

M-Vロケットの搭載アンテナ

川原康介*, 鎌田幸男*

概要

M-Vロケットは、それ以前のM-3S IIロケットと形状が大きく異なるため、ほとんど全ての搭載アンテナについて新規開発を行った。その後、打上げ回数を重ねることで明るみになった問題点を、飛翔結果をもとに改修し、M-Vロケット搭載用アンテナとして最適な設計に至った。本報告では、開発経緯とその性能について述べる。

1. はじめに

M-Vロケット搭載アンテナは飛翔結果をもとに改良を重ね、M-Vロケットに最適なアンテナへと進化してきた。また、飛翔保安の観点から第3段基本計器部 (B3PL) に保安コマンド受信機1台を新たに追加し、ロケット追跡用のCバンドレーダトランスポンダが2台ともB3PL部に搭載されるなどM-Vロケット自身も改良が行われており、それに伴うアンテナ設計の仕様変更も行われてきた。

本報告では、M-Vロケット搭載用アンテナが最適化されるまでの経緯を振り返ると共にその電気特性について報告する。

2. アンテナ開発の概要

M-V-1号機からM-V-7号機に至るまでに、以下の項目について改善・変更が行われてきた。

1. Lバンドレーダトランスポンダを廃止し、Cバンドレーダトランスポンダ2台による追跡に変更(#1→#3)
2. B3PL搭載Cバンドレーダトランスポンダアンテナの後方指向性の改善(#3→#4)
3. Sバンドアンテナ切替器の制御方式をアップリンク受信レベルによる判定から、CNからのロール角判定方式に変更(#4→#5)
4. TVテレメータ用アンテナの素子数を2素子に変更(#4→#5)
5. Cバンドレーダトランスポンダ5M (CRT5M) の搭載位置をB2PL部からB3PL部に変更し、給電方式をそれまでの2素子逆相給電からアンテナ切替方式に変更(#5→#6)
6. 保安用コマンドアンテナをB3PL部にも搭載(#5→#6)

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

表1に、各号機毎に搭載されたアンテナの種類、数量、搭載位置を示す。

表1 搭載アンテナリスト

搭載位置	M-V-1		M-V-3		M-V-4		M-V-5		M-V-6 M-V-7 M-V-8	
後部筒	TMV-ANT	2	TMV-ANT	2	TMV-ANT	2	TMV-ANT	2	TMV-ANT	2
B2PL	TMV-ANT	2	TMV-ANT	2	TMV-ANT	2	TMV-ANT	2	TMV-ANT	2
	CMD-ANT	2	CMD-ANT	2	CMD-ANT	2	CMD-ANT	2	CMD-ANT	2
	STM-ANT	2	STM-ANT	2	STM-ANT	2	STM-ANT	2	STM-ANT	2
	TVTM-ANT	1	TVTM-ANT	1	TVTM-ANT	1	TVTM-ANT	2	TVTM-ANT	2
	LRT-ANT	2	CRT5M-ANT	2	CRT5M-ANT	2	CRT5M-ANT	2		
B3PL	CRT3M-ANT	2	CRT3M-ANT	2	CRT3M-ANT	2	CRT3M-ANT	2	CRT3M-ANT	2
	CRT3M-CPA	2	CRT3M-CPA	2	CRT3M-CPA	2	CRT3M-CPA	2	CRT3M-CPA	2
	STM-ANT	2	STM-ANT	2	STM-ANT	2	STM-ANT	2	CRT5M-ANT	2
	STM-CPA	2	STM-CPA	2	STM-CPA	2	STM-CPA	2	CRT5M-CPA	2
									STM-ANT	2
									STM-CPA	2
									CMD-ANT	2
NF	CRT3M-ANT	2	CRT3M-ANT	2	CRT3M-ANT	2	CRT3M-ANT	2	CRT3M-ANT	2
	STM-ANT	2	STM-ANT	2	STM-ANT	2	STM-ANT	2	CRT5M-ANT	2
									STM-ANT	2
合計		23		23		23		24		30

「略語」

*数字は数量を表す

TMV-ANT	PCMテレメータ(TMV)アンテナ
CMD-ANT	コマンドアンテナ
TVTM-ANT	テレビテレメータアンテナ
LRT-ANT	Lバンドレーダトランスポンダアンテナ
CRT5M-ANT	Cバンドレーダトランスポンダ(5M)アンテナ
CRT3M-ANT	Cバンドレーダトランスポンダ(3M)アンテナ
CRT5M-CPA	Cバンドレーダトランスポンダ(5M)カップリングアンテナ
CRT3M-CPA	Cバンドレーダトランスポンダ(3M)カップリングアンテナ
STM-ANT	Sバンドテレメータアンテナ
STM-CPA	Sバンドテレメータカップリングアンテナ

3. アンテナの電気特性

3.1. 後部筒搭載アンテナ

B1計測データはB1-PCMテレメータから伝送される。しかし、燃焼ガスの影響を避けるために、第1段燃焼中はB2PL搭載のPCMテレメータアンテナから送信される。その後、1/2段分離直前にタイマーにより後部筒搭載のPCMテレメータアンテナに切り替わる。図1に後部筒搭載PCMテレメータアンテナの搭載位置を示す。

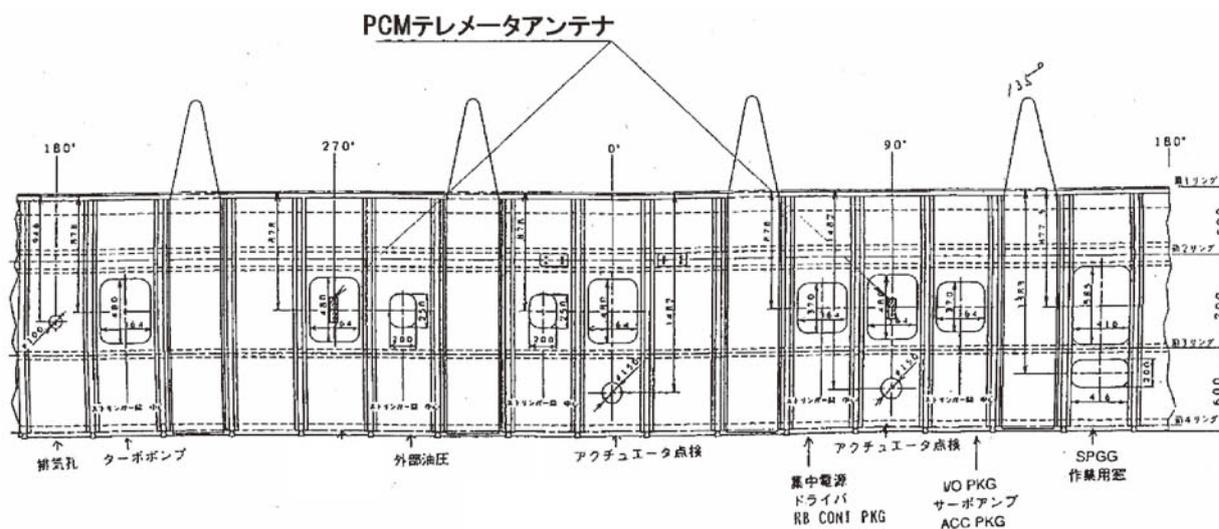


図1 後部筒搭載アンテナの搭載位置

3-1-1. PCMテレメータアンテナ (B1-TMV-ANT)

一般にロケット搭載用アンテナには、ロケットの姿勢に関わらず確実な通信回線が得られるように無指向性アンテナが要求される。しかし、M-Vロケットの径は2.5mと波長に対して十分大きい為、アンテナの多素子化による無指向性のアンテナ系を構成することは、素子数の増加とパターンの劣化を招き得策ではないため、2素子切替方式を採用している。

