

M-V ロケットのレーダ追跡設備

鎌田幸男*, 川原康介*, 山田三男**, 水野貴秀*, 斎藤宏文*

Abstract : M-V rocket tracking system consists of two independent RADAR system that are two C-band RADAR transponder (CRT) and two RADAR tracking facilities (New-Precision Grand Tracking RADAR facility (New-Prec. RADAR) and Precision Grand Tracking RADAR facility (Prec. RADAR)). New-Prec. RADAR tracks CRT that has 3 micro seconds identification pulse interval. Prec. RADAR tracks 5 micro seconds identification pulse interval CRT. We report about RADAR tracing system and flight data from M-V-5 in this paper.

Key words : RADAR

概 要

M-V ロケットには、2 台の C バンドレーダトランスポンダ (CRT) が搭載されており、地上の新精測レーダが識別パルス間隔 $3 \mu s$ の CRT を、精測レーダが識別パルス間隔 $5 \mu s$ の CRT をそれぞれ独立に追跡している。本文では、地上のレーダ追跡設備の概要と M-V-5 号機から 8 号機までの飛翔結果ならびに地上レーダ局のオペレーションについて述べる。

1. はじめに

M-V ロケット打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 ロケット初号機では、周波数の異なる 2 台のレーダトランスポンダ (L バンド/C バンド) が搭載されており、L バンドレーダトランスポンダ (LRT) を L バンド系 3.6m レーダにより追跡し、C バンドレーダトランスポンダ (CRT) を新精測レーダで追跡した。しかしながら、L バンド系の燃焼ガスによる電波減衰量が予想以上に大きい事が判明したため、L バンド 3.6m レーダによる追跡を次号機以降とりやめた。代わりに CRT をもう 1 台搭載させて、これを既存の「精測レーダ」で追跡することとした。それ以降の 6 回の打上げにおけるレーダ追跡は全てこの形で行われ、結果は良好であった。

同一周波数によるレーダ 2 系統の追跡にあたっては、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。そこで、搭載トランスポンダの識別パルス間隔を互いに異ならせ、新精測レーダが追跡する搭載

* The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) /JAXA

** Office of Space Flight and Operation /JAXA Usuda Deep Space Center (UDSC)

CRTの識別パルス間隔を $3\mu\text{s}$ に、精測レーダが追跡するCRTの識別パルス間隔を $5\mu\text{s}$ とした。さらに、地上の2つのレーダ局の送信タイミングを一定時間だけずらした同期運用方式を採用している。

本文では、M-Vロケットのレーダ追跡設備の概要とM-V-5号機からM-V-8号機までの飛翔結果ならびに地上での追跡オペレーションについて述べる。

2. レーダ追跡設備の概要

2.1. 新精測レーダ

新精測レーダは、ロケット搭載の識別パルス間隔 $3\mu\text{s}$ のCRT (CRT3M) の追跡を行う。ただし、地上局側で識別パルス間隔を変更することは可能であり、飛翔中CRT3Mに異常が発生した場合には、ただちにCRT5Mを追跡することも可能である。また、ロケット打上げ前の地上試験においては、識別パルス間隔を $5\mu\text{s}$ に変更してCRT5Mの動作チェックも行っている。CRT3M系には、電波誘導ならびに保安コマンド受信機能があり、RGならびにRSで計画されたコマンドが新精測レーダのアンテナならびに送信設備を介してロケットへ送信される。

図1に新精測レーダのシステム構成図を示す。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、光伝送装置など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バンド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など取得のためのKuバンド信号を受信する機能を共用したCバンド/Kuバンドホーン (Cバンド4ホーン及びKuバンド角錐ホーン) を組み込んでいる。アンテナ主反射鏡の骨組などには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ている。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、受信用はアレイアンテナを採用している。新精測レーダの主要性能を表1に示す[1]。また、新精測レーダにおける追跡オペレーションの様子を図2に示す。

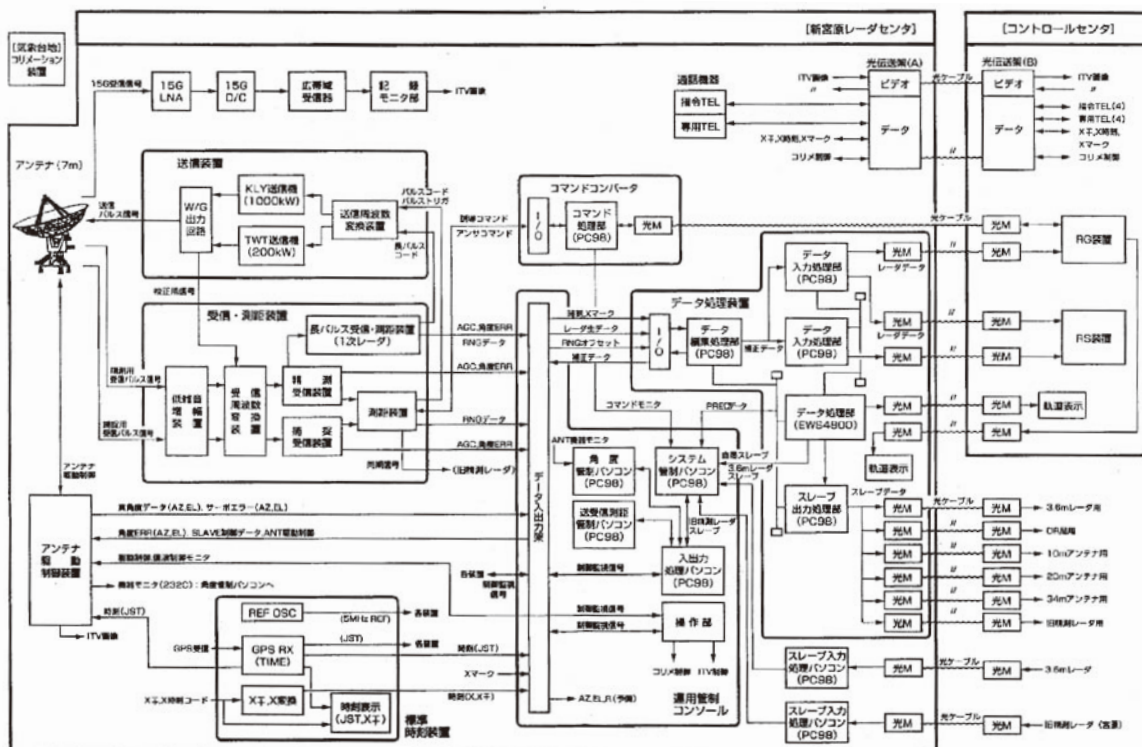


図1. 新精測レーダシステム構成図

表 1. 新精測レーダ主要性能

アンテナ	アンテナ径 (メイン)	7m ϕ カセグレンアンテナ
	アンテナ径 (捕捉)	0.5m ϕ ホーン (送信)
		0.9m ϕ アレイ (受信)
	マウント方式	AZ, EL 方式
	追尾方式	振幅比較 4 ホーンモノパルス方式
	利得 (メイン)	48.7dBi (送信)
		48.2dBi (受信)
	利得 (捕捉)	27.9dBi (送信)
		29.2dBi (受信)
送信機	周波数	C バンド
	送信出力	1000kW (クライストロン)
		200kW (TWT)
	パルス幅 (2 次レーダモード)	0.35 μ s (IR ダブルパルス) 電波誘導時は, S パルス, 3 out of 6 コードが付加
	パルス幅 (1 次レーダモード)	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)
	繰り返し周波数	250PPS, 267.6/7PPS
測定精度・追尾限界	測距精度	2m rms
	測距分解能	0.61m
	測距可能範囲	0.01~56ms (1.5~8394km)
	最大測距速度	15km/s
	最大測距加速度	25km/s ²
	角度精度	0.003deg rms (0.05mil rms)
	最大角速度	AZ 10deg/s, EL 10deg/s
	最大角加速度	AZ 20deg/s ² , EL 20deg/s ²
	最小受信感度 (2 次レーダモード)	-106dBm
	最小受信感度 (1 次レーダモード)	-106dBm (1 μ s)
		-119dBm (20 μ s)
		-133dBm (1009 μ s)



