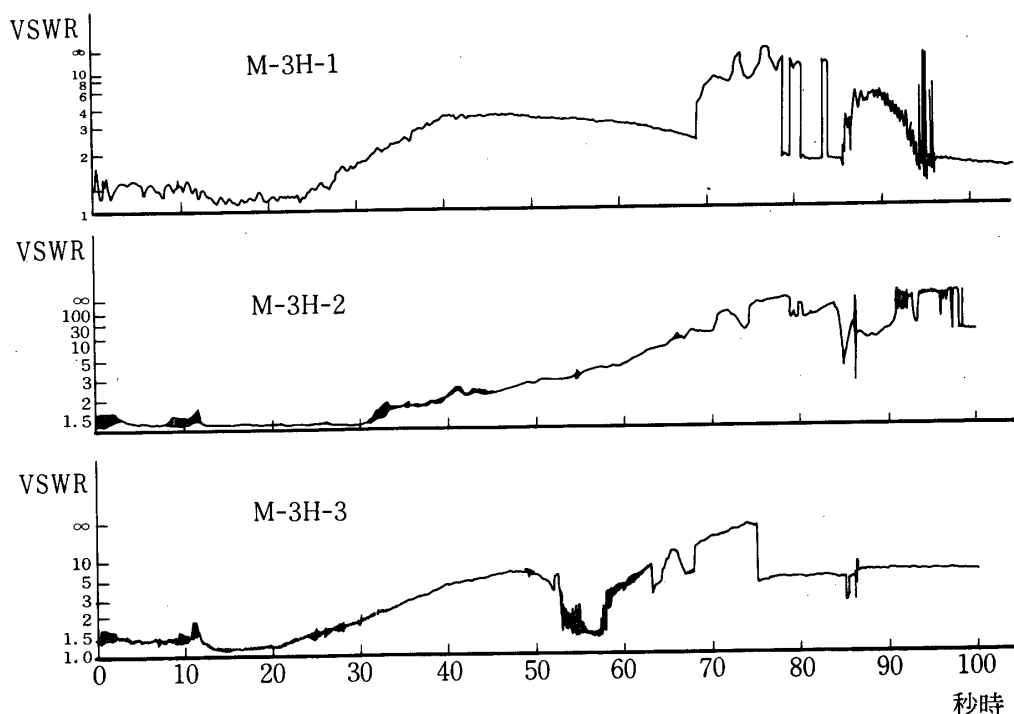
第14図 M-3H-1 構成図



第15図 M-3C型ロケット搭載 VHF 帯アンテナ VSWR 測定値



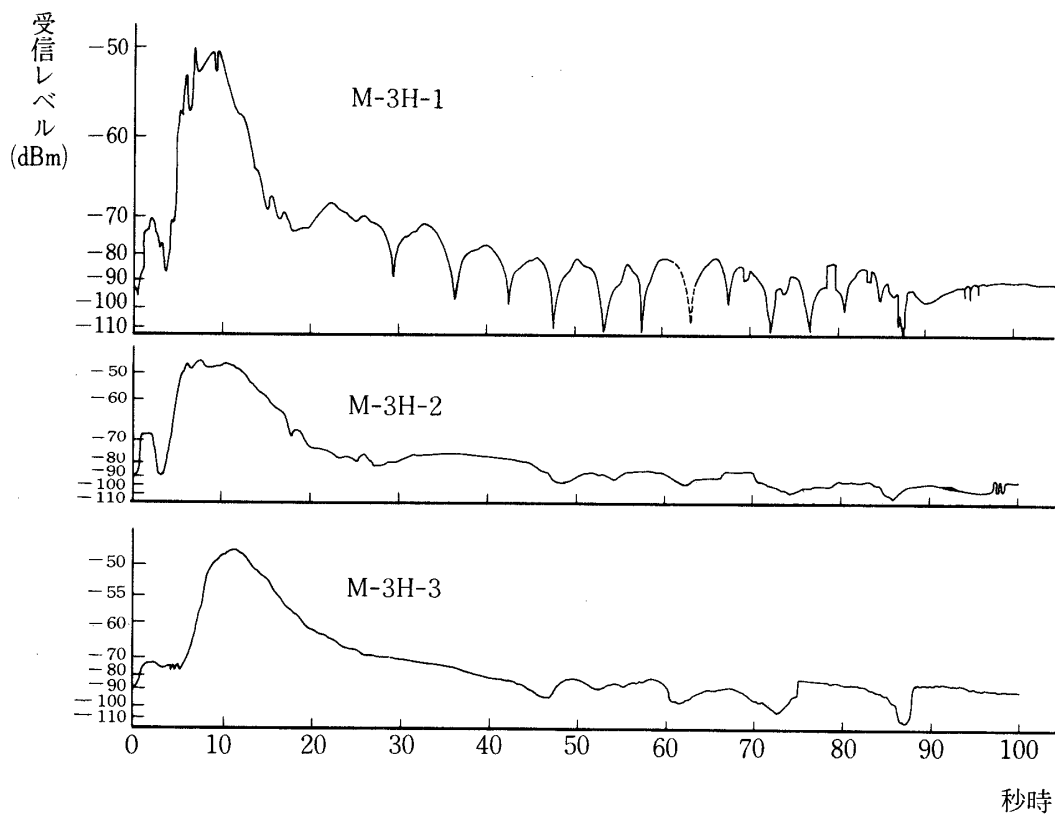
第16図 M-3C-4 VHF 帯受信レベル



