

II. 2 鹿島局 34 m アンテナシステム

小山 泰弘^{*1} 高羽 浩^{*1} 栗原 則幸^{*2} 川口 則幸^{*3}

(平成元年10月6日受理)

II. 2 34 m ANTENNA SYSTEM OF KASHIMA STATION

By

Yasuhiro KOYAMA, Hiroshi TAKABA, Noriyuki KURIHARA,
and Noriyuki KAWAGUCHI

An Az-El mounted, dual shaped cassegrain type 34 m-antenna has been constructed at the Kashima Space Research Center. This large aperture, highly sensitive antenna will play an important role as a key station in the Western Pacific VLBI Network. While the observation system is designed to be appropriate for geodetic VLBI experiments, the field where this antenna can be applied is not limited only to plate motion measurements. The system is flexible enough to be used for various astronomical or geodetic observations. The antenna has as many as 11 different feeds covering the frequency range of 300 MHz-49 GHz. Two of them are located at the side of the sub-reflector, and the others are located near the cassegrain focus. During observation, one or a few feeds are transported close to the prime focus or the cassegrain focus. The observing feed is switched by using a trolley mechanism, lateral shifter mechanism, and five axis subreflector position controller. These mechanisms are unique and also very powerful, since the spectrum profile of a radio source can be observed within a day. This paper presents the details and the performance characteristics of this antenna system.

1. はじめに

鹿島宇宙通信センターに建設された 34 m パラボラアンテナ (第1図) は、西太平洋電波干渉計の中心局となるアンテナである。34 m という開口径の大きさは通信総合研究所のアンテナとしてこれまでで最も大きく、国際的にみてもかなり大型のアンテナの部類に属する。開口径が大きくなるということは、それだけでも受信感度の向上につながり、測地 VLBI 実験での観測スケジュールに入れることのできる電波源の数を増やし、また相手局のアンテナの小型化を実現することにもつながるものである。それにも増して、本アンテナシステムの受信器は、周囲を冷却することなどによって低雑音化が図られており、受信感度は一層高いものになっている。これまで鹿島で活躍してきた 26 m アンテナは、東アジア地域

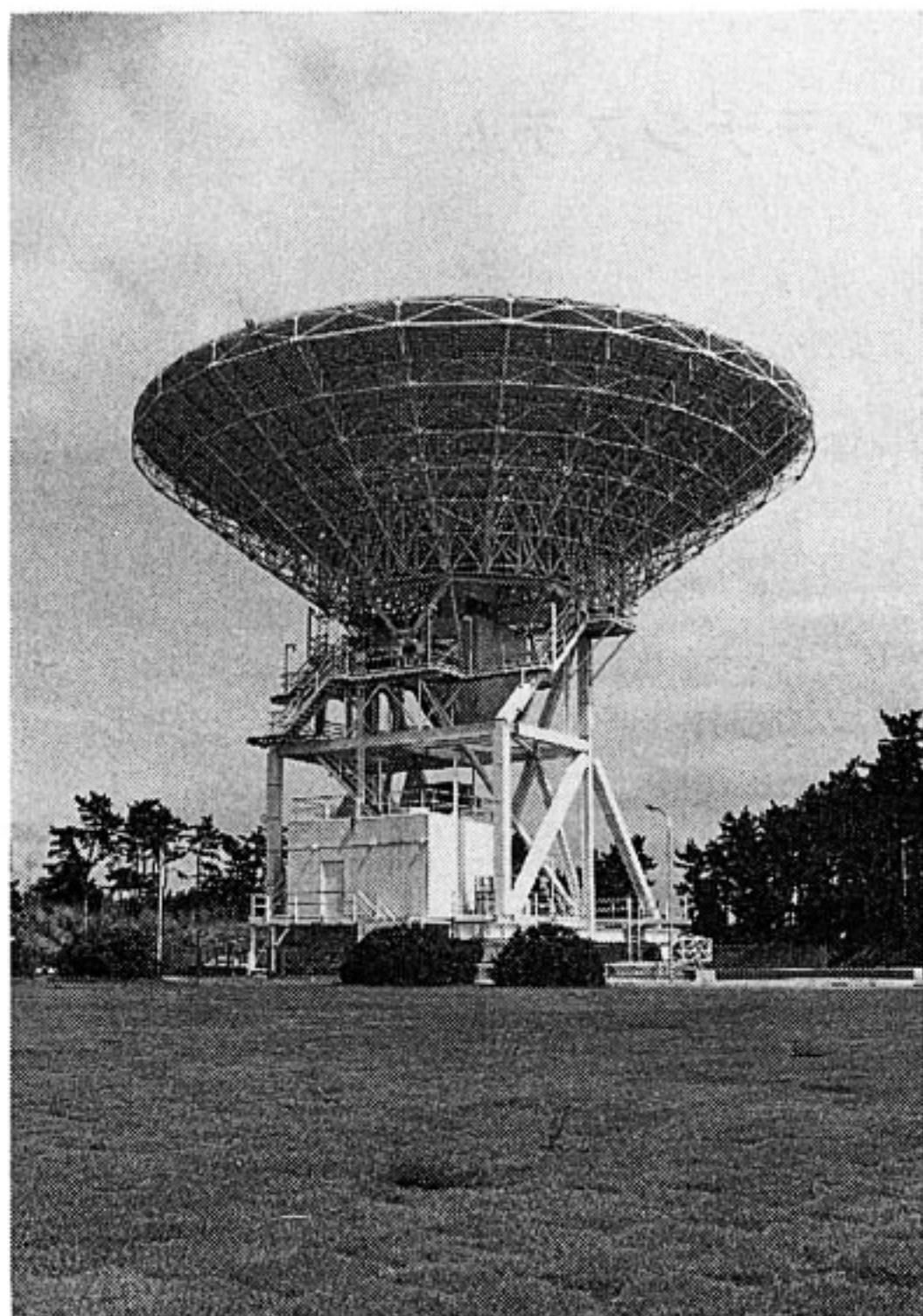
の重要な観測局として国際 VLBI 実験に参加し、また VLBI 座標系における基準局として国内の測地 VLBI 実験でも頻繁に利用されてきた。しかしこの 26 m アンテナも老朽化してきたこともあって、一段と性能の優れたこの 34 m アンテナが利用できるようになることのメリットは非常に大きい。また、このアンテナは、その大きな集光能力を活用して、単に従来の S/X バンドを用いた測地 VLBI 実験で活躍するにとどまらず、宇宙電波の新しい応用技術の開発や電波天文観測に大きな威力を発揮するものと期待される。本稿では、この 34 m アンテナシステムの詳細について述べる。

このアンテナの最大の特徴は、300 MHz 帯という低い周波数から 49 GHz 帯のミリ波に至るまで、合計11にものぼる電波天文バンドを受信できるというところにある。高い周波数の受信を行うためには、高い鏡面精度と、正確でスムーズな追尾をする優れた駆動性能とが要求される。また、測地 VLBI 実験で得られる測位解の精度を上げるためには、いろいろな方向の電波源を観測す

*1 関東支所 鹿島宇宙通信センター 第三宇宙通信研究室

*2 電波部 電磁圏伝搬研究室

*3 国立天文台 電波天文研究系



第1図 鹿島局 34 m アンテナ

る方が有利であり、そのためにはアンテナの指向可能範囲が広くてアンテナの駆動に関する制限が少ないこと、そして駆動速度が速いことが要求される。こういったアンテナシステムの性能については2章で述べる。また、このアンテナは単に多くの周波数を受信できるというだけでなく、受信フィードの切り換えを行う部分に他に例を見ない画期的な機構を採用している。3章ではそれぞれの周波数帯の受信系の構成と各受信器の性能を述べるとともに、ユニークな受信フィードの交換機構について紹介する。最後に4章では、34 m アンテナシステムの制御を行っている計算機の構成と、それぞれの機能について説明することにする。

2. アンテナシステム

34 m アンテナは昭和 63 年にアメリカ TIW 社によって製作、建設された Az-El 駆動方式の鏡面修正型パラボラアンテナである。主反射鏡・副反射鏡の形状などアンテナの基本的な設計は、NASA の深宇宙探査用に用いられている 3 基のアンテナ（カリフォルニア、オーストラリア、スペイン）と同じものである。第1表に鹿島の 34 m アンテナの主な諸元をまとめる。ミリ波のような高い周波数で受信を行うためには、非常に高い鏡面精度が求められる。そのために、このアンテナの主反射鏡

第1表 鹿島局 34 m アンテナ主要諸元

開口径	34.073 m
緯度	北緯 35°57'05.76''
経度	東経140°39'36.16''
アンテナ中心海拔高	43.6 m
アンテナ位置海拔高	26.3 m
アンテナ形式	鏡面修正型カセグレン／ フロントフィード切り換え式
マウント形式	Az-El マウント
主反射鏡鏡面精度	0.17 mm r.m.s. (El=45°)
駆動可能範囲	北 ±359° (方位角方向) 6.0°-90.7° (仰角方向)

第2表 駆動系特性測定結果

	方位角	仰角
最大駆動角速度	1.0°/sec	0.8°/sec
最大駆動角加速度	1.0°/sec ²	0.8°/sec ²
ステップ応答行き過ぎ量		
ステップ角=10°	0.035°	0.018°
ステップ角=0.1°	0.013°	0.016°
ステップ応答整定時間*		
ステップ角=10°	8 sec.	8 sec.
ステップ角=0.1°	5 sec.	8 sec.