図2. 新精測レーダ 追跡オペレーションの様子

2.2. 精測レーダ

精測レーダは、ロケット搭載の識別パルス間隔 $5\mu\text{s}$ のCRT（CRT5M）の追跡を行う。新精測レーダ同様、地上局側で識別パルス間隔を変更することは可能であり、飛翔中CRT5Mに異常が発生した場合には、すぐさまCRT3Mを追跡することも可能である。表2に精測レーダの主要性能を示す[2]。また、精測レーダにおける追跡オペレーションの様子を図3に示す。

表2. 精測レーダ主要性能

アンテナ	アンテナ径	4m ϕ カセグレンアンテナ
	マウント方式	AZ, EL 方式
	追尾方式	4 ホーンモノパルス方式
	利得	42.5dBi
送信機	周波数	C バンド
	送信出力	1000kW（マグネトロン）
	パルス幅	0.25 μs （2次レーダ）
		1 μs （1次レーダ）
測定精度・追尾限界	繰り返し周波数	250PPS, 267・6/7PPS
	測距精度	10m 以下
	角度精度	0.006deg rms
	最大測距速度	15km/s
	最大測角精度	16deg/s
	最小受信感度	-102dBm



図3. 精測レーダ 追跡オペレーションの様子

2.3. データ伝送系

レーダ系のデータ伝送のおおまかな流れを、図4の全系局間インタフェース系統図に示す。ロケット打上げ時の各アンテナ設備に対する角度スレーブ信号が、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、新精測レーダと精測レーダはお互いに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。

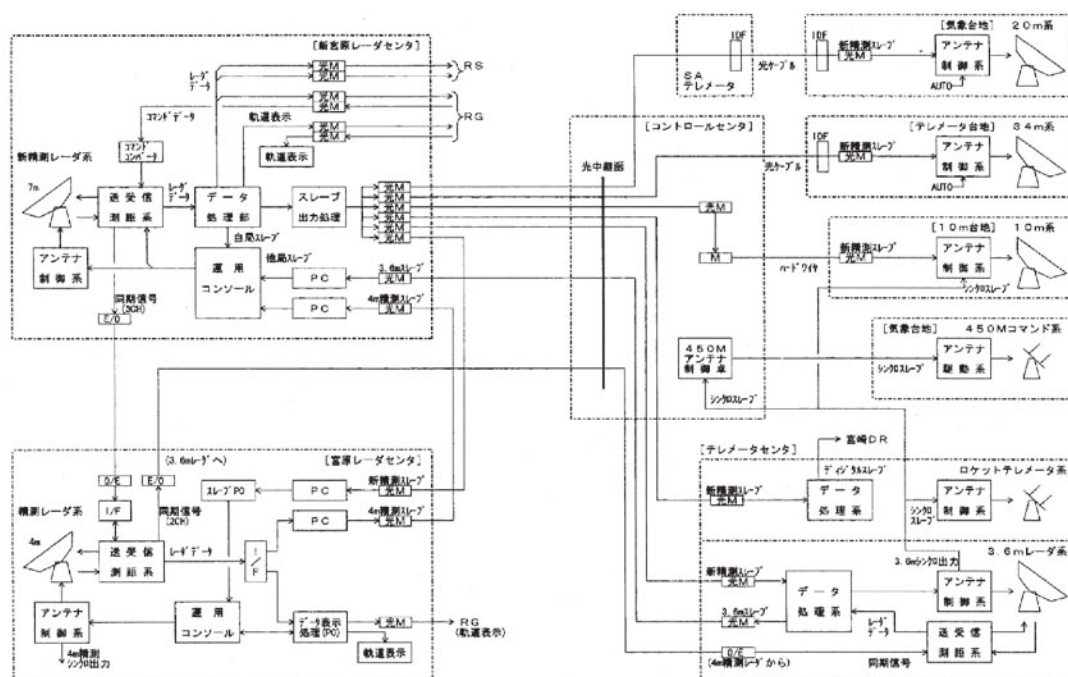


図4. 全系局間インタフェース系統図

3. 追跡オペレーションと飛翔結果

M-V ロケットのレーダによる追跡は、待ち受け方式を採用している。すなわち、オンランチャではアングル系をAUTO状態にせず、打上げ数秒後の方向に予めアンテナを待機させ、ロケットが飛翔してきた時点でアングル系をAUTOモードに移行する方式である。これは、レーダ局が位置する宮原台地からM射点を見たとき背後に存在する山によりマルチパスの影響を受けやすい地形になっているためである。ただし、レンジ系に関してはオンランチャからロックオンした状態である。待ち受け方式は、内之浦実験場の地形に固有なものであり、M-V ロケット以前から行ってきた追跡手法である。表3に新精測レーダ、精測レーダ、M射点の位置を示す。

M-V-5号機では、B2PL部に搭載されたCRT5Mを精測レーダが追跡し、B3PL部に搭載されたCRT3Mを新精測レーダが追跡した。M-V-6号機以降は、B2PL部に搭載されていたCRT5MがB3PL部に搭載され、新精測レーダと精測レーダによる完全冗長追跡が消感まで可能となった。本項では、M-V-5号機以降の打上げに関する地上オペレーションとその飛翔結果について述べる。

表3. 所在位置

施設名称	東経	北緯
M 射点	131°5' 4.66"	31°14' 50.73"
精測レーダ	131°4' 19.3"	31°13' 57.6"
新精測レーダ	131°3' 54.4"	31°13' 37.3"

3.1. M-V-5号機

M-V-5号機の発射日時とランチャセット角は以下の通り、

衛 星	はやぶさ (MUSES-C)
発射日時	2003年5月9日12時30分00秒
ランチャセット角	方位角90.2°, 上下角80.8°

3.1.1. 新精測レーダ

新精測レーダは、待受角AZ: 39.854°, EL: 0.260°においてX + 3.1秒にロックオンして自動追跡に入った。その後、X + 6.5秒に送信パワーをLOW, X + 42.7秒に送信パワーをMED, X + 45.1秒にPREC-RF-ATT 20dBをOFF, X + 47.1秒にACQ-ATT 20dBをOFF, X + 73.1秒にPREC-DC-ATT 20dBをOFF, X + 73.9秒に送信パワーをHIGH, X + 61秒にアングルサーボバンドをWからMに切り替えて、予定された操作を全て行い、順調に追跡を行っている。受信状況は良好で、X + 435秒にAZ = 91.3°, EL = 0.46°, RNG = 1691.7kmでロックオフするまで良好な追跡が行われた。

3.1.2. 精測レーダ

精測レーダは、待受角AZ: 37.2°, EL: 3.6°で待ち受けてX + 5.0秒にロックオンして自動追跡に入った。その後順調に追跡を行い、受信レベルの変化に対応してX + 40秒に20dBのATTをOFFへ、X + 60秒に送信パワーを32kWから1000kWに、X + 70秒にアングルサーボバンドをWIDEからMEDに切り替えている。さらに、精測レーダは2段目が分離される前のX + 199秒に同期装置を同相モードに移行し、3段目搭載のRTを受信モードで追跡した。この切り替え時のオペレーションも非常にスムーズに行われ、X + 203秒に3段目の追跡を開始できている。その後も受信状況は良好でX + 435秒にシグナルオフするまで追跡を行った。

3.1.3. 受信レベル

新精測レーダの受信レベルを図5～8に、精測レーダの受信レベルを図9に示す。受信レベルが示すように、新精測レーダと精測レーダの受信レベルはほぼ同様に変化している。図5と図6は新精測レーダの主アンテナによる受信レベルで図7と図8は捕捉アンテナによる受信レベルである。これらが示すように、第2段モータ点火とほぼ同時刻のX + 75.4秒に約68dBもの急激なレベル低下が生じ、その後も平均して約38dBのレベル低下がX + 139.7秒まで続いている。これは第2段モータの燃焼ガスの影響による電波減衰が原因と考えられる。この燃焼ガスによる電波減衰は前号機にも見られているものであり、その受信レベル低下量は大きいですが、追跡は支障なく行われた。

X + 187.6秒のNF開頭時に鋭い切れ込みがあるが、これはNF開頭時にカップリングアンテナが引抜ワイヤにより分離し、B3PL搭載アンテナに切り替ったときのレベル変動である。3段目以降は、同じく燃焼ガスの影響によるレベル低下がX + 250秒からX + 268.6秒まで続きこの間で約17dB低下したが、B3PL搭載アンテナの利得増加により受信レベルには十分な余裕があった。X + 435秒のロックオフ後も、海面反射や回折波の影響で受信している時間帯があり、X + 484.3秒に完全にシグナルオフした。

