

通信系概要と運用結果

井上 浩三郎・市川 満・橋本 正之
野村民也・林 友直・広沢 春任
高野 忠

(1986年12月25日受理)

The Summary of Communications System and Operational Results

By

Kozaburo INOUE, Mitsuru ICHIKAWA, Masayuki HASHIMOTO
Tamiya NOMURA, Tomonao HAYASHI, Haruto HIROSAWA
Tadashi TAKANO

Abstract: Telecommunications systems are indispensable to control spacecraft and gather telemetry data from space. After the launch of each spacecraft, the telecommunications systems worked well and supported the observation around the encounters with Halley's comet. The system performances have been confirmed to be coincident with the design through operations. This chapter describes the design principle and constitution of the telecommunications systems, and the operational results together with system evaluations.

1. はじめに

ハレー彗星の観測を目的とした二つの探査機「さきがけ」と「すいせい」は1985年1月と8月にそれぞれ打ち上げられ、1986年3月のハレー彗星との会合でその目的を果し、今も順調に惑星空間を飛び続けている。61年11月現在、打ち上げから「さきがけ」が23ヶ月、「すいせい」が15ヶ月経過した。会合時の地球と探査機との距離は、各々1.5億kmと1.6億kmであった。

このミッションのために開発したわが国としては初めての深宇宙通信システムは、臼田深宇宙地上局も含めてすべて良好に作動し、設計の妥当性と機器の性能が確認された。この章では、はじめに深宇宙通信システムの設計をするにあたりシステムへの要求条件と、それに基き新規開発した各種装置を挙げる。次にシステムの構成の概要、システムの運用結果について述べる。

図-1に「すいせい」の外観図、図-2に「さきがけ」と「すいせい」の軌道を示す。

2. 通信システムへの主要な要求条件と新規開発装置

ミッションを達成するため、通信システムに対して以下に示す厳しい要求条件を踏まえ探査機と地上局で新しい装置を開発設計した。

2.1 主要な要求条件

(a) 超遠距離通信の確保

ハレー彗星と会合する時の探査機と地球との距離は1億6000万kmに達するため、少くとも2 AU (1 AU: 1億5000万km) 程度の通信が確保されること。

(b) 回線品質の確保

テレメータ・コマンド回線品質としては、会合時に64 bpsで探査機より送られてくるPCMテレメトリデータ、16 bpsで地上局より送出されるコマンドデータ、それぞれが 1×10^{-5} 以下のビット誤り率であること。コマンドは、いかなる状態でも確実に受信復号し、運用制御が出来ること。

(c) 高精度距離および距離変化率の計測が可能であること

これはコヒーレント2ウェイで実現する必要がある。特に探査機の距離変化率で20 km/sec, Sバンド搬送波周波数シフトに直すと140 kHzに相当するドップラーシフトに対して捕捉計測を行う必要がある。計測精度として距離で3 mRMS (S/No=9 dB・Hzで積分時間250秒)、距離変化率で0.3 mm/secRMS (C/No=26 dB・Hzで積分時間60秒)程度が要求される。

(d) 小型・軽量化および高信頼性をはかること、探査機の重量が140 Kg以下という厳しい制限のため構体材料から回路設計に至るまで高信頼性を保ちながら徹底した重量軽減が必要である。

2.2 新規開発装置

新規に開発した装置は次に示す通りである。

まず探査機では、①23.1 dBiの利得をもつ高利得アンテナ、②送信出力5 Wの高出力送信機、③スレッショルドレベルが-145 dBmの高感度受信機、④誤り訂正符号(コンボリューショナル符号)を用いたデータ処理装置、および⑤デジタルPLLを用いたコマンドデコーダなどである。

これに対して地上局は、①1.5 AUの超遠距離から来る微弱な電波を集める直径64 mの大口径パラボラアンテナ、②ガスヘリウム冷却低雑音増幅器(雑音温度9 K)、③最小受信レベルを-170 dBmとした低スレッショルド受信機、④高効率クライストロンによる40 KW送信機、⑤低スレッショルド型PCM復調器、⑥高精度2ウェイドップラ計測装置、⑦低S/Nでの高精度距離計測装置などで、これらは長野県臼田町に設置された。

