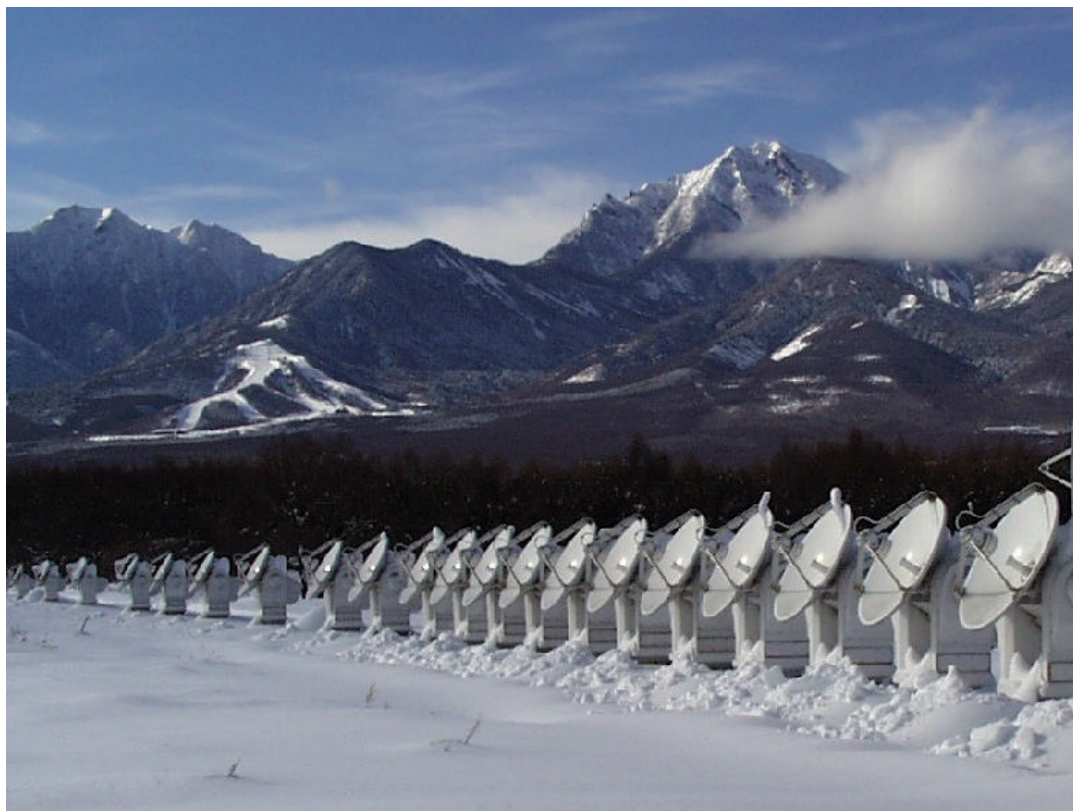


電波ヘリオグラフ10周年



国立天文台野辺山太陽電波観測所



1998 年 10 月清里清泉寮前にて
国際シンポジウム「電波観測による太陽物理学研究」参加者

目次

電波ヘリオグラフとともに10年	柴崎清登	2
隙間商品と決定版	鰺目信三	6
電波ヘリオグラフ二周波化	中島 弘	10
1970年代の野辺山太陽電波観測所	小杉健郎	14
太陽の電波観測	柴崎清登	20
太陽活動におけるプラズマの果たす役割	柴崎清登	22
電波ヘリオグラフによる科学成果	柴崎清登	27

電波ヘリオグラフとともに10年



野辺山太陽電波観測所
柴崎清登

太陽表面に現れる黒点の数は11年で増減します。黒点数が増えると、黒点のまわりで起こる「太陽フレア」と呼ばれる爆発も増えます。ですから太陽フレアの頻度も11年の周期で増減します。電波ヘリオグラフは1992年6月末から毎日太陽を観測していますので、今年で10年、来年には太陽活動周期の1サイクルを観測することになります。電波ヘリオグラフは、太陽表面で発生する電波を受けるための専用の望遠鏡で、おもに太陽フレアに伴って発生する電波をとらえることによってフレアの原因をさぐろうとつくられました。観測をはじめた1992年6月は太陽活動の下り坂でしたが、1995年の極小期のあと、2000年4月に極大期を迎えました。電波ヘリオグラフにとってはじめての極大期です。この間に、大規模な太陽フレアをたくさん観測することができました。特筆すべきものとして、太陽フレアによってほとんど光の速度まで加速された電子が飛んでいるようすを動画としてとらえたことがあげられます。また、今までの太陽フレアの理論に対して、新たな理論を提案できたこともあげられます。これらを含めた科学的成果は別に詳しく述べます。

現在の太陽研究は10年まえとくらべても夢のような研究環境にあります。電波ヘリオグラフの完成もそうですが、これ以外にも、太陽観測専用の人工衛星がたくさん打ち上げられ、観測を行っていることです。ようこう、SOHO、TRACE、RHESSI衛星などです。もちろん地上からの光

観測は世界中で行われています。太陽観測が他の天体観測とちがう点は、そのデータの多さです。特に太陽フレアを観測するには、広い視野内を細かく、さらに高速で撮像を続けなくてはなりません。また、さまざまな装置で同時に同じフレアを観測しなくてはなりません。太陽フレアの研究をするためには、これらのデータを集めて重ね合わせ、それらが時間とともにどのように発展していくかを解析しなくてはなりません。多くのデータを解析できること、さまざまなデータが自由に利用できること、短時間に利用できることなどの条件が必要です。最近の計算機技術の向上、ネットワーク網の充実、それにデータ提供者がデータ所有権を強く主張しないことなどにより、条件が満たされてきました。今や衛星データも含めて、観測されたデータはすぐインターネット上で利用できるようになっていました。電波ヘリオグラフのデータも世界中から見られるようにしています。フレアが発生すれば詳しいデータもホームページに載せています。パソコンがあり、インターネットがつながっていれば各家庭からでもデータを見ることができます。

(<http://solar.nro.nao.ac.jp>)

これだけデータがそろい、世界の叡智をもってしても太陽はフレアの原因を明らかにしてくれません。われわれは人類の持つ最先端技術を駆使した観測装置を地上や宇宙空間に配置し、これらを総動員して観測をしています。そこからのデータを共同で解析しています。われわれの電波ヘリオグラフのそのなかのひとつです。国内の太陽研究者を集めてデータ解析の研究会を定期的で開催しています。また、外国から研究者を招待して共同研究を行っています。野辺山を太陽電波研究のメッカと称してくれた研究者もいます。アメリカには野辺山電波ヘリオグラフのデータを中心とした研究グループがあります。プラズマ物理学、電波物理学の進んでいるロシアからの研究者も多く野辺山に滞在しています。1998年には「電波観測による太陽物理学研究」というテーマの国際シンポジウムを清里清泉寮にて開催し、電波ヘリオグラフによる研究成果を中心に、電波観測による太陽物理学研究、さらに太陽物理学一般まで広げたテーマについて発表と議論を行いました。来年は太陽活動1サイクル観測となりますので、再度このようなシンポジウムを開

催したいと考えています。このような研究会、研究者の交流を通して太陽のなぞにせまっていきたいと思っています。私個人としては、最近その糸口をつかんだ気がしています。世界中の研究者がそれを認めてくれるには時間がかかるかもしれませんが。国内は最後かもしれませんが。

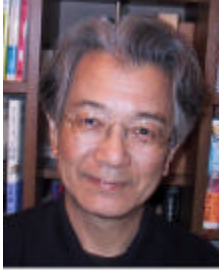
太陽活動のエネルギー源は中心核での核融合反応です。そのエネルギーが表面まで伝わって、温度6千度の光球があるわけですが、その上空に温度百万度のコロナがなぜできているのかはまだなぞです。それを明らかにしようというのが宇宙科学研究所の次期太陽観測衛星 SOLAR - B です。光・紫外線・X線の望遠鏡をそなえ、太陽表面の細かな構造の変化とその上のコロナの関係を調べようとするものです。電波ヘリオグラフは SOLAR - B がめざすような細かな構造は見えませんが、細かな構造から大きな構造にエネルギーや物質が供給され、最終的に大きなフレアとなる部分が観測できます。電波ヘリオグラフの使命として、SOLAR - B との共同観測があります。コロナへのエネルギーと物質の供給から、最終的にフレアとなってさらに惑星間空間に供給される過程全体を理解してはじめて太陽活動が理解できたことになるからです。SOLAR - B衛星の打ち上げ予定は2005年ですので、それから何年か共同観測をしたいと思っています。また、アメリカで、野辺山電波ヘリオグラフの後継機に対応するような太陽電波望遠鏡の建設を計画しています（FASR計画）。電波ヘリオグラフの空間分解能を10倍よくし、さらに非常に広い周波数で観測できる装置です。その建設予定が2008年ですので、それまでは電波ヘリオグラフががんばって、後輩に道を譲りたいと思っています。しかし、1992年から蓄えたデータは膨大なものです。電波ヘリオグラフだけではなく、各種衛星データも揃っています。今後もこのような恵まれたデータセットはなかなか実現はむずかしいと思います。これらのデータが十分生かせるような環境を整備し、新たなフレア理論やコロナ加熱理論が出てきてもそれに応えられるようにしておきたいと思っています。

