

M-V型ロケットにおけるテレメータ/コマンド

広沢春任, 山本善一, 橋本正之, 河端征彦,
大西 晃, 大島 勉, 加藤輝雄, 日高正規,
太刀川純孝, 豊留法文, 横山幸嗣*

1. 概 要

M-V型ロケットのテレメータ/コマンドシステムは前世代のM-3SII型ロケットに比べて大幅に変更されている。M-V型ロケットもM-3SII型ロケットと同じく3段式であるが、M-V型では第3段に計器部が設けられ、その結果、そこにテレメータ送信機を搭載することとした。すなわち、第1段から第3段まで各段にテレメータ送信機を搭載することとした。第3段に搭載されるテレメータ送信機はS帯周波数を用い、伝送速度も高めた新規開発のものである。姿勢制御系データの伝送という重要な役割を担っている。搭載送信アンテナに関しては、ロケットの径が大きくなったことにより、M-3SII型の時のように単一のアンテナでは十分なカバレッジを確保できなくなったため、各段とも、2本のアンテナを、それぞれ180°離れた位置に取り付けた。地上局からのガイド送信により、KSC局、あるいは宮崎ダウンレンジ局にとって条件の良い方を選択した。

地上送受信系については、M-3SII型の時とはほぼ同様である。第2段燃焼ガスが通信回線に及ぼす影響を考慮し、宮崎にダウンレンジ局を設けた。

受信結果はほぼ予想通りで、KSC局では第2段モータ点火と同時に、燃焼ガスの影響によりテレメトリデータに欠損を生じたが、宮崎ダウンレンジ局においてその間のデータ補完することができた。

2. M-V型搭載テレメータ/コマンド

表1にM-V-1, 3および4号機に搭載したテレメータ送信機の諸元および450MHzコマンドの機能を示す。

第1段計器部には、1段目の機体計測や制御情報を伝送する300MHz帯PCMテレメータ送信機(TMU-1)を搭載した。第2段計器部には、2段目の機体計測情報およびコマンド情報を伝送する300MHz帯PCMテレメータ送信機(TMU-2)、機体振動情報を伝送するS帯4相PSKPCMテレメータ送信機(TMS-H)、および第1段モータの切り離し状況のモニタや、飛翔途中の画面切り替えにより、第2段切り離し、第3段モータ点火等のモニタを行う2画面合成型15GHz帯TV送信機(TM-TV)を搭載した。第3段計器部には、M-V型用に新規開発した伝送速度204.8kbpsのS帯PCMテレメータ送信機(TMS-D)を搭載し、姿勢制御情報、機体計測情報およびS帯アンテナ切替モニタを行えるようにした。

保安コマンド関係では、飛翔保安と第3段タイマ起動等のために、コマンド受信機を第2段計器部に搭載した。

*千葉工業大学

テレメータ送信機の諸元

	第3段計器部	第2段計器部			第1段計器部
呼 称	TMS-D	TMU-2	TMS-H	TM-TV	TMU-1
周波数	2280.5 MHz	298.1 MHz	2289.6 MHz	14.86 GHz	295.6 MHz
送信電力	2 W	2 W	3 W	2 W	1 W
変調方式	PCM-PSK	PCM-PSK	4相PSK	FM	PCM-PSK
主要伝送 内容	姿勢制御計測 機体計測	機体計測 コマンド情報 地磁気姿勢計	機体振動計測	テレビ計測	機体計測

450MHz コマンド機能

コマンド名称	内 容
CM-A1	M2-EPT STOP
CM-A2A	B1 S0 / M2-EPT STOP
CM-A2B	B2 S0 / M2-EPT STOP
CM-A3	SMRC STOP / B2 SMSJ STOP
CM-A4	B2-LITVC STOP
CM-A6	NO ACTION

表1 M-V型搭載テレメータ送信機の諸元とコマンド機能

3. M-3SII 型からの主な変更点

M-3SII 型から変更された主な項目を以下にあげる。

- (1) 新設の第3段計器部に、新規開発した従来の倍の伝送レートをもつSバンドテレメータ送信機を搭載した。
- (2) 第2段計器部の機体振動計測情報を伝送するS帯PCMテレメータ送信機の変調方式を情報量を増やすために4相PSKとした。
- (3) 飛翔中に受ける機械環境条件が厳しいため、全てのテレメータ送信機にショックマウントを取り付け、衝撃および燃焼振動対策を施した。
- (4) 15GHzTV伝送では1号機、3号機において2画面切替方式を、4号機で4画面合成方式を採用した。
- (5) S帯および300MHz帯搭載アンテナを機体90°および270°位置（ロケット後方から見てランチャ位置からCW方向）の2カ所に取り付け、KSC局20mアンテナから電波を送信して、搭載した2台のアンテナ切替装置の受信レベルの強い方にアンテナが切り替えられるようにした。
- (6) 地上受信系では、宮崎ダウンレンジ局〔1〕の他に、第3段モータ燃焼終了後の各種計測データ取得および第3段切り離しを確認するため、宇宙開発事業団に協力を依頼し、1号機では小笠原ダウンレンジ局、3号機では小笠原ダウンレンジ局とクリスマスダウンレンジ局、4号機ではクリスマスダウンレンジ局で第3段搭載テレメータの受信を行った。

4. M-V 型の通信回線

図1にM-V-4号機までのテレメータ・コマンド通信システムの構成を、図2にKSC局における受信系統図を示す。

KSC局ではS帯は10mアンテナ、300MHz帯は16素子アンテナおよび4素子アンテナを用い受信を行った。15GHzTV受信については、新精測レーダアンテナ〔2〕を周波数共用させることで対応した。

受信各装置はTMS-Dの受信復調装置（写真1）が新設された他はM-3SII型からの変更は無い。

各装置の詳細については宇宙研報告「M-3SII型ロケット特集号」を参照願いたい〔3〕。

また、M-V型ではKSC局、宮崎ダウンレンジ局の非可視後の第3段各種計測データを取得するため、宇宙開発事業団の協力を得て1号機では小笠原ダウンレンジ局、3号機では小笠原及びクリスマスダウンレンジ局そして4号機ではクリスマスダウンレンジ局でTMS-Dの受信を行った。

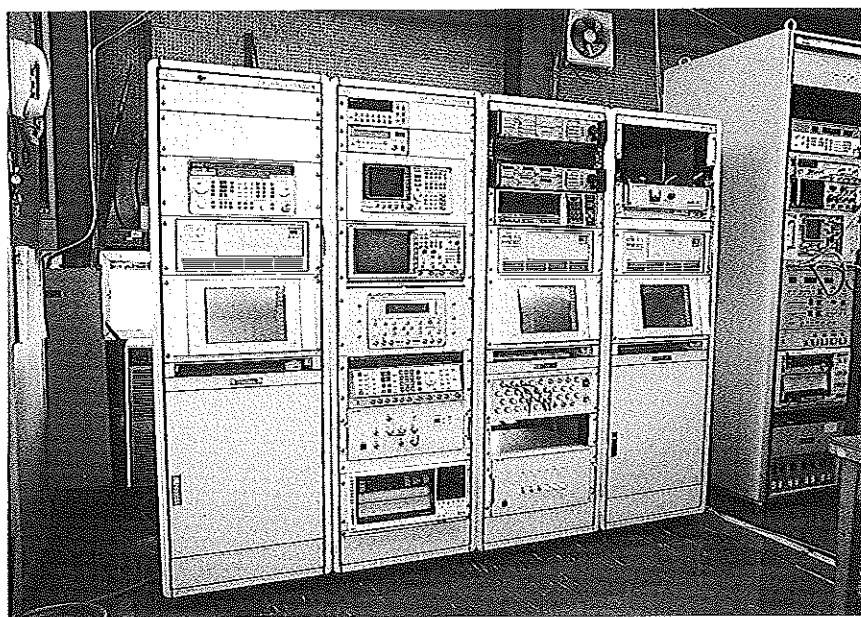


写真1 TMS-D 受信復調装置

図3, 図4にKSC局におけるテレメータおよびコマンドの回線マージンを示す。テレメータ受信に関しては, 図3に見るように第2段燃焼中, 約30dBの回線マージンを見込んでいたが, 後述するように第2段モータの燃焼ガスにより燃焼中, KSC局では正常なテレメトリ受信を行う事が出来なかった。しかし, この間は宮崎ダウンレンジ局が正常に受信を行っており, 各段テレメータのデータ取得およびKSC局へのデータ伝送も正常に行われ, ロケットの飛翔保安についても特に問題は無かった。