以上の装置の詳細な機能および性能等については、ここでは省略するが、別論文(1)、(7)、(8)に掲載してあるので参照していただきたい。

2.3 通信回線によるシステム性能評価

超遠距離通信の能力を評価する意味で、新しく開発した深宇宙通信システムのパラメー

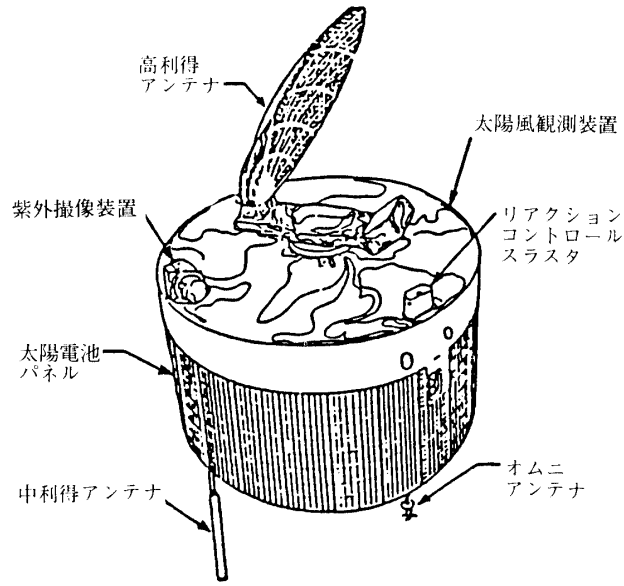


図1 「すいせい」の外観

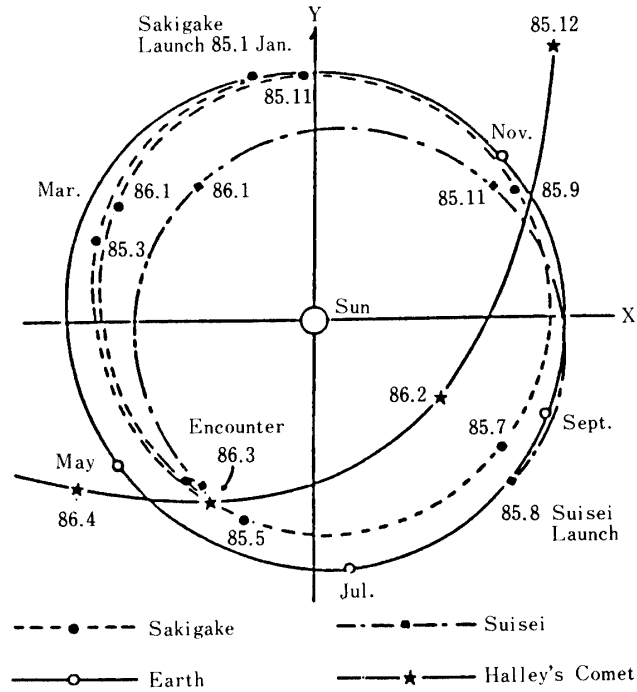


図2 「さきがけ」および「すいせい」の軌道

表-1 「すいせい」の回線パラメータ
○テレメトリ回線 ○ハレー彗星会合時

| 項 目 | 値 | 備 考 |
|----------------|---------------|---|
| 探 査 機 | 出 力 | 37.4 dBm 5.5 W |
| | アンテナ利得 | 23.1 dB 高利得アンテナ |
| | 指 向 誤 差 | -0.2 dB 1.5 度以下 |
| | フィーダ損失 | (-) 3.2 dB |
| 空 間 | 自由空間損失 | (-) 263.8 dB 1.6 億 km |
| | 伝 搬 損 失 | (-) 0.3 dB 降雨, 偏波変換 |
| 地 球 局 | アンテナ利得 | 62.4 dB 64 m・直径 |
| | 指 向 誤 差 | -0.2 dB |
| | フィーダ損失 | (-) 0.3 dB |
| (小計) 受信レベル | -145.1 dBm | |
| 変 調 損 失 | (-) 2.1 dB | 変調指数=0.9 rad. |
| 復 調 損 失 | (-) 1.6 dB | PSK 復調・同期損失 波形ひずみ・回路損失 |
| デ ー タ 速 度 | 18.1 dBHz | 64 b/s |
| 受信雑音電力密度 | -182.9 dBm/Hz | $E_i=20$ 度で, アンテナ (18 K) 分 波 器 (10 K) L N A (9 K) |
| (小計) E_b/N_0 | 16.0 dB | |
| 符 号 化 利 得 | 5.1 dB | BER= 10^{-5} Viterbi 復号 |
| 所 要 E_b/N_0 | 9.6 dB | BER= 10^{-5} , 2 相 同期検波 |
| (合計) マージン | 11.5 dB | |

タを使用し、回線計算を行った。ここでは、特にハレー彗星会合時に最もマージンが少ないテレメトリについて、「すいせい」の場合を例にとり検討した。回線計算パラメータを表-1に、計算結果を図-3に示した。

