
解 説 (再録)

平磯の新太陽電波観測システム^{*1}近藤 哲朗^{*2} 磯辺 武^{*2} 猪木 誠二^{*3}
亘 慎一^{*4} 徳丸 宗利^{*5}

(1993年12月1日受理)

THE NEW SOLAR RADIO OBSERVATION SYSTEM
AT HIRAIISO

By

Tetsuro KONDO, Takeshi ISOBE, Seiji IGI,
Shin-ichi WATARI, and Munetoshi TOKUMARU

The Hiraïso Solar Terrestrial Research Center has been engaged in the prediction of significant disturbances in the solar terrestrial environment, and has therefore been monitoring solar radio emissions for more than 40 years. These observations had been at fixed frequencies until 1988 when a spectrograph (70-500 MHz) with a 10-m antenna was built. In FY1992 (April 1992-March 1993) the solar radio observation system at Hiraïso was renewed. Three old antennas were replaced by new ones, and total flux measurements at 2800 MHz were started. These were in addition to the fixed frequency measurements at 200 MHz and 500 MHz. By adding two antennas, the frequency range of the spectrograph was expanded from 70-500 MHz to 25-2500 MHz. Routine observations of the sun using the new spectrograph (HiRAS: Hiraïso radio spectrograph) began late in May 1993, and daily operation is now fully automated. Everyday the antennas automatically track the sun from sunrise to sunset, and the data acquired by the HiRAS are processed by a workstation computer to produce dynamic spectrograms. An algorithm that removes interferences due to radio, television, and other artificial signals has significantly improved the signal to noise ratio of the spectrogram, thereby considerably increasing the HiRAS' ability to monitor solar radio bursts.

[キーワード] 太陽電波, ダイナミックスペクトル計, II型バースト, F10.7, 宇宙天気予報.

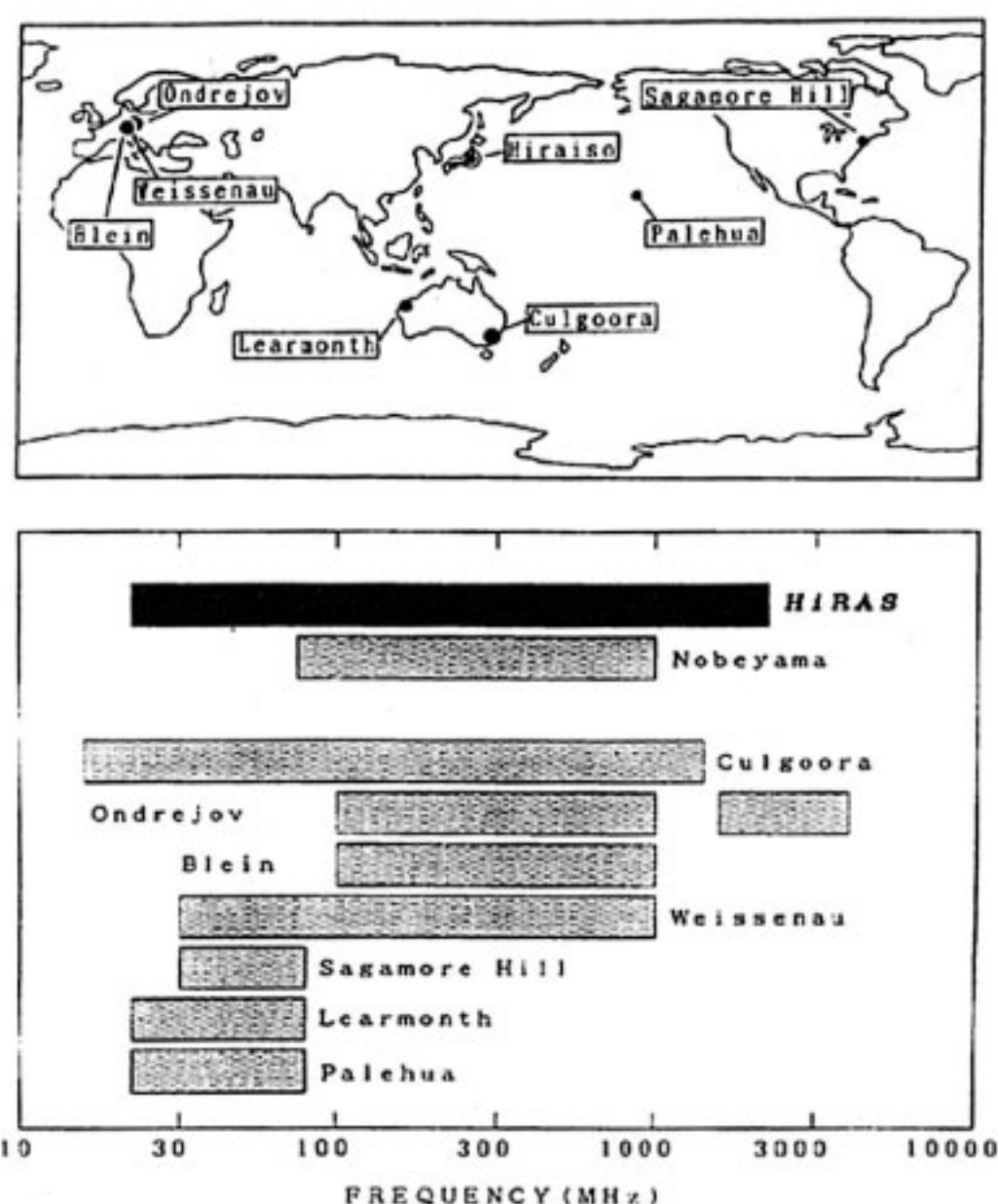
Solar radio emission, Radio spectrograph, Type II burst, F10.7, Space weather forecast.

1. は じ め に

通信総合研究所平磯宇宙環境センターで太陽電波観測が始まったのは1952年である。その後設備の更新を行いつつ固定周波観測が続けられてきたが、1988年か

らは70 MHzから500 MHzのダイナミックスペクトル観測も開始された⁽¹⁾。取得された太陽電波データは平磯で行っている地磁気嵐等の予報業務に役立てるほか宇宙天気予報研究の基礎データとして用いられてきた。昨年(1992年)度これら観測施設のうち老朽化した固定周波観測用のパラボラアンテナ(10 mφ: 100/200 MHz受信, 6 mφ: 500 MHz受信, 1.1 mφ: 9500 MHz受信)が解体され, 新たに6 mφ(500-2500 MHz受信)と2 mφ(2800 MHz受信)のパラボラアンテナおよび直交ログペリアンテナ(25-70 MHz受信)が整備され

^{*1} (再録) 季報 Vol.40 No.1 March 1994 (pp.85-102)^{*2} 元関東支所 平磯宇宙環境センター 太陽研究室^{*3} 元企画部^{*4} 宇宙科学部 宇宙計測研究室^{*5} 元稚内電波観測所



第1図 世界の主要な太陽電波観測用スペクトル計と周波数範囲。HiRASは平磯の新スペクトル計に付けた名称である。

た。新アンテナの整備に伴い、ダイナミックスペクトル観測の周波数帯が大幅に拡張され、25 MHz から 2500 MHz を連続的に受信できるようになり世界的にも有数な広帯域となった(第1図)。固定周波観測はダイナミックスペクトル観測用の 10 m φ アンテナおよび新たに整備された 6 m アンテナを使用して 200 MHz と 500 MHz の 2 周波数で継続されることになった。100 MHz での固定周波観測は混信の増大による品質の悪化のため廃止した。また、あらたに太陽活動度を表す指標として重要である 2800 MHz での太陽電波強度の観測を開始し、9500 MHz での固定周波観測は廃止した。なお鹿島宇宙

通信センターの 10 m アンテナで行っていた 32 GHz での太陽面マッピング観測は装置の老朽化のため廃止した。

2. ダイナミックスペクトル計 (HiRAS)

平磯の新太陽電波観測システム全体のブロック図を第2図に示す。平磯にある太陽電波観測用の 4 本のアンテナのうち 3 本のアンテナが 25 MHz から 2500 MHz を連続的にカバーするスペクトル計 HiRAS (ハイラス: Hiraïso Radio Spectrograph) を構成している(これらの 3 本のアンテナを周波数帯の低い方から HiRAS-1, HiRAS-2 および HiRAS-3 と呼ぶ)。それぞれのアンテナで右旋および左旋円偏波成分を独立に受信する。受信された信号はさらにスペクトルアナライザに入力される。スペクトルアナライザからの出力はデジタルデータとしてワークステーションに蓄えられる。ワークステーションで混信除去等の処理を行い、ダイナミックスペクトルとして表示を行う。HiRAS アンテナ部の写真を第3図に諸元を第1表に示す。またバックエンド部の写真を第4図に、HiRAS 全体の性能を第2表に示す。

2.1 HiRAS-1 (25~70 MHz)

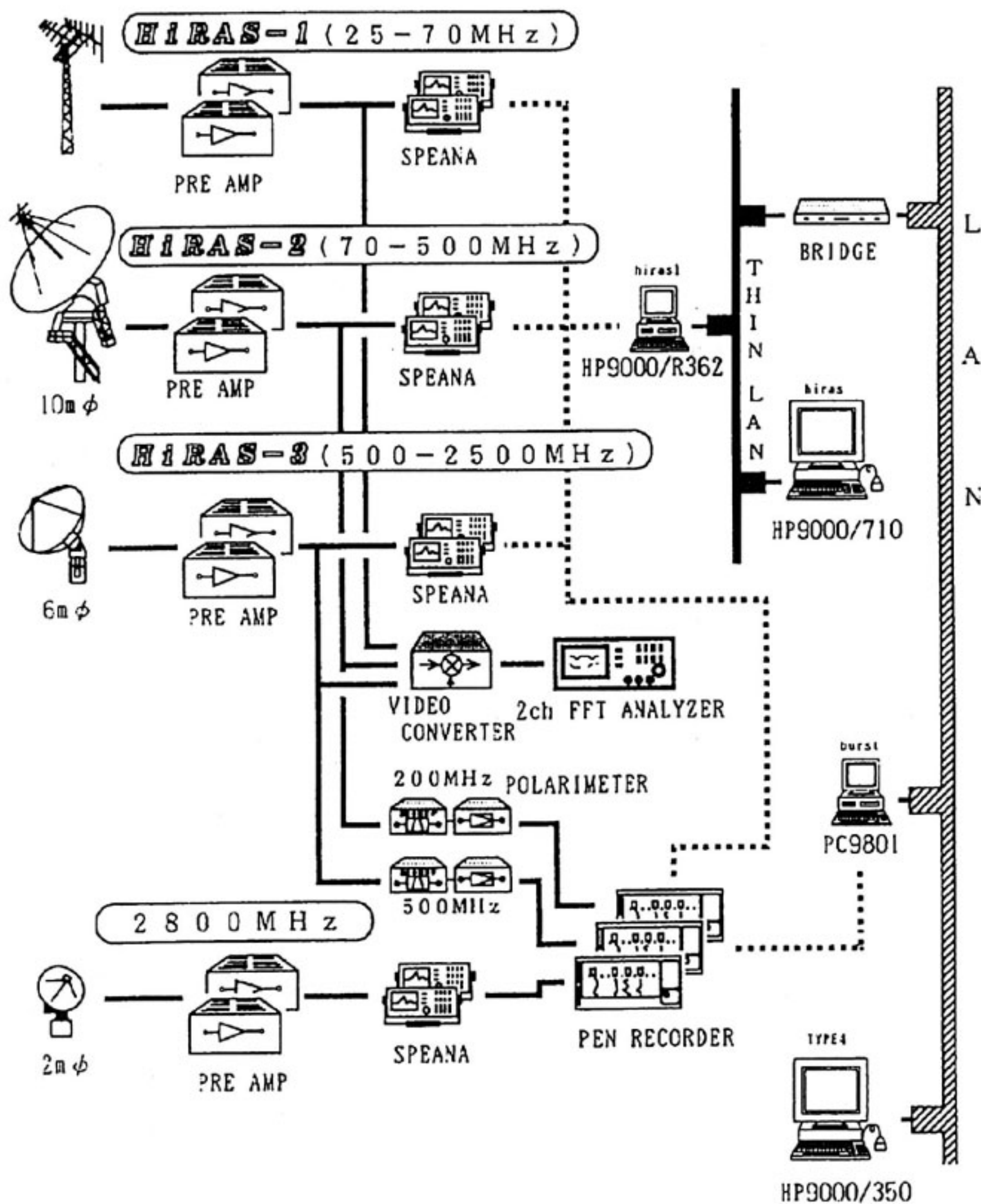
帯域 25~70 MHz のログペリアンテナが“ハ”の字型に直交し直交直線偏波成分を受信する。架台は AZ (方位角) - EL (仰角) 駆動方式で地上高約 15 m のタワー上に設置されている。主ビーム幅は 60° である。円偏波合成部のハイブリッドには周波数帯域 3.5~80 MHz の広帯域ハイブリッド (Merrimac QHM-6-42)

第2表 HiRAS の性能

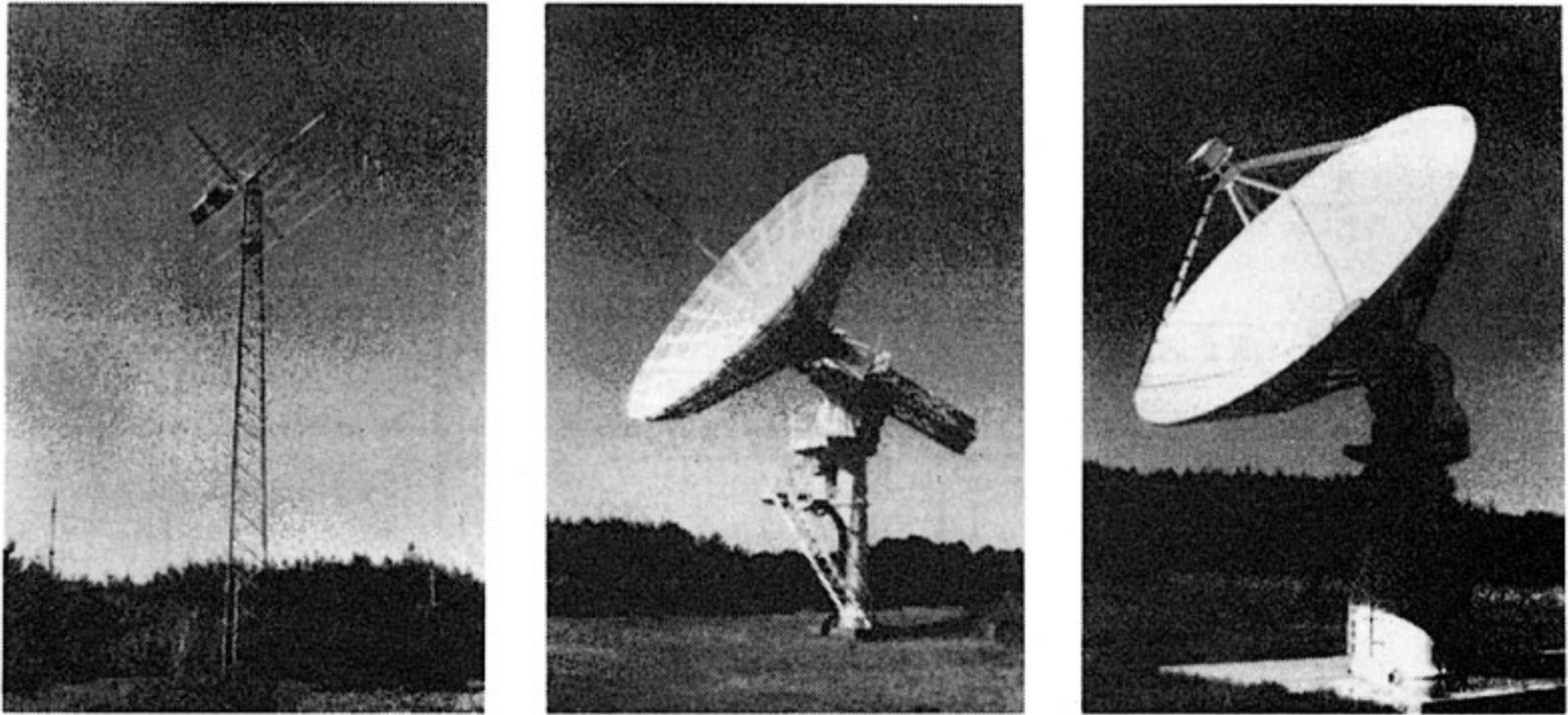
周波数帯域	25-2500 MHz
周波数分解能	501 点 (対数スケールに圧縮)
時間分解能	2 ~ 5 秒
偏波	RHCP, LHCP
観測時間	日の出から日没まで連続