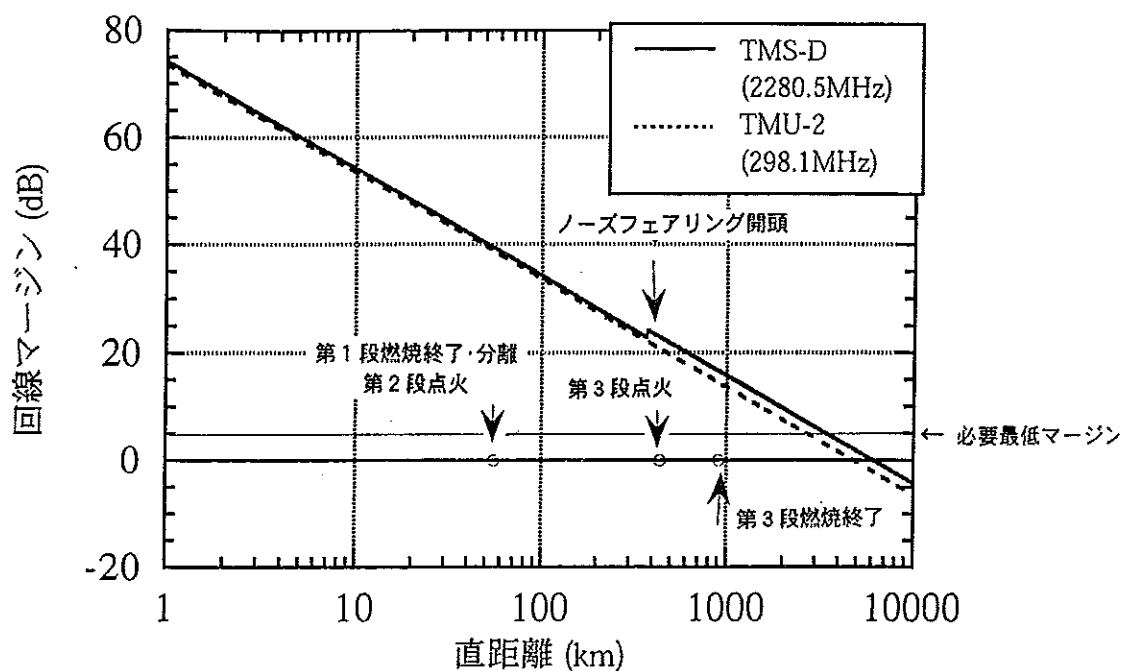


図3 M-V型テレメータレベル

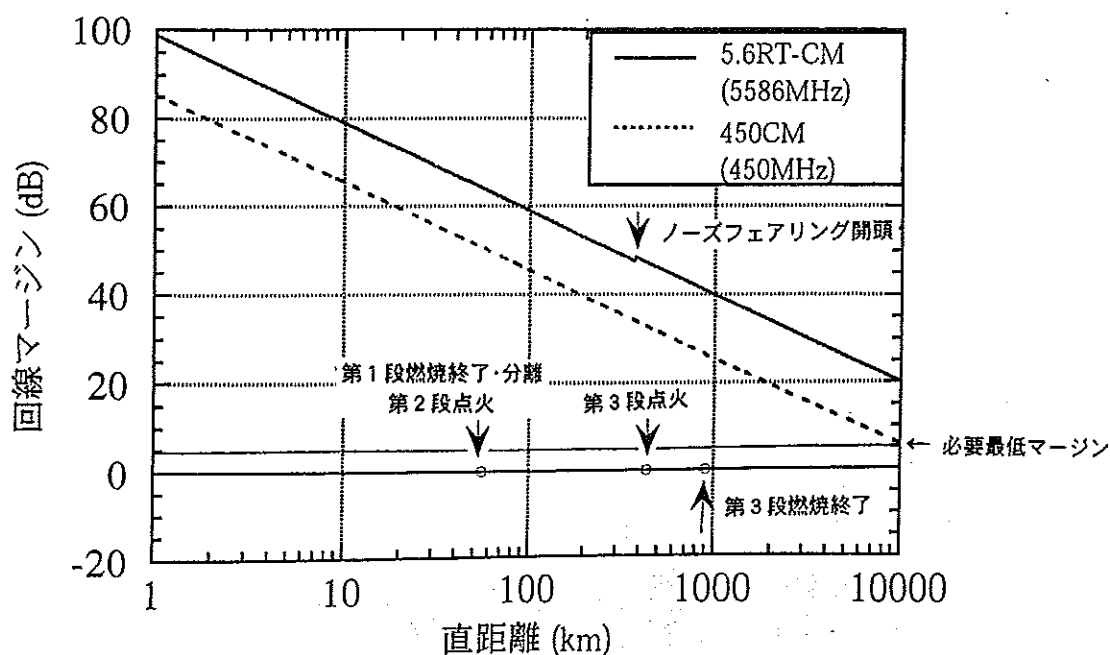


図4 M-V型コマンドレベル

5. テレメータデータ処理システム

M-V型ロケットにおけるテレメータデータ処理システムは、M-3SII型までのミニコンPFU-1500II 2台構成システムから、より性能を向上させたミニコンA-100を中心とした4サブシステム構成へと更新した。

図5にテレメータデータ処理システム構成図を示す。

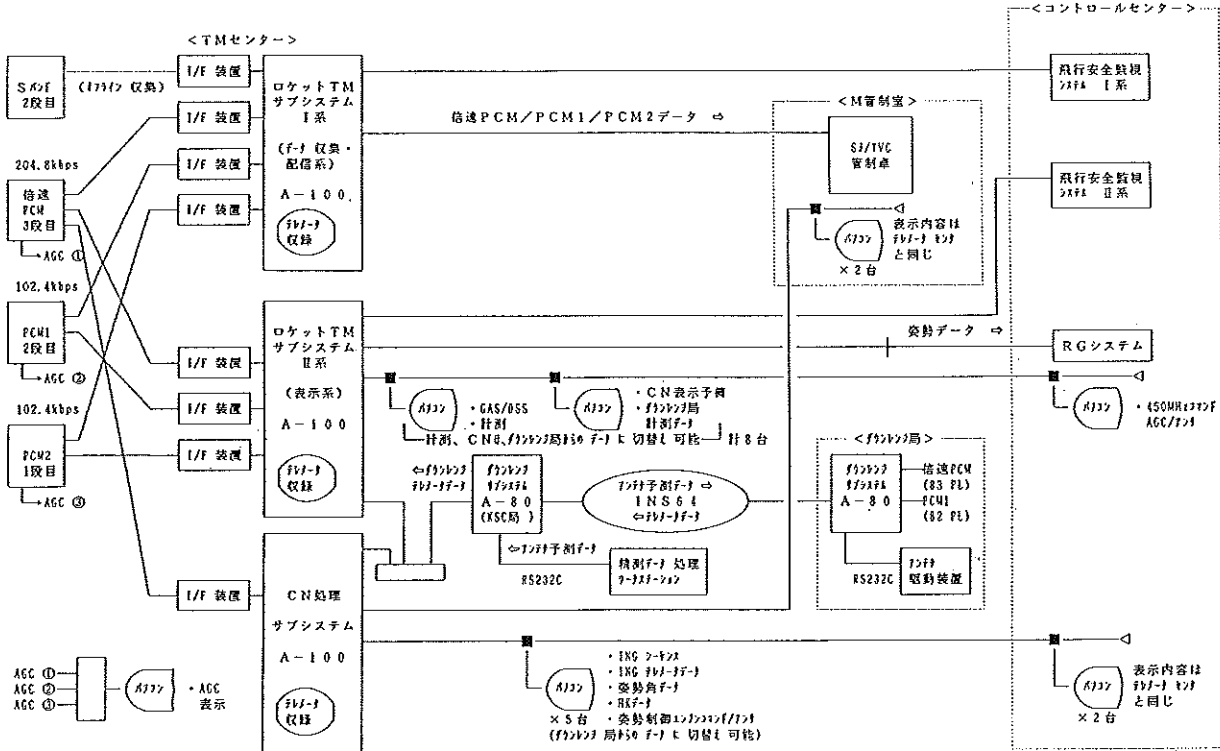


図5 テレメータデータ処理システム

TMS-D, TMU-1 および TMU-2 のデータ収録, また飛行安全監視システム, M 管制室へのデータ伝送等の機能については, その重要度からロケット TM サブシステム I 系, II 系で二重化されている。

CN 系のデータ処理は, TMS-D のデータ収集から実時間処理および後処理まで独立させ, 計算機の負荷分担, 運用の円滑化を図っている。

宮崎ダウウンレンジ局対応としてはミニコン A-80 を使い, CN データと計測データを KSC でリアルタイム表示させている。

6. これまでの受信結果

6.1. テレメータ受信結果

各テレメータの受信状況について以下に報告する。受信レベルの図については各号機を代表して1号機のデータを示す。

6.1.1. M-V-1 号機

第1段に搭載した TMU-1 の受信は, X+75秒の FITH (Fire In The Hole) で約5秒間大きなレベル低下 (約40dB) があり受信不能となった。第1段モータ分離後は落下中の姿勢変動のため周期的なレベルの低下がありデータの質は落ちたがデータ欠損もなく, 正常に受信する事が出来た。図6に時間および直距離に対する受信レ

ベルを示す。

第2段に搭載したTMU-2の受信は、後述するルックアングルの関係で燃焼ガスの影響をまともに受け、X+75秒のFITHからX+160秒の第2段燃焼終了まで大きなレベル低下と変動があり正常にデータ取得を行う事が出来なかったが、第2段燃焼終了後、受信レベルは正常にもどった。図7に時間および直距離に対する受信レベルを示す。

同じく、第2段に搭載されたTMS-Hの受信は受信アンテナであるKSC10mアンテナが3.6mレーダにシンクロスレーブとなっているため、打上当初はパララックスの関係でビームがロケットから逸れ、受信レベル低下が見られた。第2段燃焼中はTMU-2と同じく第2段モータの燃焼ガスの影響を受け大きなレベル低下があった。図8に時間および直距離に対する受信レベルを示す。

