

電波で見る太陽の磁力線

岩井 一 正

〈国立天文台 野辺山太陽電波観測所 〒384-1305 長野県南佐久郡南牧村野辺山462-4〉
e-mail: kazumasa.iwai@nao.ac.jp



電波は目では見えませんから、直感的に理解するのがなかなか難しく、その魅力を説明するときにはいつも苦労します。しかし電波観測には、ほかの波長では可視化の難しい天体の観測や物理量の計測ができるという魅力があります。野辺山電波ヘリオグラフでは太陽が放射するマイクロ波と呼ばれる電波を観測しています。最近、このデータの偏波を解析することで太陽の磁場を詳細に計測することが可能であることがわかりました。今回は、電波観測から彩層やコロナと呼ばれる太陽の上層大気の磁場を計測する新しい手法についてご紹介します。

1. はじめに

理科の時間に砂鉄をまいた紙の下から磁石を近づけるような実験をしたことがある方は多いのではないのでしょうか。そうすると砂鉄は磁石の周辺で弧を描くように並びます。この弧の形が磁石のもつ磁力線の形状（磁場）を表しています。この磁場とは厄介なもので、物体の運動に影響を与えることができるのに、人間の目には見えません。さらに砂鉄は磁場を感じる物質なので、磁力線に沿って並びますが、下に敷いた紙や磁石をつまんでいる私たちの指は微動だにしません。実はこの磁場、宇宙空間にも広く存在し、地球を含む一部の惑星や、太陽のような恒星も磁場を発生させていることがわかっています。宇宙空間や恒星の周りがある物質のほとんどは「プラズマ」と呼ばれる磁場を感じる状態の物質なので、宇宙で起きるさまざまな現象を理解するには、その場所の磁場を計測することが重要です。磁場がある場所に砂鉄をばらまけば、その影響を推測することができますが、遠い宇宙のかなたに砂鉄をばらまきに行くことは、非現実的ですね。この目に見えない力を地球にいながらにして計測する手法があります。

その一つが電波の偏波観測です。しかも、何か特別な電波放射を用いるわけではなく、天体が通常放射する電波を観測するだけでいいのです。これはそんな少し変わった電波天文学のお話です¹⁾。

2. 太陽の磁力線

方位磁石の針は常に南北方向を向きますね。それは地球に磁場が存在し、その磁場に針が反応しているからです。太陽も磁場をもっています。太陽にも北極と南極を結ぶ磁場が存在しますが、それに加えて、太陽表面の至る所に磁場の塊が発生します。それが黒点です。黒点の大きさは、さまざまですが、時に地球をすっぽり覆うような大きさにまで成長します。つまり黒点はただ黒く見えるだけではなく、とてつもなく大きな磁場の力が蓄えられているのです。この磁場の力が何らかのきっかけで一気に解放されるとフレアと呼ばれる爆発現象や、コロナ質量放出と呼ばれる太陽の大気中のガスが宇宙空間に噴出される現象が発生します。こういった爆発的な現象の余波は地球にも到来し、今度は地球の磁場に影響を与えます。この結果としてオーロラのような自然現象が発生します。このように宇宙で起きるさまざまな現象の

元をたどると、太陽の磁場のエネルギーであることが多々あります。

太陽の可視光で見た表面は光球と呼ばれる約6,000度の大気層です。この層の磁場は可視光の観測で古くから計測されてきました。ただ、実際の爆発現象やそれらに関連する変動が起きるのは、それより上空の彩層やコロナと呼ばれる大気層であることが多く、近年これら太陽大気の上層の磁場を計測することに注目が集まり始めています。彩層やコロナでは磁場強度が小さくなり、また大気の状態が複雑になるため、磁場の計測が難しく、現在いくつかの手法が検討段階にあります^{2), 3)}。その一つが電波による観測手法です。

3. 電波（でんぱ）の偏波（へんぱ）で磁場（じば）を見る？

電波も光と同じ電磁波の一種です。今回用いる電波はマイクロ波と呼ばれる電波で、その波長は1センチ程度、周波数に換算すると10 GHz（ギガヘルツ、1ギガヘルツは1,000,000,000ヘルツに相当）程度です。電波の性質の一つに偏波があります。ここでは簡単に、電波には進行方向に対して右回り成分と左回り成分があり、その2成分が相対的に強くなったり弱くなったりすることで偏波が生まれると考えてください。右回りの成分と左回りの成分の強度が同じ場合は「無偏波」です。イメージが付きにくい場合は、電波には強度や波長のほかにもう一つ性質があり、その性質を使って磁場を計測すると思っただけならば十分です。また今回は「偏波」と表現しますが、光学観測では同じことを「偏光」と表現します。どちらも電磁波の同じ性質を表す表現です。