第1表 HiRAS アンテナ諸元

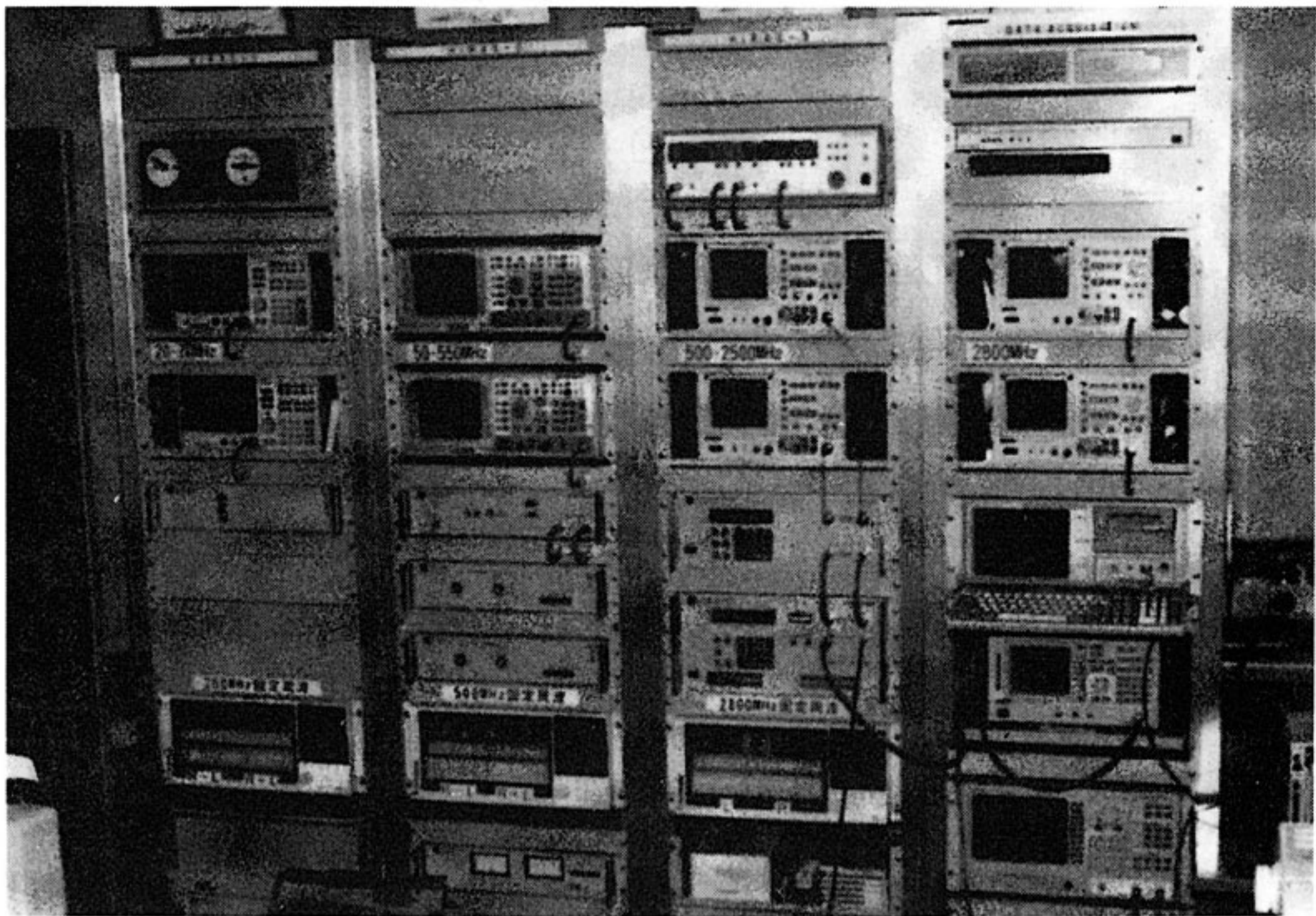
	HiRAS-1	HiRAS-2	HiRAS-3
パラボラ直径	---	10 m	6 m
1次放射器	直交13素子 ログペリアンテナ	直交20素子 ログペリアンテナ	直交23素子 ログペリアンテナ
周波数 (MHz)	25 - 70	70 - 500	500 - 2500
アンテナゲイン (dBi)	13 (全帯域)	14.8 (70MHz) 22.9 (200MHz) 30.7 (500MHz)	27.6 (500MHz) 36.8 (1500MHz) 40.8 (2500MHz)
偏波	右旋および 左旋円偏波	右旋および 左旋円偏波	右旋および 左旋円偏波
架台方式	経緯儀(AZ-EL)方式	赤道儀方式	経緯儀(AZ-EL)方式



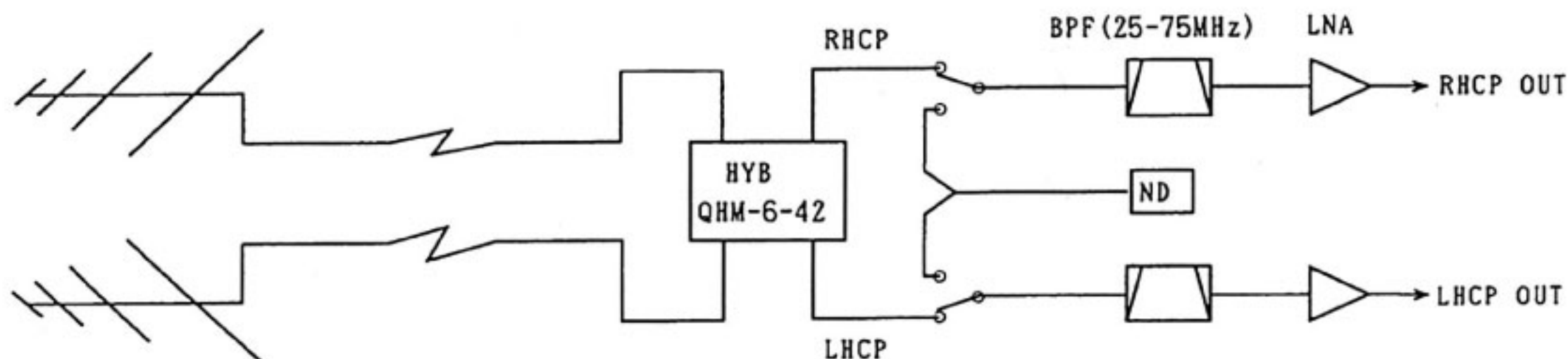
第2図 平磯での新太陽電波観測システムブロック図. 4本のアンテナの内, 上から3本がHiRAS (スペクトル計) を構成している. 10m ϕ アンテナおよび6m ϕ アンテナの信号は200 MHz および 500 MHz 受信用の固定周波受信器にも分配されている. 一番下のアンテナは2800 MHz 受信システム専用の2m ϕ アンテナである.



第3図 HiRASを構成する3アンテナ。左からHiRAS-1（ログペリアンテナ）、HiRAS-2（10mφアンテナ）、HiRAS-3（6mφアンテナ）。



第4図 HiRAS バックエンド部。

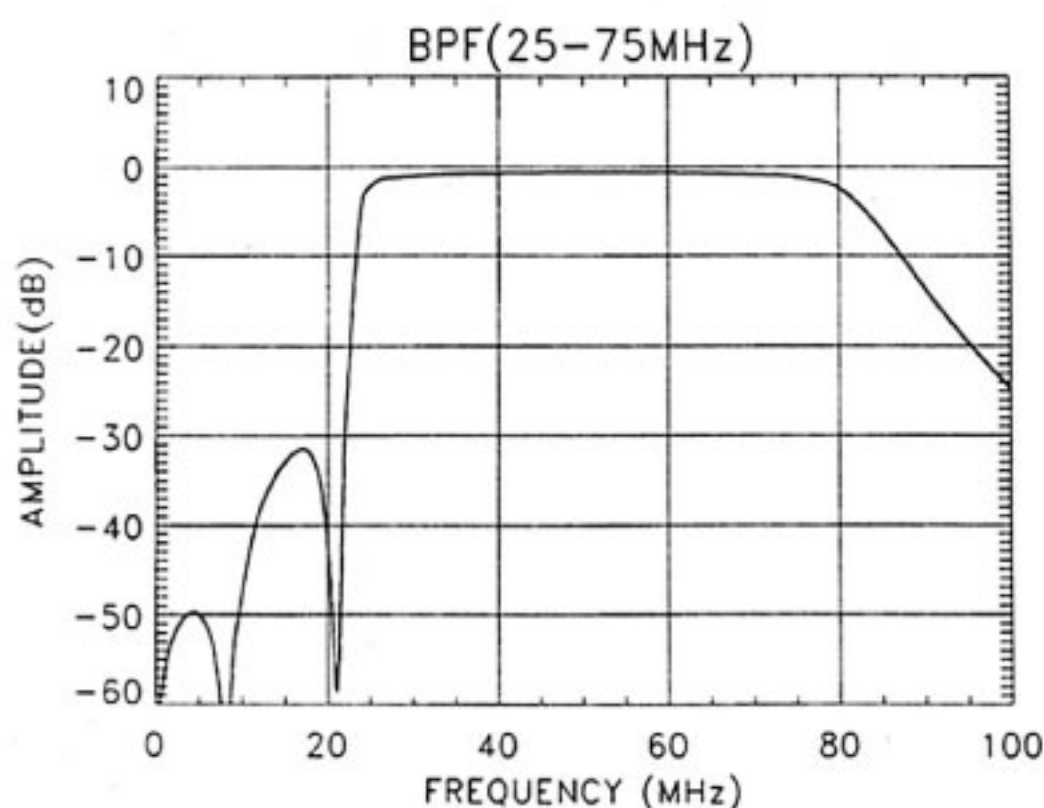


第5図 HiRAS-1 フロントエンド部ブロック図.

を使用している。フロントエンド部のブロック図を第5図に示す。プリアンプ (R&K A-8) のゲインは40 dB, 雑音指数は4 dBである。プリアンプの前のバンドパスフィルター (通過帯域 25~75 MHz) では低域側の特性を急峻としている。21 MHz 帯に極 (減衰率 60 dB 以上) をおくことにより特にこの周波数帯において強く受信される通信波の影響をさけている (第6図)。

2.2 HiRAS-2 (70~500 MHz)

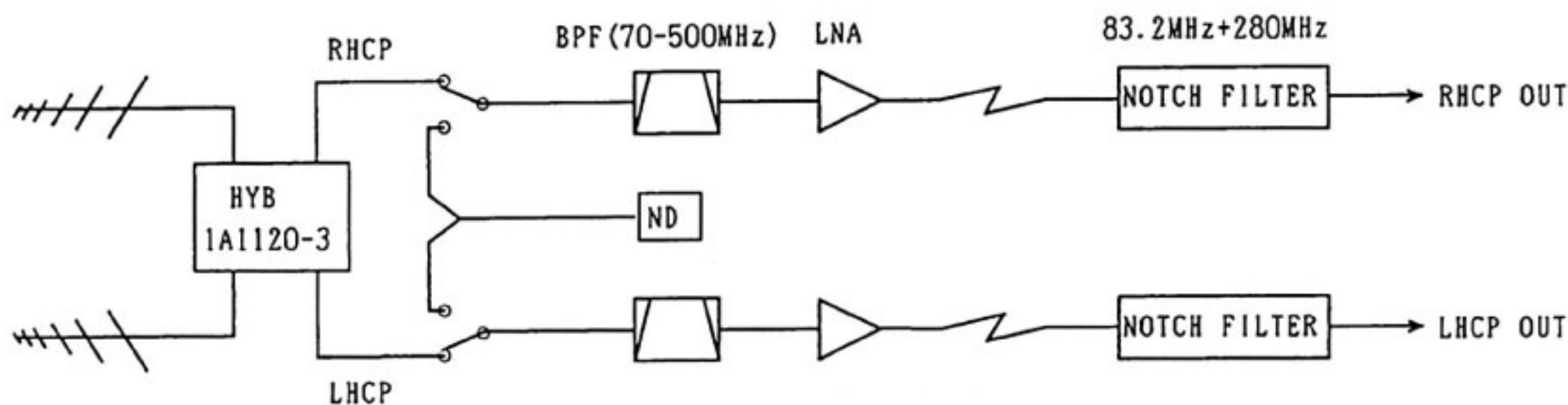
HiRAS-2 は 1988 年度に整備された直径 10 m のパラボラアンテナで1次放射器として直交 20 素子ログペリ



第6図 HiRAS-1 で使用している 25-75 MHz バンドパスフィルターの特性。特に 21 MHz 帯に減衰の極を持たせてこの周波数帯からの混信を防止している。

アンテナが使用されている⁽¹⁾。主ビーム幅は 70 MHz で 29°, 500 MHz で 4° であり、架台は赤道儀方式である。今回のシステム拡張に伴い以下に述べるようなフロントエンド部の改修を行った。新しいフロントエンド部のブロック図を第7図に示す。プリアンプ (MITEQ AU-1054) のゲインは 29 dB, 雑音指数は帯域内最大で 1.7 dB である。