この切替信号はSバンドアンテナ切替器から得ており、地上局に対向している側のアンテナより伝送される。この方式では、1つのアンテナに送信出力の全てが入力されることになるため、耐電力性能は2W以上必要になる。しかし、従来の伝送線路型アンテナは耐電力が低く、最も放電しやすい気圧の約0.2Torrでは約0.6Wで放電する。そこで、耐電力性能の向上と空力加熱に対する耐熱性等の改善を図るため図2に示すように線路部を誘電体カバーの中に埋め込んだ構造のアンテナを開発している。このカバーの材料には耐熱性が良く、電気特性も優れている物としてセラミック材の中からボロンナイトライドを選定している。本アンテナは気圧に対する耐電力特性を測定した結果、1Torrで8.5W、最も放電しやすい0.2Torrでも3.8Wの耐電力特性が得られている[1]。セラミック製のアンテナカバーをそのまま搭載するとロケットの振動環境により破損してしまうため、アンテナカバー底面に導電性の緩衝材としてカーボンフィルム (GRAFOIL) を貼り付けている。さらに、ロケットボディとの固定部分であるネジ留め部の肉厚を厚くし、振動によりクラックが生じないように設計されている。本アンテナの外観図を図3に、放射パターンを図4にそれぞれ示す。なお、 $\theta = 0^\circ$ 方向が機体後方を示す。アンテナ全周のパターンは図4に示すように、アンテナ取付面側はほぼ無指向性のブロードな放射特性が得られており、反対側のパターンはこれと対向する位置に取り付けられるアンテナの守備範囲となり全球面で無指向性のアンテナ系を構成する。図5には、第2段基本計器部 (B2PL)に搭載されているPCMテレメータアンテナ (B2-TMV-ANT)を含めたシステム系統図を示す。

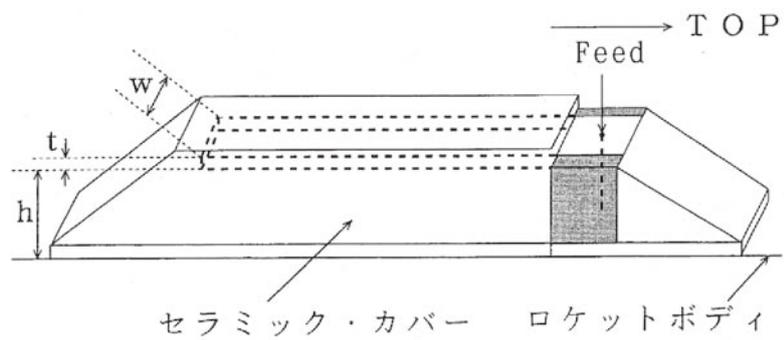


図2 TMVアンテナ構造図

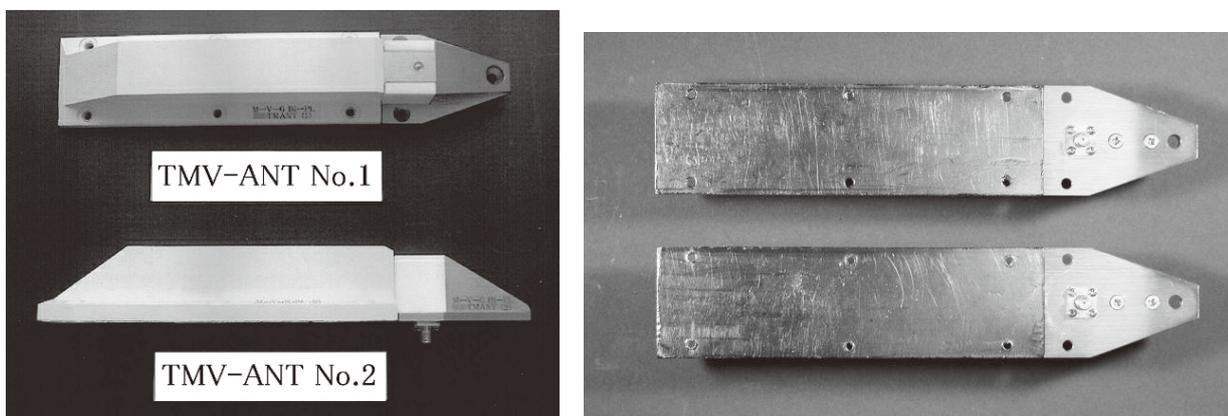


図3 TMVアンテナ外観図

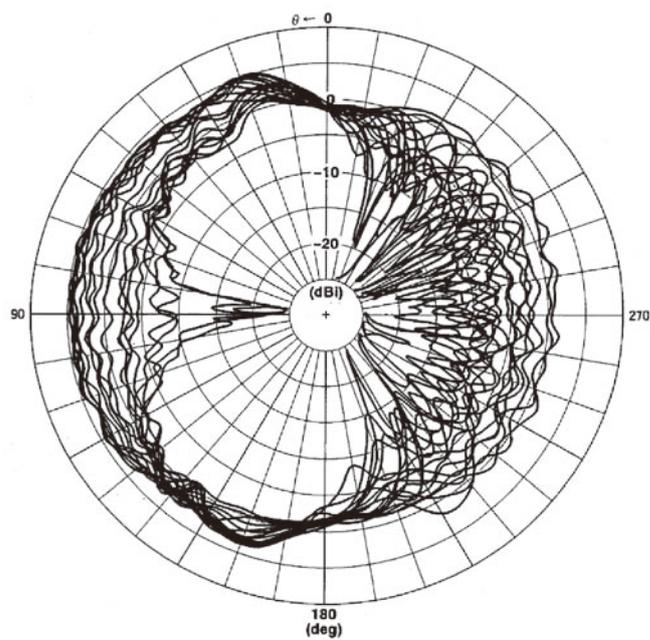


図4 TMVアンテナ放射パターン

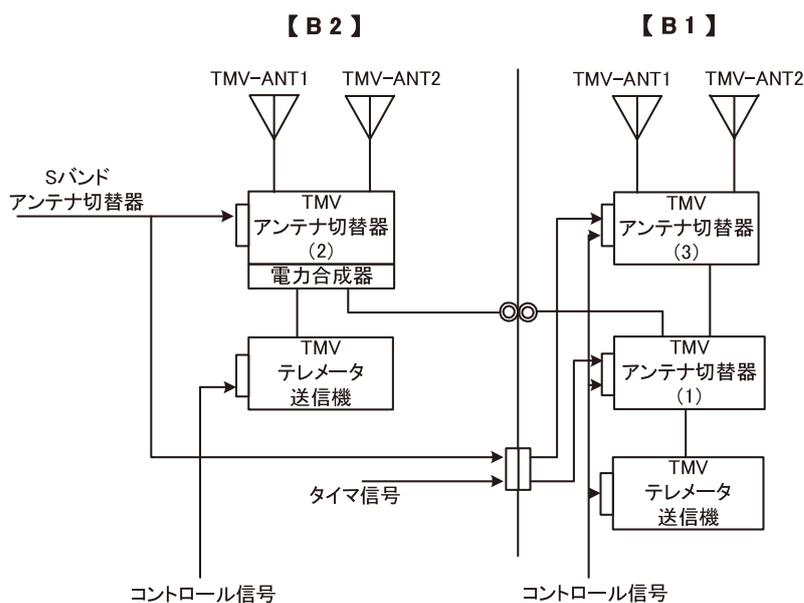


図5 TMVアンテナ系統図

3.2. 第2段搭載アンテナ

第2段基本計器部 (B2PL) には、PCMテレメータアンテナ (B2-TMV-ANT) とコマンドアンテナ (B2-CMD-ANT), Sバンドテレメータアンテナ (B2-STM-ANT), TVテレメータアンテナ (B2-TV-TM-ANT) の4種類のアンテナが搭載されている。図6に各アンテナの搭載位置を示す。

