

太陽電波と41年

鳥居近吉

<〒442 愛知県豊川市蔵子7-6-8>

名古屋大学空電研究所で35年、国立天文台で6年余り太陽電波の観測装置にかかわって来た。国立天文台野辺山に1992年に完成した電波ヘリオグラフに至るまでの太陽電波受信装置の移り変わりについて紹介する。

1953年8月、私は愛知県豊川市にある名古屋大学空電研究所の第3部門(太陽電波)に就職した。ここは豊川海軍工廠の跡地で広さがおよそ東西600m南北300mもあり、ここに出来上がって間もない3.75GHz太陽電波強度受信装置と4GHzの5素子干渉計があった。既に田中春夫先生や柿沼隆清先生がおられた。

3.75GHz太陽電波強度受信装置は、直径2.5mの網ばりのパラボラアンテナで、太陽電波の信号をディック変調(天体からの信号と比較用雑音源とを交互に切り換えるもの)して受信機に接続されており、一方5素子干渉計は5台の1.5mアルミ鋳物製パラボラアンテナから5本の導波管をマジックTで接続して1本にしてから、ディック変調器を通して受信機に接続されている。アンテナは新品だが、受信機は中古部品の混ざった真空管

式のお手製、記録計は円弧式で大きな磁石の付いたゼンマイ式の重い物であった。

それでは、あたかも日本の高度経済成長と同じように急速に発展を遂げた豊川のアンテナ群について、年代別に製作した装置の概要を紹介しよう。これらのアンテナのほとんどは法月さんのところで作られたものである(天文月報95年7月号の古在氏の記事を参考にしてください)。

1951年に最初の装置、3.75GHz強度計が建設された。アンテナ径2.5m、ビーム半値角2.5°、強度のみ受信。観測データを11月から出しはじめた。次いで53年に4GHzでの5素子干渉計を作る。アンテナ径1.5m、ビーム間隔43′、ビーム半値角7.8′、アンテナ間隔6.0m。

これからあとIGY(国際地球観測年)に向けて1954年から1959年にかけてアンテナを矢継ぎ早に増やしていった。こんな有り様だから観測装置の製作は、大変だった。4年の間にわずか5人で観測とデータ整理と機器開発をしながら受信機を作らねばならなかったのである。

製作する機器は、太陽の追尾用のモータとアナログ時計を動かす定周波電源、受信装置の利得変動を無くすための交流定電圧電源と直流定電圧電源、真空管のヒータ電圧変動補償型中間周波主増幅器



1964年頃のアンテナ群 手前から18素子9.4GHz干渉計、偏波受信用1/4波長板付8素子4GHz干渉計、後列右から1GHz偏波計、2GHz偏波計、3.75GHz偏波計、9.4GHz偏波計

4台、1 GHz から 9.4 GHz 迄の中間周波前置増幅器 4台、低周波増幅器 4台が必要だった。これらの機器開発に設定した仕様は、故障しない物をつくること、故障した時は、通電したまますぐ修理できること、10年後にも通用する性能であること、10年間以上使用出来る物を作ることであった。直流定電圧電源は、250 V 500 mA で出力変動 0.02 %、リップル 10 mV 以下とした。交流定電圧電源は、AC 100 V で出力変動 0.1 V 以下の実効値安定化電源を使用した。受信装置の利得変動は、大部分が中間周波増幅器のヒータ電圧の変動によるものなので、ヒータ電圧変動補償型増幅回路の採用により非常に安定度が良くなった。

