

電波ヘリオグラフ

甲斐敬造*

わが国の太陽電波研究者が共同で提案している電波ヘリオグラフは、激しく変動する太陽の姿を短 cm 波帯の電波写真として高速撮影する太陽観測用の干渉計である。フレアが太陽面のどこで起こっても必ず検出できる広い視野とエネルギー解放領域を分解してみることでできる高い解像力をあわせもち、また太陽自体を較正源とする自己較正法を採用することにより 100:1 以上のダイナミックレンジでフレアの明暗構造を写しだすなど、他の望遠鏡にない特長を備えた最新鋭の装置である。1991 年の太陽活動極大期には、太陽観測衛星 SOLAR-A と協力して、太陽フレアの物理、とくにフレアにおける粒子加速等高エネルギー現象のメカニズムを解き明かすことを目的としている。

1. 電波ヘリオグラフの狙い

電波ヘリオグラフ (radioheliograph) は、その名のとおり電波で太陽像を撮る電波写真儀である。Radioheliograph という言葉がはじめて用いられたのはオーストラリア・カルグラ観測所の円形干渉計であった。これはコロナのダイナミックな姿を電波写真に撮るとい画期的な装置であり、爆発で生じた衝撃波やプラズマ雲の運動を明らかにするなど数多くの新しい成果をもたらした。しかし、メートル波帯でみる太陽はコロナの中層から上層にあたり、したがってこのヘリオグラフがとらえた現象は爆発の余波、いわばフレアのアフター・イフェクトであった。その後第 21 太陽活動期 (1980 年極大) に入ると、太陽電波研究の主流は X 線観測と協力して、フレアのエネルギー蓄積・解放過程そのものの解明に移ってきた。私たちがここに提案している電波ヘリオグラフは、まさにこの要請に応えるもので、フレアのエネルギー蓄積・解放領域を最もよくみることのできる波長帯 (cm 波) を選び、フレアの鮮明な電波写真を高速で撮影することを目的としている。現在宇宙科学研究所で進められている SOLAR-A 衛星の X 線観測と協力して、懸案となっているフレアの粒子加速・プラズマ加熱などのメカニズムを解き明かし、さらに、宇宙で起こっている類似の高エネルギー現象の理解に役立たせたいと考えている。

フレアは、黒点上層の磁力線に徐々に蓄積されてきた磁気エネルギーが、粒子の加速や加熱として爆発的に解

放される現象と考えられている。解放されるエネルギーの量から推して、磁気エネルギー以外に財源を求めるのは困難である。したがって、フレアのエネルギーがどこにどのように蓄積されていくか、その結果どこにどのような不安定が生じるか、解放されるエネルギーはどのように加速や加熱に転化されていくか、など、フレア物理の基本的な課題に明快な答えをだすためには、上空のフレアループ (磁力線) の形状を観測から知ることが最も重要である。

では、観測からフレアループの形状をどのようにして推察することができるだろうか。エネルギーの高い硬 X 線は、加速された電子とまわりのイオンとの相互作用 (制動放射) を表す。電子の運動は磁力線によって規制されるから、もし上空で加速された電子が下層に降り注ぐなら、硬 X 線で明るく見えるのは磁力線の根元の彩層であろうし、電子が上空に捉えられているとすれば、磁力線上部の形状が見えるはずである。エネルギーの低い軟 X 線は、高温プラズマ (数百~数千万度) の熱放射によるが、高温プラズマは磁力線に閉じ込められているので、軟 X 線で明るく見えるのは磁気ループであろう。一方、cm 波帯の電波は、高エネルギー電子と磁場との相互作用 (磁気制動放射) および高温プラズマの熱放射による。電波観測の利点は強度と偏波の分布から放射領域の磁力線の強さと極性 (向き) を推定できることにある。さらに、可視光では、 $H\alpha$ 線でみえるフレア領域の細かい模様から彩層の中の磁力線の形を推察することができ