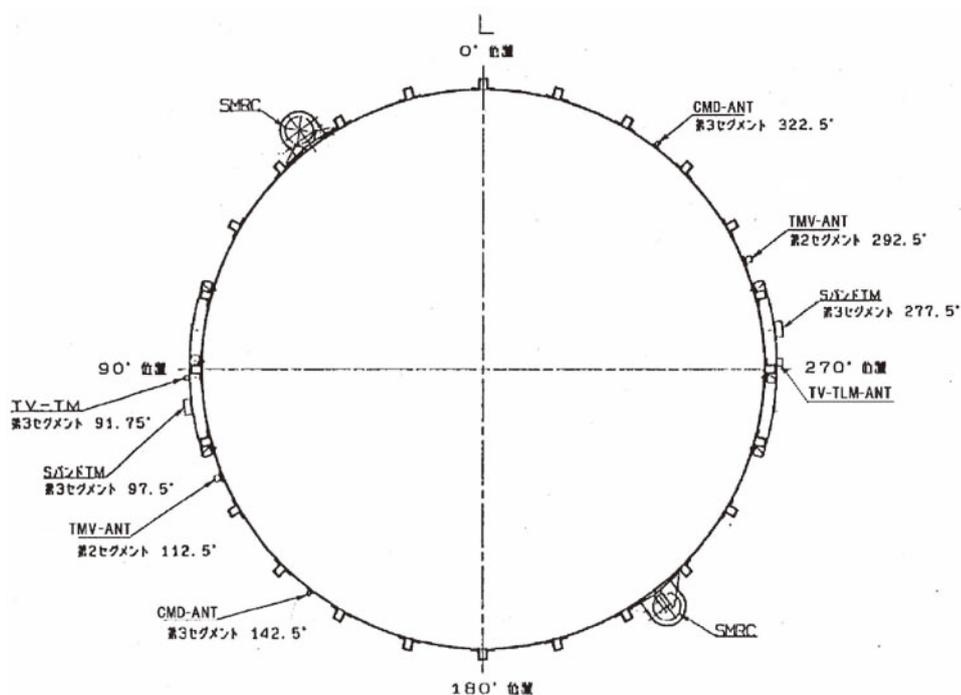


図6 B2PL搭載アンテナの搭載位置

3.2.1. コマンドアンテナ (B2-CMD-ANT)

TMVアンテナ同様、コマンドアンテナ系に関してもロケットの直径が大きいため2素子切替方式を採用している。コマンドアンテナ切替器では、アンテナの放射パターンを等価的になくすために一定間隔で切替動作が常に行われている。図7にコマンドアンテナ系統図を示す。6号機以降、コマンド受信機の搭載位置がB3PLへ変更になったことにより、コマンドアンテナもB2とB3にそれぞれ2素子ずつ搭載されており、NF開頭直後にB2-CMD-ANTからB3-CMD-ANTへアンテナが切り替わる。B2-CMD-ANTの構造はTMV-ANTと同じであり、図8にその外観図を示す。また、図9に放射パターンを示す。

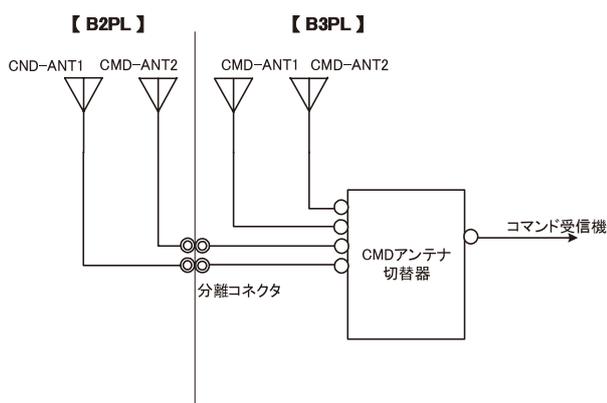


図7 コマンドアンテナ系統図

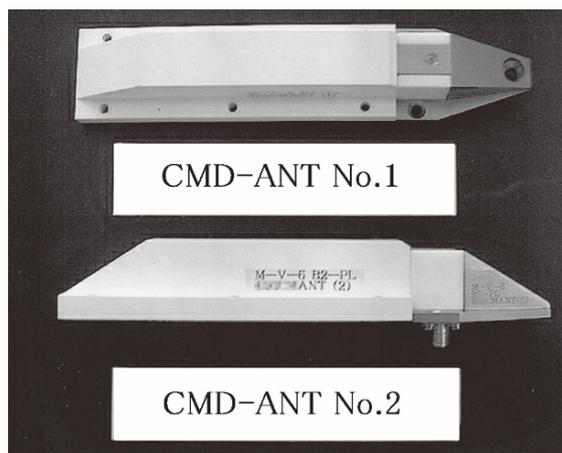


図8 B2-CMD-ANT外観図

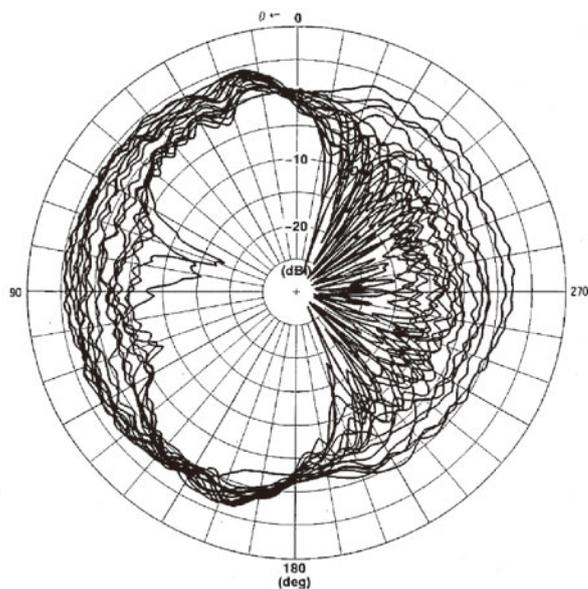


図9 コマンドアンテナ放射パターン

3.2.2. PCMテレメータアンテナ (B2-TMV-ANT)

本アンテナは、後部筒搭載PCMテレメータアンテナ (B1-TMV-ANT) と全く同じ構造を持つ。詳細は既に述べてあるので省略する。

3.2.3. Sバンドテレメータアンテナ (B2-STM-ANT)

Sバンドの周波数になると波長が約13cmと小さくなるため、高さ約5cmのストリンガーが無視できなくなり、放射特性は大きく乱される。この影響を除去するために、ストリンガー上にアンテナ取付板を設け、その上にアンテナが取り付けられている。このアンテナ素子は、優角コーナリフレクタ付きモノポールアンテナ[2]で、放射パターンは図10に示すようにロケット後方に対して良好な特性を得ている。このアンテナ系も2素子切替方式により、地上局に対向したアンテナに切り替えることで無指向性アンテナを構成している。また、アンテナの軽量化のため、金属部分からなる無垢の部分をくり貫いた構造になっている。本アンテナの外観図を図11に示す。

