

西はりま天文台における低周波電波観測

前田 耕一郎
兵庫医科大学物理学教室

Low Frequency Radio Observations at Nishi-Harima Astronomical Observatory

Koiti Maeda
Department of Physics, Hyogo College of Medicine, Nishinomiya, Hyogo 663

Abstract

We initiated low frequency radio observations at Nishi-Harima Astronomical Observatory in 1992. Test observations at about 22, 30, and 50 MHz were made with a conical log-spiral antenna, a half-wave dipole, and a 5 element Yagi, respectively. In the test observations we identified the galactic background radiation, some Jovian decametric noise storms, solar radio bursts, and flare-associated ionospheric absorption events. We also obtained information on some characteristics of the interference at Nishi-Harima Astronomical Observatory.

Key words: Radio Observations; Low Frequency.

1. はじめに

兵庫医科大学物理学教室では、三重県柘植町にアンテナを設置し、低周波数で電波観測を行って来た。柘植町では、木星電波（デカメータ波）の専門的な観測（前田，1987）及び電波天文学普及のために考案された簡単な電波望遠鏡のテスト（前田，1989，1990）が行われた。1991年末に柘植町の観測用地が使用できなくなり観測を中断していたが、西はりま天文台の協力の基に、1992年3月より柘植町の観測設備を西はりま天文台公園内に移して観測を再開した。西はりま天文台は大撫山の山頂にあり、アンテナ設置に使用できる土地は必ずしも広くはない。木星電波観測用として必用最小限のアンテナを設置するとともに、電波天文学

の普及・教育に役立てるために、いくつかのタイプのアンテナを設置した。本論文では、現在までに設置したアンテナや機器類の概要について述べるとともに、これまでにを行ったテスト観測の結果について報告する。

2. アンテナ

次の4タイプのアンテナを設置した。いずれもビームの半値幅が数10度以上で、分解能の低いアンテナである。

a) 30 MHz用の半波長ダイポールアンテナ（図1 a）

アルミパイプにより自作したものである。地上1/4波長の高さに設置することに

より、指向性を上方に向けている。銀河電波（銀河背景放射）や太陽電波バーストの観測に使用される。

b) 50MHz用の5素子八木アンテナ（図1b）

ナガラアンテナSS-569である。天頂に向けて設置されており、銀河電波及び太陽電波バーストの検出に使用される。

c) 430MHz, 1200MHz用のパラボラアンテナ（図1c）

コメット・アンテナCPA-7300である。給電部は430MHzと1.2GHzの2バンドで使用できるように設計されている。1.2GHz帯のテストはまだ行われていないが、430MHz帯ではプリアンプと組み合わせることにより、銀河電波、太陽コ

ロナからの電波、太陽電波バーストが受信できることが確かめられている。

d) コニカル・ログ・スパイラル・アンテナ（図1d）

広帯域アンテナ（使用可能周波数は18-70MHz）であり、各周波数で反射板付ダイポールと同程度のアンテナ・ゲインを持つ。中央にグラスファイバーのポール（グラスファイバー工研のデベポール4本を接続）を立て、8本の支え用のロープ（グラスファイバー工研の直径5mmのデベグラスロープ）により円錐面を近似している。コニカル・ログ・スパイラル・アンテナは円錐面に2本の帯状導体を巻き付けて構成する。各帯状導体は3本の細い同軸ケーブル（1.5C-QEVの外部網状導体を利用）により近似されている。木星電波の場合、通常右回り偏

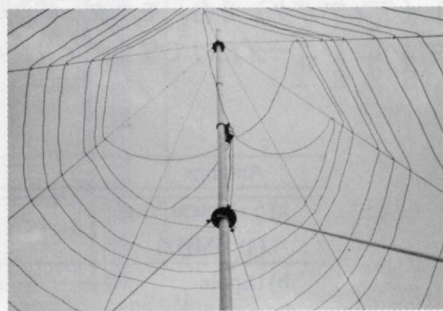
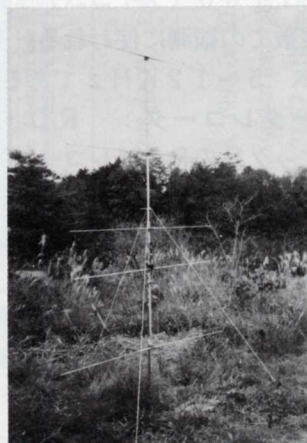
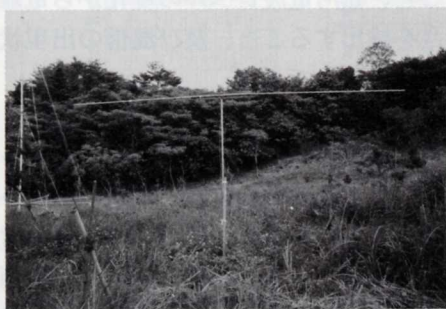