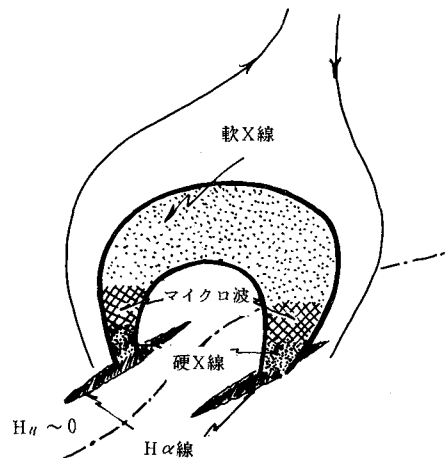


図1 電波・光・X線のフレア像を総合して磁力線の形を推測する。

* 東京天文台 K. Kai: Radioheliograph

るし、またゼーマン効果を利用して光球面での磁場の強さと向きを直接測定することができる。

このように、一つの波長でみる現象はフレアのある一つの側面にすぎないが、もし電波、光、X線と広い波長域で解像力のよい写真が同時に得られるなら、それらを総合的に考察することによってフレアを起こす磁力線の形状を知ることができる(図 1)。前回の太陽活動期には、SMM、『ひのとり』等の衛星によって観測波長域が X線・γ線まで拡張されたことにより、新しい事実が相次いで発見されフレア物理に大きなインパクトを与えたが、これらの波長域ですべての観測データが揃った例はきわめて少なく、とくに電波と X線と同時観測された例が少なかったことが、多様なフレアの性質を調べる上で大きな障害になっていた。

2. 基本的性能とアンテナ配列

フレアのエネルギー解放が起こるのは、コロナの下層数千 km の狭い領域と推測されており、この領域を鮮明に分解してみるには、波長 1~数 cm 帯で数秒角の解像力を必要とする。エネルギー解放は秒程度のきわめて短い時間に起こるので、瞬時 (<1 秒) に撮影しなければならぬ。しかも、フレアは広い (~32 分角) 太陽面のどこで発生するか予測するのは難しいので、太陽全面をみる広い視野が要求される。

(a) 広視野 (~40 分角), (b) 高分解能 (2 次元数秒角), (c) スナップショット (<1 秒) 撮影, さらに (d) 100 : 1 以上の明暗構造を再現できる良好な画質, の四つの条件を電波ヘリオグラフに課す基本性能とし

た。これらを限られた条件 (アンテナ数, 等) で満たすのはそう容易なことではない。できるだけ少ないアンテナ数でこれらの条件を満足する最も適したアンテナ配列はどれか、これは私たちが最も腐心した点であった。種々の角度から考察を行い、計算機によるシミュレーションを検討した結果、最適な配列として提案するのが『多重 T 型配列』である。

図 2 に示すように、東西 560 m, 南北 280 m の T 字基線上に、139 基の小型 (口径 80 cm) アンテナを内側ほど密に、外側ほど粗く配列する: 間隔の異なる T 型配列を多重に重ねたものである。アンテナ間の基本間隔は、ビームの間隔が太陽の大きさより広がるよう波長の 90 倍とした。最も内側の T では、アンテナを基本間隔 (d) で等間隔に並べ、その外側では 2d, さらに外側では 4d, 8d と間隔を広げていく。不規則な間隔をもつ (ランダム) 配列も可能ではあるが、この多重 T 型配列で規則性を持たせているのは、第一にアンテナ組み合わせの冗長度を利用し、太陽自体を較正源とする実時間の自己較正を行い画質の向上を計る、第二に単純なフーリエ変換でもフレア像を得るアルゴリズムが使えることにある。後者は、太陽フレアのように多量の情報を迅速に処理する場合には、軽視できない条件である。

多重 T 型配列を採用することによって、オーソドックスな等間隔の T 型配列と比べて、アンテナ数を ~1/4 に節減することができる。しかも、フレア領域の部分画像については、スナップショット (<1 秒) モードで数秒角の分解能が得られるし、太陽全面像については数十分の超合成により数秒角の分解能を得ることができる。

