

太陽フレアを電波で解明する

花岡 庸一郎

〈国立天文台電波天文学研究系 〒384-13 長野県南佐久郡南牧村野辺山 411〉

e-mail: hanaoka@nro.nao.ac.jp

ここ最近、日本の太陽物理は大きな発展を遂げつつある。この一翼を担うのが長野県の野辺山に建設された電波ヘリオグラフである。主目的の、太陽フレアにおける高エネルギー電子の振舞いはもちろん、高温のコロナプラズマや低温のプロミネンスまで、幅広い対象において観測成果を上げている。本稿では装置の紹介、電波放射のメカニズムの解説とともに、興味深い観測結果のいくつかを紹介する。

1. 電波ヘリオグラフの登場

太陽はいつも同じように輝いていて、気まぐれに明るくなったり暗くなったりしないので、地球上では平和な生活を送ることができる。しかし、目には見えない短波長・長波長では、全く違った激しく活動する太陽が見えてくる。その中で特に華々しいのが、太陽フレアである。太陽表面では黒点を中心に磁場の強い領域があるが、この磁場に蓄えられたエネルギーがフレアの時に一気に解放され、光速の何十パーセントかに加速された高速の電子や一千万度程度の高温プラズマが生ずる。これらの高速電子・高温プラズマが強い X 線や電波を出すため、X 線や電波で見ると、大きなフレアが起るとフレアだけの明るさで普段の太陽の明るさの何十倍、何百倍にもなる。もっとも、太陽全体が放つエネルギーに比べればフレアのエネルギーはわずかであるので、太陽からのエネルギーがもっとも集中する可視光では特別な工夫をしない限りフレアは見えない。人間に X 線や電波が見えてフレアのたびに太陽が何倍にも明るくなったりしては大変であろう。このフレアなど太陽の活動現象を研究するのは、もちろん、対流層を持つ晩期型星に共通な、ダイナモによって生成された磁場の浮上による活動現象を研究するという

天文学的な目的がある。また太陽物理は現象をプラズマの物理として理解すべき局面に来ており、太陽の活動現象は磁場中のプラズマの振舞いを見せてくれる巨大な実験室といえることができる。さらに地球はもちろん太陽系全体の環境に影響する現象としても太陽フレアは注目されている。

フレアは高温のプラズマや高速の電子が主役になる高エネルギー現象であるため、当然 X 線、 γ 線がよく見えるわけである。それではなぜ波長の長い電波でもよく見えるのであろうか。これは主として磁場中に高温プラズマ・高速電子が存在すると、極めてよい効率で電波を出すことに原因がある。磁場と荷電粒子の相互作用というフレアの本質が、電波を出すことに寄与しているのであり、逆にだからこそ電波観測がフレアの本質を研究するのに重要なのである。

太陽の活動は 11 年周期である。太陽フレア現象の解明のために、この極大に合わせて新しい装置を作れば、大きな成果が期待できる。現在の活動期、第 22 太陽活動期の極大に合わせて、日本では 2 つの大型装置が立ち上がった。ひとつは波長の短い方、地上には届かない X 線で太陽を観測するためのようこう衛星で、宇宙科学研究所によって 1991 年 8 月に打ち上げられ、現在も活躍中である。もうひとつが本稿でその成果を述べる電波へ

リオグラフである。従来から日本では太陽電波を観測して成果を上げてきたが、既存の装置では性能的に不十分になっており、より高空間分解能・高時間分解能の新たな装置が望まれてきた。幸い予算が認められ、1990/1991年度の2カ年で野辺山に建設され、1992年6月から本観測にはいっている。本稿ではこの電波ヘリオグラフによる観測で、太陽フレアがどう見えてきたかを紹介する。

