

“さきがけ(1985-001 A)”及び“すいせい(1985-073 A)”  
のデスパンアンテナ制御系

林 友直・升本 喜就\*・川口 正芳\*

(1985年12月10日受理)

Antenna Despin Control System  
for “SAKIGAKE(1985-001 A)” and “SUISEI(1985-073 A)”

By

Tomonao HAYASHI, Yoshinari MASUMOTO  
and Masayoshi KAWAGUCHI

**Abstract :** Japan's inter-planetary exploration spacecraft “SAKIGAKE” and “SUISEI” employ a mechanically despun antenna which operates at 0.2 rpm and 6 rpm spin rates. This is the first time that an antenna-despin-control system is used in space at an ultra-low spin rate of about 0.2 rpm. The despin control system was developed by incorporating several new techniques and its performance confirmed through the ground tests and the computer simulation. This paper describes the system tradeoff and study of the antenna despin control system developed for “SAKIGAKE” and “SUISEI” together with the flight data.

1. はじめに

“さきがけ”及び“すいせい”に搭載された高利得アンテナは、軽量かつ低消費電力のシステムを構成するため種々の方式のトレードオフを行なった結果、メカニカルデスピン方式が採用された。しかし探査機のスピンのレートが0.2 rpm及び6 rpmと非常に低速なため、デスピンモータのコギングトルクに起因するポインティングジッタを抑圧するのが大きな

---

\* 日本電気株式会社 宇宙開発事業部衛生システム開発部

技術的課題であった。

特に0.2 rpmの超低スピンのにおけるデスパンアンテナ制御系は新しい試みであり、上記2種類のスピンレートモード間の遷移をいかに速めるかも問題となった。

これらに加えて“さきがけ”においては伸展アンテナ等の柔軟物とのダイナミックなカップリングの影響及び“すいせい”においてはハレー撮像時のスピンレート変動に対するデスパンアンテナ制御系の影響も重要な解析課題であった。

これらの問題を解決し、ポインティング精度( $\pm 0.3$ 度以内)を満足するアンテナ制御系を実現するために、種々の低スピンレート用回路を試作し実験を行うとともに、コンピュータシミュレーションによる検証を行った。これをもとにプロトモデル(PM)の製作を行い、一軸レートテーブルを用いて過渡応答特性試験及びポインティング性能試験などを探査機本体のダイナミクスをも考慮して実施した。これらの試験結果より本制御系が要求性能を満足していることが確認された。

その後、PMをもとにフライトモデル(FM)の設計及び製作を行い、環境試験、総合試験を経て、すべての面で運用に支障のないことが確認された。

フライト後の運用についても、地上試験にて得られた性能に変化のないことが確認され、現在も高利得アンテナによる通信が支障なく行われている。

本報告では、以上述べたデスパンアンテナ制御系の設計検討、開発試験およびフライトデータについて述べる。

## 2. 高利得アンテナ系のトレードオフ

まずアンテナ方式として種々のメカニカルデスパンアンテナ及びエレクトリカルデスパンアンテナが検討されたが、“さきがけ”および“すいせい”の探査機重量が非常に厳しく制限されたこと、及び回線設計上から21 dBi以上の利得が必要である点から、オフセットパラボラアンテナによるメカニカルデスパン方式が採用された。

また、メカニカルデスパンアンテナの制御方式についても、次の2つの方式がトレードオフの対象となった。

1) RF センサを用いたオートトラッキング方式

2) サンセンサ又はスターセンサ、及び地上からのコマンドサポートによる方式

制御方式のトレードオフについても重量を最重点に考え、最も構成の簡単な2)の方式を採用することにした。なお、使用するセンサについても、スターセンサ信号のオンボードでの処理には非常に複雑な回路が必要であるとともに、運用も難しくなるため、サンセンサのみを用いる構成として、太陽を基準としてアンテナのポインティング方向を決定する方式とした。この方式による概念図を図1に示す。また、本高利得アンテナを搭載した“すいせい”の外観を写真-1に示す。

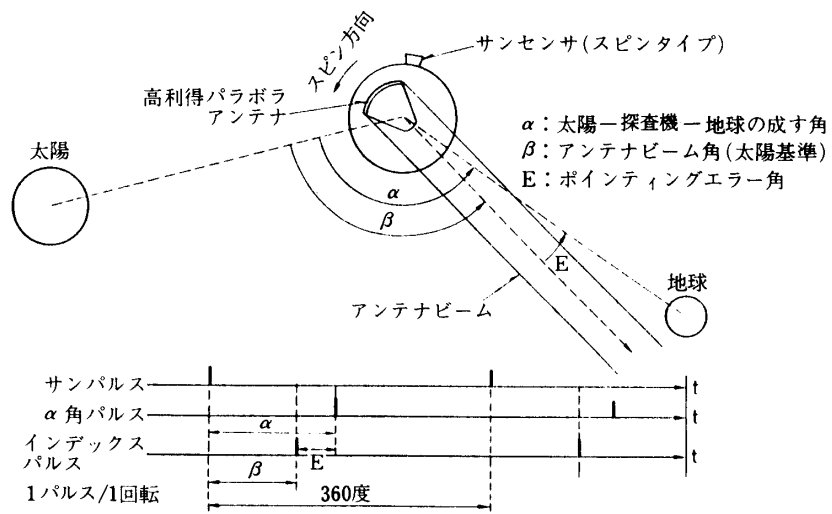


図-1 サンセンサを用いたポインティング方式の概念図

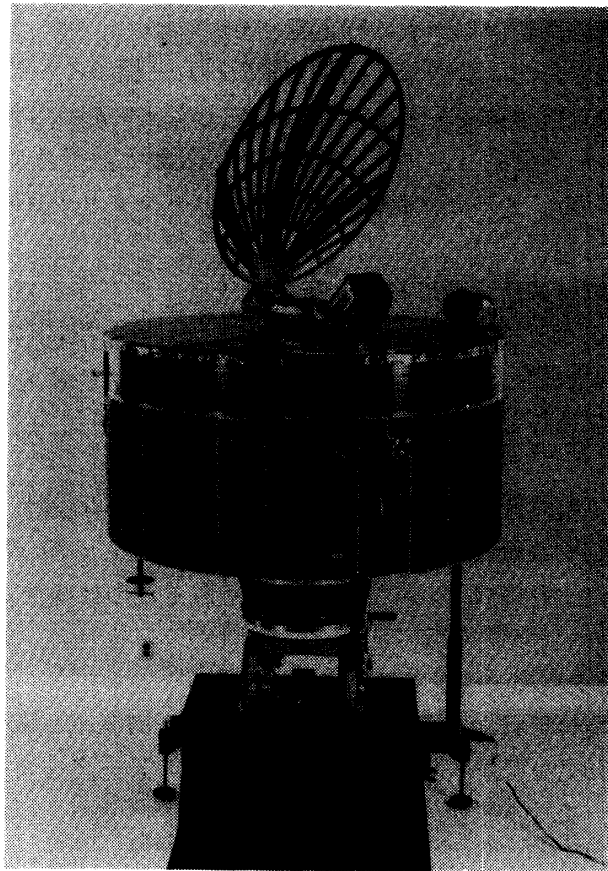


写真-1 “すいせい”の外観

### 3. デспанアンテナ制御系に対する要求条件

#### (1) ポインティング精度に対する要求

アンテナのポインティングジッタによるアンテナゲイン変動は主にレンジングの性能を満足するための条件として、0.2 dB 以下であることが要求された。アンテナのビームパターンより、ゲイン変動が0.2 dB 以内となる範囲は約±1.0度である。これに対し本制御系の設計に当たっては、マージンを考慮し設定角に対するポインティングジッタを±0.3度以内に納めることを設計目標とした。