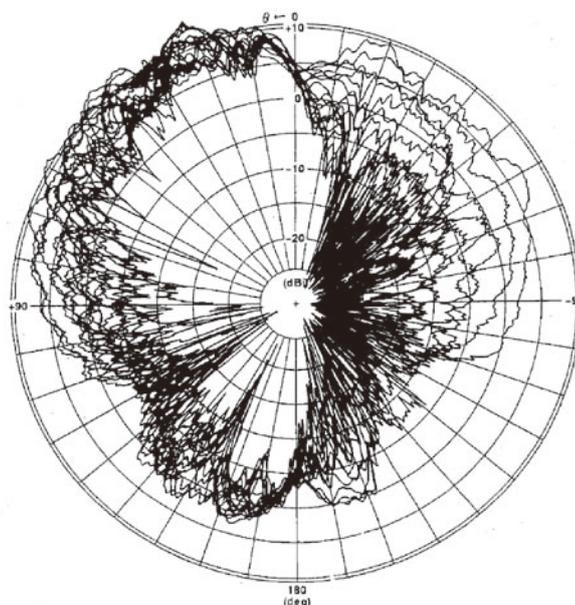


図10 B2-STM-ANT放射パターン

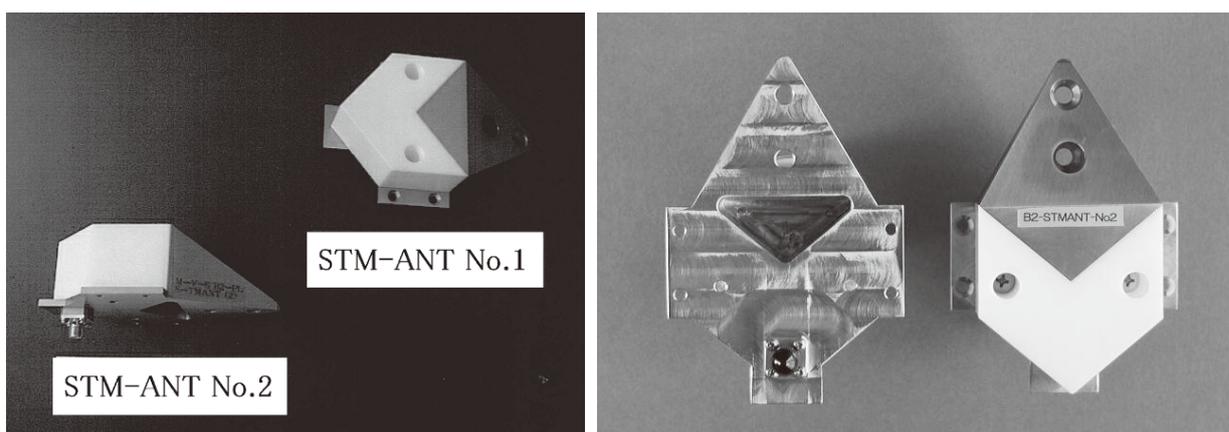


図11 B2-STM-ANT外観図

3.2.4. TVテレメータアンテナ (B2-TVTM-ANT)

ストリンガーによる影響を除去するため、このアンテナもアンテナ取付板上に装着されている。この時の放射特性を図12に示す。このようにロケット後方に優れた放射特性が得られている。本アンテナの外観図を図13に示す。

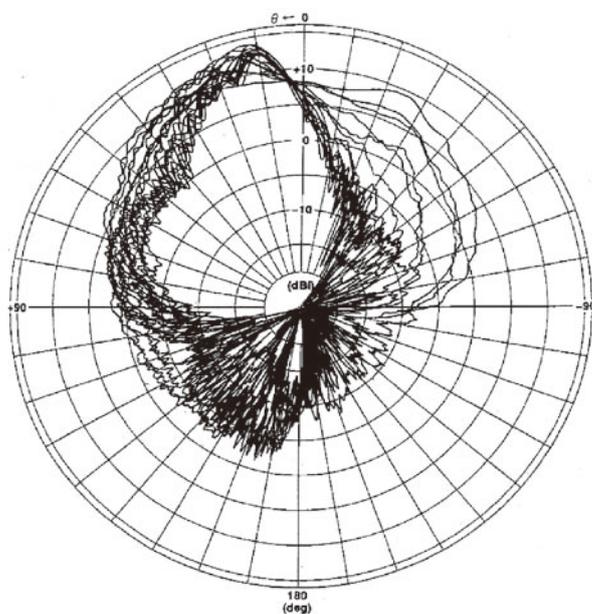


図12 B2-TVTM-ANT放射パターン

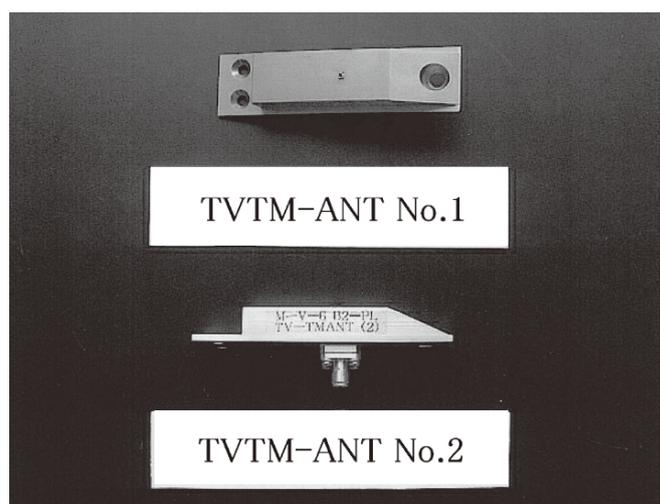


図13 B2-TVTM-ANT外観図

3.3. 第3段搭載アンテナとNF外板部搭載アンテナ

M-VのNFは、電波を透過しないCFRP製で出来ており、NF内部に搭載されるCバンドレーダトランスポンダ（CRT）とSバンドテレメータ（STM）、コマンド受信機（CDR）は、NF開頭までの通信を確保するために何らかの方策が必要となる。先に述べたように、CDRに関してはB2PL部にもアンテナが搭載されており、NF開頭直後にB2PL搭載アンテナからB3PL搭載アンテナにアンテナを切り替える方式を採っている。一方、CRTとSTMにおいては、B3PL部とNF外板にそれぞれアンテナ設け、NF開頭と同時にアンテナを切り替える方式を採用している。アンテナの切り替えは、図14に示すようにRFスイッチと分離コネクタの機能を兼ね備えたカップリングアンテナ（CPA）により行われる[3]。これにより、アンテナの切り替えとNFの開頭を常に同時に行うことが出来る。

図15にCPA分離機構を示す。NFの開頭によりバネで押さえられたスライドブロックがNFに固定されたワイヤーにより引かれて上に移動し、アンテナ本体の側壁の穴に入っていたボールが移動することによりロックが解除されて分離する。分離時の張力はバネの強度を変えることにより最適な値に調整できる。このような構造にすることにより、小さな引抜荷重で大きな耐震性が得られる。CPAの垂直方向引抜荷重と給電ロスを表2に示す。

CPAは厳しい機械環境下においても外れないように強く結合されている必要が有る。その一方で、NF開頭時にはスムーズに外れる必要があり、相反する要求がCPAには課せられている。そこで、厳しい振動・衝撃環境下でもCPAが外れないように、可動部を成す金属部分にざぐりをいれて可動部の軽量化を図っている。また、摺動部分を成すベアリングとボールが振動により融着しないように、結合部にテーパをつけ且つグリースにより摩擦を減らしている。これらの開発により、現在の最適化されたCPAの設計に至っている。

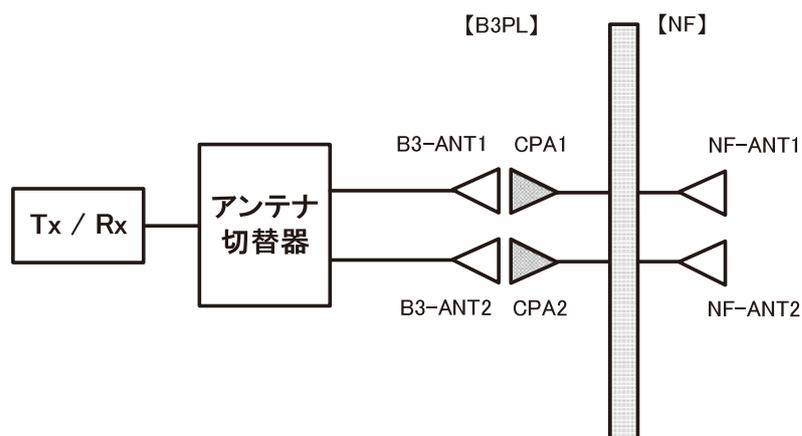


図14 B3PL/NF アンテナ構成図

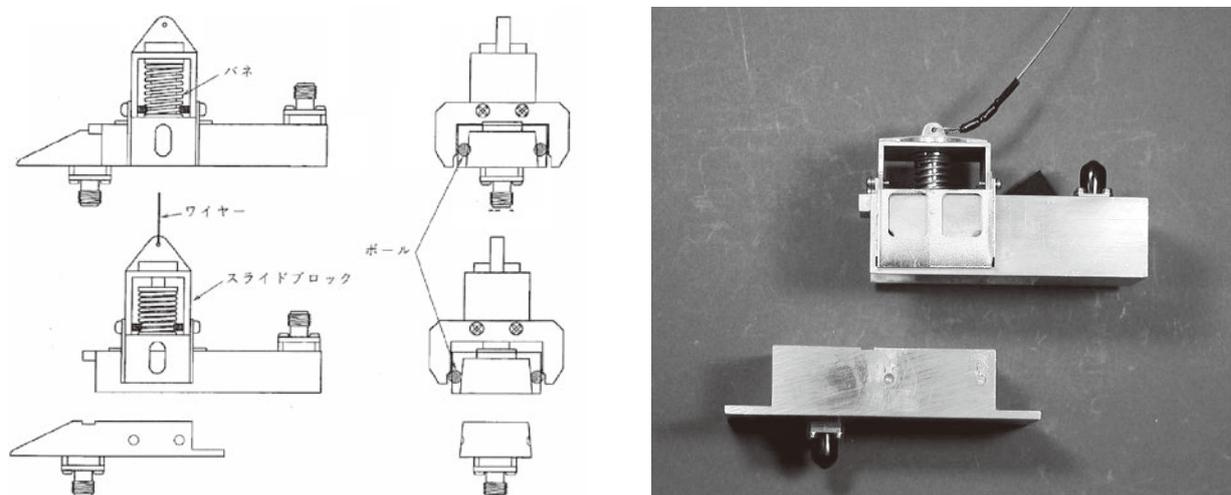


図15 CPA分離機構

表2 CPAの引抜荷重と給電損失

アンテナ	引抜荷重	カップリングロス
CRT-CPA	3.0kg~4.0kg	1dB 以内
STM-CPA	3.0kg~4.0kg	1dB 以内

B3PL部のアンテナは図16に示すような、アンテナ取付板に搭載される。また、アンテナ地板の面積を十分に確保する目的で、メッシュ状の反射板がアンテナ取付板直下の第3段モータ上部に取り付けられている（図17）。図18にアンテナの搭載位置を示す。