2. 電波ヘリオグラフの性能

装置の紹介は天文月報1995年4月号の「ハイテクとおめがね事情」や論文¹⁾にあるので、簡略にとどめる。図1(表紙)はアンテナの写真である。

フレアはいつどこで起こるかかわからないので、太陽望遠鏡は太陽全面を観測するのが望ましい。一方、フレアがどのように進行するか見るには高空間分解能である必要がある。これを電波望遠鏡で実現するには必然的に干渉計になる。しかも、フレアは短時間で変化するので、宇宙電波の観測のように少ないアンテナで時間をかけて1枚の絵を得るといふわけにはいかないため、太陽電波干渉計は小口径アンテナを多数並べた独特のスタイルになる。ヘリオグラフでは東西489m、南北220mのT字型に84台のアンテナが並ぶ。観測周波数は、コロナがほぼ透明になる17GHz(波長1.76cm)である。17GHzで太陽全面を見るために、個々のアンテナの口径は80cmとした。空間分解能は約12"角である。1秒の時間分解能で1日8時間、左右両円偏波を観測していて、特にフレアの時には50msecの時間分解能の生データを保存する。これによってフレア初期の極めて速い変化もとらえることができる。

干渉計では、直接観測されるのは天体像をフーリエ変換した時の各フーリエ成分である。アンテナの間隔それぞれが観測できる空間周波数に対応するが、最も狭いアンテナ間隔、すなわち最も低い空間周波数で太陽全面が見えなくてはならないので、アンテナ基本間隔は1.5mである。この間

隔でT字の上に密にアンテナを並べれば必要な全てのフーリエ成分が観測できるが、このためにはアンテナが400台以上必要になる。これは非現実的なので、T字の中央部はこの間隔で並べ、外側へ行くほどアンテナを間引くことで84台までアンテナ数を減らした。ところがアンテナを減らすとフーリエ空間上のデータに抜けが生じ、そのまま逆フーリエ変換してももとの太陽像は得られない。そこでCLEANと呼ばれる処理を行って本来の太陽像を再生する。このために高い能力をもった計算機を使用している。

3. 電波放射のメカニズム

観測される電波の強度、偏波率から電波が熱的な放射か非熱的なものか、放射に関わっている磁場の強さはどれだけか、といった物理的な情報を引き出すわけだが、そのためにはそもそもどういうメカニズムで電波が出るのか知っておく必要がある。17GHzで重要なものについておさらいしておこう。

- (1) 磁場がないところからの熱的な電波—高温プラズマは、それを構成している自由電子とイオンの相互作用によって連続光を出している。温度が高いので短波長の電磁波が主であるが、電波も出している。このように、磁場がなくても純粋に熱的な電波放射は観測できる。あまり強い放射ではないが、フレアで生成される高温・高密ループであれば電波ヘリオグラフの感度・空間分解能をもってすれば容易に観測できる。放射は偏波していない。
- (2) 強い磁場があるところからの熱的な電波—磁場のあるところでの電磁放射といえばサイクロトロン放射である。荷電粒子が走るときに磁力線に巻き付いて電磁波を出すわけだが、放射される電磁波の周波数は磁場の強さで決まっていて、17GHzの電波を出そうとすると6000ガウスの磁場の強さが必要になる。実際の太陽では、黒点でもこのような強い磁場は観測されない。しかし、高

温のプラズマの場合、ある程度弱い磁場でも、効率は悪いが、高調波で17 GHzを出すことができる。実際の黒点程度の磁場、2000 ガウスなら3倍の高調波で、1500 ガウスなら4倍の高調波で17 GHzの電波を出すので、黒点の近所に高温プラズマがあれば観測できる。これをジャイロレゾナンス放射という。左右の円偏波共出るが、一般に片方の偏波が圧倒的に強い（磁力線の方向にもよるが）、偏波率は高い。

(3) 弱い磁場があるところからの非熱的電波
 コロナ中の磁場はもっと弱く、せいぜい数百〜数十ガウスである。こうなると熱的な放射は17 GHzでは観測できない。しかし、非熱的な粒子加速によって、高温プラズマよりもっと高い数十keV以上のエネルギーを持った電子が生ずると、このような磁場でも、より高い高調波を効率よく出すことができるのである。フレアの時にもっとも強いのはこの放射である。これをジャイロシンクロトロン放射という。偏波はしているが、一般にジャイロレゾナンス程には偏波率は高くない。