図10～12に飛翔軌跡を示す。ロケットは初期軌道において仰角がやや高めの約0.7°高く飛翔したがほぼノミナル軌道で飛翔したことが分かる。

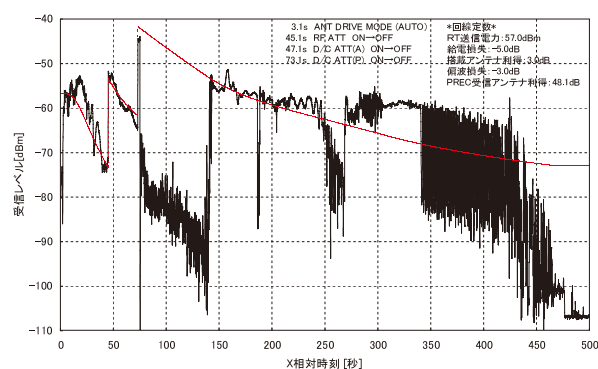


図5. M-V-5 新精測レーダPREC受信レベル
(X 相対時刻)

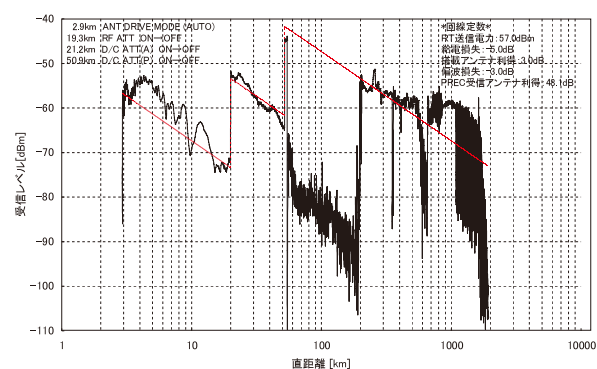


図6. M-V-5 新精測レーダPREC受信レベル
(直距離)

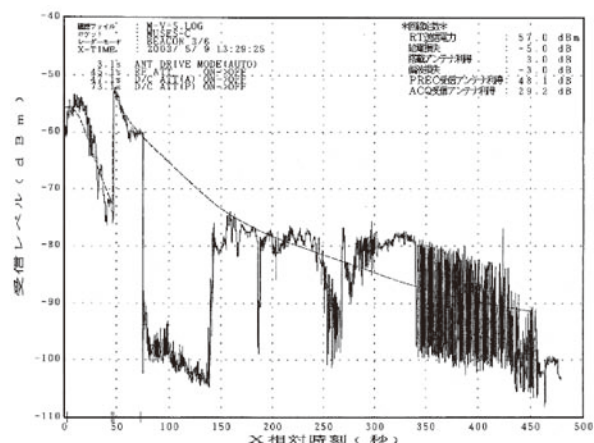


図7. M-V-5 新精測レーダACQ受信レベル
(X 相対時刻)

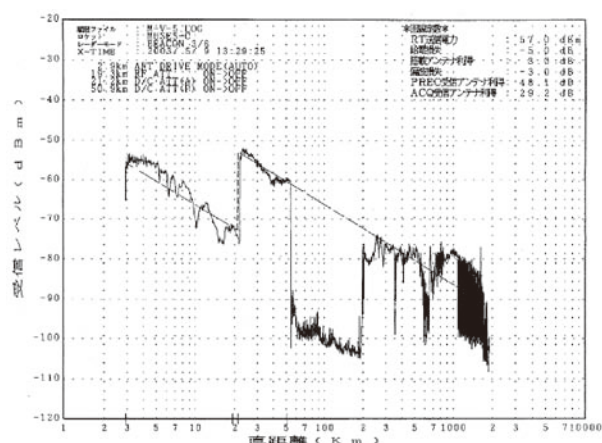


図8. M-V-5 新精測レーダACQ受信レベル
(直距離)

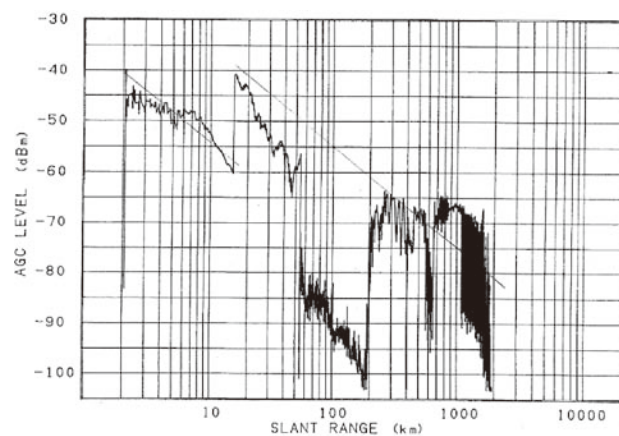


図9. M-V-5 精測レーダ受信レベル (直距離)

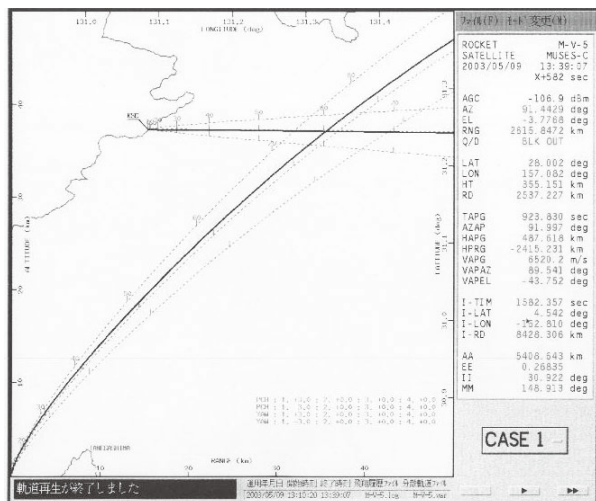


図10. M-V-5 飛翔軌跡1 (新精測レーダ)

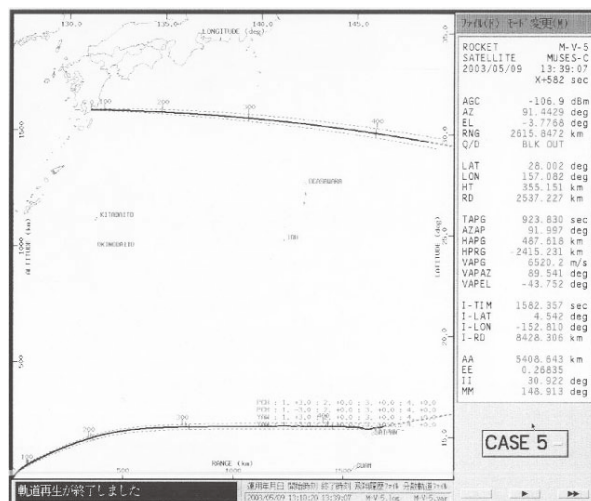


図11. M-V-5 飛翔軌跡2 (新精測レーダ)

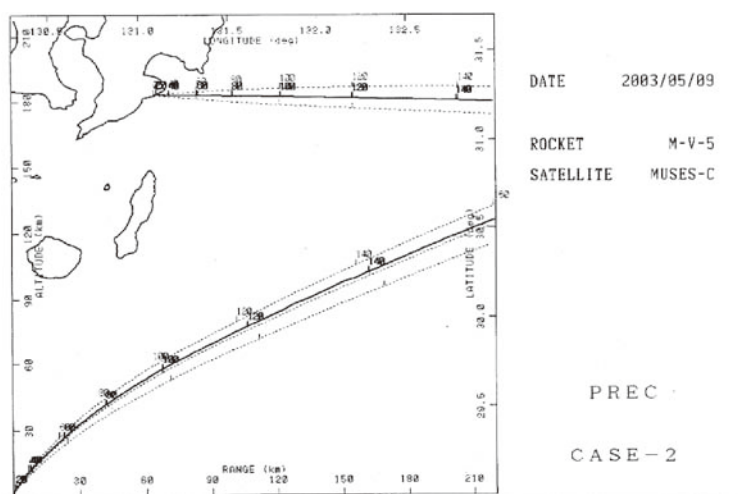


図12. M-V-5 飛翔軌跡 (精測レーダ)