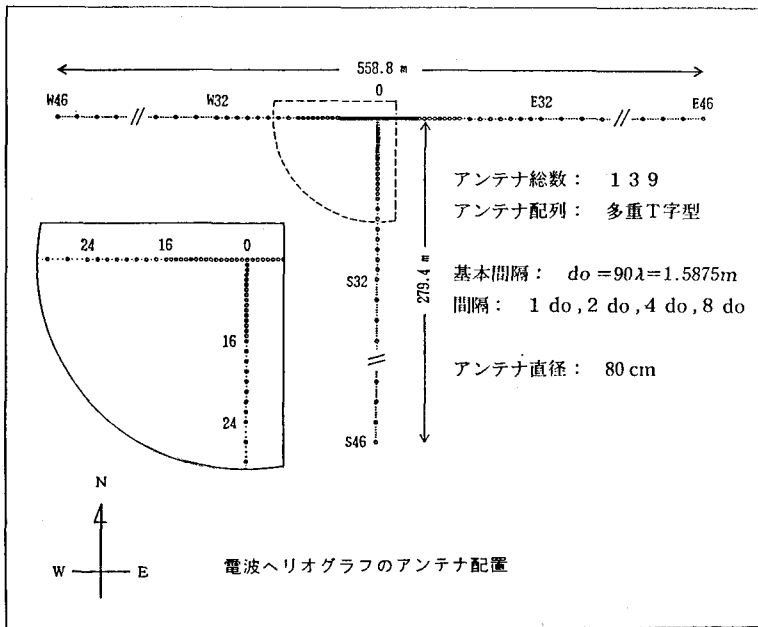


図 2 ユニークな多重 T 型アンテナ配列 (139 基のアンテナを T 字型基線上に、内側ほど密に配置する。)

電波ヘリオグラフの技術的なブレークスルーとしては、非常に数量の多い相関器をどうコンパクトにつくるか、またこれらの相関器から出力される膨大な量のデータをどう迅速に処理するかという問題がある。139 台のアンテナの出力から種々のアンテナ組合せを作り、その間の相関をデジタル（1ビット）相関器で測定する。画像合成および自己較正に必要な組合せ数は ~6000 となり、相関器としては 4 倍（正弦、余弦、左・右回り偏波）の ~24000 個となる。このような莫大な数の相関器を集積化していかにコンパクトに作るかは厳しい課題であるが、幸いわが国のデジタル技術は大変進んでおり、すでに具体的な提案がなされている。

相関器から出力されるデータの取込み速度は、毎秒 24000 ワード、約 50k バイト/秒、1 日 6 時間観測するとして約 1G バイトとなり、これらのデータをすべて光ディスクに記録する。また、10 秒に 1 組の画像を実時間で出力するには、 128×128 の 2 次元 FFT を 4 回行う必要がある。これに対応するには、非常に早い処理能力をもつ計算機システムを必要とする。

太陽面に複数の強い電波源が同時に存在するモデルを想定し、CLEAN をとりいれたシミュレーションによ

り再生した画像の例を図 3 に示した。これはスナップショットをもとに合成した像であるが、超合成によってさらに一桁質のよい画像を得ることができる。

ここで、米国国立電波天文台の Very Large Array (VLA) による太陽観測に触れておこう。VLA は本来時間変動がほとんどない天体を観測対象として設計された宇宙電波用の巨大干渉計であるが、太陽観測にも活用され、フレアや活動域の複雑な微細構造を浮き彫りにした。しかし、VLA は地球回転を使った超合成により像を出力するのが基本であるので、フレアのスナップショット像にはいくつかの重大な欠陥がある。とくに短 cm 波では短いベースラインをもつアンテナの組が少ないために、大きく広がった構造が見失われ、その結果フレアの全体像がわからなくなる。また、画像合成に必要なフーリエ成分が充分ないため、画質が悪く出力された暗い構造がどこまで信頼できるか判断に苦しむケースが多い。それにもかかわらず、秒角を得る高い分解能は大変魅力的であり、もし太陽観測に多くの時間が割り当てられるなら、VLA は電波ヘリオグラフの長所と短所とを入れ換えた相補的な装置となる。

