

M-Vロケットのレーダ系

鎌田幸男*, 川原康介*, 水野貴秀*, 齋藤宏文*

概要

M-Vロケットのレーダ追跡は、互いに独立な2系統の追跡システムから成る。M-V-6号機以降は、B3PL部に2台のCバンドレーダトランスポンダ (CRT) が搭載され、ロケット消感まで完全冗長構成を有している。また6号機以降のCRT系には、CRT受信レベルとアンテナ切替ステータスをテレメトリデータとして出力できる機能が追加されている。本文では、CRT系の概要と6号機以降の飛行結果について述べる。

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第3段ペイロード部 (B3PL部) にCバンドレーダトランスポンダ (CRT) を、第2段ペイロード部 (B2PL部) にはLバンドレーダ (LRT) を搭載した。地上系は新設のCバンド系「新精測レーダ」[1]と既設のLバンド系3.6mレーダであった。しかしながら、初号機の追跡において、Lバンド系の電波の燃焼ガスによる減衰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取り止め、B2PL部にもCRT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。それ以降の3回の打上げ (M-V-3, 4, 5号機) の打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。その後、飛行保安の観点からロケット消感 (LOS) までの完全冗長追跡を行うために、それまでB2PL部に搭載されていたCRTをB3PL部へと変更させた。M-V-6号機以降の3回の打上げで良好な結果が得られており、M-Vロケットのレーダ系が確立した。

ロケットにCRTを2台搭載するにあたっては、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。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、新精測レーダが追跡する搭載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た。

識別パルス間隔 $3\mu\text{s}$ のCバンドレーダトランスポンダ (CRT3M) には、コマンドデコーダ機能が付加されており、新精測レーダから送られる電波誘導用のRGコマンドと飛行保安用の保安コマンドを受信することが出来る。これにより、保安コマンド系についてもコマンド受信機 (CDR) との組合せによる冗長構成がLOSまで確立している。

本文では、M-Vロケットのレーダ追跡に関して、搭載機器の概要、ならびに6号機から8号機までの追跡結果について述べる。

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

2. レーダ系搭載機器の概要

2.1. Cバンドレーダトランスポンダ IR5 μ s (CRT5M)

本CRTはM-V-5号機まではB2PL部に搭載されていたが、M-V-6号機以降、飛翔保安の観点からB3PL部に搭載位置が変更となった。それに伴い、給電方式を以前の2素子逆相給電から2素子アンテナ切替方式へと変更した。この方式は、従来からB3PL部に搭載されているCRT3Mと同じ給電方式である。これにより、レーダ2局による冗長追跡が消感するまで可能となった。また、識別パルス間隔3 μ sのCRT3Mと識別可能となるように、このCRTでは識別パルス間隔を5 μ sとしている。CRT5Mの主要性能を表1に、外観図を図1に示す。図2にM-V-5号機でのCRT5Mシステム系統図を、同じくM-V-6号機以降のシステム系統図を図3に示す。

受信感度	-70dBm 以下
識別パルス間隔	5 \pm 0.15 μ sec
受信帯域幅	11 \pm 3MHz
送信出力	500W
送信パルス幅	0.9 \pm 0.1 μ sec
自送パルス 繰り返し周波数	210 \pm 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 \pm 0.1 μ sec
電源電圧	+18 \pm 4V
重量	2.7kg