第2段に搭載した15GHzTV伝送については、図9に時間に対する受信レベルの変化を示すが、第2段燃焼ガスの影響は他のテレメータ程ではなかった。それでも15dB程度の低下があり、画像がちらつく等の現象が見られた。また第2段モータ燃焼ガスの影響と思われるカメラレンズの曇りがあったが、その他は特に問題はなかった。図10にX+75秒のFITHにおける第2段点火の画像、図11に第2段分離後の第3段モータの画像を示す。

第3段に搭載したTMS-Dの受信状況は、X+213秒の第2段切り離しまでは、TMS-Hとほぼ同様であった。その後、アンテナスレーブ系のオペレーションに不具合があり、一時レベル低下があったがデータ欠損までには至らずに済んだ。図12に時間および直距離に対する受信レベルの変化を示す。

上述したようにKSC局では、第2段燃焼中はTM-TV以外は燃焼ガスの影響による大きなレベル低下と変動があり、一部データ欠損が生じたが、図13に一例を示すように宮崎ダウンレンジ局では正常に受信出来ており、この間のデータは補完された。

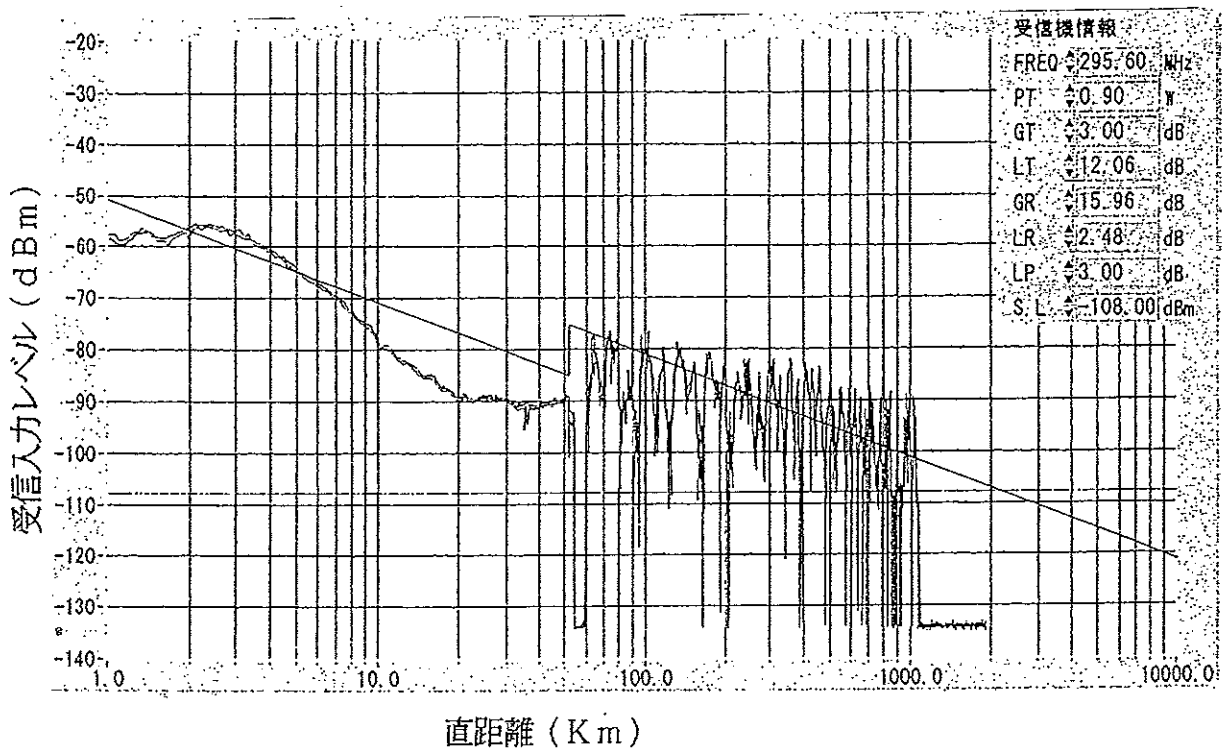
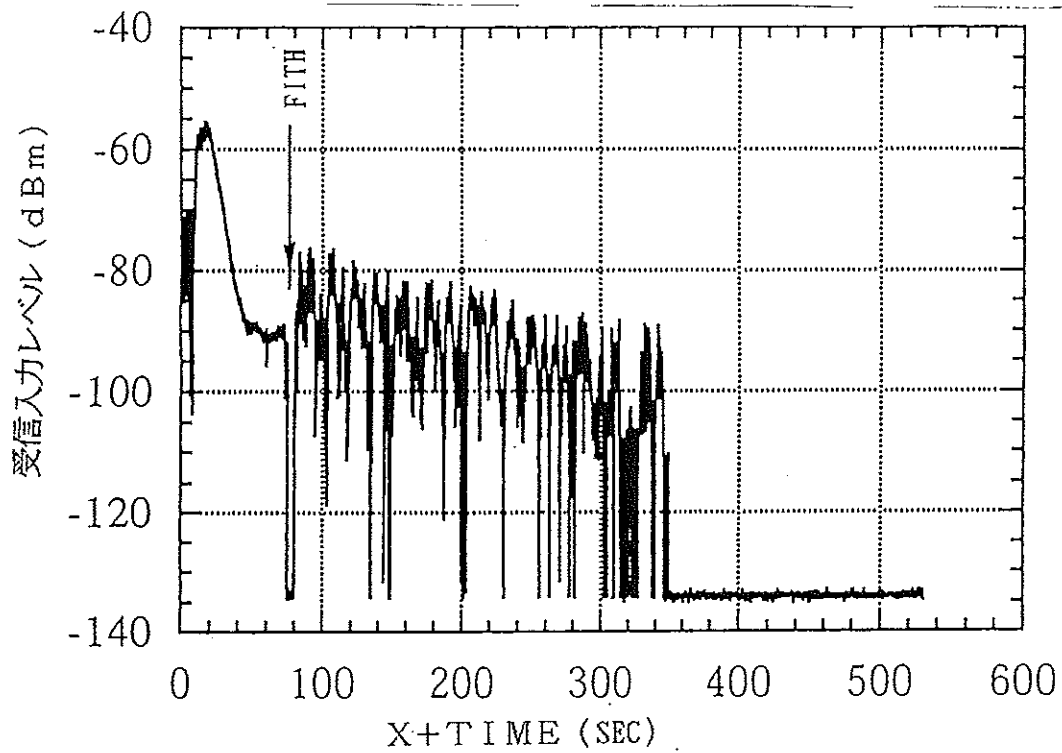


