

—太陽を観測する新しい目：その1—

電波ヘリオグラフ：電波写真に写るコロナ

西尾正則*・鷹野敏明*

■電波ヘリオグラフ紀元前

マイクロ波帯の電波で撮影された太陽像は、太陽下層コロナの様子、特にコロナ中の電子の密度分布や磁場の様子を良く示している。このため、フレアー現象の開始前後における活動領域の上層大気の状態を研究するうえで注目されてきた。前太陽サイクルには米国 NRAO の VLA がマイクロ波帯でのフレアー現象の研究に大活躍したが、日本でも東京大学東京天文台、名古屋大学空電研究所、名古屋大学理学部の研究グループがそれぞれ独自に電波干渉計を持ち、それらの装置から得られたデータは太陽電波の研究に重要な役割を果たしてきた。しかし、日本で活躍したこれらの装置は、東西方向の一次元像のみであったり、二次元像であっても解像力、時間分解能が不足であったりして、フレアー現象に関連した研究には十分とはいいがたかった。このため、10年以上前からマイクロ波帯での高解像力、高時間分解能の太陽専用電波望遠鏡の建設が熱望され、技術的な検討が重ねられてきた。電波ヘリオグラフは太陽フレアー現象の解明を目指した太陽専用の大型電波望遠鏡であり、今サイクルの太陽観測における目玉のひとつとして現在建設が進められている。建設は1990年度に始まり、1992年の3月に完成予定である。この装置の登場によって、太陽フレアー現象の初期段階にコロナで起こると考えられている磁場のエネルギーが粒子に引き渡される様子やエネルギーをもたらした粒子の動きなどが捕らえられることが期待されている。

■T字形に並ぶ小型アンテナ

フレアー現象が黒点近辺の活動領域で起こることはよく知られているが、いつ起こるか正確に予測するのは現在の研究段階ではまだ困難である。太陽活動が活発な時期には多くの黒点が太陽面上に現れるので、フレアーを起こしそうな場所を特定するのはよりいっそう困難となる。一方、フレアー現象は活動領域の中の非常に限られた領域から始まるので、フレアー現象の初期段階を詳しく調べるためには高い解像力が必要となる。このため、フレアー現象を観測する装置としては、1)太陽全面が常に撮影でき(=広視野)、かつ2)細かい構造も分解できること(=高解像力)という相反する項目が要求される。さらに、フレアー現象の初期段階では短時間に放射エネルギーが大きく変化するので、3)短時間に撮影できること(=高時間分解能)が必要とされる。電波ヘリオグラフでは、以上の3つの要求を満たすために大口径のパラボラアンテナを1台使う方法は避け、多数の小口径のアンテナを広い敷地に並べる電波干渉計と呼ばれる方法を採用した。

電波干渉計では、解像力、観測視野および時間分解能を独立に決めることができる。観測視野は干渉計を構成するアンテナ(素子アンテナ)の口径によって決まり、口径が小さいほど一度に見られる範囲は広くできる。一方、解像力は最も離して置かれたアンテナ間の距離で決まり、アンテナを遠くに離して置くほど解像力は高くなる。時間分解能は並べられるアンテナの数と受信した電波を処理し、記録する装置の能力によって決まり、なるべく多くのアンテナを並べ、なるべく高速な処理装置、記録装置を用いるほど時間分解能は高くなる。もちろん、これらの条件をすべて満たす装置をつくるとなると、非常にたくさんのアンテナが必要となり、かつそれらのアンテナで受信される膨大な量のデータを高速に処理することが必要となる。

電波ヘリオグラフでは、なるべく少ないアンテナ数、なるべく簡単なデータ処理で所要性能を達成できるようにアンテナの並べ方を工夫している。アンテナの配置はT字形とし、かつ、内側が密で外側に行くほどまばらになるようにしてある。このようにすると、フレアー現象を撮