従来のシステムでは直交直線偏波成分から円偏波成分を合成するための偏波分離部が 2 帯域 (70~100 MHz および 100~500 MHz) に分かれていた。そのため受信全帯域をカバーするためには周波数帯によってハイブリッドを切り換えなければならず、高時間分解能での観測の障害となっていた。そこで偏波分離部に広帯域ハイブリッド (Anaren 1A1120-3 : 保証帯域は 100~500 MHz であるが実測により 70 MHz においても偏波分離度 20 dB 以上が確保できていることが判明した) を使用して帯域の切り換えを不要とし、機械的リレーを使用しないことによる信頼性の向上と時間分解能の向上を図った。ところで HiRAS-2 の受信周波数帯域には FM ラジオ放送, TV 放送, 航空管制等の強い電波を出している周波数帯が含まれているが, 太陽電波受信の立場からはこれらすべてが混信波 (干渉波) となる。平磯ではローカルな FM 放送と航空管制用通信波が非常に強く受信されてしまい, 時々受信機がサチュレーションを起こしてしまう。そこで 83.2 MHz と 280 MHz で 30 dB 以上減衰するノッチフィルターを挿入している (第8図)。



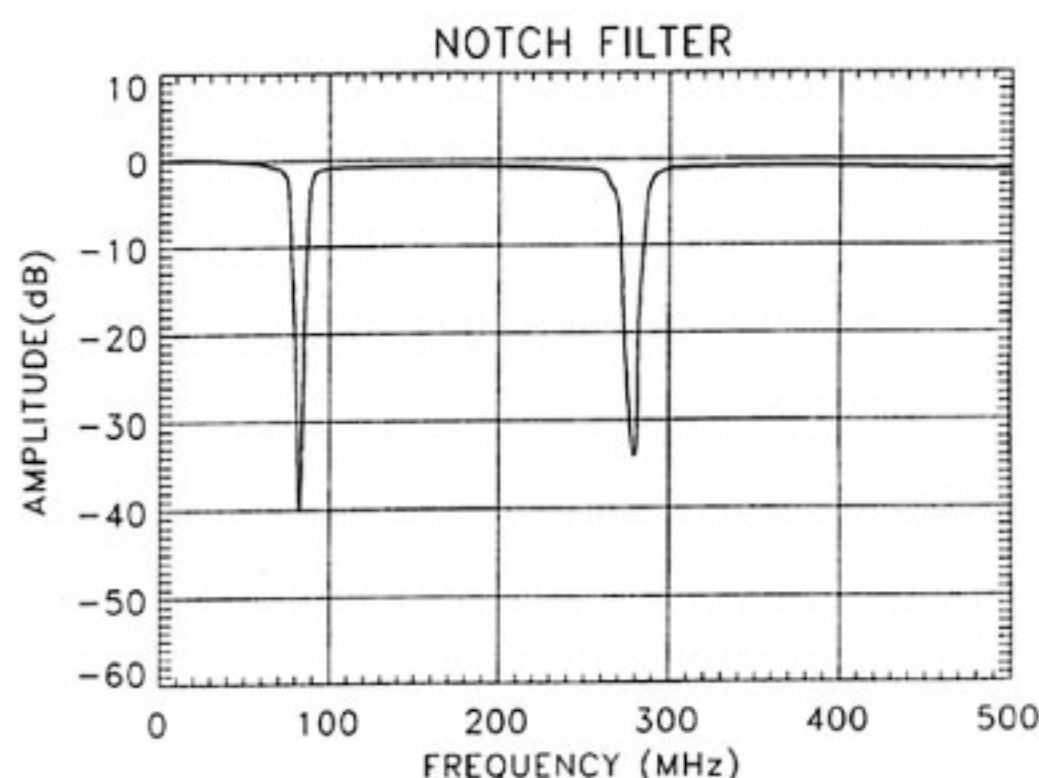
第7図 HiRAS-2フロントエンド部ブロック図.

2.3 HiRAS-3 (500~2500 MHz)

アンテナ部は直径6mのパラボラアンテナで1次放射器として直交23素子ログペリアンテナが用いられている。円偏波分離部には周波数帯域500-3000MHzのハイブリッド (Anaren 1B0024-3) が使用されている。帯域内で偏波分離度は19.6dB以上(実測値)が得られている。架台部はAZ-EL方式で、駆動速度の最大値はAZ軸、EL軸それぞれ $1.2^{\circ}/\text{秒}$ および $0.33^{\circ}/\text{秒}$ である。主ビーム幅は500MHzで約 6.5° 、2500MHzで約 1.4° (太陽視直径の約3倍)である。フロントエンド部のブロック図を第9図に示す。プリアンプ(MITEQ AFS3-00100300-20-10P-4)のゲインは34dB、雑音指数は帯域内最大で1.2dBである。

2.4 ビデオ変換器と2ch-FFT解析器

HiRASで受信した信号RF信号のままスペクトルアナライザで解析されるが、その他に25~2500MHzの帯域の任意の2MHz幅を切り取り0~2MHzのビデオ帯信号に変換する機能を有する。このビデオ信号を



第8図 HiRAS-2で使用しているノッチフィルターの特性。
83.2 MHzと280 MHzを減衰させている。

FFT解析器で処理することによりスペクトルアナライザよりも高時間分解能観測が可能となっている。また右旋偏波成分と左旋偏波成分のクロススペクトル解析により、ストークスパラメータの測定も目指している。

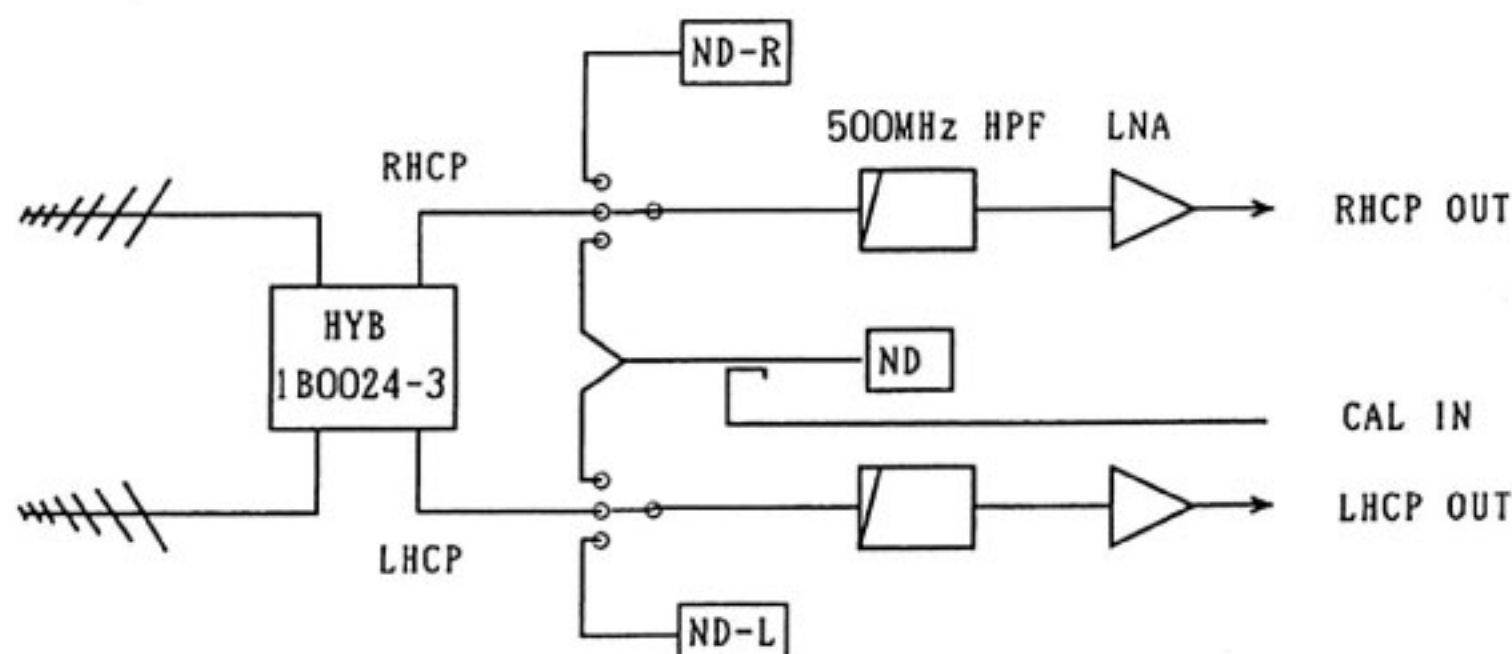
2.5 観測

HiRASの各アンテナは計算機制御で太陽追尾を行っている。太陽位置は実時間太陽軌道計算で求めている。HiRAS-1とHiRAS-3はAZ-ELタイプの駆動系であるが、制御装置とのインターフェースはGP-IBであり、GP-IBさえ装備されていればどのようなパソコンからの制御も可能である。HiRAS-2は計算機と一体になった専用の制御装置で太陽追尾を行うため外部からの制御は不可能である。HiRAS-1はビーム幅が広い精密な追尾は行っていない。1分毎にアンテナを駆動しているが軌道計算精度まで含めた追尾精度は 10° 程度である。HiRAS-2およびHiRAS-3の追尾精度は計算精度まで含めると 0.1° 程度であり、ビーム幅に比べて十分な精度となっている。各アンテナは日中自動的に太陽追尾を行い、夜間はそれぞれの待機状態で日の出まで待機する。HiRAS-2と3の待機状態は天頂方向であり、HiRAS-1は日没時の太陽方向が待機状態である。

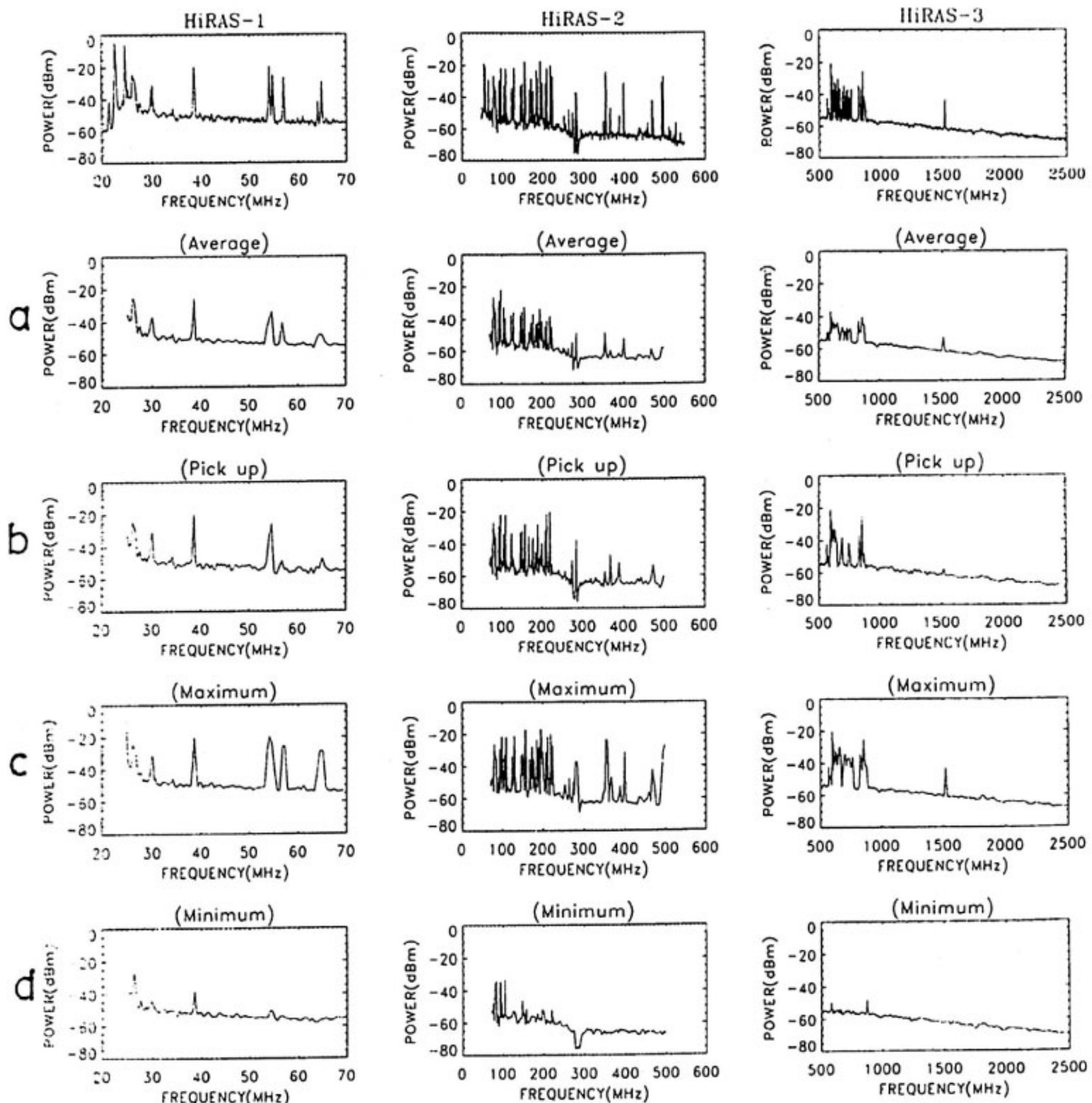
各アンテナで受信された信号は右旋偏波および左旋偏波成分独立にRF信号のまま増幅され最終的にスペクトルアナライザを使って周波数分析が行われる。使用しているスペクトルアナライザはHiRAS-1用にHP8590D (×2)、HiRAS-2用にアドバンテスト TR4135

第3表 スペクトルアナライザの設定

	HiRAS-1 (HP8590D)	HiRAS-2 (TR4135)	HiRAS-3 (R4131D)
分解能帯域幅	100 kHz	300 kHz	1 MHz
ビデオ帯域幅	3 kHz	10 kHz	10 kHz
掃引時間	0.5 s/掃引	0.5 s/掃引	0.5 s/掃引
掃引周波数範囲	20-70 MHz	50-550 MHz	500-2500 MHz
検出器モード	サンプル	サンプル	サンプル



第9図 HiRAS-3 フロントエンド部ブロック図。



第10図 データ圧縮時の混信除去効果。最上段の3枚のスペクトルはHiRAS-1, -2, -3のスペクトル生データである。2段目以下に周波数軸方向のデータ圧縮時に、a) 平均値, b) 1点抽出値, c) 最大値, d) 最小値で再サンプリングした場合を示している。最下段(最小値を用いた場合)が通信による混信を除去するのに効果的であることがわかる。詳しくは本文参照のこと。

