

M-V型ロケットのレーダ追跡

廣澤春任, 鎌田幸男, 斎藤宏文
水野貴秀, 豊留法文, 山田三男, 市川 満

1. 概 要

M-V型ロケット打ち上げにおけるレーダ追跡は従来からのレーダ系冗長化の方針を踏襲している。M-V型ロケット初号機では第3段ペイロード部(B3-PL部)に5.6GHz帯(Cバンド)のレーダ・トランスポンダ(以後RTと略記)を, 第2段ペイロード部(B2-PL部)には1.6GHz帯のRTを搭載した。地上系は新設のCバンド系「新精測レーダ」[1,2]と既設のLバンド系3.6mレーダであった。この初号機の追跡において, Lバンド系の電波のロケット燃焼ガスによる減衰が予想した以上に大きいことが判明した。そこで, 2号機以降では, Lバンド3.6mレーダによる追跡を取り止め, B2-PL部には1.6GHz帯RTに置き換えて5.6GHz帯RTを搭載し, これを既存の「精測レーダ」で追跡することとした。2号機以降の2回の打ち上げ, すなわちM-V-3号機とM-V-4号機の打ち上げにおけるレーダ追跡はこの形で行われ, 結果は良好であった。これにより, M-V型ロケットのレーダ系は確立したものと考えている。

ロケットに5.6GHz帯RTを二台搭載するに当たっては, それぞれの追跡が独立に, かつ干渉が無いように行われる必要がある。搭載トランスポンダに関しては, 識別パルス間隔を互いに異ならせ, B3-PL部RTの $3\mu\text{s}$ に対して, B2-PL部搭載のものを $5\mu\text{s}$ とした。また, 地上の二つのレーダの送信タイミングを π 相(逆相)同期とした。

「新精測レーダ」は1996年度に完成したものであるが, 従来の「精測レーダ」に比較して大幅な性能改善が図られている[1,2]。また, 「精測レーダ」に関しても, レーダ計算機システムの更新を行うなど, 必要な手当を施して使用している。

レーダコマンドに関しては, コマンドデコーダ(5.6DEC)を小型軽量化した。これをB3-PL部に搭載している。またM-V型ロケットでは新たに保安コマンド信号の送出機能が追加されている。

本文では, M-V型ロケットのレーダ追跡に関して, 地上装置と搭載機器の概要, ならびにM-V-1号機, M-V-3号機およびM-V-4号機の追跡結果について述べる。

2. 地上装置

M-3SII型ロケット追跡用のレーダ地上装置からの大きな変更点は, M-V型ロケットのブルームによる電波減衰の増大に対応して新精測レーダが新設されたことである。

新精測レーダの主要性能を表1に示す[1]。表の項目のうち, 送受信周波数, コマンドコード列, 二次レー

ダの送信パルス幅等多くの要素は従来行ってきたロケット追尾運用形式 [3] を踏襲し、250pps/267pps 自動切り替えによる連続距離追尾、ロケット誘導コマンド (3 out of 6 コード) の送信とコマンドアンサバック信号の PPM 復調などの運用機能を保持している。

一方、主に以下の点について改良および機能付加を行い、性能改善と運用の高機能化を図った。

- ① アンテナ系の大型化
- ② IF 信号以降の信号処理の完全デジタル化、整合フィルタ構成による S/N 比改善
- ③ 送信装置の冗長構成 (クライストロン, TWT 使用)
- ④ 一次レーダにおける長パルス送信・パルス圧縮の導入
- ⑤ Ku 帯 TV テレメータのアンテナ共用化
- ⑥ ターゲットの自動補足機能
- ⑦ 擬似補足防止機能
- ⑧ 計算機による機器監視制御および自動点検校正機能

これらにより、既設精測レーダよりも二次レーダの回線マージンを約10dB 改善した。また一次レーダモードにおいては、パルス圧縮技法を導入して、長パルス送信により、距離分解能を損なうことなく探知距離の大幅な拡大を実現している。

新精測レーダのシステム構成図を図1に示す。アンテナ、運用管制コンソール、送信装置、受信・測距装置、データ処理装置、時刻装置、コマンドコンバータ、光伝送装置等から構成されている。送信装置はクライストロンと TWT の2系統から成り冗長性を持っている。

アンテナは開口径7mφのカセグレンアンテナで、C帯(5GHz帯)の高精度レーダとしての機能に加え、ロケットからの画像データ等取得のためのKu帯(14GHz帯)信号を受信する機能を共用したC帯/Ku帯ホーン(C帯4ホーン及びKu帯角錐ホーン)を組み込んでいる。アンテナ主反射鏡の骨組等にはCFRP材を使用し、日射による変形を抑えることにより、0.05mil rms (0.003° rms)の高測角精度を実現した。さらに、目標物の補足を確実にを行うために、送信/受信用の各捕捉アンテナを装備しており、送信用にはホーンリフレクタアンテナを、受信用はアレーアンテナを採用している。図2～図4に、アンテナ、運用管制コンソール、受信測距装置の外観写真をそれぞれ示す。

レーダ系データのおおまかな流れは、図5の全系局間インタフェース系統図に示してある。

ロケット打ち上げ時の各アンテナ設備に対する角度スレーブ信号は、従来コントロールセンタ設置の計算機(ACOS)より分配されていたが、M-V-1号機からは新精測レーダのスレーブ出力処理装置から直接各アンテナへ、設置点の座標に変換された角度データが送出されている。これらの信号の授受は全て光モデムを介して行われる。精測レーダのスレーブデータは新精測レーダのみに出力されており、新旧精測レーダは互いをバックアップする体制をとっている。また、精測レーダの追跡データもコントロールセンタに送られ、RG班の軌道表示画面に取り込まれている。精測レーダ、3.6mレーダの性能については文献[3]を参照されたい。

表1 新精測レーダに関する主なパラメータと性能

周波数	二次レーダモード (BEACONモード) 送信 5586MHz, 受信 5636MHz 一次レーダモード (SKINモード) 送信 5636MHz, 受信 5636MHz
パルス繰返し周期	250PPS, 267.6/7PPS 25PPS (1009 μ s ¹ 時)
送信パルス幅	BEACONモード 0.35 μ s (I,Rダブルパルス) 電波誘導時はSパルス付き3アウトオブ6コード ² が加わる SKINモード 1 μ s (シングルパルス) 20 μ s (圧縮コード付きパルス) 1009 μ s (圧縮コード付きパルス)
送信出力	1000kW (クライストロン) / 200kW (TWT)
最小追尾レベル	BEACONモード -106dBm SKINモード (1 μ s) -106dBm (20 μ s) -119dBm (1009 μ s) -133dBm
測距精度	2m rms
測距分解能	約0.61m
測距可能範囲	約0.01~56ms (1.5~8,394km)
最大測距速度	15km/s
最大測距加速度	25km/s ²
アンテナ直径	主アンテナ 7m ϕ (カセグレン) 捕捉アンテナ 送信 0.5m ϕ (ホーン) 受信 0.9m ϕ (アレイ)
マウント形式	AZ, EL方式
追尾方式	振幅比較4ホーンモノパルス方式
総合静止精度	測角精度 0.05mil (約0.003 $^{\circ}$)rms
最大角速度	AZ 10 $^{\circ}$ /s, EL 10 $^{\circ}$ /s
最大角加速度	AZ 20 $^{\circ}$ /s ² , EL 20 $^{\circ}$ /s ²
アンテナ利得	主アンテナ 送信 48.7dBi, 受信 48.2dBi 捕捉アンテナ 送信 27.9dBi, 受信 29.2dBi
耐風性	精密追尾 瞬間最大 15m/s以下 固定位置への駆動 瞬間最大 35m/s以下 固定位置格納時 瞬間最大 90m/s以下
Ku帯テレメトリ	周波数 14,860MHz アンテナ利得 53.8dBi