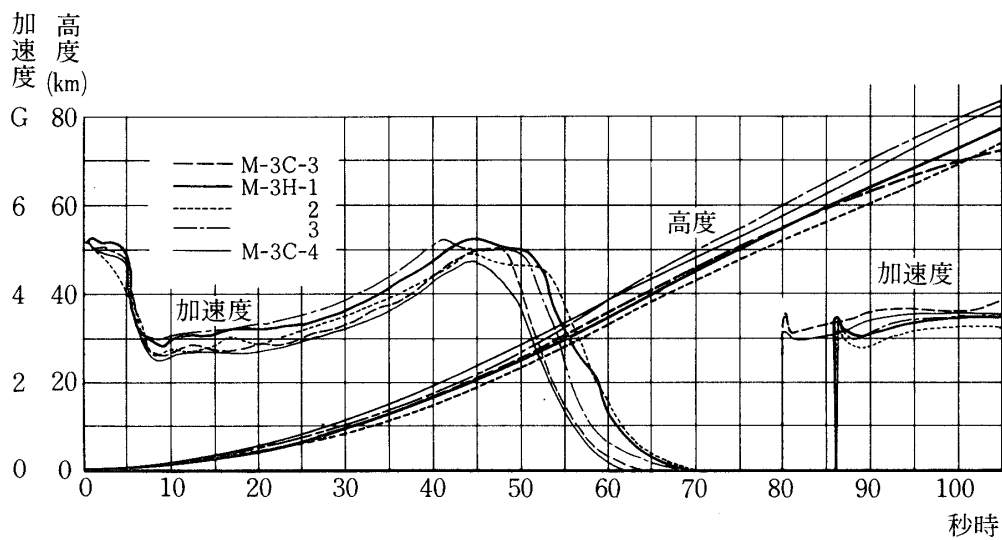
第17図 M-3H型ロケット搭載 VHF 帯アンテナ VSWR 特性

これらの図を比較して気付くことは、まず、発射後徐々に VSWR を悪化させているのはアンテナの温度上昇によるものと判断できる。その変化は第3図の温度特性とよく一致し、発射後約100秒で、この温度による影響は機体の温度低下とともに少なくなっている。