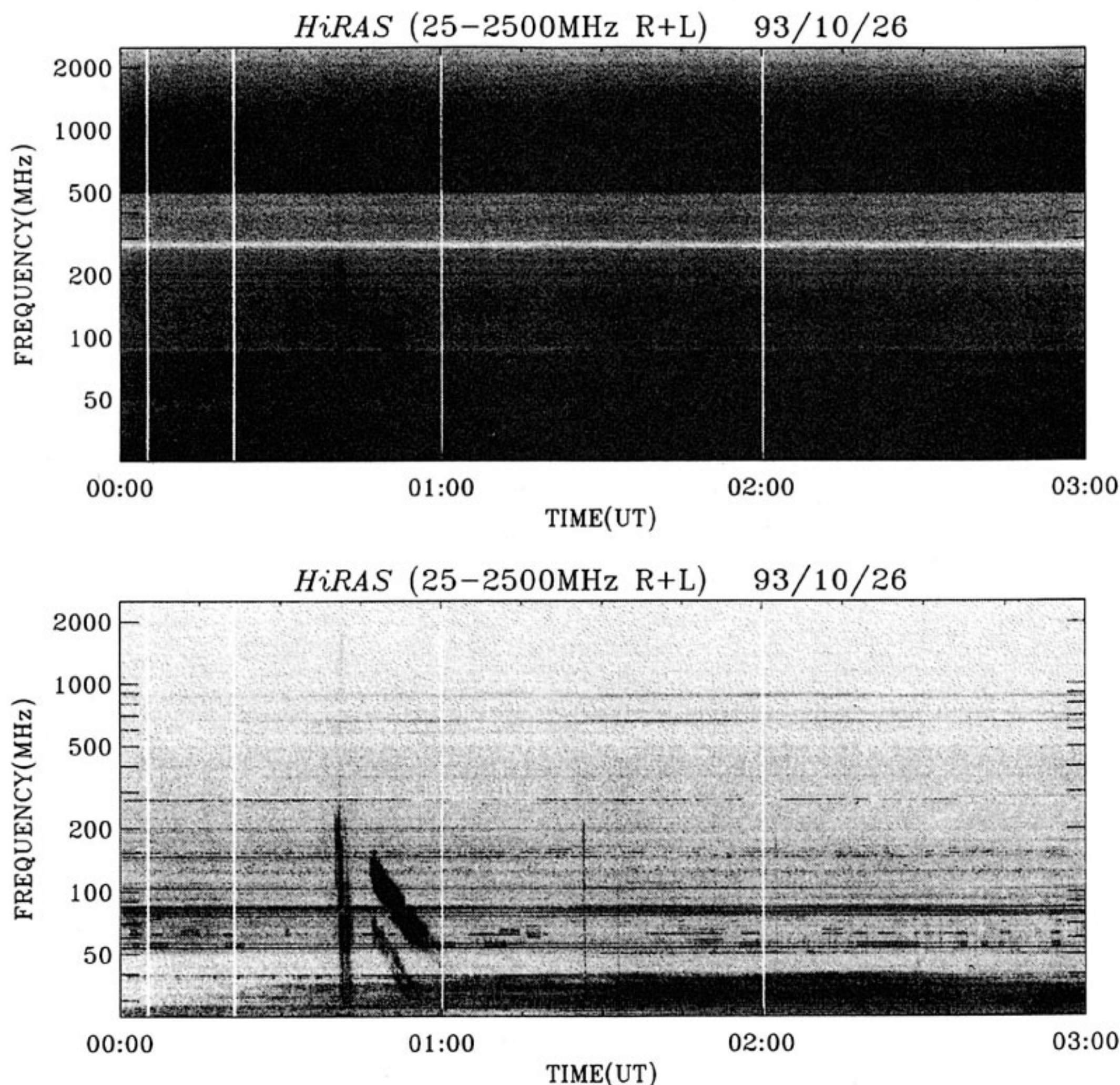
($\times 2$), HiRAS-3用にアドバンテスト R4131D ($\times 2$) である(各スペクトルアナライザの設定を第3表に示す)。計6台のスペクトラムアナライザからのデータはGP-IB経由でシステム制御用計算機(HP9000/R362)に取り込まれる。さらにデータはLANで接続されている解析用ワークステーション(HP 9000/710)に転送されハードディスクに蓄積されていく。6台のスペアナからデータを取り込むのに要する時間は2秒足らずであるが、制御用計算機がHiRAS-3アンテナのコントロール(太陽追尾)も兼ねているために実際のデータ取得間隔は2~5秒程度にばらつく。観測は太陽追尾も含めて完

全に自動化されており、日の出から日没までデータ取得が行われる。また、受信レベル校正のため、各プリアンプの入力は1時間毎に数秒間雑音信号源(ノイズダイオード)に切り換えられる。

2.6 ダイナミックスペクトル表示

2.6.1 データ圧縮と保存

スペクトルアナライザからのデータは1日あたり100 Mバイト程度になる。毎日の観測データを効率よく保存するために、ワークステーションではデータを6分の1程度に圧縮する。具体的には25 MHzから2500 MHzの範囲(スペクトル生データでは周波数方向に1803点



第11図 ダイナミックスペクトル表示例. 上段のプロットはデータ圧縮時の混信除去のみの場合. 下段のプロットはさらにバックグラウンドレベルを引き去った場合. バックグラウンドレベルを引き去ることにより, 信号対雑音比の良い表示となることがわかる. 00:40 UT から 01:00 UT にかけてⅢ型とⅡ型の太陽電波バーストがみられる (第15図参照).

のデータ)を501点の対数スケールに圧縮し,さらに受信強度情報も2バイトから1バイトに圧縮している.周波数軸方向への圧縮時に後で述べるような混信の除去も行っている.こうして,1日あたりのデータ量を15Mバイト程度に圧縮し保存している.ハードディスクに蓄積されたデータは約1ヶ月毎に光磁気ディスクに吸い上げ保存している.

2.6.2 混信の除去

第10図の上段の3枚の図はHiRAS-1, -2, -3で取得された生のスペクトル例を示している.スペクトルに見られるスパイク状のひげはすべて放送や通信による混

信であり,ベースライン部に太陽電波が受かっている(HiRAS-1では感度不足のため静穏時の太陽電波は受信されない).HiRAS-1に見られる25MHz以下のレベル低下は挿入しているハイパスフィルタの影響である.またHiRAS-2中2ヶ所に見られるレベルの落ち込み(83MHzおよび280MHz)はノッチフィルタによるものである.HiRAS-3に見られる大きな勾配は主にケーブル損失の周波数依存性に因る物であり,太陽電波のスペクトルに起因するものではない.ところでデータ圧縮の項で述べたように周波数軸の点数を1803点から501点に圧縮するためにはデータの再サンプリングが

必要である。新たなサンプリング点（周波数）でのデータ値を求める方法として以下の4つが考えられる。

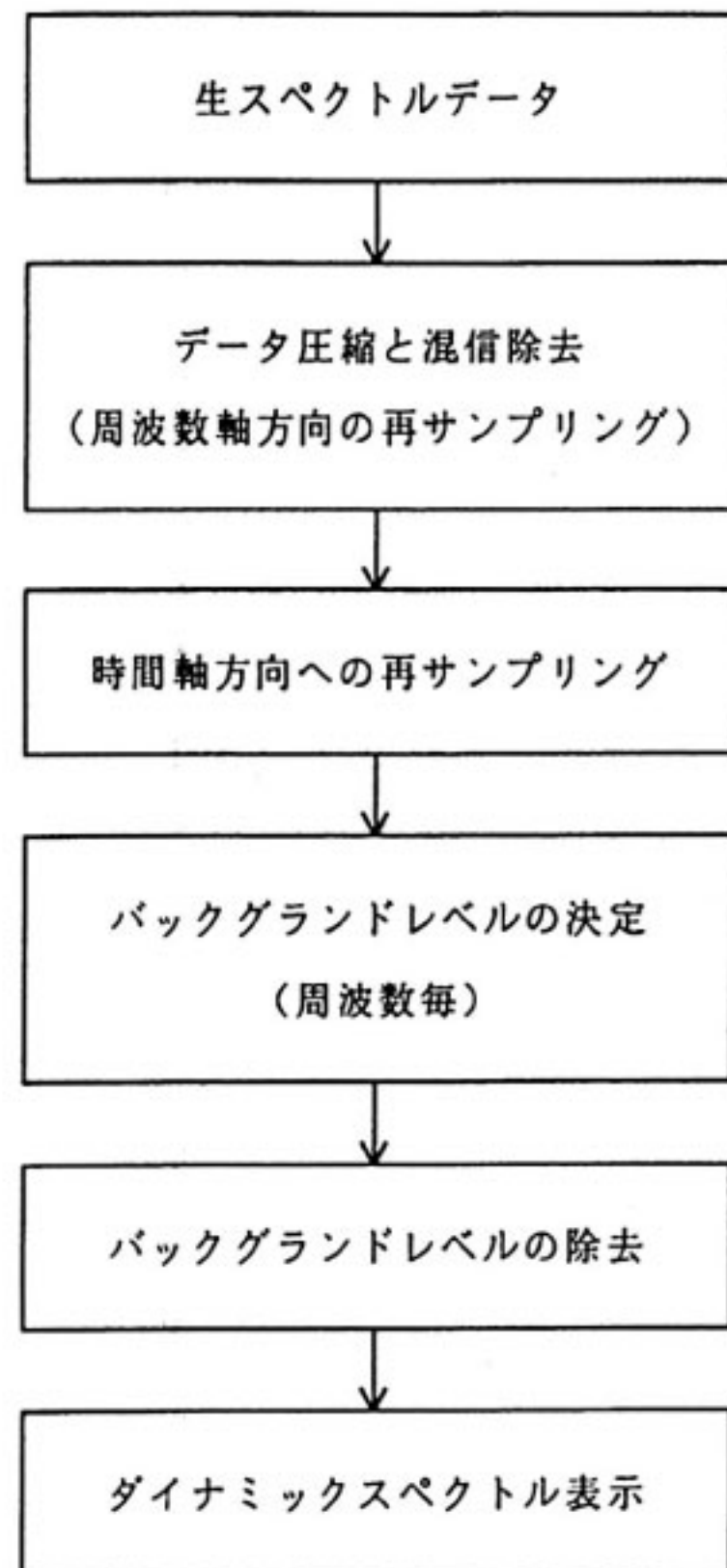
- (a) 元のデータで対応する周波数範囲内のデータの平均値を用いる方法
- (b) サンプリング点に対応する1点だけの元データを用いる方法
- (c) 対応する周波数範囲内の元データの最大値を用いる方法
- (d) 対応する周波数範囲内の元データの最小値を用いる方法

混信もなく連続スペクトルの場合は(a), (b)はほぼ同じ結果を与えることが期待される。さらに信号対雑音比が良い場合は(c), (d)も同じ結果が予想される。突発的現象があった場合は(c)が有効である。しかしながら、実際には非常に強い干渉波（混信）が絶えず存在するため、(a), (b), (c)特に(c)は混信波の影響を受ける可能性が高くなる。これらに対して(d)は線スペクトル状の混信を取り除くのに有効である。ただし、実際の現象が線スペクトル成分を持っている場合は検出が難しくなる他、感度も低めとなる。こうした欠点もあるが、見やすいダイナミックスペクトル表示を得ることをHiRASの主目的とし、ここでは方法(d)を用いて混信の除去を行っている。実際に各方法の効果を第10図の2段目以下に示しているが、方法(d)（第10図最下段）が混信を取り除くのに最も有効であることがわかる。

2.6.3 ダイナミックスペクトル表示

HiRASで取得されるデータの時間間隔は不等間隔である（アンテナ制御とデータ収集を交互に行っているためアンテナの機械的レスポンスによってデータ収集間隔が左右される）。ダイナミックスペクトル表示を行う際には、時間軸方向に不等間隔であるデータを等間隔となるように内（外）挿により再サンプリングを行っている。さらに各周波数毎にバックグラウンドの太陽電波レベルを決定し、バックグラウンドレベルを引き去っている。バックグラウンドレベルの決定には仰角が 10° 以上のデータを用い、スペクトル表示する時間範囲（1から6時間）の周波数毎の最低値をバックグラウンドレベルとしている。バックグラウンドレベルを引き去ったデータに対してレベルに応じた黒み（色）づけをすることにより、ダイナミックスペクトルとして表示している。こうしたバックグラウンドレベルの除去は、前項で述べた方法でも取りきれなかった混信の除去を可能とするだけでなくアンテナ毎のレベルの違いも吸収するという効果がある。こうしてダイナミックスペクトル表示上でのバックグラウンドレベルが整った濃さとなるため見やすい表示となる（第11図）。

ダイナミックスペクトル表示を見やすくするには以上



第12図 HiRASにおけるダイナミックスペクトル表示までの処理フローチャート。

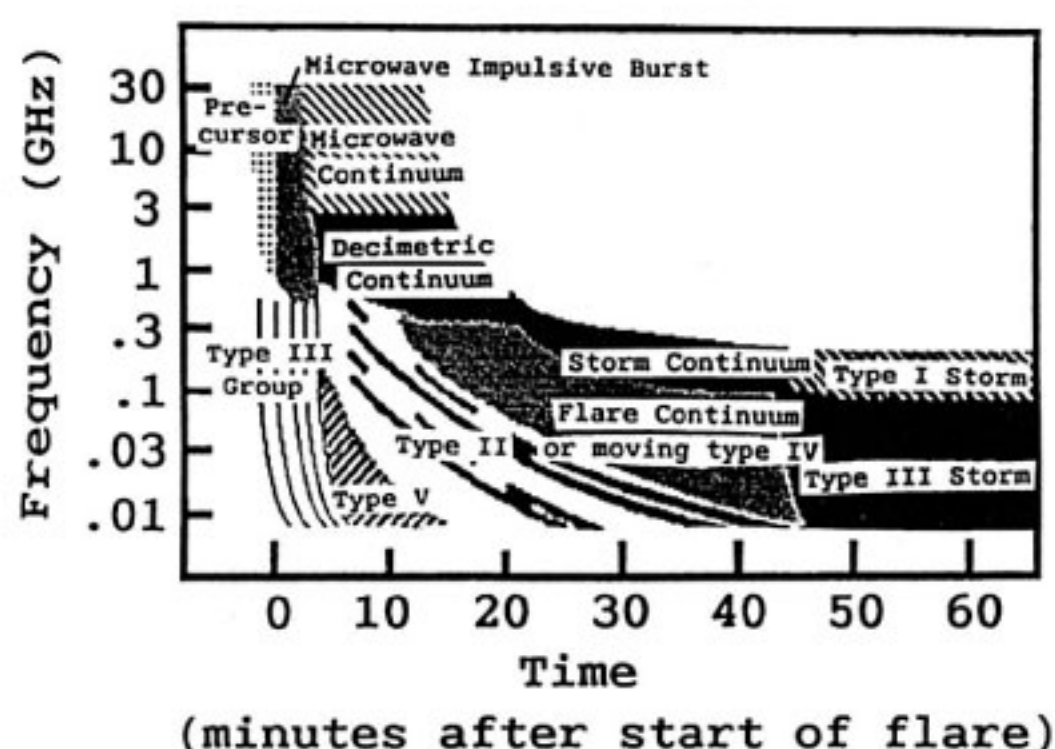
述べたようなデータ収集後の処理も重要であるが、観測時のスペクトルアナライザの設定も重要である。低周波側（数100 MHz以下）で、送電線からの放電に起因すると思われる電源周波数に同期したパルス状のノイズが多発する場合がある（気象条件で左右され、夏場の多湿時、特に海からの風が吹く場合にこのノイズの発生が多くなる）。こうしたパルス状のノイズはスペクトルアナライザの設定によってある程度軽減（目立たなく）することが可能である。試行錯誤の結果掃引時間を0.5秒/掃引、トリガーモードをフリーラン、検出器のモードをサンプルモードとすることによりパルス状ノイズを目立たなくすることができた。ここでノイズの軽減に最も貢献をしているのが検出器のモードであった。通常のスペクトラムアナライザの検出器には正ピーク検出モード（ある時間内での最大値を検出するモード）とサンプルモード（瞬時値の検出）があるが、電源ONで設定されるのは通常正ピーク検出モードである。

