

岡山観測所の太陽望遠鏡と磁場観測

桜井 隆

〈国立天文台太陽観測科学プロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: sakurai.takashi@nao.ac.jp



岡山天体物理観測所（以降、岡山観測所）の口径 65 cm 太陽望遠鏡は 1968 年に建設されました。スペクトル線のゼーマン効果に関する海野の理論（1956 年）を基礎とした、写真観測ポラリメータの開発と観測研究が 1970 年代になされ、さらに光電増倍管で感度を高めたベクトルマグネトグラフが 1982 年に完成しました。マグネトグラフによる太陽磁場の観測は、1992 年には三鷹の新しい装置に主力を移し、望遠鏡の共同利用運用も 1995 年度で終了しました。写真観測ポラリメータとベクトルマグネトグラフの主な研究成果を紹介し、その後の三鷹への展開についても述べます。

1. はじめに

岡山観測所の太陽望遠鏡（2018 年 12 月号ギャラリー 図 16）は岡山の第 2 期装置ともいえるべきもので、1965 年から 3 年計画で建設され、1968 年 1 月に完成しました。主鏡の口径は 65 cm、カセグレン式で合成焦点距離 37 m (F/57)、焦点面での太陽像の直径は約 35 cm です。分光器室には 1,200 本/mm、25×20 cm のグレーティングと、エッセル・グレーティングが設置されました（図 1）。望遠鏡の詳細と建設の経過については石田五郎の月報記事¹⁾をご覧ください。1970 年度より共同利用観測が開始され、1996 年度に共同利用の募集を停止するまで、観測課題の公募により運用されました。

太陽観測用の望遠鏡で、大型分光器を設置して高分散分光観測を行う場合、シーロスタットやヘリオスタットなど平面鏡の組み合わせで、地上に固定された主鏡と分光器に光を導くやり方も広く用いられます（例えば G.E. ハールが作った米国ウィルソン山天文台の 150 フィート・タワー望遠鏡など）。この場合、いわゆる望遠鏡鏡筒はなく、平面鏡を駆動するだけで太陽を追尾します。これに対して岡山の太陽望遠鏡は恒星用と同じ赤道儀式で、

カセグレン副鏡からの光を平面鏡で極軸に導くクーデ方式です。建設当時では珍しい方式でしたが、後で述べる磁場観測にはこれが幸いしました。

一方、太陽観測で問題となる、熱による望遠鏡内外の大気の乱れ（シーイング）を避けるため、(i) 望遠鏡や光路を真空にする、(ii) 高山や深い湖の近くなど空気の乱れの少ない立地を選ぶ、などの工夫が 1960 年代後半からなされるようになりました。岡山の太陽望遠鏡では、残念ながらこれらの点が考慮されていません。また、1971 年には東京大学東京天文台乗鞍コロナ観測所に口径 25 cm コロナグラフが完成し、口径は岡山より小さいものの、高山で散乱光が少なく、また分光器の性能も岡山より優れていました。また、初期のヘビーユーザーであった京都大学の研究者たちも、1979 年に飛騨天文台にドームレス太陽望遠鏡（口径 60 cm の真空望遠鏡）が完成すると、そちらが活動の本拠地となりました。このような状況で、この望遠鏡は高精度の磁場観測に活路を求めることとなります。



図1 左: 分光器室のコリメータミラー (左), エッセルグレーティング用の大きなカメラミラー (中央, 蓋が閉まっている) とカメラ (右の大きな箱). 右: 回折格子 (中央) とエッセルグレーティングのプレディスパーザ用透過グレーティング (上, 鉄骨の下に取り付けられている).