表1 CRT5M主要性能

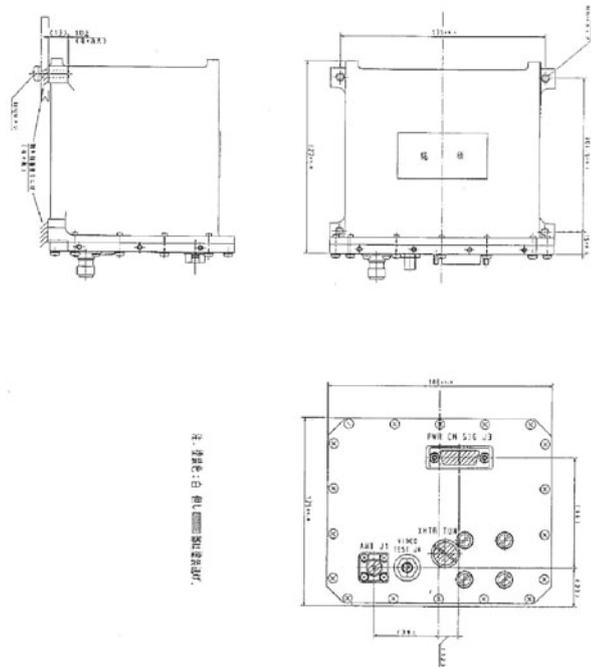


図1 CRT外観図

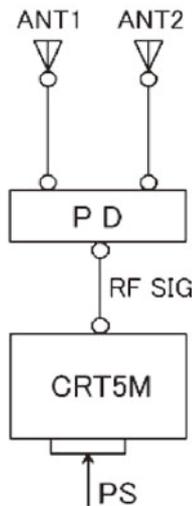


図2 CRT5Mシステム系統図 (M-V-5)

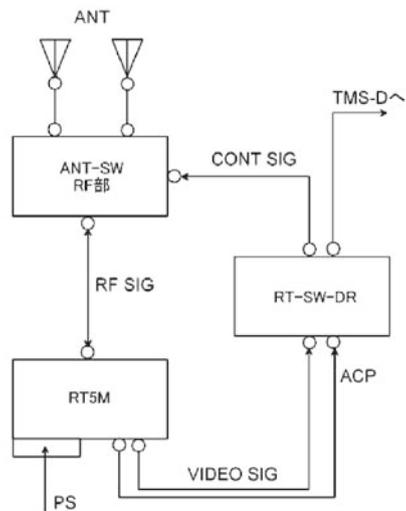


図3 CRT5Mシステム系統図

2.2.2. Cバンドコマンドデコーダ (DEC)

新精測レーダから送信されたパルスコード信号は、CRT3Mで受信された後、そのビデオ信号がCRT3MからDECに出力される。DECでは、このパルスコード列信号を解読して、各機器に出力する。また、DECは、各々のコードに対応したPPMのアンサバック・トリガパルスをCRT3Mに出力し、CRT3Mは測距パルスとアンサバックパルスを返信する。地上局では、送信したコード列に対応したアンサパルスゲートで受信し、各コード固有の定められた位置に返信パルスが来た時に照合が取れ、それ以外の場合にはエラーが計測される。

表3にDECの主要性能、表4にコマンド一覧表、図5に外観図を、表5にレーダ機能拡張ボックスの主要性能をそれぞれ示す。また、図5で示すように、DECはレーダ機能拡張ボックスと抱き合わせる形で組み込まれている。

このようなパルス波形を用いたコード列コマンドでは、伝送系による誤動作の防止対策が重要であるため、DECでは次のような対策を講じている。

- ① デコーダは読み込み動作トリガとして、定められた時間間隔を持ったSP、IP、RPが検出された時に3 out of 6のコマンドコードを読み込み解読する。
- ② コマンドコードのうちアクティベーション項目は、3回連続してコードが入った場合のみ、この項目のリレーが動作する。
- ③ デコーダのビデオ入力アンプの帯域幅を4MHz程度として等価雑音帯域幅を制限してS/N比の向上を図り、250nsec以上のパルスが通り得るようにしている。
- ④ 保安コマンドは、ナンバーコードが2連続を2回、アクティベーションコードが3連続して受信した場合のみ、この項目のリレーが動作する。

この他に、接点出力回路には、チャタリングなどのないフォトカプラを使用して、信頼性の向上を図っている。

表3 DEC主要性能

入力パルス電圧	500±100mV
入力パルス幅	1.0±0.3μs
S _p -R _p 間隔 Accept	37.2~37.8μs
Reject	36.7μs以下 38.3μs以上
コマンド符号形式	3 out of 6 コード
コード繰り返し率	250pps 又は 267 6/7pps
デコード項目	20項目
フォトカプラ出力	17項目
アンサバック出力レベル	3.5~5V
電源電圧	16~22V
消費電流 (Dummy 出力時)	100mA 以下
消費電流 (保安用コマンド出力時)	150mA 以下
重量	500g 以下