3.2. M-V-6号機

M-V-6号機の発射日時とランチャセット角は以下の通り、

衛 星	すざく (ASTRO-E II)
発射日時	2005年7月10日12時30分00秒
ランチャセット角	方位角 87.6°, 上下角 80.2°

3.2.1. 新精測レーダ

新精測レーダは、待受角 $AZ: 39.757^\circ$, $EL: 0.260^\circ$ において $X + 3.3$ 秒にロックオンして自動追跡に入った。その後、 $X + 42.5$ 秒に送信パワーを MED, $X + 47.1$ 秒に ACQ-ATT 20dB を OFF, $X + 73.1$ 秒に PREC-DC-ATT 20dB を OFF, $X + 74.0$ 秒に送信パワーを HIGH, $X + 60.5$ 秒にアングルサーボバンドを W から M に切り替えて、予定された操作を全て行い、順調に追跡を行っている。第2段モータ点火以降、燃焼ガスの影響による大きなレベル低下が第2段燃焼終了まで続いているが、追跡に支障は無かった。また NF 開頭時には約 20dB の大きなレベルの落ち込みも見られたが、 $X + 347$ 秒の第3段姿勢反転までの間、安定した追跡が出来ている。

第3段姿勢反転以降は、地上局方向のアンテナ利得の低下に伴い受信レベルが大きく低下している。そのため、 $X + 425$ 秒までは正常に追跡を行っていたが、それ以降は時折ロックオフを繰り返しながら追跡を続けた。最終的に $X + 444$ 秒に $AZ = 93.63^\circ$, $EL = 1.19^\circ$, $RNG = 1850.8\text{km}$ でアングルを停止し $X + 459.4$ 秒にシグナルオフしている。

3.2.2. 精測レーダ

精測レーダは、待受角 $AZ: 36.84^\circ$, $EL: 3.415^\circ$ で待ち受けて $X + 4.9$ 秒にロックオンして自動追跡に入った。その後順調に追跡を行い、受信レベルの変化に対応して $X + 39.1$ 秒に 20dB の ATT を OFF へ、 $X + 60$ 秒に送信パワーを 32kW から 1000kW に切り替えている。新精測レーダ同様、第2段モータ点火時や第2段燃焼中、NF 開頭時に大きなレベル低下が観測されているが正常に追跡が出来ている。

第3段姿勢反転による大きなレベル低下に伴い $X + 423$ 秒以降はロックオンとロックオフを繰り返しながら追跡を続けていたが $X + 456.6$ 秒に $AZ = 93.74^\circ$, $EL = 0.688^\circ$, $RNG = 1936.6\text{km}$ でアングルを停止し追跡を終了している。新精測レーダと精測レーダの同一周波数による2局同期運用も良好に行われた。

3.2.3. 受信レベル

新精測レーダの受信レベルを図13～16に、精測レーダの受信レベルを図17と18に示す。受信レベルが示すように、新精測レーダと精測レーダの受信レベルはほぼ同様に变化している。図13と図14は新精測レーダの主アンテナによる受信レベルで図15と図16は捕捉アンテナによる受信レベルである。これらが示すように、第2段モータ点火とほぼ同時刻の $X + 75.4$ 秒に約 61.6dB もの急激なレベル低下が生じ、その後も平均して約 32dB のレベル低下が $X + 137.3$ 秒まで続いている。さらに、第2段燃焼終了末期の $X + 137.4$ 秒～142.3秒においては、平均して約 42dB の大きなレベル低下が観測されている。これは第2段モータの燃焼ガスの影響による電波減衰が原因と考えられる。この燃焼ガスによる電波減衰は前号機にも見られているものであり、その受信レベル低下量は大きい。追跡は支障なく行われた。

$X + 187.6$ 秒に見られる約 25dB もの鋭い落ち込みは NF 開頭時に、カップリングアンテナが引抜ワイヤにより分離し、B3PL 搭載アンテナに切り替ったときのレベル変動である。 $X + 205$ 秒に第3段モータが点火しその直後の $X + 207$ 秒からロール角 90° マヌーバが開始された。これにより、B3 搭載アンテナの地上局方向の利得が増加し、受信レベルが最大で約 10dB 増加している。また、第3段燃焼中のルックアングルは 30° 以上あったため、ほとんど電波減衰は生じず、B3 燃焼中の受信レベルには十分な余裕があった。図22にルックアングルを示す。

X + 347秒の第3段リファレンスチェンジ以降は、地上局方向のアンテナ放射パターンの劣化に伴い受信レベルも大きく低下し、パターンの切れ込みによる受信レベルの大きな落ち込みも見られる。その後、仰角が 1° を下回った為X + 444秒にアングルを停止し、追跡を終了した。なお、X + 447秒以降に見られる受信レベルの変動は、ロケットのロール回転によるレベル変動である。

図19～21に飛翔軌跡を示す。ロケットは初期軌道に対して仰角が高め、方位角において北側へ飛翔しているが、ロケットの飛翔として問題ない程度である事が分かる。

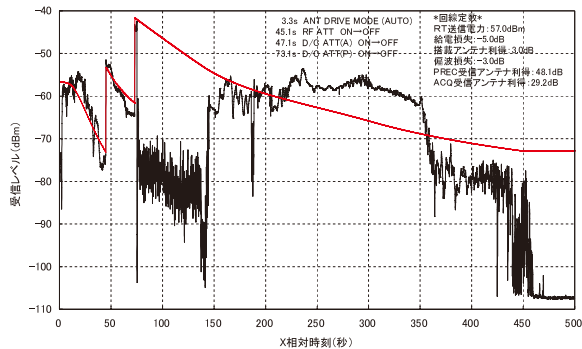


図13. M-V-6 新精測レーダPREC受信レベル (X相対時刻)

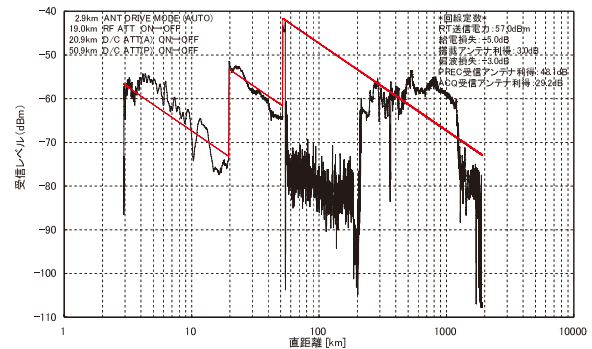


図14. M-V-6 新精測レーダPREC受信レベル (直距離)

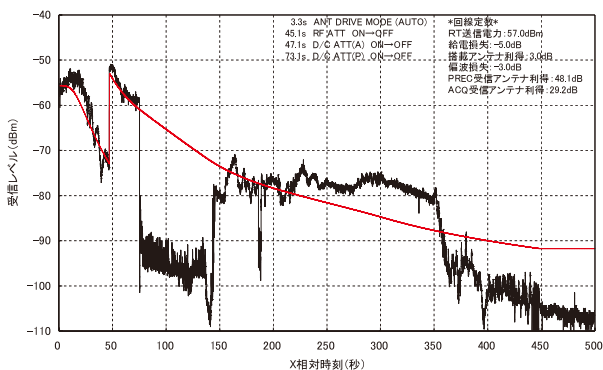


図15. M-V-6 新精測レーダACQ受信レベル (X相対時刻)

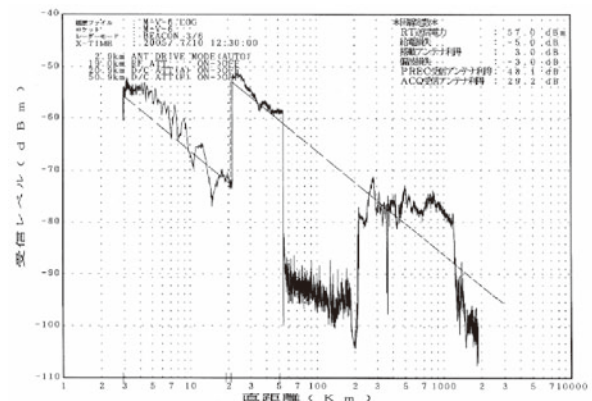


図16. M-V-6 新精測レーダACQ受信レベル (直距離)