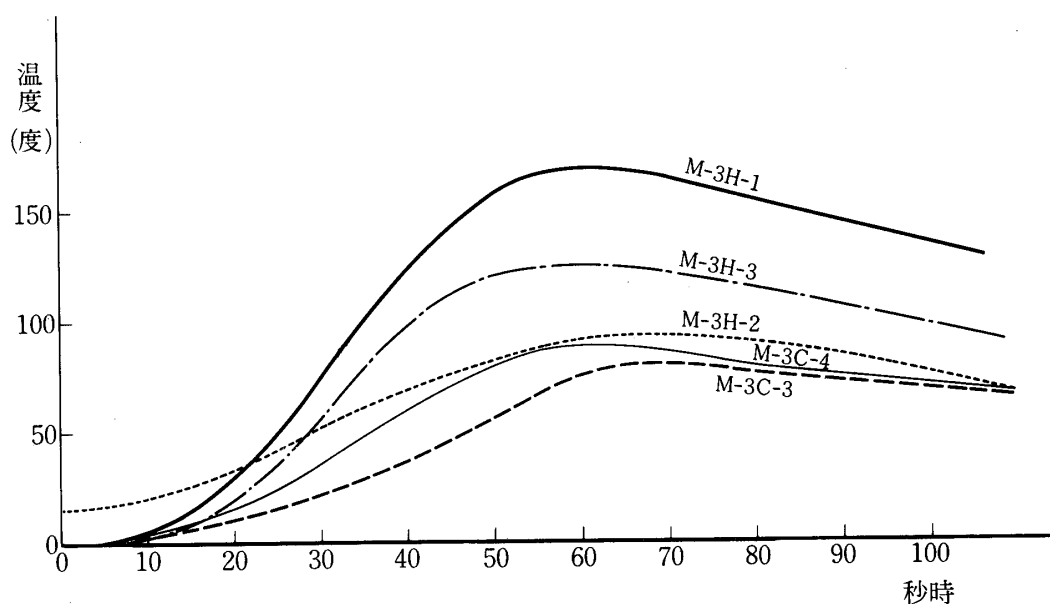
M-3C-3号機の発射後38秒付近および54秒以後、80~95秒で生じている不連続な変化はM-3H-1号機(67~81秒)、2号機(69~98秒)、3号機(52~75秒)でも認められる。このとき、VSWR悪化、復起と一致した受信レベルの低下、復起が認められる。このVSWRの不連続な変化は高度25~65km、気圧10~0.1mmHgで起ったアンテナの放電によるものと解釈できる。このアンテナへの供給電力は号機により若干の差が認められるが約