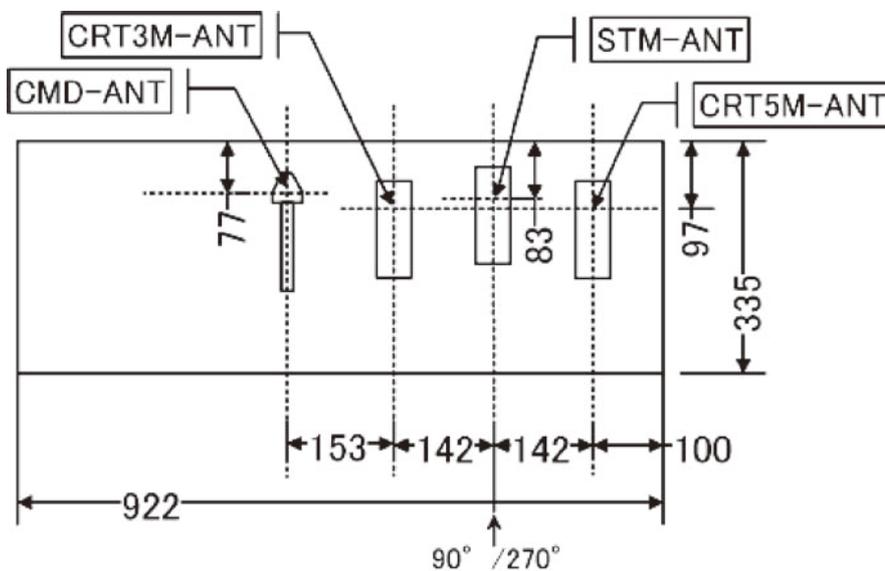


図16 B3PL アンテナ取付板

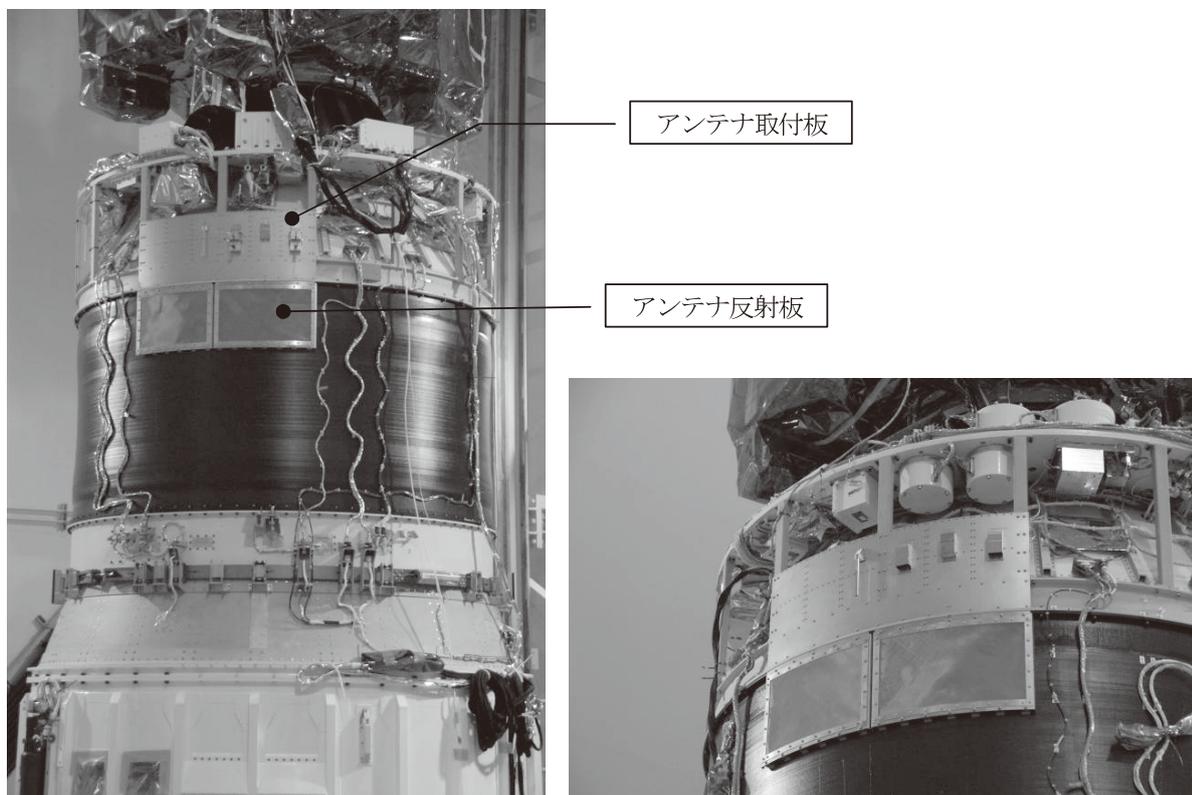


図17 B3PL アンテナ取付板と反射板

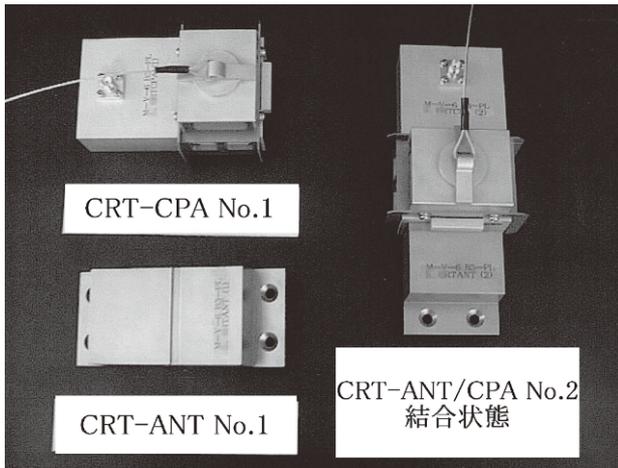


図19 B3-CRT-ANT/CPA外観図

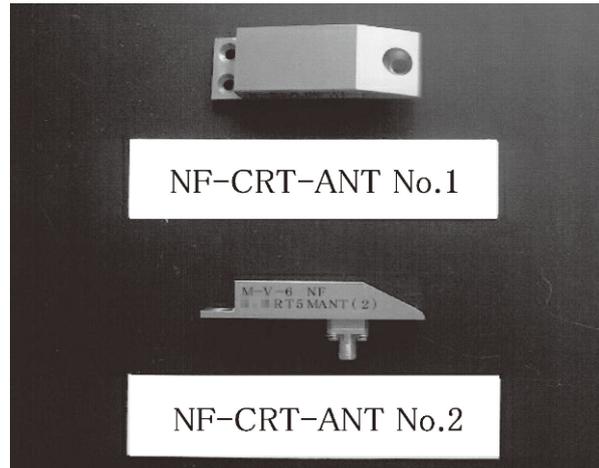


図20 NF-CRT-ANT外観図

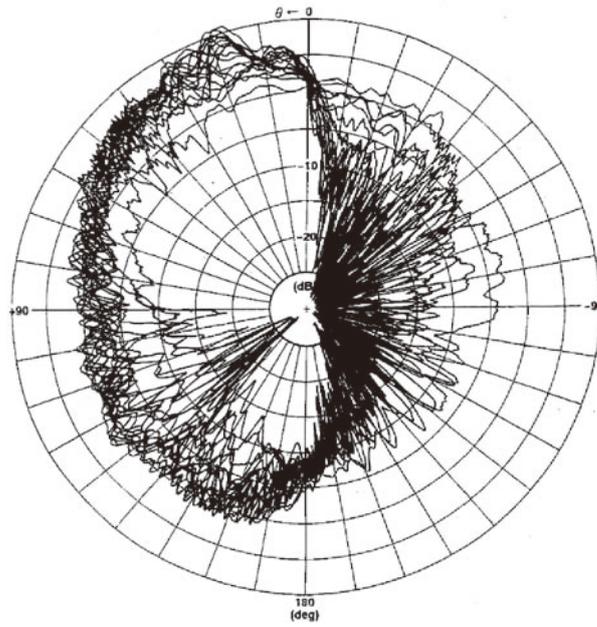


図21 B3/NF-CRT-ANT 放射パターン

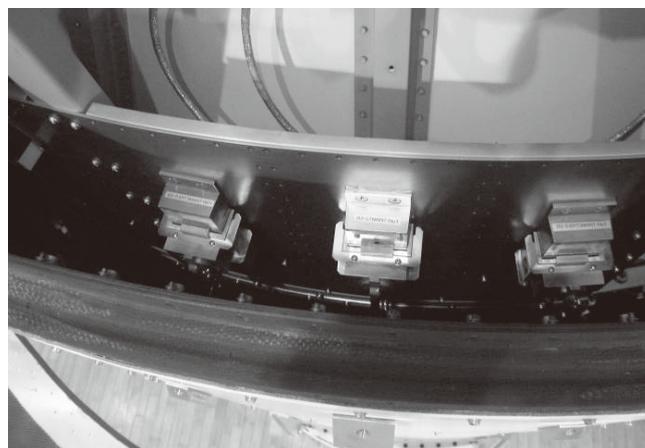
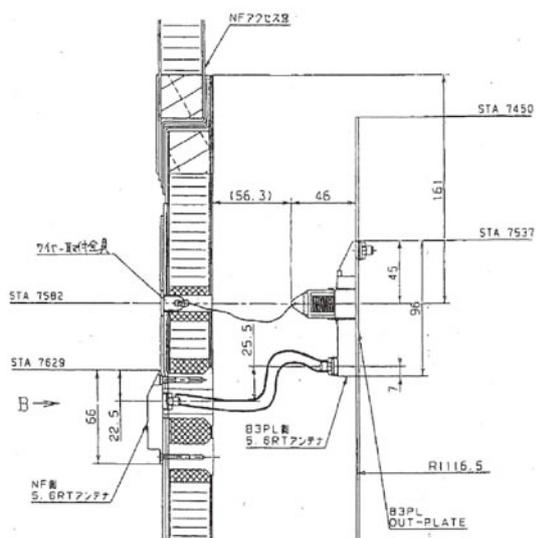


図22 B3/NF-CRT-ANT アンテナ取付位置関係

3.3.2. Sバンドテレメータアンテナ (B3-STM-ANT, B3-STM-CPA, NF-STM-ANT)