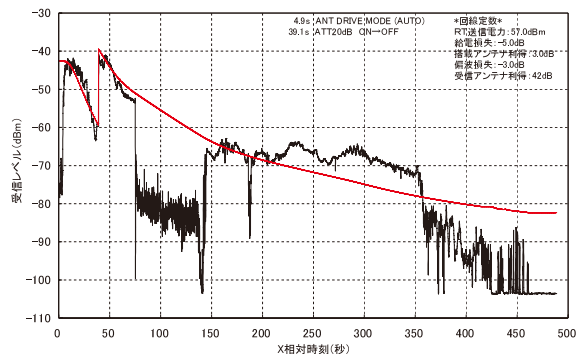


図17. M-V-6 精測レーダ受信レベル (X相対時刻)

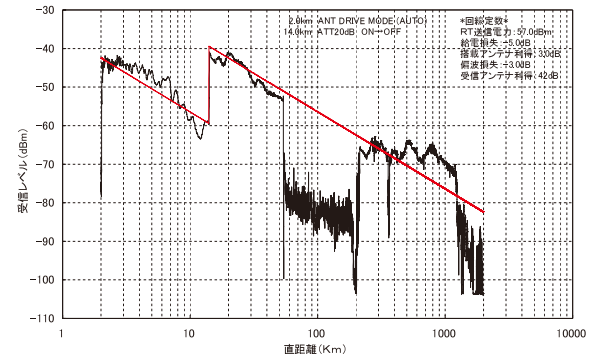


図18. M-V-6 精測レーダ受信レベル (直距離)

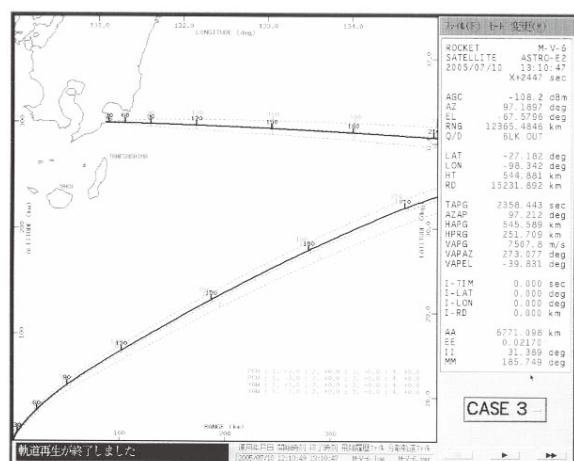


図19. M-V-6飛翔軌跡1 (新精測レーダ)

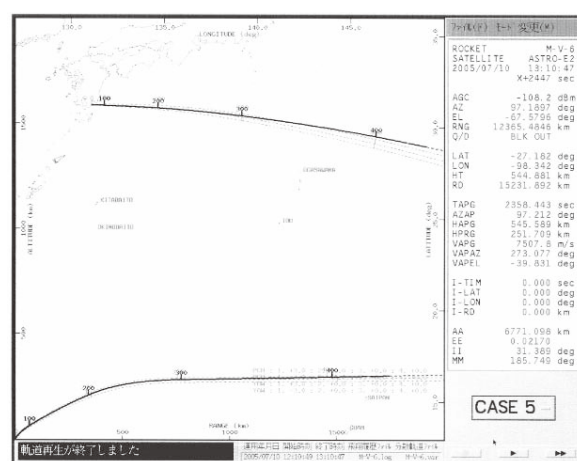


図20. M-V-6飛翔軌跡2 (新精測レーダ)

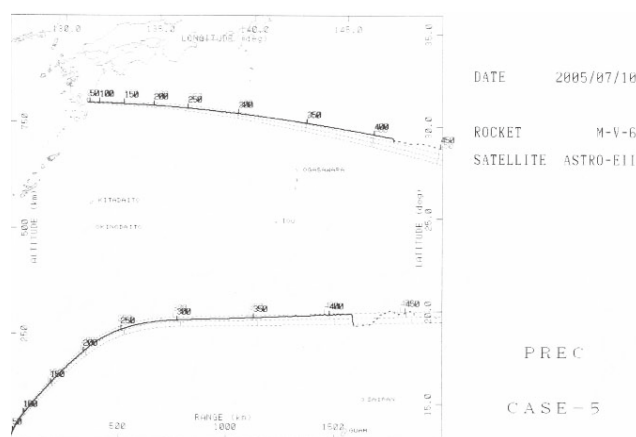


図21. M-V-6 飛翔軌跡 (精測レーダ)

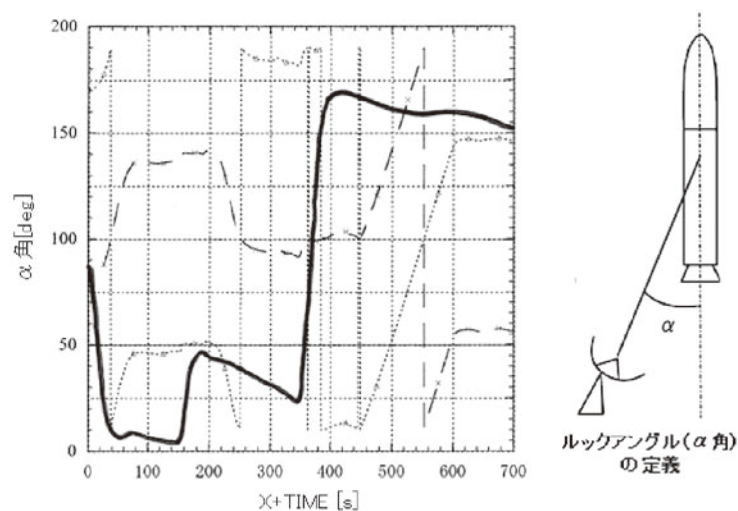


図22. M-V-6 ルックアングル

3.3. M-V-8号機

M-V-8号機の発射日時とランチャセット角は以下の通り、

衛 星	あかり (ASTRO-F)
発射日時	2006年2月22日6時28分00秒
ランチャセット角	方位角142.97°, 上下角81.51°

3.3.1. 新精測レーダ

新精測レーダは、待受角AZ:39.86°, EL:0.254°においてX + 3.3秒にロックオンして自動追跡に入った。その後、X + 42.7秒に送信パワーをMED, X + 47.1秒にACQ-ATT20dBをOFF, X + 73.1秒にPREC-DC-ATT 20dBをOFF, X + 73.9秒に送信パワーをHIGH, X + 61.3秒にアングルサーボバンドをWからMに切り替えて、予定された操作を全て行い、順調に追跡を行っている。追跡終盤においては、姿勢反転による受信レベルの低下と海面反射による影響を避けるためX + 449秒にAZ = 190.2°, EL = 1.157°, RNG = 1934.5kmでCPUスレーブへ移行した。その間、安定した追跡を行いX + 482秒にシグナルオフしている。

3.3.2. 精測レーダ

精測レーダは、待受角AZ:37.20°, EL:2.205°で待ち受けてX + 4.2秒にロックオンして自動追跡に入った。その後順調に追跡を行い、受信レベルの変化に対応してX + 40秒に20dBのATTをOFFに、X + 60秒に送信パワーを32kWから1000kWに切り替えている。その後も安定した追跡を行っていたが、X + 347秒の姿勢反転による受信レベルの低下と海面反射による影響を避ける為、X + 430.6秒にAZ = 188.2°, EL = 5.245°, RNG = 1655.6kmで新精測レーダスレーブに移行しX + 443.7秒にシグナルオフした。また、新精測レーダと精測レーダの同一周波数による2局同期運用も良好に行われている。

3.3.3. 受信レベル

新精測レーダの受信レベルを図23～26に、精測レーダの受信レベルを図27と28に示す。受信レベルが示す様に、新精測レーダと精測レーダの受信レベルはほぼ同様に変化している。図23と図24は主アンテナによる受信レベルで図25と図26は捕捉アンテナによる受信レベルである。これらが示すように、2段モータ点火とほぼ同時のX + 75.4秒に約53dBもの急激なレベル低下が生じている。従来号機ではその後、燃焼ガスの影響により平均して約30dBのレベル低下が観測されるのだが、今号機は約X + 80秒からルックアングル (α 角) が10°以上になるため、X + 82秒以降はロケットのルックアングルに応じて受信レベルがほぼ計算値まで回復している。図31にルックアングルを示す。また、2段モータ燃焼終了前のX + 130秒からX + 137秒において燃焼ガスの影響と見られるレベル低下が見られているが、全体を通して追跡に支障は無かった。