電波ヘリオグラフは17GHzだけの観測として始まりましたが、その後

1995年には34GHzを加えた2周波観測となりました。その開発の苦労については、中島さんの記事を参考にしてください。電波ヘリオグラフを作った技術は、東京大学東京天文台野辺山太陽電波観測所および、名古屋大学空電研究所太陽電波部門で培われてきたものです。国立天文台の発足にあわせて、これらふたつのグループがいっしょになり、電波ヘリオグラフを実現しました。実現にあたってはさまざまなひとびとから直接、間接に支援をいただきました。ここでそれらのかたがたをすべてあげることはできませんが、特に亡くなられた小田稔先生、早川幸男先生、田中春夫先生、それにいっしょに建設を進めながら、完成間際に亡くなられた甲斐敬造先生に感謝し、ご冥福をお祈りいたしたいと思います。完成後10年間の運用にあたってはみなさまにご援助いただき感謝いたします。いままでのみなさまのご支援に応えるのは電波ヘリオグラフからの研究成果です。世界の太陽研究者とともに電波ヘリオグラフの特徴を生かした研究によりフレアを中心とした太陽活動のなぞを明らかにしていきたいと思っています。



隙間商品と決定版



鰐目信三（元太陽電波観測所長、国立天文台名誉教授）

隙間商品という言葉は商業用語で、ニッチという仮名文字を使うこともあるらしい。新しい概念・用途などを盛り込んで消費者の購買意欲を掘り起こそう、と言うもののようである。決定版の商品にどのように成長するのか、あるいは決定版は全く別の発想から生まれて来るのか、詳らかではない。

昔、電波天文学研究が日本では太陽電波に限られていた頃、どうやって宇宙電波を始めるか？が初期には茶飲み話、酒の席であった。商業ビジネスがいまほど持て囃されていなかったし、戦争の名残あるいは冷戦時代の中だったからか、ゲリラ戦法、大艦巨砲主義とか最終兵器などと物騒な言葉を使って、新しい観測方法、観測分野の開拓を電波天文で模索していたと記憶する。

電波天文懇談会とか宇宙電波懇談会を組織して従来とは異なる局面が少しずつ開かれ、野辺山に電波天文の一大センターが築かれ、赫々の成果、多くの人材等などは今日に及んでいる。

次は何か？は地上はアルマ（ALMA）計画、スペースではVSO P-2。今はベラ（VERA）望遠鏡。

ベラ望遠鏡は日本国内に張った電波干渉計網でわが銀河の果てまで測量しようと言う工夫が盛り込まれ、意欲を感じさせるユニークな装置である。しかし、米国のVLBA望遠鏡に比べるとある目的に特化されていて、ゲリラ的、ニッチな性格が濃厚である。それだからこそ日本で建設することが認められた、とも言えよう。

V S O Pは競争相手が次々と様々な事情で実現出来なくなるという幸運？に恵まれて、スペースからのV L B Iの分野で世界にさきがけることが出来て、成果も上げた。この実績は極めて大きく、これを踏まえてV S O P－2を日本が主導権を持って是非実現したいものである。

アルマ計画は野辺山ミリ波干渉計の自然な発展型の一つで、日米欧三極で一つの装置を作ろうという流れであった。しかし、アメリカと欧州では予算がついて、日本がつかない、と言う変則的な状態になっている。日本が世界に互して計画に参加できる数少ない分野なのだから何とかならないかなどと単純な考え方についてはまりたくなる。

スバル望遠鏡に匹敵する大きな予算規模になると今日本がおかれている経済的な混迷とまともに関わってくるだろうと想像される。そもそも高度経済成長の時期に基礎科学にも力を入れて、一流の国家になるという話もあったような気がする。オイルショックの危機も乗り越えて、愈々欧米に並ぶのか、なんてこれまた単純に思っていたら、あれはバブルだった、バブルは弾けるものなのだ、と説明された。後から考えると、電波ヘリオグラフを作り始めた頃はバブルの最盛期であつたらしい。建設用重機が中々割り当てられなくて工期が遅れそうな事がしばしばあった。失われた十年という言葉があったが、何年失われ続けるのか判らなくなってきた。元気の良さそうな内閣が出てきたが、その勢いも元気も化けの皮が剥がれ始めたように見える。

昨年(2000年)の11月に立花隆が北京大学で「『解説日本』－日本の1940年体制の起源とその崩壊＝日本第三革命の行方」と題して集中講義を行った。その抄録が雑誌「現代」の平成14年3月号に掲載されている。題目は現代史が証明する「小泉純一郎の敗退」という刺激的なものである。1940年体制と呼ばれる戦時総動員体制の主要部分が現在もそのまま生きていて、この仮説はあの野口悠紀雄が唱えたもの、これが硬直した現在のシステムの根幹である。これを構造改革しないと日本経済の根本的な復元はない。この判断は野口悠紀雄が唱え始めたものだが、立花隆は小泉内閣に当てはめている。立花

隆の刺激的な副題の論拠としては、小泉内閣の経済閣僚、経済ブレーンが40年体制まで溯ってその欠点、良い面をわきまえて、構造改革を行う姿勢がないので、小泉改革は敗退するだろう、である。

40年体制については野口悠紀雄の「1940年体制」、東洋経済新報社、があり、また同じ著者の「日本経済再生の戦略」中公新書、は40年体制をどう打ち破るかをかなり具体的に記述して面白い。「1940年体制」とは「日本的企業、日本的経営、日本的労使関係、日本的官民関係、日本的金融制度など、日本経済の特徴として通常指摘されるさまざまな要素が、1940年頃に戦時体制の一環として導入された」とする考えである。これらに加えて、食糧管理法、借地借家法などなどあらゆる面で戦争遂行のための法整備が行われた。敗戦後これらはどう言う訳か温存され、後に高度経済成長のエンジンとして働き、冷戦構造の中で自由主義経済？の一翼を担うことに役立った。高度経済成長が世生活を豊かにした反面、公害に象徴されるような負の側面があったが、40年体制の反省に至らないうちに、石油危機でも復元力を担う力を見せてしまった。そして、バブル、引き続く混乱。

長々引用してしまったが、経済の話のほかにも面白い、気になる指摘がある。戦時体制の影響の一つに「競争は悪であり、協調こそ望ましい」という考え方があるという。こう言われると自分はどうかだったかな？と反省するが、余りはっきりしない。話は飛ぶが、TRONで良く知られている坂村健の「情報文明の日本モデル」PHP新書を読むと、これは力が湧いてくる数少ない本の一つだ、個人でなくチームで働くことと長所が出てくる日本人、と言う表現に出会う。この表現を最初見た時には成る程、我々もそうだったかな、くらいに軽く納得した。その後野口悠紀雄の中公新書を読んで、おや？と思った。セロトニンなる脳内物質の影響だとか、遺伝子に関わっているなどと言う話になると、おやおやと眉に唾してしまう。

「四十年体制」のお手本はドイツ（当時ナチス）で日本の官僚が練り上げたという。では本家のドイツは敗戦後どうなったか？イタリアは？枢軸国だけ

でなくイギリス、フランスはどうであったか？などについては前掲の二書には言及した記述がない。これらの国々がE C・・・E Uと国を越えて経済的に統一しようとするようになったこととどう関わっているのか？判らない。しかし、もしこのような戦時体制から意識的に脱却しているのであれば、日本だけが戦時体制の遺産を引きずっていることになる。そう言えば、欧州の天文ジャーナルが合併したのは60年代だったと記憶している。その後大型計画、衛星計画の共同建設・推進が行われて来ている。アルマ計画はこの延長線にある。

A LMA計画を実現するにはこうした時代背景あるいは現実を知っていると良い局面があるかも知れない、と感じたので不適切、不勉強、不十分を省みず、あれこれ読みかじったものを書いた。野口悠紀雄の言葉をまた引用すれば、企業間の競争が激化するだけではなく、政府間の競争も生じる「大競争時代」において、国と国との間の競争に日本が生き残れるかどうか。これが二一世紀に向っての日本の問題だ。現在の制度のままでは、日本がこの競争に生き延びて行くのは困難である。国立天文台なども企業みたいにこれからは一層こうした競争に参加することになるだろう。

1940年体制という言葉を使うようになったのは93年だという。10年近く経つ訳だが作業仮設から定説への変り目だろうか。面識のある昭和の思想史を研究されている人に40年体制の本のことを尋ねたら、読んだが、あれは荒っぽい話だ、と決め付けられた。作業仮設の段階ではそれは許されるように思うのだが、文学の世界ではそうではないらしい。それなら自分で仮設の検証するような勉強をぼちぼちするか。