#### (2) スピン同期パルス発生部に対する要求

アンテナをスピンに同期してデスピン制御するために、スピンの同期した逡倍パルスが必要となる。

“さきがけ”及び“すいせい”ではスピンレートが非常に低いため、アナログフェーズロックループ(アナログPLL)を用いた場合PLLがロックするまでの時間が長くなることが予想された。これは運用上好ましくないため、0.2 rpmの低スピンレートにおいても2~3スピン以内にロックすることが要求された。

また、観測機器が探査機の位相情報をオンボードで使用できるように、デスピン制御系より必要な観測機器に $2^{12}$ 逡倍および $2^{15}$ 逡倍のスピン同期パルスを出力することも要求された。

#### (3) ハレー撮像時のスピンレートの安定度

“すいせい”に搭載された、真空紫外撮像装置のハレー撮像モードにおいて、その撮像方式より撮像時の探査機本体レート0.2 rpmに対して±0.4%以内の安定度が要求された。探査機本体のレート変動は、ホイールレートの変動と、デスピンモータのトルクリップルに依存するため、デスピン制御系としても、トルクリップルを極力小さくする必要があった。

#### (4) 柔軟物とのカップリングにおける安定性

“さきがけ”には5 mの伸展アンテナおよび2 mの伸展マストの柔軟構造物が搭載されたため、これら柔軟物とデスピン制御系とのダイナミックなカップリングによって、不安定動作とならないことが重要であった。

### 4. デспанアンテナ制御系のシステム設計

デспанアンテナ制御系は大きくわけて、デスピンモータとそのドライバ、及びデスピン制御装置(DCE)により構成される。以下に、それぞれの仕様決定および方式設計について述べる。

#### 4.1 デスピンモータ(モータドライバを含む)

デスピンモータについては、米国のBall社、西独のDornier社等の製品を調査したが重量、電力及び宇宙での使用実績等の理由からBall社製のモータを使用した。デスピンモータの仕様決定に当たっては次の点を考慮した。

##### 1) 温度範囲

熱解析結果より、デスピンモータの低温化が予測されたため、性能維持温度範囲を

-50°C～+70°Cとした。このため、モータの潤滑には低温での動作が安定な、固体潤滑(VACKOTE)を用いることにした。

## 2) 長寿命化

長寿命化のためモータはブラシレス DC モータとし、コミュテーションにはレゾルバを用いる方式とした。

## 3) 速度および位置検出

速度及び位置検出には低スピレートでも安定な出力が得られるようにオプティカルエンコーダを採用した。エンコーダはインクリメンタル方式とし、0.2 rpm のスピレートにおいても十分な応答が得られるよう、1スピンのレートパルス数を $2^{12}$ とした。また、信頼度を高めるためエンコーダに使用する LED およびフォトランジスタを冗長構成とした。

デスピンモータおよびドライバの外観を写真-2 に、主要諸元を表-1 に示す。

表 1 デスピンモータおよびモータドライバの主要諸元

項	目	諸	元
デスピン モータ	タ	イ	ブ
	ピーク	トルク	
	コギング	トルク	
	速度および位置の検出		
	重	量	
モータ ドライバ	外	形	
	消費	電力	
	温度	範囲	
	重量	形状	

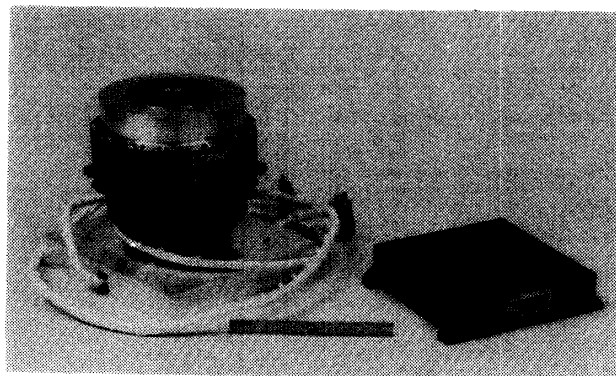


写真-2 デスピンモータおよびモータ・ドライバの外観

## 4.2 デスピ制御装置 (DCE)

DCEの全体ブロック図を図-2にDCEのフライトモデルの外観を写真-3に示す。なお、写真-3においてDCEは軌道姿勢制御装置と同一のケースに収納されており、DCEの占める部分は上部約1/3の部分である。制御系全体の構成がわかりやすいように、図-2のブロック図ではデスピンモータおよびドライバも含めて記載した。図に示すように、大きく分けてDCEはスピン同期パルス発生部、ポインティング角制御部、サーボコントロール部より構成されている。

DCEの設計に当たっては前述の要求条件を満足させるため、スピン同期パルス発生部及びサーボコントロール部に低スピレートでの制御用に開発したいくつかの回路を採用した。以下に、DCEの回路構成及び技術的な検討を述べる。