B2-STM-ANT同様、2素子切替方式が採用されており、その切替はCNからの切替信号により行われる。また、CRT同様CPAを介したB3搭載アンテナとNF搭載アンテナの切り替えが行われている。図23にSTM-CPAとSTM-ANTの外観図を示す。

NF外板部に搭載されるNF-SMT-ANTの外観図を図24に示す。NF-CRT-ANTと同様に誘電体装荷導波管アンテナである。図25に放射特性を、図26にアンテナ取付位置関係を示す。

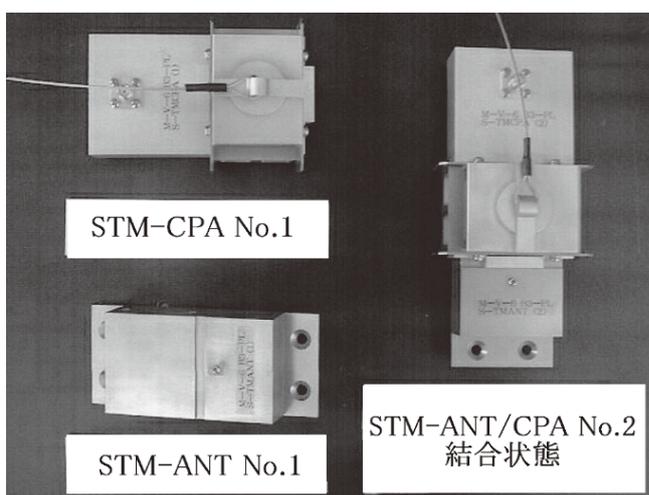


図23 B3-STM-ANTとCPA結合時の外観図

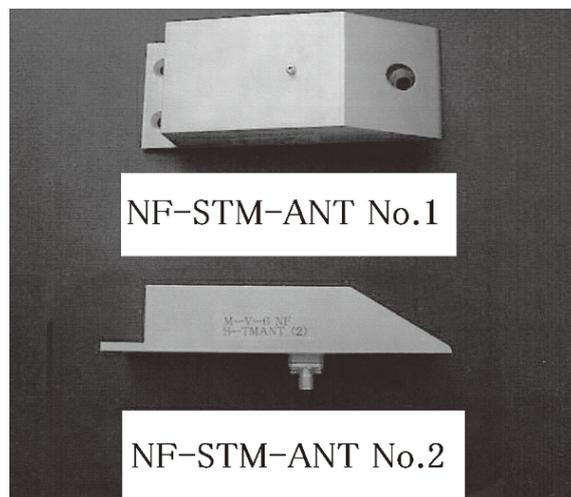


図24 NF-STM-ANT外観図

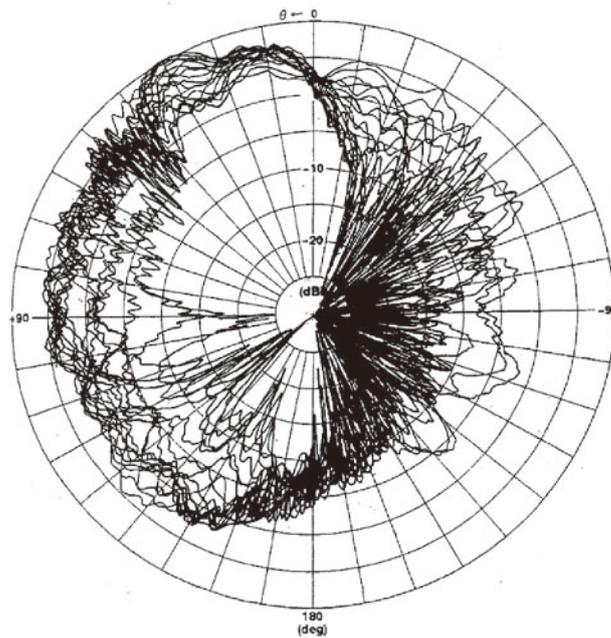


図25 B3/NF-STM-ANT 放射パターン

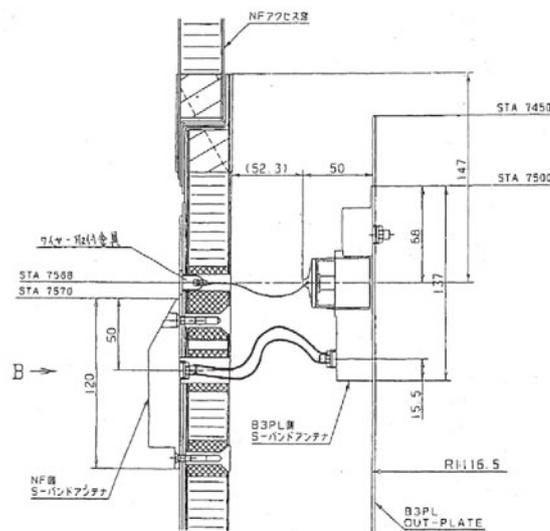


図26 B3/NF-STM-ANT アンテナ取付位置関係

3.3.3. コマンドアンテナ (B3-CMD-ANT)