表4 誘導及び保安用コマンド一覧
(1/2)誘導コマンドアンサバック一覧

コマンド項目		アンサバックパルス	フォトカプラ番号
Dummy	1	50±0.5 μ sec	---
Pitch	Reset	83±0.5 μ sec	K1 ~ K3
	+1	101±0.5 μ sec	K3
	-1	56±0.5 μ sec	K1
	Activation	71±0.5 μ sec	K2
Yaw	Reset	53±0.5 μ sec	K4 ~ K6
	+1	77±0.5 μ sec	K5
	-1	62±0.5 μ sec	K6
	Activation	68±0.5 μ sec	K4
Time	Reset	59±0.5 μ sec	K7 ~ K9
	+1	80±0.5 μ sec	K8
	-1	92±0.5 μ sec	K7
	Activation	95±0.5 μ sec	K9
Number	Reset	89±0.5 μ sec	M-V型ロケットは コマンドの組合せ でのみ使用する。 (保安用のみ)
	2 ⁴	74±0.5 μ sec	
	2 ³	65±0.5 μ sec	
	2 ²	86±0.5 μ sec	
	2 ¹	104±0.5 μ sec	
	2 ⁰	107±0.5 μ sec	
	Activation	98±0.5 μ sec	

注. アンサバックパルス位置は、レンジパルスを基準とした位置を示す。

(2/2)保安用コマンド一覧

コマンド項目	Numberコマンド組合せ	フォトカプラ番号	備考
B3-EPT-STOP	2 ¹ , 2 ⁰ , N _A	K10	優先コマンド CONTNo.1
B3-SO	2 ⁴ , 2 ³ , N _A	K11	優先コマンド CONTNo.10

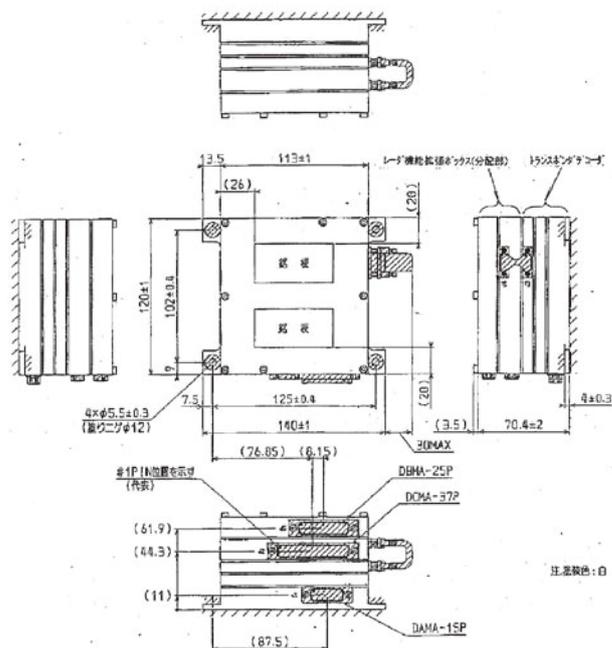


図5 トランスポンダデコーダ/レーダ機能拡張ボックス (分配部)外観図

表5 レーダ機能拡張ボックス 主要性能

項目	性能
VIDEO CHK 信号入力	2V _{P-P} (50Ω)
VIDEO CHK 出力信号	2V _{P-P} (50Ω)
TLM 信号出力	0～+2V (受信レベルモニタ範囲: -30dBm～-80dBm) (RESET 時間: 10msec)
コマンド信号入力数	2 信号 (CM-B1, CM-B2)
コマンド信号出力数	2 信号×2 系統 (CM-A1, CM-B1, CM-A2, CM-B2)
タイマ信号入力数	2 信号 (B2 CM ARM, B2 CM ARM RESET)
ARMING ステータス出力	ARM 状態: High RESET 状態: Low
消費電流	+18V: 200mA 以下 -18V: 100mA 以下

2.3. アンテナ切替器ドライバ/レーダ機能拡張ボックス (計測部)

アンテナ切替スイッチドライバ部は、当初の設計から約20年間にわたり同じものを用いてきたが、近年その回路部品の一部に入手困難なものが現れてきたため、最新部品を盛り込んだ形で新規設計がなされた。また、CRTの受信レベルとアンテナ切り替えステータスをテレメトリデータによりモニタする機能も追加された。アンテナ切り替えの動作は、CRT受信レベルが -60dBm を下回ると 90° 側のアンテナと 270° 側のアンテナが1秒周期で切り替わり、 -60dBm 以上信号が入力された時点でアンテナが固定されるシステムになっている。