電波の偏波は放射機構や伝播方法によって磁場の影響をさまざまな形で受けます。よって電波の偏波から磁場を計測する手法はいくつかあります^{4), 5)}。今回用いる手法では熱制動放射という機構で放射される電波を用います。この放射は理論上ほとんどの天体から放射されている電波で、通

常は無偏波です⁶⁾。ただし、太陽大気には磁場があり、かつ電離したプラズマによって満たされています。磁場のあるプラズマ中では、熱制動放射は偏波する性質があります。また、その円偏波率（偏波の度合いを表す指標で、全体の電波強度に対する偏波した強度の割合）は電波が通過するプラズマ大気の大気強度に単純に比例することがわかっています。つまり円偏波率を計測すれば、その場所の磁場を逆算できるのです。多くの手法において、太陽大気の大気強度は大気モデルや数値計算結果を観測結果と合わせることで求められます。一方、熱制動放射の場合、モデルや数値計算を一切用いなくても解析的に式が解けます⁷⁾。観測結果だけで物理量が一意に求まることは、遠隔探査において非常に強力な手法であることを意味します。

ただし、この手法にも欠点があります。それは、発生する偏波成分が少ないことです。理論上、30ガウスの磁場で最大でも1%の円偏波率しか生まれません⁸⁾。太陽の彩層やコロナの典型的な環境では最大でも数%程度の偏波信号しか生まれない見積もりになります。検出には望遠鏡に高い偏波決定精度が求められます。

4. 人知れず続く観測

今回観測に用いるのは、国立天文台野辺山太陽電波観測所が運用している野辺山電波ヘリオグラフと呼ばれる電波望遠鏡です⁹⁾。この装置は口径80センチの小型なアンテナを84台組み合わせた電波干渉計と呼ばれる装置です。この干渉計は84台のアンテナが受信した信号を組み合わせることで1枚の電波写真を作ることができます。電波ヘリオグラフは高い偏波決定精度をもっていることも、この研究では重要です。

野辺山電波ヘリオグラフのユーザーは世界中に存在しますが、観測は観測所員が行い、そのデータがすべて自動的に公開されるシステムになっているので (<http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/index-j.html>)、ユーザーが実際に観測したり、解析のた

めに観測所を訪れたりする必要はありません。ましてや観測所に居住している研究系の要員は筆者を含め2, 3名だけです。望遠鏡を実際に運用したり、トラブルが起きたときにメンテナンスをしたりするのが筆者らの仕事です。この望遠鏡を保有する野辺山太陽電波観測所は人員自体が少ないですから、日々の運用は技術系・事務系を含め職員全員が交代で行い、トラブルの際には三鷹勤務の職員の助けやOB職員の知恵を拝借しつつ対応しています。太陽はいつ変化を起こすかわからないので、常に継続して観測することが必要です。マイクロ波は雨や雲の影響を受けにくく、電波ヘリオグラフの観測では天候の影響をほとんど受けないため、太陽の観測に適していると言えます。観測を阻害するのは主に機器のトラブルで、そういったトラブルが発生したら、すぐに対応します。その結果、直近10年間の運用効率（観測できる時間と実際に観測した時間の比）は99.3%にも上ります。

望遠鏡の近くにいるといろいろなことがわかります。例えば、電波ヘリオグラフの観測は天候の影響をほとんど受けないと上述しましたが、「ほとんど」ということは例外的に受けることもあります。主な要因は大雪です。雪が鏡面に大量に積もると望遠鏡が電波を集める力が弱まり、さすがの電波ヘリオグラフでも画質が一時的に低下します。この望遠鏡は当然ですが日中は常に太陽の方向を向いているため、放っておいても太陽光によって鏡面の雪はそのうち解けます(図1)。しかし、解けるのを待っていると運用効率が落ちてしまいます。このような場合は人力で一つひとつアンテナの雪を払い落とします。この作業は結構重労働で、平日は観測所員総出で行いますが、週末に雪が積もると、ごくまれにはありますが筆者一人で全部のアンテナを数時間かけて除雪に回るわけです。天文学は体力がないとできませんね。