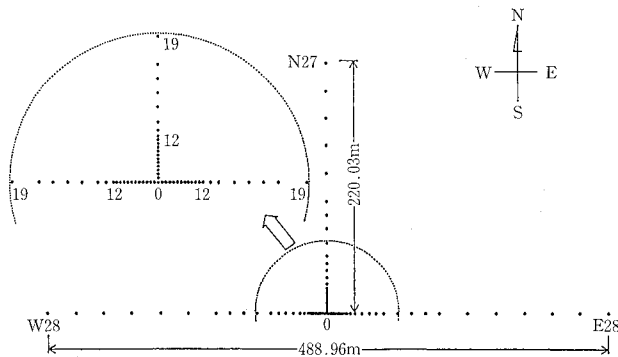


図1 電波ヘリオグラフのアンテナ配置

* 国立天文台 Masanori Nishio, Toshiaki Takano: Nobeyama Radioheliograph

影する場合、あまり画質を低下させないで高解像力、高時間分解を達成できる。図 1 は電波ヘリオグラフにおけるアンテナの並べ方を示したものである。アンテナは東西約 490 m、南北約 220 m の T 字形の敷地に並べられている。通常、地図などでは北を上にして描くので倒立の T 字形というべきであろうか。隣合うアンテナの間隔は T 字の交点付近では 1.528 m、いちばん外側では 24.448 m 間隔にとっている。アンテナの口径は集光力とのかねあいを考えて 80 cm にとっている。

電波ヘリオグラフに採用したアンテナ配列によって得られる電波像がどのようなものであるかは、計算機シミュレーションによって推定することができる。電波ヘリオグラフによって太陽を撮影すると電波干渉計特有の画像の乱れを含んだ画像が得られる。この乱れを含んだ像は CLEAN と呼ばれる画像処理の手法を使って処理され、乱れの少ない画像が再生される。図 2 にシミュレーション実験の各過程で得られる画像を示す。図 2 (a) はシミュレーション実験に用いたモデル画像であり、静かな太陽の上に局所的に電波放射が強くなっている領域が 2 か所ある像を用いた。図 2 (b) は電波ヘリオグラフのアンテナ配列によって撮影された太陽像である。この画像には電波干渉計特有の乱れが見えている。図 2 (c) は、この画像に CLEAN を施した結果であり、図 2 (a) とほぼ同じ画像が再生されていることがわかる。

■硬 X 線との同時観測に適した波長

電波で観測する場合、どの周波数で観測するかによってフレアー現象の見え方が違ってくる。フレアー現象の初期段階で加速された電子は、高いエネルギーに加速されたものほど短い波長の電波を放射する。フレアー現象の観測において、なるべく高いエネルギーの電子まで捉えようとすれば、なるべく短い波長で観測した方がよい。しかし、短い波長では地球大気に含まれる水分による吸収が大きくなり、観測条件は厳しくなる。また、受信装置が高価になる。こういったことから、観測波長は 1.76 cm (17 GHz) とした。これまでの観測から、この波長での電波強度の変化と硬 X 線の強度変化の間に強い相関関係があることが指摘されている。こういったことから、硬 X 線と電波での画像の同時撮影は興味を持たれるところである。

■磁場を精度良く観測

右回りの電波と左回りの電波の割合が場所によってどのように変わっているかは、コロナ中で磁力線がどのような形になっているかを知る上で重要な情報である。電波ヘリオグラフでは、右回りの電波と左回りの電波による撮影を 25 ミリ秒毎に交互に行い、2 枚の電波写真の差