図6 KSC局でのTMU-1受信入力レベル

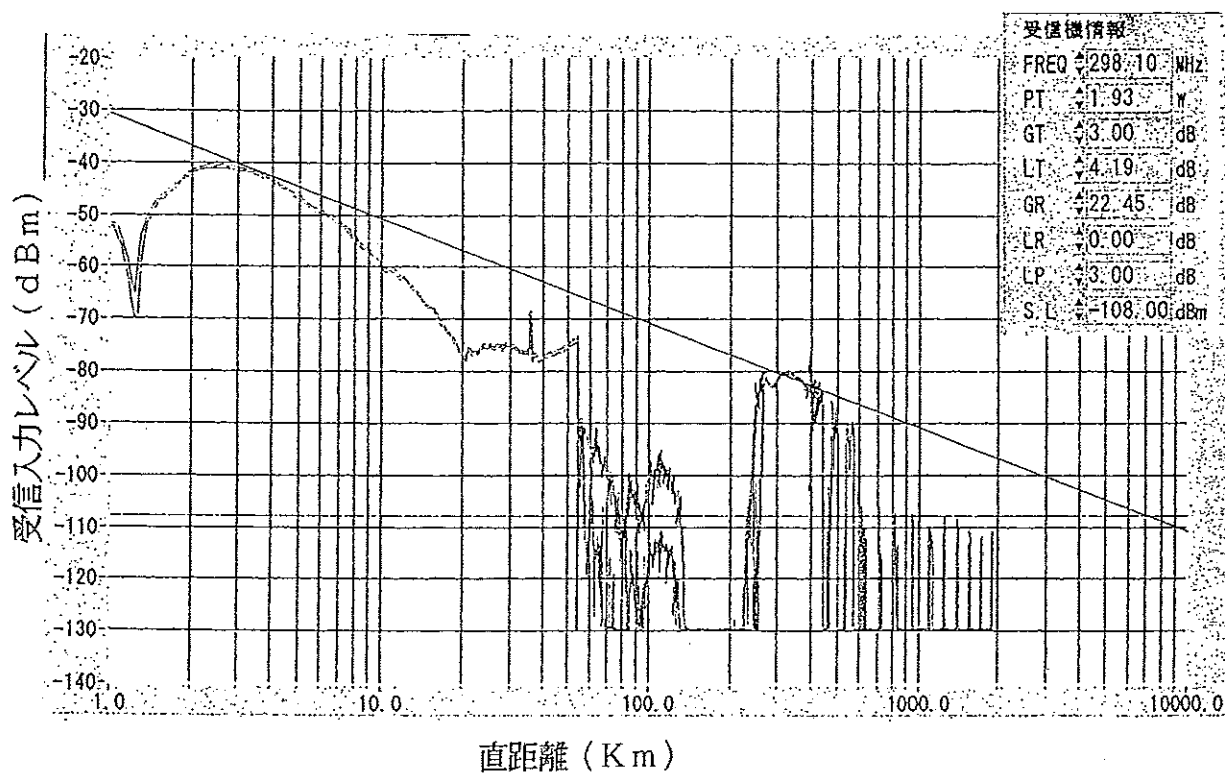
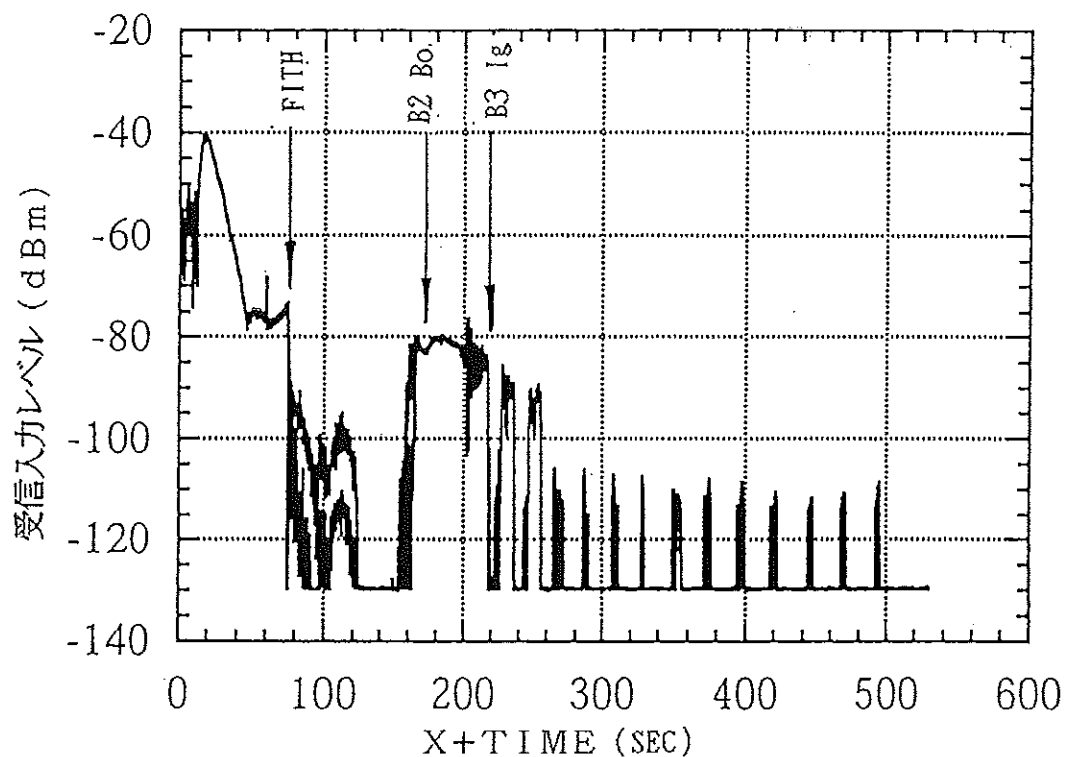


図7 KSC局でのTMU-2受信入力レベル

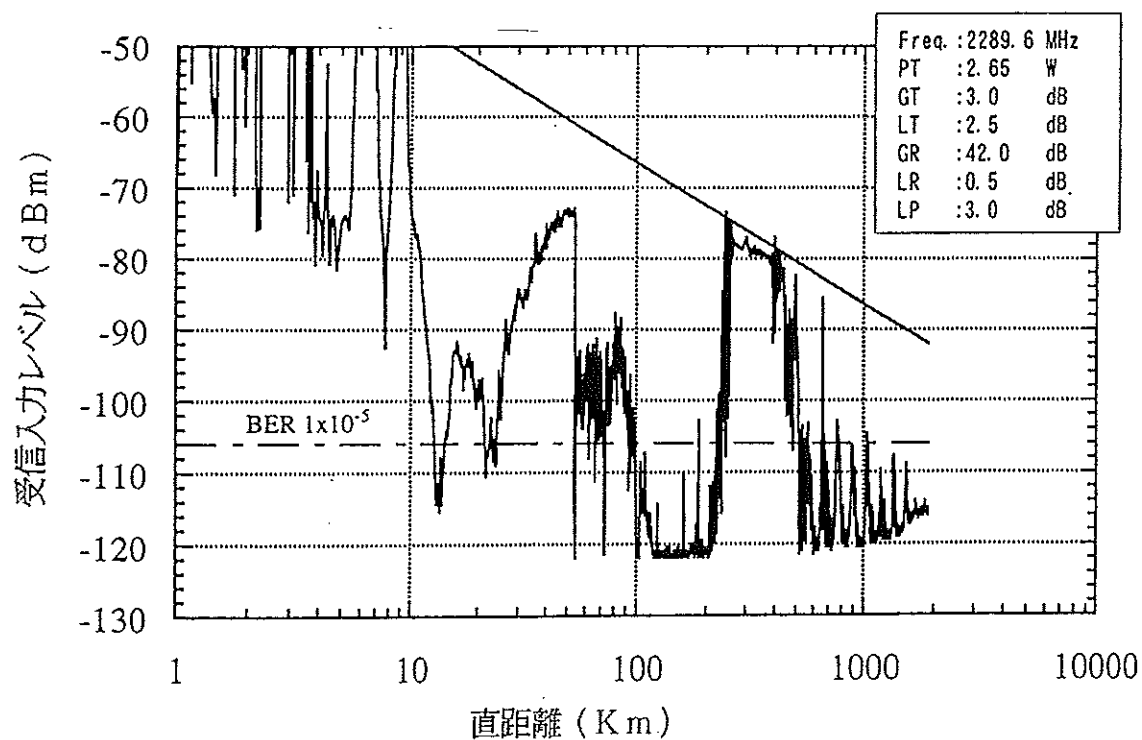
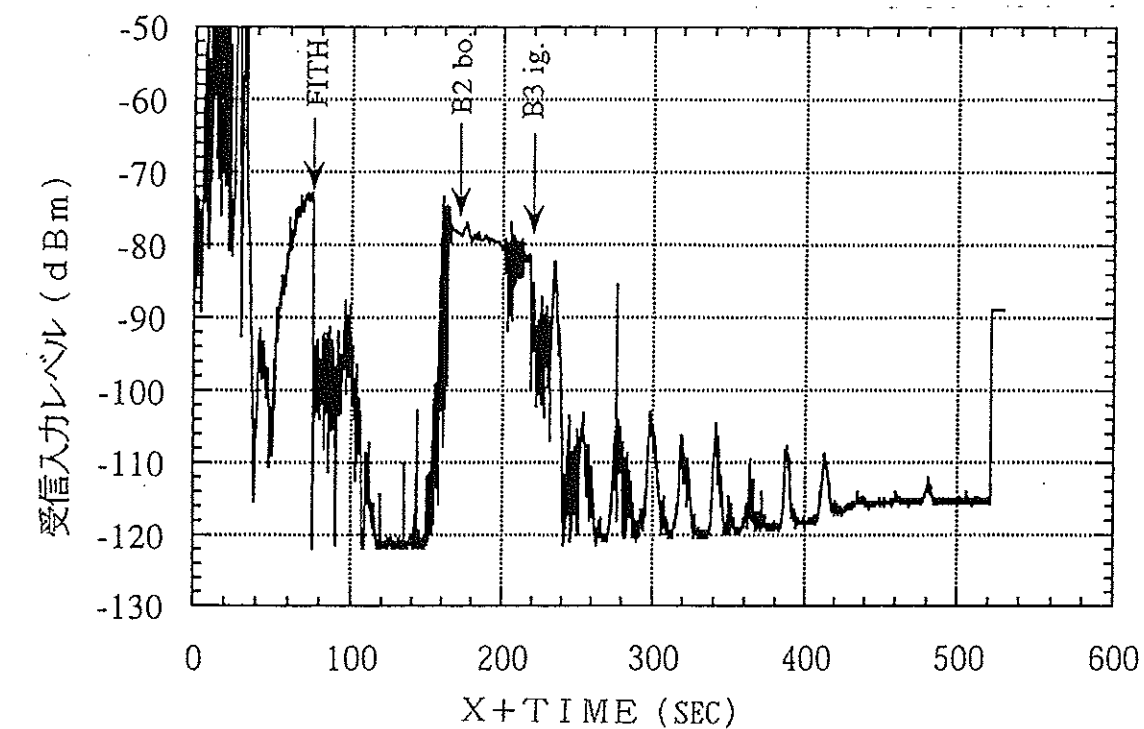