なお、表-2にDCEの主要諸元を示す。

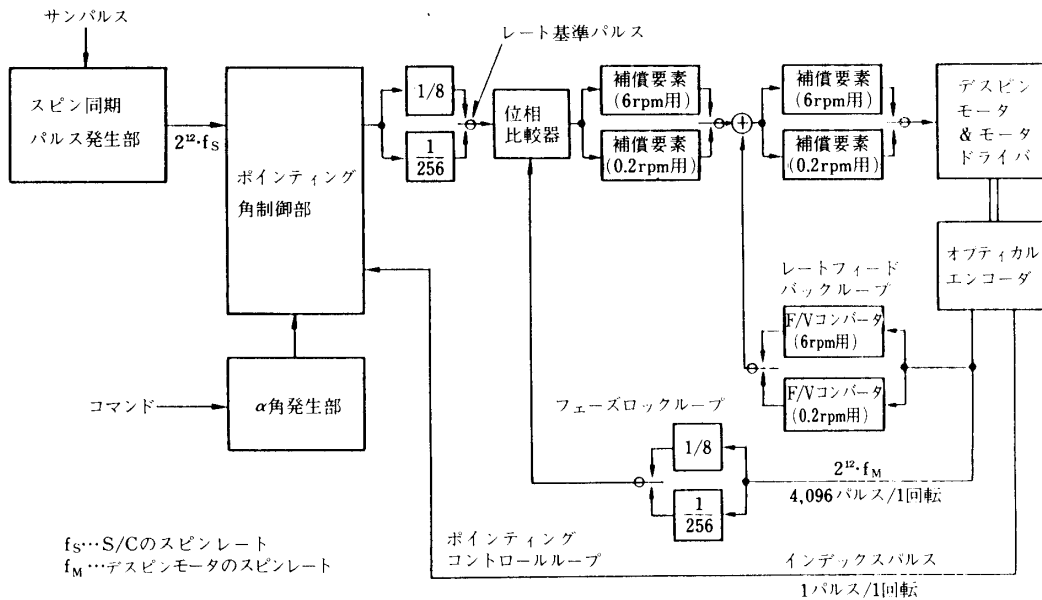


図-2 デスピ制御装置 (DCE) のブロック図

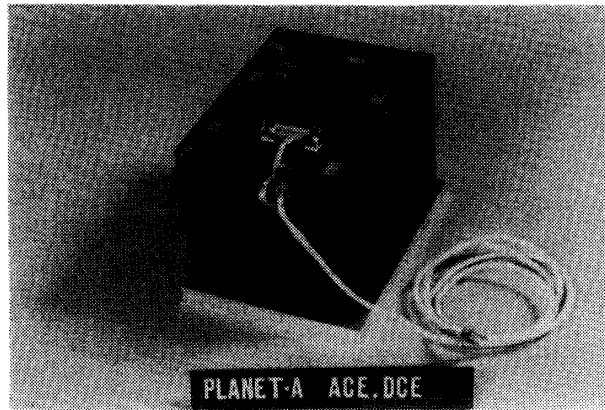


写真-3 デスピ制御装置外観

表2 デスピン制御系の主要諸元

項目	諸元
外形 重量 消費電力	180 × 240 × 50 mm 1.1 kg 0.5 W
主要コマンド項目	ポインティング角セット ポインティング角変化率セット 6 rpm モード制御スタート 0.2 rpm モード制御スタート 0.7° ステップ制御
主要テレメータ項目	ポインティング角情報 スピン周期情報 探査機本体の位相情報 ハウスキーピング
スピン同期パルス	$2^{12}/\text{spin}$ , $2^{15}/\text{spin}$

## (1) スピン同期パルス発生部

低スピンレートでの定常状態への到達時間を極力短くするため，“さきがけ”および“すいせい”では，一般に用いられているアナログ PLL による位相同期方式に対して，何らかの改善を施す必要があった。

このため，アナログ PLL に初期値をプリセットする方式，及びカウンタでスピン周期を計測しオープンループで出力する方式が検討の対象となった。検討結果を表-3 に示す。これより，いくつかのデメリットはあるものの回路のシンプルさと定常状態への到達時間を短くできる点から，オープンループによる方式を採用することとした。図-3 にブロック図を示す。動作はまずカウンタでスピン周期を計測した後，このデータを 12 ビ

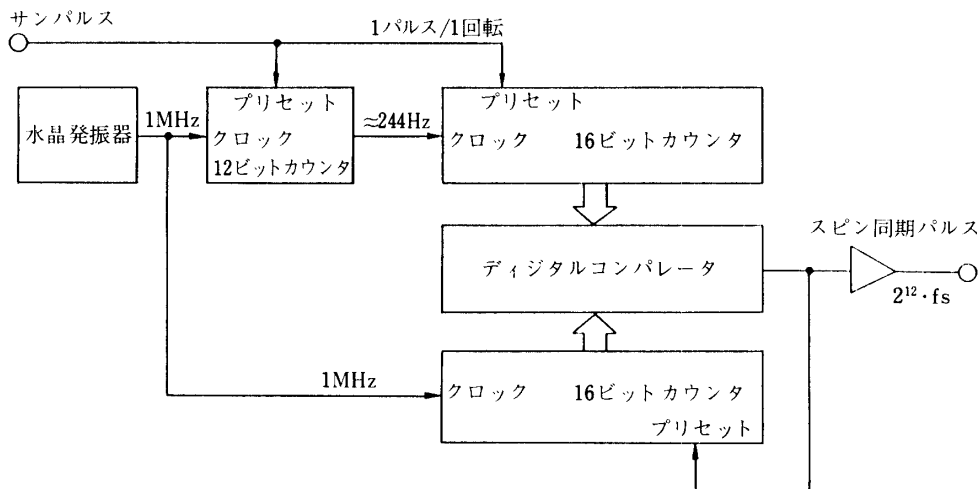


図-3 スピン同期パルス発生部ブロック図

表3 スピン同期パルス発生方式のトレードオフ

項目	方式	アナログ PLL 方式	デジタルオープンループ方式
ロックレンジ		狭い それぞれのスピンモードに対して 別々の回路が必要	広い 0.1 rpm から数 rpm までをカバー できる
定常状態への到達時間		遅い	早い
位相誤差		比較的大きい、但し誤差の蓄積が ない。	基本クロックの周波数により変化 誤差の蓄積がある。
部 品		リーク電流の少ない特殊なコンデ ンサが必要	問題なし
回路規模		大 特性を改善するための付加回路が多い	小

ットシフトすることにより、 $2^{12}$  の割算を行い、割算の結果に等しい周期のパルスをスピン同期パルスとして出力するものである。

この方式による場合、少なくとも2つのサンパルスが入力された時点でスピン同期パルスの使用が可能である。

なお、この方式はオープンループであるため、スピン周期計測における誤差が蓄積するという問題があるが、この誤差は、次に述べるポインティング角制御部で逐次補正し計測誤差が蓄積しない方式を開発した。

## (2) ポインティング角制御部

このブロックはデスピンのモータを含んだサーボ系の最も外側の制御ループを構成する部分である。このブロックはスピン同期パルスの位相をポインティングエラーの大きさに応じて、リードおよびラグ制御し、これをサーボループ部へレート基準信号として供給する。デスピンのモータはこのレート基準信号に同期して制御されるためポインティングエラーを0とする方向へのモータのリード、ラグ制御が可能となる。図-4 にポインティング角制御部のブロック図を示す。

ポインティングエラー角  $E$  は、図-1 に示すように  $E = \beta - \alpha$  である。 $\alpha$  は地上からコマンドにより設定し、 $\beta$  はサンパルスとポジションパルス(デスピンのモータのロータ部が探査機本体との相対角で特定の角度に来た時に出力される)とのタイムインターバルを角度に変換したものである。このポインティングエラー角  $E$  の大きさにより、デスピンのモータのレートをリード・ラグ制御し、ポインティングエラーを0とする制御が行われる。また、リード・ラグ制御は、リード時、ノミナルの9/8倍、ラグ時7/8倍のレートに制御するものとした。この場合のポインティング角変更速度は1スピン当たり45°となる。

このようにして、1スピン1回の割合でポインティングエラーの検出およびエラー



の補正が行われる。

なお、最短距離でのポインティング角変更が可能のように、適正制御方向を検出するための制御方向検出回路を付加した。

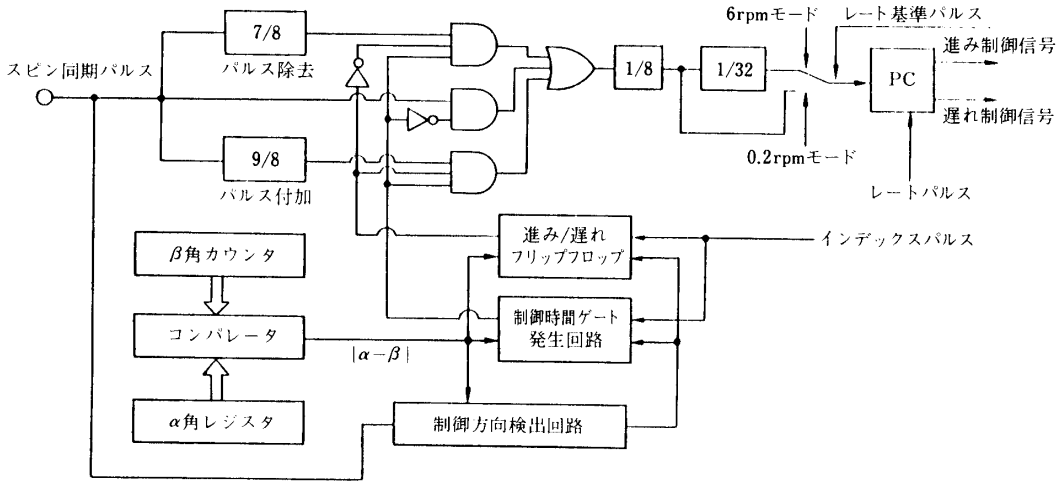


図-4 ポインティング角制御部ブロック図

### (3) サーボコントロール部

サーボコントロール部はデスピアンテナがポインティング角制御部より出力されるレート基準信号に同期して回転するように制御する。したがって、前述のように、アンテナのポインティング角制御量はポインティング角制御部での位相制御量にほぼ一致する。図-5 にサーボコントロール部のブロック図を示す。