* 目標角のステップ状の変化に対して、目標角を通り過ぎてから、実際の角度と目標角との差が行き過ぎ量の 10% 以内に収まるまでに要する時間で定義する。

の支持構造部分には他の同じ設計の 3 つのアンテナのものよりも強い補強が施されている。したがって、そのぶん重力や風の影響によって主反射鏡に生じる歪みも少ない。しかも仰角が 45° のときの主反射鏡の鏡面精度の実測結果は、0.17 mm (rms) と非常に優れている。また VLBI 観測で得られる測位解は、Az 軸 El と軸の交点の位置を与えるので、これらの 2 つの軸が交わっていることが望ましい。このアンテナはこういった点にも注意して設計されており、2 つの軸の隔たりは 1 mm 以下である。

2.1 駆動系

通常の測地 VLBI 実験では、約 24 時間のあいだに 100 以上もの観測を行う。しかも高精度な測位解を得るためには、観測する電波源の方向がなるべく分散している必要があり、アンテナは観測ごとにいろいろな方向を向くことになる。したがって電波源の切り換えに要する時間は短いほどよく、そのためには第一に駆動速度が速く、第二に目標とする電波源をとらえてから、アンテナの指向方向が整定するまでに要する時間が短い方がよい。第2表に 34 m アンテナの駆動系特性の測定結果を示す。この表にあるように、方位角方向の駆動速度は 1 分間に約 60° であり、2 つの電波源の間の方位角の差がたとえ 180° あったときでも約 3 分で電波源の切り換えが完了す

る。また、観測電波源の方向を分散させるためには、アンテナを駆動することのできる領域が広い方が有利であるが、34 m アンテナの指向可能範囲はほぼ全天に渡っており、これについても問題はない。ただし、天頂付近を通過する電波源については、アンテナの構造的な制限の外に、方位角方向での安定な駆動速度の限界から追尾可能領域に制限が生じるので注意を要する。このアンテナの場合には、プログラム追尾のソフトウェアの中で仰角が 88° 以上の天体は追尾しないように規制している。

駆動に用いているモーターはEl軸用に2台、Az軸用に4台ある。主反射鏡の支持部分には、1/4円状にギヤが固定されており、El軸用の2台のモーターが互いに逆方向からこのElギヤに取り付けられている。また、アンテナの約370トンの重量はアンテナ最下部にある4つのホイールで支えられており、Az軸方向の駆動の際には円形に敷かれたレールの上をこの4つのAzホイールが回転する。中心部には軸ぎめのためのベアリングがあり、それぞれのAzホイールはここでできる軸を中心として円を描くようにレールの上を走行することになる。4台のAzモーターはそれぞれ2台ずつが組になって、4つのうち2つのAzホイールに取り付けられている。このように駆動用のモーターはEl軸用とAz軸用のどちらも2台ずつが組になっており、組になった2台のモーターは互いに逆方向のトルクを常に発生させることによってアンテナの指向方向を安定させるようになっている。Azトラックの水平性および平坦性は、El軸の垂直度に大きく影響するので、Azトラックは硬度の高い鉄でできており、熱による伸縮の影響を受けないように、レールの継ぎ目の部分は斜めに接するようになっている。また、レールは全部で12の部分に分かれており、アンテナを通常の状態のまま簡単にレールの交換を行うことができる。Azトラックは長期の使用によって摩耗し、平坦性が劣化する可能性があるため、その場合にはレールの部分だけを交換することになる。Azトラックは、また、落雷の際に電流を地面へと解放するアース端子としても機能する。

アンテナの指向角度を正確に制御するためには、アンテナ指向角を読み取るための精密な角度エンコーダーが必要である。34 m アンテナの方位角と仰角を読み取るために用いられているエンコーダーは、量子ビット数20ビットの光学エンコーダーで、 $3.43 \times 10^{-4}^\circ$ (1.235秒角)の分解能がある。

2.2 基準点位置測定システム

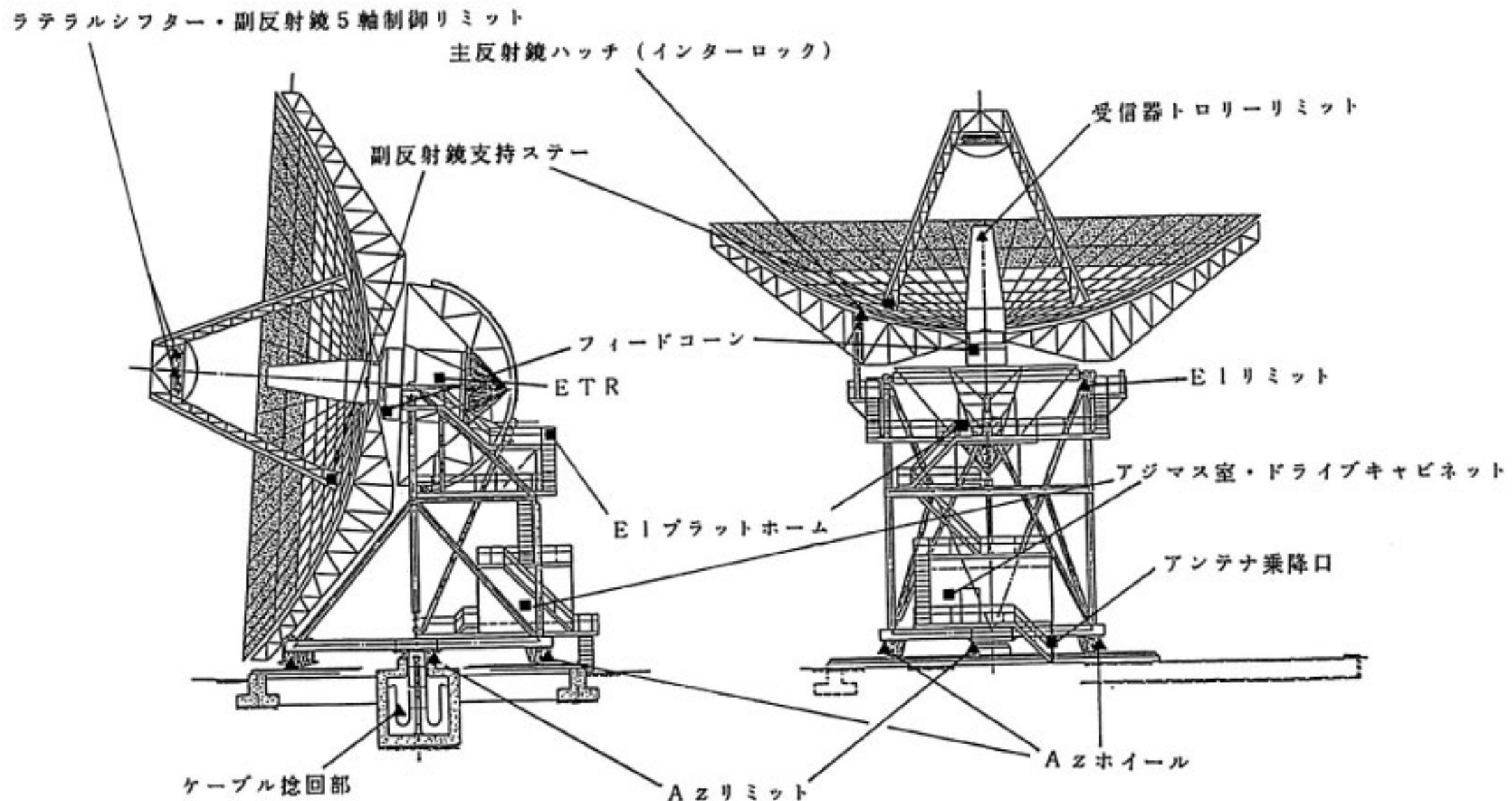
1回の測地VLBI実験で測定できるのは、その実験の時点での2局間の相対位置関係である。したがって、測地VLBI実験からプレート運動を知るためには、ある程