第18図 M-3H型ロケット VHF 帯受信レベル



第19図 M-型ロケット高度, 加速度曲線



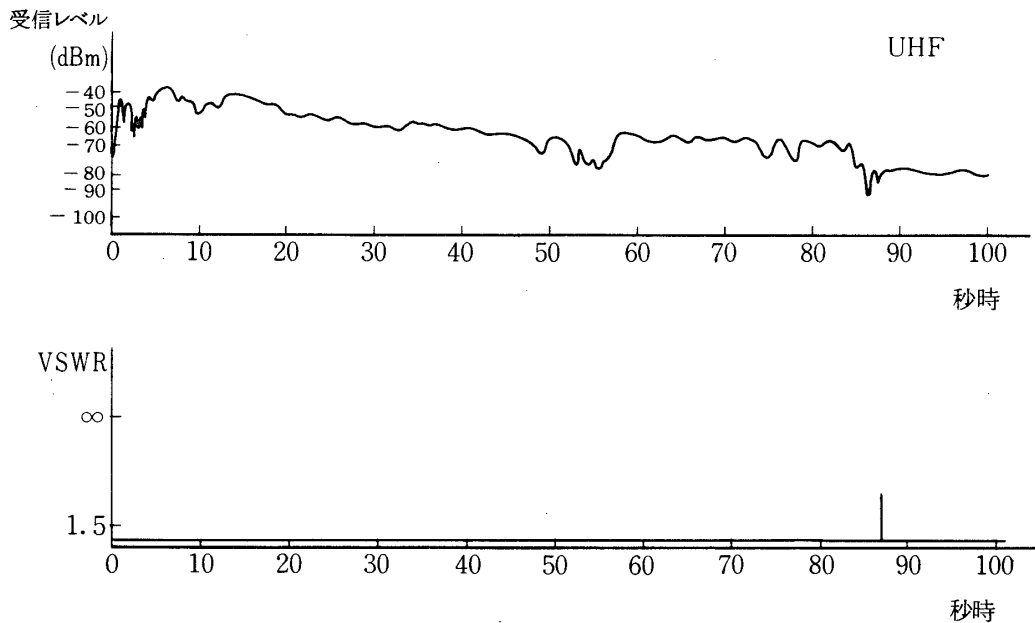
第20図 M-型ロケット外壁温度曲線

0.6 W であった。真空槽を用いてこのアンテナの耐圧試験を行った結果、供給電力が 0.4 W で 10~1 mmHg のとき放電を起こした例がある。したがって、実際に使用するアンテナに対しては送信機出力、給電系損失、アンテナの使用本数等留意する必要がある。

一方、M-3C型ロケットでは 80 秒、M-3H型ロケットでは 85 秒にて第 2 段エンジンが点火される。このとき生ずる VSWR の悪化が認められる。その顕著なものは M-3C-4 号機、M-3H-1 号機であり、M-3C-3、M-3H-2 号機では放電による VSWR 悪化と重複して明らかではない。また、M-3H-3 号機では認められていない。この VSWR 悪化が高度（または気圧）と関係があるものと考えると、第 2 段エンジン点火時の高度は第 19 図より M-3C-3 号機で 55 km、4 号機で 57 km、M-3H-1 号機で 61 km、2 号機で 57 km、3 号機で 67 km となっている。VSWR 悪化の起らなかった M-3H-3 号機はエンジン点火時に気圧 0.06 mmHg であり、のこりのロケットの場合は 0.3~0.6 mmHg の気圧下であったことがわかる。前述の L-3H型ロケットの場合と考え合せ、高度 35~65 km におけるエンジンの燃焼によって VHF 帯アンテナが影響を受けると判断できる。

#### 4.2 UHF 帯テレメータアンテナ

UHF 帯テレメータアンテナは M-型ロケットのみに搭載される。このアンテナは非常に安定で、ロケット発射から第 2 段エンジン燃焼終了時まで、VSWR < 1.5 におさまっており、搭載アンテナ自身はロケットの飛しょう中の温度変化、振動にはほとんど影響されないことが判る。ただし、第 2 段エンジン点火時にはテレメータ受信レベルの低下、VSWR 測定結果にパルス状の変化が認められる。第 21 図には、M-3H-2 号機の受信レベルと VSWR 測定結果を示した。図で第 2 段エンジン点火時の受信レベルの低下、パルス状の VSWR の悪化が認められる。この VSWR 悪化の原因は衝撃 ( $G=3.5$ ) によるものと解釈できるが、



第21図 M-3H-2号機 UHF 帯アンテナ VSWR 特性と受信レベル

受信レベルの低下は約1秒間続いている。受信レベル低下はロケット火焰による電波の散乱減衰によるものが影響していると考えられ、第1段エンジン燃焼終了付近(45~57秒)で認められる受信レベル低下と同質のものと解釈できる。この影響はM-3D-1号機に搭載したスピンモータのように横方向に噴射されるものについて特に大きいと考えられる。

### 5. 実験結果の考察

数機にわたる搭載アンテナのロケット飛しょう中のVSWRの変化を測定して、その結果をロケットの高度、加速度、振動、温度等の測定データとつき合せてみた。周波数は300MHz帯と915MHzを用いた。