Fig.1 Antennas we built at Nishi-Harima Astronomical Observatory. a) half-wave dipole, b) 5 element Yagi, c) parabolicreflector antenna(1.2m in diameter), d) conical log-spiral antenna.

波が卓越しているので、アンテナは右回り偏波成分に感度を持つように作られている。図1dはアンテナ円錐の内部より撮影されたものである。このタイプのアンテナは3本設置されており、組み合わせて使用することによりビーム方向をある程度変えることができる。木星電波観測及び太陽電波バーストのダイナミック・スペクトラムの観測に使用される。

3. 主な測定機器類

a) スペクトラム・アナライザー: MS 62 A (アンリツ)。電波の受信状況を広帯域で把握する際に使用する。また、ダイナミック・スペクトラムの観測に使用することができる。

b) 通信型受信機: FR 101 (八重洲無線) 2台、NRD 525 (日本無線) 2台、IC-R 7100 (アイコム) 1台があり、固定周波数での観測に使われる。受信機の帯域幅は2.5~12 KHzである。

c) データレコーダ: RD-111T (ティアック社のPCMレコーダ)。8チャンネルあり、2時間のデータを記録することができる。主に木星電波の強度変動を多周波数で観測する際に使用される。

d) ペンレコーダ: R-304V (理化電機)。4ペンの記録計でモニター観測の記録をとるのに使用される。

e) デジタル・データレコーダ: DR-F1 (ティアック) 2台。モニター観測のデータはペンレコーダだけでなくデジタル・

データレコーダによってフロッピーディスクにも記録される。1 Hzでサンプリングする場合、フロッピーディスク1枚に約1週間分のデータが記録できる。ペンレコーダによる記録において現象を発見した場合、フロッピーディスクのデータを使えば時間変動をより詳しく解析することができる。

f) その他の関連機器: スイープ・ジェネレータ、周波数カウンタ、ノイズ・ブリッジ、プリアンプ、ディップ・メーター、インピーダンス・メーター、ステップ・アッテネータ等があり、アンテナや受信機の調整及びキャリブレーションに使用される。

4. モニター観測

表1のようなモニター観測を行っている。モニター観測の主な目的は、太陽電波バーストや木星電波ストームの発生状況を調べること、銀河電波レベルの変化から電離層の擾乱を検出すること、及び混信の出現状況を調査することである。

図2に21.87 MHz、29.98 MHz、及び49.5 MHzにおけるペンレコーダによる典型的な記録(紙送りスピードは3 cm/h)を示す。図2では、銀河電波、太陽電波バースト、太陽フレア(太陽面での爆発現象)からのX線バーストによる電離層の吸収増加、混信(天体以外からの電波で観測の障害となる電波)等が認められる。

図2の49.5 MHzの記録を見ると、レベルがゆるやかに変化しており、二つのピークが認められる。これが銀河電波強度の日

Table 1.

Antenna	Receiver	Recorder
a) 5 element Yagi (49.5MHz)	NRD525	Pen Recorder
b) Dipole (29.98MHz)	FR101	Pen Recorder Digital Data Recorder
c) Conical Spiral (21.87MHz)	FR101	Pen Recorder Digital Data Recorder