以上のデータ処理フローを第12図にまとめておく。

2.7 観測例

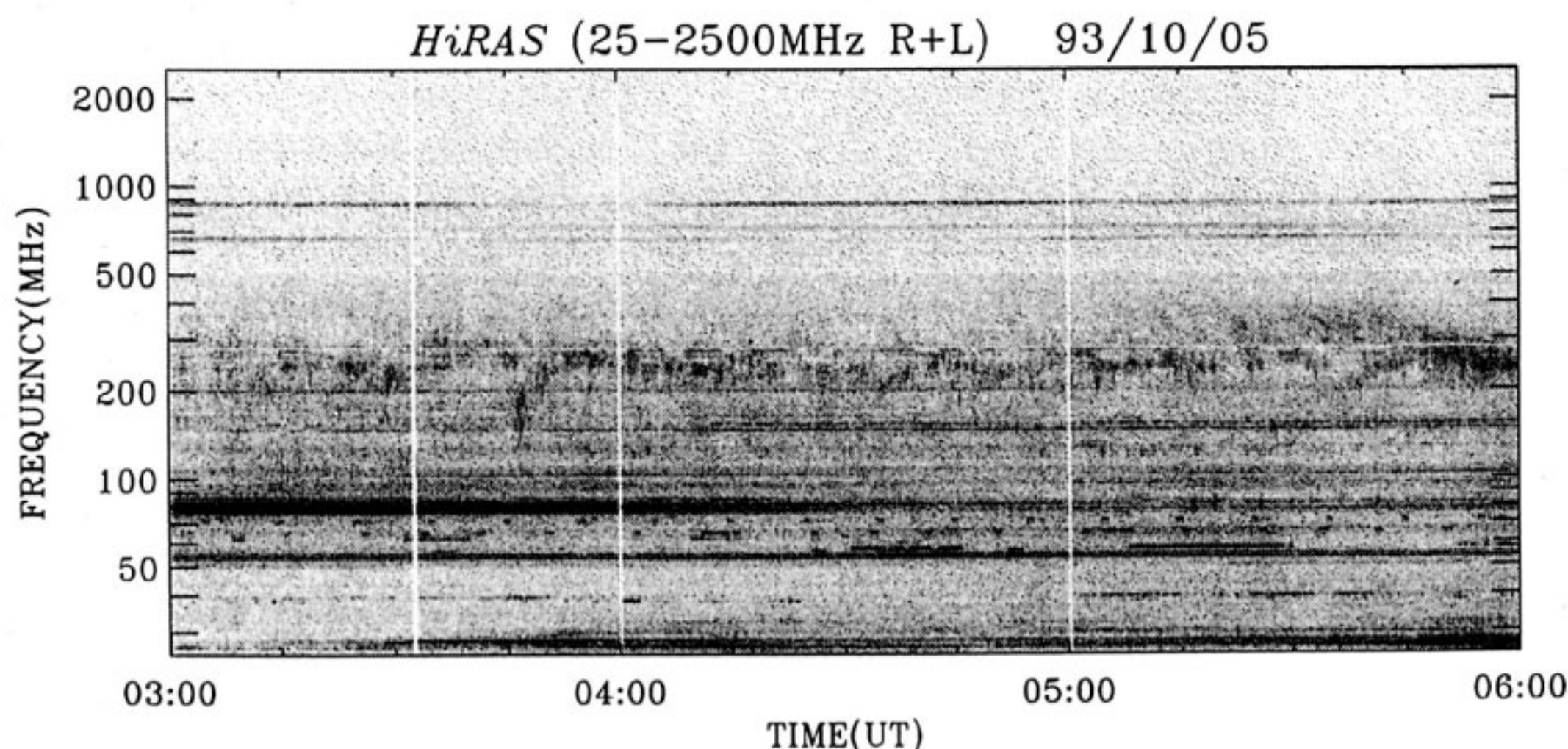
1993年5月末からHiRASの定常観測を行っている。太陽電波現象はI型バーストからV型バーストまでの5種類に大きく分類されている(第13図)⁽²⁾。現在までのHiRASの観測でそれぞれの型に相当する現象が観測されている。

1993年10月5日に観測されたI型バーストの例を第14図に示す。この観測例では100 MHzから300 MHzにかけて出現しているのがI型バーストである。I型放射は狭帯域で数秒程度の時間構造を持ったバースト群で

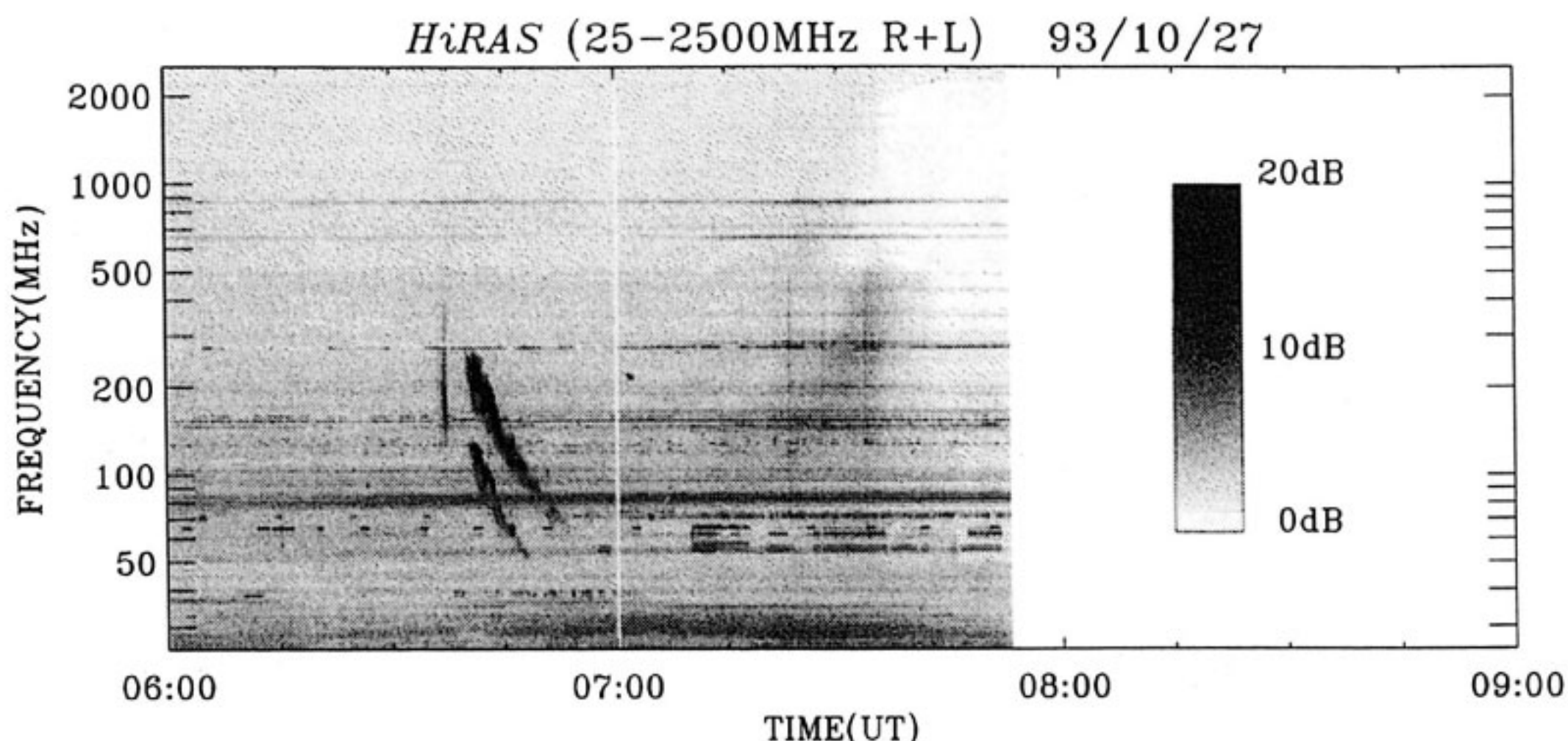


第13図 太陽面爆発現象に伴う電波現象 (Cary [1990]⁽²⁾の図を編集)。大きなフレアの場合まずⅢ型バーストが発生し、低周波側にV型バーストが現れる。引き続きⅡ型バーストが現れその後にⅣ型バーストが続く。Ⅰ型バーストやⅢ型バースト群(ストーム)は活動的な黒点群がある場合に観測される。

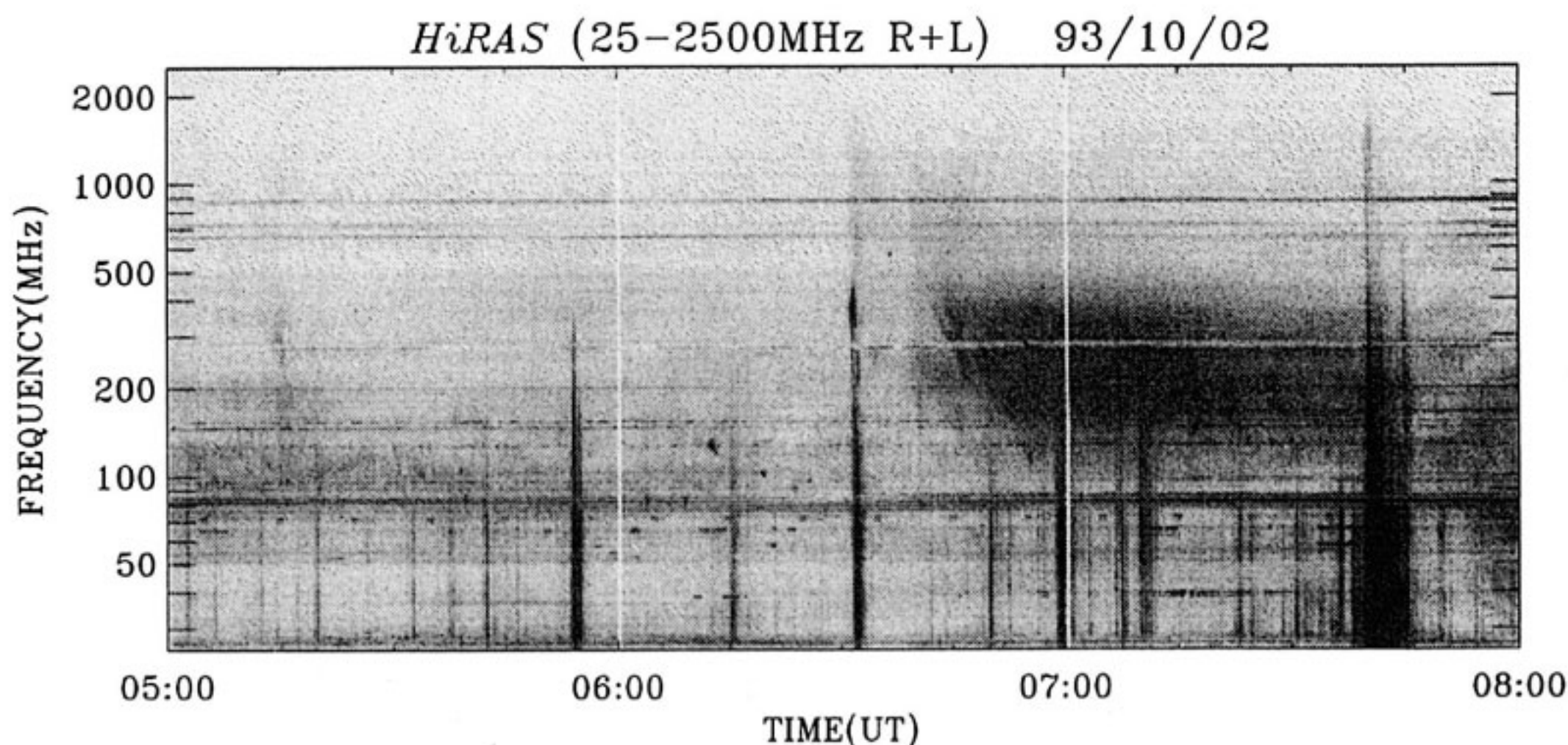
あるが、HiRASのダイナミックスペクトル上では“チリチリ”状あるいは“モヤモヤ”状のスペクトルとして観測される。Ⅰ型バーストは活動的な黒点が出現したときに起こり、数時間から数日にわたって出現することがある。発生メカニズムは諸説あったが現在は偏波特性などから活動的な黒点に凝集する磁力管内でのプラズマ波起源と考えられている。第15図(1993年10月27日の観測)にはⅡ型バーストとⅢ型バーストが見られる。6:38 UTに見られるスパイク状の現象がⅢ型バーストで6:40 UTからスタートするゆるやかな負の周波数ドリフト($< 1 \text{ MHz/s}$)構造を示す2本の筋がⅡ型バーストである。2本の筋は基本波とその高調波の関係になっている。Ⅲ型バーストも負の周波数ドリフト構造を持っているが、ドリフト率が多い($\sim 100 \text{ MHz/s}$)ためHiRASのスペクトル表示上ではスパイク状にしか見えない。なお7:00 UTから7:40 UTごろにかけて日没時の地面との反射による干渉縞が見られる(ゆるやかな正の周波数ドリフト構造)。Ⅱ型、Ⅲ型バースト共プラズマ波起源であるが、Ⅱ型バーストの元となるプラズマ波の発生はフレアに伴うショックフロントでの電子の加速が原因と考えられている。Ⅲ型バーストの起源は100 keV程度の高速度電子流が励起するプラズマ波である。Ⅲ型バーストが頻発している例を第16図(1993年10月2日に観測)に示す。この例では頻発するⅢ型バーストに混じってⅣ型放射も観測されている。6:45 UT頃から観測される100~500 MHzにおける連続的なレベル上昇がⅣ型である。ここに示されているⅣ型バース



第14図 I型バーストの観測例(1993年10月5日観測)。100 MHzから300 MHzにかけて“チリチリ”あるいは“モヤモヤ”状に出現しているのがI型バーストである。レベルのスケールは第15図に表示しているがバックグラウンドを差し引いたレベルである。