図-5 に示すように、このブロックはレートダンピングのためのレートフィードバックループと、レート基準信号にデスピアンテナレートを同期させるためのフェーズロックループより構成される。

なお、サーボコントロール部の開発に当たり、超低スピンのレートであること、及び 0.2 rpm と 6 rpm の 2 つのモードがあることから次に示すような問題があった。

- a) 2 つのスピンのレートモードのレート差が大きいため単一のサーボ系で構成する場合、非常に広いロックレンジを必要とする。
- b) レートパルスからレート電圧への変換はモノマルチバイブレータと、レート電圧のリプルを除去するためのローパスフィルタで構成される。0.2 rpm モードの場合、ローパスフィルタのカットオフ周波数が 1 Hz 程度となりサーボ系の応答周波数に近い場合ローパスフィルタのカットオフ周波数付近の位相遅れがサーボ系の安定性に影響を与える。
- c) 0.2 rpm モードでは安定性を確保するため制御トルクを非常に小さくおさえる必要がある。この場合モータ自身のもつコギングトルクが制御トルクとほぼ同程度となり、コギングトルクによるポインティングジッタを抑圧するのが難しい

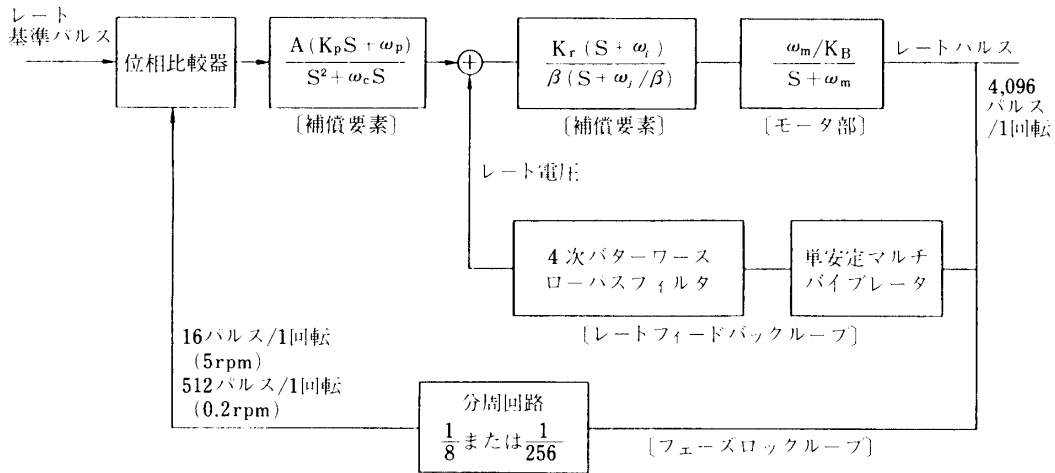


図-5 サーボコントロール部ブロック図

以上の問題点を解決するため以下に示す開発及び改善策を行った。

a)については軽量化のため各スピンモードに対する専用回路は設けず、サーボループ内のゲイン及び補償要素等の回路定数を各スピンモードに合わせてスイッチで切替える方式を採用した。

また、スイッチにはC-MOSアナログスイッチを用いた。

b)についてはデスピンモータから得られるレートパルスの立上がり及び立下がりの両エッジを利用しレートパルス周波数を4096/revから倍の8192/revに上げ、ローパスフィルタのカットオフ周波数を約1 Hzから2 Hzに引き上げた。

また、ローパスフィルタとして4次のフィルタを使用しカットオフ特性を改善することによりカットオフ周波数をさらに6 Hzまで引き上げた。

以上により、ローパスフィルタのカットオフ周波数付近の位相遅れをサーボ系の応答領域より高域に移動させ位相マージンを改善した。

c)については0.2 rpmモードでのフェーズロックループの位相比較回数を512/revとし制御トルクを小さく抑えたままフェーズロックループのゲインを可能な限り上げ、コギングトルクによるポインティングジッタを要求範囲内に抑えることに成功した。

以上のほか、レートフィードバックループにはリード・ラグフィルタによる位相補償回路を挿入しゲイン及び位相マージンを改善するとともにフェーズロックループフィルタには完全積分型リード・ラグフィルタを用い定常誤差が発生しないよう配慮した。

## 5. 性能評価のためのシミュレーション試験

以上述べた構成によるデスパンアンテナ制御系の性能評価を行うため、PMを用いてシミュレーション試験を行った。試験項目は大きく分けて次の3項目とした。

- 1) 過渡応答特性 (制御開始時, ポインティング角度変更時)
- 2) ポインティング性能

### 3) 探査機本体レートへ与える影響（ハレー撮像時）

#### 5.1 試験系の構成

試験はすべての項目について同一のセットアップで実施した。試験系の構成を図-6に示す。本試験では一軸回りのレートテーブル上にデスピンモータと高利得アンテナを搭載し、DCEによるポインティング制御を行った。

なお、テーブルのスピンレートをミニコンにより制御し、探査機のダイナミクスを含んだ系でのシミュレーションができるようにした。サンセンサはテーブルに取付け、擬似太陽光としてはレーザー光を用いた。