X + 186秒に見られる鋭い切れ込みはNF開頭時に、カップリングアンテナが引抜ワイヤにより分離し、B3PL搭載アンテナに切り替ったときのレベル変動である。X + 205秒に第3段モータが点火しその直後のX + 207秒からロール角90°マヌーバが開始された。これにより、B3搭載アンテナの利得が増加し、受信レベルが最大で約10dB増加している。第3段燃焼中のルックアングルは30°以上あったため、ほとんど電波減衰は生じず、B3燃焼中の受信レベルには十分な余裕があった。また、X + 347秒の姿勢反転開始以降、アンテナ放射パターンの切れ込みにより受信レベルは著しく減少しているが、海面反射による影響を避ける為、X + 449秒にCPUスレーブに移行するまでの間、安定した追跡を行っている。

図29と30に飛翔軌跡を示す。これらが示すように、ロケットはほぼノミナル軌道を飛翔していることが分かる。

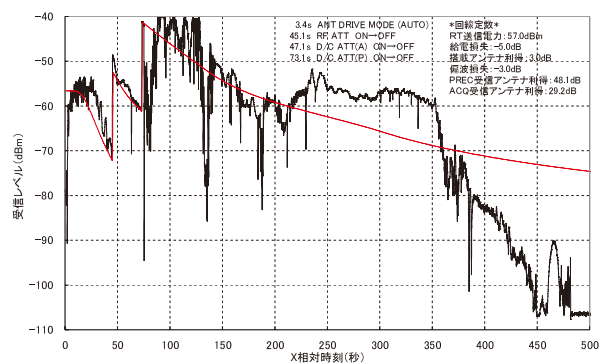


図23. M-V-8新精測レーダPREC受信レベル
(X 相対時刻)

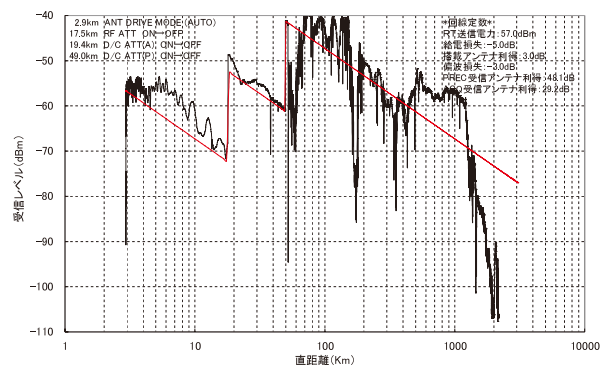


図24. M-V-8新精測レーダPREC受信レベル
(直距離)

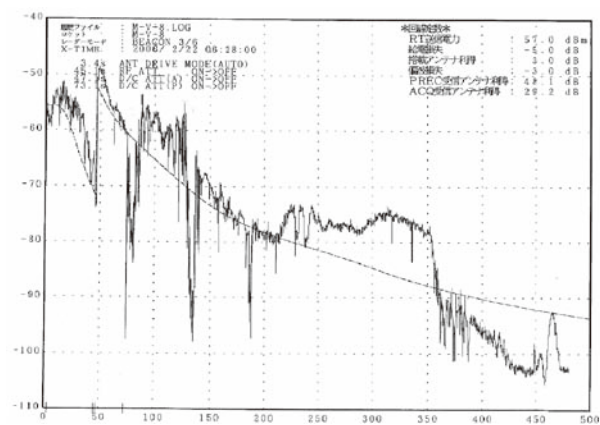


図25. M-V-8新精測レーダACQ受信レベル
(X 相対時刻)

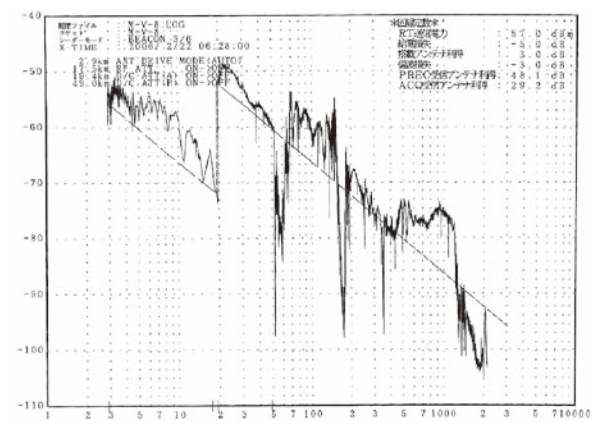


図26. M-V-8新精測レーダACQ受信レベル
(直距離)

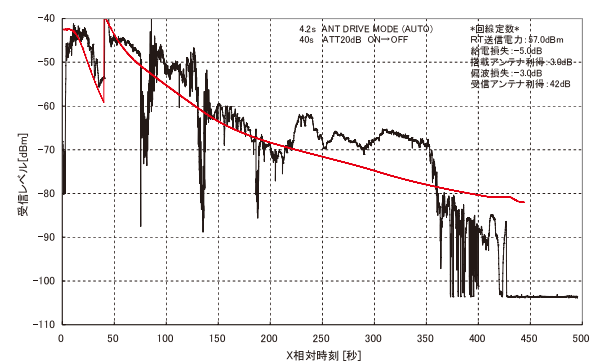


図27. M-V-8精測レーダ受信レベル
(X 相対時刻)

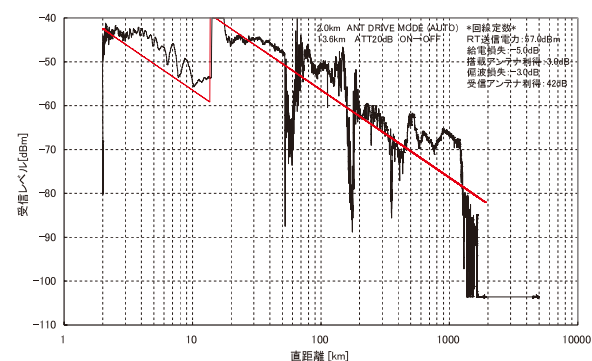


図28. M-V-8精測レーダ受信レベル
(直距離)

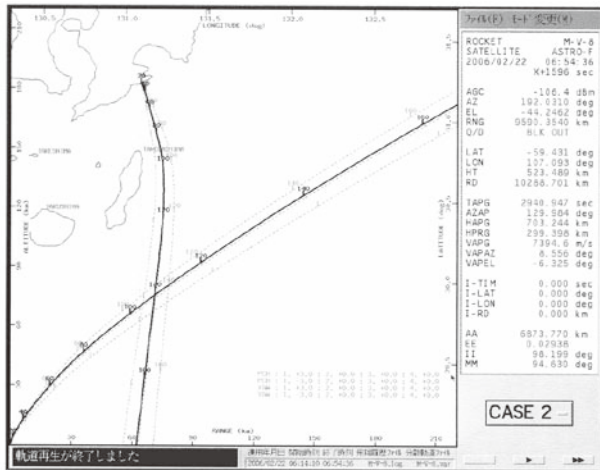


図29. M-V-8 飛翔軌跡1 (新精測レーダ)

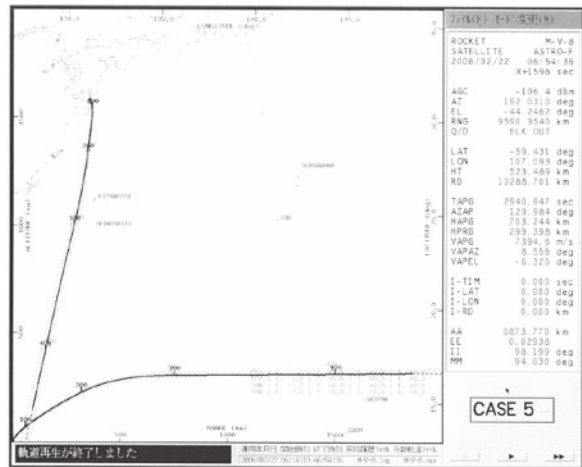


図30. M-V-8 飛翔軌跡2 (新精測レーダ)