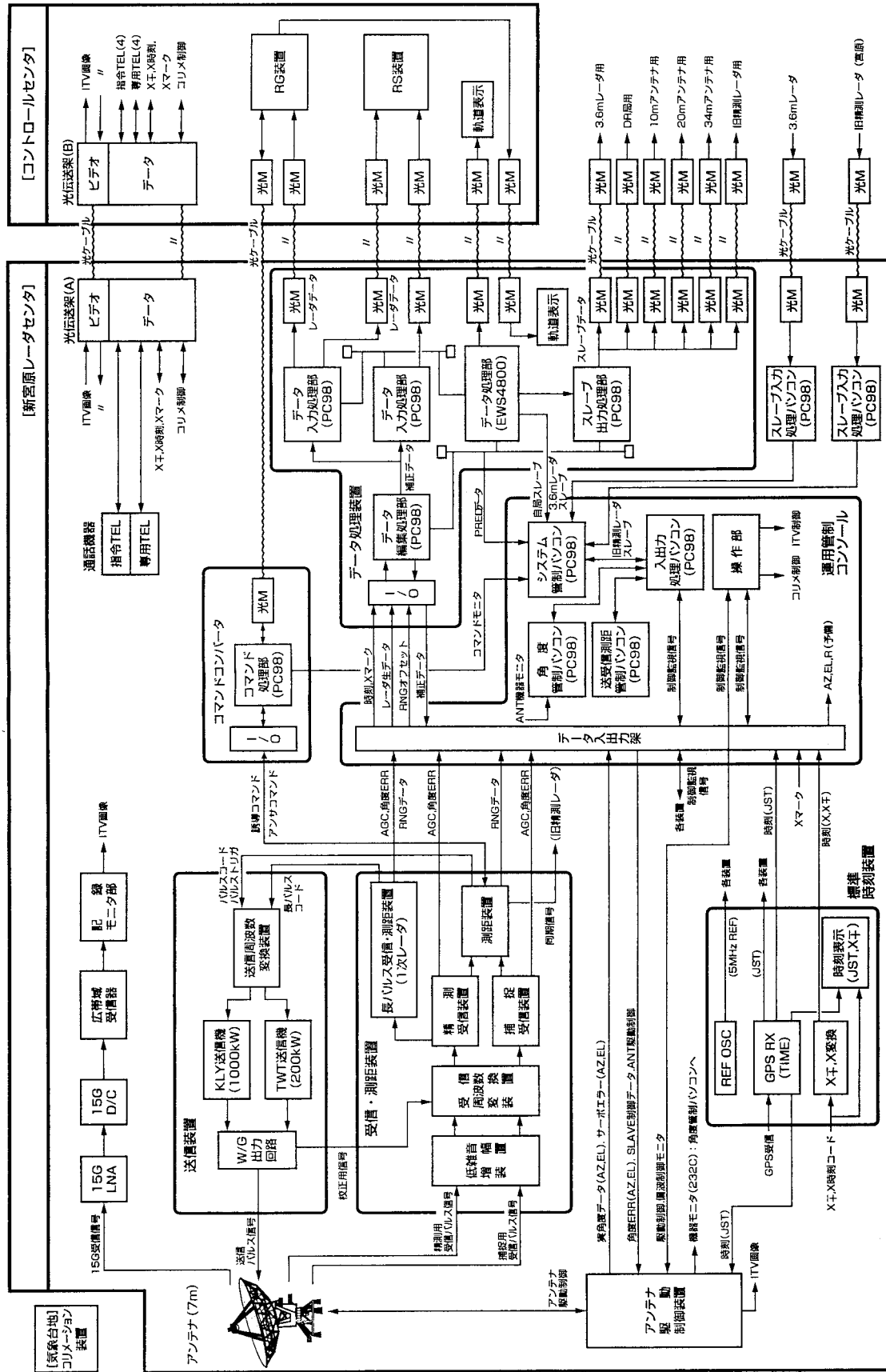


図1 新精測レーザーシステム構成図



図2 新精測レーダアンテナ外観写真



図3 新精測レーダ運用管制コンソール外観写真

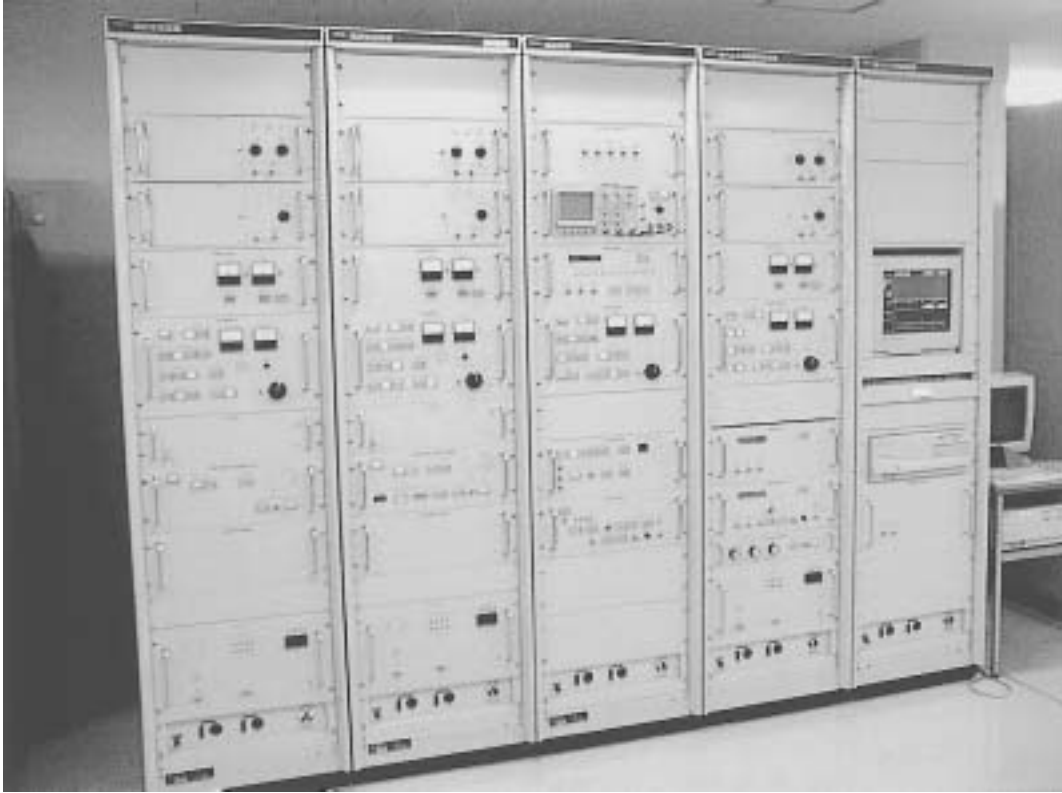


図4 新精測レーダ受信測距系装置外観写真

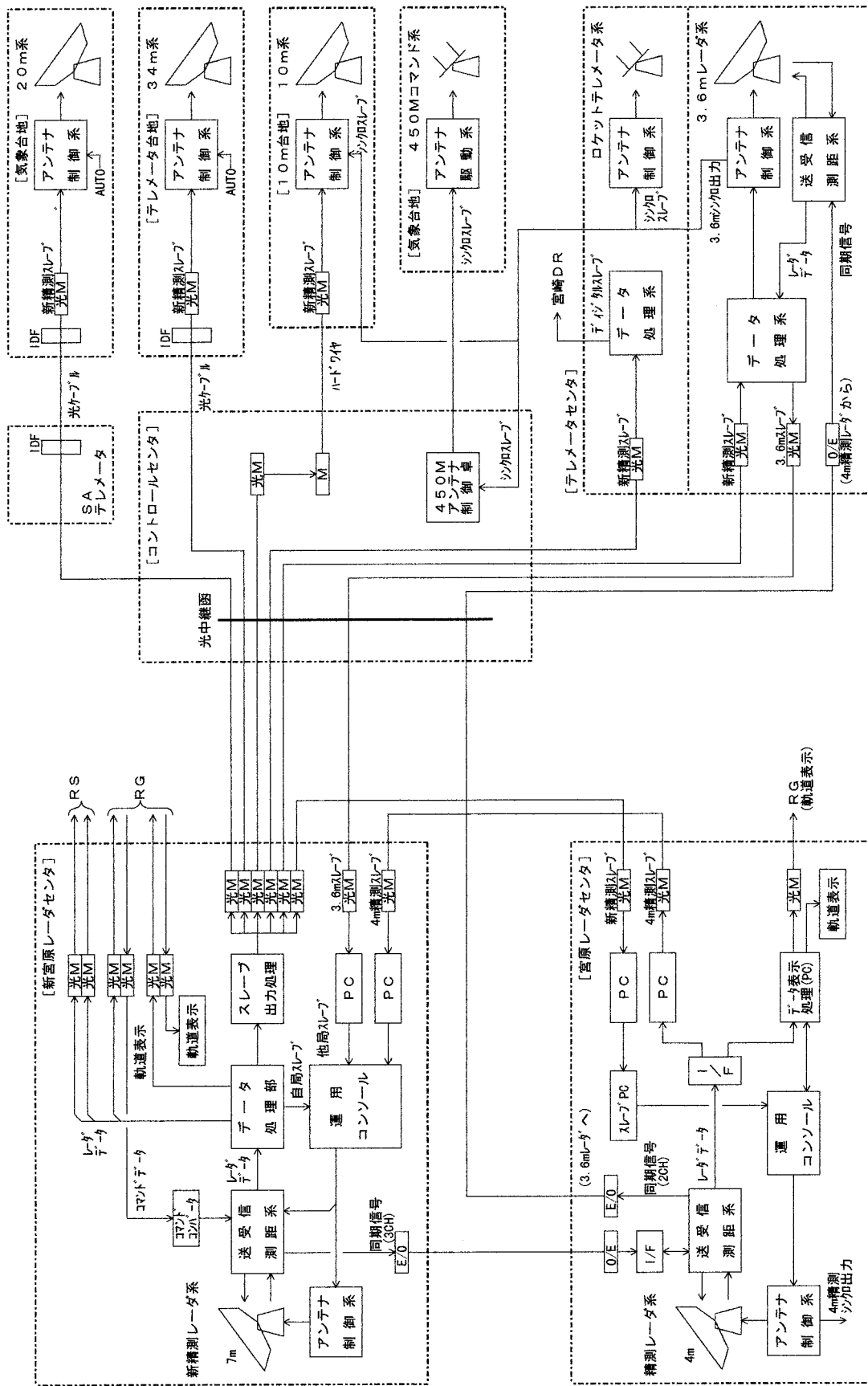


図5 全系局間インタフェース系統図

3. 搭載機器

3.1. 1.6RT 系搭載機器

M-V-1号機に搭載された1.6GHz帯レーダの搭載機器は、レーダトランスポンダ(1.6RT)、送受分波器、及びアンテナ等から構成されている。1.6RT搭載系統図を図6に、1.6RT主要性能を表2にそれぞれ示す。M-V-1号機でのプルームによる電波減衰が予想以上に大きかったため、2号機からはこの搭載を止め、5.6GHz帯のトランスポンダに変更した。