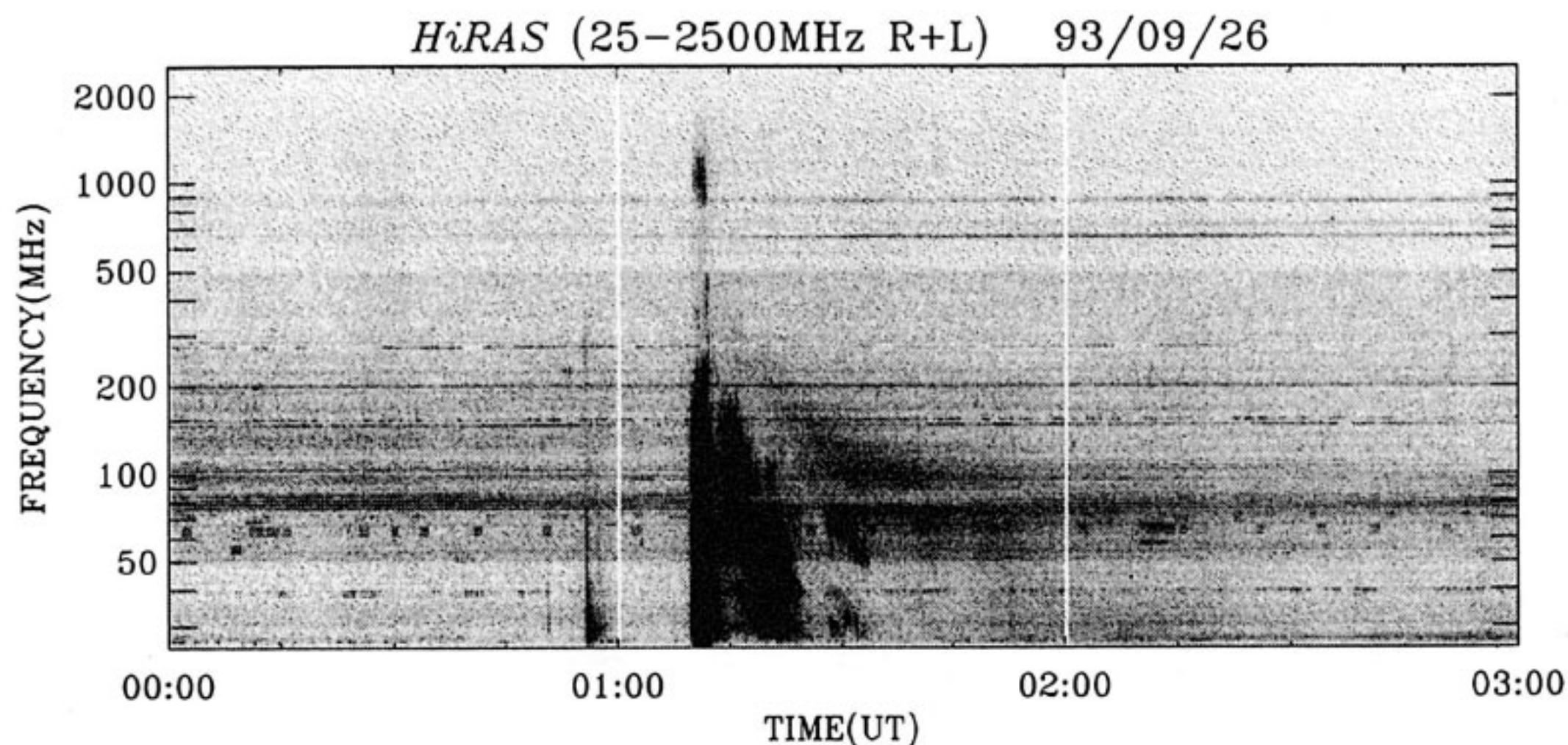
第15図 II型とIII型バーストの観測例（1993年10月27日観測）。6：38 UTにIII型バーストが発生し、6：40 UTからII型バーストが始まっている。III型バーストは周波数ドリフトが大きい（ ~ 100 MHz/s）ため、スパイク状にしか見えない。II型バーストはゆるやかな負の周波数ドリフト（ < 1 MHz/s）を示す2本の筋として特徴づけられる。7：00 UTごろから始まる正の周波数ドリフトを示す縞模様は日没時の干渉縞である。



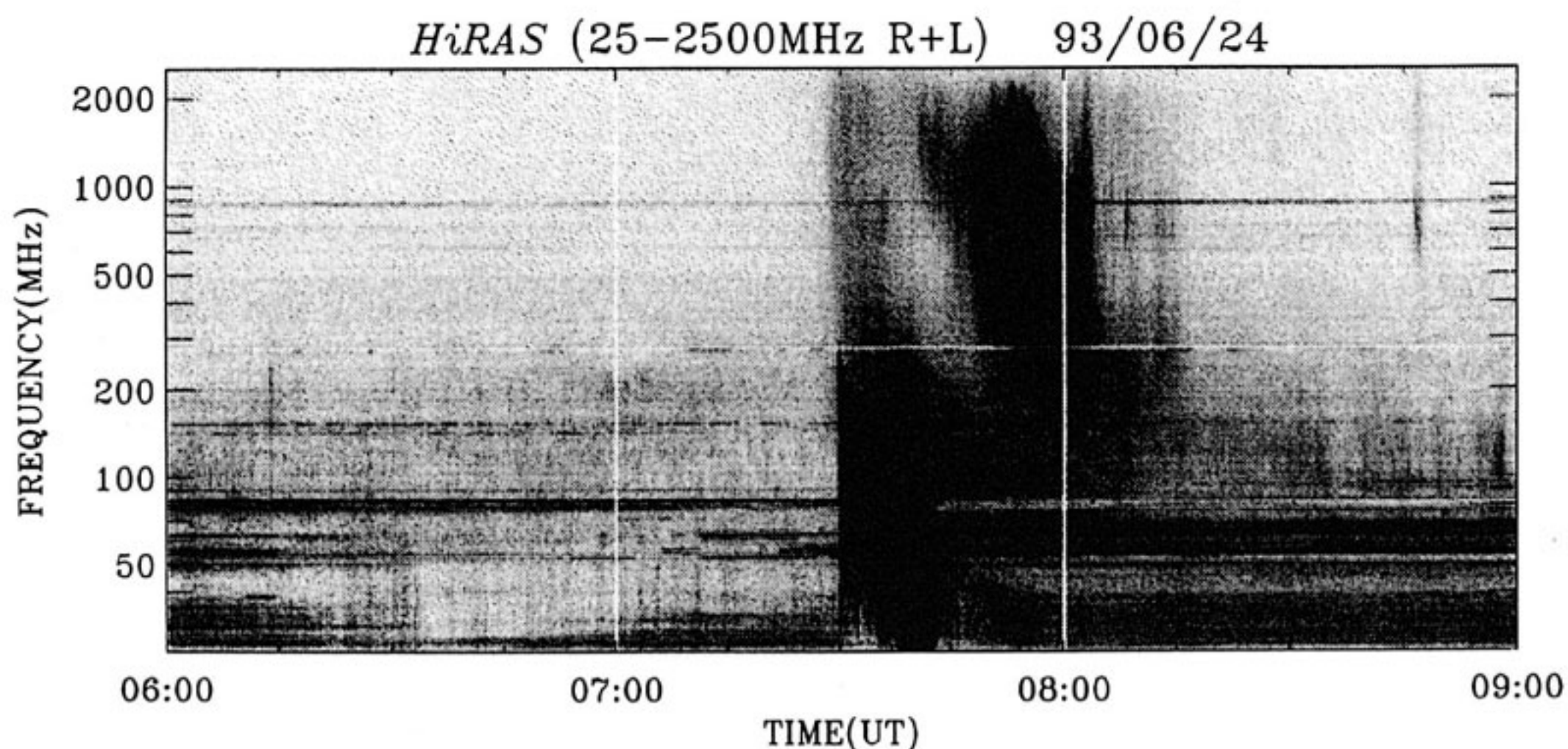
第16図 III型とIV型バーストの観測例（1993年10月2日観測）。スパイク状に見えるのが頻発しているIII型バースト。6：45 UT頃から100～500 MHzで見られる連続的なレベル上昇がIV型バーストである。レベルのスケールは第15図と同じ。

トは周波数ドリフト構造が見られなくフレア域に固定された領域から発生していると考えられる。こうしたIV型バーストとは別にII型バーストが発生した後、ゆるやかな負の周波数ドリフト構造を持つIV型バーストが観測されることがある（第17図）。いずれも磁場に捕捉された

高速電子群からのジャイロシンクロトロン放射と考えられているが後者ではプラズマ波起源の放射も含まれているようである⁽³⁾。第17図の例（1993年9月26日）ではI型バースト以外のすべてが観測されている。1：10 UTにフレアに伴うIII型バーストが発生しているが、低



第17図 II, III, IV, V型バーストの観測例 (1993年9月26日観測)。この例ではI型以外の現象がすべて見られる。1:10 UTにフレアに伴うIII型バーストが発生しているが、低周波側で裾野が広がって見える部分がV型バーストである。その後、1:15 UTにII型バーストがスタートしている。1:20 UTころから100 MHz付近を中心として弱いIV型が始まっている。レベルのスケールは第15図と同じ。



第18図 強い太陽電波放射観測例 (1993年6月24日観測)。NOAA領域#7529で発生したM9.7/2Bフレアに伴う電波現象。7:30 UTから7:45 UTにかけてII型バースト (100 MHzから25 MHzにかけてドリフトする放射とその高調波関係で200 MHzから50 MHzへとドリフトする放射)が発生しその後7:45 UTごろからIV型に分類される電波放射が観測されている。もっとも強度の強い所ではバックグラウンド太陽レベルの1万倍 (40 dB) を越えている。レベルのスケールは第15図と同じ。

周波側で少し広がっている部分がV型バーストである(V型バーストは当初シンクロトロン放射と考えられていたがその後プラズマ波(の高調波)起源が有力と考えられている)。その後、1:15 UTにII型バーストがスタートしている。1:20 UTころから100 MHz付近を中心として弱いIV型が始まっている。

HiRASが定常観測を開始して1993年12月10日現在までに観測された現象の内もっとも大きな現象は、6月24日にNOAA領域#7529で発生したM9.7/2Bフレアに伴う電波現象であった(第18図)。7:30 UTから7:45 UTにかけてII型バースト(100 MHzから25 MHzにかけてドリフトする放射とその高調波関係で200 MHzから50 MHzへとドリフトする放射)が発生しその後7:45 UTごろからIV型バーストに分類される電波放射が観測されている。もっとも強度の強い所ではバックグラウンド太陽レベルの1万倍(40 dB)を越えている。

2.8 II型バーストとショック速度

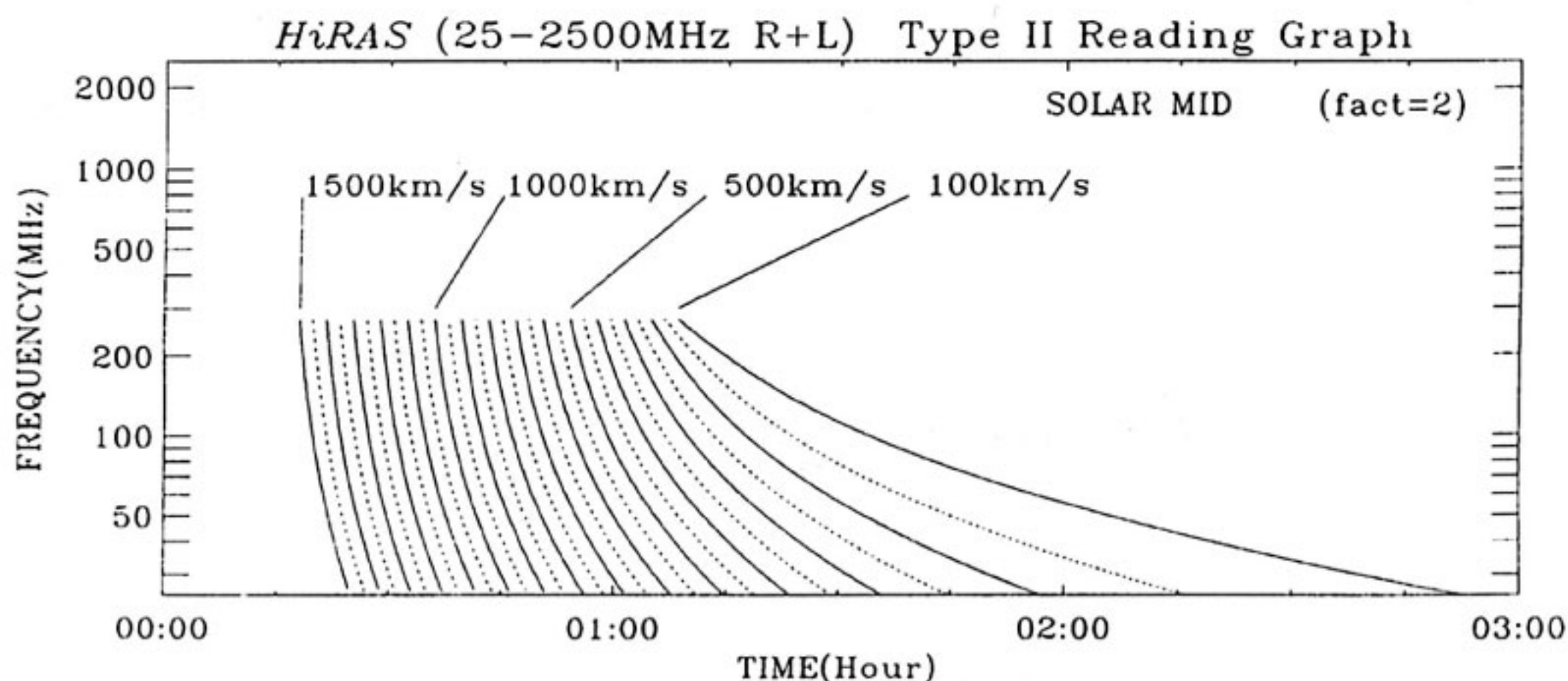
II型バーストに伴ってIV型バーストが観測されるとフレアに伴ってプラズマ雲が放出されたことを示しており、数日後に地磁気擾乱の発生する可能性が高くなる。したがってフレアに伴う地磁気擾乱を予報するためにはII型バーストおよびIV型バーストの発生の監視とフレアに伴うショック速度の推定が重要である。II型バーストの基本波の周波数はショックフロントでのプラズマ周波数と考えられることから(例えば文献(3)など)、太陽コロナ中の高度に対する電子密度分布が分かっているれば周波数の時間変化からショックの速度を以下のように見積もる

ことができる。

太陽表面からある速度 v でショックが上方へ伝播していくと考えると、時間 t 後には高度 $h (= vt)$ にショックが到達する。電子密度の高度に対するプロファイルが与えられれば時間 t 後にショックが到達した高度での電子密度 n を求めることができる。電子密度からプラズマ周波数を求めると、つまり周波数の時間変化を求めることができる。太陽活動極小期のコロナの電子密度モデルとしてはBaumbach-Allenモデル⁽⁴⁾とSaitoモデル⁽⁵⁾がある。Baumbach-Allenモデルは球対称な電子密度分布モデルであり、太陽中心からの距離のみの関数として電子密度分布が与えられている。Saitoモデルでは電子密度分布が太陽中心からの距離と太陽面緯度での関数として与えられている。緯度 0° ではBaumbach-Allenモデルとほぼ等しくなる。太陽表面の活動領域に関する情報を取り込んだモデルとしてNewkirkモデル⁽⁶⁾がある。