これだけの予備知識を持ったところで実際の観

測結果を見てみよう。

4. 電波ヘリオグラフでなにが見えるか

それでは実際に電波ヘリオグラフでどのような現象が捉えられているかを紹介しよう。一部しか挙げることができないので、もっと系統的に知りたい方は文献²⁾を参照されたい。

(1) インパルスフレア

多くのフレアは、始まったとたんに数秒〜1分以内に急激な増光をし、その後ゆっくりと暗くなっていく。このようなフレアをインパルスフレアという。図2に1993年5月28日に観測された教科書的なインパルスフレアの例を示す³⁾。図2(c)に模式図を示したように、磁気中性線をまたいで磁気ループがあり、これがフレアを起こしている。ようこう衛星の硬X線望遠鏡(以下HXT)によるフレアの初期の像(図2(a-1))では、2つの輝点が見えるが、これはループの両足元が光っているのである。硬X線は非熱的な電子が出すものである。おそらく磁力線の再結合によって加速された高速電子が、両足に同じように突っ込んで硬X線を出している。電波ではジャイロシンクロ

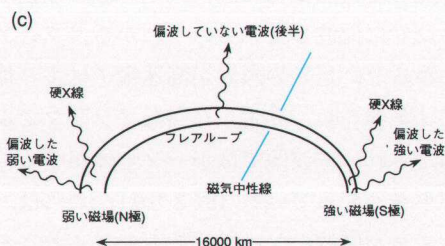
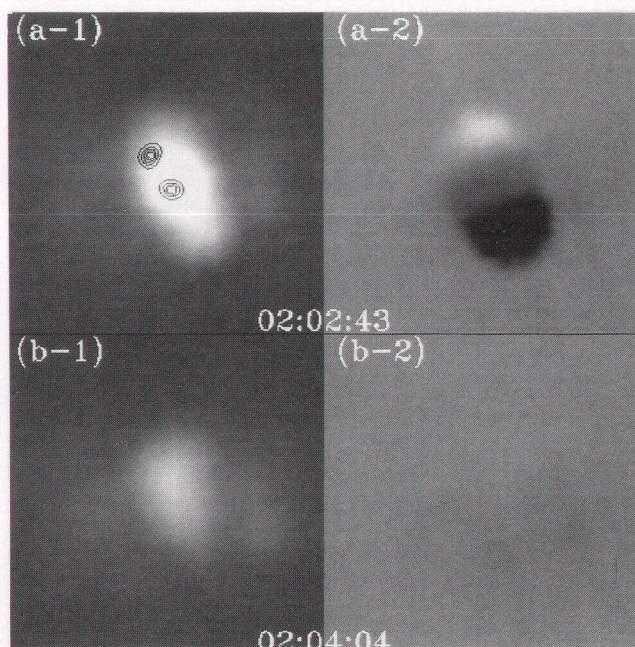


図2 1993年5月28日のフレア。(a)はフレアが最大の時、(b)は減衰期。(a-1)、(b-1)は電波(17GHz)の強度、(a-2)、(b-2)は電波の偏波率を表している。白が右円偏波、黒が左円偏波を表す。(a-1)のコントラストは硬X線の像である。上が北、視野は2'.5×2'.5。(c)はループを横から見た状態の模式図。