この表から分るように、搭載アンテナの口径や送信機出力はあまり大きく出来ないので、地上局アンテナシステムを大口径、低雑音にしているが、超遠距離による伝播損失は大き

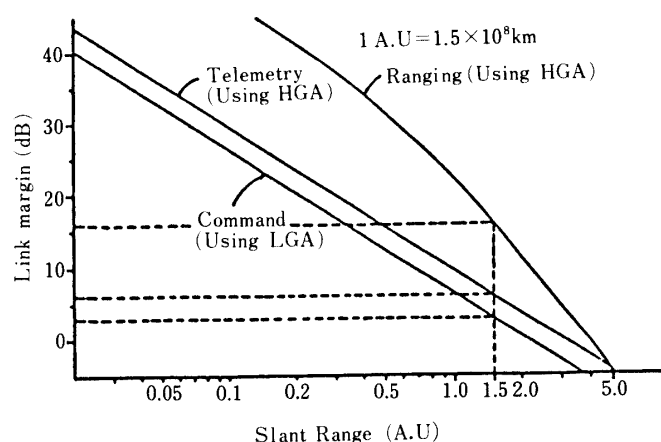


図3 回線マージン (臼田深宇宙局一探査機)

く地上局の全受信電力は -145.1 dBm となる。さらに、ここではテレメトリは低速モードを想定しているため、 64 bps のデータ速度であり、 -182.9 dBm/Hz の受信雑音電力密度、 5.1 dB の符号化利得であるから、その他の損失を含めて考えても $E_b/N_0=21.1$ dB となる。ベースバンド信号の変調が BPSK であるのでこの E_b/N_0 値は、 1×10^{-5} のビット誤り率に対し 11.5 dB のマージンとなる。これから推定すると計算上 6 億 Km まで通信可能となる。コマンド、レンジングについては、テレメトリより十分余裕があり、特にコマンドについては低利得アンテナでも、十分伝送出来ると考えられる。これらは「超遠距離通信の確保」というシステムに対しての要求条件を満たしていると言える。

3. システムの構成と特性

深宇宙通信システムは、探査機のシステムと探査機を運用する地上局システムに分けることが出来る。

通信システムの機能としては、(a)地上から探査機への指令(コマンド)、(b)探査機からのデータ伝送(テレメトリ)、(c)距離および距離変化率の測定(レンジング)がある。

3.1 「さきがけ」と「すいせい」の搭載通信システム

システム構成図を図-4に、主要諸元を表-2に示す。両探査機とも同一設計であり、Sバンドアンテナ、Sバンドトランスポンダ、コマンドデコーダおよびデータ処理装置などから構成される。Sバンドアンテナは、デスパンする部分にあるオフセット高利得アンテナ(HGA)、スピンする構体の下側の部分に位置する3段リニアアレーの中利得アンテナ(MGA)およびクロスダイポールの低利得のアンテナ(LGA)から成り立っている。アンテナ特性を表-3に示す。各アンテナは放射パターンが異なり、探査機の姿勢や距離に応じて使い分ける。

Sバンドトランスポンダは、Sバンド受信機、Sバンド送信機、ダイプレクサなどからなり、Sバンド受信機は搬送波追尾限界が -145 dBm、雑音指数 3 dB 以下で2台冗長構成になっている。Sバンド送信機は、主にテレメトリデータを伝送し、出力 70 mW と 5 W の出

表 2 通信システム主要諸元〔探査機〕

| システム名 | テレメトリシステム | コマンドシステム |
|-------|---------------------------------------|------------------------------------|
| 変調方式 | PCM-PSK-PM | PCM-PSK-PM |
| データ速度 | 2048 BPS (uncoded) 64 BPS (coded*) | 16 BPS |
| 副搬送波 | 8192 Hz, 矩形波 | 512 Hz, 矩形波 |
| 搬送波 | さきがけ：2293.1 MHz すいせい：2293.9 MHz | さきがけ：2111.6 MHz すいせい：2112.3 MHz |

* 畳込み符号：符号化率=1/2, 拘束長=7

| | | |
|-------|-------------------|--------------------|
| システム名 | 測距システム | 送信機出力 70 mW/5 W |
| 変調方式 | トーン-PM | |
| トーン波 | 1 Hz~500 kHz, 矩形波 | |