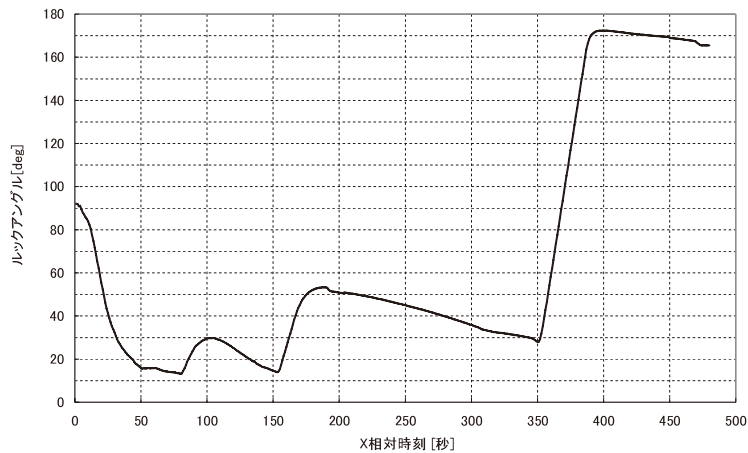


図31. M-V-8 ルックアングル

3.4. M-V-7号機

M-V-7号機の発射日時とランチャセット角は以下の通り、

衛星	ひので (SOLAR-B)
発射日時	2006年9月23日06時36分00秒
ランチャセット角	方位角149.27°, 上下角82.01°

3.4.1. 新精測レーダ

新精測レーダは、待受角AZ: 39.808°, EL: 0.255°においてX + 3.4秒にロックオンして自動追跡に入った。その後、X + 42.7秒に送信パワーをMED, X + 47.1秒にACQ-ATT 20dBをOFF, X + 73.1秒にPREC-DC-ATT 20dBをOFF, X + 73.9秒に送信パワーをHIGH, X + 60.5秒にアングルサーボバンドをWからMに切り替えて、予定された操作を全て行い、順調に追跡を行っている。今号機はM-V-8号機同様南打ちであったため、電波減衰の影響が比較的少なく、X + 487.4秒にAZ = 37.140°, EL = 3.886°, RNG = 2196.1kmにてアングルをMANUALモードへ移行して、アングルを停止させるまでの間、安定した追跡が行われている。

3.4.2. 精測レーダ

精測レーダは、待受角 $AZ = 37.140^\circ$ 、 $EL = 3.886^\circ$ において $X + 5.2$ 秒にロックオンして自動追跡に入った。その後順調に追跡を行い、受信レベルの変化に対応して $X + 60$ 秒に 20dB の ATT を OFF、さらに送信パワーを 32kW から 1000kW へと切り替えている。新精測レーダ同様、第2段モータ点火時や第2段燃焼初期、NF 開頭時に大きなレベル低下が観測されているが正常に追跡が出来ている。追跡は、 $X + 476.2$ 秒に $AZ = 188.4^\circ$ 、 $EL = 0.159^\circ$ 、 $RNG = 2115.3\text{km}$ にてアングルを停止し追跡を終了している。また、新精測レーダと精測レーダの同一周波数による2局同期運用も良好に行われた。

3.4.3. 受信レベル

新精測レーダの受信レベルを図32～35に、精測レーダの受信レベルを図36と37に示す。受信レベルで示すように、新精測レーダと精測レーダの受信レベルはほぼ同様に变化している。図32と図33は新精測レーダの主アンテナによる受信レベルで図34と図35は捕捉アンテナによる受信レベルである。これらが示すように、第2段モータ点火とほぼ同時刻の $X + 75.4$ 秒に約 50dB もの急激なレベル低下が生じ、その後 $X + 82$ 秒まで平均して約 30dB のレベル低下が続いているが、その後受信レベルはほぼ計算値まで回復している。これは、M-V-8号機同様南打ちであったため、ルックアングル (α 角) が 10° 以下になっておらず、第2段モータの燃焼ガスによる影響が少なかったものと考えられる。図41にルックアングルを示す。

第2段モータ燃焼終了後の $X + 186$ 秒にみられる鋭い切れ込みは、NF 開頭時にカップリングアンテナが引抜ワイヤにより分離し、B3PL 搭載アンテナに切り替わった時のレベル変動であり、約 30dB のレベル低下が見られたが、全体を通して追跡に支障は無かった。また、前号機まで第3段モータ点火直後に行っていた 90° ロールマヌーバを第2段燃焼終了直後の $X + 152.5$ 秒から実施している。これにより、地上局に対するアンテナ放射パターンが改善され、受信レベルが最大で約 10dB 増加している。

追跡は、アンテナ上下角が低くなると海面反射による影響を受けるので、 $X + 487.4$ 秒にアングルを停止し追跡を終了している。その間、1度もロックオフすること無く安定した追跡を行っている。なお、 $X + 487.4$ 秒のアングル停止以降に見られる -75dBm 相当の受信レベルは、送信ルートからの漏れ込みが測定されているものであり、追跡とは関係ない。追跡全体を通して、精測レーダについても同様なレベル変動がみられており正常な追跡を行っている。

図38～40に飛翔軌跡を示す。初期軌道に対して仰角が高めではあるが、ほぼノミナルの軌道を飛翔している。

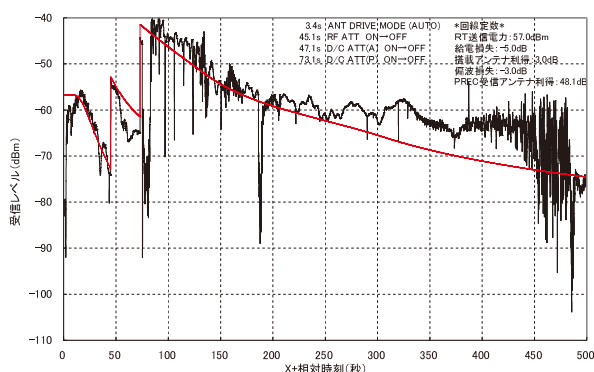


図32. M-V-7新精測レーダPREC受信レベル
(X 相対時刻)

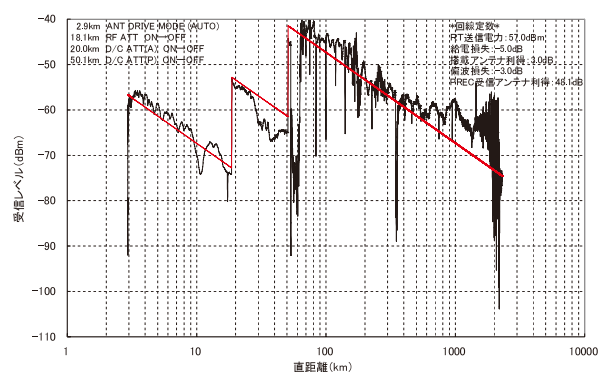


図33. M-V-7新精測レーダPREC受信レベル
(直距離)

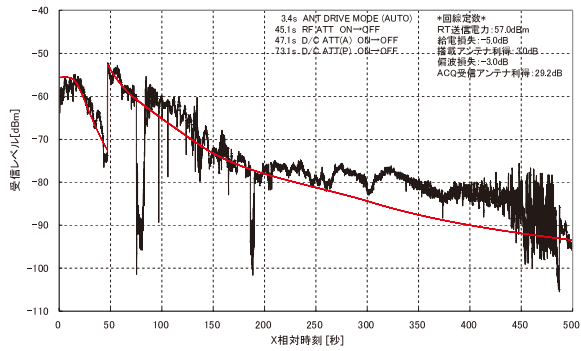


図34. M-V-7新精測レーダACQ受信レベル
(X相対時刻)

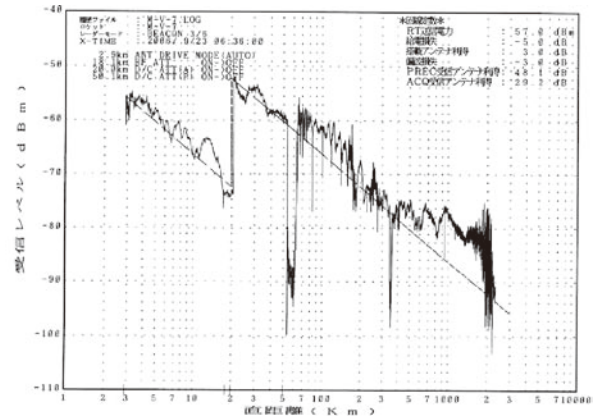


図35. M-V-7新精測レーダACQ受信レベル
(直距離)