本アンテナ切替器はM-V-5号機で初めて搭載される計画であったが、アンテナ切り替えの挙動に不具合が発見されたため、M-V-5号機では従来のアンテナ切替器が搭載された。その後の調査により、回路がノイズに対して弱い事が主たる不具合原因であると考えられたため、ノイズに強い回路設計に改修が施された。M-V-6号機以降は、安定したアンテナ切り替え動作をしている。

図6にアンテナ切替器ドライバの外観図を、表5にレーダ機能拡張ボックスの主要性能を示す。図6で示すようにアンテナ切替器ドライバはレーダ機能拡張ボックスと抱き合わせる形で組み込まれている。

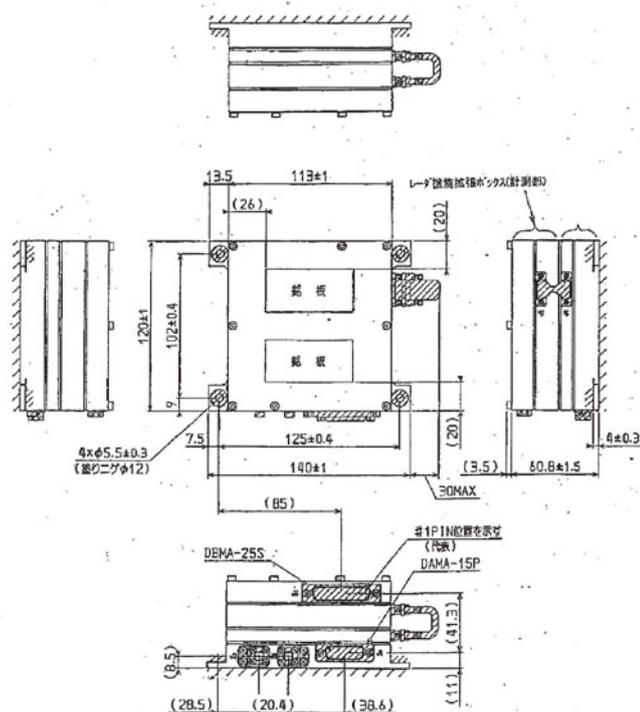


図6 アンテナ切替器ドライバ/レーダ機能拡張ボックス (計測部)外観図

3. 飛翔結果

M-V-6号機以降、アンテナ切替器からCRT受信レベルとアンテナ切替ステータスがテレメトリデータとしてモニタ出来るようになってきている。以下にM-V-6, 7, 8号機のCRT受信レベルとアンテナ切替ステータスのテレメトリデータを示す。

3.1. M-V-6号機

M-V-6号機のCRT3M受信レベルを図7に、CRT3Mのアンテナ切替ステータスを図8に示す。X+347秒の第3段姿勢反転開始以降、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ているが、X+425秒までアンテナは切り替わることなく正常に追跡が行われている。その後、しばらく受信レベルが安定していたが、図7で示すようにX+439.5秒以降は、アンテナ切替器のスレッシュホルドレベル-60dBmを下回り、アンテナが1秒周期で切り替わっている。なお、第2段モータ燃焼中のX+75秒からX+150秒の間にて、スレッシュホルドレベルを瞬間的に下まわる事が多数生じているが、その間においてもアンテナ切替器は動作していない。これは、噴煙の影響等による急峻なレベルの落ち込みに対してロバストな設計がアンテナ切替器に採用されている為であり、ある一定時間以上スレッシュホルドレベルを下回らなければアンテナ切替器は動作しないような設計になっている。そのため、1/2段分離やNF開頭の瞬間、また、第2段モータの燃焼ガスによる影響を受けている時間帯においてもアンテナ切替器は作動せず、ロケットを安定して追跡出来ている。

図9と図10にCRT5Mの受信レベルとCRT5Mのアンテナ切替ステータスを示す。第2段モータの噴煙ガスによる電波減衰のためX+137秒からX+141秒までの4秒間、アンテナ切替器が作動している。しかし、その間もCRT5Mの受信感度以上であるため、ロケット追跡に支障は無く正常に追跡が行われている。また、X+347秒の第3段姿勢反転開始以降も、時々アンテナ切替器が作動している時間帯があるが、正常に追跡ができています。