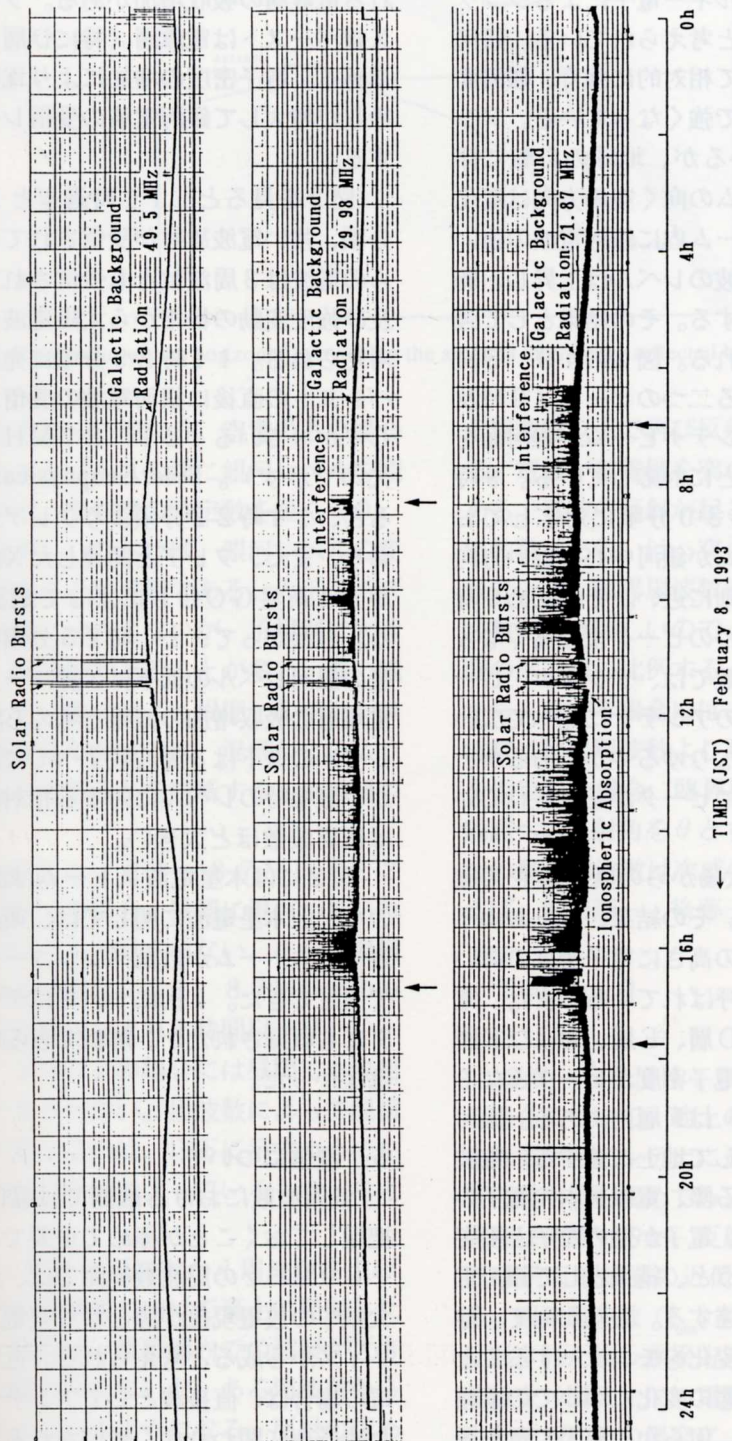


Fig. 2 Monitoring records on February 8, 1993, at 21.87, 29.98, and 49.5 MHz. We can see the galactic background radiation, solar radio bursts, sudden ionospheric absorption due to a solar X ray burst, and interference. Each arrow below the 29.98 and 21.87 MHz records indicates the start or end of the interference occurrence time inferred from an ionospheric critical frequency analysis.

変化のカーブである。銀河電波は我々の銀河内を飛び交う高エネルギー電子によるシンクロトロン放射が成因と考えられている。銀河電波は銀河面に沿って相対的に強く、銀河面でも銀河中心の方向で強くなっている。アンテナは固定されているが、地球の自転に伴い、アンテナ・ビームの向く空の方向は変化する。アンテナ・ビーム内に銀河電波の強い領域が入ると銀河電波のレベルは上昇し、弱い領域が入れば低下する。その結果として強度の日変化が観測される。図2の49.5 MHzの記録に見られる二つのピーク（9時及び20時頃）は、アンテナビームが銀河面を1日に2度横切ることに対応している。9時頃が恒星時で18時30分頃に対応しており、アンテナ・ビームが銀河中心に近い方向で銀河面を横切る時刻に近い。そのため9時頃のピークはもう一つのピークより高くなっている。他の2周波数では、アンテナ・ビームが49.5 MHzのアンテナに比べて広い範囲のカーブの形がかなりゆるやかであるが、いずれも7-9時頃にピークが記録されている。