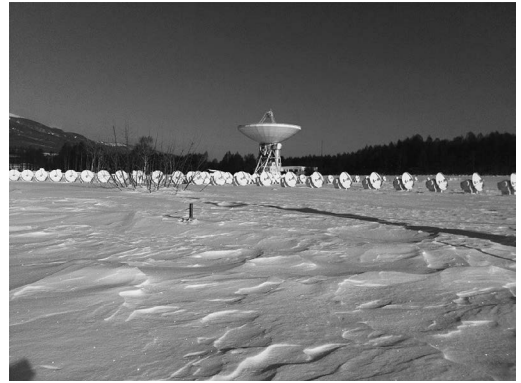


図1 2014年2月17日、建設以来最大の大雪に見舞われ鏡面まで雪に埋没しながら、それでもなお観測を続ける電波ヘリオグラフ。この望遠鏡の精神が最も如実に表現されている。このときは人力による除雪を断念し、太陽光による融解のみで除雪された。奥に見える大きなアンテナが野辺山45 m電波望遠鏡。

5. 太陽の磁場と偏波の関係

それでは、電波ヘリオグラフの観測結果を見ていきましょう。図2aは2012年4月13日に観測された、電波で見た太陽面です。この電波はほぼ熱制動放射によって放射されています。太陽面の中心付近に明るい構造があるのがわかります。図2bはこのときの太陽磁場を可視光で観測したものです。明るく見える領域には黒点があることがわかります。電波で観測すると黒点は明るく見えます。これは黒点上空には熱制動放射を放射するプラズマ大気が周辺より多く存在するからです。黒点の領域を拡大したものが図3aです。白または黒の領域がそれぞれ正極と負極の磁場をもつ領域に対応します。薄い青の等高線が正極の磁場に対応する円偏波、濃い青の等高線が負極の磁場に対応する円偏波が観測された領域です。ここで注意していただきたいのは、比較対象として表示している磁場は可視光で計測された太陽表面（光球面）の磁場である点です。電波では、それよりも

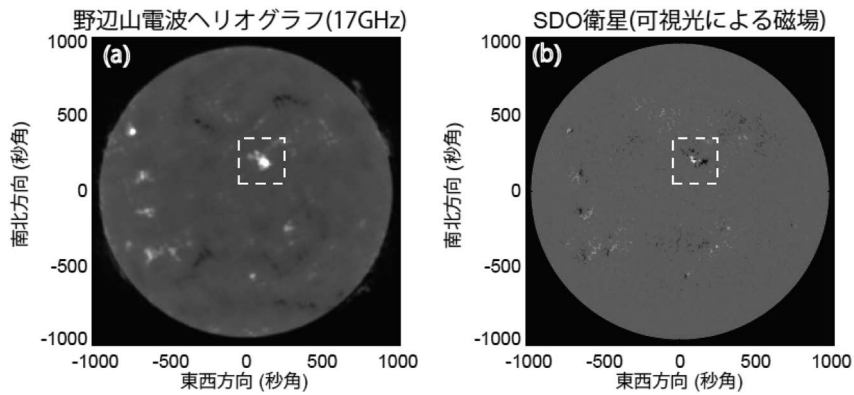


図2 (a) 野辺山電波ヘリオグラフで観測された17 GHzで見た太陽面。電波の強い領域ほど明るく表現されている。(b) 太陽観測衛星SDOで観測された可視光による太陽表面の磁場。白い領域が正極、黒い領域が負極の磁場を表す。