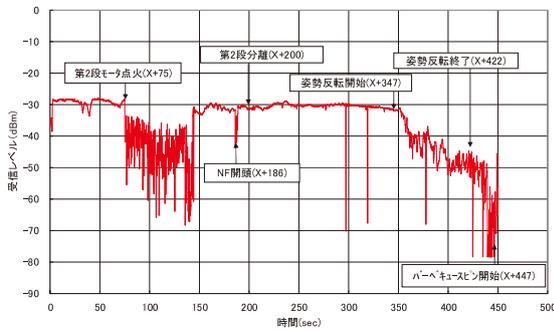


図7 CRT3M受信レベル (M-V-6)

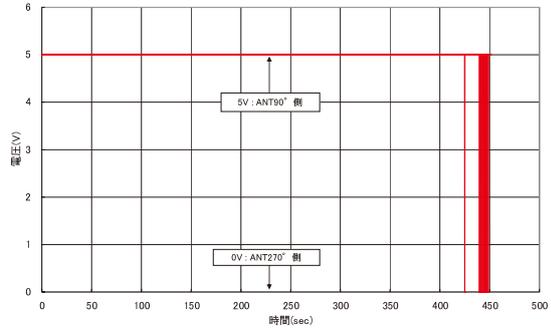


図8 CRT3Mアンテナ切替ステータス (M-V-6)

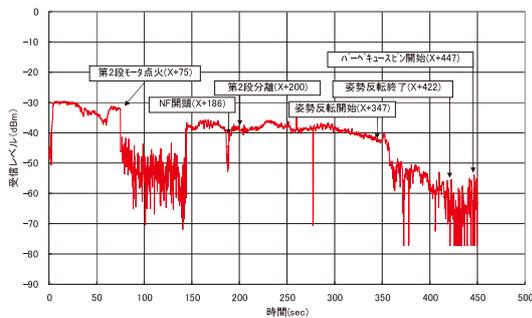


図9 CRT5M受信レベル (M-V-6)

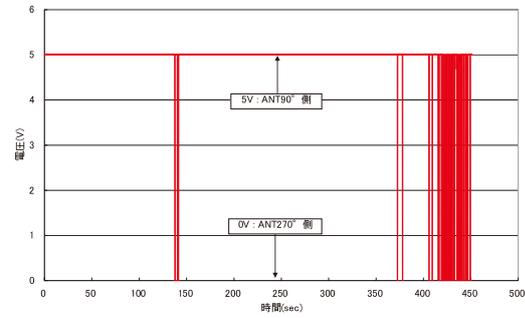


図10 CRT5Mアンテナ切替ステータス (M-V-6)

3.2. M-V-8号機

M-V-8号機のCRT3M受信レベルを図11に、CRT3Mのアンテナ切替ステータスを図12に示す。本号機は、南打ちの軌道であったため、東打ちの軌道ほどドリック角度が小さくなる事が無く、第2段モータ燃焼中の噴煙ガスの影響が少なくCRT受信レベルも安定している。X + 422秒以降は、第3段姿勢反転によるレベル低下が見られるが、X + 449秒に地上の追跡局がCPUスレーブに移行するまでの間、アンテナ切替器が作動することなく安定した追跡が行われている。

図13と図14にCRT5Mの受信レベルとCRT5Mのアンテナ切替ステータスを示す。X + 422秒の姿勢反転開始以降、受信レベルが大きく低下しアンテナ切替器が作動している。これは、CRT3Mを追跡している新精測レーダ局とCRT5Mを追跡している精測レーダ局のアンテナ利得には約6dBの差があるため、回線にマーヅンの少ないCRT5M系において、アンテナ切替器が作動したものと考えられる。ただし、この間もロケット追跡は正常に行われている。