度の間隔をとって数年間にわたって何回かの実験を行い、2局間の相対位置の時間変化を調べる。しかしながら、その相対位置変化の原因は、プレート運動だけというわけではない。2局の内の片方のアンテナがそれ自身の重量によって沈下したり、経年的に変形することによって相対的な位置変化が生じるという可能性も考えられる。34 m アンテナの基礎の下には、アンテナ全体の自重による沈下を防ぐために、地下の岩盤にまでとどくパイルが打ち込まれている。しかし、それでもアンテナが経年的に傾いたり、沈み込んだりする場合を想定して、アンテナ基準点(Az-El交点)の位置を地上から測定できるシステムが用意されている。そのために、アンテナの周囲には放射状に4本のコンクリートブロックが地面に埋め込まれており、各ブロックの上に10個ずつの測位基準マーカが据え付けられている。このコンクリートブロックはアンテナとは独立した基礎の上に造られており、アンテナと比較すればはるかに軽いものであるから、たとえアンテナが沈降した場合にでもこの基準点のマーカは動かないものと考えられる。測定の際にはマーカの上に光波測距儀を設置し、主反射鏡の支持構造部分に固定した反射プリズムまでの距離と方向とを測定する。この測定を様々なアンテナの方位角・仰角について行い、同じことを他のマーカからも繰り返し行う。そうすると、地上の40個のマーカで決定される空間上で、反射プリズムがどのように動くかの軌跡を求めることができる。そして、プリズムの軌跡の球の中心点としてAz軸-El軸の交点の位置を知ることができる。また、両軸が直角に交わっていない場合には、この軌跡が球形にならないから、この測定によってAz-El軸の直交性を調べることも可能である。この測定を定期的に行って、アンテナ基準点の位置の監視を続ければ、2局間の相対位置変化の中から、34 m アンテナ固有の変形や沈降によるアンテナ基準点の動きなどの成分を分離できる。

また、このシステムを積極的に活用すれば、アンテナ各部の重力や風による歪や、熱による変形の度合を調べたりすることもできる。またさらに、地上に設置したGPS(Global Positioning System)受信器の基準位置とVLBI基準点の間の位置関係を正確に測定することができ、VLBIとGPSのコロケーション実験に役立つということも考えられる。

2.3 気象測器

34 m アンテナには、気圧、気温、湿度を自動測定できる気象測器システムが設けられている。気圧センサーは給電点付近での気圧をなるべく忠実に測定するため、El軸付近のアンテナ架台上に据え付けられている。気



第2図 手動停止スイッチ (■) とリミットスイッチ (▲) 設置場所

温・湿度センサーはアンテナ付近の地上の風通しのいい場所に地上 1.5 m の位置に設置されている。これらの気象データは GPIB ラインを通過して、一定時間おきにインターフェースコンピュータによって自動収集される。

2.4 安全システム

34 m アンテナには種々の安全設計が盛り込まれている。以下それらについて説明する。

(A) 手動停止スイッチ (EMERGENCY STOP)

アンテナ本体とその周辺には手動停止スイッチが配置されていて、そのうちのどれか1つのスイッチを押込むことによってアンテナの動きを直ちに停止させることができる。停止スイッチが押されている間はすべてのモーターの電源が遮断され、アンテナの角度やフィードの交換などの操作が一切できなくなる。アンテナ主反射鏡の上や ETR (Elevation Tilt Room: フィードコーン下部の部屋) で作業する場合には、このスイッチを押して他の人が不用意にアンテナを動作させること防ぐようにする。どこで停止スイッチが押されているかは、アジマス室 (アンテナ架台下部の機器室) 内部のアンテナドライブキャビネットの中の表示を調べることによって知ることができる。

(B) モニターカメラ

実験庁舎屋上および ETR の1階と2階部分にはそれぞれモニターカメラが設置されている。これによって、実験庁舎内から、アンテナを操作しながら現在のアンテナの指向角度方向を確認することができ、ETR 内の状態を常に監視することができる。

(C) リミットスイッチ

アンテナの可動部分には全ての場所のリミットスイッチがつけられている。これらのリミットスイッチは、アンテナの通常の動作をある一定の位置で止めるための1次リミットスイッチと、アンテナが異常な動作をしたときに強制的に動きを止めるための2次リミットスイッチとがある。リミットスイッチは基本的にこの1次リミットスイッチと2次リミットスイッチが1組になって構成されていて、アンテナが制御不能に陥った場合にでも致命的なダメージを回避するようになっている。アンテナの方位角・仰角や副反射鏡の位置の場合は、エンコーダーで読み取った値を用いて制御を行うが、受信フィードを切り換えるためのモーターは単に一定方向に駆動をするだけで、1次リミットスイッチが作動されるまで動き続けるようになっている。したがって、この場合のリミットスイッチはフィードのセットされる位置を決定する非常に重要な役割を果たしている。一方、2次リミットスイッチの配線はその部分の駆動を行うモーターの電源部分に接続されており、スイッチが作動したときにはモーターの電源の供給が止められることになる。これらのリミットスイッチはすべて導通がなくなった状態で作動するようになっているので、配線が切断されるということによって、リミットスイッチが作動しないでアンテナが動き続けるといった危険はない。仰角の駆動部分にはさらに3つめの最終リミットスイッチがあり、このスイッチが作動した場合にはアンテナ全体に供給している電源が切られるようになっている。

また、主反射鏡にはハッチが設けられ、保守等の作業の際にはここを通して主反射鏡上部に出られるようになっているが、このハッチにもリミットスイッチと同様のスイッチ（インターロックスイッチ）が取り付けられている。これによって、主反射鏡上に人がいてハッチが開けられている場合には、駆動モーターのうち E1 モーターの動作が禁止され、不用意にアンテナが傾けられるということが起こらない。

第2図に手動停止スイッチとリミットスイッチの設けられている場所を示す。

3. 受信系

34 m アンテナは、300 MHz 帯から 49 GHz 帯までの11の受信器をもった多周波受信アンテナである。これらの受信器の受信周波数帯は、電波天文観測を地上通信波から保護するように国際的に決められた周波数帯に応じて選ばれているので、このアンテナ1基だけで UHF からミリ波帯までの主な電波天文観測をカバーすることになる。このように多様な周波数をカバーする大型アンテナは日本では他に例を見ない。しかも、従来のこういった多周波受信アンテナの場合には受信器の切り換えにある程度の時間と人手を要したが、本システムの場合の受信器の切り換えは人の手を介さずに自動的に行われ、切り換えに要する時間も短い。このことを可能にしたのは、直線レールの上を移動するトロリーを用いた受信器切り換え機構とカセグレン焦点の位置を複数個並んだフィードのうちの1つに移動させる副反射鏡5軸制御機構である。この2つの機能を活用することによって、例えば同一の電波源の観測を1日のうちに様々な周波数帯で行うといったことも可能であり、天体電波の周波数特性を調べるような観測に威力を発揮する。