以上の構成により実験室内で実際にアンテナをあるターゲットにポインティングさせ、光学変位計等によるポインティングジッタの測定を可能とした。

探査機本体とデスパン部との相対レートは角度分解能0.5分のオプティカルエンコーダによりミニコンに入力し、探査機のダイナミクスを含んだクローズドループを構成した。

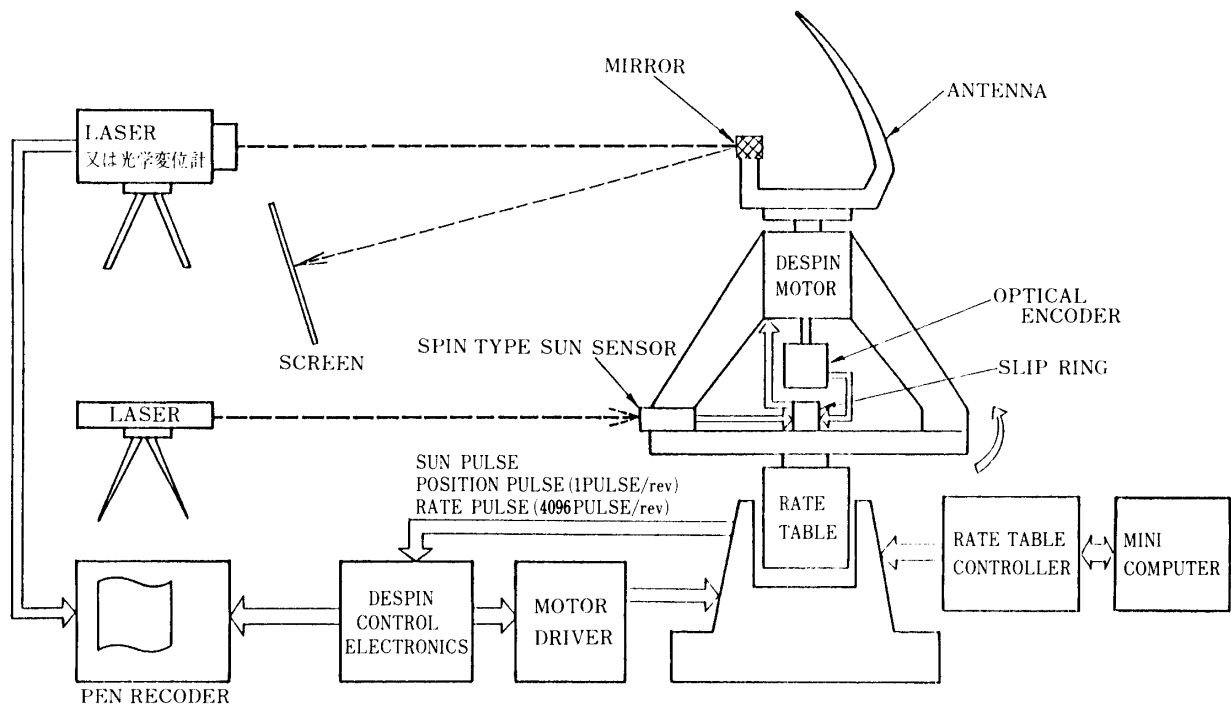


図-6 デスピン系シミュレーション試験の構成

#### 5.2 試験結果

制御開始時及びポインティング角変更時とも、不安定動作はなく要求された機能を満足していることが確認された。図-7にポインティング制御開始時の探査機本体とデスパンアンテナとの相対レートと探査機本体のレートについての過渡応答結果を示す。また、図-8に6 rpmのモードにおいて45°のポインティング角変更を行った場合のポインティング角の応答を示す。

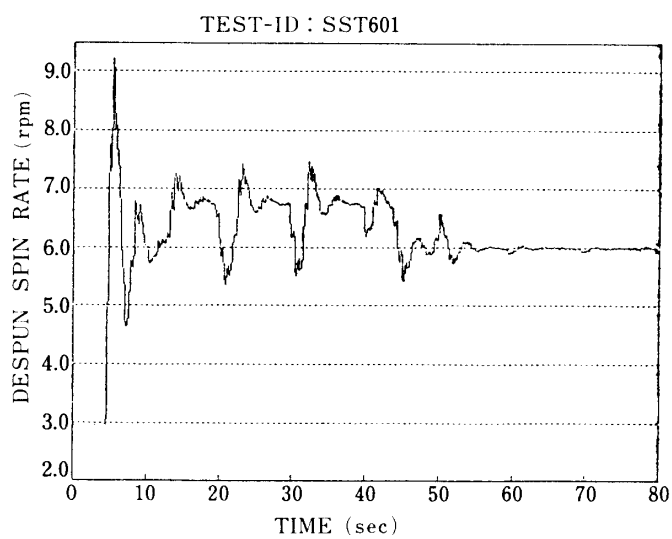
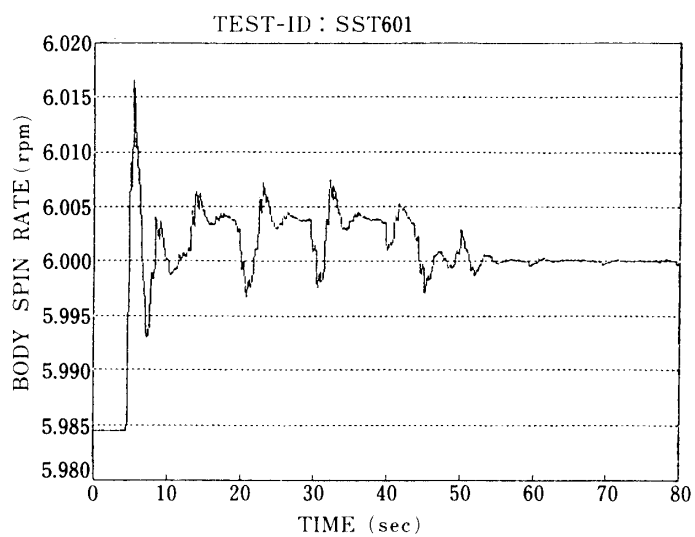


図-7 デスピン制御スタート時の探査機本体及びデスパンレートの過渡応答

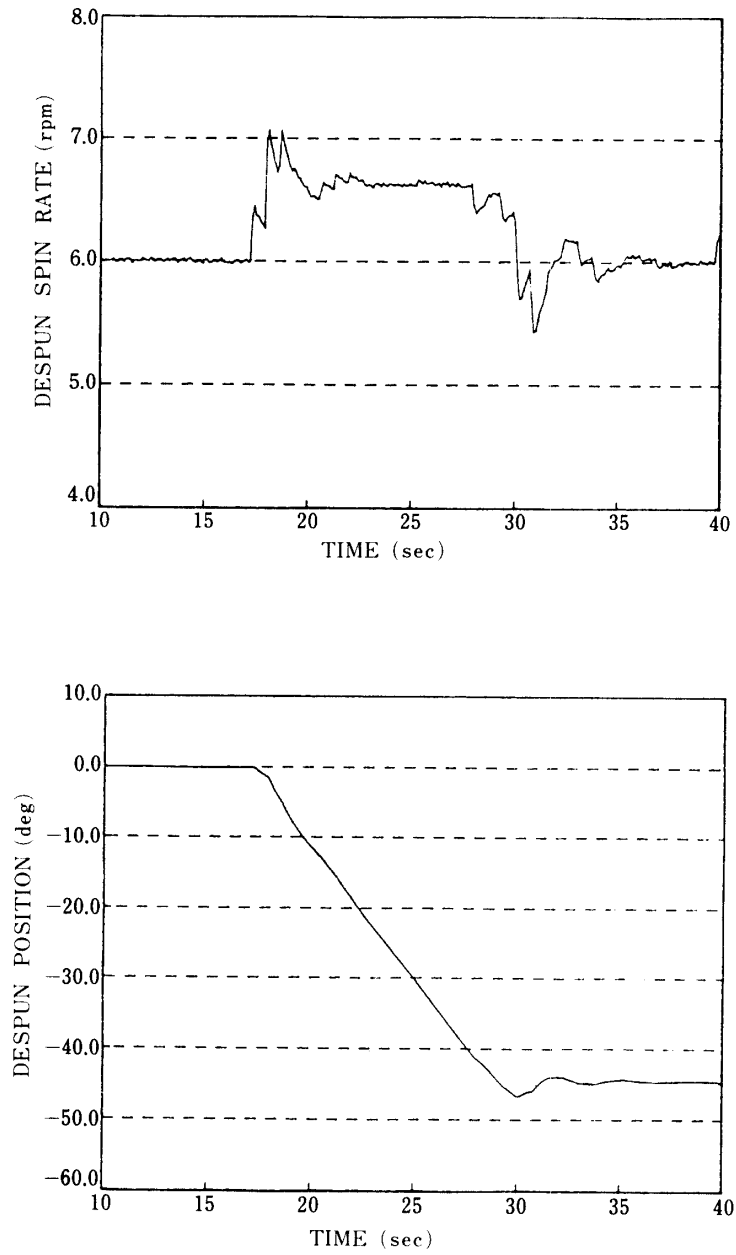


図-8 45° ホイニング角制御時の応答

## (2) ポインティング性能

上記に示した試験系において、ミラーの反射光および光学変位計によりポインティングジッタの測定を行い、0.2 rpm および 6 rpm のモードにおいて、ポインティングジッタ $\pm 0.3$ 度以内の要求を満足していることが確認された。オプティカルエンコーダの出力より算出したポインティングジッタを図-9及び図-10に示す。