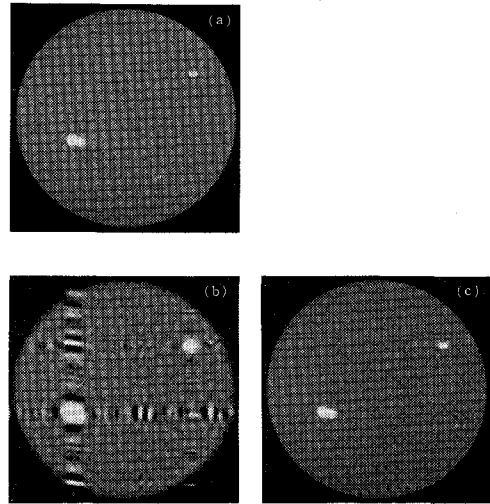


図 2 電波ヘリオグラフによって得られる太陽像 (シミュレーション結果)。(a) モデル画像、(b) 像処理前の画像、(c) 像処理後の画像

からコロナ中の磁場のようすを推定する。右回りの電波の量と左回りの電波の量が 1% 違っているだけでも見つけることができる。このかつてない高い測定精度により、フレアーの前後やフレアー中のコロナ中の磁場の状態を詳しく調べることが可能となる。

■アンテナ、受信機、計算機がひとつになった複合装置

電波ヘリオグラフはフレアー現象の撮影を主目的にしており、そのために必要な性能を最優先して設計されている。フレアー現象の初期には電波強度が秒以下の継続時間で大きく増減することがある。このため、電波写真の撮影は 50 ミリ秒で行えるようになっている。また、フレアー現象の初期には電波を放射している領域は非常に小さいといわれている。このため、多少画質を犠牲にして 2 次元像で約 10 秒角という高い解像力を達成している。一次元像で良い場合にはさらに高い解像力を得ることができる。表 1 に電波ヘリオグラフの所要性能を示す。

電波ヘリオグラフの受信装置はアンテナ、受信機、計算機を含む大きな複合システムであるが、役割別にアンテナ系、フロントエンド系、信号伝送系、中間周波系、

表 1 電波ヘリオグラフの性能

観測周波数	17 GHz
観測視野	40 分角×40 分角
解像力	約 10 秒角 (2 次元像)
時間分解能	50 ミリ秒
偏波観測	右回り・左回り時分割
画質 (ダイナミックレンジ)	100 : 1 (高速撮影時) 1000 : 1 (低速撮影時)

デジタルバックエンド系，データ集録処理系の6つの部分に分けて考えることができる。それぞれの部分の役割は、

- 1) アンテナ系
太陽からやってきた電波を受け取るためのパラボラアンテナ
- 2) フロントエンド系
受け取った微弱な電波を増幅する低雑音増幅器
- 3) 信号伝送系
各アンテナを電気的に結び合わせるための信号伝送線
- 4) 中間周波系
各アンテナから送られてきた信号の特性を揃える装置
- 5) デジタルバックエンド系
各アンテナで受信された電波の間の掛け算を行う超高速専用計算機
- 6) データ収録処理系
掛け算結果から電波写真を合成する計算機。データの記録も行う

である。図3に電波ヘリオグラフの受信装置の構成を示す。中間周波系以降の装置は、アンテナの近くに建設中の観測棟の中に格納される。フロントエンド系は各アンテナに1台ずつ装着され、観測棟との間を信号伝送系で結ばれる。

■マイクロコンピュータ搭載の高性能・小型アンテナ

長期間良い画質で電波写真を撮影するためには、すべてのアンテナ（素子アンテナ）が正確に太陽を追尾することが必要である。電波ヘリオグラフではアンテナの視野の中心と太陽像の中心のズレが 30 秒角以内になることが要求されている。このため、アンテナは非常に高い

精度で組み上げられている。アンテナの光学系にはカセグレン方式と呼ばれるパラボラ反射鏡（主鏡）と双曲面の副鏡を組み合わせた方式を採用している。これは、受信機を温度を一定に保った箱に納めて動作を安定させるのに都合の良い機械構造にできるからである。アンテナの架台には、機械的な構造が簡単な経緯儀を採用した。写真1にアンテナの外観を示す。主鏡の裏側に取り付けられているのが受信機を格納するための箱である。