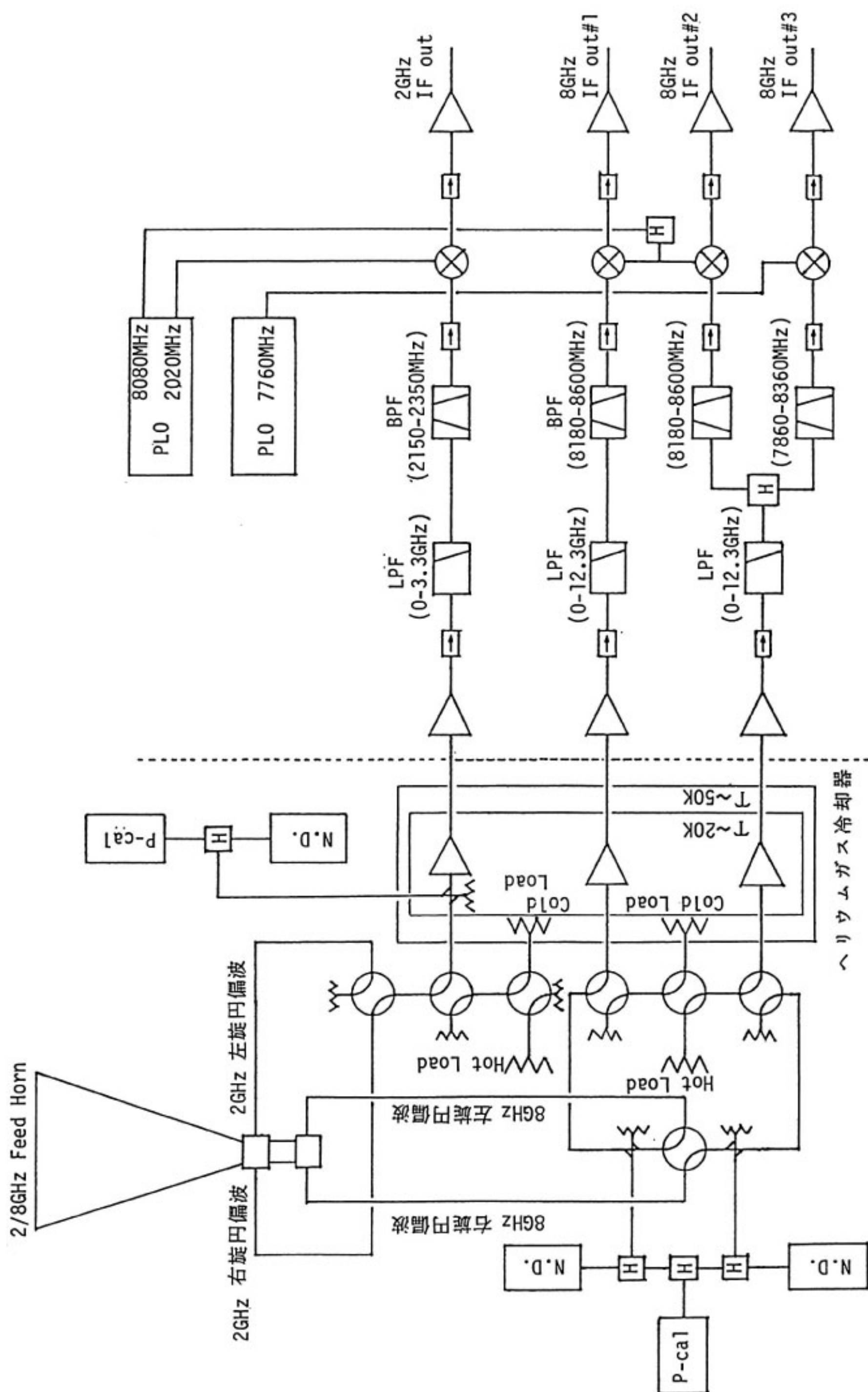
3.1 フロントエンド

このアンテナの光学系はカセグレン給電とフロントフィード給電の2方式の併用である。フロントフィードで給電するのは300 MHz 帯と600 MHz 帯の2つの受信器で、ともに双極子型のフィードを用いている。低雑音アンプは FET (Field Effect Transistor) アンプである。どちらの受信器とも右旋/左旋の円偏波が受信でき、これらの切り換えは同軸切り換えスイッチで遠隔操作により行われる。偏波の切り換えスイッチの後方には、方向性結合器を通じてノイズダイオードからの信号を注入することができるようになっていて、受信電力の校正ができるようになっている。フロントフィードで受信された信号は周波数変換されず、受信した帯域のままの信号が34 m 実験庁舎まで伝送される。

カセグレン焦点で給電するのは、1.5 GHz 以上の周

波数帯の9つの受信器である。これらの受信器はすべてホーン型のフィードを用いている。低雑音アンプは1.5 GHz から15 GHz までの受信器が FET アンプで、22 GHz 以上の3つの受信器は HEMT (High Electron Mobility Transistor) アンプである。これらの低雑音アンプは、すべて低雑音化のために20 K 程度にまで冷却した環境下に置かれている。この冷却には、ヘリウムガスを利用した冷却器が使用されていて、50 K 前後の温度の1次冷却庫の中にさらに低温の20 K の2次ステージが格納される形になっている。それぞれの低雑音アンプはこの2次ステージの上にある。1次冷却庫の中にはそれぞれの周波数帯につき1つの終端抵抗器が組み込まれていて、冷却庫の中の温度に応じた雑音信号を発生するダミーロードとして使用される。終端抵抗器はこのほかにもう1ヶ所の室温環境下にも置かれていて、これらのダミーロードから発生する雑音信号の電力と受信信号の電力を比較することによって、受信電力の校正をすることができる。そのために、それぞれのダミーロードには正確な温度センサーが取り付けられており、その環境の温度を一定時間間隔で測定している。低雑音アンプに入れる信号をフィードの出力の信号にするか、ダミーロードからの信号にするかを選択する部分には導波管切換スイッチが用いられている。右旋/左旋の偏波切り換えをするのも、同じタイプの導波管切換スイッチである。また、受信電力の校正のためにはこのダミーロードのほかにノイズダイオードがあり、低雑音アンプの前の段階で雑音信号が注入できるようになっている。カセグレン給電を行う受信器の例として、2/8 GHz 帯の受信系のブロック図を第3図に示す。2/8 GHz 帯の受信器の場合には、測地 VLBI 実験を念頭において設計されており、同一フィードによる2周波同時受信をするようになっている。また、バンド幅合成の際に用いられる位相校正信号は、ノイズダイオードの注入点から注入できるようになっている。8 GHz 帯受信器は、広帯域での受信と、右旋/左旋円偏波の同時受信の両者を可能にするため、広帯域用と通常の帯域用の2つの低雑音アンプを備えている。

各受信器の特性の測定結果を第3表に示す。この表の中の受信器雑音温度とシステム雑音温度の測定には、ダミーロードからの信号を校正のための基準として用いている。ただし、未測定のものについては空欄とした。第3表に見るように、各受信器の雑音温度はかなり小さい。また、高い面精度からも期待されたとおり、高い周波数まで非常に良い開口効率が得られている。さらに、このアンテナの主反射鏡および副反射鏡の形状は、地面から熱輻射によって放射された電波が副反射鏡で反射し