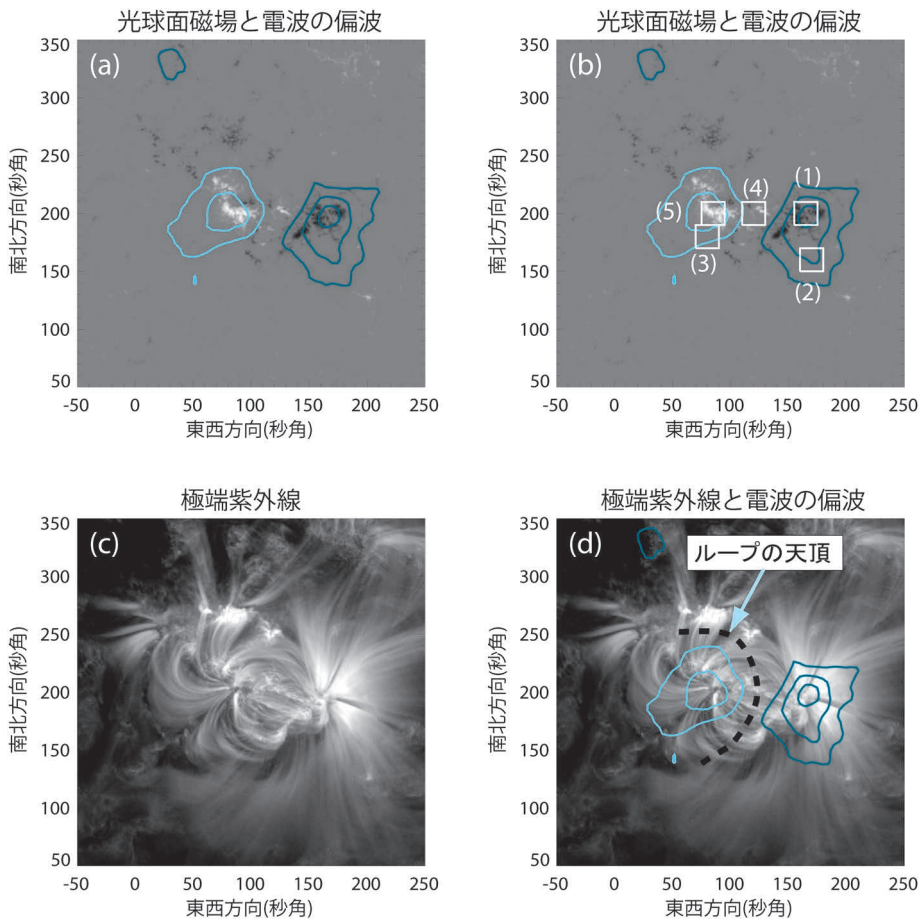


図3 図2の白い点線で囲まれた領域の拡大図。(a) 可視光で観測された光球面磁場に電波の偏波成分を等高線で重ねた図。(b) 同上。四角で囲まれた5領域は図4で解析する(1)~(5)領域に対応。(c) 太陽観測衛星SDOで観測された極端紫外線によるコロナループ構造。(d) 極端紫外線の観測データに電波の偏波成分を等高線で重ねた図。

上層の磁場が計測されるはずですが、磁力線は光球面から伸びているので、光球と彩層・コロナの磁場分布は全く同じではないですが、大まかには似ているはずですが。光球面の磁場は、彩層の磁場に対して計測が比較的簡単で、その手法も十分に確立しているため、今回は電波による磁場の比較対象として光球面磁場を用います。図3aを見る限り、偏波の極性や観測領域は、表面の磁場とよく一致しているようですが、偏波の分布は表面の磁場の分布よりも広がっているようです。

図3bで四角で囲まれた黒点周辺の5カ所の表面磁場と電波の偏波成分を比較した結果を図4に示します。二つの観測量はおおむね比例関係にあります。黒点の端の領域(2, 3番の四角)では表面磁場が弱いのに偏波信号が観測されています。この観測データでは、観測条件の最も良い時間に得られた画像1,000枚以上を積分するなど詳細な解析を行った結果、円偏波率の誤差を約0.1%まで低減することに成功しました。よって、1%の偏波は誤差よりも十分に大きいと言えます。電波ヘリオグラフの空間分解能は10秒角程度であるのに対して、四角で囲った領域は1辺が20秒角あります。よって偏波信号が観測された領域の広がりには望遠鏡の空間分解能の違いでは説明できません。つまり、この領域には、表面磁場が弱いにもかかわらず、偏波信号が存在しているようです。