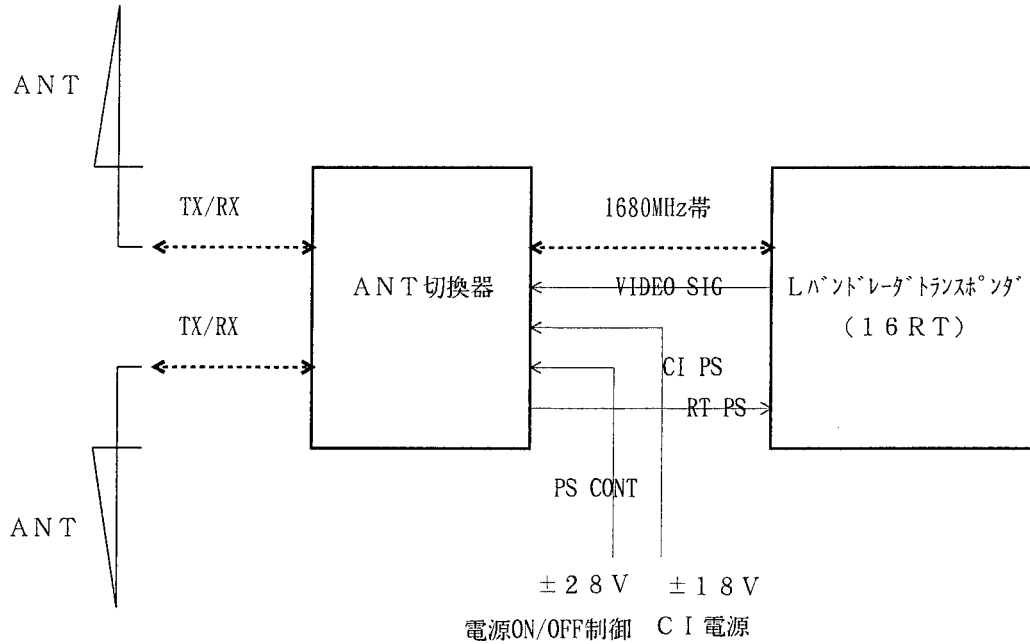


図6 B2-1.6RT システム系統図

表2 1.6RT 主要性能

受信周波数	1687 ± 2MHz
受信感度	-70dBm以下
中間周波数	30MHz
中間周波バンド幅	2.5MHz
送信周波数	1673 ± 2MHz
送信出力	100W
送信パルス幅	1.0 ± 0.2 μ S
自送パルス繰り返し周波数	180 ~ 220Hz
同期パルス繰り返し周波数	250, 267 6/7Hz
電源電圧	+18 ± 4V
重量	2.3kg

3.2. 5.6RT系搭載機器

3.2.1. B2 PL部搭載5.6RT系

M-V-3号機と4号機では、従来のM型ロケットに搭載してきた5.6RTと同様のトランスポンダをB2 PL部に搭載した。アンテナ系に二素子逆相給電方式を採用し、アンテナ素子にはロケット後方に優れた放射特性を有する誘電体装荷導波管アンテナを用いた。システム系統図を図7に示す。この5.6RTでは、基本性能は従来の基本性能をほぼ踏襲し、B3 PL部搭載の5.6RTとの識別が可能となるように、識別パルス間隔を従来の $3\mu\text{s}$ から $5\mu\text{s}$ に変更し、さらにフリーランを無くしている。

B2-5.6RTの主要性能を表3に、外観図を図8に示す。

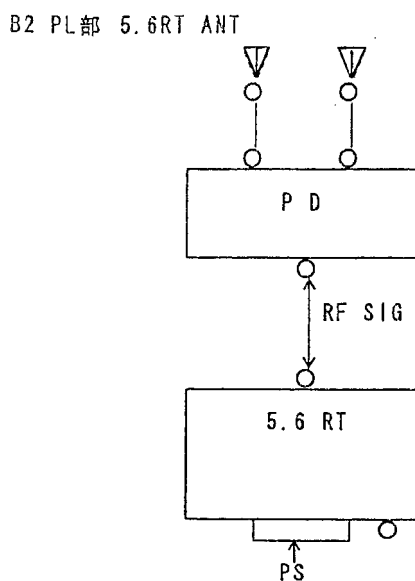


図7 B2-5.6RTシステム系統図

表3 B2-5.6RT主要性能

受信周波数	$5586 \pm 3\text{MHz}$
受信感度	-70dBm以下
識別パルス間隔	$5 \pm 0.15\mu\text{sec}$
受信帯域幅	$11 \pm 3\text{MHz}$
送信周波数	$5636 \pm 3\text{MHz}$
送信出力	500W
送信パルス幅	$0.9 \pm 0.1\mu\text{sec}$
自送パルス繰り返し周波数	
同期パルス繰り返し周波数	250, 267 6/7Hz
固定遅延時間	$2.5 \pm 0.1\mu\text{sec}$
電源電圧	$+18 \pm 4\text{V}$
重量	2.7kg

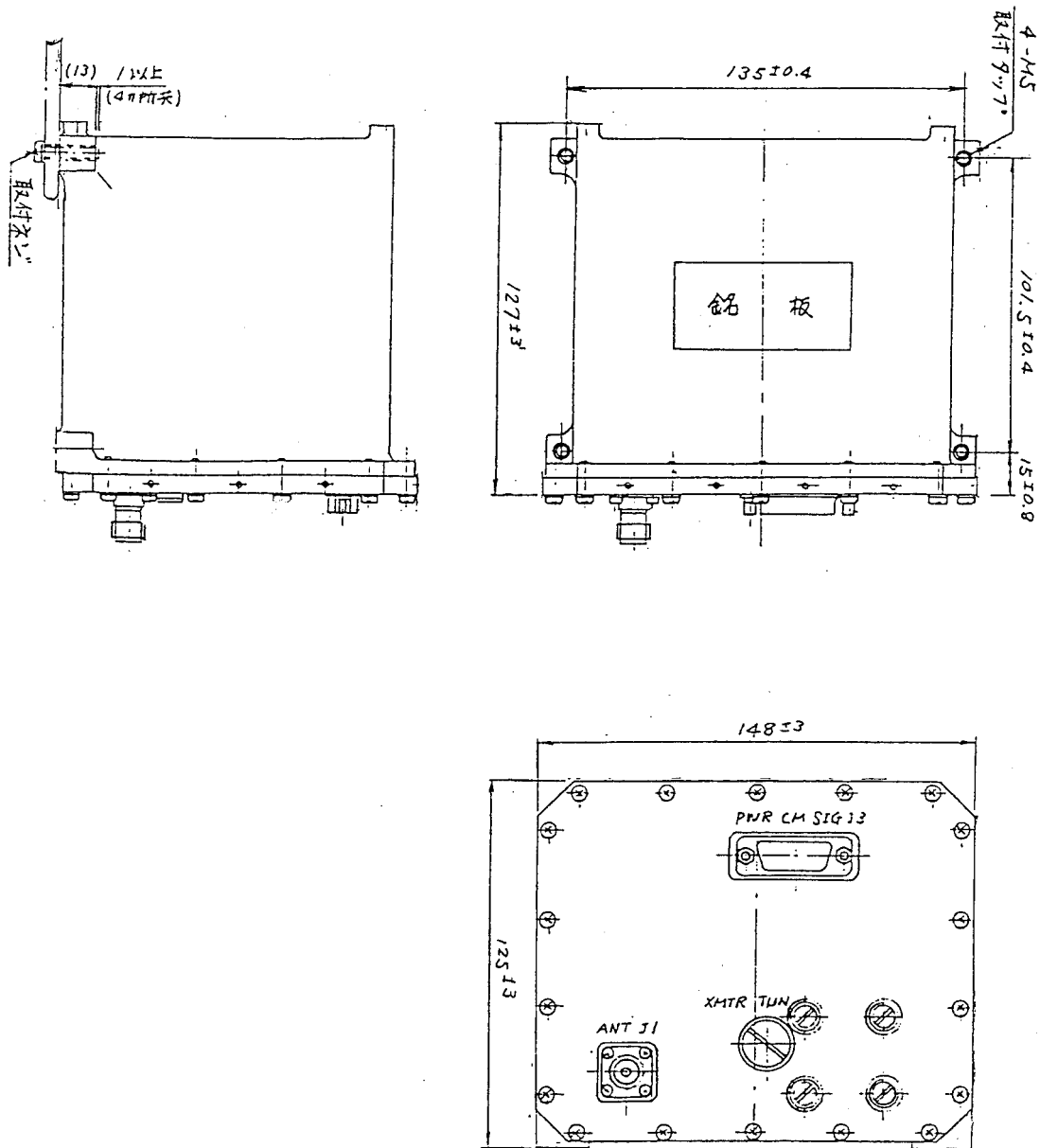


図8 B2-5.6RT 外觀図

3.2.2. B3 PL 部搭載5.6RT 系

M-3SIIのB2PL部に搭載されていた機器構成と同様であるが、大きな変更点としてコマンドデコーダを小型軽量化したと保安コマンドの機能を追加したことがある。システム系統図を図9に示す。