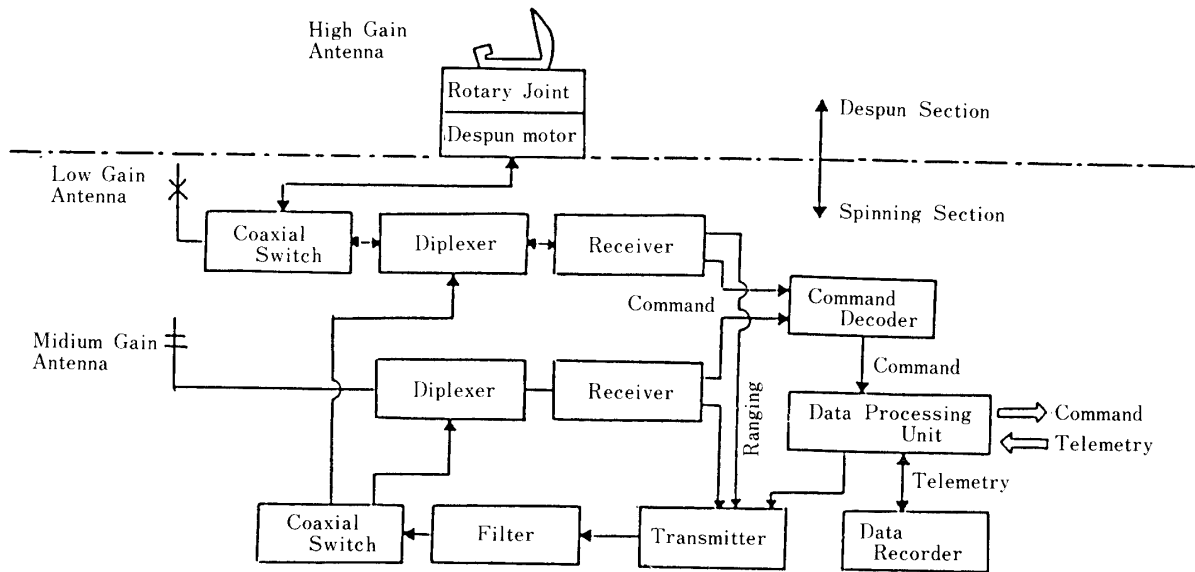


図 4 「さきがけ」「すいせい」通信システムの構成

力モードがある。70 mW は打上げ時のみ使用する。レンジングモードでは、受信機で復調されたレンジングベースバンド信号が送信機へ送られる。

コマンドデコーダは、コマンドベースバンド信号を復調しデータ処理装置へ送出するが、副搬送波がドップラシフトを受けている。このため遅いビョトレートに対応して非常に狭いフィルタ帯域でも安定に副搬送波を再生する2次デジタル位同期回路を用いている。

データ処理装置はコマンドデータの解読と蓄積を行い、各機器を実時間およびプログラムで制御を行うと共に、探査機各機器からのテレメトリデータの編集に、変調を行う。コマンドの蓄積の時には、1ビット誤り訂正可能なハミング符号(符号長12, 符号化率2/3)を用い、また低速テレメトリモード(64 bps)では畳み込み符号(拘束長7, 符号化率1/2)を行っている。データレコーダは実時間で伝送できないPCMテレメトリデータを一時蓄積し、必要に応じて再生し地上へ伝送する。素子としては磁気バブルメモリを用いている。容量は1 Mbitで、4.4時間分(64 bpsで書き込み)の記録が可能である。

3.2 「さきがけ」と「すいせい」との通信を行う臼田深宇宙局

深宇宙局のブロック図を図-5、主要なアンテナ特性を表-4に示す。

直径64 mの大口径アンテナはビーム給電形カセグレンアンテナで、主反射鏡はアンテナ仰角を変えた時の自重による変形に対してホモロジー構造をとっている。鏡面精度1.5 mmRMSである。

表3 搭載アンテナの特性(送信周波数2293 MHz)

| 名称 | | 低利得 アンテナ | 中利得 アンテナ | 高利得 アンテナ |
|--------|----|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| 放射パターン | | 半空間 無指向性 | 水平面 無指向性 | ペンシル ビーム |
| 偏波 | | 円偏波 | 直線偏波 | 円偏波 |
| 利得 | 最大 | 6.5 dB | 6.5 dB | 22.3 dB |
| | 最小 | -3.0 dB (後方±86°以内) | -2.0 dB (水平±16°以内) | (ビーム幅 : 10.6°) |

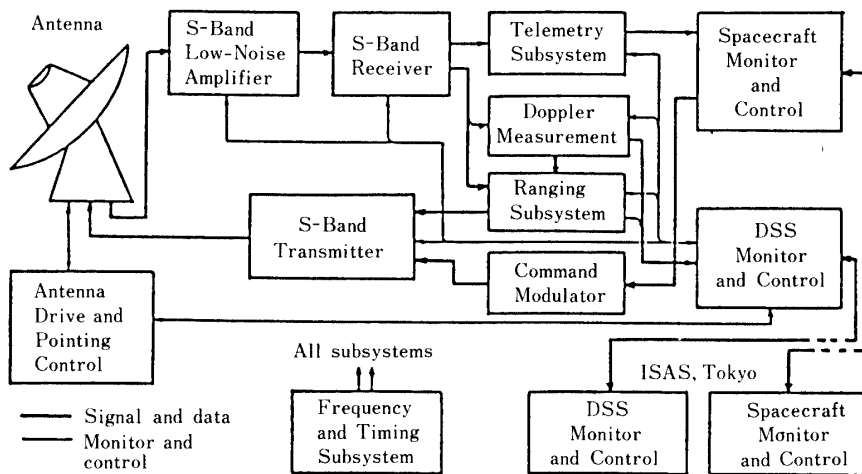


図5 臼田局の構成

表4 臼田64mφアンテナの特性

| | |
|--------|--|
| 周波数 | Sバンド(送受含んで2.1~2.3GHz) Xバンド(送受含んで7.1~8.5GHz) |
| アンテナ利得 | 62.6dB(2293MHz) |
| 開口能率 | 77%(Sバンド) |
| 雑音温度 | 12K(アンテナ単体)(天頂方向) 22K(給電分波系含む) |
| 偏波 | RHCまたはLHC |
| ビーム半値幅 | 0.13度(Sバンド) |
| 指向精度 | 0.003度RMS |