図3cに人工衛星によって観測された極端紫外線(EUV)と呼ばれる波長で得られた画像を示します。極端紫外線は可視光やマイクロ波に比べ、より高温なプラズマ大気から放射される特徴があります。太陽の場合、可視光で見える表面が約6,000度に対して、マイクロ波で見える表面である彩層が1万度程度で、その上空に100万度程度の高温度大気コロナが存在するという不思議な大気構造になっています。極端紫外線は主にこのコロナ大気から放射されます。図中には湾曲した筋状の構造が多数認識できます。これらはコロナループと呼ばれる構造で、太陽表面からつながった磁力線の形を表しています。コロナの大気はほぼ完全に電離したプラズマで満たされており、この電離した大気は磁力線の中に閉じ込められやすい性質があります。磁力線の両端が太陽表面につながっている場合、プラズマ大気には逃げ場がありませんから、その中にたまっていきます。結果、コロナループのような構造中には、たくさんのプラズマ大気が存在し、光って見えるのです。つまり光る筋は磁力線の構造そのものです。ちょうど磁石の周りに砂鉄をばらまいた状態に似ていますね。ただし、この観測データからは磁力線の形状はわかりますが、磁場は導出できません。

このコロナループと電波で観測される偏波信号の等高線を重ねたものが図3dです。偏波が観測

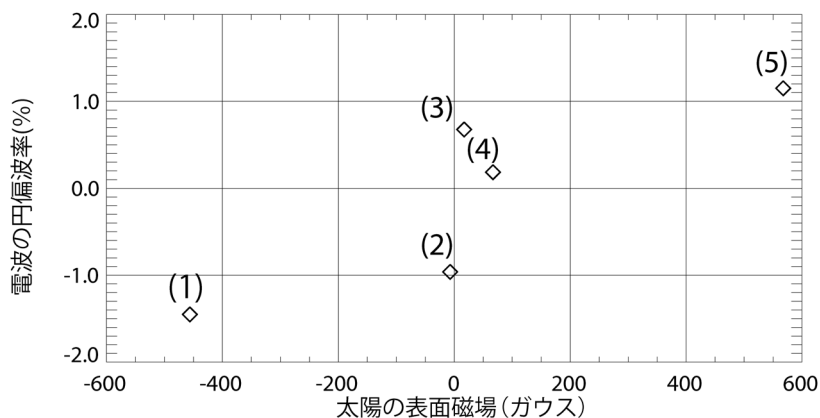


図4 図3b中の四角で囲まれた5領域内の平均的な電波の円偏波率と光球面磁場の関係。

されているのは黒点からコロナループが広がりながら伸びている領域に対応するようです。さらによく見ると、コロナループが折れ曲がって反対側の端に落ち込むその天頂よりやや内側で偏波が検出されなくなっています。図3dでは正極側の等高線でその傾向が顕著です。

電波で観測されるのは、視線方向磁場といって、磁場の3成分のうち、観測者が見ている方向と並行な成分だけです。例えば、磁力線が観測者が見ている方向に対して垂直に横切っている場合、十分な磁場強度があっても偏波は生まれません。ループ構造の頂上より内側で偏波が観測されるのは、コロナの磁力線の観測者に対する角度が関係していると考えられ、つまり、太陽表面から広がって伸びるコロナの磁力線から放射される偏波信号が受信されていることになるのです。

6. 重なり合う二つの大気

さて、今回の観測結果を正しく理解するには、少しだけ電波に関係する物理を知る必要があります。以下では少し専門的な話をしますが、お付き合いいただければと存じます。

そもそも、磁場のあるプラズマ中で熱制動放射がどうして偏波するのか？というところから考えていきましょう。プラズマ大気とは荷電粒子（電子やイオン）でできた大気です。磁場のある空間ではローレンツ力が働くため、電子やイオンは磁力線を中心に円運動しますね。円運動の回転方向は磁場の向きと粒子の電荷の符号によって決まっています。熱制動放射に含まれる右回りと左回りの成分は、電子の回転運動と同じ方向に回転するか逆方向に回転するかで、そこを通過する「しやすさ」が異なるのです。電波がある媒質中を通過する「しやすさ」のことを物理の用語では「光学的厚さ」と言います。この光学的厚さが右回り・左回りの2成分で異なると、2成分の合計がどちらかの成分に偏ります。これが偏波成分を生むのです。磁場がなければ、荷電粒子は自由に熱