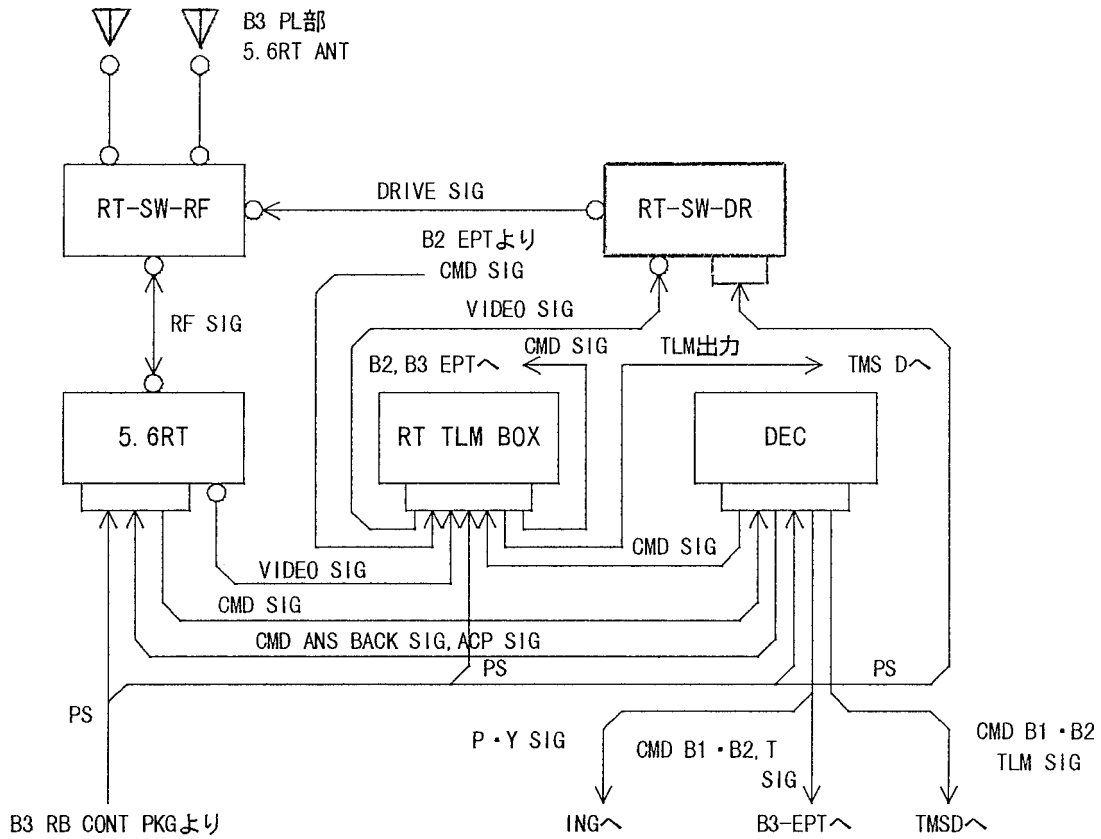


図9 B3-5.6RT システム系統図

3.2.2-1 B3-5.6RT

5.6RTは、高精度なロケットの追跡及び精密な飛翔経路の標定を目的として、地上局の新精測レーダ及び精測レーダとの間で同期信号を送受信する。更に、新精測レーダから送出された電波誘導及び保安コマンド列のコード信号を受信してコマンドデコーダに送出し、コマンドデコーダからのアンサーバック信号を受けてレンジパルスと共にアンサーバックパルスを送信する。RTの主要性能を表4に示す。外観図は図8のB2-5.6RTと同様であるので省略する。

表4 B3-5.6RT 主要性能

受信周波数	5586 ± 3MHz
受信感度	-70dBm以下
識別パルス間隔	3 ± 0.15 μ sec
受信帯域幅	11 ± 3MHz
送信周波数	5636 ± 3MHz
送信出力	500W
送信パルス幅	0.9 ± 0.1 μ sec
自送パルス繰り返し周波数	210 ± 10Hz
同期パルス繰り返し周波数	250, 267 6/7Hz
固定遅延時間	2.5 ± 0.1 μ sec
電源電圧	+18 ± 4V
重量	2.7kg

3.2.2-2 5.6DEC

前述したように5.6DECについては、M-V-1号機から、回路の集積度を上げ小型軽量化を図った。従来のデコーダは、TTL-ICを中心とした回路構成となっており、PWB4枚構成の規模であった。この装置の小型化にあたり全ての機能ブロック構成を再検討した。集積化方法の代表的な回路構成デバイスとしては、マルチチップモジュール、ゲートアレイ、FPGA (Field Programable Gate Arrays) があげられる。これらについて検討を行い、部品の集積度、開発コスト、信頼性等をトレードオフした結果FPGAを採用した。FPGAにも紫外線消去型、SRAM型、ヒューズ型のものがあるが、本装置に対しては高信頼性が不可欠であることから、ヒューズ式のFPGAを用いた。従来品からの主な変更点を以下に挙げる。

①小型化

回路の集積化による小型化を行った。

回路基板の構成 4枚→2枚

装置の外形寸法 (mm) 150×120×53.5→150×120×30

②軽量化

1.2kg→0.5kg

③低電力化

消費電流 Dummy出力時 550mA→100mA

保安コマンド出力時 600mA→150mA

④保安用コマンド出力の追加

ナンバーコマンドの組み合わせにより、保安用コマンドを出力する。

B3-EPT-STOP (2⁰, 2¹) 2連続, NA3連続で出力。

B3-SO (2³, 2⁴) 2連続, NA3連続で出力。

また、単一故障によるコマンドの誤出力を防止するために、論理回路以降フォトカプラ出力までの系統を冗長構成とした。

⑤テレメータ出力の追加

保安用コマンド出力時のテレメータ出力を追加した。

⑥塗装色の変更

B 3 PL 部に搭載されるため、熱解析の結果から白色塗装とした。

(塗料：ケミグレース Z202)

4. 追跡結果

M-V-1 号機, 3 号機, 4 号機のレーダ追跡結果について概要を以下に示す。

①M-V-1 号機

3.6m レーダは, AZ109°, EL55° の角度において待ち受け, X+16.7秒に予定通り自動追跡に入りロックオンした。図10に示す受信レベルに見るように, B 2 点火前は, 搭載アンテナの利得増加の効果により, 受信レベルは従来に比べ約10dB 増大している。しかし, B 2 点火後はプルームにより想定していた以上の電波減衰(40~60dB) を受けロックオフしたため, X+75.9秒から新精測レーダにスレーブした。B 2 燃焼終了後は受信レベルが回復し, X+173.3秒に再ロックオンしている。

新精測レーダと精測レーダは, X+3 秒前後で待ち受けて予定通り自動追跡に入りロックオンした。その後 X+474秒に消感するまで自動追跡を続行することができている。新精測レーダの受信レベルを図11に, 精測レーダの受信レベルを図12にそれぞれ示す。受信状況はおおむね良好であったが, B 2 点火以降は予想通りの電波減衰が生じており, FIH (Fine-in-the-Hole) 時に約45dB, 燃焼終了直前の X+150秒頃に約40dB の減衰が生じた。

図11に見るように新精測レーダの受信レベルには, ロックオン直後の X+12.3秒から X+22.2秒の間, 大きなレベル低下が生じている。これは送信波の漏れ込みにより LNA が飽和状態となり, LNA のリカバリータイムが予想以上に長かったために和系のレベルが低下したためであった。新精測レーダにおいては, この対策として, ダイオードスイッチの入力にアイソレータを挿入し, 送受のアイソレーションを30dB 以上確保した。さらに仮に漏れ込みが大きくなった場合にも受信ゲート内では影響が出ないように, LNA のリカバリータイムを数 μ s に短くする改修を行った。