第3図 2/8GHz 受信系フロントエンドのブロック図

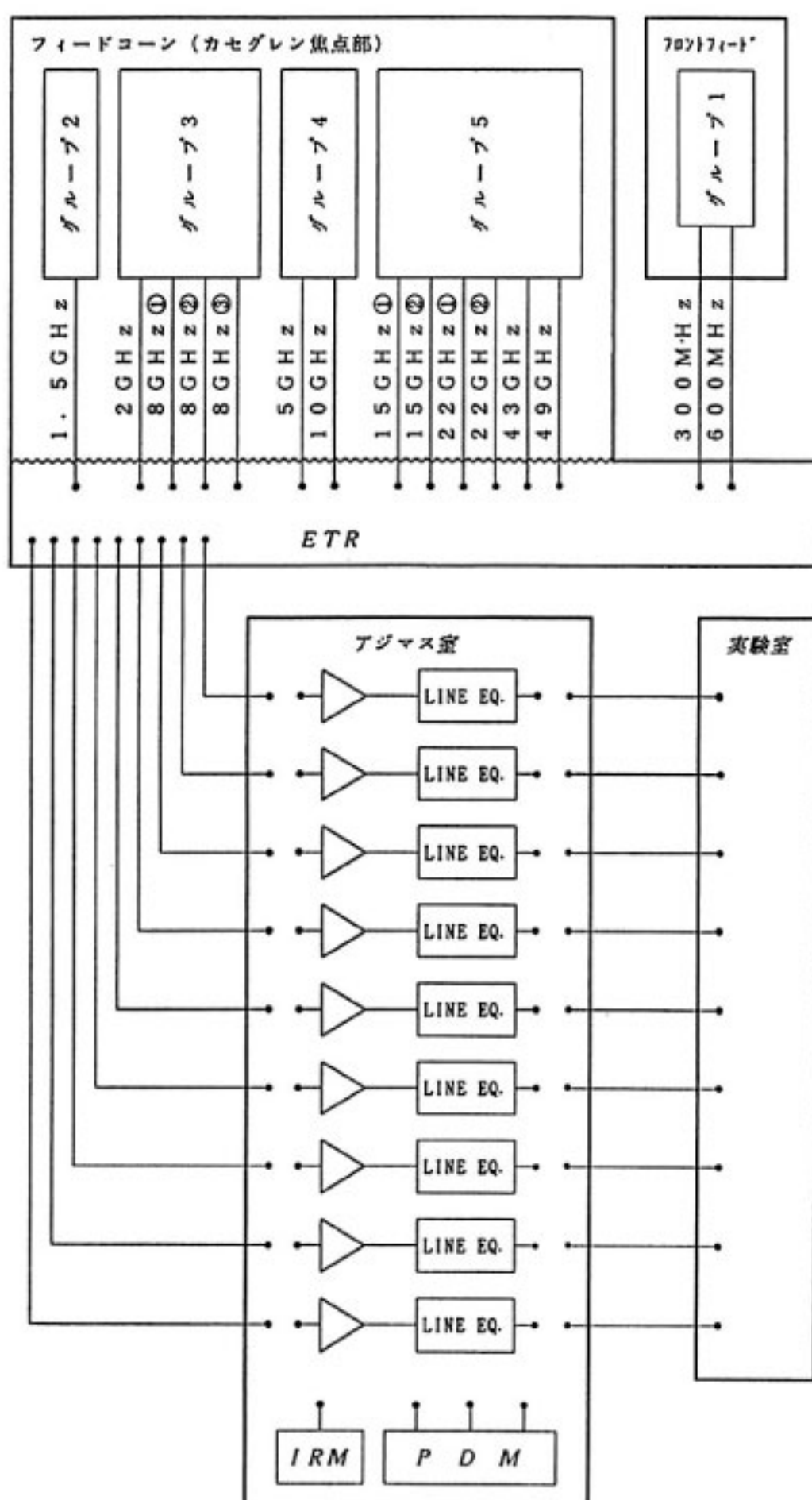
第3表 受信系特性測定結果

受信器	受信帯域	T_{LNA} (K)	T_{sys} (K)	G/T (dB/K)	アンテナ利得 (dB)	ビーム幅	開口効率 (%)
300 MHz	312— 342 MHz	43	199	15	38	1.8°	49
600 MHz	580— 640 MHz						
1.5 GHz	1.35— 1.75 GHz	10	38	37	53	24'	68
2 GHz	2.15— 2.35 GHz	11	71	38	56	16'	65
5 GHz	4.60— 5.10 GHz	25	60	45	63	7.5'	71
8 GHz	8.18— 8.60 GHz*	8	48	50	67	4.4'	56
8 GHz	8.18— 8.60 GHz#	12	53	50	67	4.4'	56
8 GHz	7.86— 8.36 GHz#	13	56	49	67	4.4'	58
10 GHz	10.2— 10.7 GHz	44	71	51	69	3.6'	64
15 GHz	14.4— 14.9 GHz	42	106	51	71	2.4'	51
15 GHz	14.9— 15.4 GHz	40	108	52	72	2.4'	47
22 GHz	21.98—22.48 GHz	101	189	52	75	1.6'	58
22 GHz	23.58—24.08 GHz	158	223	52	75	1.6'	54
43 GHz	42.8— 43.3 GHz	400	1200			0.8'	44
49 GHz	(48.8— 49.2 GHz)&						

* 8 GHz LNA (通常帯域用)

8 GHz LNA (広帯域用)

& 現在はフィードホーンのみ



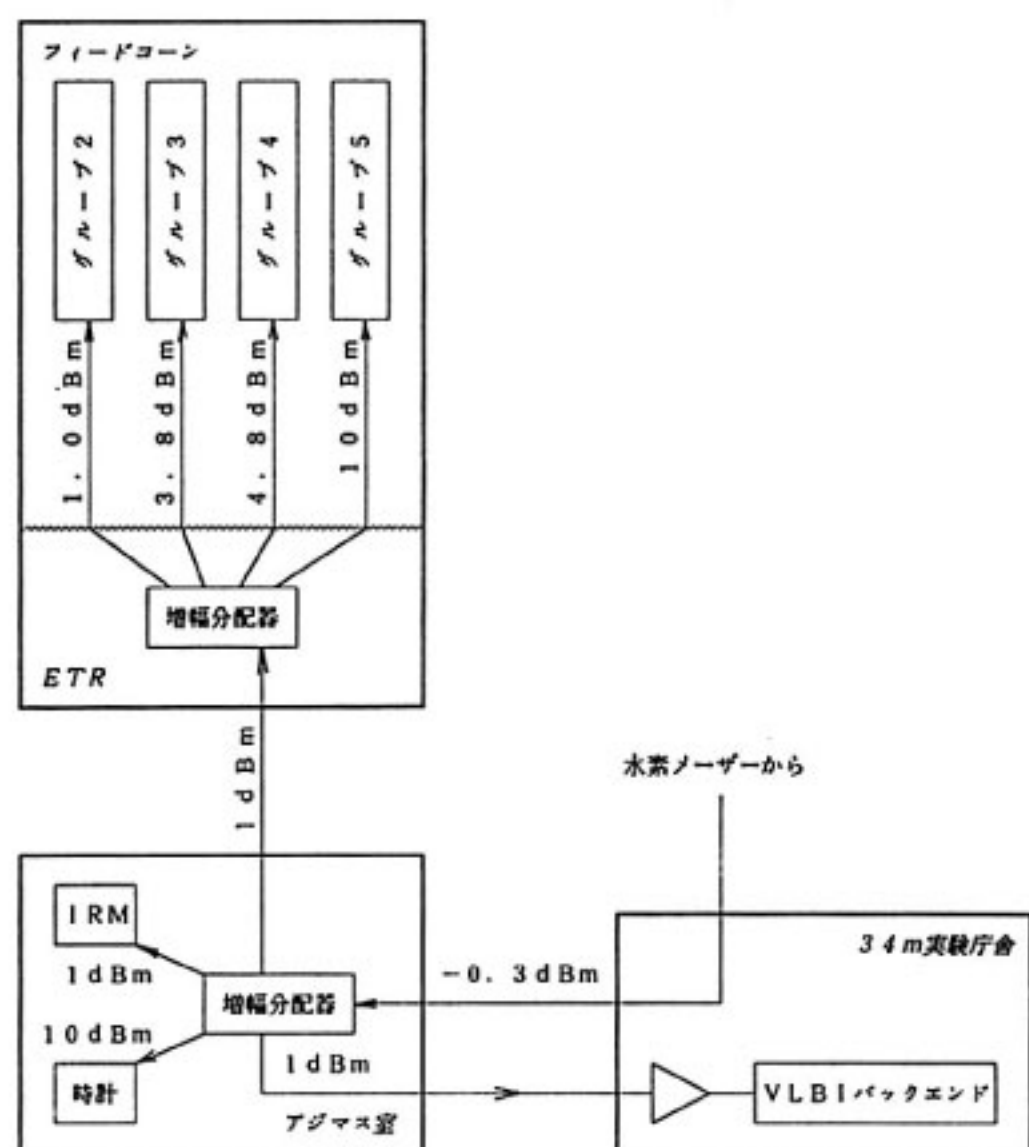
第4図 IF信号伝送経路

て受信フィードに入るのを防ぐために、純粋な放物面や双曲面ではなく少し修正された形になっている。そのため副反射鏡を制御して焦点位置を移動させるような場合にも、システム雑音温度をそれほど悪化させることなくアンテナの利得を向上させることに成功しており、その結果として G/T 値が大きくなっている。

3.2 信号伝送系

受信器で受信された信号が 34 m 実験庁舎内の実験室にまで伝送される様子を第4図に示す。受信器からの出力は全部で15個あるのに対し、ETR から実験室にまで伝送するケーブルは9本しかない。これは、アンテナの地下部分にあるケーブル捻回部の容量に限界があるためである。しかしながら、カセグレン焦点部にある 1.5 GHz 以上の受信器の出力は 100 MHz から 600 MHz までの間の IF 帯に周波数変換されて伝送されるので、ラインイコライザーや IF アンプの部分は共通して使用することができ、ETR のパッチパネルでケーブルをつなぎ変えてやることで伝送ケーブルの数が少ないことには対処できる。ただし、300 MHz 帯および 600 MHz の受信器からの信号は周波数変換されずにそのまま伝送され、また伝送経路の長さもカセグレン焦点部にある他の受信器の場合より長いために、それぞれ専用の調整を行ったラインイコライザーを用いている。

34 m アンテナに供給される 10 MHz の標準周波数信号の伝送経路を第5図に示す。VLBI 観測においては、周波数変換した信号のコヒーレンスのロスを防ぐために、非常に品質の良い基準信号が要求される。26 m アンテナの近くにある水素メーザでつくられた 10 MHz の基準信号は、いったん 34 m 実験庁舎の実験室に送られたあとアジマス室にある基準信号分配アンプに入れら



第5図 標準周波数信号 (10 MHz) 伝送経路

れる。この分配器で分配された基準信号は、1つはETRに伝送されて、そこから各受信器の周波数変換に用いる局部信号を生成するのに使用される。そのほかアジマス室の分配器からは、実験室のVLBIバックエンドに供給する基準信号と、アジマス室内のIRM (Image Rejection Mixer) と時計の基準信号とが分配される。