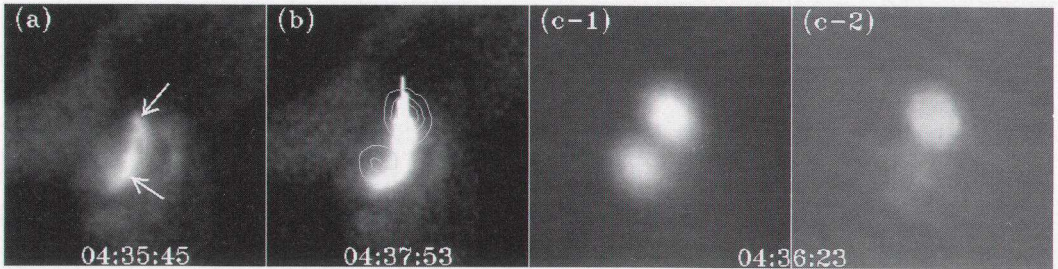
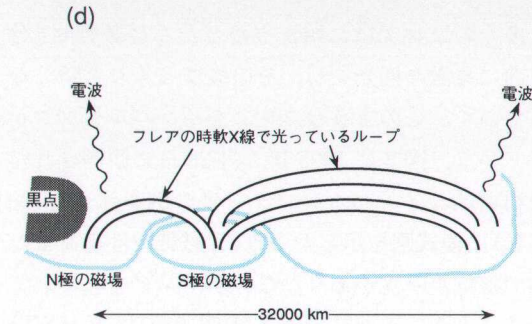


図3 1992年8月12日のフレア。(a)はフレア前の軟X線像。(b)(c)はフレアが最大の時で、(b)は軟X線像、(b-1)のコントラストと(c-1)は電波(17GHz)の強度、(c-2)は電波の偏波率を表している。上が北、視野は $2'.5 \times 2'.5$ 。(d)はループを横から見た状態の模式図。



トロン放射が見えていて、もっとも明るい点では周辺の500倍も明るい。電波の画像は両足がつながって見えているが、下の方がより明るくなっている。これは、下の方の足の方が磁場が強いため、電波の強さがアンバランスになるのである。偏波を見ると(図2(a-2))、両足の磁場極性が違うため反対に偏波しているのがわかる。フレアの後半になると、足元の彩層が高速電子により加熱されて「蒸発」し、発生した高温プラズマでループが満たされ、電波像ではループ全体が明るく、偏波が小さくなっている(図2(b))。これは、高温プラズマが偏波のない熱的放射で見える一方、ジャイロ放射を出すほどエネルギーの高い電子が少なくなっていることを示している。

このような一本のループが光っているシンプルなフレアというのは実はむしろ珍しい方で、たいていのインパルスフレアはより複雑である。むしろ複数のループが関わって起きるフレアというのが普通のようなものである。その例として1992年8月12日のフレアを紹介する。

図3は8月12日のフレアの様子を示してい

る。ようこう衛星の軟X線望遠鏡(以下SXT)で見ると2本のループがある(図3(a)矢印)。軟X線像は高温プラズマの分布を示している。模式図に示したように、2本のループの接近している方の足元がS極、離れている方がN極である。フレアが起ると小さい方のループが明るく輝き(明るすぎてつぶれてしまっているが)、大きい方のループの外側のループも明るくなっている。電波では、小さい方のループあたりと、大きい方のループの南側の足元あたりが明るくなっている。特に、黒点が近くにある小さいループの方で明るい。共に右円偏波なので、それぞれのループのN極の足元に突っ込んだ高速電子が電波を出している。つまり、ひとつのフレアにふたつのループが関わっているわけである。おそらくフレア自体が2本のループの相互作用で起こっている。

このフレアはSXT像でも複数のループが関わっているのがわかるフレアであったが、SXTやHXTではもっとも明るい部分が簡単な構造でしか見えないことが多い。しかし、こういうフレアの中でも複数のループが関わっているものがある。複数のループ、もっと一般的には複数の双極磁場が関連していることが、フレアが起ることそのものに本質的な意味を持っているようである。そういうループの一部に磁場の強い部分があると、主たるフレアサイトから離れていても電波