低雑音増幅器(LNA)は気体冷却のパラメトリック増幅器で、利得の周波数偏差は、30MHzの帯域で1.5dBである。雑音温度は9Kを達成出来た。

Sバンド高感度受信機はPLLで搬送波を追尾し、等価雑音帯域幅は3Hz~1kHzの間で変えることが出来、3Hzの時の最小受信レベルは-170dBmを目標としている。

大電力送信装置は、水冷形クライストロンで、200Wから40KWまで段階的に切替が出来る。探査機に対しては、受信機の位相同期ループを同期させるため、送信周波数を掃引することが出来るようになっている。

テレメトリ装置は、復調器とシンボル同期回路およびビタービ復号とで構成している。ドップラ測定は2ウェイコヒーレント方式で、連続して積分して距離の形で出力する。距離の測定は(上り搬送波周波数)/ 2^n ($n=12\sim 31$)のトーン波を順次送出し、戻りの位相を測定しアンビギュイティを除去して行う。

4. 通用結果

4.1 打ち上げ初期の運用概要

ハレー彗星探査機「さきがけ」と「すいせい」の運用は、惑星間軌道に投入後、最初に日本の可視範囲に入ってきたパス1の内ノ浦局、臼田局、勝浦局の電波追跡から始まった。その時、探査機と地球の距離は約10万kmで、最初の軌道要素はNASA(アメリカ航空宇宙局)のDSN局(Deep Space Network)と臼田局の各パス1レンジングデータをもとに算出された。その後、探査機は軌道投入姿勢から姿勢を変更し、スピン軸を太陽と地球に対し垂直に制御し電力、通信を確保した。

通信アンテナは、最初LGA(低利得アンテナ)を使用したが、姿勢変更後は、MGA(中利得アンテナ)とHGA(高利得アンテナ)を使用して運用した。地上局は、パス2以降、管制権を内ノ浦局より駒場局へ移し、駒場局から臼田局をリモート管制し定常運用に入った。

次に「さきがけ」を例にして、運用の詳細を説明する(表5)。「さきがけ」はKSC(内

表5 「さきがけ」パス1入感から管制権を駒場局へ移行するまでの運用

| | | | |
|-------|-------------------|--------------------|---|
| 1/ 8 | 4:46:48 | ゴールドストーン局入感 | 受信レベル-119 dBm, スピン 29.6 rpm (偏波直線) |
| | ⋮ | ⋮ | |
| | 9:13:06 | 勝浦局入感 | 受信レベル-139 dBm EL=2.6° |
| | 9:14:26 | 内ノ浦局入感 | ダイバシティ受信機 |
| | 9:17:55 | 内ノ浦局入力レベル -125 dBm | 10 mφ アンテナ |
| | 9:24 | 内ノ浦局テレメータ Lock ON | $\theta_s=89^\circ$, スピン 28.76 rpm |
| | 9:27 | 内ノ浦局アンテナ Auto 追尾開始 | |
| | 9:39 | 内ノ浦局再度テレメータモード | $\theta_s=89^\circ$, テレメータデータを 駒場, 臼田へ伝送, 温度等正常 |
| | 9:40頃 | 勝浦局 Auto | -116 dBm~-118 dBm スピン 28.6 rpm, EL=5.04° |
| | 9:55頃 | 臼田局低レベルで受信 | |
| | 9:59 | 臼田局が勝浦局に slave | -117 dBm で受信 |
| | 10:00 | 臼田局 Auto | -113.6 dBm, EL=8°, AZ=133.7° |
| | 10:20 | 内ノ浦局 10 mφ より送信 | レンジングのため |
| | 10:25 | Range=10万 1049 km | 内ノ浦より |
| | 10:30 | Range=10万 2200 km | 同上 |
| | 10:38 | Range=10万 3900 km | 同上 |
| | 11:00 | 内ノ浦局から臼田局へ引渡し | |
| | 11:01 | 臼田局 64 mφ より送信 | |
| 11:26 | 臼田局レンジング開始 | | |
| 11:29 | Range=11万 4785 km | | |
| 1/ 9 | 11:00頃 | 384400 km (月までの距離) | |
| 1/12 | 18:00頃 | 100万 km (影響圏脱出) | |

ノ浦) から打ち上げ後, 約 20 分で NASA のゴールドストーン局で受信, 追跡された。打ち上げ 28 分後, 非可視域においてプログラムコマンドによって θ_s (太陽と探査機のスピン軸とのなす角度) = 90° の太陽捕捉制御が実行され, 送信アンテナが LGA から MGA に切り替えられた。

打ち上げ後 4 時間 33 分に, S バンド送信機出力がロウパワーからハイパワーに切替えられ, 日本の可視領域 (パス 1) に入った。

さらにパス 18 には略黄道面垂直, パス 21 においてはデスパン制御がそれぞれ実行され, 送信アンテナも MGA から HGA に切替えられた. この間, レンズング, テレメトリデータによる探査機のチェック, 姿勢制御チェック, 軌道決定, 姿勢決定などが行なわれた.