図8 KSC局でのTMS-H受信入力レベル

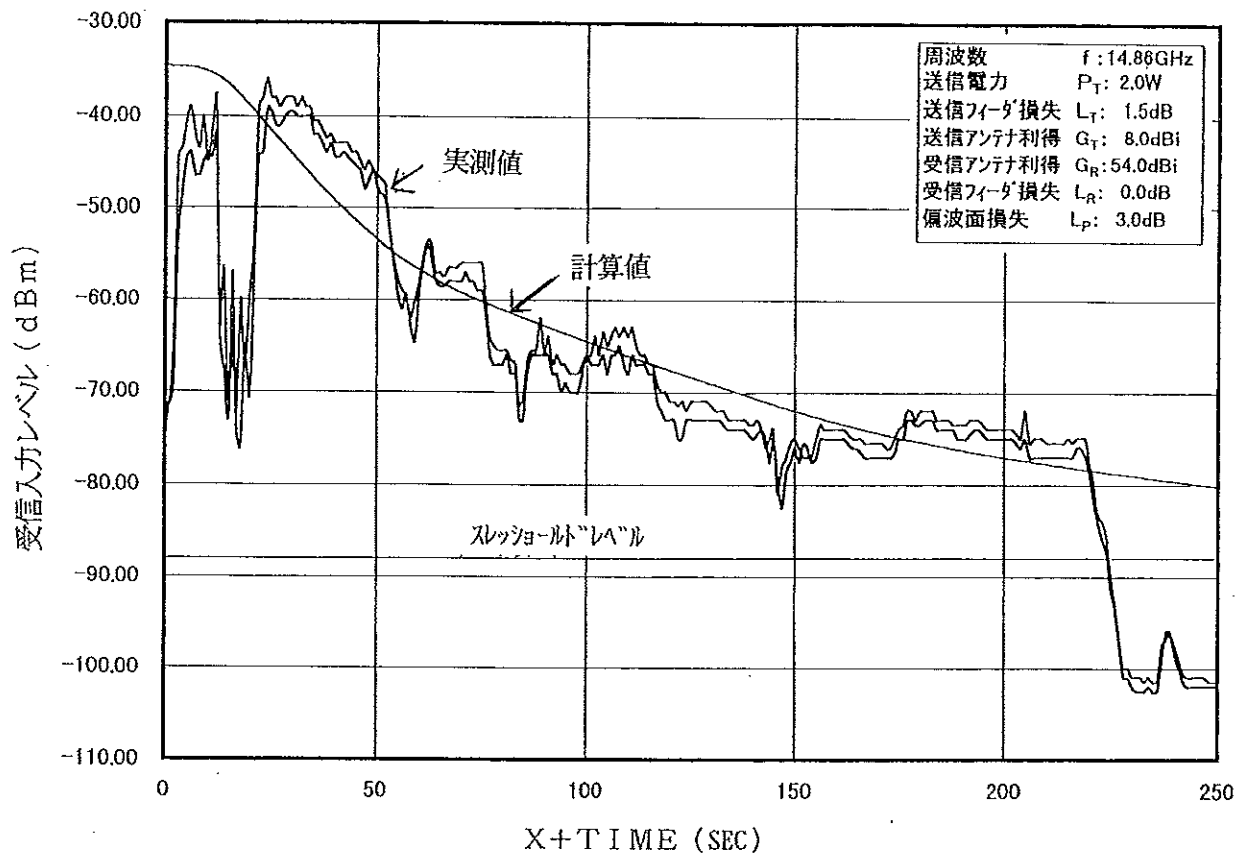


図9 KSC局でのTM-TV 受信入力レベル



図10 第2段点火画像

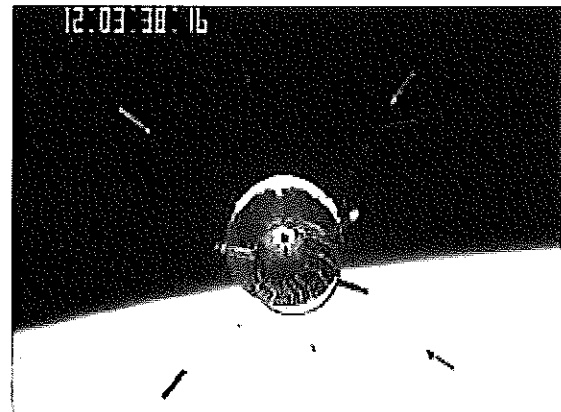


図11 第3段モータ画像

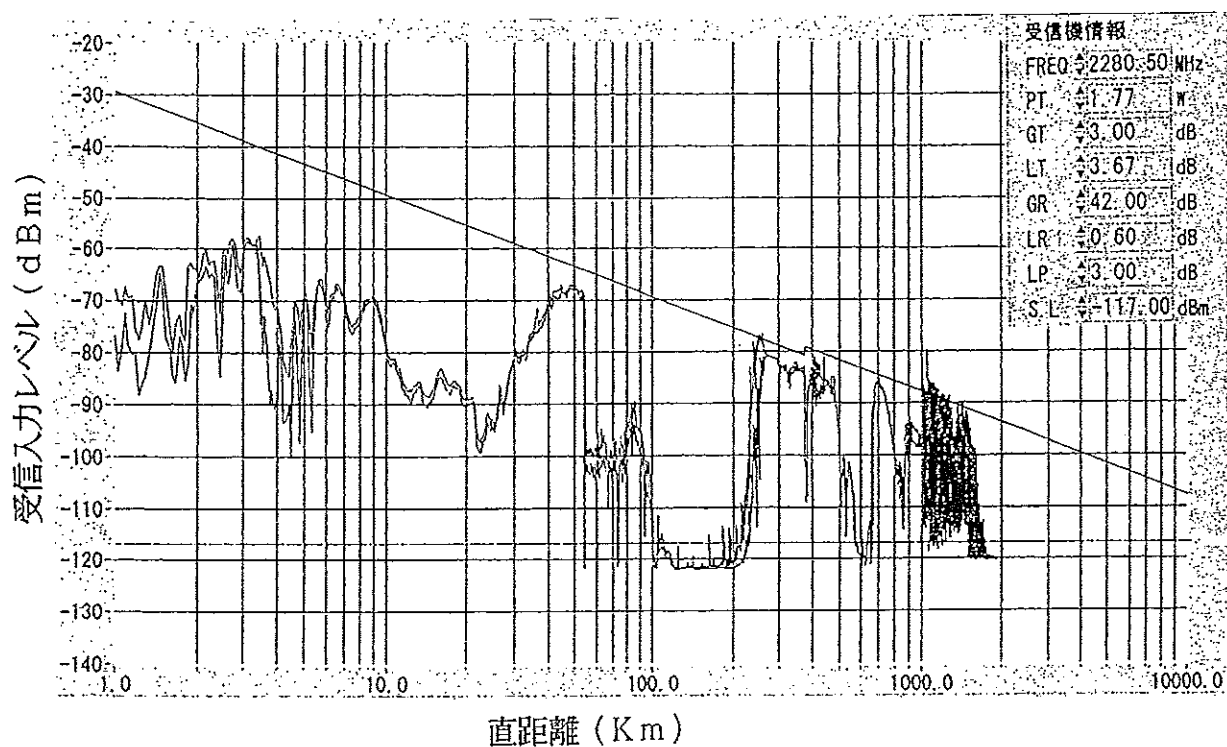
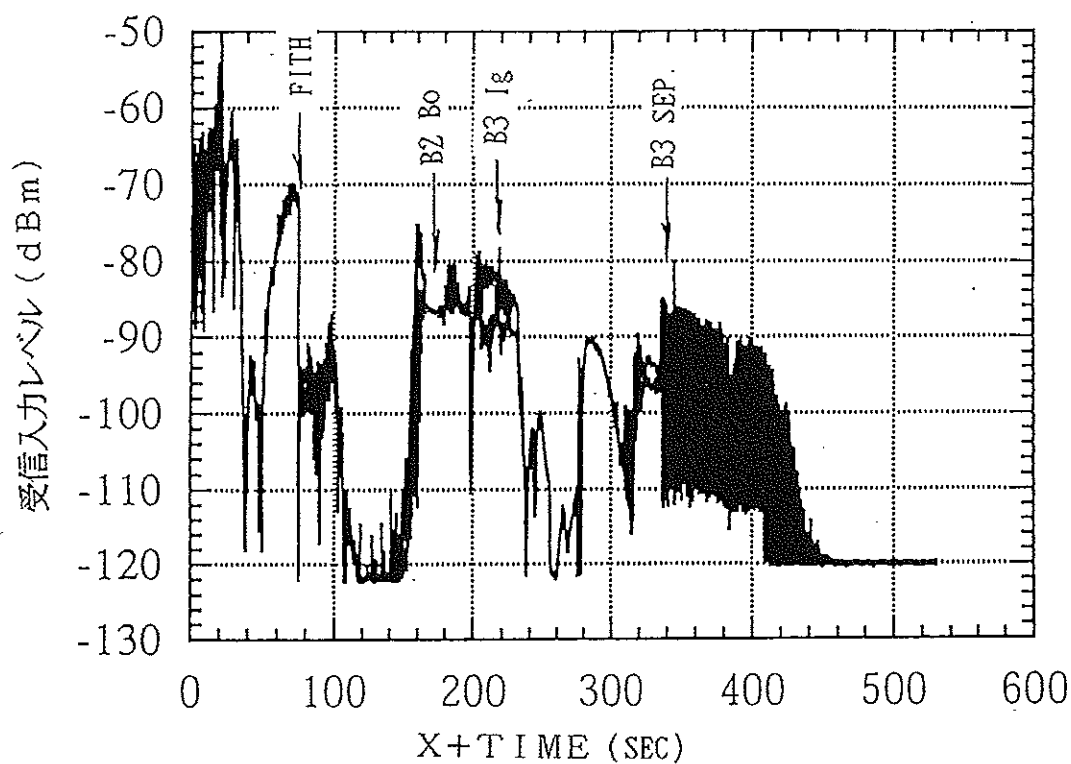