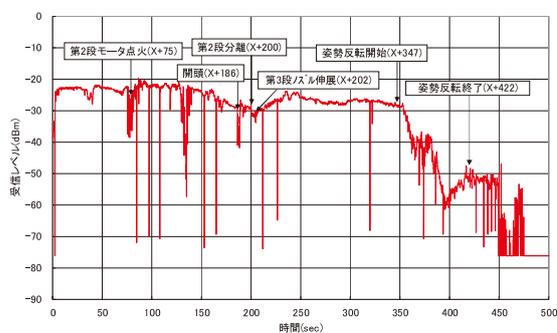


図11 CRT3M受信レベル (M-V-8)

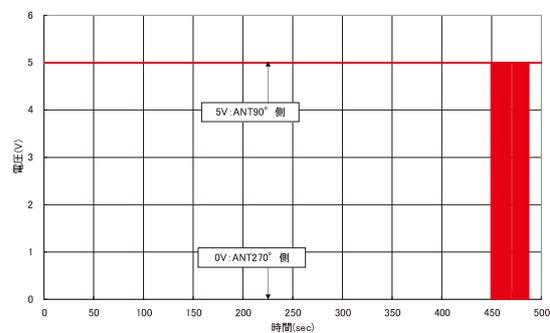


図12 CRT3Mアンテナ切替ステータス (M-V-8)

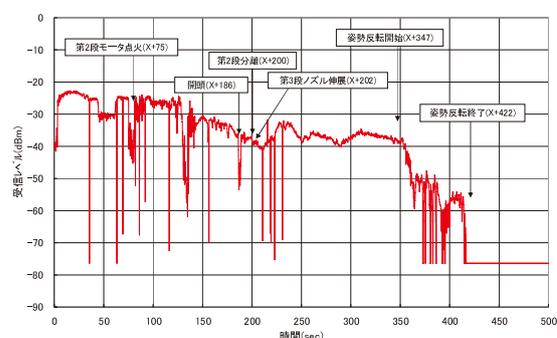


図13 CRT5M受信レベル (M-V-8)

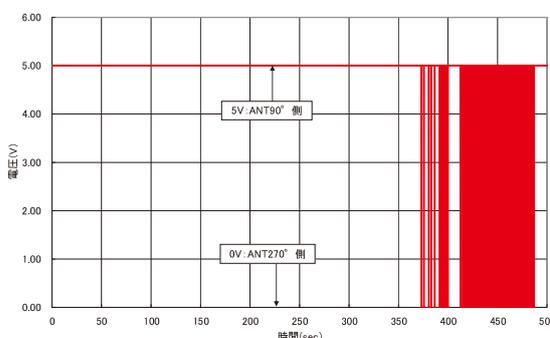


図14 CRT5Mアンテナ切替ステータス (M-V-8)

3.3. M-V-7号機

M-V-7号機のCRT3M受信レベルを図15に、CRT3Mのアンテナ切替ステータスを図16に示す。本号機もM-V-8号機同様、南打ちの軌道であったため第2段モータ燃焼中の噴煙ガスの影響が少なくCRT受信レベルも安定している。加えて、第3段姿勢反転も実施しなかったため、X + 487.4秒に追跡を終了するまでの間、アンテナ切替器が作動することなく安定した追跡が行われた。

図17と18にCRT5Mの受信レベルとCRT5Mのアンテナ切替ステータスを示す。X + 468秒付近でアンテナ切替器が作動している時間帯があるが、X + 476.2秒に追跡を終了するまでの間、安定した追跡が行われた。

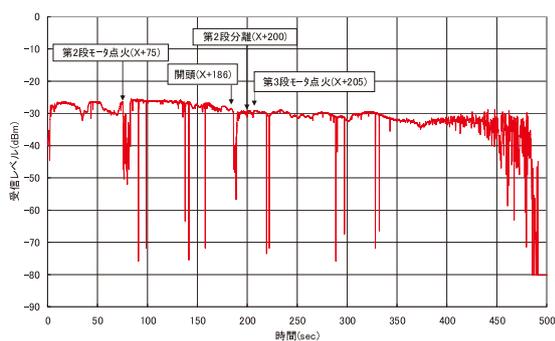


図15 CRT3M受信レベル (M-V-7)