また、 $\pm 0.3$ 度以内のポインティングジッタを確保できるスピンレート範囲についても試験により求め、運用上問題のない動作レンジをもつことを確認した。

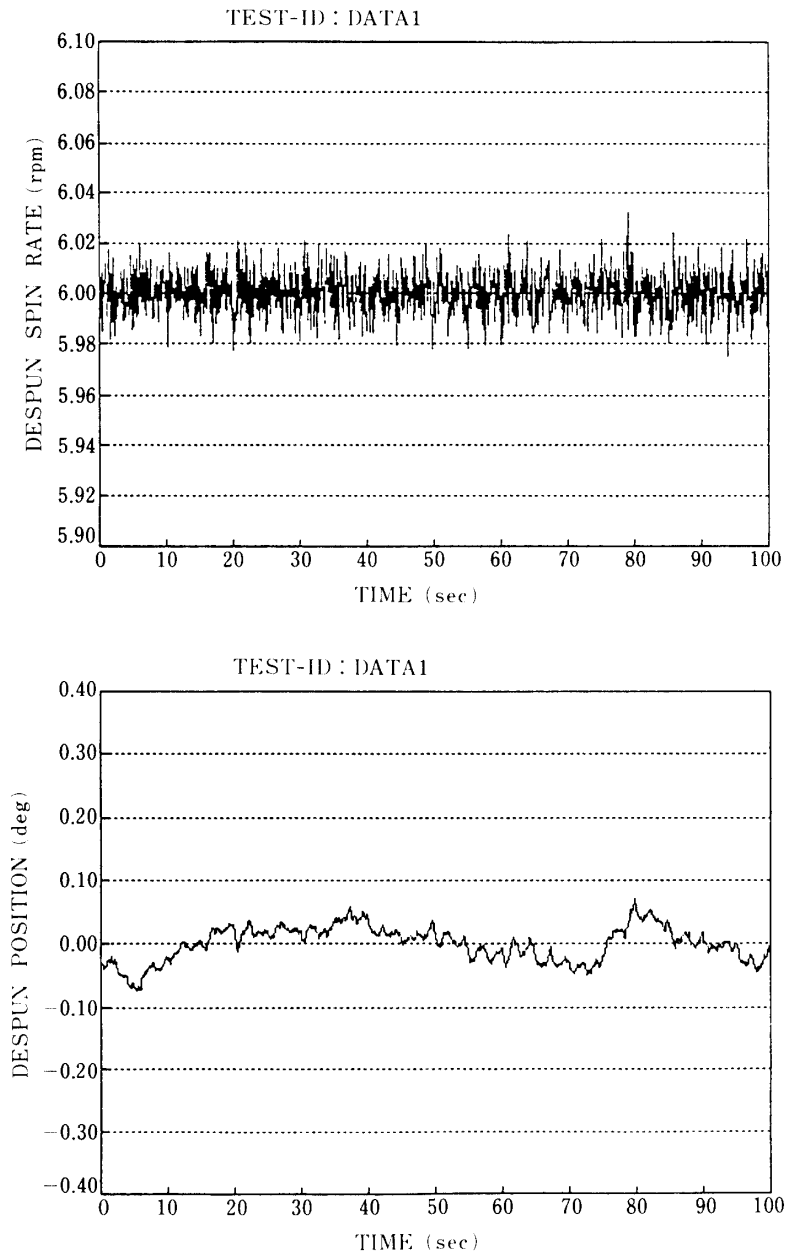


図-9 6 rpm モードでのデスパンレート変動及びポインティングジッタ

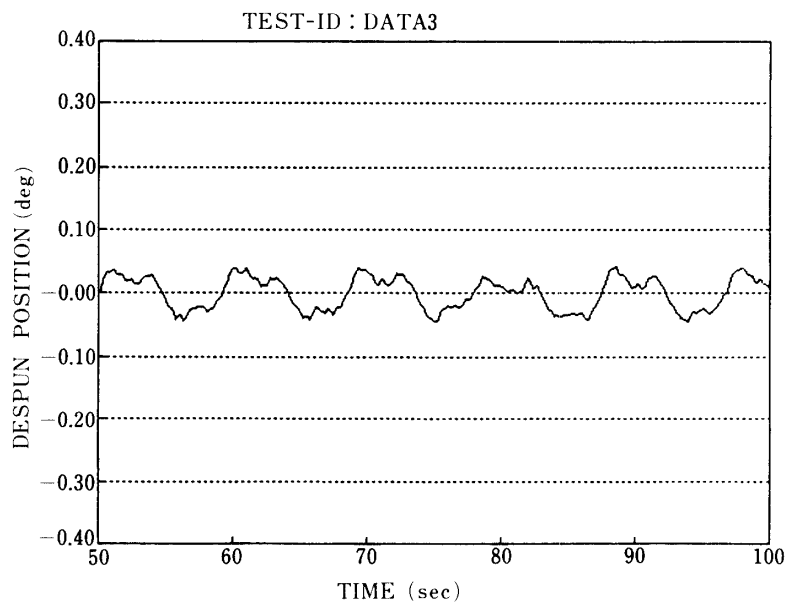
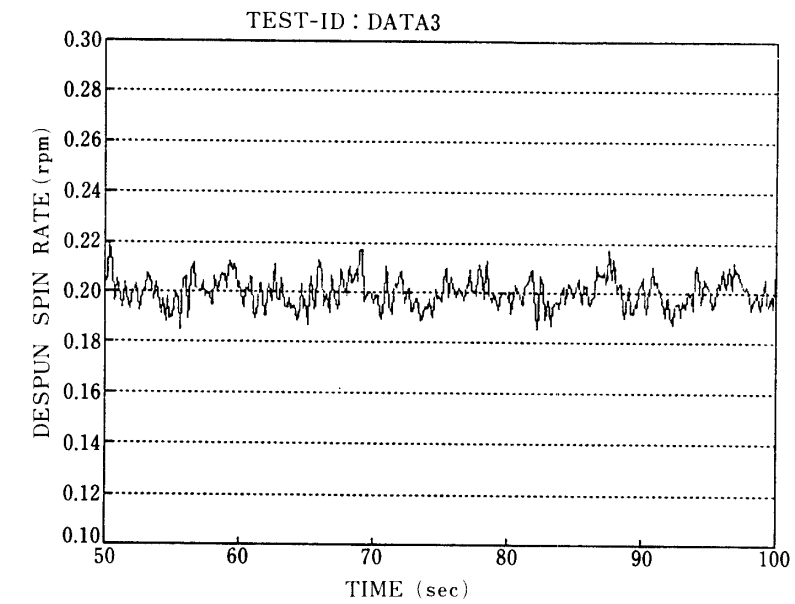