地球上層大気は太陽からの紫外線やX線によって電離される。その結果、地上およそ100-500 kmの高さに電子密度の高い層ができ、電離層と呼ばれている。また、電離層内は、下層よりD層、E層、およびF層に分けられており、電子密度がピークとなる高さ（～300 km）はF層内にある。銀河電波は電離層を通過して地上に達する。電波が電離層内を通過する際、電離層内の電子の運動を引き起こすが、電子が他の粒子と衝突してエネルギーを失うと、結果として銀河電波は弱まって地上に達する。したがって、地上で銀河電波の強度変化をモニターすることにより、電離層の状態の変化についての情報を得ることができる。何らかの原因で電離層の電離状態が急激に変化した場合には、静穏時の比較的滑らかな銀河レベルの日変化が乱

される。典型的な例として太陽フレアに伴われる電離層の吸収増加がある。フレアからのX線バーストは電離層（特にD層）の電離を進める。電子密度の増加により電離層内での吸収が増大して銀河電波の受信レベルが低下する。

図2を見ると、11時過ぎと11時25分頃、強い電波放射が受信されている。これらの電波は3周波数とも受信されていること及び強度変動の様相から太陽電波バーストと考えられる。11時25分頃に発生した電波バーストの直後に銀河電波の受信レベルが少し下がっている（21.87 MHzの記録に矢印で示す）。Solar Geophysical Dataによると、11時22分頃よりフレアが発生しており、また、フレアに関連したX線バーストが人工衛星GOESによって観測されている。したがって、11時25分頃のバースト後の銀河レベルの低下はX線バーストによる電離層の吸収増加の結果と考えられる。銀河レベルの低下は3周波数すべてに認められるが、静穏時のレベルに対する相対的な変化量は低周波数ほど大きい。

図2には木星電波ストームは記録されていない。木星電波に関しては、衛星イオと関連するストームが数例ペンレコーダの記録上で同定できた。1例についてはデータレコーダにも収録されたが、解析できる程の強度ではなかった。

5. 混信について

低周波数における観測では混信の状況を把握しておくことが極めて重要である。20-50 MHzの周波数範囲では、混信は主に大気中の放電現象が源となる空電及び人工のノイズから成ると考えられる。近雷からの空電の場合は、直接波としてアンテナに達するため昼夜に関わりなく受信される。昼間は、電離層の反射によって遠くの雷発生源からの空電が受信される。空電は継続時間の短いパ

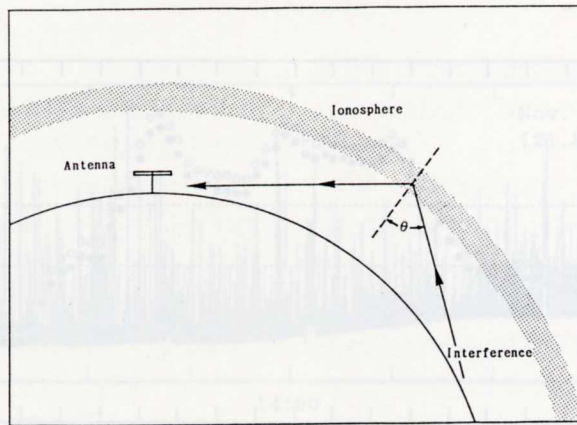


Fig. 3 Path of the radio waves horizontally reaching the antenna after being reflected by the ionosphere.