これらの結果から、915MHzの搭載アンテナはその構造上からもわかるように非常に安定で、飛しょう中のVSWR変化はほとんど認められず、エンジン燃焼中の火焰の影響は認められなかった。

一方、300MHz帯アンテナは温度、振動、衝撃に影響され、飛しょう中のロケットの状態変化にともなって特性が変化した。とくに高度35~65kmでのロケットエンジン燃焼にともなうVSWR悪化は顕著で、この影響には機体振動によるものも含まれ、M-3H-3号機で認められる53~63秒のVSWR悪化は約10Gの機体振動によるものと解釈される。しかし、M-3C-4、M-3H-1号機における第2段エンジン燃焼中のVSWR変化の高周波成分については振動計測結果とつき合せても関連が少なく、これらはL-3H-8号機の第2段エンジン燃焼中のVSWR変化とともに火焰の影響によって生ずるものと推定される。この効果の起る高度が35~65kmであることはロケット打上げに対するeventsを決定する際に

重視すべき事項である。この効果は従来より注目して来た高度 50 km 前後で起るエンジン燃焼中の受信レベル低下に対し、火焰による電波の散乱・減衰効果のほかにアンテナの VSWR 悪化も相乗されていることが判明した。受信レベルの低下は UHF 帯アンテナの VSWR 測定結果も考え合せ、エンジン燃焼中アンテナが正常動作をしていても火焰の影になるために生ずる電波の散乱、減衰効果によって大きく影響される。

現在の3段式ロケットにおいて、第1段エンジン燃焼にともなう受信レベル低下も認められるが、ロケットと地上局との距離が近いため問題は生じていない。第2段エンジン燃焼にともなう受信レベルの低下はロケット飛しょうシーケンスから重要視すべき事項であり、その点火時期（あるいは高度）は慎重に決定されるべきである。第3段エンジン燃焼に対する影響も考慮されるべきであるが、本文で取上げたアンテナが2段目搭載のものであるので対象が異なる。この事については別に計測を試みたい。ロケットの進行方向に垂直な方向に噴射されるスピンモータによる影響はその噴射方向の理由から受信レベルに影響を与えやすい。とくに高度 42 km で燃焼した M-3D-1 号機のスピンモータは、VHF 帯テレメータ受信機のスレシホールドレベルをわる影響を与えた。しかし、現在の M-型ロケットにおけるシーケンスではスピンモータの作動は 250 km 以上であってその影響はほとんど認められない。

以上の実験結果を総合して、現在使用している UHF 帯テレメータアンテナは非常に安定した特性を有し、ロケット飛しょうにともなう温度、振動等の影響などを受けにくいすぐれたアンテナであると言える。VHF 帯テレメータアンテナは温度、衝撃、振動等の影響は受けるが重大な影響は受けておらず、小型・軽量・単純、全方向放射特性の利点からロケット搭載に適したアンテナと言えよう。また、現在の M-型ロケットの飛しょうシーケンスはこれらロケットエンジン燃焼中の火焰の影響を比較的受けにくい events が組まれていると結論できる。

## 謝 辞

VSWR 測定器の製作に、データの収集にご尽力いただいた日本電気株式会社の関係各位に深謝する。また、データ取得にご協力をいただいたテレメータ班の方々に厚く御礼申し上げます。

1980年4月15日 新設部（工学）

## 参 考 文 献

- [1] 林, 長谷部, "ロケット実験における電波障害" 宇宙航行の力学シンポジウム, 昭和 45, 東大宇宙研, p 37-40.
- [2] 林, 長谷部, "ロケットエンジン燃焼中のレベル低下について" 昭和 46, 信学全国大会, 236.
- [3] R. W. P. King, C. W. Harrison, "Antennas and Waves: A Modern Approach" ch. 6, 6. 7, p. 437. M. I. T. Press, 1969.