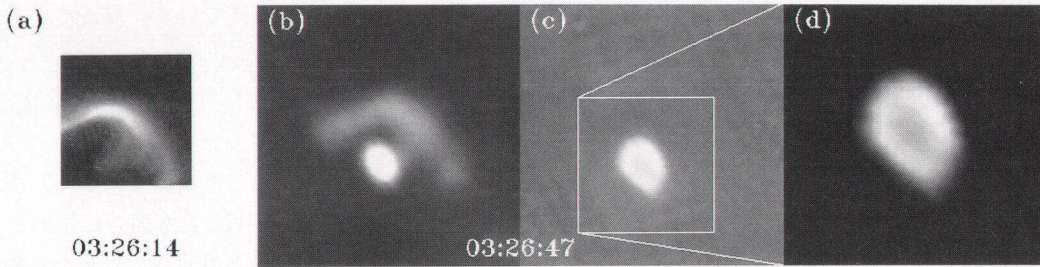


図4 1993年3月11日のフレア。(a)は軟X線像,(b)は電波(17GHz)の強度,(c)は電波の偏波率を表している。(d)は偏波率の像を拡大したもの。上が北,視野は5'×5'。(e)は黒点の部分の模式図。

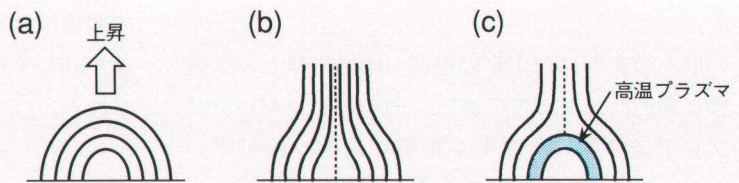
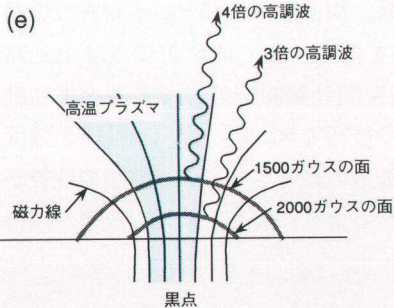


図5 Long Duration Event の模式図。閉じた磁場が上昇する 磁力線が開く 内側から順に再結合する

での増光が見られ、フレアに関わるループの真の広がりを見せてくれる。

(2) 熱的なフレア

すべてのフレアが、磁場の再結合に伴う電子加速・加速電子による彩層の加熱・彩層蒸発によるフレアループ内の高温プラズマの充満、というストーリーで進むわけではない。LDE (Long Duration Events) といわれる文字通り長い、数時間にわたる継続時間を持つフレアの中に、軟X線の強度のわりに硬X線が極めて弱いものが存在する。このようなフレアの例、1993年3月11日のフレアを図4に示す⁵⁾。

こういうフレアは太陽表面の閉じたループが爆発的な上昇によって開いた磁場となり、それが再び閉じる時に発生する(図5)。磁力線が再結合を起こして、解放されたエネルギーが熱エネルギーとなり、数百万度の熱いプラズマで満たされたループが形成される。内側から外側に向かって順番に再結合を起こすので、明るいループが上昇していくように見える。図4のフレアではよくわからないが、図5のモデルそのままに見えるフレアは

数多く SXT で観測されている⁶⁾。

図4 (a)の SXT の画像はフレアで形成された高温ループを示している。電波での画像も、この高温ループが軟X線と同様に見える。ところが、電波ではループの足元に明るい点があり、しかもここだけが強く偏波している。実はここにはたまたま大きな黒点があり、ここに流れ込んだ高温プラズマがジャイロレゾナンスで光って見えるのである。このような現象は電波ヘリオグラフで初めて見たものである。図4 (d)の黒点部分の偏波の拡大図を見ると、面白いことに、真中が偏波率が低くなってリング状に見える。この黒点付近の構造は図4 (e)のようになっていると考えられる。フレアの初期に、黒点上空に熱いプラズマが流れ込んでくると、黒点中央部の2000ガウスの磁場のあるところでは3倍の高調波の右円偏波、左円偏波がともに輝度が上昇する。黒点がN極なので右円偏波が強く、高い偏波率を保ちつつ明るくなる。ところが、どんどん高温プラズマが増えてくると、右円偏波だけ光学的に厚くなって明るさが飽和してしまい、左円偏波だけが上昇