1954年には4 GHz 干渉計をアンテナ間隔 6.45 m (86 λ) にし、3台増設して8台にしたので、ビーム半値角が 7.8' から 4.5' に性能アップする。追加したアンテナ用に、導波管を手作りした。素管を買ってフランジを作り、半田付け、メラミン塗料を塗って焼き付け、これで出来上がり。買ってくる値段の半分以下で出来上がる。アンテナ間隔も変えたので、導波管の配管もやり直し。まず導波管を乗せる台から作る。アンテナの間に径 12 cm 長さ 1.5 m 位の丸太 3本をハンマーで地面に打ち付けて、頭を揃えて切り、この上に厚さ 1.5 cm 幅 15 cm 長さ 50 cm の板を打ち付けて、導波管を配管、その上に板で日除けを作るという大工仕事をやった。この年に初めて偏波を受ける。4 GHz 干渉計のオワンの上面に、4分の1波長板を取り付けた。アンテナの矩形導波管の口と 45度の向きから 90度回るように取り付け、共通シャフトでつないで、8台分同時に回るようにした。

1956年に9.4 GHz 偏波計を作る。アンテナ 1.2 m、ビーム半値角 2.0°、開口角 160°、受信偏波は左・右・直線を手動で切り替える。観測データを5月から出し始める。3.75 GHz 用の偏波計も作った。アンテナ 1.5 m、ビーム半値角 4°、開口角 160°、受信偏波の左・右・直線をやはり手動で切り替える。2.5 m アンテナは止めた。

観測開始の自動化も画期的な改善。時計にタイムスイッチを組み合わせ、受信機が安定するまでの時間もきちんと見込んで電源オンと観測開始を自動化できるようにした。これで日の出に間に合わせて多数のアンテナを始動させるための早朝出勤はなくなった。この年には 50 Hz 分周器も作る。タイムマークを記録計に入れたり太陽を追尾するモータを動かすために、精度の良い 50 Hz の信号が必要で、100 kHz の水晶発振子からこれを作るようになった。これは双三極真空管と共振回路を組み合わせて1段で30分の1位まで分周出来る優れ物で、安定な動作を考えて20分の1を2段重ねて最後は 250 Hz を 5分の1して 50 Hz を作った。このときは共振回路の部品調達に苦労した。

1957年には1 GHz 偏波計を新設。3 m アンテナでビーム半値角 7.54°、開口角 160°、強度・偏波同時受信できるようにした。観測データは3月から出し始める。続いて 2 GHz 偏波計も新設。径 2.2 m でビーム半値角 5.14°、開口角 160°、強度・偏波を同時受信できるようにした。観測データは同年6月から出し始める。4周波偏波同時受信にも挑んだ。これは偏波計 3.75 GHz と 9.4 GHz にフェライトスイッチを取り付けて、強度と偏波を同時受信出来るようにしたものである。

こうした大增産体制に遅れながら人員も増えてきた。IGY (国際地球観測年) のおかげで観測強化と資料処理のため定員が増えて 8人となった。

1958年、移動用 3.75 GHz 強度計を新設した。これは5月の八丈島の金環日食観測用に偏波計と同一規格の物を作った。直流電源と交流電源の他にアンテナと時計駆動用の電源を製作した。日食観測後にはこの装置を 9.4 GHz 干渉計用受信機として使用した。

1959年に8素子 9.4 GHz 干渉計で2周波化を行う。これは 1.2 m アンテナを 2.74 m (86 λ) 間隔で、東西に8台組立てることを自分たちでやった。ビーム間隔 40'、ビーム半値角 4.5'、受信機は

前述の移動用 3.75 GHz 偏波計用のものを活用。2 周波強度と偏波を同時受信できるようになった。この年にさらにスタッフが強化されて 10 人になる。女性があらたに 1 人、IGY のための強度計資料処理に従事した。

しかしそれでもまだまだ人手不足の中、予算不足で、できるものは自分達でとの考えから、人間コンクリートミキサもやる。1 m×2 m の鉄板とネリスコ（コンクリートをこねるスコップ）2 本を用意、材料のセメント、砂、ジャリ、と買いこみ、配合比は 1:3:6 だといって機会あるごとにこねたものだ。今回は干渉計観測小屋の基礎と土間コン打ちをやった。