経緯儀の場合、太陽の追尾のための制御が赤道儀に比べて複雑になるが、それぞれのアンテナに 16 ビットのマイクロコンピュータを用いた追尾制御装置を搭載することにより、追尾操作を簡略化している。電波干渉計ではすべてのアンテナが同時に同じ方向を向くことが必要である。電波ヘリオグラフではすべてのアンテナを一斉に動かすために、アンテナ間をローカルエリアネットワ

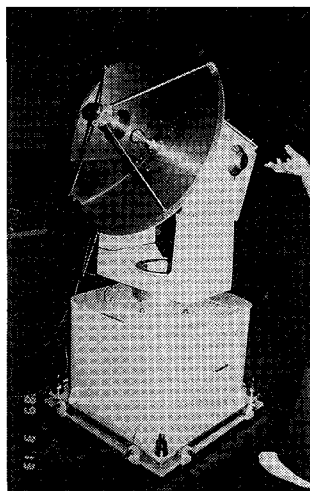


写真 1 アンテナの外観

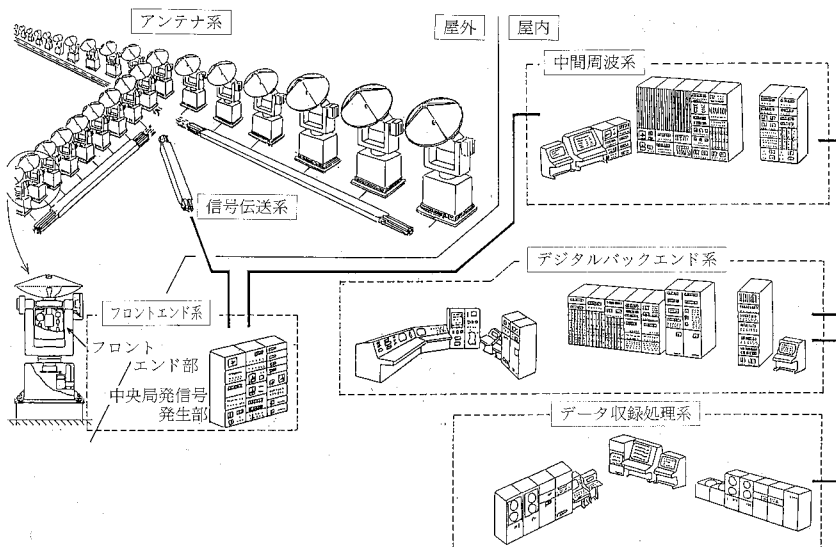


図 3 電波ヘリオグラフの受信装置

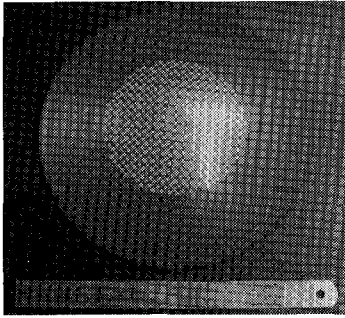


写真 2 17 GHz / 34 GHz 同時観測用の副鏡

ーク (LAN) で結び、1 台の指令装置からすべてのアンテナに動作指令を同時に出すようにしている。

電波ヘリオグラフは将来 17 GHz とその倍の周波数にあたる 34 GHz の 2 周波で同時観測を行うことを計画している。この場合、副鏡を 17 GHz は反射し、34 GHz は透過する周波数選択膜に置き換えるとともに、34 GHz の給電器 (ホーン) を副鏡の裏側に取り付けることによって 2 周波化を実現する。このための副鏡の研究はすでに進められており、試作品も完成している。写真 2 は試作品の一例である。この副鏡はファインセラミックスに金の薄膜を張り付けたものであり、薄膜に周波数選択特性がもたせてある (本誌 p. 186 「天文観測技術の最前線」の記事も参照)。