ルスの集合となって現れる。空電のみの場合には、パルスとパルスの間に銀河レベルを観測できるので、受信機の時定数を短く（0.5秒程度以下）しておけば、銀河レベルの変動を記録することは可能である。人工ノイズの場合、一概には言えないが、不規則に大きく変動し、断続的であることが多い。遅い紙送りスピード（数cm/h程度）のペンレコーダの記録を見ただけでは、混信がどのような種類のものであるかを判断することは難しい。

図2を見ると、21.87MHzと29.98MHzの場合、昼間に混信が見られるが夜間はほとんど見られない。また、混信が現れ始める時刻は、21.87MHzの方が29.98MHzより1時間以上早い。一方、49.5MHzの場合には昼間でも混信がほとんど見られない。周波数によって混信の現れ方が異なるのは、以下に示すように主に電離層の反射条件によっているものと考えられる。

1MHz程度の周波数から周波数を上げながら電波を電離層に向けて真上に発射したとしよう。最初は、電離層内での減衰が大きく反射波は認められないが、ある周波数から反射波が認められるようになる。反射の認められる最小の周波数はエフ・ミニマムと呼ばれている。さらに周波数を上げて行くと、あ

る周波数以上で再び反射波が認められなくなる。電波が電離層を突き抜けてしまうからである。電波の反射が起こる最大周波数は臨界周波数（あるいは、突き抜け周波数）と呼ばれている。臨界周波数は反射点のプラズマ周波数とほぼ等しいので、電離層の最大電子密度の平方根に比例する。電波が電離層に斜めから入射する場合には、反射の起こる最大周波数は臨界周波数より高くなる。平面電離層を仮定した場合、臨界周波数を f_c 、電波の電離層への入射角を θ とすると、反射される電波の最大周波数は次式の f'_c まで高まる（たとえば、前田憲一・後藤三男の教科書参照）。

$$f'_c = f_c / \cos \theta \quad (1)$$

20-50MHzの周波数範囲で観測する場合について、地上の混信が電離層に反射されてからアンテナに達するための臨界周波数の最小値を求めてみよう。ただし、地球の曲率は考慮するが、反射の起こる場所の近傍では平面電離層の近似が成立するものとする。観測周波数（ f_{obs} ）の混信電波が電離層で反射された後、水平方向からアンテナに達する場合（図3）に、電離層への入射角 θ は最大となる。その場合に、反射の起こる最小臨界周波数を求めてみよう。地球を半径 R の球と考え、反射点の地上からの高さを h とする

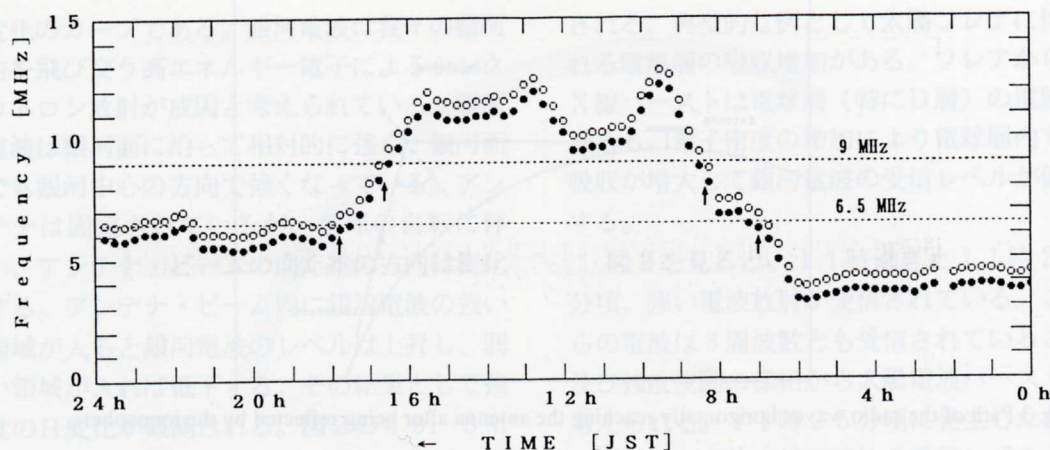


Fig. 4 Ionospheric critical frequency variations on February 8, 1993. Both the O-mode (solid circles) and X-mode (open circles) critical frequency variations are shown.