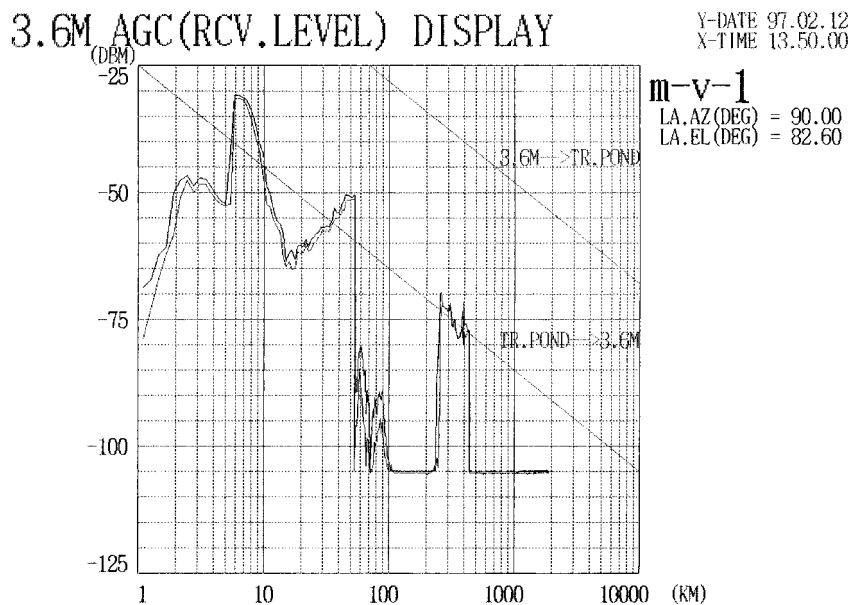


図10 M-V-1 3.6m 受信レベル

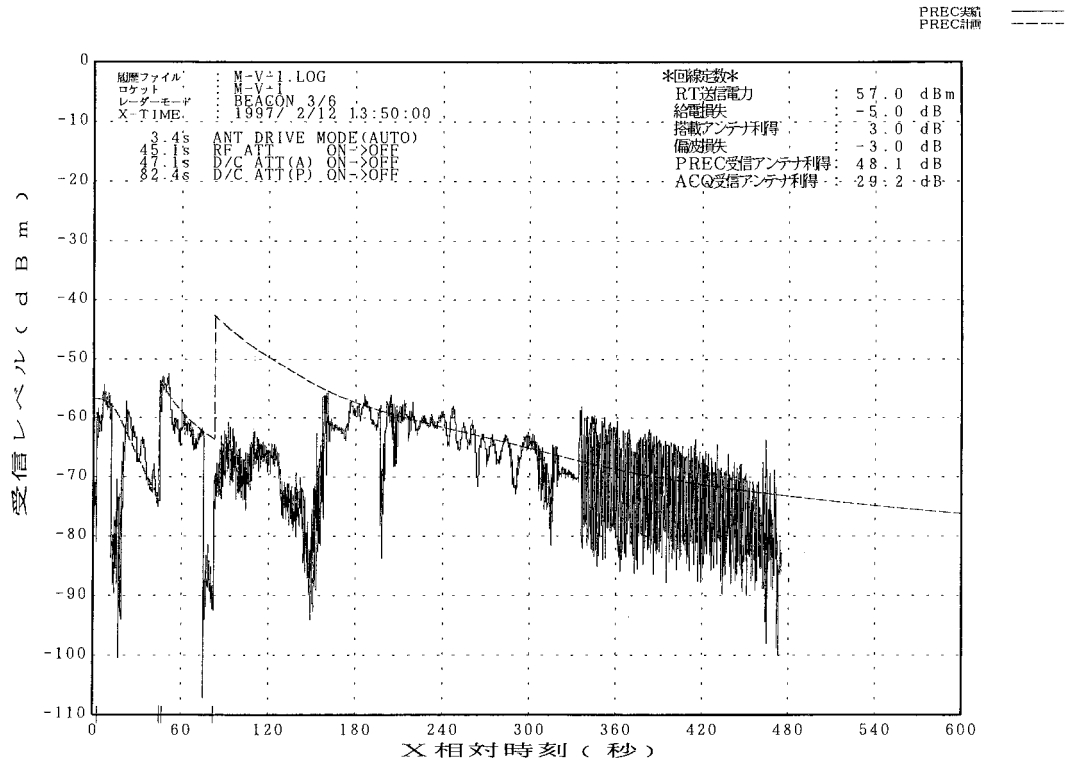


図11 M-V-1 新精測レーダ受信レベル

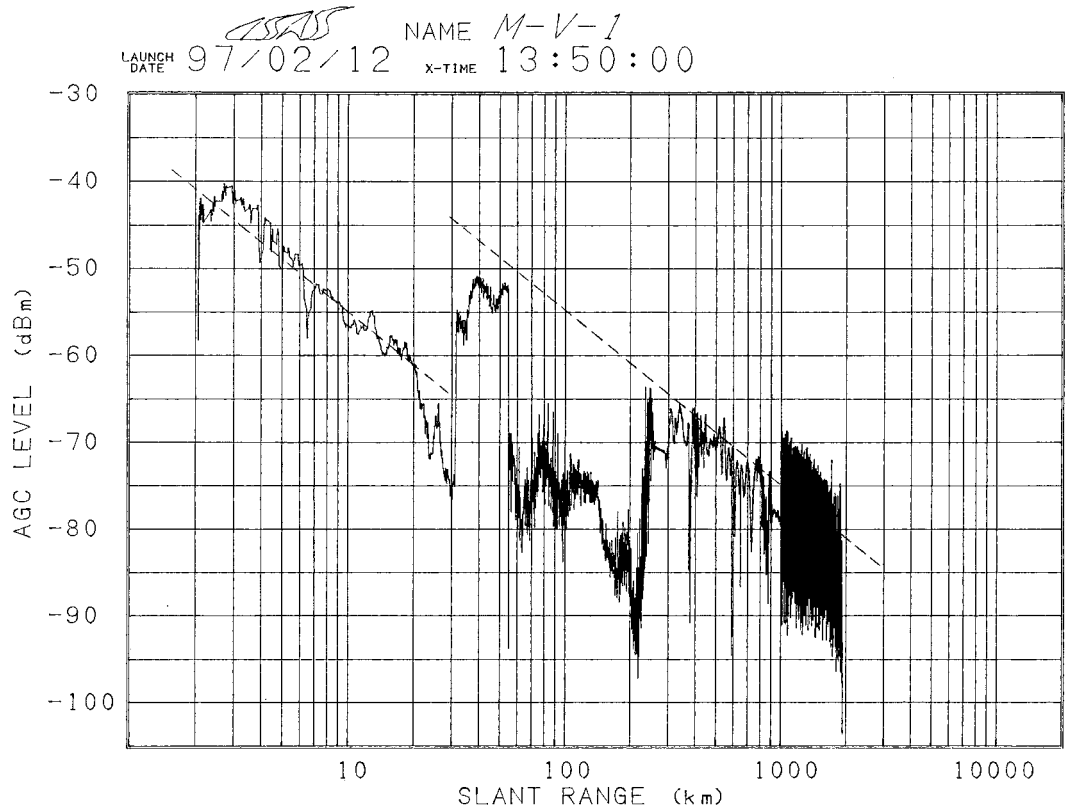


図12 M-V-1 精測レーダ受信レベル

②M-V-3号機

新精測レーダと精測レーダは、X+3秒に待ち受けて予定通り自動追跡に入りロックオンした。精測レーダはB2-PL部に搭載されたB2-5.6RTをX+203秒まで追跡し、それ以降は送信を行わず新精測レーダの送信タイミングと同相に同期を取り、B3-PL部のB3-5.6RTを受信モードで追跡した。図13と図14に新精測レーダと精測レーダの受信レベルを示す。

これらに示す様に追跡は非常に順調に行われ、受信レベルも十分であったが、B2点火以降の燃焼ガスによる電波減衰が1号機の時よりも大きく現れている。さらに、その後のB3燃焼中、1号機では電波減衰はほとんど現れなかったのに対し、3号機では予想以上に大きな減衰が生じている。新精測レーダではX+264秒からレベルが徐々に低下しだし、X+288秒から著しく低下、自動追跡が不安定なレベルにまで達したため、コンピュータスレーブに投入した。アンテナのボアサイト赤外線カメラにはB3燃焼中の炎が映し出されており、コンピュータスレーブ以降もロケットはカメラ画像のほぼ中央に捕らえられていた。B3燃焼終了間際のX+317.6秒に受信レベルは急激に上昇し、X+318.5秒にコンピュータスレーブから自動追跡に復帰した。

このB3燃焼中の大きなレベル減衰はロケットのルックアングルに関係している。ルックアングルは、1号機では25°であったが、3号機では18°以下になっていた。燃焼ガス密度の濃い中心部を電波が透過したために、減衰量が大きくなったと考えられる。