図12 KSC局でのTMS-D受信入力レベル

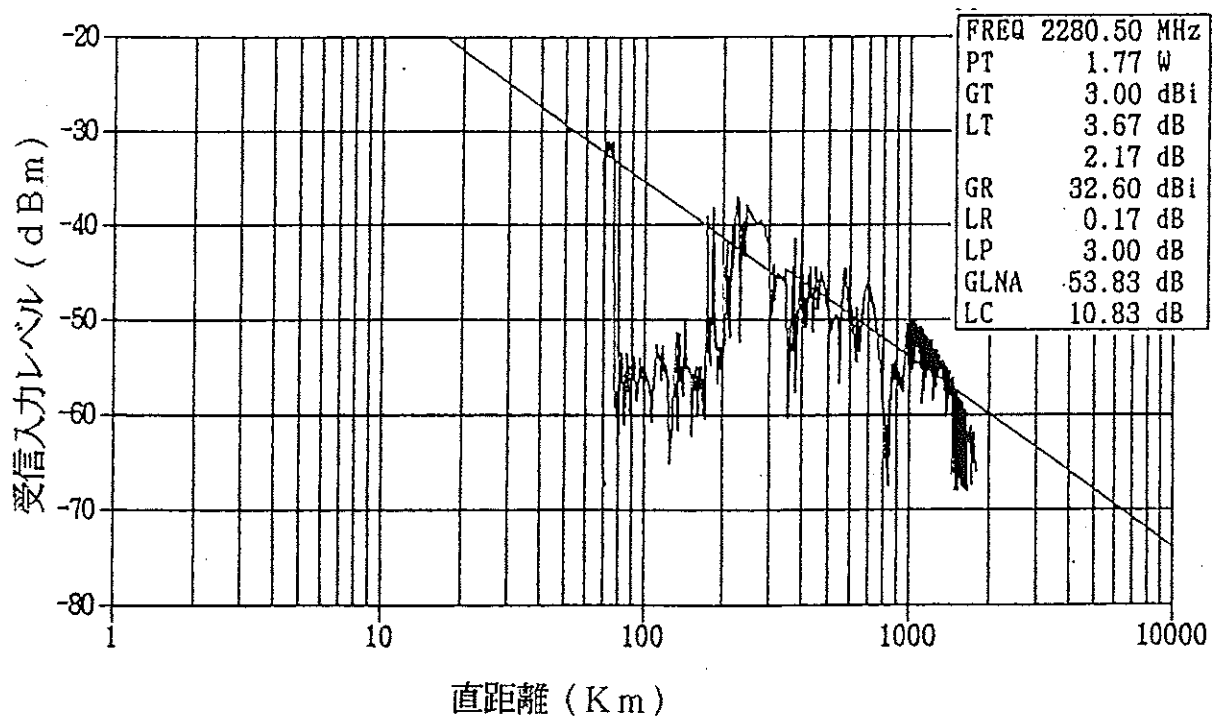
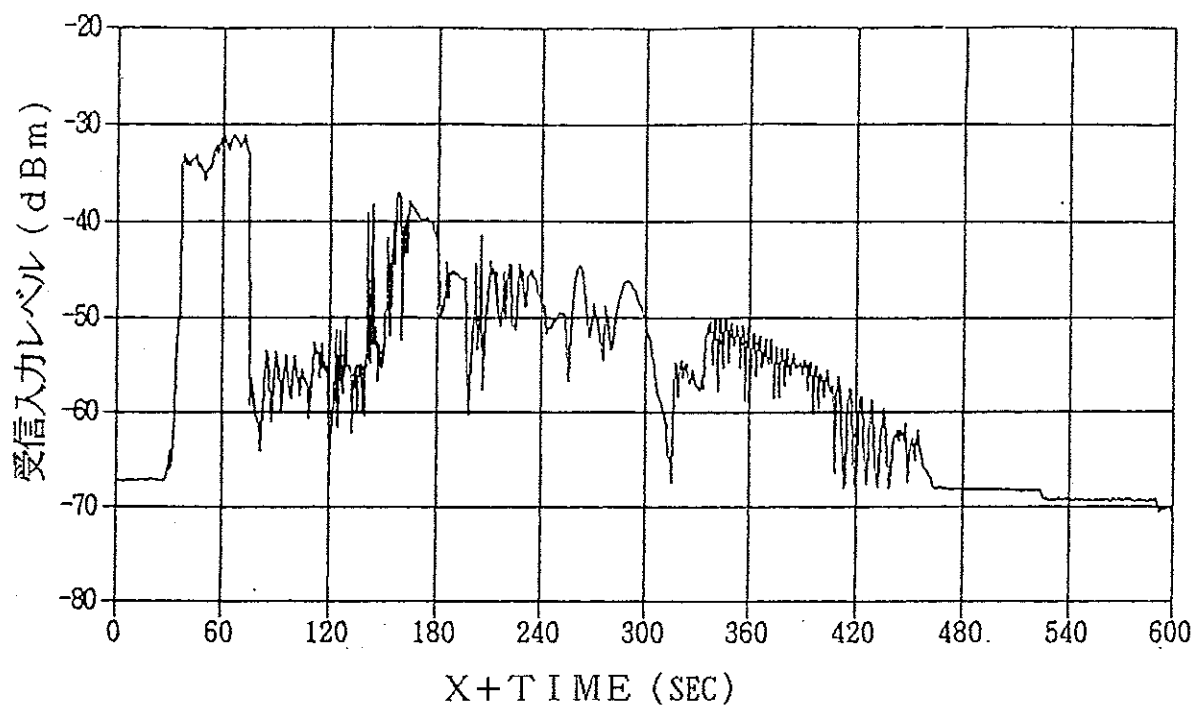


図13 宮崎ダウンレンジ局での TMS-D 受信入力レベル

6.1.2. M-V-3号機

第1段に搭載したTMU-1は全体的に受信レベルが低く、飛翔軌道条件があまり変わらない1号機のデータと比べても打上時から10~20dB低かった。実験後、詳細に検討した結果、搭載の計装系に何らかの不具合が生じたと推測され、次号機以降の対策としてロケットがランチャに装着された後でも、送信パワーがチェック出来る態勢を整えた。第1段モータ切り離し後、メモリ再生された計測データは正常に取得する事が出来た。

第2段に搭載したTMU-2については飛翔軌道が1号機に比べ若干低い事により後述するルックアングルの影響で全体的に受信レベルが多少低かったが、1号機とあまり変わらなかった。

TMS-Hについては、受信アンテナである10mアンテナのスレーブ系を3.6mレーダ経由のシンクロスレーブから、新精測レーダからのパララックス補正された角度データにスレーブするように変更された。このため、1号機で見られた打上初期のレベル低下は見られなかった。第2段点火以降は1号機とほぼ同じであった。

テレビ伝送を行った15GHzTVについては、1号機で見られたカメラレンズの曇り対策としてカバーガラスの追加を行い、途中タイマ信号でカバーの取り外しを行った結果、良質な画像を取得する事が出来た。

第3段に搭載したTMS-Dについては、1号機と異なり第3段燃焼中に大きなレベル変動と低下が見られ、第3段燃焼中のかなりの時間完全ロックオフの状態に陥った。宮崎ダウンレンジ局についてもほぼ同様であった。解析の結果、小さなルックアングルのもとで第3段モータ燃焼ガスの影響によって強力な電波減衰と位相擾乱が起こったと判明した。軌道計画変更時、ルックアングルが当初より小さくなった事が遠因であった。

6.1.3. M-V-4号機

第1段に搭載したTMU-1は、第1段モータのノズルスロートの不具合による影響を受け、X+73秒にテレメータ電波断となり、FITHにおける計測メモリデータの取得は出来なかった。3号機で見られた全体的なレベル低下については対策を施した結果、特に問題はなく、電波断までの受信レベルは正常であった。

第2段に搭載したTMU-2およびTMS-Hについては、3号機とほぼ同様であった。15GHzTV伝送については、3号機までの2画面構成から機器改良を行い4画面の同時伝送を行い、第1段、第2段モータの燃焼、各段の分離、ノーズフェアリング内の衛星の様子や開頭等の映像を取得する事ができた。

第3段に搭載したTMS-Dの受信状況は第2段切り離しまでは前号機までと大きくは変わらなかった。第2段切り離し以降は3号機で見られた第3段モータ燃焼中のレベル低下はルックアングルの関係でほとんど無く、良好に受信できた。

6.2. アンテナ切替器に関する問題

M-3SII型ロケットでは、第2段に搭載した300MHzテレメータがメインであり搭載送信アンテナも胴体装着型フックアンテナをロケット外壁に8本取り付け、各素子間に45°づつの位相差をもたせアンテナパターンを確保していた。