■信号を光で送る

電波ヘリオグラフでは多くのアンテナが離れた場所に置かれているので、それぞれのアンテナで受信された信号を 1 カ所に集めてやる必要がある。これまでの電波干渉計では信号を集めるのに同軸ケーブルと呼ばれる太さが 1 cm 程度の電線を用いて送っていた。電波ヘリオグラフでは同軸ケーブルのかわりに光ファイバーケーブルを用いている。光ファイバーは髪の毛程度の太さの線の中を信号が伝わるので、同軸ケーブルに比べて非常に細い場所を通すことができる。また、同軸ケーブルに比べてきつく曲げても折れない。電波ヘリオグラフのアンテナは小型にできているので、方位軸、仰角軸の 2 軸にケーブルがきつく巻き付く。このため、同軸ケーブルでは架台の内部を通して敷設することが難しかったが、光ファイバーを用いることでこれが容易となった。

電波ヘリオグラフでは、フロントエンド系に組み込んだ発信器により各アンテナで受信した信号をより取扱いの容易な低い周波数の信号に変換してから送り出している。このような変換を施した信号に対しデータ処理すると変換前の信号を直接処理するのが同様な結果を生ずるためには、フロントエンド系に組み込んだ発信器がすべて同期して動いている必要がある。このため、すべ

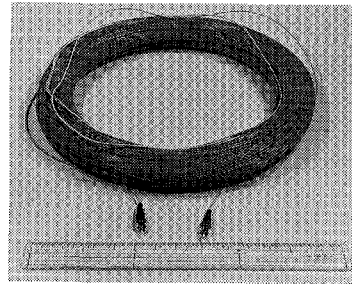


写真 3 光ファイバーの芯線。これで 1 km の長さ

でのアンテナに共通の基準信号を観測棟から各アンテナに分配して発信器の間の同期をとっている。この基準信号の分配にも光ファイバーケーブルを用いている。

電波ヘリオグラフでは、高い画質で電波写真を得るためには観測棟と各アンテナを結ぶ光ファイバーの長さがほぼ等しく、かつ変化しないことが必要とされる。具体的には、各アンテナと観測棟の間の光ファイバーの長さの差が 30 cm 以内、周囲温度の変化による伸び縮みが 60 μm 以下であることが必要とされる。通常の光ファイバーは温度変化による伸び縮みが大きく、上記の要求を満たさない。このため、周囲温度が変化しても伸び縮みの少ない特殊な光ファイバーを使っている。

■超高速でかけ算を行うデジタル計算機

電波ヘリオグラフは、2 台の離して置かれたアンテナとそれらで受信された信号の積を求める樹算器で構成される 2 素子電波干渉計を基本として考えることができる。2 素子電波干渉計で得られる情報と電波像の関係はフーリエ変換と呼ばれる数学的な変換式で関係づけられている。2 台のアンテナの間の距離や方位関係をいろいろと変えて観測した後、得られた情報 (フーリエ成分) を数学的な変換式に当てはめてやれば電波像が再生できる。2 素子電波干渉計では、アンテナの位置を変えながら観測を繰り返す必要があるので、電波写真の撮影には長い時間が必要である。もし、撮影中に電波源の形が変わると、再生された像はボケたものになってしまう。電波ヘリオグラフでは、フレアー現象のように電波源の形が速く変化する現象を撮影するために、像の再生に必要なアンテナの組み分けがすべて同時に得られるようにアンテナを並べてある。このため、それぞれのアンテナで受信された信号の間の積を求める計算 (フーリエ変換で使われる数学的な関係から“相関演算”と呼んでいる) もアンテナの組み合わせの数だけ行っている。電波ヘリオグラフでは 3000 組以上の相関演算を同時に処理している。この計算は電波ヘリオグラフ用に設計された専用の計算機で行う。この計算機はゲートアレイと呼ばれる高密度のデジタル集積回路で組み立てられており、