平磯では緯度効果も含めた拡張性とモデルの単純さを考えてSaitoモデルを使用してのII型バースト時のショック速度推定を開始した。Saitoモデルは極小期でのコロナ電子密度であるため太陽活動度による変化を取り入れるためにファクターを乗じた(1)式を電子密度の計算に用いることにした。

$$n(r, \phi) = F \times \left[\frac{3.09 \times 10^8}{r^{16}} (1 - 0.5 \sin \phi) + \frac{1.58 \times 10^8}{r^6} (1 - 0.95 \sin \phi) \right]$$



第19図 周波数対時間曲線。種々のショック速度に対して、時間に対する周波数の変化をプロットしている。II型バーストの周波数時間変化に最もフィットする曲線を選ぶことによりショック速度を読み取ることができる。

$$+ \frac{2.51 \times 10^6}{r^{2.5}} (1 - \sin^{0.5} \phi) \quad (\text{cm}^{-3}) \quad \dots\dots(1)$$

ここで r : 太陽中心からの距離 (太陽半径単位)

ϕ : 太陽面緯度

F : ファクター

(極小期 1, 極大期 4~10)

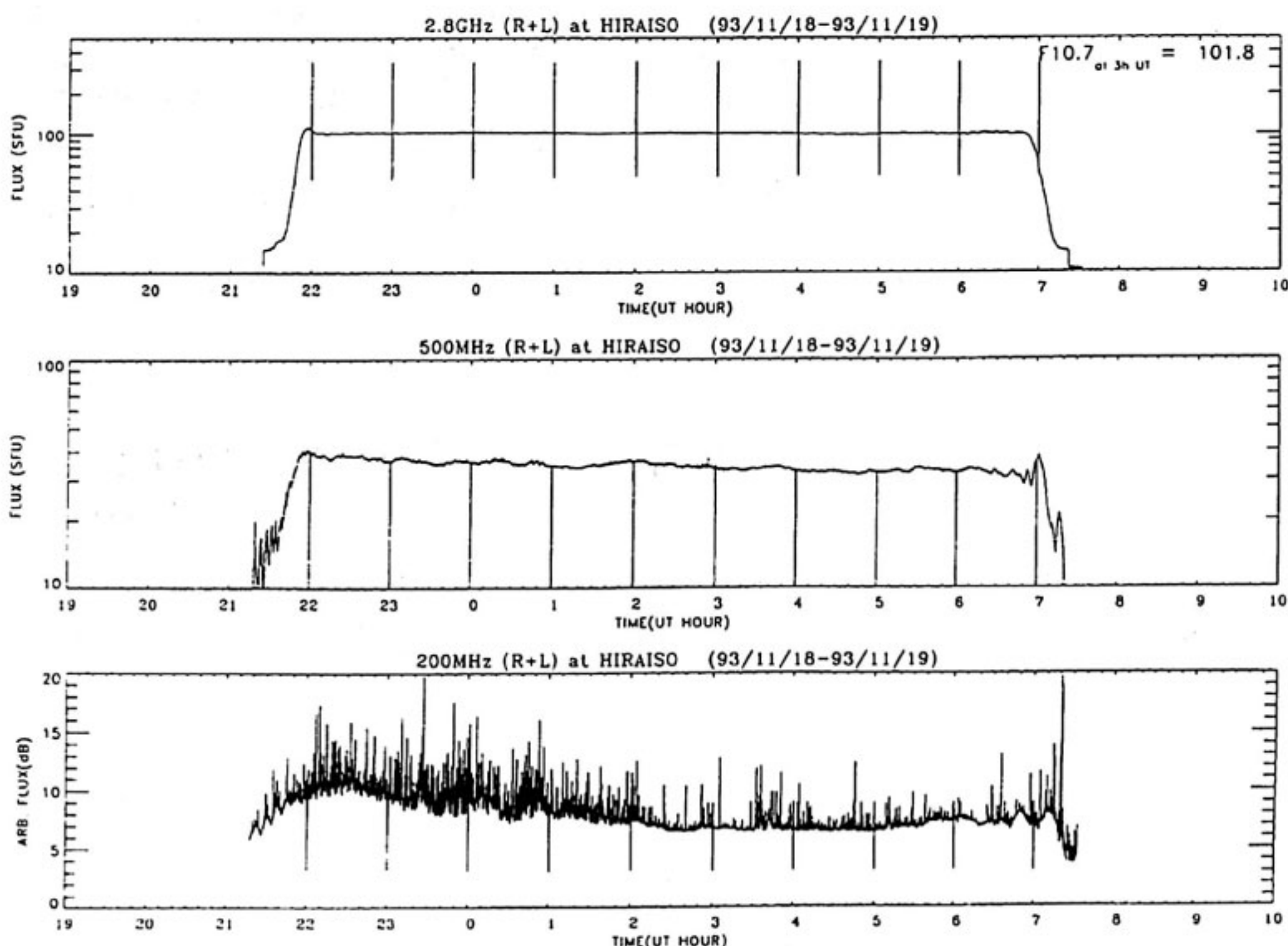
ファクターは太陽活動度に応じて考慮されるべき値であるが、ここでは便宜的に2とした。さらに、緯度も 0° とした。実際に用いるべきファクターおよび緯度は今後の検討課題である。ショック速度を仮定することにより(1)式を用いてショック到達点での電子密度を計算し、さらにプラズマ周波数 ($\approx 9\sqrt{n}$ kHz) を計算することにより時間に対する周波数の変化 (周波数-時間曲線) を求めることができる。第19図に様々なショック速度に対する周波数-時間曲線を示すが、このスケールをII型バーストに重ねて最も現象とフィットする曲線を選ぶことによりショック速度を読み取ることができる。

3. 固定周波観測システム

平磯で現在行っている固定周波観測の周波数は200 MHz, 500 MHz および 2800 MHz である。200, 500 MHz は HiRAS と共通のアンテナを使用しているが、スペクトル計より高感度の観測を行うために専用の受信機 (固定周波偏波計) を使用している。2800 MHz システムは HiRAS とは独立のシステムである。これらの固定周波観測データはペンレコーダで記録するほか、1秒毎にサンプリングされデジタルデータとしてワークステーション (HP 9000/350) のハードディスクに蓄積される。

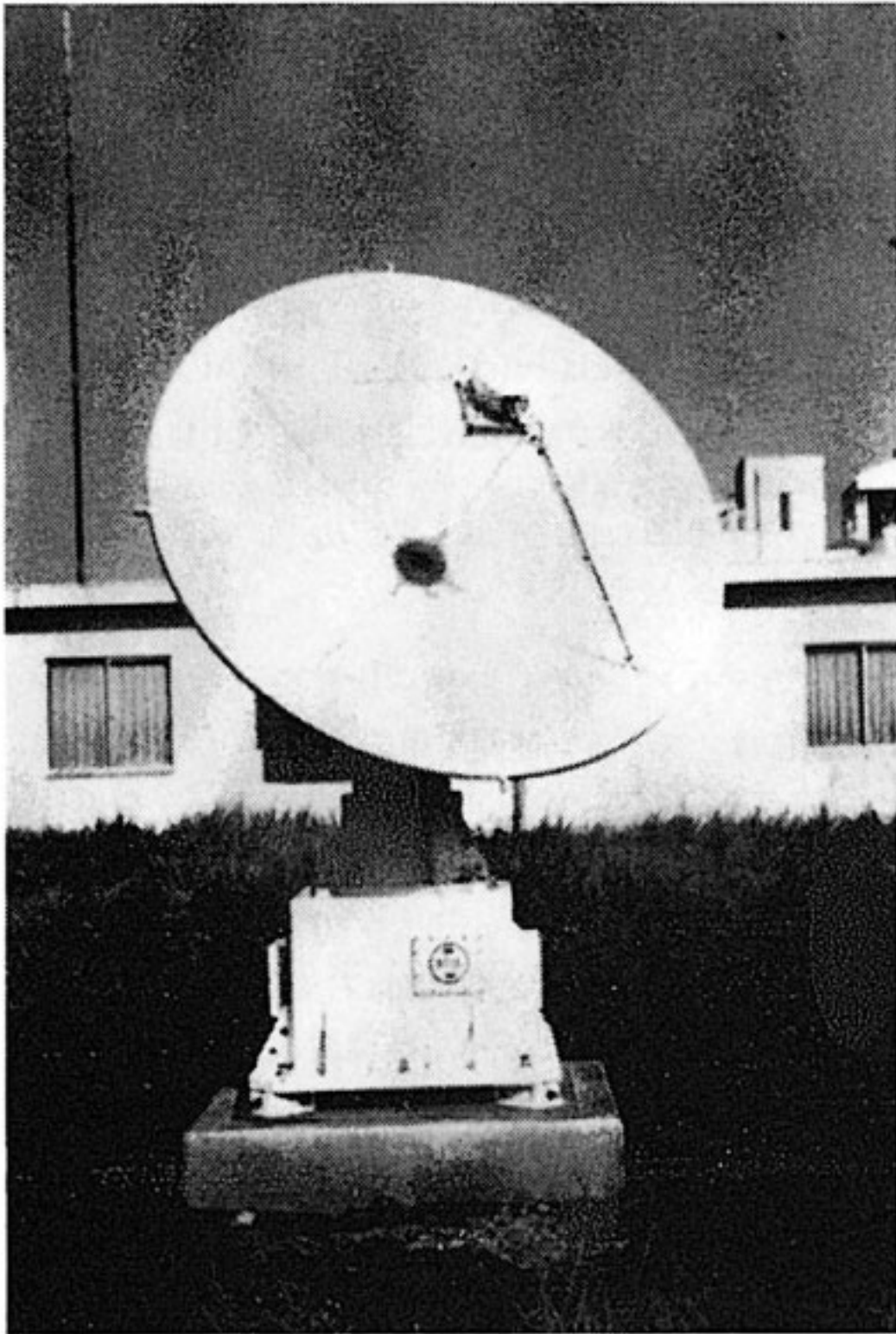
3.1 200 MHz および 500 MHz 偏波計

HiRAS-2 および HiRAS-3 アンテナで受信した信号を分配し、それぞれ 200 MHz および 500 MHz の固定周波偏波計の入力としている。観測例を第20図に示す。500 MHz の受信強度はアンテナゲインの推定値を使用した値である。200 MHz のデータは近くの送電線から



第20図 固定周波数での観測例 (1993年11月18日から19日に観測)。図は上から2800 MHz, 500 MHz, 200 MHzでの観測を表す。毎正時に受信器入力に校正信号 (ノイズダイオードおよび特性インピーダンスでの終端) に接続されるが、図中では縦線となっている。200 MHzに見られるスパイク状の現象は固定周波で見た場合のI型放射である。

の放電性のノイズに起因するとみられる混信を受けることが多いが、活動的な黒点群が出現したときに放射されるI型のモニターには有効であることが示されつつある。第20図で200 MHzデータにおいて特に22時UTから2時UTにかけてスパイク状にみられるのが固定周波で見たI型バーストである。



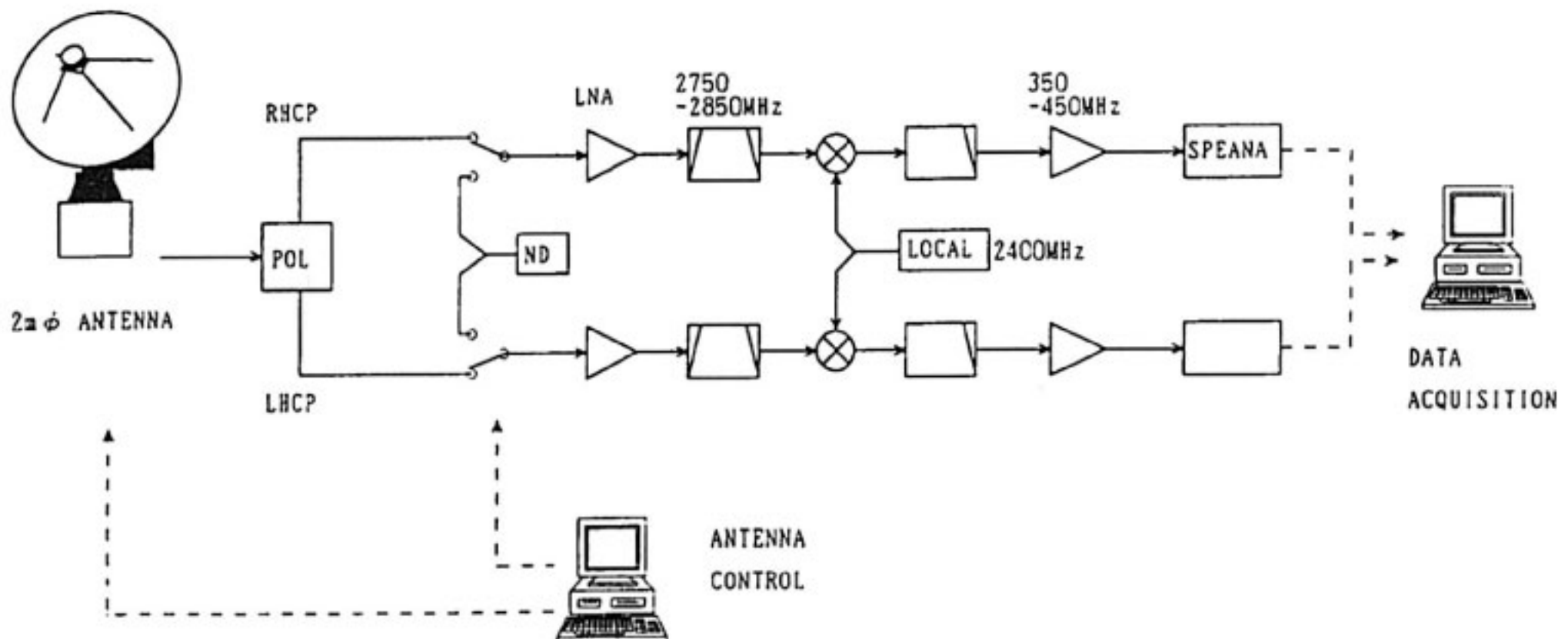
第21図 2800 MHz 受信用 2 m アンテナ。

3.2 2800 MHz 偏波計

1992年10月に2800 MHz 受信用の直径2 mのパラボラアンテナが設置された(第21図)。架台はAZ-EL架台で制御インターフェースはGP-IBである。主ビーム幅は 3.5° (実測値)である。太陽追尾はHiRASのアンテナ群と同様に実時間での太陽軌道計算で行っており、追尾精度は 0.1° である。なお、観測は全自動で行われ、受信器の較正のため1時間毎に雑音信号源からの信号が入力される。1次放射器としてセプタム型の偏波分離器(ポラライザ)を使用し、直接左旋および右旋円偏波成分に分離している。システムブロック図を第22図に示すが、最終的な受信部として2台のスペクトラムアナライザ(アドバンテスト R4131D)をゼロスパンモード、帯域幅1 MHzで使用している。当初フロントエンド部は主焦点部に設置されていたが、温度変動の影響を軽減させるためポラライザのみを残して主鏡背面部に移動した(1993年10月に実施)。

デシメータ波やセンチメータ波帯での太陽電波強度は黒点相対数と良い相関があることが知られている(例えば文献(7))。特に2800 MHzでの強度は太陽活動度を表す重要な指標(F10.7)となっており、カナダのペンティクトンで測られた値がNOAA(米国海洋大気局)に報告され、太陽地球物理データ(Solar Geophysical Data)として全世界に公表されている。