運動していますから、熱制動放射の両偏波成分で光学的厚さは同じであり、当然偏波も生まれません。

上記だけで現象が理解できるのなら簡単なのですが、話はもう少し複雑です。上記では、偏波の2成分で通過しやすさが若干異なるものの、電波が簡単に通過できる環境について考えました。これを物理の用語では「光学的に薄い」と言います。一方、大気が濃くなれば、いずれ電波はそれ以上通過できない層に到達します。この領域の状態を「光学的に厚い」と言います。通常太陽から放射される電波はこの光学的に厚くなる層からの熱制動放射で、この層が電波で見たときの太陽の表面と言えます。熱制動放射はこの表面の温度に対応した電波強度で放射される性質があります。電波ヘリオグラフが観測している17 GHzでは彩層の約1万度の層で光学的に厚くなると考えられています¹⁰⁾。よってこの温度に対応した電波強度が観測されます。この彩層に磁場がある環境を考えてみましょう。磁場があれば、右回りと左回りの偏波成分の光学的厚さが異なりますから、片方が、

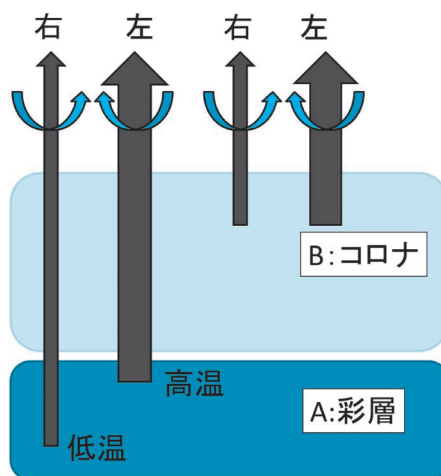


図5 彩層とコロナで偏波が発生する模式図。縦の矢印が電波の進行方向、その太さが強度を表す。縦の矢印の周りを旋回する矢印が偏波の旋回方向を表す。磁場の極性が反対なら、卓越する偏波の旋回方向も反対になる。

もう片方よりもより大気の濃い領域（より深い領域）まで到達できることになります。そして、太陽大気は高さによって温度が異なり、彩層では深くなるほど低温になります。つまり、右回りと左回りの成分では、見ている表面の温度が異なり、結果偏波が発生するのです。

話を簡単にするために、太陽の大気を、図5のように光学的に薄い層（コロナ）と光学的に厚い層（彩層）の2層の大気にモデル化して考えてみましょう。熱制動放射は電波で見た太陽の表面である彩層から、その面の温度に対応した強度で放射されます。しかし、磁場のある状態では、右回りと左回りで異なる高さ（＝異なる温度）の層から放射されるため、熱制動放射は偏波した状態で放射されます（図5のA）。彩層の上空にあるコロナ大気は彩層に比べ大気が希薄ですが、プラズマが存在し、電波を放射しています。コロナにも当然磁場があります。よって右回りと左回りで通過しやすさが異なりますから、コロナからの熱制動放射にも偏波が生まれます（図5のB）。私たちが地球で観測しているのは、この二つの層が生み出す偏波の足し合わせだったのです。

上記を踏まえて、もう一度観測結果を見てみましょう。表面に強い磁場のある黒点の中心付近では、図5のA、B両方の効果で偏波が発生します。一方、黒点の中心から外れた領域であっても、コロナのループ構造は広がっていますから、見通した先に表面磁場がなくても、コロナループからの放射が偏波しています。さらに黒点中心から離れると、ループ構造の頂上に達し、視線方向に対して磁力線が垂直になるので、偏波も発生しなくなります。ではなぜ、図3では磁力線の反対側の端で偏波が観測されていないのでしょうか？ 反対側の足元は表面磁場が弱く、また、このような領域ではマイクロ波の放射自体も弱いため、偏波が

観測されにくいのです。

放射の仕組みがわかったところで、観測された偏波を磁場に変換していきましょう*2。偏波信号が観測された端の領域では、見通した先に彩層磁場がありませんから、得られた偏波信号はすべてコロナのループ構造から放射されたものです。彩層から放射される無偏波の成分を差し引くとコロナ単体の円偏波率は高くなります。この円偏波率を視線方向の磁場強度に変換すると約70 Gaussとなります。一方、偏波信号が観測された中心領域ではコロナも彩層も両方磁場をもっています。この状態でも円偏波率から視線方向磁場を求めることはでき、約110 Gaussとなります。ただし、この磁場は彩層とコロナの磁場をそれぞれの層から放射される電波強度で重み付き平均したもので、実際の磁場強度とは少し違います。