M-V型ロケットでは、径が2.4mと大きくなったのと、第3段に搭載したS帯テレメータがメインとなったため、300MHz帯、S帯送信アンテナ共、各段機体90°および270°位置（ロケット後方から見てランチャ位置を基準にCW方向）にそれぞれ取り付け、KSC局20mアンテナから送信された電波を2本のS帯アンテナで受信し、受信レベルの強い方のアンテナが送信アンテナとして選択され、300MHzアンテナもそれに同期させて切り替わるようにした。

この結果M-V-1号機では、噴煙の影響による激しいレベル変動が災いし、必要のないアンテナ切替動作が頻繁に起こった。その結果、宮崎ダウンレンジ局の受信レベルに大きな変動が見られたが、データ欠損までには至らずに済んだ。3号機以降は、アンテナ切替器の改修を行い、軌道姿勢予測からタイマ信号を使って各受信局に有利なアンテナが選択されるような運用による工夫を施すようにした。

図14にルックアングルの定義を示す。また、1号機におけるKSC局、宮崎ダウンレンジ局から見たルックアングル（実測値）を図15、16に示す。

α 角：機軸ベクトル(roll軸ベクトル)と視線ベクトルのなす角。

β 角(roll phase angle)：yaw軸ベクトルと視線ベクトルのなす角。

ANT位相(ANT rotation phase)：指定されたアンテナ位相と機軸を通る平面と、視線ベクトルと機軸ベクトルが張る平面とが成す角。

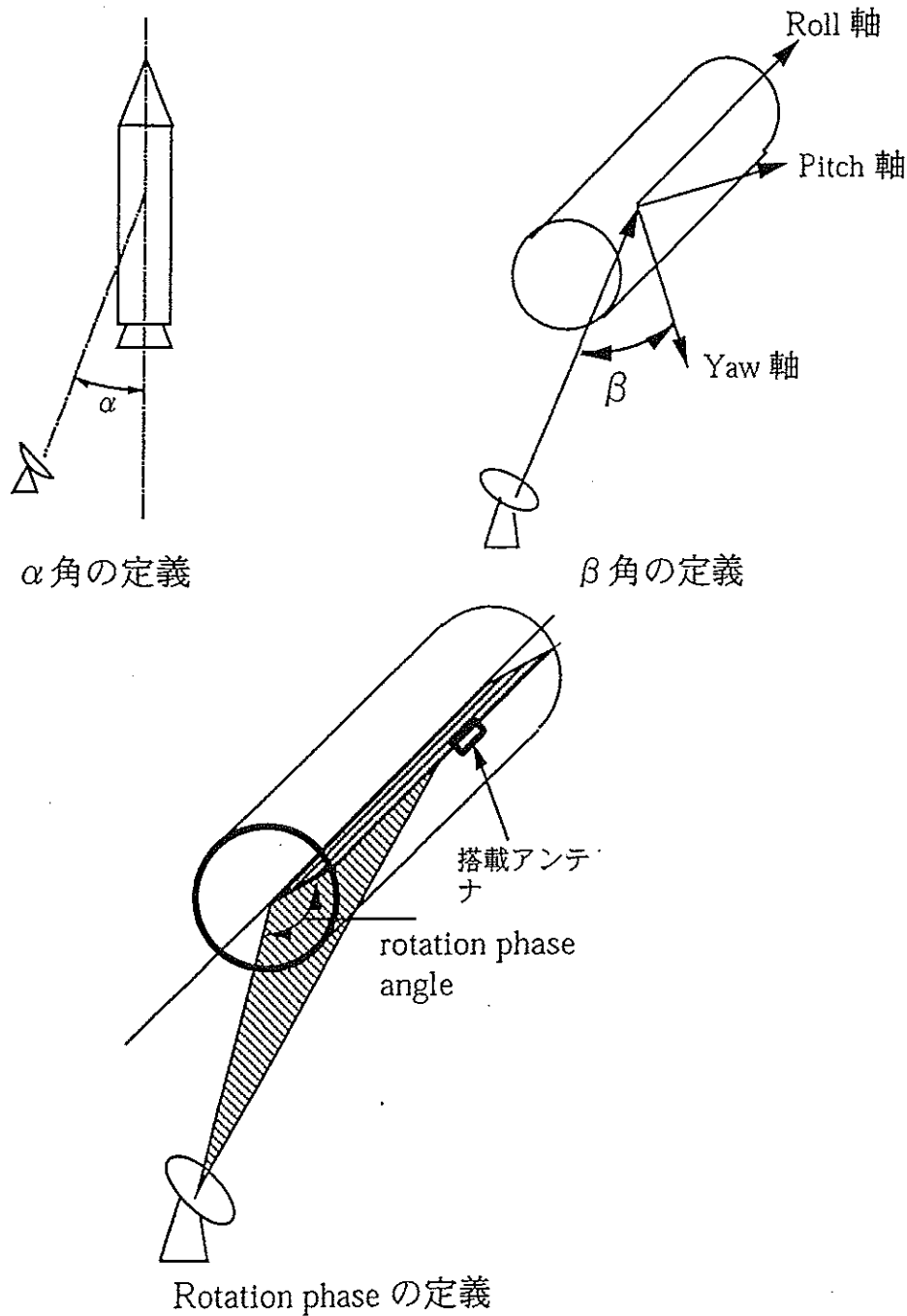
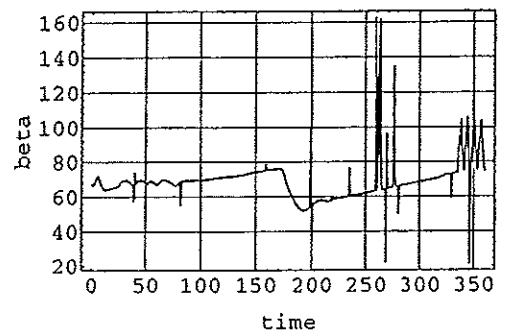
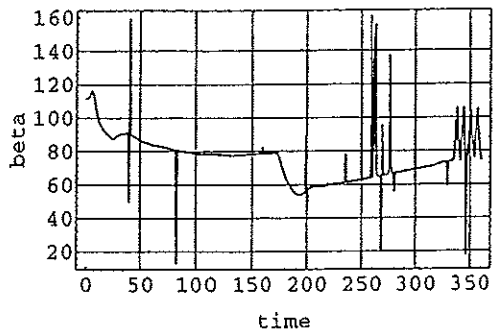
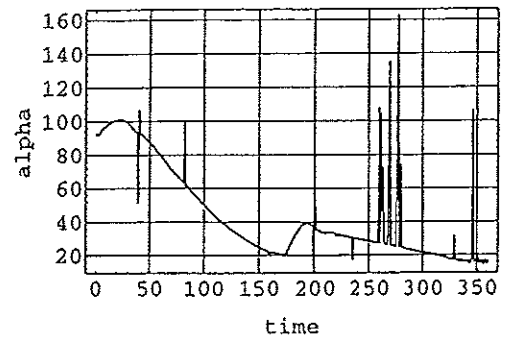
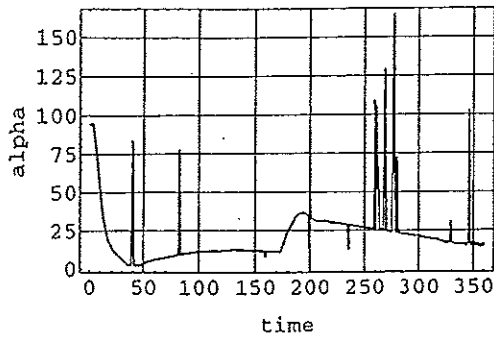
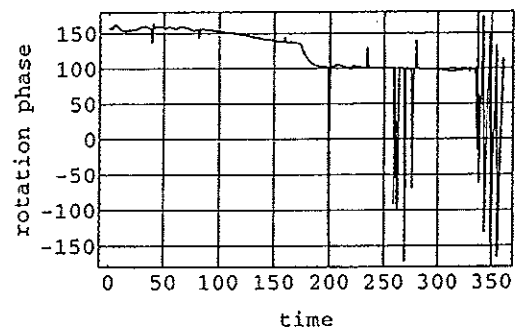
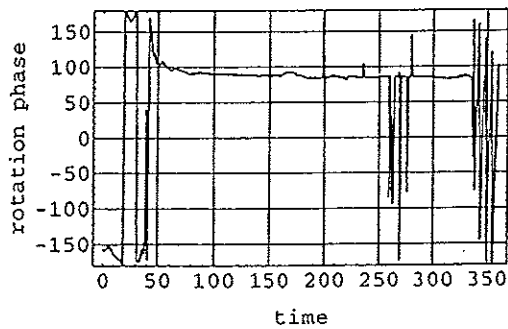