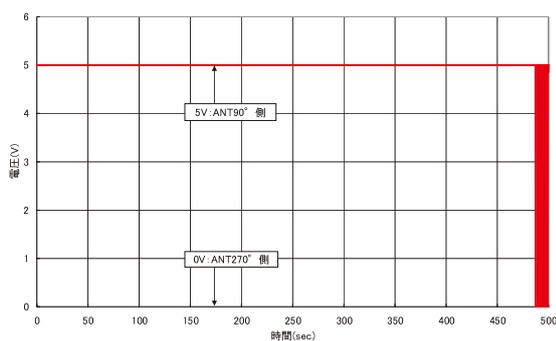


図16 CRT3Mアンテナ切替ステータス (M-V-7)

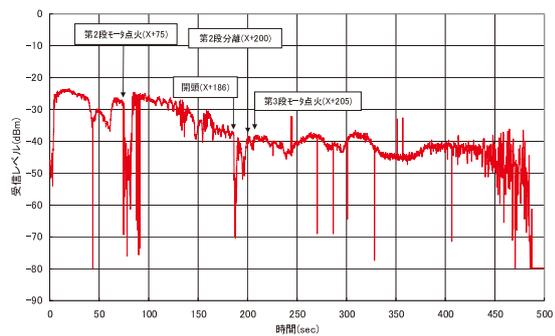


図17 CRT5M受信レベル (M-V-7)

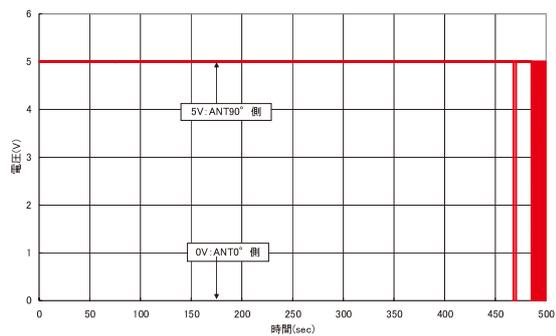


図18 CRT5Mアンテナ切替ステータス (M-V-7)

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、飛翔保安の観点から必要不可欠な項目となっている。そのため、レーダ系自身がロバストな設計になっていることに加え、他のシステムから影響を受けない独立なシステムであることも要求されている。M-Vロケットのレーダ系は、搭載と地上を含めて完全に独立した追跡システムが2系統存在する。さらに、他のシステムから独立していることは勿論、レーダ同士も互いに独立したシステム構成になっている。これらは、全てのロケット打上げに該当することであり、次期固体ロケットにも適用されるべき思想である。

次期固体ロケットに対して有効かどうかは分からないが、M-Vロケット搭載のレーダに固有な機能である「アンテナ切替機能」と「フリーラン機能」について述べる。

1. アンテナ切替機能

ロケットの径が大きいため、アンテナの多素子化は放射パターンの切れ込みを招き得策ではない。一方、アンテナ切替方式の場合、アンテナパターンの劣化を防げることに加え、電力分配されることなく1つのアンテナから送受信ができる。そのため、回線上のマージンを確保する事が可能となる。また、アンテナの切り替えは、地上のアップリンクレベルに応じて作動するようになっており、レーダ系のみで閉じた独立したシステムとなっている。

2. フリーラン機能

一般に搭載レーダトランスポンダは、地上からのアップリンクに対して応答する仕様となっている。一方、M-Vロケットに搭載用レーダトランスポンダの場合、地上のアップリンクが無くても一定の繰り返し周期でレンジパルスを送出している。これがフリーランと呼ばれる機能である。勿論、地上のレーダ局と同期が取れていないのでロケットの位置標定は出来ないが、アングルトラッキングのみは可能である。

5. まとめ

M-Vロケット搭載レーダシステムの概要とM-V-6号機から8号機までの飛翔結果について報告した。4号機までのシステムと大きく異なる点は、CRT2台がB3PL部に搭載された事により消感まで冗長追跡が可能となった点と、CRT受信レベルとアンテナ切替ステータスをテレメトリデータとして出力させる機能が追加された点である。いずれも、所期の目的を十分に果たす事ができ、M-Vロケットのレーダによる追跡システムの確立に至っている。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。

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] 廣川春任, 鎌田幸男, 斎藤宏文, 水野貴秀, 豊留法文, 山田三男, 市川満, ”M-V型ロケットのレーダ追跡” 宇宙科学研究所報告, 特集, 第47号2003年3月