二つの層からの偏波放射を完全に分離するには、異なる二つ以上の周波数で偏波観測をする必要があります。残念なことに、電波ヘリオグラフは17 GHzでしか偏波観測ができないため、この2成分を分離することができません。一方、太陽の淵の近くにある黒点から太陽面の外に飛び出た磁場構造なら、コロナを見通した先に彩層の成分はありませんから、純粋なコロナの磁場を求めることができます。この点に注目した筆者らは、最近の研究で、コロナ磁場をより詳細に求めることに成功しました¹¹⁾。今後この研究がさらに発展していくことが期待されます。

7. 偏波・偏光観測の時代へ

今回は電波の偏波観測から磁場を求めのお話を紹介しました。電波ヘリオグラフの高い偏波決定精度によって、微妙な偏波成分の観測に成功し、条件は付くものの、彩層やコロナの磁場を観測量から求めることができました。特に黒点の端だけ

*2 紙面の都合上割愛しましたが、理論上、1層の大気の磁場の導出には、1波長での偏波観測と2波長での強度観測が必要です。野辺山電波ヘリオグラフでは強度情報のみですが34 GHzでもデータが取得されます。最終的な磁場はこれらを組み合わせることで導出されています。

と条件は限られますが、コロナの磁場を観測量だから求めることができるこの手法の信頼度は、他の手法に比べ非常に高いと言えます。

電波ヘリオグラフでは1周波数でのみ高精度な偏波観測が可能のため、いろいろと条件が付きましたが、多周波数で高精度な偏波観測が可能な電波望遠鏡が諸外国で建設されつつあります。また、日本を中心に計画が進められている太陽観測衛星 Solar-C では、別のメカニズムを用いて可視光・赤外線「偏光」観測から彩層やコロナの磁場を詳細に計測することを目指しています。これから偏波・偏光観測で磁場を計測することは、ますます盛んになっていきそうです。このような近未来の観測で、太陽大気や物理がより深く理解できることが期待されます。

謝 辞

この記事の科学的内容は日本天文学会欧文研究報告 (PASJ) の野辺山電波ヘリオグラフ特集号に掲載された筆者らによる投稿論文¹⁾に基づいています。本研究で用いた野辺山電波ヘリオグラフは、国立天文台野辺山太陽電波観測所によって運用されています。日頃研究や観測を一緒に行っている観測所員の皆様に、この場を借りて感謝申し上げます。また編集を担当していただいた勝川行雄氏には、多くの有益なコメントをいただきました。

参考文献

- 1) Iwai K., Shibasaki K., 2013, PASJ 65, S14
- 2) Lin H., Kuhn J. R., Coulter R., 2004, ApJ 613, L177
- 3) Trujillo Bueno J., et al., 2005, ApJ 619, L191
- 4) Gary D. E., Hurford G. J., 1994, ApJ 420, 903
- 5) Ryabov B. I., et al., 1999, Solar Physics 185, 157
- 6) Dulk G. A., 1985, ARA&A 23, 169
- 7) Bogod V. M., Gelfreikh G. B., 1980, Solar Physics 67, 29
- 8) Grebinkij A., et al., 2000, ApJS 144, 169
- 9) Nakajima H., et al., 1994, Proc. IEEE 82, 705
- 10) Zirin H., Baumert B. M., Hurford G. J., 1991, ApJ 370, 779
- 11) Iwai K., et al., 2014, EP&S, submitted

Solar Magnetic Fields Measured by Radio Observations

Kazumasa Iwai

Nobeyama Solar Radio Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, Nobeyama, Nagano 384-1305, Japan

Abstract: Radio emission is invisible to the human eye, preventing us from understanding it intuitively. Hence, it is usually difficult to promote radio astronomy. However, radio astronomy has enabled us to observe many objects that have poor visibility in the visible wavelength range and to measure physical quantities that are difficult to visualize by optical observations. Nobeyama Radioheliograph (NoRH) observes radio emissions of the Sun in the microwave range. Recently, we developed a new data analysis method that can measure the solar magnetic field using polarization data from NoRH. This paper describes the method for measuring the magnetic field of the solar upper atmospheres, *i.e.*, the chromosphere, and the corona by radio polarization observation.