3.3 受信フィード交換メカニズム

11個ある受信器はつぎのように5つのグループに分割され、各グループごとにつ1のまとまったパッケージとなってそれぞれのトロリーの上に構成されている。

グループ1 300/600 MHz 帯

グループ2 1.5 GHz 帯

グループ3 2/8 GHz 帯

グループ4 5/10 GHz 帯

グループ5 15/22/43/49 GHz 帯

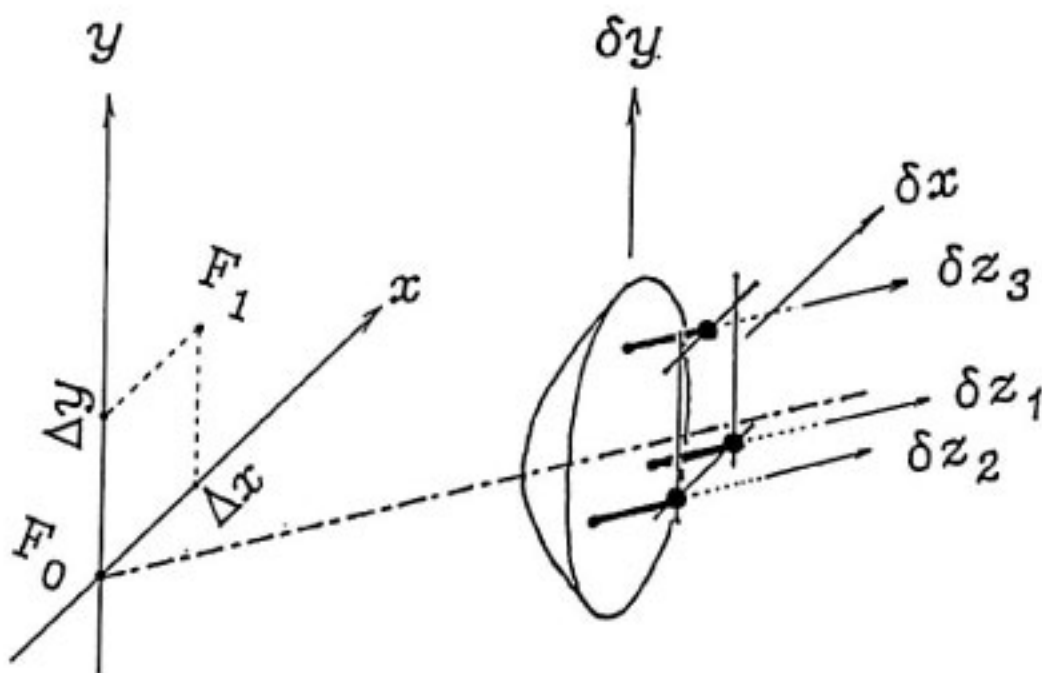
このうちグループ1のみ主反射鏡の一次焦点での給電を行い、他のグループはカセグレン焦点で給電する。ただしグループといっても、2/8 GHzの受信器は同一のフィードを用いており、1.5 GHzのフィードも非常に大きいために単独でトロリーにのせられているので、グループ2と3に含まれるフィードはそれぞれ1つだけである。グループ1と4に含まれるフィードはいずれも2つで、22 GHzの受信器にはビームスイッチによる受信のために2つのフィードがあるので、グループ5は5個のフィードから構成されていることになる。

グループ1の受信器は主反射鏡の焦点で給電するフロントフィード方式である。カセグレン焦点で受信を行う場合には副反射鏡が主反射鏡の焦点をふさぐ形になるの

で、副反射鏡とフロントフィードとを交換する機構が必要である。そのため、グループ1の受信器は副反射鏡と同じトロリーの上に固定されていて、カセグレン焦点を用いるときには副反射鏡が主反射鏡の中心軸上に位置し、一次焦点を用いるときには副反射鏡と入れ換わって300 MHz帯と600 MHz帯のフィードの位置が主反射鏡の一次焦点付近になるようにトロリーごと移動するようになっている。この部分は特にラテラルシフターと呼んでいるが、この機構によって副反射鏡とフロントフィードが4分弱の時間で交換できるようになっている。ただし、300 MHz帯と600 MHz帯のフィードの位置が中心になったときでも、2つのフィードは主反射鏡の一次焦点の位置に正確にセットされるのではなく、焦点位置から少し離れた位置に置かれることになる。波長が比較的に長いためにフィードの位置が焦点位置から離れることによる利得の損失はあまり気にならない程度であるが、受信ビームの方向は数度程度もアンテナの軸方向からずれることになるので、300 MHz帯と600 MHz帯の2周波で同時に1つの電波源を観測することはできない。

またグループ2から5の受信器は、すべて主反射鏡中央部分に錐状につきだした。フィードコーンと呼ばれる部分に入っている。フィードコーンの上部は電波の透過性の良いフィルムになっていて、その少し内側がカセグレン焦点の位置になっている。フィードコーン内の受信器は、通常はカセグレン焦点の位置から主反射鏡の方向に少し離れた場所に格納されていて、受信をするときにだけレールの上を移動するトロリーによって焦点位置にまで運ばれる。トロリーとレールはそれぞれのグループにつき1つずつあって、同じグループに属する受信器は同時に焦点位置の近くにまで運ばれることになる。1.5 GHzや2/8 GHzのフィードは非常に大きいので、受信位置に同時に2個以上のフィードがセットされることはないが、グループ5の場合には5つのフィードが同時に受信位置にセットされることになる。このような場合には、副反射鏡の姿勢を回転させることによって観測をするフィードの位置までカセグレン焦点を移動させることになる。

このように、本システムでは、受信器の位置を観測周波数ごとに移動することによって受信周波数の切り換えを行っている。したがって、受信器をセットする際に、受信器の位置が正確に再現されることが重要である。このため、ラテラルシフターおよびフィードコーン内で用いられているレールと直動ベアリングブロックの部分には、精密機械用に用いられている特に精度の高いものを用いている。



第6図 副反射鏡の5軸姿勢制御

F_0 : 主鏡中心軸上にあるカセグレン焦点の位置

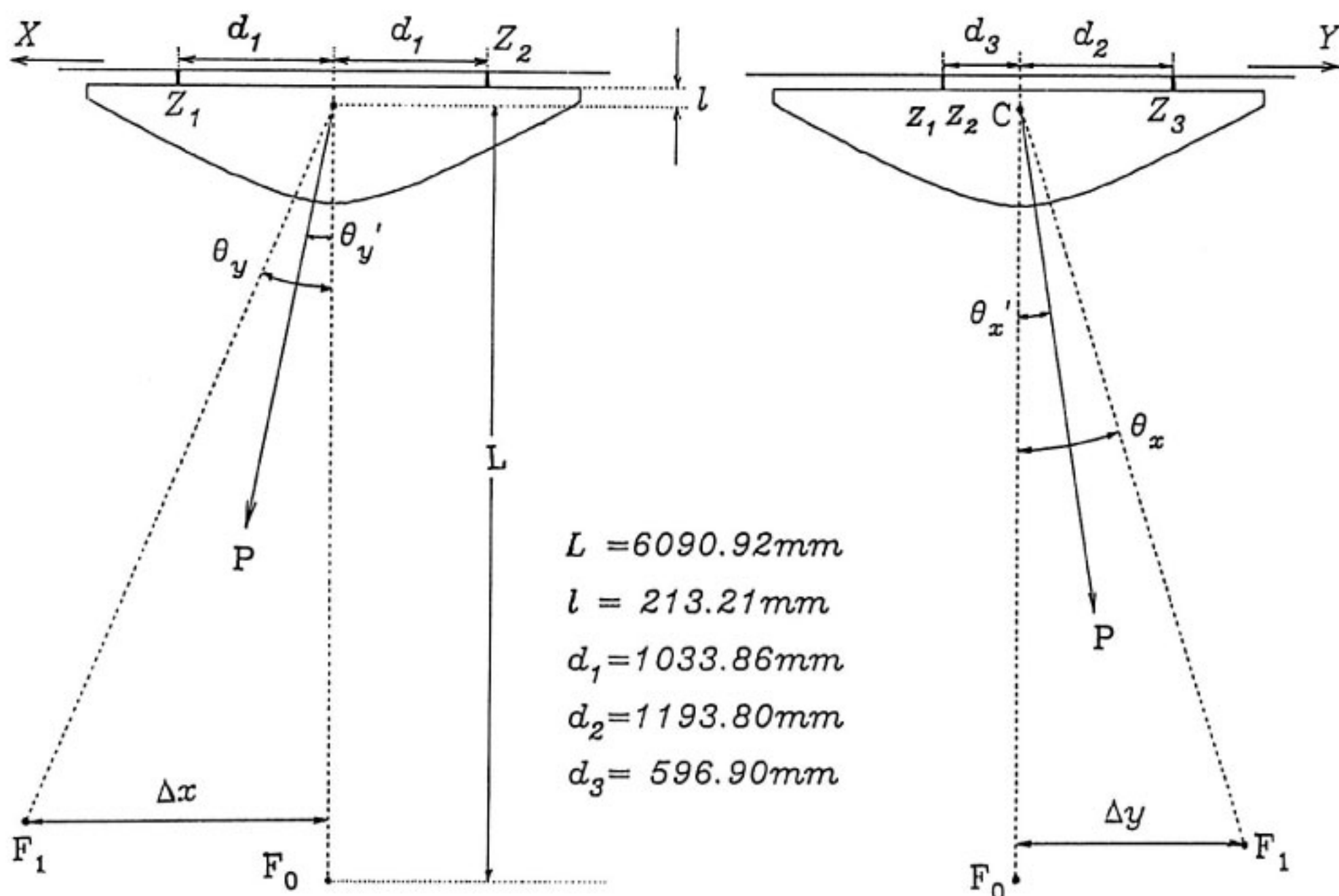
F_1 : オフセットされたフィード位置

3.4 副反射鏡5軸制御機構

1.5 GHz, 2/8 GHz, 22 GHz の各受信フィードは、受信器をセットしたときにフィードの位相中心がちょうどカセグレン焦点位置になるように設計されている。ところが 5, 10, 15, 43, 49 GHz のフィードはアンテナの中心軸から少し離れた位置にセットされる。したがって、これらのフィードで受信する場合には副反射鏡の角度および位置を変えて焦点の位置を移動させる必要がある。本アンテナの副反射鏡にはそのために5つのアク