図14 ルックアングルの定義



ANT 90 DEG

ANT 90 deg



ANT 270 DEG

ANT 270 deg

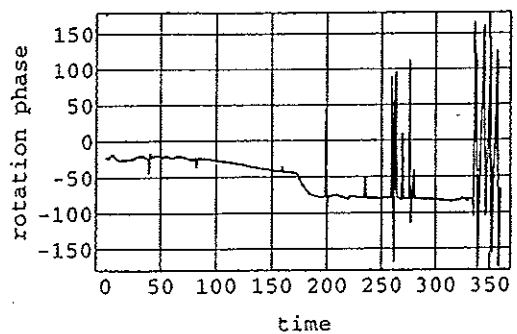
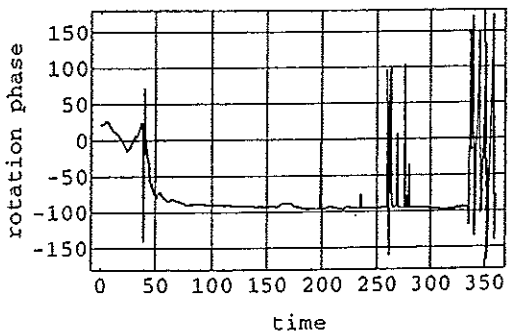


図15 KSC局20m アンテナから
見たルックアングル

図16 宮崎ダウンレンジ局から見た
ルックアングル

6.3. 450MHz コマンド

飛翔保安のための450MHz コマンドについては、図17に系統図を示すが、システムおよび送信機を含む各装置とも M-3SII 型からの変更は無い。

図18に宮崎ダウンレンジ局で取得した、M-V-1号機のコマンド受信機の受信レベルを示す。テレメータと同様、第2段モータ燃焼中は燃焼ガスの影響を受け大きなレベル低下があったが、スレッシュホールドレベルを下回る事はなかった。1号機、3号機および4号機とも保安コマンドの送信は行われなかった。

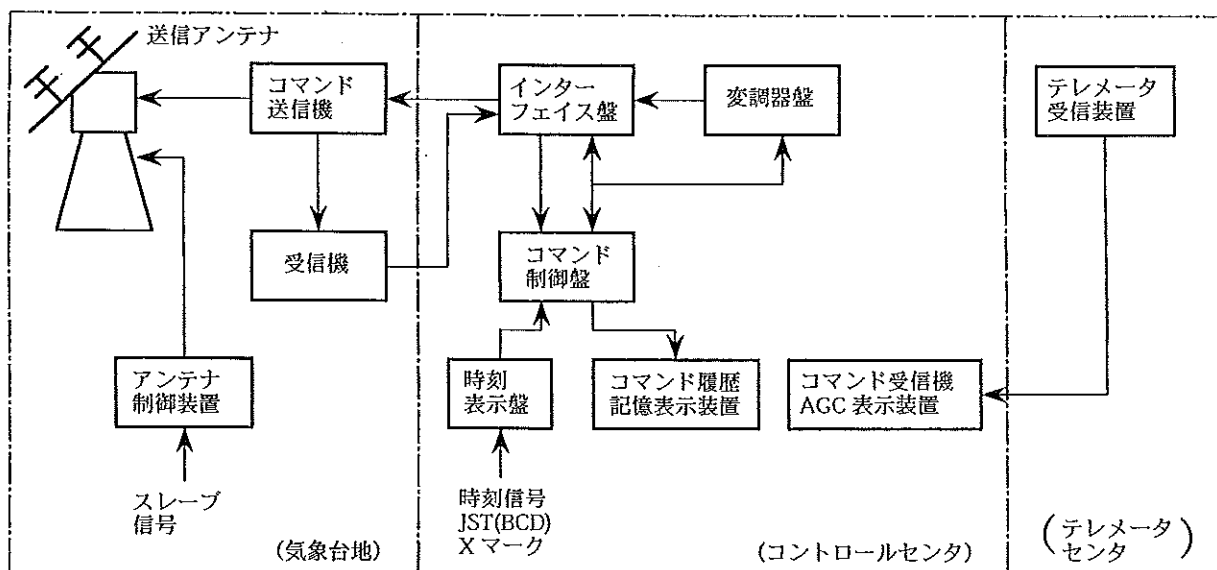


図17 450MHz コマンド送信装置系統図

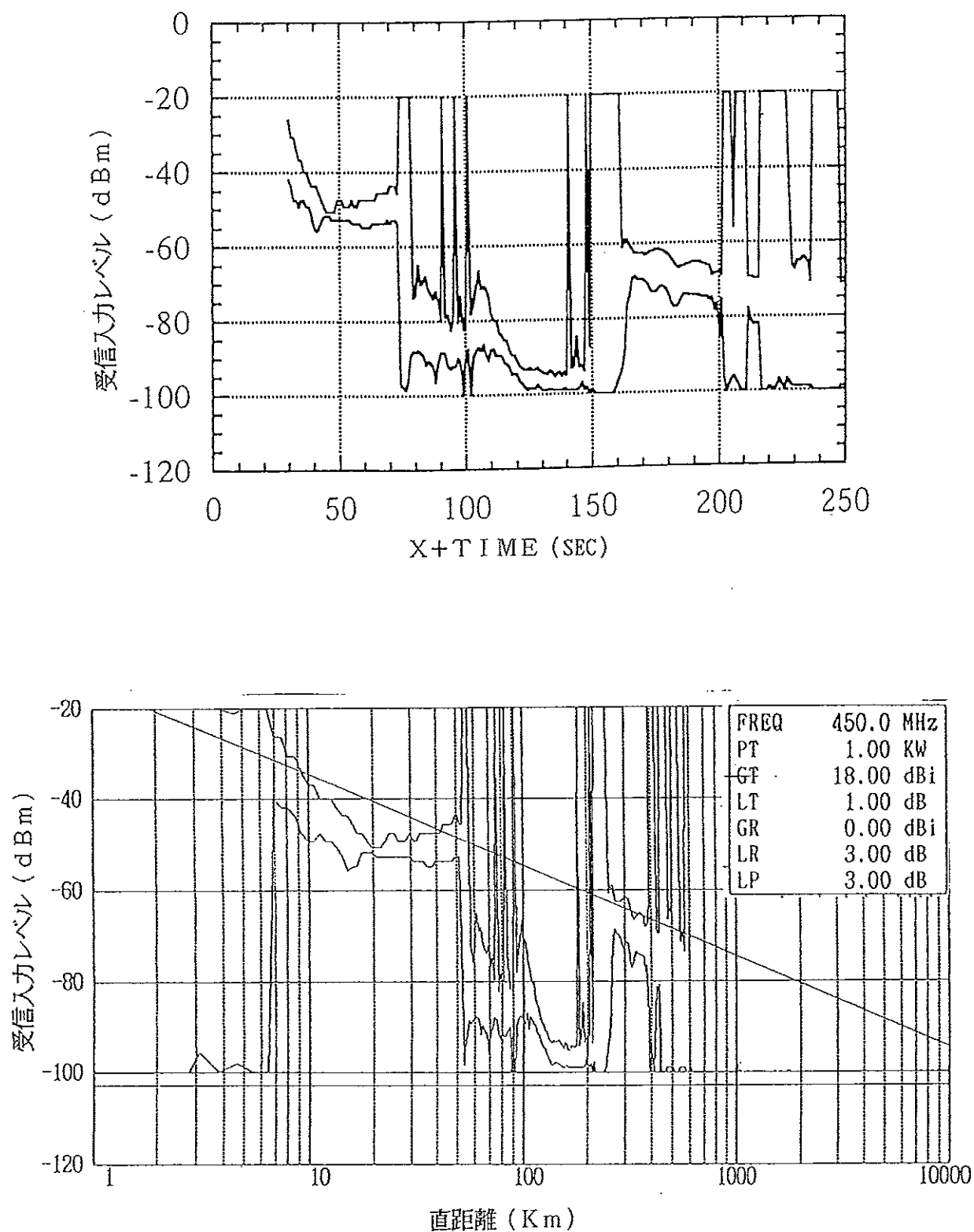


図18 450MHz コマンド受信入力レベル

7. おわりに

M-V 型ロケットではロケットの大型化故に、テレメータ、コマンドの通信回線に大きな影響を与え、特に発射75秒後に実行される第1段分離、第2段点火がほぼ同時に行われる FITH 時および第2段モータ燃焼中は KSC 局では、予測された事ではあるが、大きなレベル低下と変動がありデータ取得を正常に行う事は出来ない。しかし、この間は宮崎ダウンレンジ局が正常に受信を行っており、データ補完を行っている。

なお、M-V-1 号機では FITH 時の約 1 秒間は両局共データ欠損があり、リアルタイムではデータを得る事が出来なかった。そのため 3 号機以降、計測器側で、この間、データをメモリに蓄え、FITH 後、データ再生を行う措置がとられている。

5 号機以降においては 4 号機までの経験から、KSC 局はもとより宮崎ダウンレンジ局の強化、さらに宇宙開発事業団の協力を得、飛翔軌道が東打ちの場合は小笠原ダウンレンジ局、南打ちの時は例えば種子島ダウンレンジ局での受信が必要になると思われる。

最後に、関係実験班各位、宇宙開発事業団をはじめ実験に参加された NEC、富士通、丸文、三菱電機関係各位に深甚の謝意を表する次第である。

以 上

参 考 文 献

- [1] 広沢春任ほか、宇宙科学研究所報告 特集47号 pp351～pp358 (2003年 3 月)
- [2] 広沢春任ほか、宇宙科学研究所報告 122号 (2003年 3 月)
- [3] 林友直ほか、宇宙科学研究所報告 特集29号 pp141～pp171 (1991年 6 月)