電波ヘリオグラフ二周波化



中島 弘

電波ヘリオグラフが実質的に完成したのは、1992年の6月ですから、今年の6月でまる10年が経過したことになります。月日の経つのはこんなに早いとは、改めてビックリしています。

1992年6月に完成した電波ヘリオグラフは、17GHz一周波で太陽の観測を始めました。電波ヘリオグラフは、建設の当初から17と34GHzの二周波における観測をめざしていましたので、一周波での完成は第一期工事の完成ということになります。太陽フレアの解明をめざす電波ヘリオグラフにとって、光学的に薄い周波数帯に2つの観測周波数を持つことは、フレアから発生する高エネルギー電子のスペクトル情報をうるためにどうしても必要だからです。そこで、第一期工事の完成後、直ちに二周波へのグレードアップの検討に入りました。二周波化の工事としては、34GHzのフロントエンドと二周波化の光学系、データ収集のためのソフトウェア、が主なところですが、34GHzのフロントエンドは、西尾さん（現鹿児島大）と私が中心となって進めましたが、17GHz電波ヘリオグラフを製作する過程でメーカーとは検討を続けていたこともあり、比較的順調に進みました。特に新しく開発が必要だったのは、二周波を同時に受信するための光学系でした。この光学系については、2～3の方法を検討しましたが、（1）従来の17GHzにおける円偏波測定などの高い性能を落さない、（2）アンテナは84台もあるので製作・調整が比較的短時間でできること、（3）安価である、などの条件を満たすものとして、従来のアルミ製の副鏡を周波数選

択膜（この場合、17GHzは反射し、34GHzは透過）を施した副鏡に置き換える方式が提案され、鷹野氏（現千葉大学）と入交氏（現通総研）によって数年前から基礎実験が行われてきました。周波数選択膜副鏡本体の素材についても、さまざまな試行の結果を踏まえ、周波数34GHzで低い挿入損失を示し、変形がしにくい、セラミックが選ばれてきました。このような経過を踏まえ、二周波用副鏡の開発は、えのめさんをヘッドにおき、鷹野氏を実質的な責任者とし、私、技術系の職員が加わって、始まりました。

周波数選択膜副鏡は、セラミックを副鏡の形に成型し、その上に金属（実際は金）の周波数選択膜を貼り付けて、出来上がりとなります。周波数選択膜は、エルサレムクロスを抜いたパターンで、34GHzでは比較的狭いバンドパス特性をもちます。このバンドパス特性は、パターンの精度ばかりでなく、周波数選択膜を貼り付けたセラミックの厚みや誘電率の精度に依存します。さまざまな精度計算をした結果、製造工程の厳しい管理や、高い精度でセラミックを加工し金膜を形成する技術が必要ながわかりました。セラミックは非常に硬いので、精度の高い研削には高い技術が必要ですし、野辺山の過酷な気象にさらされる周波数選択膜の製作にも、最新の技術が必要です。さらに、高周波回路のためのセラミック基板を製造するセラミック会社は多いのですが、ミリ波の高周波技術とセラミック加工技術を合わせもつ会社は完無で、しかも電波天文のこのような副鏡の製作に興味を示してくれた会社は、一社だけでした。結局、副鏡の製造は、副鏡本体と周波数選択膜の製作にともなう工作精度（セラミック加工会社）と高周波測定技術（天文台）を結合して進めることになりました。このような体制の下では、相互の関係を緊密にして、個々の工程でなにをどうすれば最後の電気的特性に跳ね返るかのパラメーターを、きちんと押さえていく必要があります。幸いに、セラミック加工会社も特別な体制をとってくれ、1995年夏までには満足すべき特性をもった84台の副鏡の製作にこぎつけました。34GHz用の受信機を取り付け、副鏡を取り替え、各種ソフトを取り付けて、総合調整を終えたのが同年10月でした。

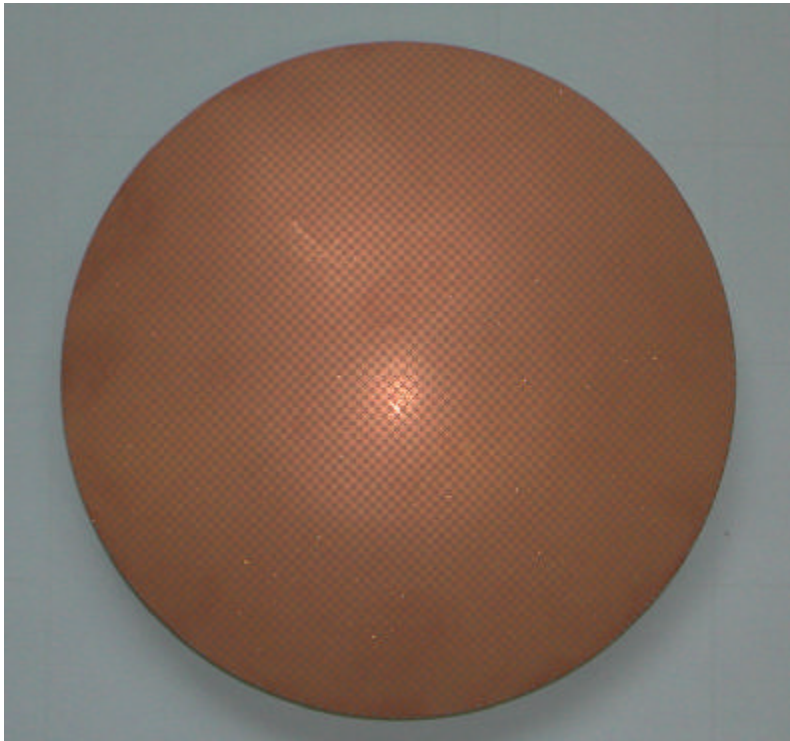
さて、これで電波ヘリオグラフの初期計画は完了したので、今後はデータ解析に専念できると喜びました。そんな折、第二期工事が終了してから二年目の1997年の夏、アンテナの点検中にセラミック副鏡10枚ほどに、ひび割れが発見されました。このときは、さすがに青くなりました。さいわい傷は小さく、二周波観測には支障がありませんでしたが、放っておけばセラミック副鏡の落下という事態の可能性もあります。このとき既に鷹野さんは他の大学に転出された後なので、私がこの事態の解決にあたることになりました。早速、技術的な面からの検討を行いました。セラミックは温度膨張係数が小さく、副鏡を取り付けている金具のアルミは温度膨張係数が大きく、野辺山の気象条件では夏冬の温度変化は50℃以上もありますので、セラミックと金属の接触部分に時に過大な破壊性の応力が発生する可能性があります。特に、セラミックは引っ張り応力に対しては、大変弱いのです。セラミック副鏡をアンテナに取り付けるための取付金具の設計では、セラミックとアルミの膨張係数の違いを逃す工夫は一応されていたのですが、結果的にこのような事態を招いてしまいました。外部の専門家を加えた検討の結果、原因はある程度特定され、その回避策も提案されました。このような中で、セラミック副鏡の製作グループの体制にも問題がなかったかどうか、検討のメスを加えました。電波ヘリオグラフは小さなグループですがグループ員の意見が十分出せるような体制であったか、メーカーの自主性を十分引き出せる関係であったかなど、を反省しました。

このような検討の上にたち、副鏡としての性能の向上もめざし、副鏡の改修作業にはいりました。引っ張り応力がほとんどかからず、圧縮応力をつかってセラミック副鏡をアンテナに取り付ける方法を、新たなセラミック加工メーカーとの協力の下に考え出しました。再度の副鏡改修には、ほぼ2年がかかり、最終的に完了したのが、2000年の7月でした。この間、ほとんど観測の中断がなく、改修工事を進めることができました。

最近、NASAや宇宙研の衛星打ち上げに伴う不具合やカミオカンデの事故、などを知るにつけ、他人事でなく気になります。不具合や失敗は、案

外簡単なことの見落としから起こる場合も多いようです。それらが、大きな問題につながらないうちに、発見されるような仕組みが必要なのだろうと思います。

2001年の太陽活動極大期は、電波ヘリオグラフも二周波観測で迎えることができ、ますます成果が期待できそうです。残念ながら、2001年3月でわたしは定年になってしまいましたが、これまでの分を取り返すべく、データ解析を進めているところです。



1970年代の野辺山太陽電波観測所

―― 野辺山電波ヘリオグラフ10周年に寄せて ――



宇宙科学研究所 小杉 健郎

野辺山を初めて訪れたのは1974年の3月か4月のことだったと記憶している。内田さんの指導のもとに『太陽電波移動性IV型バースト電波源構造の MHD 理論モデル』というタイトルの修士論文を書き上げたものの、自分自身そのモデルに納得がいかず、また内田さん、甲斐さんから「お前には理論的工作より観測的工作の方が向いている」「どうだ、観測の現場で働かないか」と促されて、なにはともあれ現場を見てやれという気持ちで野辺山にやってきた。