9 月、伊勢湾台風が襲来。台風が来たときには、夜中でもアンテナは大丈夫か、窓ガラスは割れていないか、浸水していないか、飛ばされて壊れている物はないかなど見回りに行くことにしていた。この日は特に激しい風雨で外に出ると顔に当たる雨は小石のようで痛い、暴風で飛ばされないように前屈みで一步一步踏みしめるように歩いて、やっとアンテナの有るところに来てみると、観測室の北側の松林の松は地上 3 m 位の所で 90 度ほど風下の方向に曲がって激しく揺れていた。これは凄い風だ、気を付けなければ、と思いながら見回ったが、幸い装置は無事であった。翌日多くの松の木が地上 3 m 位の所で折れていた。記録を見返すと、伊勢湾台風の通過翌日にもきちんと観測を行っている。豊川では田中先生の厳しい号令のもと、欠測のないよう努力をしていた。機器が故障してもすぐに直せるように、そして直してすぐ観測を続けていたのである。

1961 年、9.4 GHz 干渉計の東西方向に 1.2 m アンテナを 8 台増やして 16 台にする。オワンは日軽アルミ、部品は法月、そして組立てが空電である。ビーム半値角 2.2' になる。

1 GHz から 9.4 GHz まで 4 台の偏波計で観測してみると、2 GHz と 3.75 GHz の間で偏波の向きが変わるデータが見つかったので、2-4 GHz ス

ペクトルの観測を始めることになった。2 m のオワン 2 個に円錐うずまきアンテナをつけ、2 GHz から 4 GHz の広帯域周波数変換器、20 チャンネルの中間周波増幅器、検波器、低周波増幅器、検波器を順に接続し、出力をオシロスコープに輝度表示して、フィルムに露光する方法をとった。アンテナ以外は例によって手作り。

1962 年にも 9.4 GHz 干渉計のさらなる増設。16 素子にした西端のアンテナから 2.74 m 離して 1 台、更に西 43.84 m の所に 1 台増設し、18 素子化。ビーム半値角 0.7' となり、遂に 1' を切る。

1963 年には 10 m アンテナが登場。宇宙電波観測用にアンテナを手作りすることになり、鉄のアングルを 10 トン余りも買い込んで、溶接機、鋸盤、ハンマー等を使って見事 10 m のアンテナを作ってしまった。EL 軸に 10 m のオワンを乗せるのにさすがに自衛隊の助けを借りたが、ペンキ塗りには全員出動した。このアンテナで面精度 ± 2 mm、追尾精度 $\pm 5'$ を達成できた。

1964 年、9.4 GHz 干渉計にメーザ増幅器を搭載する。この雑音温度 40 K のメーザ増幅器のおかげで、おうし座 A (かに星雲)、オメガ星雲、オリオン星雲、白鳥座 A (こちらは電波銀河) の観測ができた。

このようにして観測を続けている太陽フラックスの変動がどの程度まで正確におさえられているのかを知りたい。そこで 1965 年には 1 GHz、2 GHz、3.75 GHz の 3 台の偏波計用に 3 台のアルミの標準ホーンアンテナを作り絶対測定をした。これによりデータの精度が 1% を切るレベルまで信頼できることがわかって安心。

1966 年、9.4 GHz 干渉計を分解、オワンを新しくして、南側に東西 2.74 m 間隔で 2 m アンテナ 32 台、西端から 2.74 m 離して 3 m を 1 台、更に 87.68 m の所に 3 m を 1 台並べた。ビーム半値角は 1.1' (32 台)、0.35' (34 台)、強度・偏波を同時受信する。

1967 年に 3.75 GHz 干渉計も大増強。東西方向

に 6.88 m (86 λ) 間隔に 3 m アンテナ 32 台、その西端から 3.44 m 離して 3 m を 1 台、更にここから 220.16 m 離して 3 m をもう 1 台の合計 34 台の 1 次元干渉計を新設した。強度偏波を同時受信することはもはや当たり前。回転移相器を回して 10 秒で 1 走査できるようにした。受信機は真空管で全部手作り、アンテナ組立ては空電研と法月。