2. 磁場観測

2.1 写真観測用ポラリメータの時代

1956年に海野和三郎²⁾は、恒星大気の中で形成されるスペクトル線が、磁場がある場合ゼーマン効果によってどのような形になるかという論文を発表しました。この論文で述べられた理論 (後に「海野・ラチコフスキーの公式」と呼ばれることとなります) は、その後の磁場観測の基本理論となり、現在でも (例えばひので衛星の可視光望遠鏡SOTの解析ソフトウェアでも) ほぼそのままの形で使われています。スペクトル線の偏光を観測することにより、磁場の強度と向きを求めることができます。

海野の理論に基づき、太陽の磁場を測定するための装置の試作は、1960年代に三鷹の塔望遠鏡を使って始まりました。装置はその後、「西ポラリメータ」と称されるようになりますが、当の西恵三によれば³⁾、「…海野先生はその頃大学院生であった小平桂一氏を指導して太陽黒点磁場を測定するためのポラリメータ (偏光観測装置) を製作中でしたが、同氏がドイツ留学のため出発されたのでタイミングよく私 (西) が引き継いだ形となっ



図2 写真観測用ポラリメータ。

たのです。」しかし最初の観測結果⁴⁾では、ポラリメータを分光器の出口に配したことから、塔望遠鏡はシーロスタット方式であることから、平面鏡での斜め反射や回折格子が作る装置偏光 (太陽起源でない偏光) が大きく、西もいうように満足のいくものではありませんでした³⁾。これらの欠点を克服するため、岡山の太陽望遠鏡に設置する写真測光用ポラリメータ*¹⁾ (図2) の開発が、1970年頃から西恵三、牧田貢によって進められました⁵⁾。

ポラリメータの原理は、偏光ビームスプリッタにより、互いに直交する直線偏光を二つの出射光線に分離することです。円偏光は、1/4波長板に

*¹⁾ このポラリメータは長い間、岡山観測所の太陽望遠鏡分光器室内に保管されていたのですが、最近になって遺失していることが判明しました。たいへん残念です (筆者)。

よって直線偏光に変えた後、同じ操作を加えると、右周り、左周りの円偏光が分離できます。岡山のポラリメータは分光器スリットの前に置かれ、ポラリメータの出射光は分光器に入って直線偏光2本、円偏光2本の4本のスペクトルを作ります。これをフィルムに撮影して解析します。ビームスプリッタとしてロッシェンプリズム、1/4波長板としてフレネルの菱面体を採用しています。使うスペクトル線は通常はFe I 6303 Åですが、フレネルの菱面体は広い波長範囲にわたって1/4波長板としてはたります。岡山の望遠鏡でも鏡での斜め反射による装置偏光はありますが、反射角が一定であるため、ポラロイドを通して入射させた光のデータを較正に使うことで容易に取り除くことができました。

図3は観測結果の例で、田中捷雄⁶⁾はこの1974年7月のデータから磁場強度を4,300 Gaussと求め、1942年の黒点と並ぶ最強強度であったと報告しました。川上肇の学位論文である黒点磁場の詳細観測⁷⁾は今でもよく引用されます。

しかしながら写真観測では、磁場の測定精度は100 Gauss (10ミリテスラ)程度が限度で、黒点以外の場所では有為な信号が得られません。光電観測により、高精度の磁場観測を行う装置(マグネトグラフ)が西恵三、牧田貢、浜名茂男らによって1976年から製作され、1982年に完成しました⁸⁻¹⁰⁾。

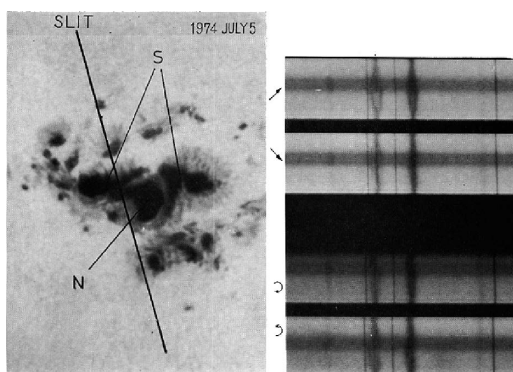


図3 黒点のスペクトルに見られるゼーマン効果. 右のスペクトルは直交する2偏光と右・左周り円偏光.