当時の野辺山には、今のように立派な施設はなにもなかった。村道から太陽電波観測所の建物へは愛岳寮の前から信州大学農場沿いの未舗装の道を通っていた。この道沿いに平屋の官舎が6軒並んでいた。観測所は小屋と言った方が似合うような代物で、西側の部屋に160メガヘルツ干渉計、動スペクトル計、17ギガヘルツ干渉計の受信機と、OKITAC のミニコンがところ狭しとばかり並べられていて、廊下は磁気テープの棚で埋まっていた。わずか10畳ばかりの1室が研究室で、ここに甲斐さん、中島さん、平林さん、関口さん、餐場（現・川島）さんが机を並べていた。そこに三鷹から塩見さん、桑原さん、沢さん、大学院生では栗原さんが交代で出張に来ていたわけで、ここに私が加わった。記憶が定かでないが、これだけの人があんなに狭いところに机を並べられるとは思えないから、多分、玄関わきの小さな部屋も居室に使っていたのではないかと思う。

野辺山太陽電波観測所が開設されたのは1969年のことだ。赤羽さんがまとめた「日本の電波天文学」（日本ITU協会発行、『ITU研究』第58号、1976年）には、三鷹地区におけるメートル波の太陽電波の観測が激しい混入電波に悩まされたこと、1961年頃より新たな観測適地探しを行ったこと、3年間に及ぶ消耗的な候補地探しの結果として現在の野辺山地区が選定されたこと、1967年から160メガヘルツ干渉計の建設が始まったこと、1969年には17ギガヘルツ干渉計ともども完成に至ったことが記されている。

甲斐さんからは開設当初の苦労話を、愚痴としてではなく面白い昔話でもあるかのような調子で、さんざん聞かされた。ご家族を伴って官舎に入ったものの、11月には台所北側の壁のなかを通る水道管が凍りつき始め、12月になったら全面凍結して、ご家族は実家に「避寒」に行き、甲斐さんは愛岳寮に寝泊りしたそうだ。また、村道の道普請のための利用者負担金の強制割り当てに悩まされた話は、なんだか焼け跡闇市の時代の話の聞かされているようだった。こんなことを書き出すときりがないし、またこのあたりの話は伝聞で書くしかない私よりもっと適任者がいるので、省略する。

それから5年、私が訪れた野辺山は、しかしこの甲斐さんの苦労話の世界からあまり大きくは変わっていない。あいかわらず官舎は寒く、ただ水道の配管は壁のなかから室内空中配管に変わっていて、ヒータと断熱材で手厚く保護されていた。冬の観測所は雪が降ると陸の孤島になりかねない。研究を放り投げて、雪かきが最優先課題だ。頼るべき機械力もなく、スコップを握る人力だけで官舎と観測所の道を確保した。朝からこれをやると昼にはもうぐったり、喉が乾いてビールがうまかった。そして昼食後また雪かき。疲れはて、観測は機械任せだったこともしばしばだった。

当時の160メガヘルツ干渉計はアナログ記録からOKITACミニコンを用いたデジタル記録に変わったところだった。このミニコンは16ビットマ

シン、メモリサイズが4 kワードから16 kに拡張されたばかりで、アセンブラと機械語を併用してプログラミングする。この辺りは平林さんの専売特許のような分野で、私もしばらくしてからお手伝いすることになった。観測はデジタル化したものの、それまでの観測結果はアナログテープに収められている。このデータの処理が大変だった。160メガヘルツ干渉計は東西それぞれ1次元の干渉計で、東西系の場合、64チャンネルの出力がアナログテープに記録されている。データを取り出すには、まずアナログテープを8チャンネルのペンレコで再生する。これを8回繰り返して得られる時系列データを並べ、1次元位置と時間とをパラメータとした2次元空間上の電波強度を色鉛筆で色づけして、電波源位置と構造の時間変化を得るという原始的な方法で、時間ばかり食って、労多くして成果の得にくいものだった。

しかも160メガヘルツ干渉計は真空管を使っていて、位相が安定しない。干渉計のビームが簡単に乱れてしまうのである。ところが往々にして、興味深い太陽電波バーストはビームが乱れているときに発生する。ペンレコから読み取った電波強度をデジタル化し、これを大型計算機にかけてフーリエ分解し、アンテナ毎に位相の補正を加えた後に逆変換してやれば、あたかもきれいなビームで観測したかのような画像が得られるはずである。アメリカの人工衛星が観測した白色光コロナ擾乱（現在ではコロナ大規模噴出現象；CME と呼ばれる）に対応する移動性IV型バーストをこうして確認できたときの嬉しさは忘れられない。これが私の野辺山での最初の仕事となった。恐らくこの仕事が評価されてのことだと思うが、私は1976年に観測所の助手に採用された。

他方、17ギガヘルツ干渉計はビームを天空上に固定し天体の通過を待ち受ける位相トラッキングなしのドリフトスキャン型の干渉計であったので、太陽電波源の1次元画像が時系列として直接得られる。観測時間中にリアルタイムで(1次元)画像が見られるものの、時間分解能が決定的に不足する。要するに、どちらの干渉計も当時の太陽電波観測の国際水準に達していなかった。

それでも当時の野辺山太陽電波観測所には「なにか」があった。まずは、動スペクトル計が発する太陽電波バーストの発生を報ずるアラーム音。これは太陽からの電波雑音強度が左右円偏波切換えにより変調されることを利用したもので、無偏波のバーストのときにはただザーザーという雑音性の音が、偏波率の高いバーストの場合は偏波切換えの周波数に対応したピーというきれいな音が出る装置で、すぐにこの音を聞くだけで何が起きているか判断できるようになった。アラーム音に誘われて観測室に行き、オシロスコープ画面で160メガヘルツのバースト位置を確認し、それからおもむろに17ギガヘルツ干渉計のペンレコの動きを待ち構える。これを繰り返すと、ひとつひとつのバーストの「個性」が予測できるような気がしてくる。次に何が起ころかを予測しつつ、時々刻々の変化を見つづけることで、しだいに現象の規則性・法則性が分かってくるのだ。だいぶ後のことになるが、太陽フレアの前兆現象についての論文を甲斐さん、中島さんと一緒にまとめることができたが、これも幾分かはこのような観測経験に裏打ちされたものである。

当時の野辺山の魅力をもうひとつ。なにしろ皆が若かった。「よく学び、よく遊べ」を文字どおり実践していた。夕刻、仕事が終わって帰宅の時間に誰かが「定刻ホテルに集まろうか？」という声をかけるともう止まらない。これは「マージャンをやろう」の符牒で、定刻とは午後8時、定刻ホテルとは官舎の1室のことである。「今夜はジャン業だぞ」とも言った。常連は甲斐さん、関口さん、それと三鷹からの出張者で、それぞれ誰かに責任を押しつけて、さも自分が首謀者ではないかのような言い訳をしつつ、定刻ホテルに集まる。このマージャンの勝敗の記録は「日々の精進の記録」としてノートにまとめられていたが、この記録をいま誰が保有しているかは分からない。狭い閉鎖社会のことだから金はいっさい賭けずに名誉をかけて勝敗を争った。

マージャンに飽きると定刻ホテルはそのまま研究打合せの場所が変わっ

た。満足な装置もない野辺山でなぜがんばるのか、次はどのような装置を作ればいいのか、というのが主要なテーマで、夜を徹して議論することも稀ではなかった。甲斐さんが、世界に通用する特徴ある本格的な装置をいつか実現したい、としみじみと言っていたことは忘れられない。これは当時の野辺山太陽電波観測所に集った全員の思いであった。

とにかく、現有の観測装置がおんぼろだから、いろいろな試みをするに躊躇しなかったことも特筆に値するかもしれない。音響光学素子を使った電波スペクトル分析に甲斐さんが目をつけて、私を誘い、医療用超音波診断装置やファクシミリ用音響光学素子（トランスデューサ）を開発中の松下技研やら電電公社武蔵野通研を訪れたことから始まった音響光学型スペクトル計の開発は、これらのメーカーがさいわい広帯域トランスデューサを開発中だったこともあって、比較的短い時間で実用化にこぎつけることができた。この開発は後ほど、高分散トランスデューサを用いた音響光学型宇宙電波用電波分光計につながっていく。

各アンテナからの電気信号を音響光学素子で光信号に変え、光の干渉により電波干渉計の画像合成をアナログ的に実現しようという突拍子もない試みにも着手した。スペクトル計では周波数方向に1次元CCDを置いて検出器とするが、今度は多素子の音響光学素子を並べてそこからの出力を互いに干渉させ、その細かな干渉縞を大きな倍率のレンズで拡大して、やはり1次元のCCDで検出する。原理的には問題なく確かに画像が得られたが、なにぶん干渉縞が細かすぎて、安定的に働かせるのが難しかった。結局、観測所の環境下では空調の入り方ひとつで画像が揺らいでしまって、実用にはならなかった。アイデア倒れだったわけである。

70年代も終わり近く、我々は観測所の存亡をかける思いで、17ギガヘルツ干渉計の大幅改修を行った。12基のアンテナに2基を追加し、これを10×4基の掛け算型干渉計のアンテナ配置に変えて、解像力を3倍化する。受信方式としては40個のアナログ相関器を用いて40個のフーリエ成分