1968 年、4 GHz 干渉計がその使命を終える。3.75 GHz 干渉計と 1 年間並行運転して観測を終了した。この年に人員 11 人になる。

1969 年、9.4 GHz 写真儀を作る。これは干渉計の真ん中から北に 1.37 m 離して 1.2 m のアンテナを 16 台増設、回転型移相器をつけて南北に太陽を走査して 22 分かけて 1 枚の太陽像が得られるようにしたものである。この写真儀は、最初の 8 素子の時から導波管関係は、全部自作。導波管の架台も自作した。これに加えて 9.4 GHz 写真儀は、東西方向に 8 走査する間に南北方向を 64 走査して飛び越し走査で太陽像を描き出す方法をとっている。走査用の移相器は、高精度の周波数の電源で動く同期電動機で駆動しなければならない。同期電動機は 3 相 200 V 出力 200 W である。3 相の信号を、市販のステレオアンプと同期電動機を組み合わせて作り、サイリスタのゲートに加えて 3 相 200 V の電源を製作した。

9.4 GHz 写真儀の自動化も進めた。1959 年に最低の装備で 8 素子を作り始めて、そのまま 52 台の写真儀まで 10 年かけて増設してきたが、52 台の注油と赤緯軸の目盛り合わせは観測当番にとって相当の負担である。まず赤緯軸の駆動を手動からモータ駆動にし、スイッチオンで 52 台自動で動くようにした。時間軸の駆動も、ワンボードコンピュータを使って観測の始めから終わるまで自動で行えるようにした。人員が 12 人になる。これは 3.75 GHz 干渉計で 10 秒走査観測をするようになってデータ量が 16 倍になったため、女性を更に 1 人増やした。

1970 年、5 GHz 強度計を内之浦に設置。エンド

レスに動くアンテナと、1 年分のアンテナ修正値を記憶させたドラムと、無停電電源を組み合わせて、全自動の太陽電波受信装置を完成した。

1974 年に 3.75 GHz 写真儀が完成。東西系 3 m 34 台の 3.75 GHz 干渉計に南北 17 台を加えて 2 次元像を得られるようにした。南北系にも回転移相器を付ける。観測モードは 5 種類、1 次元 10 秒と 160 秒走査、2 次元は 41 秒、160 秒、22 分の 3 モード。これらも例によってアンテナは法月、組立ては空電と法月のコンビ。

1979 年には 1, 2, 3.75, 9.4 GHz 全自動偏波計が 2 年余りの試験観測を経て、1956 年から 57 年にかけて設置した旧偏波計に代わった。アンテナ部は無給油、太陽の追尾は自動修正、観測の始動・終了も自動、3 時間毎の較正も自動にした。フロントエンドボックスは恒温槽になっており、しかもフロントエンドは全てトランジスタ又は IC を使用した。バックエンドも半導体を使用して、エアコン付きの観測室に設置した。おかげで受信機のゲイン変動は総合で 1% 以下を達成できた。このしばらく前から女性が退職するたびに定員削減になり、ついに女性は 1 人も居なくなった。

上述の恒温槽、実は弾薬庫である。豊川の構内には、海軍工廠時代の鉄筋コンクリートの建物に上から 1 m 位まで土を被せた弾薬庫があった。部屋は湿度が高く物置に使っていたが、観測時間を長くしようとして、この弾薬庫の上に 4 台の偏波計を設置した時に、温度変動が小さいことがわかり、観測室ができるまでの数年間、バックエンドを置いていた。

もう 1 つ工夫したのが紙テープ読み取り器である。大型計算機のデータの入力に紙テープ読み取り器が使用されていた。これを太陽の自動追尾に利用することに気が付いて、1 日 8 回 4 年分の修正値の紙テープを作って、3 時間ごとにこれを読みとり、4 台の偏波計のアンテナの太陽の自動追尾を行った。この装置は、観測を中止する迄 20 年近く使用した。