図-10 0.2 rpm モードでのデスパンレート変動及びポインティングジッタ

### (3) ハレー撮像時の探査機本体のレート変動

ハレー撮像時の0.2 rpmモードにおける、デスピนมータのトルクリップルに起因する探査機本体のレート変動についてのシミュレーション試験結果を図11に示す。図より明らかなように本体レートは $\pm 0.15\%$ の範囲に入っており、撮像系からの要求である $\pm 0.4\%$ を満足していることが確認された。以上の試験結果より得られた性能を表-4に示す。

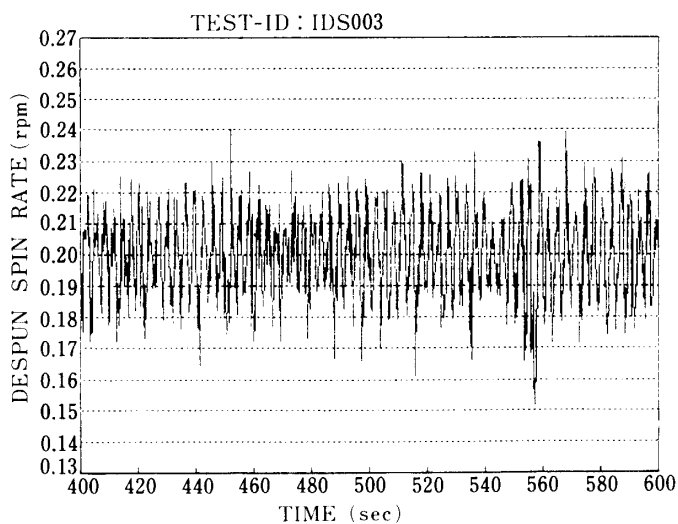
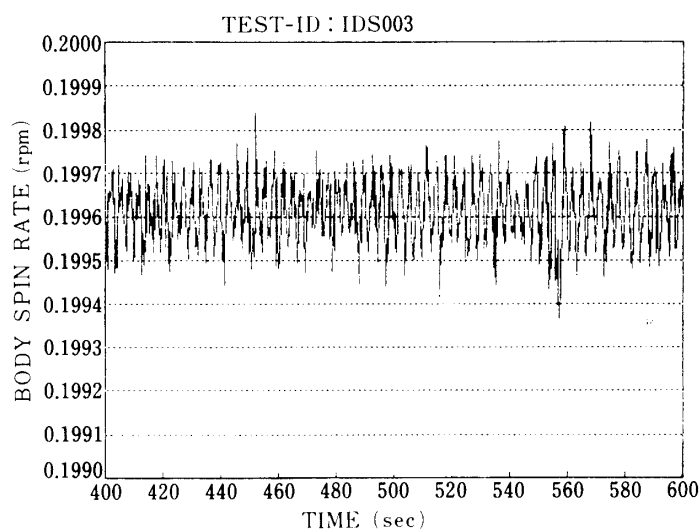


図-11 ハレー撮像時の探査機本体及びデスパンレートの変動



表4 デスピン制御系の性能

項目	モード別性能	
	(0.2 rpm モード)	(6 rpm モード)
ポインティング ジッタ	±0.1°以内	±0.2°以内
オペレーティングレンジ	0.1~0.5 rpm	3~10 rpm
ポインティング角変更速度	45°/spin	
スタートアップ時間	1 sec 以内	
制御スタートから ポインティング終了までの時間	30 min 以内	1 min 以内
スピン同期パルスの誤差	0.079°	0.15°
スピン周期データ精度	7.8 msec	

## 6. 安定解析

デスピン制御系そのものの安定性はもちろんのこと、“さきがけ”については柔軟物とダイナミックにカップリングした系での安定性も問題となった。

### 6.1 系のモデル化

図-12 に解析のためのモデルを示す。モデル内の各要素は次の通りとした。

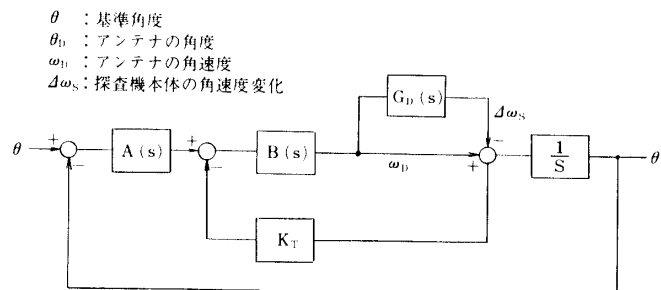


図-12 柔軟物を含む系の解析モデル

1) 探査機の柔軟物を含むダイナミクス

$$G_D(S) = \frac{S^4 C_4 + S^2 C_5 + C_6}{S^4 C_1 + S^2 C_2 + C_3}$$

2) デスピン系の伝達関数

$$A(S) = \frac{A(K_p S + w_p)}{S^2 + w_c S}$$

$$B(S) = \frac{K_R(S + w_i)}{\beta(S + w_i/\beta)}$$

6.2 解析結果

図-13に図-12のモデルより求めたナイキスト線図を示す。これより位相余裕、ゲイン余裕とも充分であり、柔軟物を含んだ系においても、安定動作が期待できることがわかる。