4.2 通信システムの動作状況

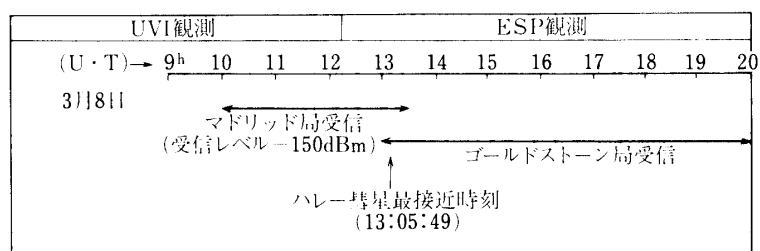


図 6 マドリッド局とゴールドストーン局でリアルタイム受信時間帯

表 6 「すいせい」の通信に関する運用

| | |
|----------------|---|
| 1985年 8月19日 | 打上げ, 探査機送信レベル 70 mW → 5 W 臼田局送信レベル 200 W スピンドアウン (29 → 6.5 rpm), 姿勢制御 |
| 8月20日 | 姿勢制御, アンテナ切替え (LGA → MGA) |
| 8月23日 | 臼田局送信レベル 2 kW に変更 |
| 8月24日 | アンテナ切替え (MGA → HGA) デスパン開始 |
| 9月2日 | 太陽風粒子の観測開始 |
| 9月4日 | スピン切替え (6 rpm → 0.2 rpm) チェック |
| 9月7日 | UVI 撮影開始 |
| 1986年 1月5日 | 臼田局送信レベル 20 kW に変更 |
| 1月14日 | テレメトリ 高速モード → 低速モード |
| 3月8日 | JPL マドリッド局受信 ハレー彗星に最接近 JPL ゴールドストーン局受信 |

4.2.1 概要

85年1月と8月に打ち上げられた「さきがけ」と「すいせい」の通信システムは, その後臼田地上局システムも含めて順調に作動した. 86年3月のハレー彗星会合時は, 探査機が日本では非可視にあったため受信できなかったが, NASA のマドリッド局とゴールドストーン局で正常に受信された. 最接近時の彗星から出るダストによる損傷が心配されたが,

それもなく無事通過することができた。

会合時の観測テレメトリデータは、日本の可視領域でデータレコーダの再生によって良好に取得することができた。また NASA 両局でのリアルタイム受信時間帯は、図-6 に示す通りである。

会合後の両探査機は、その後も太陽を廻る惑星軌道を飛び続けている。現在地球との距離は 2 億 km 以上の遠距離にあり、太陽風データを送り続けている。

表-6 に「すいせい」の打ち上げから 3 月 8 日のハレー彗星会合までの通信に関する運用を示す。

4. 2. 2 受信データによる通信系の評価

図-7 は、打ち上げ後のテレメータ電波の地上局受信レベルの変化を、横軸に距離をとり示した。距離に応じてアンテナを切替えていく様子が見られるが、LGA の場合リップルが大きい。これはこの時のスピン軸が地球を向いているため、スピンと共にアンテナパターンの切れ込みが現われたものである。

MGA へ切替えた後、4 パスでは姿勢制御を行いアンテナパターンが地球を向いたので、レベルが上っている。5 パス以降は HGA に切替えたためレベルはアンテナ利得の差だけ急増している。

会合時には -149 dBm ~-150 dBm であった。理論値は表-2 において、距離によるレベル低下と変調による搬送波の減少 (4.1 dB) を加えた受信電力値である。実測値と理論値は良く一致しており、姿勢・軌道を含めた通信系が正常に動作したことが確認できる。なお、ハレー彗星会合時の Eb/No の測定値は 17 dB で、テレメータのデータ品質としては 10^{-5} のビット誤り率を保証出来たと思われる。

また図-8 には横軸に DATE をとり、縦軸は受信レベル、レンジングの S/No、距離を示した。距離に応じてレベルやレンジング信号の S/No 変化を読みとることが出来る。

一方、地上から探査機への上り回線については、探査機受信機の受信レベルや受信周波数偏差が、テレメトリデータとして地上に伝送される。図-9 は、横軸に DATE をとり、縦軸は受信機入力レベルと受信周波数偏差を示した。受信周波数偏差については、地上の送信周波数と探査機受信機ベストロック周波数との差であるが ± 10 KHz 以内に入っており、受信機の動作は正常でかつ軌道予測も良く合っていることを示している。