受信電波強度を求めるためにはアンテナの開口効率、フィードでの損失を正確に求める必要がある。現在、ゲイン既知の標準ホーンアンテナを使ってアンテナの開口効率を求めるためのシステム整備を行っているが、暫定的にカナダのペンティクトン観測所で行っている2800 MHzでの観測値と比較することにより平磯のシステムを較正した。2800 MHz システムの入力信号は1時間毎



第22図 2800 MHz 受信システムブロック図。

にホットロード（ノイズダイオード）とコールドロード（入力部を特性インピーダンスで終端）に接続される。それぞれの雑音温度を T_H , T_0 （=環境温度）とすると、Y-factor 法（例えば文献(8)）により受信器入力部での太陽電波強度をアンテナ等価温度 T_a として以下のように求めることができる。

$$T_a = \frac{T_H(1-Y_2) + T_0(Y_1-1)}{Y_1-Y_2} \quad \dots\dots(2)$$

ただし $Y_1 = P_H / P_0$

$Y_2 = P_0 / P_a$

ここで P_H : 入力ホットロード接続時の受信器出力

P_0 : 入力コールドロード接続時の受信器出力

P_a : アンテナ接続（太陽受信）時の受信器出力

また太陽からの放射のフラックス密度を S_ν とするとアンテナ温度 T_a は下式のように表せる⁽⁹⁾。なお、2.8 GHz での銀河電波強度は太陽に比べて小さいので省略した。

$$T_a = \frac{\eta}{2k} \cdot \frac{\pi}{4} D^2 S_\nu e^{-\tau} + T_{atm}(1-e^{-\tau}) \quad \dots\dots(3)$$

ここで

η : アンテナ開口能率（フィード損失も含む）

k : ボルツマン定数

($= 1.38 \times 10^{-23}$ W/Hz)

D : アンテナ直径

τ : アンテナビーム方向の地球大気の光学的厚さ

T_{atm} : 大気の輝度温度

と表される。(3)式を S_ν について解くと、

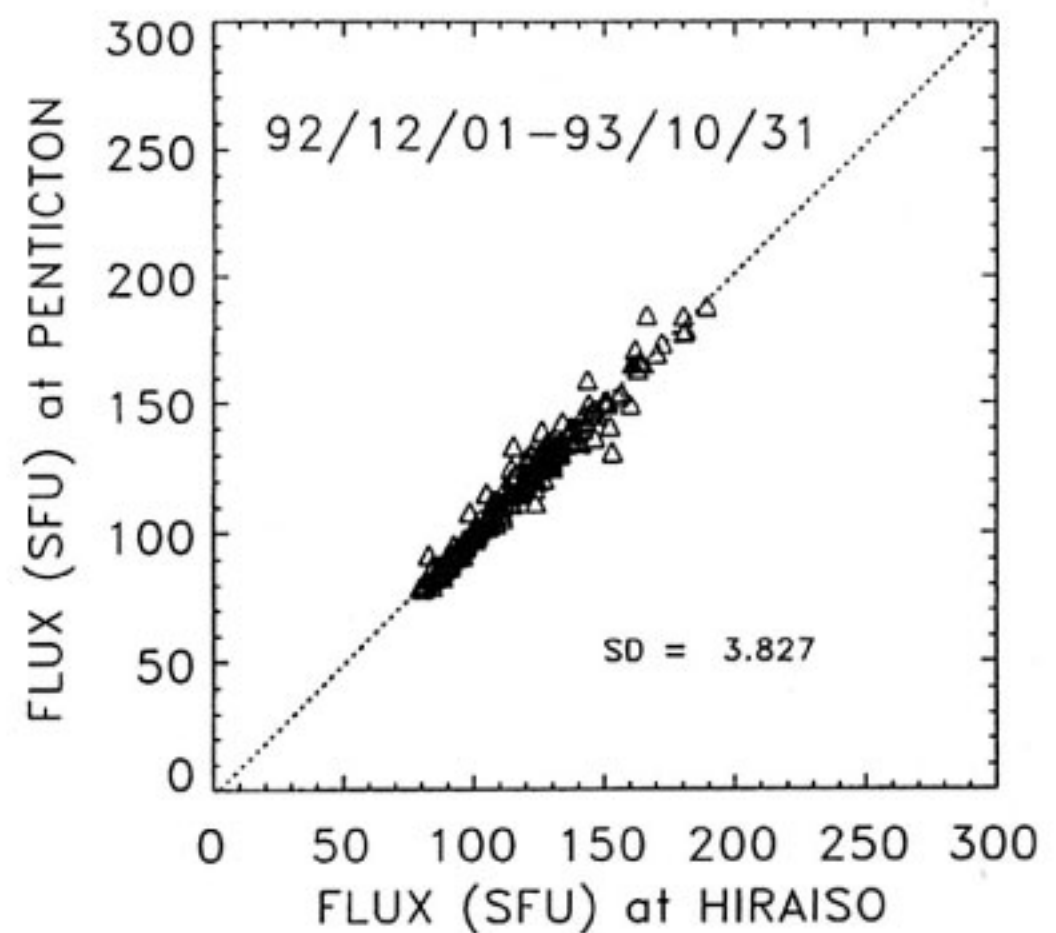
$$S_\nu = A \cdot T_a + B \quad \dots\dots(4)$$

ここで

$$A = \frac{8k\eta e^{-\tau}}{\pi D^2}$$

$$B = -A \cdot T_{atm}(1-e^{-\tau})$$

ところで(3)式で $\exp(-\tau)$ および第2項は大気の影響を表しているが、実観測データから受信レベルの仰角依存性はそれほど顕著ではない。そこで、第1次近似として $\exp(-\tau)$ および第2項を定数と考え、平磯で観測されたデータとペンティクトンで観測されている S_ν の比較を行った。平磯のデータについては毎日3時 UT での校正信号を用いて(2)式から T_a を求めた。 T_H は実測値 1450 K を用い、 T_0 は 300 K とした。ペンティクトンで観測されている S_ν は 20 時 UT での値であるため、平磯およびペンティクトン共にデータの内挿を行って 0

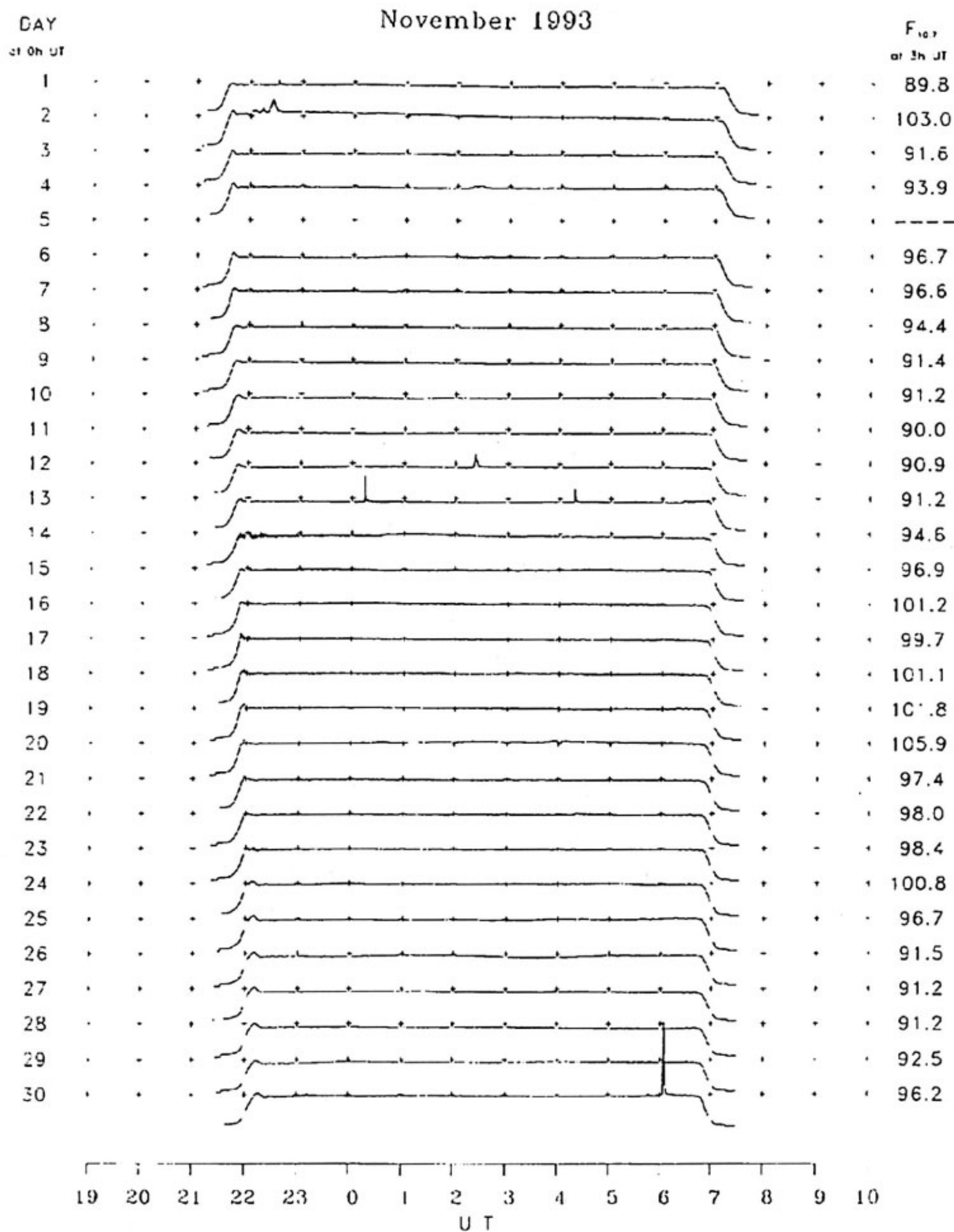


第23図 2800 MHz 観測値の比較。横軸は平磯で観測されたフラックス、縦軸はペンティクトン（カナダ）での観測値で単位は sfu ($= 10^{-22} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$)。両者の差の標準偏差は 3.8 sfu である。

時 UT のデータに変換してから比較を行った。データの内挿にはスプライン補間を用いた。 T_a と S_ν の比較には 1992 年 12 月から 1993 年 6 月までのデータを用い、(4)式の A, B を最小二乗法で決定した。フラックス密度を sfu (solar flux unit $= 10^{-22} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$) で表した場合、求められた A, B は右旋偏波成分から求めた場合 0.16 および -1.2, 左旋偏波成分から求めた場合 0.17 および -4.8 であった。これらの値からフィード部での損失も含んだ開口効率として約 53 % と見積もることができる。1993 年 10 月にフロントエンド部の設置場所変更に伴い新たな A, B を決定したが、右旋偏波成分に関しては 0.26 および -29, 左旋偏波成分に関しては 0.25 および -24 となった。こうして求められた平磯での F10.7 とペンティクトンでの観測値の比較を図 23 に示すが、両者の差の標準偏差は約 4 sfu である。このようにして暫定的ではあるが平磯での太陽電波強度の sfu 単位での表示が可能となった。2800 MHz での観測は月毎のサマリープロット（第 24 図）を作成し、当所で発行している「IONOSPHERIC DATA IN JAPAN（電離層月報）」内で報告を行っている。なお、このプロット作成時には 1 時間毎の校正信号を用いて、温度によるゲイン変動を取り除いている。

4. お わ り に

平磯宇宙環境センターの太陽電波観測システムが一新され、新システムでの観測が順調に立ち上がった。新スペクトル計 HiRAS は 1993 年 5 月末から定常観測を開始したが、データ処理の工夫により信号対雑音比の良い

Summary Plots of $F_{10.7}$ at Hiraïso

Note: A vertical grid space corresponds to a 100 sfu.
Elevation angle range $\geq 6^\circ$.

第24図 サマリープロット (2800 MHz) 例 (1993年11月). 1か月分の観測 (日の出から日没まで) を1枚にプロットしている (11月5日は欠測). アンテナの仰角駆動範囲の制限から仰角 6° 以上で実際の観測が行われている. 縦方向の1日の間隔が100 sfu に相当する. 右欄には平磯での $F_{10.7}$ (3時 UT におけるフラックスの観測値) を表示している.

ダイナミックスペクトル表示が可能となり、太陽電波現象のモニターとして強力な道具となった。スペクトルデータを利用して、太陽面爆発現象に伴う地磁気嵐の予報にとって重要であるⅡ型バースト時のショック速度の推定にも着手したが、信号対雑音比の良いダイナミックスペクトルはこうした推定作業の全自動化への発展を予期させる。

平磯にとって新たな周波数である 2800 MHz での観測は 1992 年 12 月にスタートした。この周波数での観測はフレアの発生のモニターに適しているばかりでなく、太陽活動度を表す指標 (F10.7) としても重要である。他局の観測値と整合するように暫定的にアンテナゲイン等のシステム常数を決定したが、現在、絶対値校正を行うためのシステム整備を行っている。この整備が完了次第、絶対値校正に着手する予定である。

平磯では太陽電波観測装置の他に高性能な太陽光学観測装置 (H。望遠鏡, 磁場望遠鏡) の整備が進められており、世界一級の観測データを生み出しつつある。電波から光までの高性能太陽観測装置が整備されている観測所は世界でも希有であり、今後こうした特徴を生かした研究の発展が期待される。

謝 辞

今回の太陽電波観測システムの大幅な更新を期限付きの極めて短期間で実現できたのは所内総務部, 企画調査部 (現企画部), 平磯宇宙環境センターの方々を始めとして、直接製作に携わった日本通信機株式会社および株式会社東陽テクニカの関係諸氏の多大なる協力のおかげである。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 亘, 磯崎, 大部, 富田, 磯辺, 丸橋, 石嶺
“70~500 MHz 帯太陽電波ダイナミックスペクトル計”,
通信総研季, 35, 175, pp.201-309, 1989.
- (2) Gary, D.E., “Radio Observations During
Max'91 Campaign 1”, MAX'91 Workshop #3:
Max'91/SMM Solar Flares: Observations and
Theory, Colorado, pp.1-10, 1990.
- (3) McLean and N.R.Labrum, Solar
Radiophysics, Cambridge University Press,
1985.
- (4) Allen, C.W., “Interpretation of electron den-
sities from corona brightness”, Mon. Not.
R.Astron. Soc., 107, pp.426, 1947.
- (5) Saito, K., “A non-spherical axisymmetric
model of the solar K corona of the minimum
type”, Ann. Tokyo Astron. Obs., Ser.2,
Vol.12, pp.53-120, 1970.
- (6) Newkirk, G., “The solar corona in active re-
gions and the thermal origin of the slowly
varying component of solar radio radiation”,
Astrophys. J., 133, pp.983-1013, 1961.
- (7) Kundu, M.R., Solar Radio Astronomy, pp.
146-194, Interscience Publishers, New York,
1965.
- (8) 川橋猛, 衛星通信, pp.166-169, コロナ社, 1976年.
- (9) 赤羽, 海部, 田原, 宇宙電波天文学, 共立出版,
1988年.

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