を取得し、計算機でフーリエ合成を行って画像を取得する。高画質を保証するため、隣り合うアンテナ対にも相関器を追加し、これを利用して太陽自身を較正源として自動位相較正を実現する。以上のような大幅改修により、この干渉計は当時としては世界に比類のない高時間分解能観測を実現することができた。科研費に観測所経費を継ぎ足して実現したこの新しい17ギガヘルツ干渉計の威力は素晴らしく、これによって「ひのとり」、SMM によるX線観測とタイアップしての太陽フレア研究が可能となったと言えよう。

70年代から80年代前半までに我々が仕上げた太陽電波観測装置は、まだまだたくさんある。160メガヘルツ干渉計のソリッドステート化、同じく相関器化、自作のフーリエ変換器による160メガヘルツ干渉計の実時間モニタ、35ギガヘルツ偏波計、2素子干渉計で「静かな太陽」成分を打ち消すことで実現した80ギガヘルツ強度計、等々。

こうした数多くの試みを踏み台として、同様の長い歴史と経験を有する名古屋大学空電研究所の太陽電波グループと共同して、日本の太陽電波研究の集大成として提案されたのが「野辺山電波ヘリオグラフ」である。その10周年の機会にあたり、思い出すままその前史を綴ってみた。(2002年5月6日記)



太陽の電波観測

野辺山太陽電波観測所

柴崎清登

(国立天文台ニュース No.86 より抜粋)

八ヶ岳の裾野、野辺山高原に小さなパラボラアンテナをたくさん並べて太陽から来る電波を受信しています。小さなパラボラアンテナを並べて太陽表面から放射される電波の強さの模様を詳しく観測するというアイデアは純国産のものです。当時大阪府立大学におられた小田稔先生が提案され、名古屋大学空電研究所の故田中春夫先生が実現されました。ほぼ同時期にオーストラリアでも建設されましたが、それぞれ独立になされたものです。この伝統を引き継いだものが現在の野辺山電波ヘリオグラフです。

野辺山は冬季の気象条件の非常に厳しいところです。最低気温が零下 25 度以下になったり、日中の最高気温が零下 10 度以上にならないこともあります。日本列島で海岸線から最も離れた地点（臼田町）に近く、比較的乾燥していて雪も少ないのですが、それでもかなり降ります。少々雲、雨、雪でも電波では観測ができますので、観測装置が故障したり、停電になったりしないかぎり欠測はありません。しかし、パラボラアンテナに雪がたまってしまうと、眼鏡が曇った状態になり、電波が集まらず太陽が見えなくなります。ところが、冬は日中でも太陽の高度が低く（だから冬なのですが）パラボラ面が立ち、低温のためにさらさらの雪ですから、パラボラ面には積もらず落ちてしまいます。自然の仕組みがうまくできていることを感じます。春先に降る湿った雪はこうはいきません。信州ではこのような雪のことを「上雪」と呼びます。パラボラ面は上を向き、湿った雪はパラボラ面にべっとり着きます。700m にわたって散らばった 84 個のパラボラアンテナの雪落としはたいへんですので、たいていはかまわずに太陽を自動追尾します。雪が止んで太陽が雲間から顔を出すと、その熱でパラボラ面の雪が解け始め、緩んだ雪がどさっと落ち、自動的に観測が再開できます。太陽がわれわれの観測

に協力的であることを感じます。他の天体ではこうはいきません。

自然の仕組みや太陽はわれわれの観測に協力的ではありますが、いったんその秘密を暴こうとするとそうはいきません。大規模な太陽フレアやプロミネンス爆発のような非常に興味のある現象は観測時間外か観測装置が故障している時に起こるということは世界中の太陽研究者が感じていることです。太陽全面が視野におさまらないような望遠鏡では、太陽面上のどこの活動領域を観測するかを選ぶわけですが、ねらった現象はたいてい別の活動領域で起こります。太陽活動の基本がまだわかっていないためその活動が予報できないからです。正確に予報ができるようになるということは研究が完成するときです。地上の光や電波による観測に加え、現在では3つの人工衛星が太陽の観測をしています。野辺山電波ヘリオグラフでとらえた現象を解析しようとして、他の地上観測データや衛星データを探すと、肝心なところはなかなか揃いません。

西暦 2000 年は太陽活動 11 年周期の極大期にあたります。ここ 2～3 年は非常に活発な現象が数多く発生します。いかに太陽がその正体を隠そうとしても、数多く発生すればそのうちいくらかはわれわれが張っている観測の網にかかり、その正体をさらすことになります。そのときわれわれがそれを理解するためには、正しい理論的枠組みを持っていないければなりません。最近の観測データを解析していて感じるのは、いままでに構築された枠組みでは理解できない現象がほとんどで、あらたなものが必要となっているということです。

太陽活動におけるプラズマの果たす役割

ー新たな太陽フレアシナリオー

電波天文学研究系 教授 柴崎 清登

(国立天文台ニュース No.103 より抜粋)

太陽の上層大気であるコロナは高温で数百万度にも達しています。なぜ6千度の光球の上層に数百万度のコロナがあるのかは太陽の大きな謎のひとつで、太陽物理学にとって非常に重要な研究テーマですが、これについては最後に少し触れることにします。主に水素から成る高温のコロナは、電離して電荷を帯びた陽子と電子が別々に運動をするプラズマ状態になっています。一方、太陽大気には磁場があります。特に、黒点を含む活動領域は強い磁場で満ちています。磁場中では、電荷をもった粒子は磁場に巻きついて螺旋運動をし、磁力線に束縛されています。つまりプラズマが磁場で閉じ込められた状態になっています。プラズマが希薄な場合には、その運動は磁場によって支配されますが、濃くなると逆にプラズマが磁場を支配することになります。プラズマの持つ熱エネルギー密度と磁場エネルギー密度の比をベータ値と呼び、その値によって大気の性質が大きく変わります。気体の持つ熱エネルギーは温度と密度の積に比例しますので、温度の低い低層大気でも密度が大きいので熱エネルギー密度は高く、通常ベータ値は大きくなります。一方コロナは高温ですが希薄なので通常ベータ値は低くなります。

太陽におけるもうひとつの謎として、「フレア」があります。大量のエネルギーが短時間に解放される爆発現象です。爆発に伴って衝撃波が発生したり、プラズマが飛び散ったりし、地球まで届いて磁気嵐を起こします。プラズマが加熱されて2～3千万度に達したり、加速されてエネルギーの高いX線やガンマ線が放射されたりします。加速された粒子が磁場に巻きつくと強力な電波を放射します。太陽研究者はこれらを観測することによって、フレ

アのメカニズムを明らかにしようとしています。そのために多くの観測装置が太陽をねらって観測を続けています。宇宙科学研究所の「ようこう」衛星、ESA/NASA の SOHO 衛星、NASA の TRACE 衛星は太陽観測専用の衛星で、X 線や紫外線で観測をしています。地上からも、光や電波で観測を行っています。野辺山太陽電波観測所でも太陽専用の電波望遠鏡「電波ヘリオグラフ」によってフレアからの電波を観測しています。これだけ多波長にわたって長時間観測しているにもかかわらず、いまだにフレアの正体を突き止めることができていません。

現在考えられているフレアのシナリオは次のようなものです。まず、フレアはたいてい活動領域のコロナ中で発生しています。活動領域のコロナは磁場が強くプラズマは希薄ですから、爆発のエネルギーは磁場に蓄えられ、その磁場エネルギーが何らかの原因で短時間に変換されてプラズマの加熱や加速が起こればフレアが説明できます。変換されて他の形のエネルギーになりうる磁場エネルギーは、コロナ中に流れている電流によって誘起された成分のみです。つまり、電流の持つエネルギーが解放されるわけです。高温のコロナの電気抵抗は非常に小さいので、電流のエネルギーを変換するためには特別に大きな電気抵抗が発生する必要があります。また、大きなエネルギーが蓄積されるためには、大電流が流れなくてはなりません。逆向きの磁場が接近することによって、その間に面状の大電流が流れていると想像されています。しかし、この大電流の流れている様子はまだ観測されておらず、理論的にも非常に薄くて観測できないだろうと思われています。このような面状の大電流があった場合に、部分的に大きな電流抵抗が発生すると、逆向きの磁力線が繋ぎ替わって(磁気再結合)エネルギーが解放されることが予想されます。この様子がコンピュータシミュレーションによって解析され、そこで現れた高温領域の形状が、ようこう衛星による軟 X 線望遠鏡で観測された大型フレアの形状に似ていることが示されました。これにより、ようこう衛星がフレアの磁気再結合シナリオを証明したと思われています。これ以外にも、このシナリオを間接的に支持する結果がいくつか上げられています。しかしこのシナリオの最大の問題点は、どうやって逆向きの磁場と大面電流