観測機器の運用に使用しているプログラムコマンドやブロックコマンドは、非可視での観測には有効で、特に紫外線カメラによる撮像では、探査機のスピンを 0.2 rpm にしてカメラを走査するため、データ取得率を上げるのに役立っている。

また非可視での観測データは、データレコーダに記録され、可視時間の前半で再生し伝送した。特にハレー彗星に最接近の時は、日本の臼田局は非可視になったが、データレコーダを使用することによって観測データを取得することが出来た。

なお、距離および距離変化率の測定および運用結果についての誤差解析は、別論文〔4〕として記述されているので、それを参照されたい。

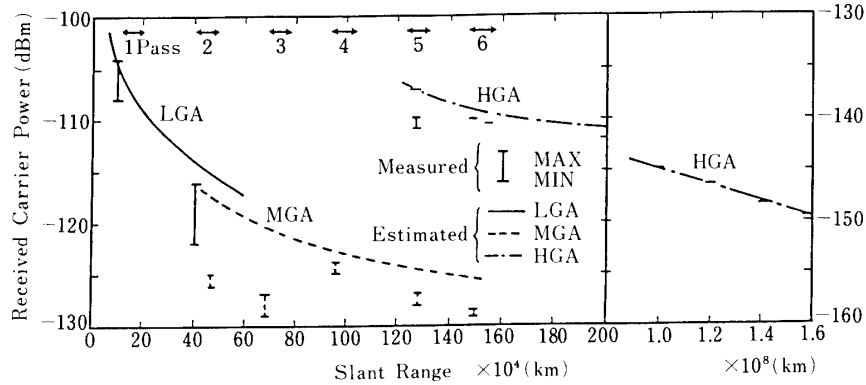
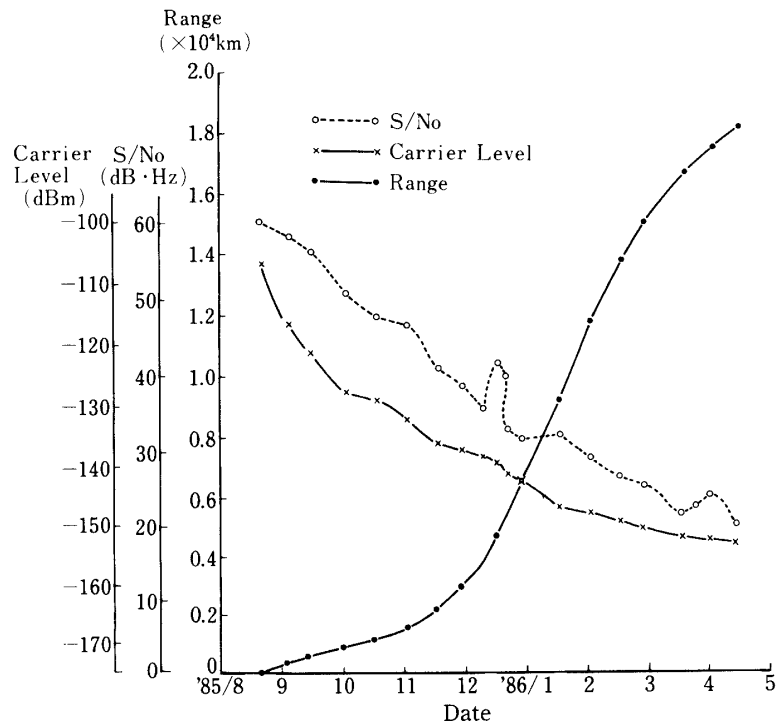


図 7 Slant Range VS. Received Power Level



(b) SUISEI

図 8 Date VS Carrier Level, S/No and Range

4.2.3 HGA のパターン測定

探査機の主要アンテナである高利得アンテナ (HGA) のパターン測定を 10 月 9 日軌道上で実施した。デスパン制御角を 0.7 度ステップで左右に振り、地上局の受信レベルをモニタしながらデータを取得した。図-10 から分かるように測定結果は地上での測定データと良く一致している。ビーム中心は 0.3~0.4° 程度ずれているが、3 dB ビーム幅は ±5° で打ち上げ前のデータと変わっていない。デスパン制御角と測定読取り誤差を考慮に入れると、打ち上げ後も殆んど特性が変わっていないと云える。