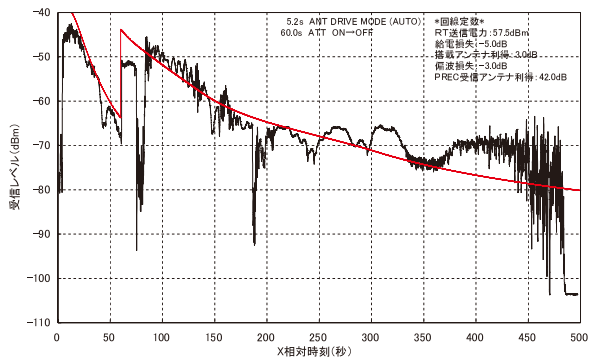


図36. M-V-7精測レーダ受信レベル
(X相対時刻)

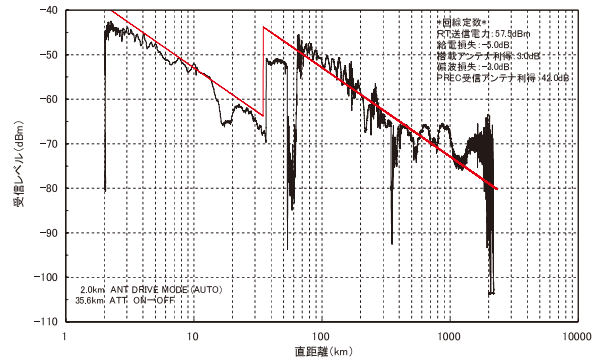


図37. M-V-7精測レーダ受信レベル
(直距離)

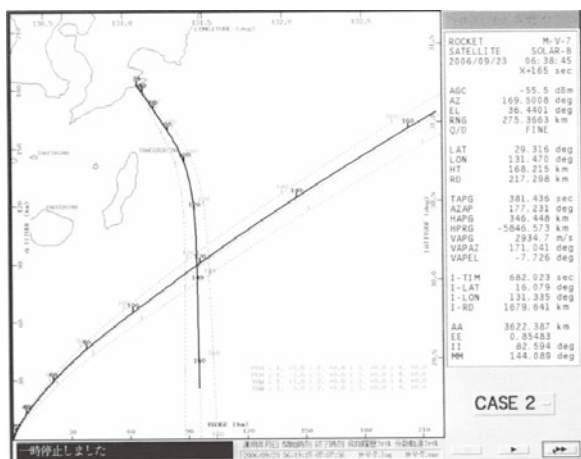


図38. M-V-7 飛翔軌跡1 (新精測レーダ)

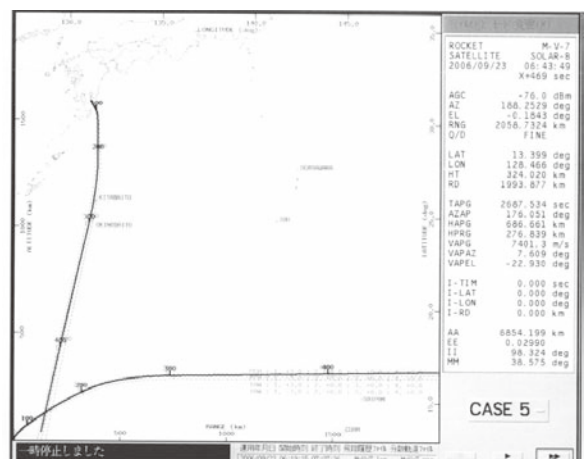


図39. M-V-7 飛翔軌跡2 (新精測レーダ)

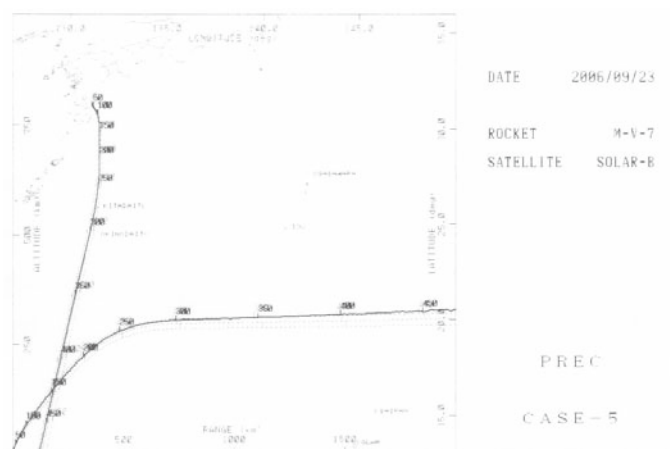


図40. M-V-7 飛翔軌跡 (精測レーダ)

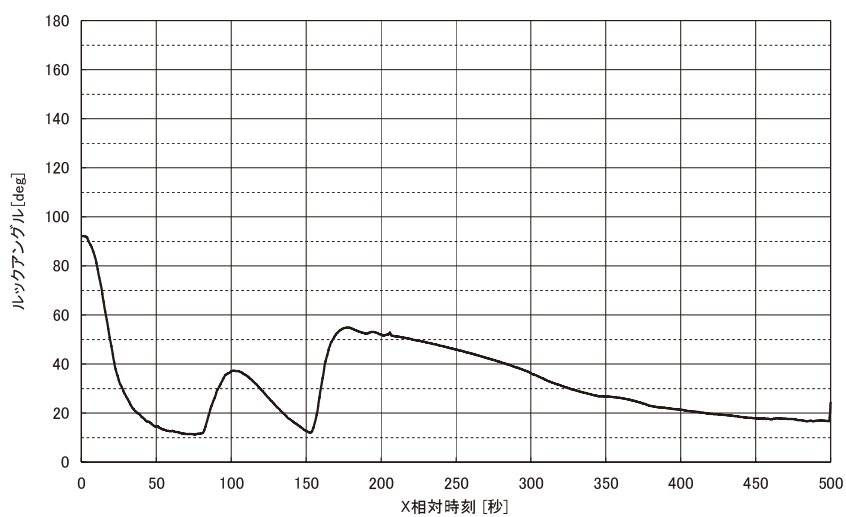


図41. M-V-7 ルックアングル

4. 次期固体ロケットへの反映事項

レーダによるロケットの位置標定は、飛行安全の観点から必要不可欠なものであり、ロバストなシステムであることが求められている。その一方で、推進剤に固体燃料を持つロケットが放つ燃焼ガスによる影響は非常に大きく、平均して30dB以上、瞬間的には60dB以上の電波減衰を招く。レーダによる追跡は、このような厳しい環境下においても、正確かつ確実な位置標定を行わなければならない。同じことは、固体燃料を推進剤に持つ次期固体ロケットについても言える。本項では、M-Vロケット追跡局としての経験が次期固体ロケットの追跡運用に役立つ事を期待し、反映事項として以下に挙げることにする。

1. 待ち受けによるロケット追跡

内之浦から打上げられるロケットの追跡は、従来から待ち受けによる追跡が行われてきた。この手法は、山の多い内之浦の地形において最適化された追跡手法である。追跡の確実性の観点から、今後も踏襲すべき追跡手法である。

2. 燃焼ガスによる電波減衰

電波減衰量は、高度とルックアングルが大きく関係している。燃焼ガスの広がり、飛翔高度の上昇に伴い真空度が増すため広範囲に噴出される。そのため、比較的ルックアングルが大きい時間帯にもかかわらず、電波減衰量が大きくなることがある。固体ロケットの追跡は、高度と燃焼ガスの広がりの相関を含めたルックアングルによる電波減衰を考慮して、十分なマージンを持たせた運用にしなければならない。

3. 90°ロールマヌーバ

第3段モータ燃焼以降、アンテナ取付位置が地上局を向くようにロケットのロール角を調整してもらう。これにより、回線リンクが10dB近く改善される。このように、搭載アンテナ、地上局、ロケットシステムがリンクしながら最適な運用方法を模索し、追跡システムとしてのマージンを確保する必要がある。

5. まとめ

M-Vロケットのレーダによる追跡システムの概要とM-V-5号機から8号機までの飛翔結果ならびに地上オペレーションについて報告した。M-V-6号機以降は、CRT5MとCRT3Mの2台のCRTがB3PL部に搭載されたため、レーダによる完全冗長追跡が確立している。また、その追跡は非常に安定したものであり、M-Vロケットのレーダによる追跡手法は確立したと言える。M-Vロケットのレーダ追跡において、これまでご指導、ご協力いただいた関係各位に深甚なる謝意を表する。

参考文献

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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, 信学技報, SANE2001-12(2001-05)