を用意するかという点です。この電流のエネルギーは、フレアで解放するエネルギーの総量以上であるはずで、フレアが発生する直前までこれをどうやって安定に蓄積するかが問題です。

このフレアのシナリオに対して、私は異なるシナリオを提案しています。フレアは磁力線に閉じ込められたプラズマの持つ自由エネルギーの解放であるとするものです。磁気再結合が低ベータ説であるとする、私の提案するのは高ベータ説です。野辺山電波ヘリオグラフの観測から、フレアに際して低層大気からコロナに向かって高密度のプラズマが供給されているようすが見えてきました。(図 1)また、NASA の TRACE 衛星による紫外～極端紫外線領域の観測では、低温のプラズマがあちこちから上空に噴出しているようすが見られます。(図 2)吹き上げられる際にプラズマは加熱され、上空の大きな磁気ループに供給されています。このようにして大きなコロナループが高温で輝いて見えるわけです。さらに、フレアに伴って発生する高エネルギー電子の出す強いマイクロ波を野辺山電波ヘリオグラフで観測すると、比較的小さなループが源となって、大きなループに高エネルギー電子を供給している様子が見えてきました。時間分解能 100 ミリ秒という高速撮像能力により、供給された電子が大きなループの中を光速の 3 分の 1 の速度で広がっていく様子がとらえられました。これらの観測事実から、フレアのエネルギー解放はベータ値の大きい低層の大気中の小さなループで発生し、そこで生成された高温高密度のプラズマや高エネルギー粒子がコロナ中の大きなループの中に詰まっていくのではないかと考えたわけです。つまりコロナの大きな磁気ループは 3 次元スクリーンにすぎないのではないかと考えたわけです。もちろん、コロナ中でベータ値が大きくなるとさらに大規模なエネルギー解放=フレアが発生することになります。

高ベータプラズマの性質は核融合実験用のトカマク装置などを利用して詳しく調べられています。核融合を実現するために、高温で高密度のプラズマをドーナツ状の磁場で閉じ込めようとしています。磁場を強くすれば閉じ込めることはできるのですが、経済的に核融合を実現するためにはなるべく

弱い磁場で閉じ込める必要があります。つまり必然的に高ベータのプラズマを扱うことになるわけです。ドーナツ状の曲がった磁場中では、プラズマは磁力線に巻きつきながら磁力線に沿って動きます。高温プラズマの場合その熱運動速度は大きく、また曲がった磁力線に沿った運動のために強い遠心力が働いて、プラズマが磁力線を外向きに押すことになります。これを引き戻している力が磁場の張力です。遠心力と張力の比がプラズマのベータ値になります。ベータの値がドーナツの太さと曲率半径の比を超えると不安定になって、プラズマが磁場を突き破って外に飛び出すことが知られており、バルーン型不安定性と呼ばれています。その際にプラズマの密度が局所的に増大したり、乱流が発生したり、高エネルギー電子が発生することも実験的に確認されています。これをプラズマの高ベータ崩壊と呼ぶこともあります。(図3) これが、磁場による核融合プラズマの閉じ込めを難しくしているひとつの大きな要因です。裏を返せば、ループ状の磁場にプラズマを詰めていくと必然的にある時点で爆発的にそれまでループに蓄積されたエネルギーが解放されることになります。これをそのまま太陽大気にあてはめれば、フレアを説明できるのではないかというのが私の提案です。トカマク実験に見られる高ベータ崩壊に伴う現象はそのまま太陽フレアでも観測されている現象です。

現在のところこのフレアのシナリオを提唱しているのは私だけですが、このシナリオによって説明できそうな観測事実が多くあり、今後この分野の研究を押しすすめていきたいと思っています。さらに、このシナリオは大きなエネルギー解放のみならず、太陽表面のあらゆる場所にみられる小さなエネルギー解放にも適用できますので、上層大気へのプラズマや熱の供給源つまりコロナ加熱にも適用できるのではないかと考えています。光球面下から磁場が浮上する場合や逆に沈み込む場合には磁気ループの曲率半径は小さくなり、また、下層大気の密度は高いので高ベータ崩壊が起こりやすい条件がそろっています。これらを用いて、太陽物理学の多くの部分を書き換えたいと考えています。

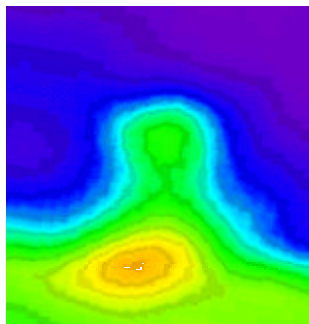


図 1： 野辺山電波ヘリオグラフで観測されたフレア初期のプラズマ雲(バルーン)の上昇。下の明るい部分からプラズマ崩壊(バルーン不安定性)によって上空の磁力線に向かって放出された。

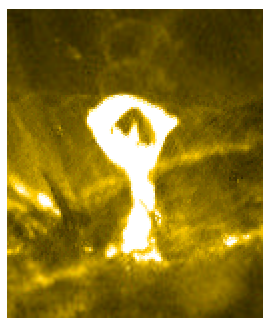


図 2： TRACE 衛星によって観測されたフレアのピーク付近でのプラズマ雲(温度百万度)。下層大気から上層に向かってバルーンが上昇している。

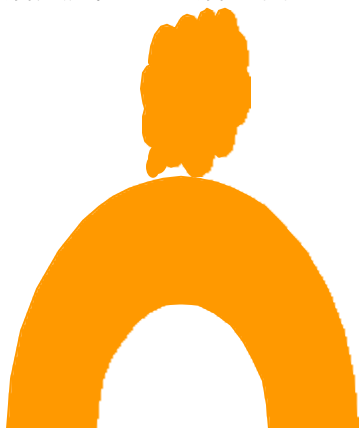


図 3： 磁気ループ頂上から高ベータプラズマ崩壊によってプラズマ雲(バルーン)が上昇する概念図。

電波ヘリオグラフによる科学成果

野辺山太陽電波観測所
柴崎清登

太陽の大気的主要な成分は水素で、高温のために水素を構成している電子と陽子は離れて別々に運動しています。電子はマイナス、陽子はプラスの電気を帯びており、このような大気の状態をプラズマと呼びます。電気を帯びた粒子が加速度運動をすると電波を放射します。電子と陽子の持つ電気量は同じですが、電子の質量は陽子の2千分の一ですので、電子の加速度は陽子の加速度の2千倍です。ですから電波は主に電子から放射されます。電波ヘリオグラフでとらえる太陽からの電波は、太陽大気中の電子の加速度運動によるものです。加速度運動の原因としてふたつあげられます。まずは電子と陽子の衝突です。衝突といっても正面衝突ではなく、ニアミス程度のものです。電子と陽子がニアミスすると電気力で引き合って曲がります。これが加速度運動の原因です。温度が高いと電子や陽子の運動速度が速く、また密度が大きいと衝突回数も増えて強い電波を放射します。このようにして、電波観測からプラズマの温度や密度がわかります。

太陽黒点は磁石のN極やS極に相当します。ですから黒点のまわりの大気はこのN極とS極を結ぶ磁力線で満ちています。電気を帯びた粒子が磁力線の中を運動すると磁力線に巻きついてらせん運動となります。これがもうひとつの加速度運動の原因です。N極かS極かで電子の回転の方向が逆になり、電波の特性（円偏波といいます）が変わります。磁場の強さ、電子の密度、電子の速度などによって、電波の強さや周波数も変わりますので、観測から磁場や電子に関する情報がえられます。このような電波放射のしくみを利用して、観測した電波から、太陽大気のプラズマや、太陽フレアで一時的に発生する非常にエネルギーの高い電子や高温高密度のプラズマの情報をえることができます。この情報と、X線や紫外線、光などの観測からえられた情

報をあわせて、太陽大気の研究や、太陽フレアでどうやって電子を加速するのか、高温高密度のプラズマをつくるのかをさぐっていくわけです。

次に主だったものについて、電波ヘリオグラフの観測からどのようなことがわかってきたかを述べます。

1. 太陽フレア

黒点のまわりの活動領域とよばれる場所では、ときどき急にX線や電波の強くなることがあり、「フレア」と呼ばれています。急に温度が千万度から3千万度の高密度のプラズマができたり、電子が光の速度近くまで加速されたりする爆発現象です。どこにどのように蓄えられたエネルギーがどのようにして短時間にプラズマを加熱したり、電子を加速したりすることができるのかが太陽フレアの謎で、いまだにわかりません。これを研究するために世界中の研究者が衛星や地上から各種の望遠鏡で観測を行っています。電波ヘリオグラフもそのなかのひとつです。電波の特徴を生かした観測成果のうちの代表的なものを以下に説明します。