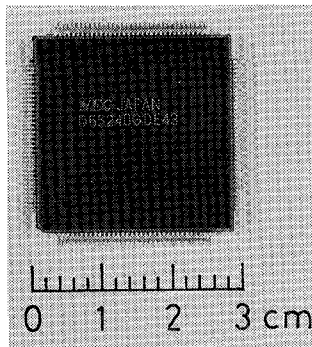


写真 4 超高速計算機の心臓部である高密度デジタル集積回路

卓上形のパソコン数台程度の大きさである。掛け算の回数は 1 秒間に約 1400 億回。掛け算しかできない計算機ではあるが、性能はスーパーコンピュータ以上である。写真 4 に専用計算機で用いる集積回路を示す。この集積回路 1 つで 4 組×4 組の掛け算を行い、約 25 ミリ秒間の平均値を求めることができる。

■実時間で画像を処理

太陽のようすは時々刻々変化してゆくので、観測は常に待たなすである。観測結果の一部は即座に画像処理し、表示装置に映し出すようになっている。太陽のようすは映し出された画像を見ながら的確に判断することができる。この画像はビデオにも記録される。観測結果の詳細な解析は計算機に一旦記録した情報（これは画像処理する前のもの）を用いて後からじっくり行うことになるが、解析したい現象のおおまかなようすはビデオに記録した画像からつかむことができる。

■建設期間は 2 年

1990 年度に始まった電波ヘリオグラフの建設は今そのまっただ中である。アンテナは組上がっている。アンテナをのせるコンクリートの土台もできあがっている（写真 5）。受信機も一部できあがってきた。これから、アンテナを土台に据え付けることになる。土台に据え付ける精度は 0.5 mm 以内、これは測量技術の限界に近い精度である。表 2 に建設スケジュールを示す。今年の後半には受信装置を納める観測棟が建ち、アンテナも土台に乗るので、外から眺めるともうできあがったという感じになるであろう。しかし、まだそれからが大変である。家庭用テレビのようにアンテナを取り付け、電源プラグをコンセントに差し込めば、太陽像がパッと映るというわけにはいかない。アンテナを希望通りに動かし、受信機から所望のデータが出始めるのにはさらに半年ほどかかる。まず、バラバラに納められてくる装置の間を

表 2 建設スケジュール

	1990				1991								1992						
	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
アンテナ	←設置				←設置								←設置						
フロントエンド	←設置				←設置								←設置						
信号伝送	←設置				←設置								←設置						
中間周波	←設置				←設置								←設置						
デジタルバックエンド	←設置				←設置								←設置						
データ収録処理	←設置				←設置								←設置						

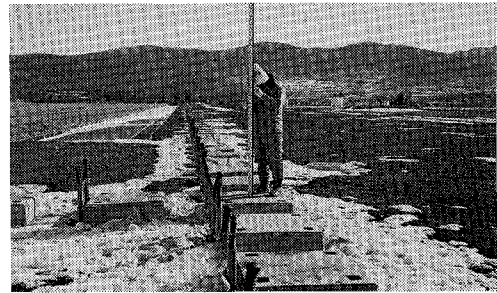


写真 5 建設中のアンテナ基礎。この上にアンテナが精密に据え付けられる。

電線や光ファイバーで結び、信号が所定どおりやり取りされるか調べなければならない。次に、機械加工で決められた方位と電波で観測したときの方位が一致するようにそれぞれのアンテナを微調整したり、全部の装置をつなぎ合わせてからでないといけないような精密な回路調整をしたりという作業に入る。このへんまでくると、もう前人未到の段階である。以上の作業と同時に膨大な量のプログラムを動かし、デバッグと呼ばれる動作試験の繰り返しを行う。電波干渉計では観測したデータに対し数学的な処理をしないと像が得られないので、調整の段階からどうしても計算機の力が必要である。電波ヘリオグラフでは、アンテナの駆動や受信機の調整を計算機にまかせているので、これらの動かすためのプログラムの動作試験も必要である。

このように外見上でできあがってからも多くの作業を行わなければならないが、これらの作業を含めて 1992 年の 4 月には太陽の電波写真の試し撮り（試験観測）、8 月にはフル稼働が可能となるように計画を進めている。