と、入射角の最大値 $\theta_{\max}$ は、

$$\theta_{\max} = \sin^{-1}(R/(R+h)) \quad (2)$$

により求められる。 $R = 6400 \text{ km}$ 、 $h = 300 \text{ km}$ とすると、 $\theta_{\max} = 72.8^\circ$ である。入射角 $\theta_{\max}$ で入射したときに反射が起こるには、臨界周波数が、

$$\begin{aligned} f_c &= \cos(\theta_{\max}) \cdot f_{\text{obs}} \\ &\sim 0.3 \cdot f_{\text{obs}} \end{aligned} \quad (3)$$

以上でなければならない。したがって、混信がアンテナに達するための最小臨界周波数は観測周波数の約 0.3 倍である。49.5 MHz、29.98 MHz、21.87 MHz の場合について計算すると、それぞれ 15 MHz、9 MHz、6.5 MHz である。

図 4 に 1993 年 2 月 8 日に通信総合研究所（東京都小金井市）で観測された臨界周波数の変化を示す。地球磁場のために電離層プラズマは複屈折性を示し、電波は正常波と異常波に分かれて伝播する。図 3 には正常波（黒丸）及び異常波（白丸）での臨界周波数の変化が示されている。図 4 よりいずれの臨

界周波数も 15 MHz に達していないので、49.5 MHz では終日混信が現れなかったものと考えられる。図 4 のカーブから、臨界周波数が 9 MHz、及び 6.5 MHz となる（図 4 に矢印で示す）時刻を読み取り、図 2 の対応する周波数の記録の下に矢印で示した。21.87 MHz の混信出現時刻には 40 分程度の差が認められるが、他は混信の出現開始あるいは停止時刻とおおむね一致している。

以上の議論は極めて定性的なものである。反射高度を一定と考えたが、実際には反射高度は変動する。反射高度が変動すれば混信の現れ始める臨界周波数の値も変動する。また、臨界周波数は場所によって異なる。しかし、混信の現れ方が電離層の反射条件とふか関わっていることは上で述べた簡単なモデルによる考察によっても明かである。

行松（1992）は、柘植町で得られたデータと通信総合研究所で観測された臨界周波数の比較から、臨界周波数が 9 MHz 以下になると 29.98 MHz の混信が消えることを報告している。都市部から離れた地点で観測する場合、混信電波はほとんど電離層に反射されてからアンテナに入射して来ることを示す例である。

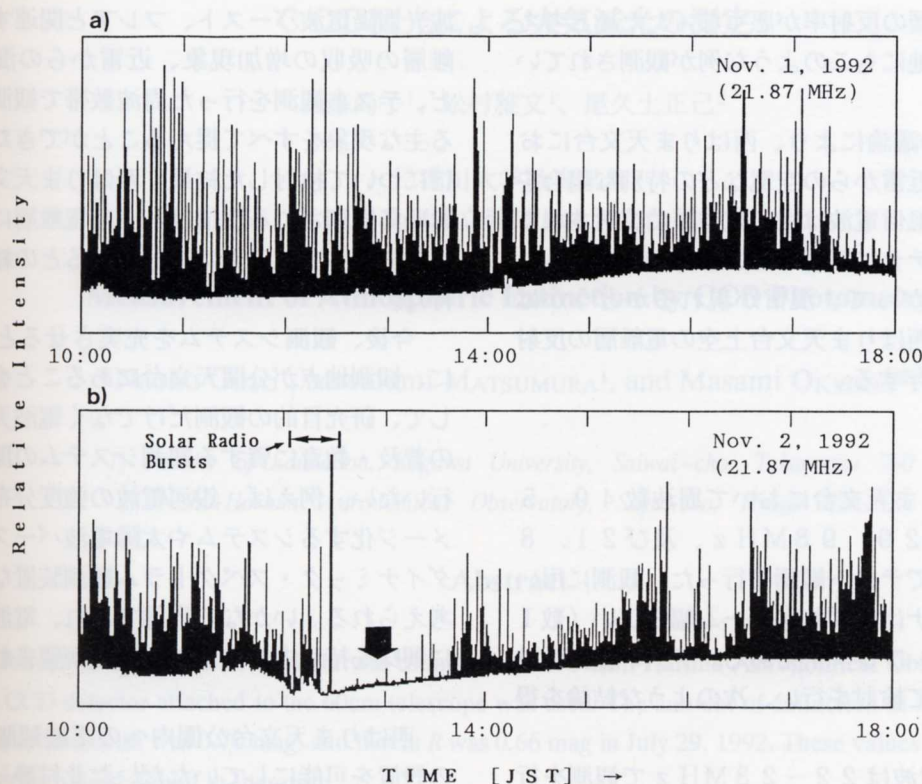


Fig. 5 Sudden ionospheric absorption due to a solar X-ray burst. The absorption event which occurred on November 2, 1989 is shown in panel b. The November 1 record is also shown for comparison (panel a).