この電波減衰に対する次号機およびそれ以降への対策として、搭載アンテナのロケット後方の指向性を従来のアンテナよりも約5dB増大させた。さらにB3点火後ロール角制御によりアンテナパターン最大方向を地上局に向けるという対策を講じることとした。これにより従来に比べて約10dB以上の利得増加が得られることとなる。

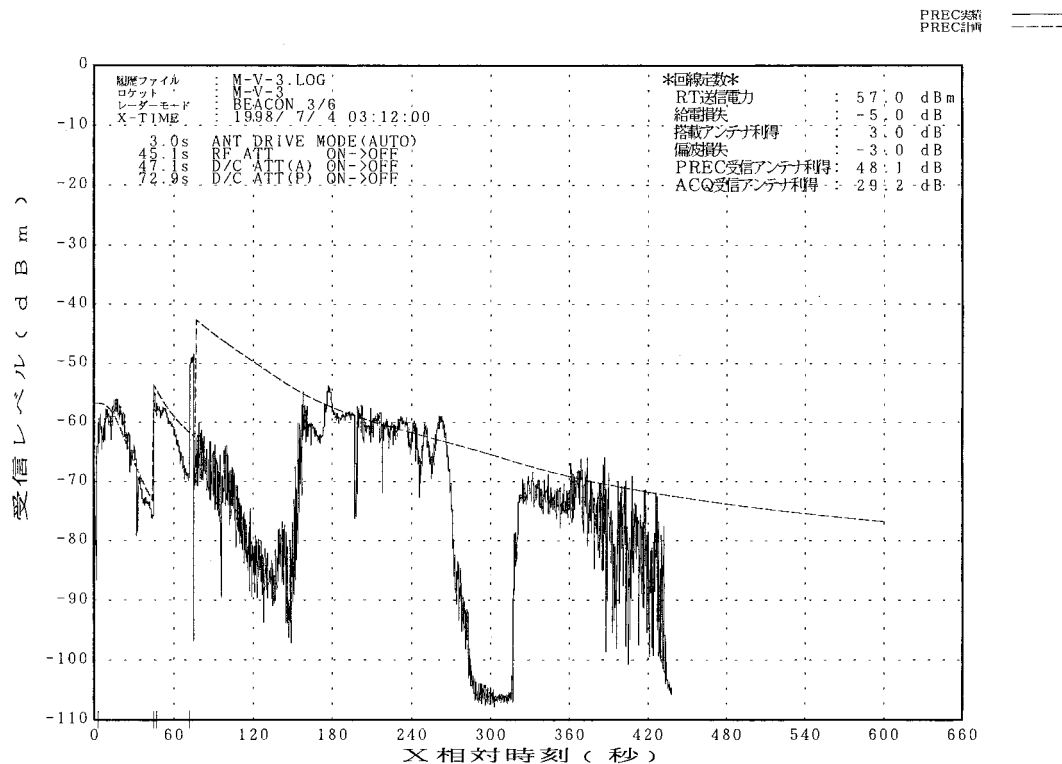


図13 M-V-3 新精測レーダ受信レベル

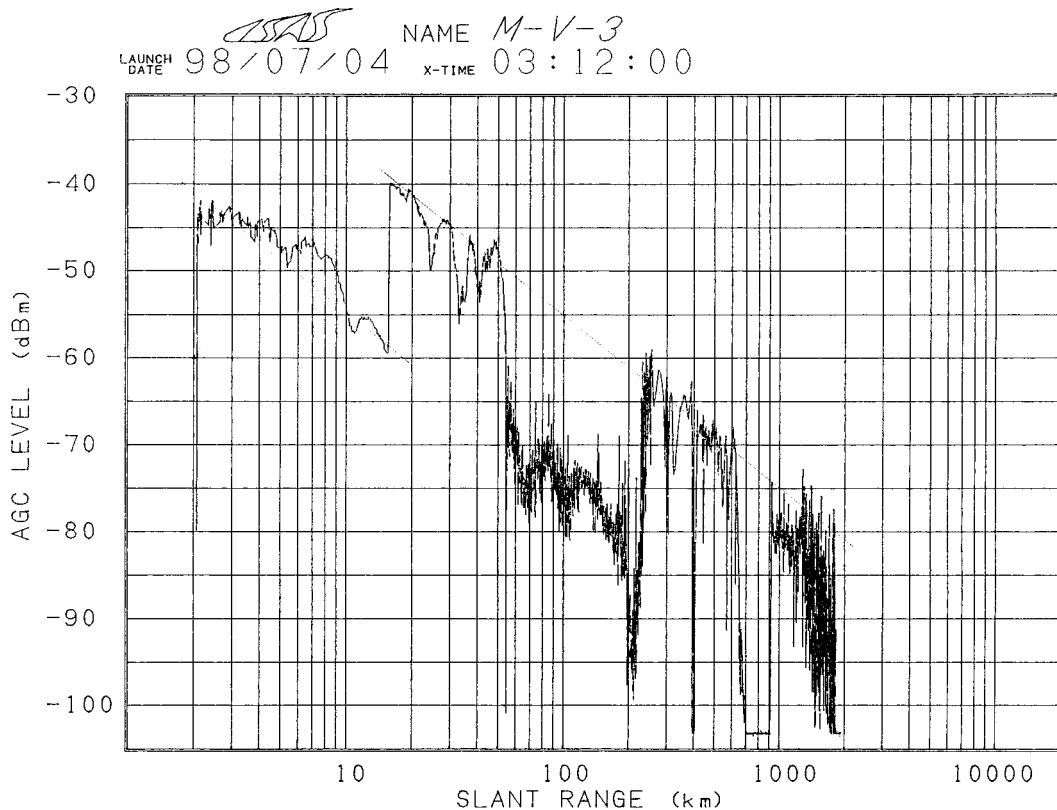


図14 M-V-3 精測レーダ受信レベル

③M-V-4号機

新精測レーダはX+3.3秒に、精測レーダはX+5.1秒に待ち受けて自動追跡に入りロックオンした。その後両局は順調に追跡を行い、精測レーダは3号機と同様に2段目が分離される前のX+201秒に同期装置を同相モードに移行し、B3-5.6RTを受信モードで追跡した。

この切替操作も非常にスムーズに行われ、X+208秒に3段目の追跡を開始した。新精測レーダと精測レーダの受信レベルを図15、図16にそれぞれ示す。X+58秒からの急激なレベル変動はロケットの姿勢が大きく変化したためである。X+197秒のNF開頭時にアンテナの切替（カップリングアンテナ引抜）が行われ、鋭い切れ込みが有った後、新しく開発搭載したB3-5.6RTアンテナによる利得の増加と、アンテナパターンの最大方向を地上局に指向させるための姿勢角変更（ロール90°回転）により利得が増大し、搭載アンテナゲインとして最大+15dBiを記録した。これは期待通りの結果であるといえる。3号機で問題のあったB3モータのブルームによる電波減衰は、ルックアングルが30°と大きかったため小さく、減衰量は5dB~10dB程度であった。これらのことからB3燃焼中の受信レベルは非常に高く、特に新精測レーダでは、約50dB近いマージンがあった。その後、X+360秒のロケット姿勢反転により、アンテナパターンの関係から受信レベルは低下するが、X+432秒の消感時まで受信できている。