1. 1 電子加速

電波ヘリオグラフは、1999年8月28日に発生したフレアで、光速に近いスピードで電子が飛んでいるようすを動画としてとらえました。電波ヘリオグラフの狙っていたものがついに見つかりました。フレアによって光の速度近くまで加速された電子が、磁極間を結ぶ大きなループ状の磁力線に沿って、片方の足元から他方へ飛びながら電波を出しているようすをとらえることに成功したのです。見かけのループの長さは6万キロメートルですので、光の速度では0.2秒しかかかりません。実際にはループは曲がっており、また電子の運動はらせん運動ですので、端から端まで0.6秒で飛んでいきました。足元の近くには小さな電波源があって、ここから加速された電子が磁気ループに注入されたと解釈しています。らせん運動する高エネルギー電

子によってループが光っているわけです。両端の根元は磁場が強いにもかかわらずはっきりしません。これは、らせん状に運動する電子の巻きつき具合が非常に強いことを示しています。粒子加速、注入の機構を考える際に非常に重要な情報です。

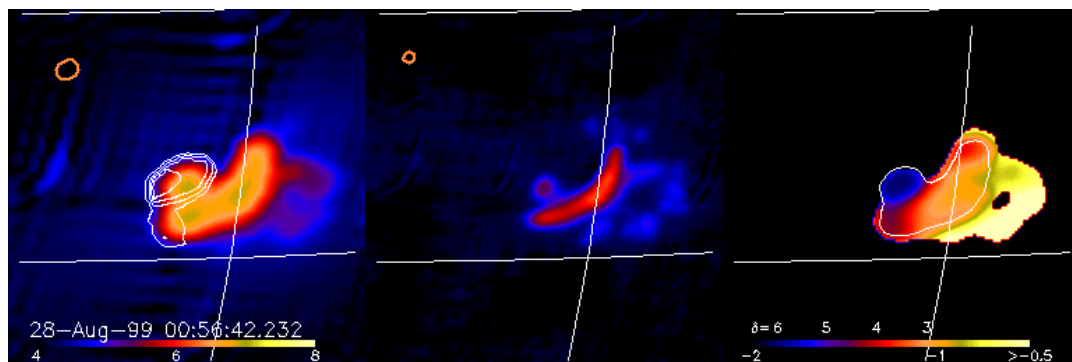


図1. 1999年8月28日のフレアの電波画像。左より、17GHz、34GHz、二つの電波強度の比。ループ状の電波源は、光の速度まで加速された電子によるものである。

1. 2 プラズマ放出

大型フレアにおいては、高温高密度のプラズマの運動を電波ヘリオグラフでとらえることができます。1993年1月2日に太陽の西の縁で発生したフレアの画像を図に示します。そこでは小さな電波源から、プラズマが上空の大きな磁気ループの中に打ち出されているようすがとらえられ、大きな磁気ループがさらに発達して大きなフレアと成長していくようすがとらえられました。

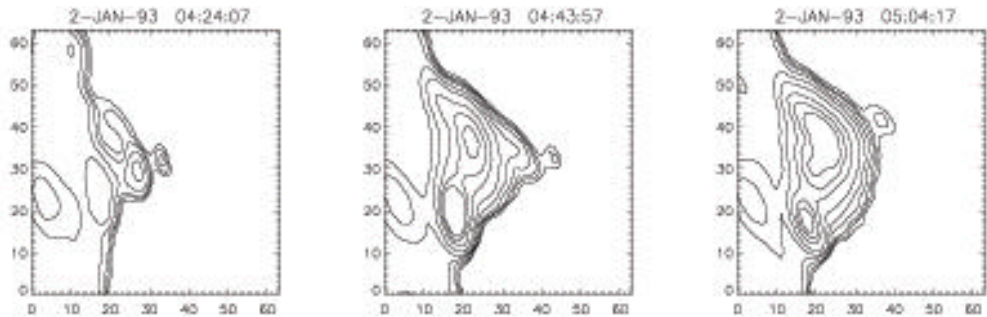


図2．約 20 分間隔のフレアの電波画像。ループ内に下側からプラズマが打ち込まれ（左）、ループを満たして（中央）、ループ全体が成長する（右）。こぶのようなものは、ループからときどき飛び出すプラズマの塊。

1. 3 磁場構造

上記 2 例においてもそうですが、フレアでは一般的に小さな構造と大きなループ構造がからんでいます。数多くのフレアを調べてみると、小さな構造も実はループ構造をしており、小さなループから小さなループにプラズマや加速された電子が供給されている描像が一般的であることがわかってきました。

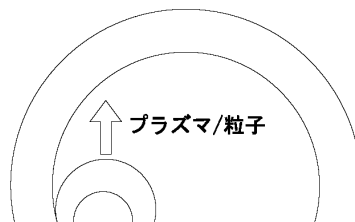


図3．小さなループと大きなループの関係

1. 4 振動現象

最近の研究で、粒子加速が数秒程度の周期で変動する現象が見つかりました。たくさんのフレアを解析してみますと、この周期的変動は非常に一般的であることがわかりました。磁気ループ全体の振動と粒子加速が関係してい

る証拠です。

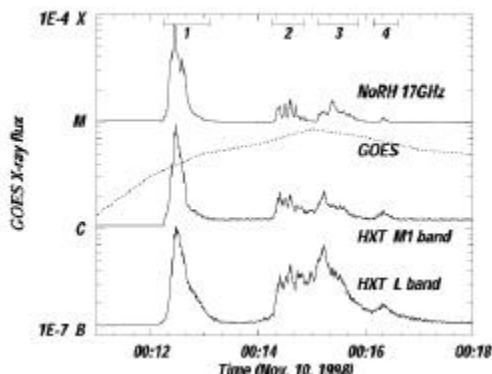


図4．電波と X 線強度の振動の例。“2”の部分の振動が顕著。

1. 5 フレア理論

現在の太陽フレアの理論はその源をたどると約40年前にさかのぼることができます。太陽フレアは、太陽コロナ中に流れている電流の持つエネルギーを熱や加速粒子のエネルギーに変換するというものです。太陽コロナの電気抵抗は非常に小さいので、多くの電流が損失せず流れることができます。何らかの原因で、ある場所で突然抵抗が大きくなり電流エネルギー（＝磁気エネルギー）が他の形に変わるというのが現在の標準的太陽フレアの理論（磁気再結合理論）です。この理論にもとづいてコンピュータシミュレーションが行われ、その結果と、ようこう衛星の軟X線画像がよく似ていたためにこの理論が世界的に広く受け入れられています。しかし流れている電流を直接観測することはできません。また、なぜある部分で突然抵抗が大きくなるのかもわかっていません。

この理論に対してわたしは、上に示した電波ヘリオグラフの観測結果から、まったく異なる理論を提案しています。この理論はすでに核融合プラズマ実験ではすでによく知られている現象を太陽に応用したもので、「高ベータプラズマ崩壊」理論と称するものです。フレアのエネルギー源は電流（磁場）

ではなく、閉じ込められたプラズマの持つエネルギーだというものです。これに関しては、添付した国立天文台ニュース（2002年2月1日号）を参考にしてください。電波ヘリオグラフデータのみならず、最近の他のデータ、過去のデータを見直すと、この理論でフレアに伴うさまざまな現象を説明することができ、さらにフレア以外の活動現象もこの理論で説明できます。

太陽表面の重力は大きいにもかかわらず、表面のいたるところで重力に抗して大気が噴き出しており、さまざまな名前で呼ばれています。噴き出す際に加熱や粒子加速が伴う場合があります。その大規模なものがフレアです。太陽表面にはいたるところに磁場があり、曲がったループ状をしています。このループにプラズマが詰まると、電気を帯びた粒子はループに沿った運動しかできないので、大きな遠心力が発生し、この遠心力が重力や磁場の張力を超えると上空にプラズマが噴き出すという単純な原理なのです。この理論では磁場はエネルギー源ではなく、プラズマの熱運動や流れを遠心力で上昇運動に変換する触媒の役割をはたします。これにより、今までの多くの謎、たとえばコロナ加熱など、が簡単に説明できそうです。太陽物理学の核心に迫ってきたと感じており、今後この理論を発展させていきたいと思っています。

2. プロミネンス噴出

静穏時の太陽電波画像には、暗く細長いものがよく見うけられます。暗条（ダークフィラメント）と呼ばれます。暗条が太陽の自転（周期27日）に伴って太陽の縁に近づくと、縁からはみ出して明るく見え、紅炎（プロミネンス）と呼ばれます。ここでは、暗条と紅炎をあわせてプロミネンスと呼ぶことにします。プロミネンスは太陽表面磁場の極性の反転するところ（磁気中性線）の上空に沿って延びており、太陽面をぐるっと取り巻くこともあります。温度が百万度を超えるコロナ大気の中に温度1万度程度の密度の濃いプラズマが浮いているのです。コロナ中の磁場によってささえられているはずなのですが、どういう構造でささえられているのか諸説あり、はっきりしませ

ん。このプロミネンスが時々上昇して太陽から飛び出し、太陽から吹き出している太陽風に乗って地球まで届くことがあります。そして地球に磁気嵐やオーロラを発生させます。非常に大きな構造ですし、比較的ゆっくりしているので観測しやすい対象です。近年宇宙における人類の活動が頻繁になってきましたので、そこでの環境「宇宙天気」が注目を集めています。太陽表面現象と地球周辺の宇宙空間、その間の惑星間空間に関する研究分野が非常に重要となっています。太陽フレアもそうですが、それ以上にこのプロミネンス噴出が注目されています。もっと一般的に太陽からのプラズマの噴出現象をCMEと呼び、プロミネンス噴出はその一部です。