混信電波が電離層に反射された後にアンテナに達していることを示唆する西はりま天文台での他の観測例を示す。図5bは、1992年11月2日に21.87MHzで観測された吸収の例である。比較のため11月1日の記録も図5aに示す。図2で示した電離層吸収の例の場合と比較して、11月2日の場合は吸収量がはるかに大きく、また、継続時間も長い。ここでは、吸収が起こった際の混信の様子に注目してデータを見てみよう。12時前より銀河レベルの低下（つまり、吸収）が始まり、12時15分頃に最低レベルに達した後、元のレベルへと数時間かけてゆっくりと回復している。Solar Geophysical Dataにある人工衛星GOESによるX線の観測データによると、吸収の時間に対応して太陽X線バーストが記録されている。したがっ

て、このレベル低下が電離層の異常電離による吸収増加を示していることは明かである。12時から12時20分頃まで見られる強い電波放射は、49.5MHzの記録にも対応した放射が認められるので、混信ではなく太陽電波バーストと考えられる。図2において注目されるのは、太陽バーストの直後から約1時間にわたって混信がほとんど現れていない（太い矢印で示す）ことである。11月1日の記録（図5a）に示されているように、通常、昼間は混信がほぼ連続的に現れる。混信電波が混信源からの直接波であるとする、電離層の状態に関係なく同じ強さで受信されるはずであるが、そうはなっていない。このことは、混信電波が電離層に反射されてからアンテナに達していることを示している。混信が消えたのは、太陽X線バーストに

より電離層の反射率が悪くなったためと考えられる。他にもこのような例が観測されている。

以上の議論により、西はりま天文台においては、近雷からの空電などの特別な場合を除くと、混信電波は主に電離層に反射されてからアンテナに入射しているものと考えられる。したがって、混信が現れるかどうかはもっぱら西はりま天文台上空の電離層の反射条件に依存する。

6. 結論

西はりま天文台において周波数 49.5 MHz、29.98 MHz、及び 21.87 MHz でテスト観測を行った。観測に用いたアンテナはいずれもビーム幅の広い（数10度以上）アンテナである。テスト観測の結果について検討を行い、次のような結論を得た。

木星電波は 22–23 MHz で観測を行う。21.87 MHz におけるテスト観測によると、夜間には混信がほとんど無くなるので、木星が夜間に南中する時期を選べば、木星電波の観測は十分可能である。実際、数例の木星電波ストームの観測例を得た。銀河電

波、太陽電波バースト、フレアと関連する電離層の吸収の増加現象、近雷からの混信など、テスト観測を行った周波数帯で観測される主な現象をすべて捉えることができた。混信について検討した結果、西はりま天文台において観測される混信は、主に電離層に反射されてからアンテナに達しているとの結論を得た。

今後、観測システムを充実させるとともに、観測地点が公開天文台にあることを考慮して、研究目的の観測だけでなく電波天文学の普及・教育に資する観測システムの開発も行いたい。例えば、銀河電波の強度分布をイメージ化するシステムや太陽電波バーストのダイナミック・スペクトラム観測装置などが考えられる。いかなる形態であれ、電波観測に興味を持つ方々の参加・協力が望まれる。

西はりま天文台公園内への電波観測施設の設置を可能にいただいた北村静一園長（当時）、アンテナ・観測小屋等の設置計画の立案、兵庫県との折衝において多大の協力をいただいた黒田武彦天文台長にふかく感謝いたします。臨界周波数のデータは郵政省通信総合研究所より提供していただきました。

《参考文献》

- 行松 彰、1992, 南極資料, 36, 181.
 前田耕一郎、1989, 天文月報, 82, 7月号より隔月5回連載.
 Maeda, K., 1987, Solar Terres. Environ. Res. Japan, 11, 14.
 前田憲一、後藤三男、1965, 電波伝播, 岩波全書.