チュエータが取り付けられていて、自由に副反射鏡の位置と姿勢を変えることができる。副反射鏡の形状は、一つの軸に対して回転対象になっているので、位置および姿勢の自由度は5しかなく、5つのアクチュエータだけで完全に任意の状態を達成できる。

副反射鏡の姿勢制御の様子を第6図に示す。5つのアクチュエータはすべて直動型で、 ± 60 mm の範囲で制御できる。それぞれのアクチュエータには変位量を測定するためのエンコーダーがつけられていて、0.01 mm 単位で位置を制御することができる。副反射鏡の中心軸に直交する平面内での平行運動は、XとYの2つのアクチュエータが制御する。アクチュエータの変位量はそれぞれ δ を前につけて表現することにする。アンテナの仰角をかりに 0° にしたときの上下の方向がYで、天頂の方向を正にとる。中心軸に平行な方向の移動と副反射鏡の傾きは Z_1, Z_2, Z_3 の3つのアクチュエータが制御する。3つのアクチュエータは副反射鏡裏面と副反射鏡の支持ステーの間の距離を制御し、それぞれの長さの組み合わせを変えることによって副反射鏡の傾きを変化させることができる。変位量はそれぞれ主反射鏡から遠ざかる方向を正にとる。いま、受信を行うフィードの位置 F_1 が中心軸上のカセグレン焦点位置 F_0 から X 方向に Δx 、Y 方向に Δy だけ離れた位置にある場合を考え



第7図 副反射鏡の5軸制御用アクチュエータの位置関係

C: 副反射鏡を回転させるときの中心点

CP: 直線最適な角度だけ傾けたときの副反射鏡の中心軸

第4表 各フィードの軸中心からのオフセットと最適な副反射鏡位置の計算値 (mm)

フ ィ ー ド	Δx	Δy	δx	δy	δz_1	δz_2	δz_3
5 GHz	-355.6	-241.3	6.22	4.22	-18.46	41.83	-23.77
10 GHz	-355.6	241.3	6.22	-4.22	-42.09	18.19	23.50
15 GHz	489.0	0.0	-8.54	0.00	41.23	-41.58	-0.17
43 GHz	297.9	139.7	-5.33	-2.44	18.92	-32.77	13.61
49 GHz	195.6	139.7	-3.42	-2.44	9.71	-23.48	13.65

る。主反射鏡が完全な放物面で、副反射鏡が完全な双曲面である場合には、副反射鏡を主反射鏡の一次焦点を中心にして回転させてやれば、副反射鏡の中心軸上のカセグレン焦点もそのまま移動する。ところが、この 34 m アンテナのように鏡面修正された光学系の場合、主反射鏡で反射された電磁波は一つの点で焦点を結ばない。したがって、反射波が主反射鏡の中心軸を通る点は、ある長さをもった線分の上に分布する。ところが、この場合でも、やはり副反射鏡はこの線分上の一つの最適な点を中心として回転させることになる⁽¹⁾。第7図に各アクチュエータと副反射鏡、焦点位置の位置関係を示す。副反射鏡を回転させるときの中心となる点が図中の点Cである。点CからZ軸の3つのアクチュエータが取り付けられている副反射鏡背面までの距離を l 、点Cから点 F_0 や点 F_1 までの距離を L とする。また図のように、X軸に射影した場合の副反射鏡中心から Z_1 あるいは Z_2 のアクチュエータまでの長さを d_1 、Y軸に射影した場合の副反射鏡中心から Z_3 と $Z_1 \cdot Z_2$ の各アクチュエータまでの長さをそれぞれ d_2 と d_3 とする。純粋なカセグレン系の場合には、図のように副反射鏡をX軸まわりに θ_x 、Y軸まわりに θ_y だけ回転させれば、焦点位置は F_0 から F_1 に移動する。しかし、このアンテナのタイプの鏡面修正型カセグレン系の場合には、最適な副反射鏡の軸の方向CPを得るための回転角度 (θ_x', θ_y') は純粋のカセグレン系の場合のほぼ1/2になることが数値計算の結果示されている⁽¹⁾。すなわち、

$$\theta_x' = \frac{1}{2}\theta_x = \frac{1}{2}\sin^{-1}\left(\frac{\Delta y}{L}\right) \quad \text{.....(1)}$$

$$\theta_y' = \frac{1}{2}\theta_y = \frac{1}{2}\sin^{-1}\left(\frac{\Delta x}{L}\right) \quad \text{.....(2)}$$

これを用いて、各アクチュエータの変位量は近似的に次式で与えられる。

$$\delta x = l \sin \theta_y' \quad \text{.....(3)}$$

$$\delta y = -l \sin \theta_x' \quad \text{.....(4)}$$

$$\delta z_1 = -d_3\theta_x' - d_1\theta_y' - l(1 - \cos \theta_x')(1 - \cos \theta_y') \quad \text{.....(5)}$$

$$\delta z_2 = -d_3\theta_x' + d_1\theta_y' - l(1 - \cos \theta_x')(1 - \cos \theta_y') \quad \text{.....(6)}$$

$$\delta z_3 = -d_2\theta_x' - l(1 - \cos \theta_x')(1 - \cos \theta_y') \quad \text{.....(7)}$$

この計算式によって得られた結果を第4表に示す。ただし、第4表の副反射鏡の位置は設計図に基づいて計算された値であり、これらの値は実際の観測を通じてアンテナの利得が最大になるように徐々に改善されて行くものと思われる。