3. 電波ヘリオグラフで何を観測するか

(i) フレア

電波ヘリオグラフがその特長を生かして最も威力を発揮できるのは、変動の激しいフレアの観測である。以下、面白そうな 2-3 の対象をあげてみる。

加速はどこで起こるか

電波で明るく見えるのは、エネルギーの高い（数 10 keV ~ 数 MeV）電子が磁場と相互作用する場であって、加速域そのものではない。しかし、その場の移動を非常に早いシャッタースピードで追いかければ、加速域を逆に辿っていくことができよう（図 4）。電波ヘリオグラフは 1 秒に 1 枚の速度で連続撮影するほか、フレア領域の写真を 50 ミリ秒ごとに撮ることもできる。フレアループの大きさは 1~2 万 km と推測される。50 ミリ秒の間隔で電波源の移動を追うなら、ループの上方で加速された電子が彩層に突入していく経路を追跡することが可能であり、その経路を逆に辿ることによって磁力線の形や加速域を探り当てることもできるだろう。

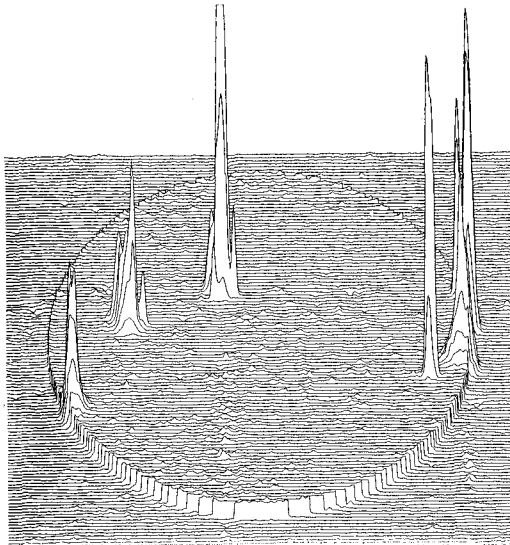


図 3 シミュレーションによる太陽の電波輝度分布（小杉氏による）。

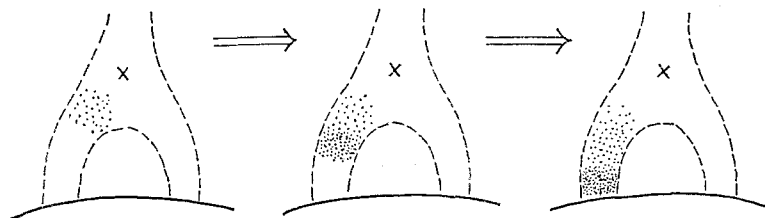


図 4 加速された電子の伝播を 50 ミリ秒ごとの電波写真で追う（矢印は時間の流れを、×印は加速域を表す）。

高エネルギー電子・高温プラズマと磁力線

電波ヘリオグラフの特長の一つは画質の良いことである。電波干渉計や硬X線望遠鏡では非常に明るい領域があると、そのサイドロープのために周辺の暗い構造が隠されてしまう。電波ヘリオグラフでは瞬間的に撮影するスナップ写真でも、最も明るい処の $\sim 1/100$ のレベルまで忠実に再生することができる。たとえば、非熱電子によって輝度温度 10^9K の明るい領域があるときにも、 10^7K のプラズマからの弱い熱的放射を写しだすことができるので、エネルギーの高い電子を閉じ込めているループと高温のプラズマを閉じ込めているループが同じかどうか調べることができよう。また、彩層に降り注ぐ電子によって磁力線の根元が明るく光っているとき、磁力線の上部に捕捉された一部の電子による弱い電波を検出し、これから磁力線の形を知ること、さらに放射モデルを検定することができる(図5)。ちなみに、VLA や硬X線望遠鏡では、最も明るい処の $\sim 1/10$ のレベルまで再生するのが限度である。