本アンテナは、NF 開頭以降に有効となる。それ以前は、B2PL 搭載のアンテナを介して通信が行われる。詳細は、既に述べてあるので省略する。図27に外観図を示す。

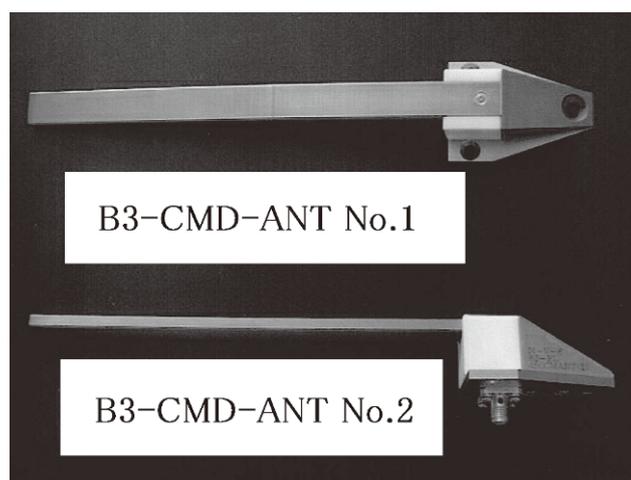


図27 B3-CMD-ANT 外観図

4. 電気特性試験及び環境試験

4.1. 電気特性試験

周波数の高いアンテナに関しては、アンテナ取り付け部を模擬した金属板を用いて電波暗室にて電気調整を行う。一方、周波数の低いTMVアンテナとCMDアンテナに関しては、ロケットボディの形状による影響が無視できない為、最終的にロケットへ取り付けられた状態で電気調整を行う。図28に電気調整の様子を示す。

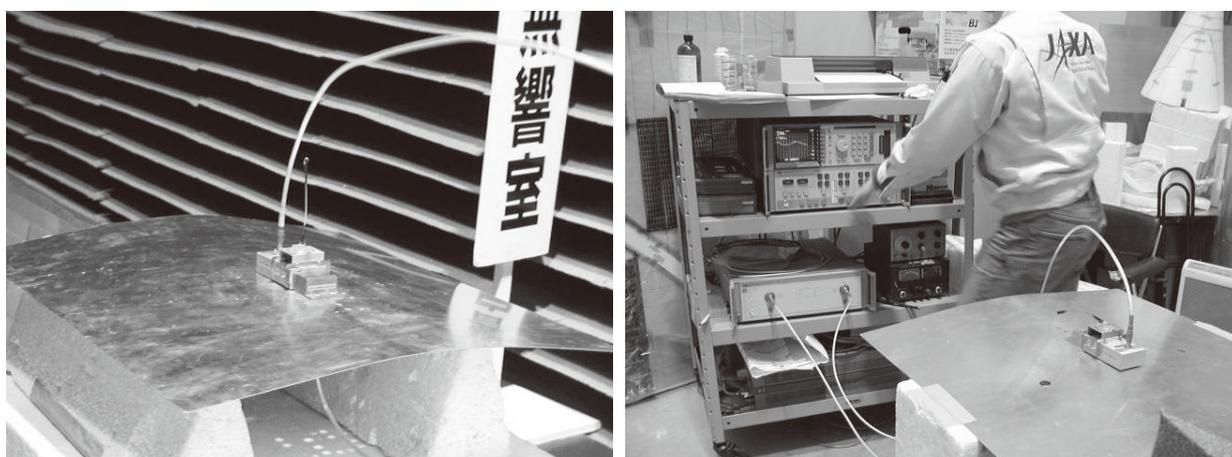


図28 電気調整の様子

4.2. 機械環境試験

ロケット搭載のアンテナに対して振動、衝撃試験を施す。各段の振動、衝撃試験レベルを表3～5に示す。機械環境試験の様子を図29, 30に示す。

表3 後部筒機械環境レベル

試験項目	QTレベル		ATレベル (QT-3dB)	
	ランダム振動	<面外>		
周波数		レベル	周波数	レベル
20-47Hz		0.08 G ² /Hz	20-47Hz	0.04 G ² /Hz
47-100Hz		10 dB/oct	47-100Hz	10 dB/oct
100-200Hz		1 G ² /Hz	100-200Hz	0.50 G ² /Hz
200-400Hz		6 dB/oct	200-400Hz	6 dB/oct
400-700Hz		4 G ² /Hz	400-700Hz	2.00 G ² /Hz
700-1500Hz		-14.6 dB/oct	700-1500Hz	-14.6 dB/oct
1500-2000Hz		0.1 G ² /Hz	1500-2000Hz	0.05 G ² /Hz
50.3Grms, 45s		35.61Grms, 30s		
<面内>				
周波数		レベル	周波数	レベル
20-40Hz		0.08 G ² /Hz	20-40Hz	0.04 G ² /Hz
40-151Hz		-6 dB/oct	40-151Hz	-6 dB/oct
151Hz	0.0057 G ² /Hz	151Hz	0.00286 G ² /Hz	
151-500Hz	10 dB/oct	151-500Hz	10 dB/oct	
500-2000Hz	0.3 G ² /Hz	500-2000Hz	0.15 G ² /Hz	
22.1Grms, 45s, 各軸		15.6Grms, 30s, 各軸		
低周波衝撃	<低周波衝撃>			
	40G × 10ms (半正弦波)		28.4G × 10ms (半正弦波)	
	3軸共通 各軸2回		3軸共通 各軸1回	
高周波衝撃	<高周波衝撃>			
	50-600Hz	6 dB/oct	実施せず	
	600-4000Hz	900 G		
3軸共通、各軸2回				

表4 B2PL機械環境レベル

試験項目	QTレベル		ATレベル (QT-3dB)		
	ランダム振動	<面外>			
周波数		レベル	周波数	レベル	
20-100Hz		3 dB/oct	20-100Hz	3 dB/oct	
100-1000Hz		0.6 G ² /Hz	100-1000Hz	0.301 G ² /Hz	
1000-2000Hz		-10.0 dB/oct	1000-2000Hz	-10.0 dB/oct	
27.9Grms, 45s		19.75Grms, 30s			
<面内>					
周波数		レベル	周波数	レベル	
20-100Hz		3 dB/oct	20-100Hz	3 dB/oct	
100-1000Hz		0.6 G ² /Hz	100-1000Hz	0.301 G ² /Hz	
1000-2000Hz		-10.0 dB/oct	1000-2000Hz	-10.0 dB/oct	
27.9Grms, 45s		19.7Grms, 30s			
低周波衝撃		<低周波衝撃>			
		40G × 10ms (半正弦波)		28.4G × 10ms (半正弦波)	
	3軸共通 各軸2回		3軸共通 各軸1回		
高周波衝撃	<高周波衝撃>				
			実施せず		

表5 B3PL 機械環境レベル

試験項目	QTレベル		ATレベル (QT-3dB)	
	周波数	レベル	周波数	レベル
ランダム 振動			<面外>	
	10-20Hz	0.02 G ² /Hz	10-20Hz	0.01002 G ² /Hz
	20-100Hz	8.6 dB/oct	20-100Hz	8.6 dB/oct
	100-200Hz	2 G ² /Hz	100-200Hz	1.00237 G ² /Hz
	200-400Hz	-3 dB/oct	200-400Hz	-3 dB/oct
	400-800Hz	1 G ² /Hz	400-800Hz	0.50119 G ² /Hz
	800-2000Hz	-7.6 dB/oct	800-2000Hz	-7.6 dB/oct
	36.4Grms, 45s		25.77Grms, 30s	
			<面内>	
	10-60Hz	0.08 G ² /Hz	10-60Hz	0.04009 G ² /Hz
	60-300Hz	1.7 dB/oct	60-300Hz	1.7 dB/oct
	300-450Hz	0.2 G ² /Hz	300-450Hz	0.10024 G ² /Hz
	450-600Hz	14.5 dB/oct	450-600Hz	14.5 dB/oct
	600-900Hz	0.8 G ² /Hz	600-900Hz	0.40095 G ² /Hz
900-2000Hz	-7.8 dB/oct	900-2000Hz	-7.8 dB/oct	
26.5Grms, 45s, 各軸		18.76Grms, 30s		
低周波 衝撃			<低周波衝撃>	
	40G × 10ms (半正弦波)		28.4G × 10ms (半正弦波)	
	3軸共通		3軸共通	
	各軸2回		各軸1回	
試験項目	QTレベル		ATレベル (QT-3dB)	
	周波数	レベル	周波数	レベル
高周波 衝撃			<高周波衝撃>	
	50Hz	60 G	50Hz	42.6 G
	62.5Hz	75 G	62.5Hz	53.25 G
	125Hz	150 G	125Hz	106.3 G
	250Hz	300 G	250Hz	213 G
	500Hz	600 G	500Hz	426 G
	1000Hz	1200 G	1000Hz	852 G
	4000Hz	1200 G	4000Hz	852 G
3軸共通、各軸2回		3軸共通、各軸1回		