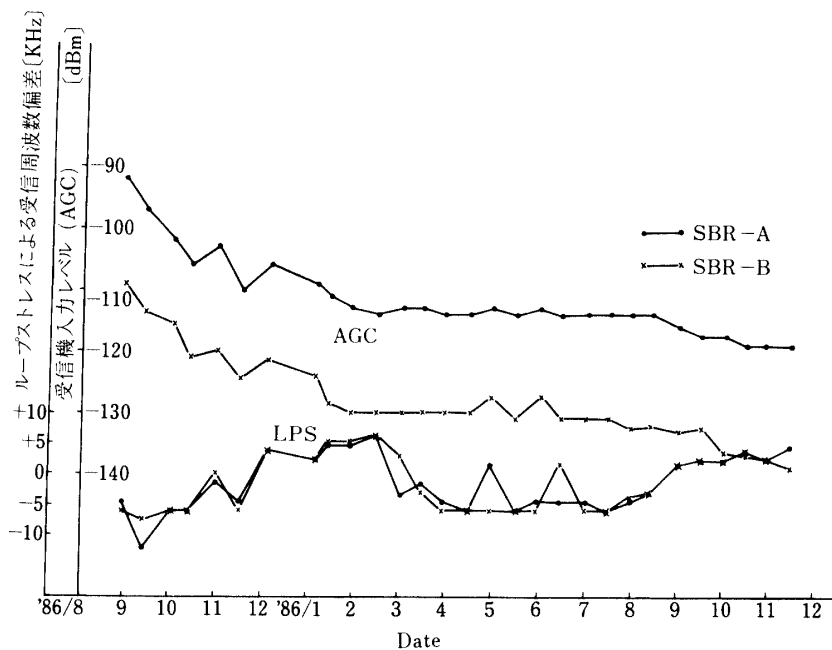


図9 “すいせい”のSバンド受信機入力レベル(AGC)とループストレス(LPS)

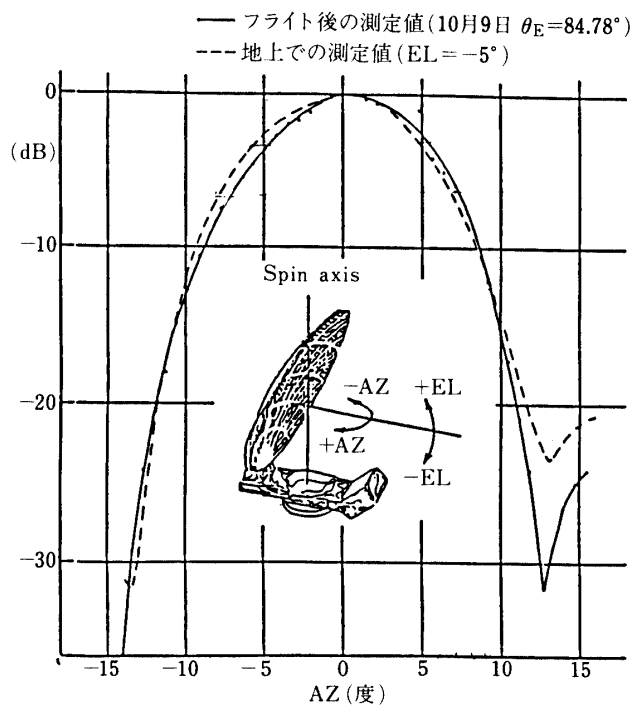


図10 HGAの軌道上でのアンテナパターン測定

5. おわりに

ハレー彗星のために開発・設計した通信システムについて、その要求条件、構成と性能、運用結果等について述べた。新規に開発した技術が数多く採用されたが、軌道上での観測・運用結果からシステム設計の妥当性が実証された。最後に本システムの開発ならびに運用にあたり終始御指導、御協力をいただいた宇宙科学研究所および日本電気株式会社、三菱電機株式会社、富士通株式会社の関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] T. NOMURA et al. "Communication system for the Japanese interplanetary spacecraft MS-T5/PLANET-A", 36th Congress of the International Astronautical Federation, IAF-85-388, Stockholm (Oct, 1985)
- [2] 井上他, "ハレー彗星探査機用無線方式", 昭和61年度電子通信学会総合全国大会, 2392
- [3] 野村他, "ハレー彗星探査のための無線通信システム", 電子通信学会論文誌B (1986)
- [4] T. NISHIMURA et al. "Tracking and Orbit Determination of "SAKIGAKE" and "SUISEI" Encountering Halley's Comet", Proc. 15th Int. Symp. on Space Technol. and Sci., 1986, Tokyo.
- [5] 野村他, "「さきがけ/すいせい」の通信システム," NEC 技報 vol. 38 No. 13/1985
- [6] T. HAYASHI et al. "Operation Result of Communication Facilities at the Usuda Deep space Center", Proc. 15th Int. Symp. on Space Technol. and Sci., 1986, Tokyo.
- [7] 野村他, "ハレー彗星探査と臼田大型アンテナ", 電子通信学会誌, 67, 10, pp. 1039-1044, (昭59-10)
- [8] 林 他, "臼田宇宙空間観測所大型アンテナ", 電子通信学会技報, AP 85-73, (1985-10)