1980年には3.75 GHz写真儀の高位相安定化及び高感度化をはかる。導波管と回転移相器を全部はずして、52台のアンテナにNF 4 dBのフロントエンドをつけた。PLOの参照信号入力と中間周波の出力は、地下1.5 mに埋設した長さの等しい高位相安定同軸ケーブルで、第2中間周波増幅器と接続した。この増幅器は、局部発振器側に1.4度ステップ8ビットの移相器があり、第2中間周波信号出力の位相を360度変えることができる。第2中間周波信号の出力は、コンバイナを通してバックエンドに接続する。アンテナ等価雑音温度1000 K、位相安定度±3度/月が実現できた。

フロントエンド箱は実は家庭用冷蔵庫である。3.75 GHz写真儀のアンテナ1台毎にフロントエンドを付けることになって、安くて良いものはないかと探していたところ、当所の太陽風観測装置に小型冷蔵庫を使用していたのを思い出して、様子を聞き10年は使えると判断。これにヒータと手製の温度制御器を組み込んでフロントエンドの温度変化を0.5度以下に抑えることができた。

こうして高位相安定化及び高感度化された3.75 GHz写真儀の第2中間周波増幅器及びバックエンドの多様な制御に対応する為に、パソコンを使った受信機の制御器を製作した。

1982年にも引き続きパソコン制御を広めた。9.4 GHz干渉計はアンテナの1走査160秒ごとにステップで動かしている。これはパラボラアンテナの直径が2 mと大きいので、1走査の両端で利得の低下が有る為で、機械構造であったものをパソコン(PC-8001)制御に変更した。

1983年にはデジタル制御フェーズシフタを製作した。これは3.75 GHz写真儀の第2中間周波増幅器の8ビット移相器の多様な制御に対応出来るようにするものであった。このフェーズシフタを受信機制御のパソコンに接続して使用した。

10 mアンテナの制御も改良。エレベーション軸にステッピングモータをつけ、アジマス軸にDCサーボモータを取り付けた。2台のモータドライ

バにパソコンからデータを送って太陽を追尾し、このようなパソコンによる経緯儀式アンテナの制御の検討を行った。

1984年に入ると3.75 GHz写真儀について、観測時間の延長とアンテナ駆動系の改善、コンピュータ制御による自動化を目的に改造した。共通シャフトによる駆動を行っていた52台のアンテナの2軸に、ステッピングモータを取り付けてコントローラを通し、受信機制御のパソコンを通じて制御出来るようにしたのである。

1985年には3.75 GHz写真儀に実時間相関型太陽電波画像装置を追加した。80年にアップグレードしていたこの写真儀をさらに改良、2年かけて第3中間周波増幅器と相関器、画像装置をつけ、0.1秒に1枚の太陽像をとることが出来るようにしたのである。

3.75 GHz写真儀を高感度にする事はいつも求えていたが、1台40万円では手が出ない。1987年になり、民生品で周波数がピッタリ合っている格安の低雑音増幅器を見つけた。少しの改造を頼んでこれを写真儀に取り付けた。これで雑音温度が1000 Kから一気に200 Kに改善された。

9月23日には3.75 GHz写真儀で日食を観測した。天候が悪い時の為に、普通の方法では太陽が見えなくても、こちらでなら日食が見られると云うことで、NHKがテレビ中継に来た。しかしこちらでは毎日の観測と変わらない。勿論偏波計でも観測した。

この年には相関器の改良をする。安定度の向上と小型化、低消費電力化を目指して、3.75 GHz写真儀の相関器を、ATチップ(専用IC)使用の相関器に取り替えた。容積20分の1以下、消費電力4分の1にできた。