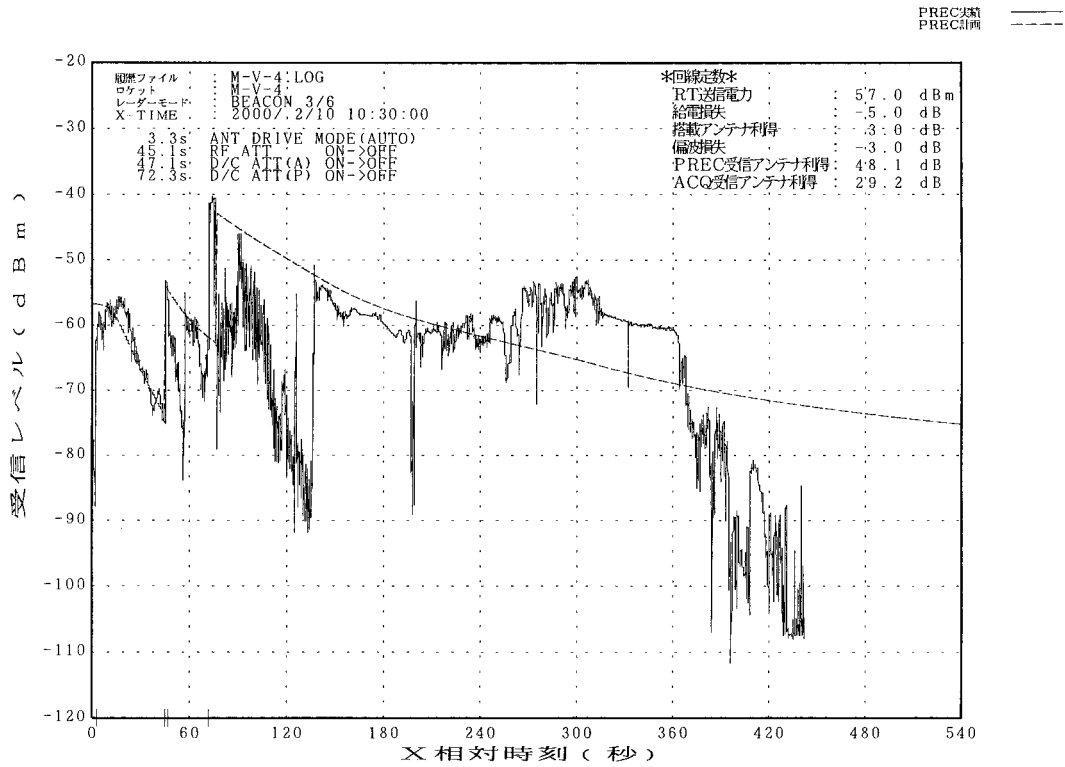


図15 M-V-4 新精測レーダ受信レベル

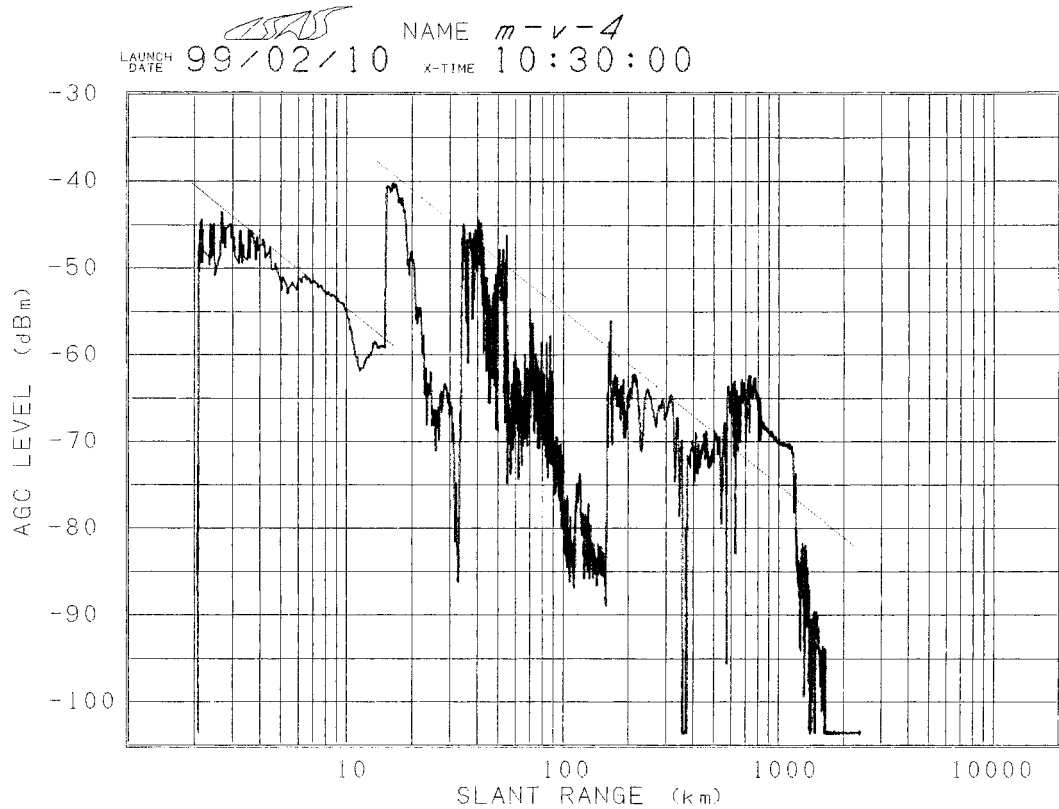


図16 M-V-4 精測レーダ受信レベル

5. 飛翔軌跡

M-V-1号機, 3号機, 4号機の新精測レーダによって得られた飛翔軌跡を図17~図22までにそれぞれ示す. 1号機と3号機はほぼノミナル軌道を飛翔しており, 補正軌道制御量も極めて少ないものであった. M-V-4号機はX+100秒前後でピッチ角で約1.5°上昇し, ヨー角が約1°南側にずれて飛翔した. この後, 二段モータによる姿勢制御によりピッチを下げて飛翔していることが分かる.

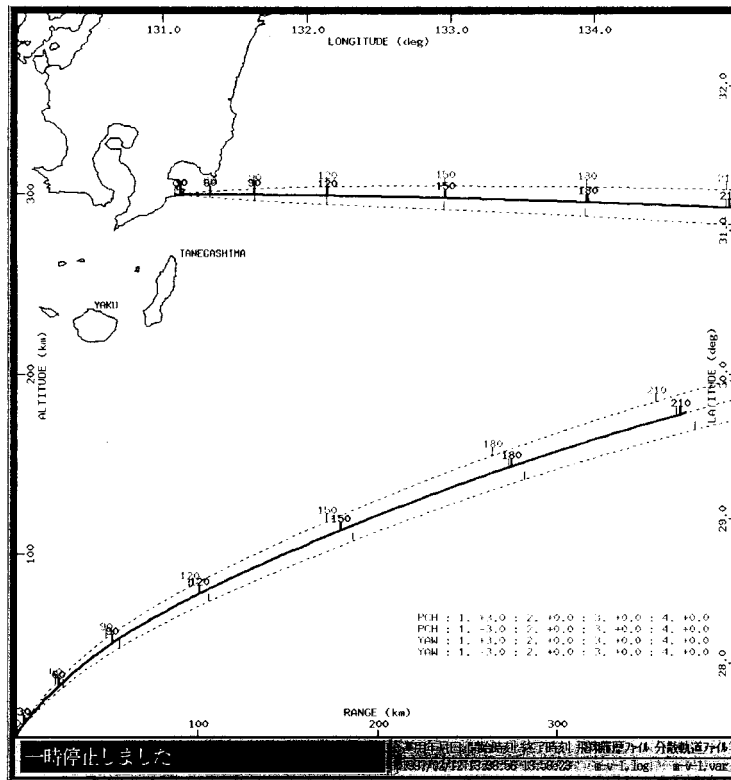


図17 M-V-1 飛翔軌跡 (X+210s)

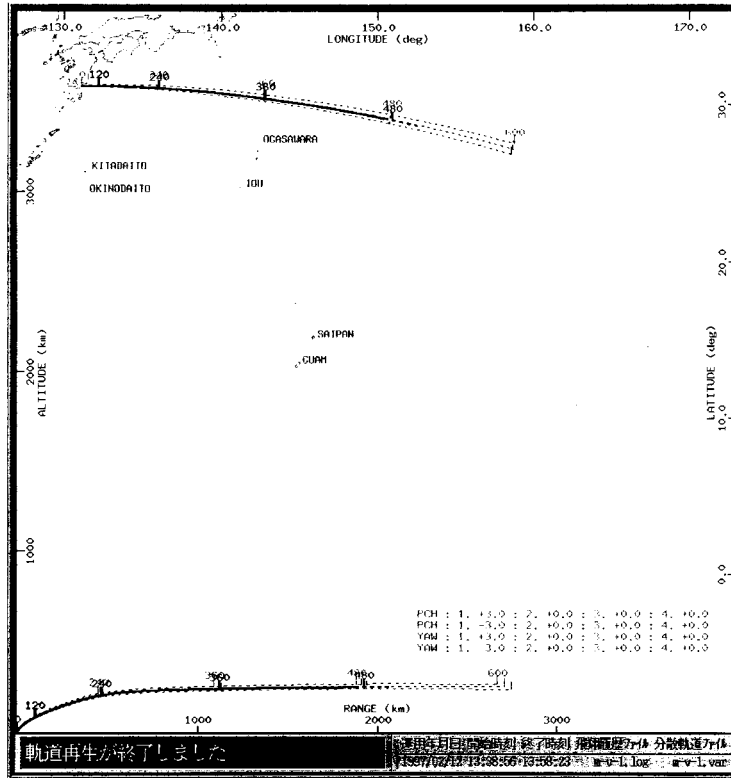


図18 M-V-1 飛翔軌跡 (X+480s)