プロミネンスを構成するプラズマは電波を出しており、噴出の一部始終を観測することができます。光の観測では、噴出プラズマの温度が上がったり、噴出速度が速くなったりすると観測できなくなりますが、電波ではそのようなことはありません。また、電波では地球の天気は左右されずに（曇っていても、雨が降っていても）観測できますので、電波ヘリオグラフはプロミネンス噴出のもっとも安定した観測装置です。

Prominence Eruption (Nobeyama Radio Heliograph)
1992-July-31 01:00 UT

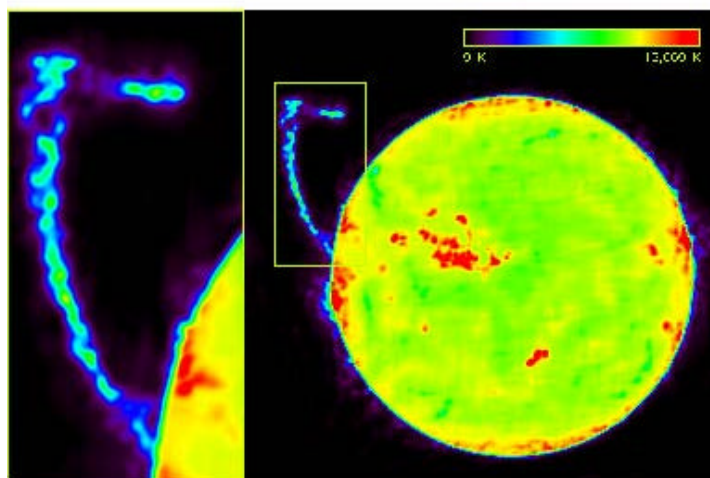


図5. プロミネンス噴出の例

黒点を含む活動領域はN極とS極の磁場の対からなっていますので、活動領域を2分するようにプロミネンスが横たわっています。このプロミネンスは曲者で、これが上昇すると、単なるプロミネンス噴出にとどまらず、最大級のフレアを引き起こします。N極とS極は磁力線で結ばれており、この中をプロミネンス物質がすり抜けて噴出するわけです。すり抜ける過程がフレアで、「高ベータプラズマ崩壊」現象にあたります。上昇するプロミネンスプラズマが上空の磁力線を押しますので、ループ内のプラズマと同じ役目をします。これによってプラズマも爆発的に上向きに加速されますので、フレアに伴うプロミネンス噴出の速度は非常に早くなっています。惑星間空間に衝撃波が生じて、この衝撃波の影響もあいまって、宇宙空間に非常に大きな影響を及ぼします。このようなフレアでは活動領域全体が明るく輝きます。すり抜けたプラズマは磁力線を引きずりながら上昇し、上昇しきれなかったプラズマはその磁力線に沿って落ちてきます。落下のエネルギーで自分自身を加熱しますので、この種のフレアではフレア開始以後数時間から1日以上かかってゆっくり減衰します（LDE型フレア）。フレアの上空に後光のように延びた構造や、それに沿って落下するプラズマもようこう衛星によって観測されています。このような解釈が可能となったのも、1.5で述べたフレアの理論のおかげです。

3. 黒点振動

黒点は非常に磁場の強いところです。特にその中心の暗部とよばれる部分の磁場は3千ガウス以上あります。強い磁場のために温度が低くなっており、光で見ると暗く見えるのです。しかし、電波では逆に明るく、くっきりと輝いています。磁場が強いために、巻き付いて運動している電子の回転数が観測している周波数17GHzに近くなっているのです。磁場が6千ガウスあると、電子の回転数は17GHzになりますが、通常電波ヘリオグラフで観測しているのは2千ガウスの層から出た電波の第3高調波です（磁気共鳴放射と呼ばれます）。黒点上空のプラズマは希薄なので、X線や紫外線ではほとんど観測できませんが、電波では観測できます。

電波のこの性質を用いて、黒点の上空で長時間安定した3分振動を観測することができました。実はこの3分振動は磁気共鳴放射が見えているときにはほとんどいつでも見えていることがわかりました。また、黒点暗部の下層から上向きに伝わる3分周期の音波が、電波を出している2千ガウスの層を通過する際にその温度や密度の変動によって電波の3分振動を起こしていることを見つけました。さらに、3分周期の音波の発生原因もつきとめることができました。3分の周期は黒点暗部の温度極小層の温度によってきまるもので、3分周期は4千度に対応します。電波の3分振動観測は黒点の温度計として利用できることがわかりました。黒点ごとにこの周期は微妙に異なり、またゆっくり時間変動することもありました。黒点の温度計として、今後も黒点の研究に利用していきたいとおもっています。太陽活動1サイクルにわたるデータがありますので、黒点の進化、太陽活動度との関係などの研究分野がひらけました。

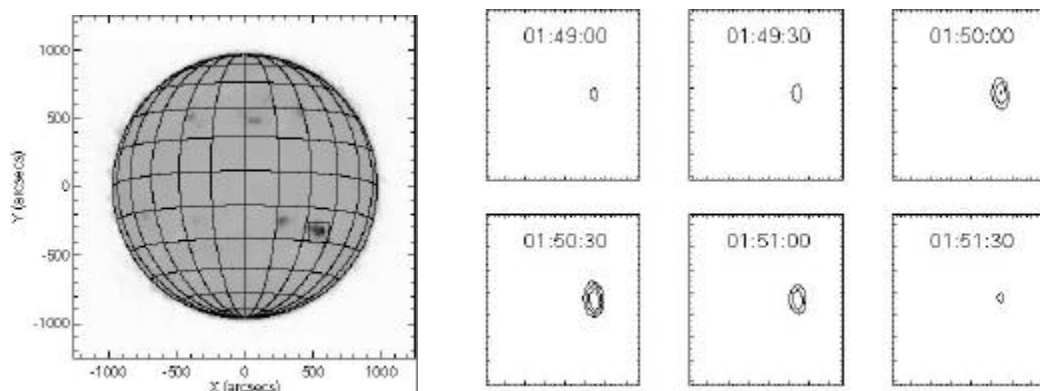


図6．黒点振動の例。右図は、左図の四角の部分拡大して、30 秒毎に並べたもので、3分の周期で明るさが変動しているようすがわかる。

4．極域増光

太陽活動の極小期において太陽面で一番明るいのは実は南極と北極地域

です。これは電波だけで観測される現象です。この原因は太陽表面磁場の下層部分の構造にあることを突き止めました。太陽活動周期を決めている大局的磁場構造と関連があるので、太陽活動を研究する上で重要なデータです。

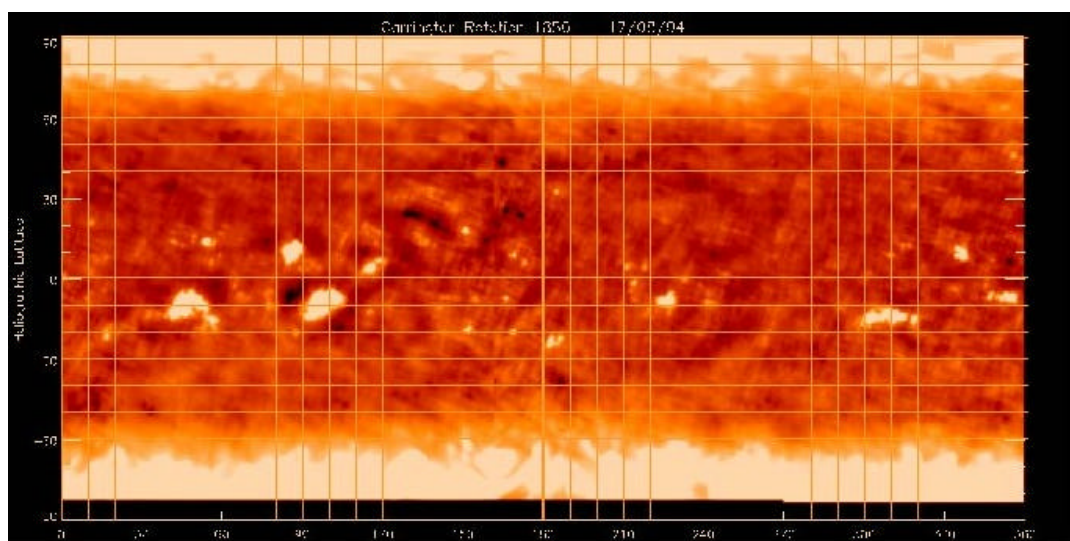


図7．太陽活動静穏時の太陽表面の電波強度分布を展開して表示したもの。上下端が北極と南極に相当し、低緯度帯に比べて明るいことがわかる。