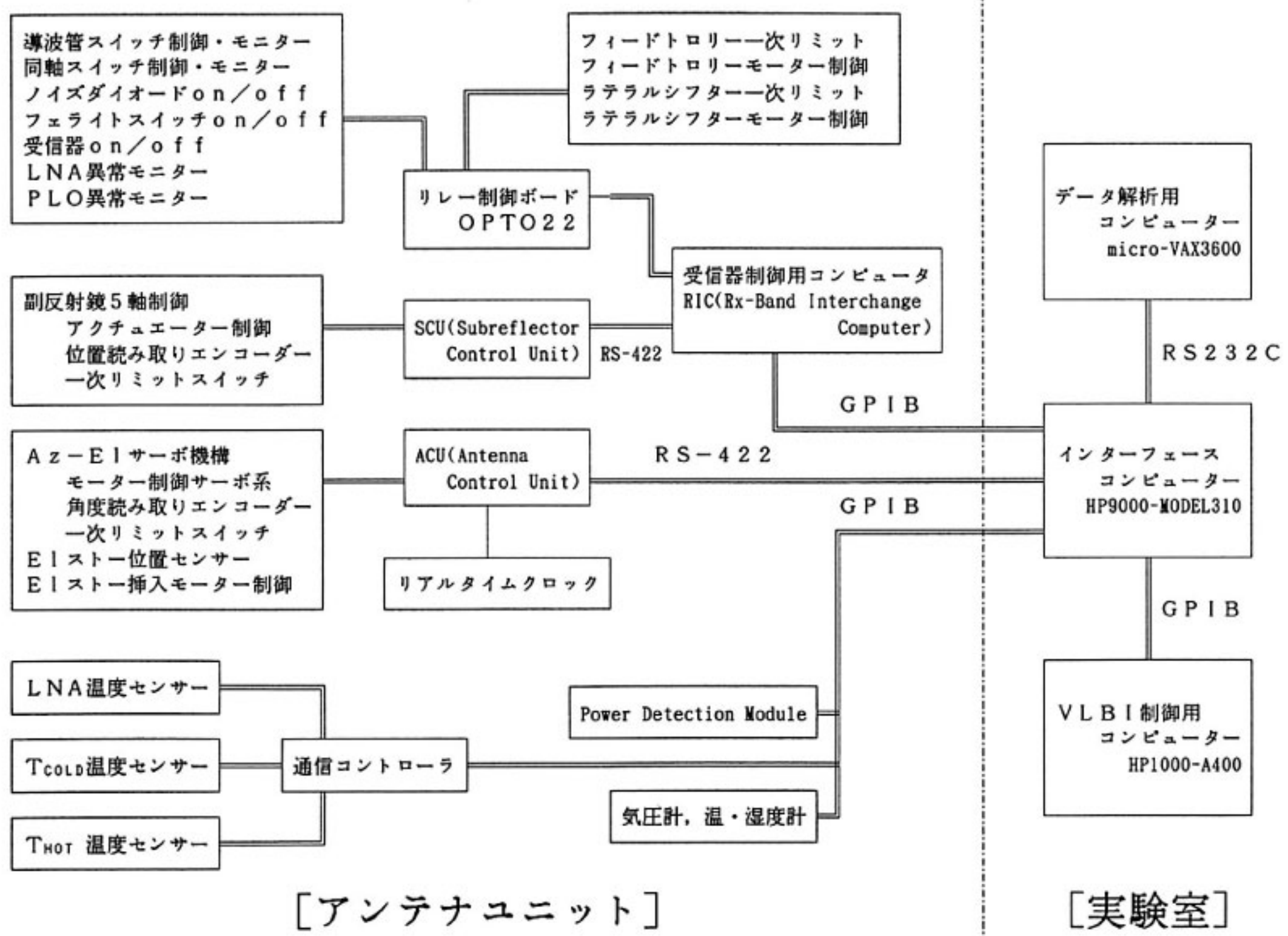
また、この副反射鏡5軸制御機構を積極的に活用すれば、アンテナの仰角が変化することによって主反射鏡の形状が変化したり、副反射鏡の支持ステーが変形した場合でも、つねに最大の利得を得るように副反射鏡の位置を制御することが可能である⁽²⁾。ただし、測地 VLBI 観測では、副反射鏡の位置を変えた場合、光路長の変化によって測位解に余分な誤差を導入してしまう可能性がある。ので、仰角による副反射鏡位置の補正は行わない。

4. 計算機の構成

34 m アンテナの制御は、基本的にすべて計算機によって自動制御できるようになっている。また、PDM (Power Detection Module) での測定データや気象測器のデータなども計算機によって自動的に収集される。この様子を模式化したものを第8図に示す。

PDM は受信した信号を直流検波してその電圧を測定できるようにしたもので、積分時間やアンプの利得をある程度自由に設定することができる。測定電圧にオフセットを加えることによって、背景雑音のレベルをキャンセルして測定することができるので、受信電力の微妙な変化を検出することができる。したがって、電波強度の弱い天体を検出する場合などには便利である。

アンテナの制御は、アンテナの Az-El 角の制御と副反射鏡5軸制御機構の制御、それに受信器系の制御の3つに大別することができる。この3つはそれぞれ ACU (Antenna Control Unit), SCU (Subreflector Control Unit), RIC (Rx-Band Interchange Computer) の3つのユニットがそれぞれ分担して制御を行っている。これらのユニットはすべてリモートモードとローカルモードの2つのモードを選択することができる。ローカルモードのときには直接オペレータが操作でき、リモートモードのときにはインターフェースコンピュータか



第8図 計算機によるアンテナの制御系統図

らの遠隔操作に従って動作する。RICの入力部分にはタッチセンス方式のスクリーンが採用されており、受信器の切り換えなどを行う場合には該当する部分を指で押すだけで済むようになっている。

また、PDMでの電力測定データ、低雑音アンプのある2次ステージの温度と受信器の校正に使用されるダミーロードの温度、気象測器の気圧・気温・湿度データはGPIBラインを通じて一定時間おきにインターフェースコンピュータで自動的に収集される。これらの値はつねに最新のものがインターフェースコンピュータに保存されていて、ユーザーの要求に応じて即座に利用できるようになっている。このように、インターフェースコンピュータはアンテナの遠隔制御を集中管理するだけでなく、観測時のデータ取得も集中して行っていることになる。このため、観測時の全ての作業は1台のインターフェースコンピュータだけを通じて行うことができる。したがって、一般のアンテナユーザーは各々の動作がどの制御ユニットによって制御されるかといった細かいところまで理解する必要がない。

ユーザーがインターフェースコンピュータを操作する方法としては3通りの方法が用意されている。1つはイ

ンターフェースコンピュータ本体に付属しているキーボードから直接入力する方法であり、残りの2つはGPIBとRS232Cの通信ラインを通じてコマンドを送る方法である。後者の2つの方法を使えば、インターフェースコンピュータとは別のコンピュータでプログラムを組むことによってアンテナの自働運用ができる。特にVLBI実験の際の観測は24時間以上の連続観測になるので自働運用が不可欠であるが、そのためにはHP1000-A400上のプログラム(NKAOS: New Kashima Automatic Operation Software)が用意されている。また、観測データの処理のための汎用コンピュータとしてmicro-VAX3600が用意されており、このコンピュータからはRS232Cでインターフェースコンピュータにつながっていて、アンテナの運用とデータの収集が行えるようになっている。ただし、これらのコンピュータの接続は固定されたものではなく、インターフェースコンピュータにコマンドを送る際のルール(プロトコル)に従って通信できるものであれば、どんなコンピュータを使用しても構わない。

これまで述べてきたように、このシステムの設計の優れた点は、インターフェースコンピュータがアンテナの

制御を集中管理していて、観測の際の作業がすべて1ヶ所で行えるというところにある。ところが、現在使用しているインターフェースコンピュータの能力の限界と、通信速度の制限のため、1台の計算機だけですべての操作を行なうことに問題が生じている。アンテナを電波源に追尾させる際には、インターフェースコンピュータからACUに最新の方角・仰角の値をつぎつぎに送ってやらなければならないが、インターフェースコンピュータとACU以外の装置との間の通信に時間がかかるために、ときどきACUの方角・仰角の値が更新されなくなる状況に陥ることがある。こうなると、電波源の追尾精度が劣化し、安定した観測に問題が生じてしまう。このため、とりあえず現在はACUの制御を行う部分だけを切り離し、もう1台別のコンピュータを専用に用いて電波源の追尾を行うことにしている。この問題については、将来的なシステム構成の検討を含めて、解決の方法を検討して行かなければならない課題である。

5. お わ り に

鹿島に建設された34mアンテナシステムについての紹介を行った。このシステムは独創的なシステムであると同時に、非常に性能の高い観測装置である。この34mアンテナが、これまでの26mアンテナにかわって、これからの測地VLBI網の日本における中心的な存在となっていくことであろう。また、この34mアンテナの建設によって、われわれはVLBIの観測装置というだけでなく、非常に汎用性の高い強力な観測手段を手にしたといえる。このアンテナは開口径の大きさ、鏡面精度の高さ、カバーする周波数範囲の広さなどを総合的にみて、世界的にも充分性能を誇れる電波望遠鏡である。このアンテナは、その持てる機能を使いこなしてやることによ

って、西太平洋電波干渉計の中心局としての任務にとどまらず、種々多様な成果を生み出す可能性を持っている。建設以後これまでに実施されてきた試験観測でも、このアンテナの今後活躍するであろう領域の広さを伺い知ることができる⁽³⁾。そして、今後このアンテナがどれだけの活躍をするかは、われわれがこのアンテナをいかに使いこなすことができるかにかかっているといっても過言ではない。これから行うべき残された問題は山ほどあるが、これらの問題を克服し、よりよいシステムを目指してつねに努力を続けて行きたい。

謝 辞

このアンテナシステムの建設にあたっては、所内の方々、とくに総務部と鹿島宇宙通信センター管理課の方々に非常にお世話になりました。また、国立天文台の方々には43GHz、49GHzの受信器の設置に関して協力していただいています。ここに、あわせて感謝致します。

参 考 文 献

- (1) T. Veruttipong, V. Galindo-Israel, and W. A. Imbriale; "Low-Loss Offset Feeds for Electrically Large Symmetric Dual-Reflector Antennas.", IEEE Trans. Antennas Propag., pp. 745-755, July, 1987.
- (2) R. D. Hughes and M. S. Katow; "Subreflector Focusing Techniques Applied to New DSS-15 and DSS-45 34-Meter Antennas", TDA Progress Report, 42-80, pp. 83-90, 1984.
- (3) 高羽 浩, 小山泰弘, 今江理人, "IV.2 34m アンテナ試験観測結果", 本季報特集号

////////////////////////////////////