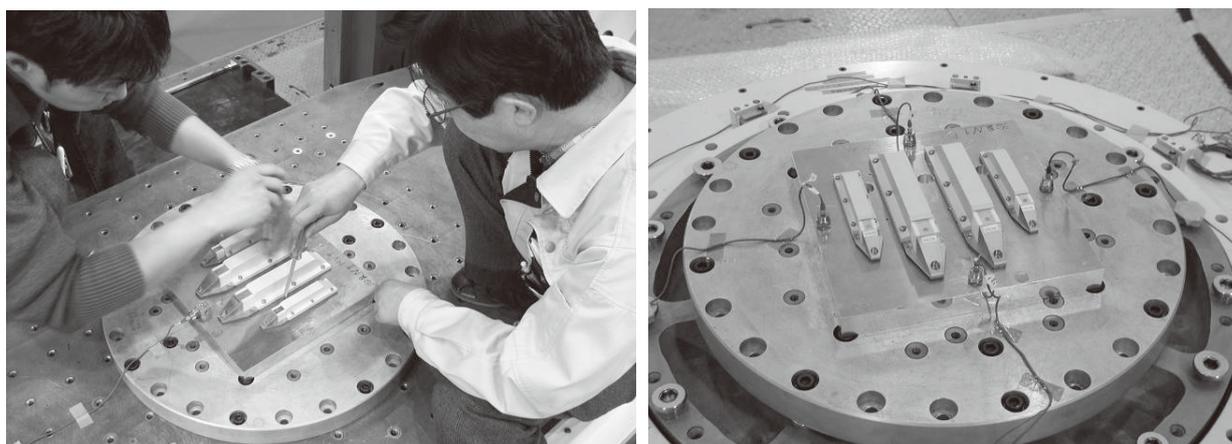


図29 振動試験

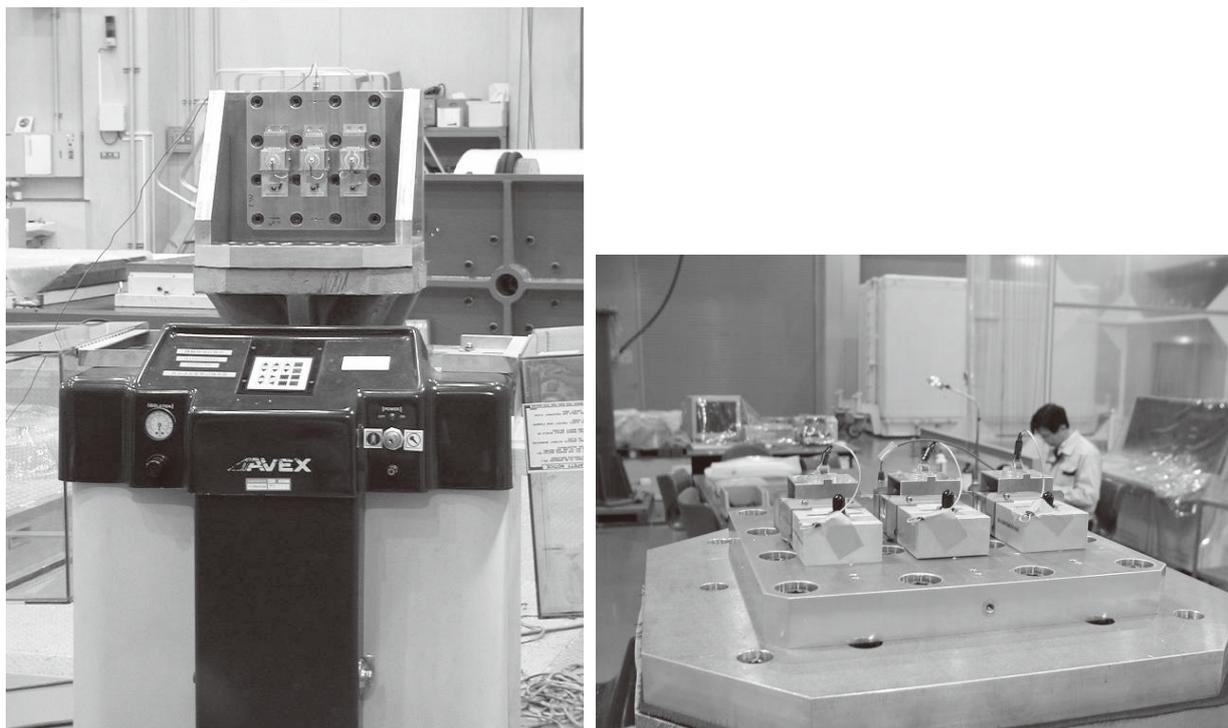


図30 高周波衝撃試験

5. 次期固体ロケットへの反映事項

推進薬に固体燃料を用いているM-Vロケット搭載用アンテナにおいて、その厳しい機械環境と燃焼ガスによる電波減衰は、非常に大きな課題であった。加えて、ロケット搭載用アンテナには、低姿勢なアンテナである事が空力加熱の観点から求められる。これらの要求は、次期固体ロケット搭載用アンテナについても同様に求められる事である。ロケットの仕様が異なるため、M-Vロケット搭載アンテナが次期固体ロケットに対しても最適なアンテナであるかどうか検討を必要とするが、次期固体ロケット搭載アンテナへ反映すべき点を、以下に挙げる。

1. アンテナ切替方式

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、電力分配されることなく1つのアンテナにより送受信できる。そのため、燃焼ガスによる電波減衰対策としても有効である。

2. セラミックカバー付き伝送線路型アンテナ

伝送線路型アンテナは低姿勢かつ耐環境性に優れているため、ロケット搭載アンテナとして多用されているが、耐電力性に少々難があるため、一定の条件化で放電を起こす可能性がある。セラミックカバー付き伝送線路型アンテナの場合、耐電力性に優れているためこの問題をクリアすることが可能となる。

3. 後方指向特性

アンテナの放射特性に多少の前後比をつけることで、ロケット後方の放射特性が改善できる。燃焼ガスの影響による電波減衰対策として有効となる。

4. 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運用する事が重要である。

搭載アンテナだけに限った事ではないが、実際に運用してみなければ明らかになってこない事象も当然出てくる。そのような事象に対して、フレキシブルに対応できるシステムである事が次期固体ロケットに求められている。

5. まとめ

M-Vロケット搭載アンテナについて、最適なアンテナシステムに至るまでの開発経緯について述べた。各アンテナは通信回線レベルの結果から所期の目的を十分に発揮したと思われる。アンテナ系の開発に当たり、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] 鎌田幸男, 近藤田城, 市川満, 高野忠, 横山俊一, “線路部をセラミックに埋め込んだロケット搭載用伝送線路型耐熱アンテナ”, 信学技報, AP95-101, Jan.1996
- [2] 鎌田幸男, 市川満, 林友直, “憂角コーナリフレクタを用いたロケット搭載用アンテナ”, 信学論, Vol.J73-B-II No.2, pp111-119, Feb.1990
- [3] 鎌田幸男, 市川満, 小野田淳次郎, 横山俊一, “M-Vロケット搭載用カップリングアンテナの開発”, 第38回宇科連講演会, 1C12, 1994
- [4] 鎌田幸男, “M-V型ロケット機体アンテナの開発”, 宇宙科学研究所報告 特集 第47号 2003年3月