フレアは一本のループまたは複数のループで起こるか

X線・ γ 線・cm波では、フレアはスパイク状の激しい時間変化を繰り返す。一つ一つのスパイクは恐らく電子の加速に対峙していると考えられる。加速が同じループで繰り返し起こっているのか、それともスパイクごとに加速領域が移動していくのか、電波源の位置を測定することによって調べることができ、エネルギー解放が孤立した一本のループで起こるか、隣接する複数のループで次々に起こるか知ることができよう。

このほか、広視野を利用して遠く離れた活動領域の間でみられる sympathetic フレア、電子加速とイオン加速との関連など、興味深い観測対象がいくつもある。

(ii) 活動領域、静かな太陽

フレアの温床である活動領域を、その発生から消滅に至る過程を追跡する。とくに、フレアの起こる数時間前から直前まで、磁力線にエネルギーが蓄積され今まさに不安定が生じていく段階で、電波像になんらかの兆候が

顕れないものか、もし兆候が顕れるとするとプラズマの加熱としてか、あるいは小規模な加速として検出されるのか。フレアの前兆は、あってもきわめて微弱なのでもあろうから、VLA のようにダイナミックレンジの狭い装置では検出が困難であろう。電波ヘリオグラフでは静かな太陽の輝度温度 ($\sim 10^4\text{K}$) の $1/1000$ 程度の変化まで検出できるので、 $\sim 10\text{K}$ の温度上昇があれば充分測定にかかるはずである。SOLAR-A 衛星の軟X線望遠鏡と協力して、フレア前段状態が明らかにされていくものと期待している。

一方、太陽の全面像は地球回転を利用する超合成法によって、 $1:1000$ のきわめて良好な写真を撮ることができよう。野辺山宇宙電波観測所の 45m 鏡による太陽観測では、極域がまわりより明るくみえる、全面に細かな構造がある、など興味ある結果が得られているが、このような写真をさらに数倍よい解像力で常時撮ることが可能となる。超粒状斑やコロナホールの構造、それらの時間変化を克明に観測することができよう。

4. 共同利用

太陽の鮮明な電波写真を高速で撮影するヘリオグラフを実現したい、これは太陽電波研究者の長年の願望であり、すでに 10 年以上も前から検討をはじめていた。宇宙電波装置の建設、東京天文台の改組等諸般の事情により実現が遅れたが、1991 年の太陽活動極大期までにはぜひともこれを完成し、SOLAR-A 衛星による X線観測と共同してフレアの研究で世界をリードしていきたいと望んでいる。東京天文台および名大空電研究所の太陽電波グループが協力して、これまでにデザインの最適化、主要部分の開発を終え、64年・65年度の2カ年での完成をめざしている。

電波ヘリオグラフが実現すれば、当然全国の研究者の共同利用装置として運用されることになる。太陽の研究者は、東大理学部、東京天文台、京大理学部、同飛騨天文台、はじめ各大学に分布しており、とくに SOLAR-A 衛星との関連で観測データは積極的に活用されるものと予想される。また、太陽観測の電波望遠鏡として世界で最新鋭の装置となるので、米国をはじめ世界各国の多くの研究者が利用するであろうし、国際的にもきわめて重要な役割を果たすことは間違いない。

太陽の観測終了した夜間には、広視野・高分解能を生かして宇宙の変動性電波源の探索・モニターに活用することができる。検出感度に限度はあるが (>100 ミリジャンスキー)、 45m 鏡などの大型望遠鏡と組んで面白いサイドワークもできそうである。

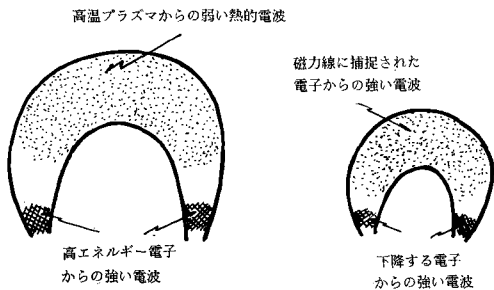


図 5 (a) 高エネルギー電子による強い電波と高温プラズマからの弱い電波。
(b) 降下する電子と捕捉された電子による電波。