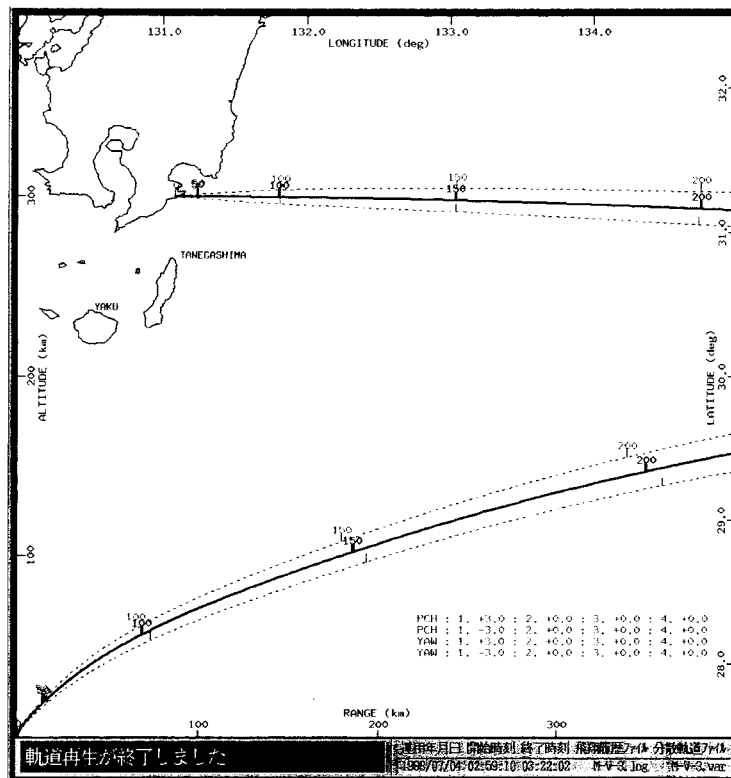


図19 M-V-3 飛翔軌跡 (X+210s)

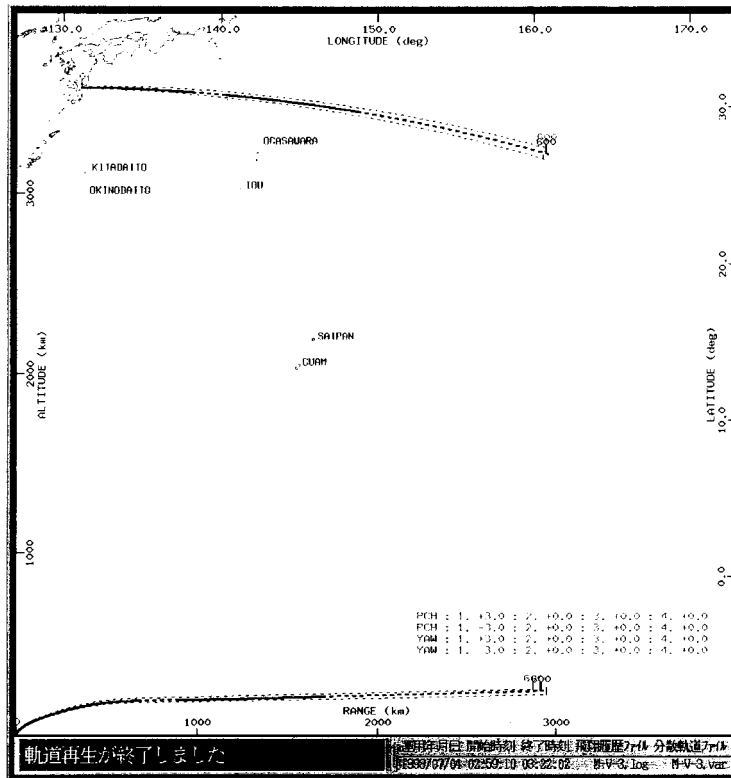


図20 M-V-3 飛翔軌跡 (X+430s)

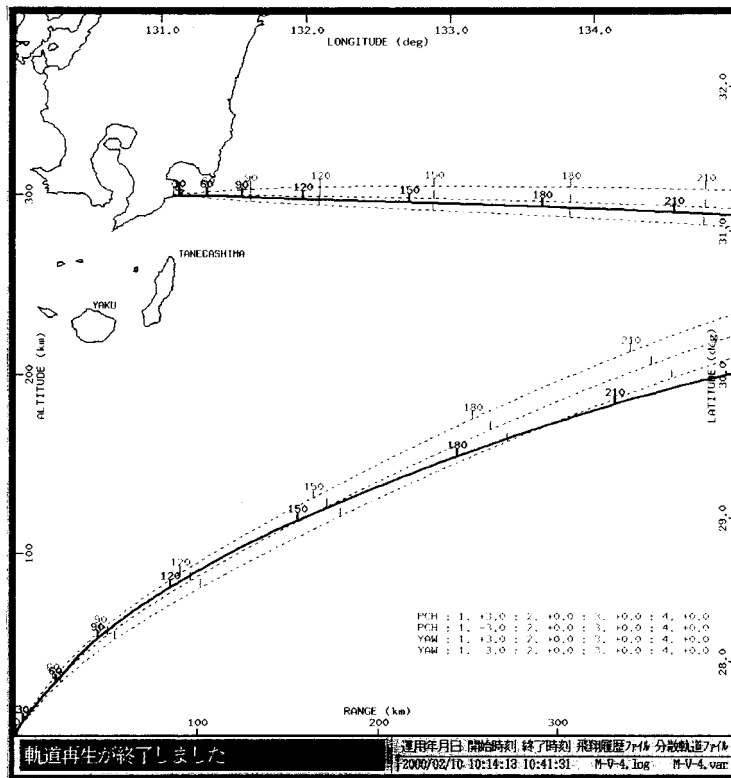


図21 M-V-4 飛翔軌跡 (X+220s)

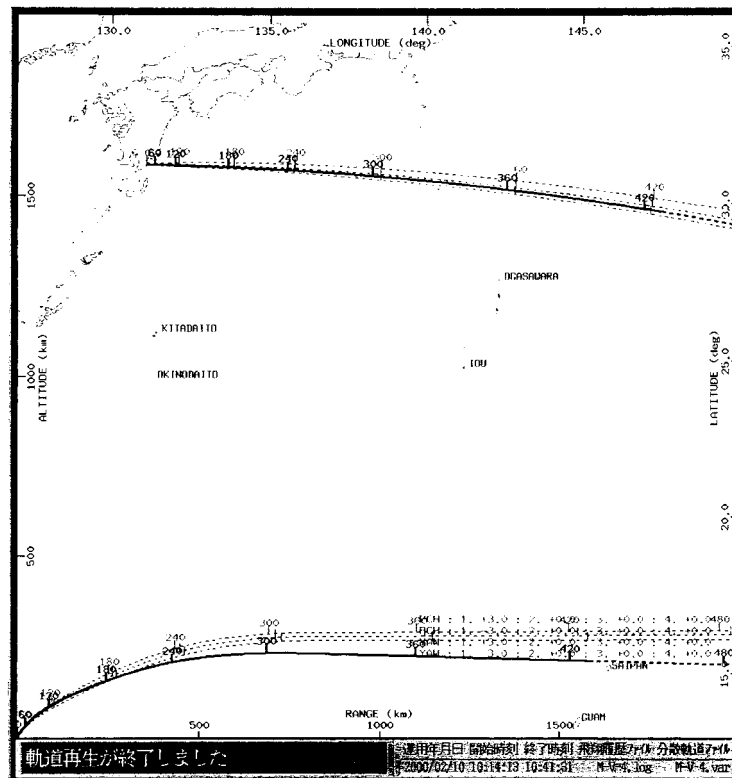


図22 M-V-4 飛翔軌跡 (X+430s)

6. 結 言

M-V型ロケット3機(1, 3, 4号機)のレーダ追跡に関して、地上装置と搭載機器、ならびに追跡結果について述べた。M-3SII型ロケット当時の大きな変更点は、新精測レーダの新たな設置と、5.6RTを2台搭載しての新旧精測レーダによる π 相同期追跡、さらにコマンドデコーダの更なる小型化と保安コマンド送出機能を加えての信頼性向上であった。これらは十分にその性能を発揮し、所期の目的を達成した。

最後に、KSCで打上オペレーションに参加された日本電気株式会社、三菱電機株式会社、明星電気株式会社の方々をはじめ関係各位に深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- [1] 市川 満, 鎌田幸男, 佐川一美, 山本善一, 斎藤宏文, 水野貴秀, 大橋清一, 松本操一, 廣澤春任:「長パルス一次レーダ機能を備えた科学衛星打ち上げ追跡用レーダ設備」, 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会, SANE2001-12, 2001年5月.
- [2] 廣澤春任, 市川 満, 鎌田幸男, 佐川一美, 大橋清一, 松本操一, 佐藤 巧, 山本善一, 斎藤宏文, 水野貴秀:「新精測レーダ」, 宇宙科学研究所報告, 第122号, 2003年3月.
- [3] 林 友直, 市川 満, 関口 豊, 鎌田幸男, 豊留法文, 山田三男, 「レーダによるM-3S型ロケットの軌道追跡及びデータ処理結果」, 宇宙科学研究所報告, 特集第16号, pp.325-340, 1986年10月.
- [4] 林 友直, 市川 満, 関口 豊, 鎌田幸男, 豊留法文, 山田三男, 「M-3SII型ロケットのレーダ追跡結果」, 宇宙科学研究所報告, 特集第29号, pp.173-184, 1991年6月.