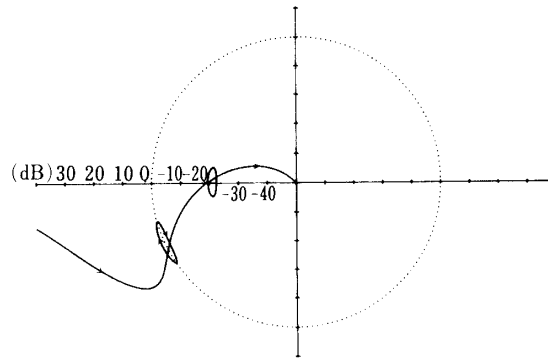


図-13 柔軟物を含めた系のナイキスト線図

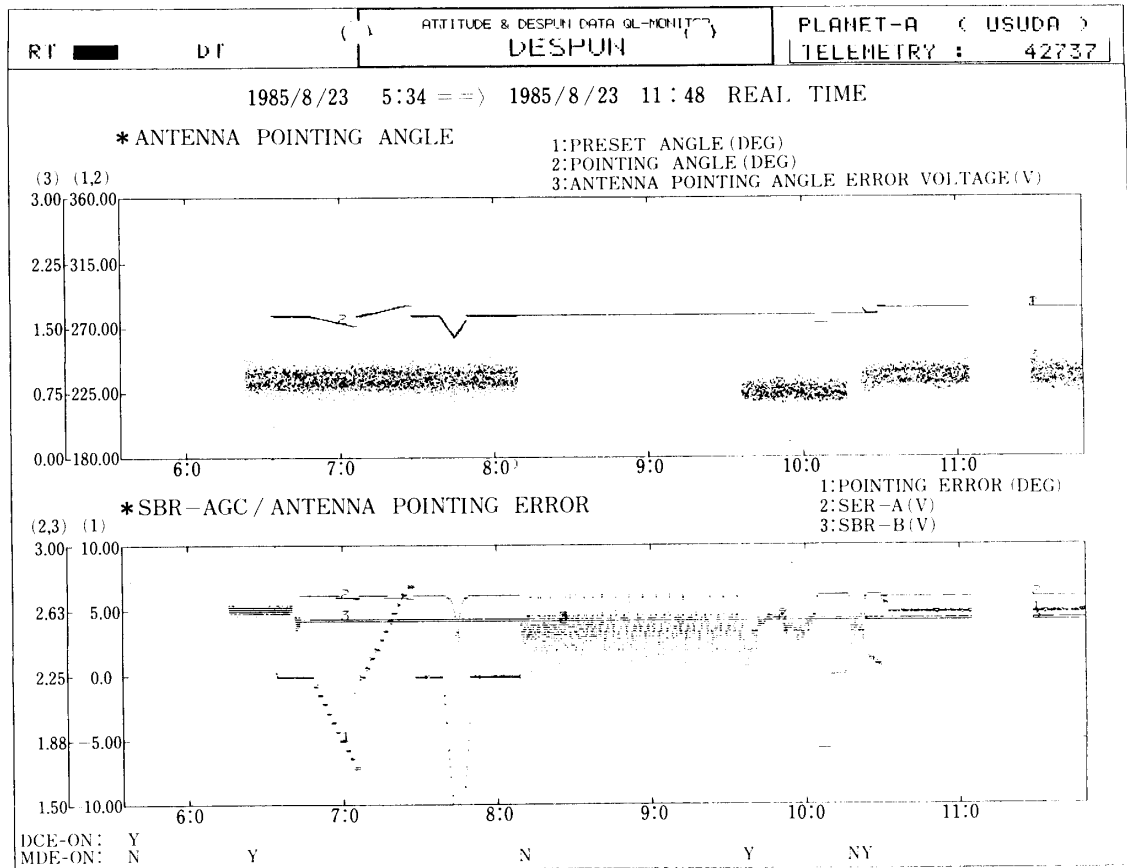


図-14 初期運用でのデスパンチェック時のフライトデータ

### 7. 運用結果

“さきがけ”および“すいせい”のデスパンアンテナ制御系は、以上述べた試験及び解析により、運用上問題ないことが確認されたため、FMの製作および総合試験を経て、“さきがけ”は昭和60年1月8日、“すいせい”は昭和60年8月19日に打上げられた。

その後、初期運用にてデスパンアンテナ系のチェックが行われ、地上試験にて確認された機能・性能を満足しており、地上での受信レベルにもほとんど変動がないことが確認された。

図-14に“すいせい”の初期運用での動作チェック時のフライトデータを、図-15に“さきがけ”定常運用時のフライトデータを示す。

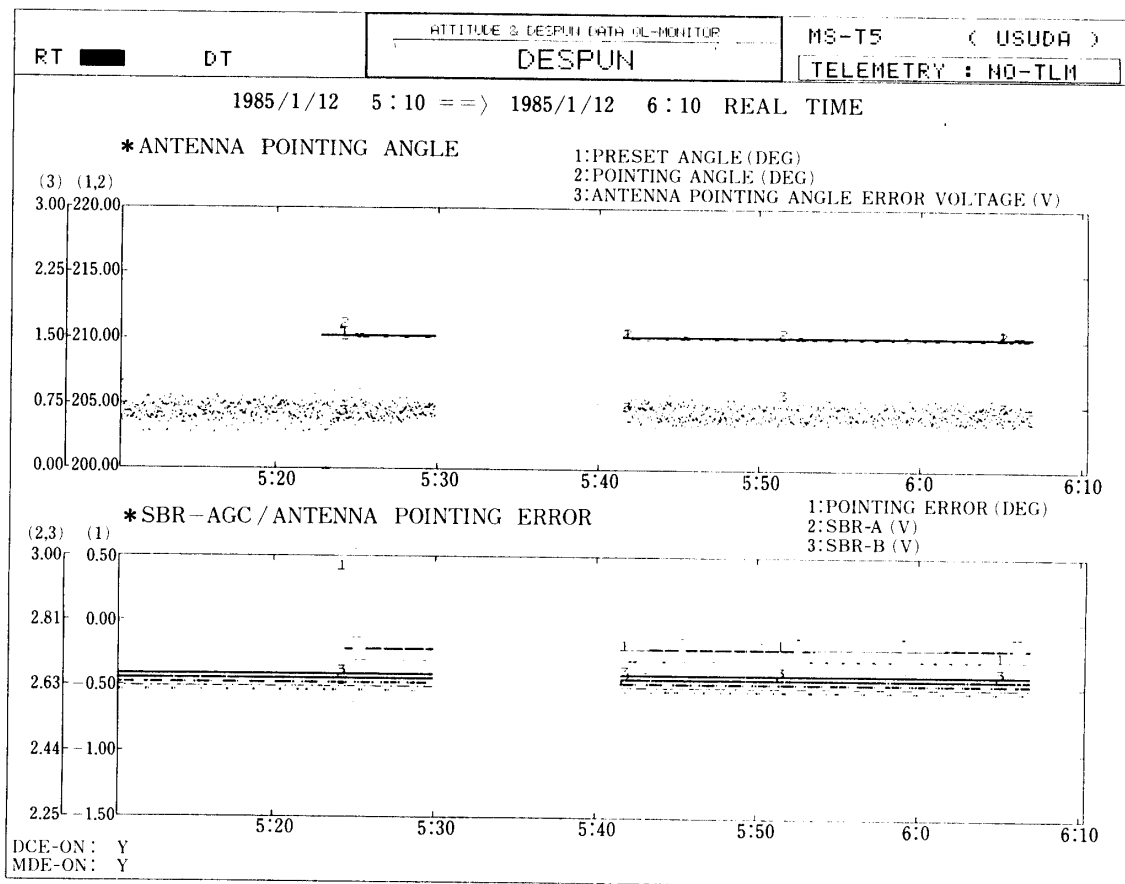


図-15 定常運用時のフライトデータ

### 8. おわりに

以上述べたように、当初心配されたモータのコギングトルクによる影響を十分に抑圧することができ、かつ、これまでに例のない0.2 rpmの超低スピンドレートのデスピン制御についても要求された性能を満足することができた。

現在“さきがけ”、“すいせい”とも、高利得アンテナを用いた定常運用が順調に続けられ、1億 km 以上におよぶ超遠距離通信が支障なく行われている。

なお、GEOTAIL への搭載が予定されているデスパンアンテナ制御系の開発に向けて、今回の成果を十分に生かし、より技術的な発展を検討している。

最後に本デスパンアンテナ制御装置の開発に際してご指導、ご協力いただいた宇宙科学研究所及び日本電気(株)宇宙開発事業部の関係各位に厚く御礼申し上げる次第である。

### 参考文献

- [1] T. Hayashi, H. Hara, H. Yamamoto, Y. Masumoto, M. Kawaguchi; Despin Antenna Control System for Planet-A, 13th, ISTS(1982), pp. 957-962.
- [2] 林 友直他; PLANET-A のデスパンアンテナ制御装置, 電子通信学会, SANE 82-22(1982).
- [3] 林 友直他; PLANET-A デスパンアンテナ制御装置, 科学衛星シンポジウム(1982), 宇宙科学研究所.
- [4] K. Ninomiya, K. Uesugi, H. Hara, H. Yamamoto,; PLANET-A ATTITUDE AND ORBIT CONTROL SUBSYSTEM, Guidance and Control 1984, Vol. 55, Advances in the Astronautical Science, AAS Publication, pp. 121-147.
- [5] 二宮敬虔他; PLANET-A/MS-T 5 の姿勢制御, 科学衛星シンポジウム(1982), 宇宙科学研究所, pp. 205-213