続けることになり、偏波率が下がる。これくらい高温プラズマがたまると今まで見ていなかった周囲の1500 Gaussのところも4倍の高調波の明るさが上昇してくる。こちらは高い偏波率を保つため、結果として偏波率の像はリング状に見えることになる。

飽和した時点で輝度温度が200万度程度なので、黒点上空には200万度のプラズマがたまっていることになる。SXTで見えているループはもっと高温なので、ループの足元には冷えて下降していったプラズマが溜って電波で見えているわけである。

以上のように、LDEの電波の画像はほとんど純粋に熱的なプラズマである。前項のインパルシブフレアは非熱的な電子が重要な役割を演じていた。しかし、この種のフレアでは硬X線が弱く、電波でも熱的な放射しか観測されず、非熱電子は問題にならないようである。フレアにおいて非熱電子は本当に本質的に重要なのであろうか？これは今後フレアをプラズマ現象として理解する上で解明すべき大きな課題である。磁気再結合でエネルギーが解放される、と言ってしまうのは簡単だが、実は条件が整わないと再結合は起こってくれない。非熱的なフレアと熱的なフレアとでどのように再結合の条件が異なるかは、まだ必ずしもよくわかっていない「磁気再結合はどのように起こるか」という問題に答えるひとつの鍵である。

以上のようなフレアの観測ばかりではなく、より低温のプロミネンスの爆発現象などの観測にも電波ヘリオグラフは活躍している⁷⁾。しかし、こういう活動現象の観測ではなく、むしろ変化のない時を狙って、長時間のデータから超合成で静穏領域の高ダイナミックレンジの画像を得ることもできる。図6(表紙)に、1時間のデータを最大エントロピー法で処理して得られた太陽像を示す。H α などでおなじみの彩層の構造の他、正体のよくわかっていない両極部分の増光など、通常のスナップショットではよく見えない低コントラスト

の構造が細かい構造まで見えている。見えているのは彩層の上部である。

5. 今後の計画

電波ヘリオグラフは完成したわけではなく、現在の17 GHzに加えて34 GHzでも同時に観測を行う計画が進行中である。両周波数でロスなく観測できるように、周波数選択膜という特殊な表面を持った副鏡を使用する。これができると、34 GHzの画像は空間分解能が倍になるのでより細かいところまで観測でき、また17/34 GHzの強度の関係から電波放射に寄与している電子の性質がより詳しくわかるようになり、新たな成果が期待される。

参 考 文 献

- 1) Nakajima, H., et al., 1994, Proceedings of the IEEE, 82, 705
- 2) Enome, S., 1995, in Proc. of the CESRA Workshop, in press
- 3) Kundu, M., et al., 1994, in Proc. of Kofu Symp., eds. S. Enome and T. Hirayama, Nobeyama Radio Observatory Report No. 360, p. 353
- 4) Takano, T., et al., 1994, PASJ, 46, L21
- 5) Hanaoka, Y., 1994, in Proc. of Kofu Symp., eds. S. Enome and T. Hirayama, Nobeyama Radio Observatory Report No. 360, p. 181
- 6) Tsuneta, S., 1993, in The Magnetic and Velocity Fields of Solar Active Regions, eds. H. Zirin, G. Ai, and H. Wang, Astronomical Society of Pacific Conference Series Vol. 46, p. 239
- 7) Hanaoka, Y., et al., 1994, PASJ, 46, 205

Observing Solar Flares at 17 GHz

Yoichiro HANAOKA

National Astronomical Observatory

Abstract: The Nobeyama Radioheliograph, which was constructed at Nobeyama, Nagano, started the regular observation of the Sun in 1992 June. Its most important targets are accelerated electrons in solar flares and plasma in the solar active regions whose temperature ranges $1 \times 10^4 - 1 \times 10^7$ K. The various observational results are reviewed as well as the introduction of the instrumentation and the explanation of the radio emission mechanisms.