1988年7月1日国立天文台の改組に伴い、名古屋大学空電研究所の一部が国立天文台に移管される。空電研はSTE研として新たなる出発。私は高分解能の電波ヘリオグラフの実現を期待し、空電研の技官として唯一人天文台の改組に加わる。

1992年、野辺山に17GHz電波ヘリオグラフが完成。1969年からの9.4GHz写真儀、1974年からの3.75GHz写真儀の観測により、より分解能の高い電波ヘリオグラフの必要性を痛感。その早期実現を期待しながら新しい技術開発を継続してきた結果として、高速・高分解能・高感度の電波ヘリオグラフがついに完成した。豊川の2台の写真儀の10倍の鮮明なカラーの太陽像は、スバラシーにつきる。

1993年、偏波計の観測を今後も継続することが決まり、製造後20年近く経過している偏波計のアンテナ群を、オーバーホールして野辺山に移設することになる。3.75GHzについてはどうしても欠測できないので、全自動3.75GHz偏波計アンテナを野辺山に新設。

1994年になり実際に1, 2, 9.4GHz偏波計を野辺山に移設。1979年から連続運転していた偏波計のアンテナは、駆動モータをステッピングモータに取り替え、コンピュータ制御のできるコントローラを取り付け、ベアリングの交換と全体塗装をして面目を一新、野辺山に移ったのである。野辺山太陽電波の2台の偏波計アンテナも同様に手を加えた。この際にと、1, 2, 3.75, 9.4, 17, 35, 80GHz偏波計全部で7周波のバックエンド出力を、0.1秒の完全積分に統一した。

1995年には電波ヘリオグラフの1992年6月からのデータ、CATALOG OF EVENT (1)が出版される一方で、豊川観測所の装置、遂に運転休止となる。3.75GHz偏波計、9.4と3.75GHzの写真儀の電源スイッチを切った。これらの観測装置が過去40年間に蓄積してきたデータを並べてみると、太陽活動静穏期が明瞭に見分けられる。今まで欠測のないよう保守・運用に努めたかいがあった。

1996年、野辺山電波ヘリオグラフ17, 34GHzの2周波化。これは当初から計画していたのだが、いよいよ34GHzを加える2周波化の工事が94, 95年度に行われ、96年には稼動する予定である。

おわりに

太陽活動の4サイクル41年の間に、職員延べ45人(女性21人)学生40人余の人達によって、電波ヘリオグラフを作り上げる力を蓄えてきた。それぞれの人が、その時々の問題点を真剣に受け止めて頑張ってきた結果だと想わずにはおれません。全てがうまくいった訳ではありませんが、電波ヘリオグラフが完成した事で、努力は報われたとおもいます。

振り返って見るとき、41年の前半は身体を張って装置を作った感じがします。土建屋さんであったり、大工さんだったり、電気工事屋さんだったり、お陰で沢山のことを学びました。後半は、少しお金に恵まれて、装置の打ち合わせをして、出来上がって来た物をつなげて調整して完成させるといった仕事が、少なからずありました。

電波ヘリオグラフから始まったこれからの20年は、自動でどんどん出てくる観測データを、大勢の人達に、早く、易しく、興味を持って使ってもらえる様にすることが、主な仕事になるように思えます。

この文章をまとめるにあたり、あやふやな記憶を、名古屋大学空電研究所報告(和文、欧文両方)で補わせて頂きました。間違いはご容赦下さい。

Observations of Solar Radio Activities Forty-One Years with Toyokawa and Nobeyama

Chikayoshi TORII

Toyokawa, Aichi, JAPAN

Abstract: I have been working with the instruments for solar radio observations, for thirty-five years with the Research Institute of Atmospheric, Nagoya University and six years with the Nobeyama Solar Radio Observatory of National Astronomical Observatory. It was fortunate for me to be involved in the technical aspect of the solar radio observations which has led to the Radio Heliograph commissioned in 1992 and now working efficiently at Nobeyama.