2.2 ベクトル・マグネトグラフ

岡山観測所のマグネトグラフ(図4)は、偏光変調用の光学系と、偏光解析用の電気系から構成されます。2枚の斜め反射鏡によって生ずる装置偏光は、入口にある平行平板とバビネ補償板によって取り除かれます。その後、光はモータで回転する1/4波長板によって変調を受け、ウォラストンプリズムにより2本の互いに直交する直線偏光に分離されます。1/4波長板の回転周波数を ω (この装置では40 Hz)とすると、出射光のうち、振動数 2ω の成分が入射した円偏光、振動数 4ω の成分が入射した直線偏光を表します。円偏光から磁場の視線方向成分、直線偏光から横方向磁場の強度と向きがわかり、磁場ベクトルが得られるので、このような装置をベクトル・マグネトグラフと呼んでいます。

スペクトルの強度の測定には光電増倍管が用いられます。光電増倍管は、ウォラストンプリズムで分けられた2本のスペクトルの各々に対して、吸収線(Fe I 5250 Å)の両翼(27-80 mÅ)に一つずつ、40Åくらい離れた連続光(幅15Å)の部分に置かれているので、全部で6本あります。吸収線両翼の光電増倍管の出力は、スリット背後に置かれたガラスブロックを傾けて吸収線の位置を動かし、バランスさせます。逆に、ガラスブロックの傾きを読むことにより、ドップラー偏移が検出できます。

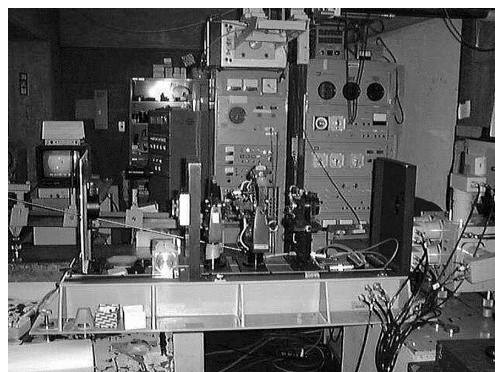


図4 光電式マグネトグラフの光学系(偏光変調部)と光電受光部(右端).

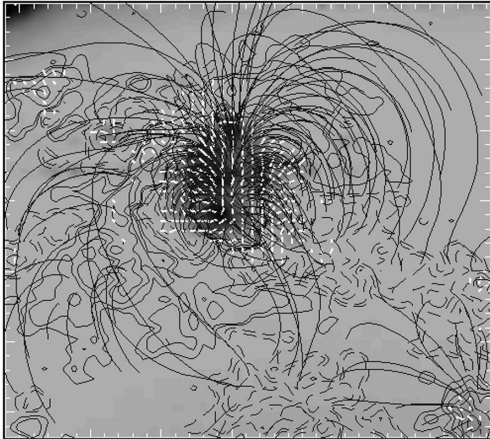


図5 磁場ベクトルの観測例と計算された磁力線
(1989年3月10日).

マグネトグラフは1982年12月に定常運用に入りました。観測を始める前の調整に30分ほどかかるほかは、観測自体は計算機(MELCOM 70/60B, 当時の言葉では「ミニコン」)の制御で自動的に行われ、約1時間かけて一つの活動領域を、10秒角ステップで東西50点、南北45点観測するのが標準的な観測でした。観測終了後、ポテンシャル磁場(磁場は表面下の電流によるもので、太陽表面より上には電流が流れていないという仮定で計算される磁場)の磁力線を計算して(これも1時間以上かかるので夜間に実施)表示することができます(図5)。1982年から1995年の間、毎年200–300スキンのデータを得ていました。

私がマグネトグラフの観測に参加するようになったのは1983年からで、主にデータの後処理(偏光度から磁場ベクトルへの変換、図作成・出版、データ保管作業)を担当しました。当時名古屋大学空電研究所の柴崎清登もデータ処理に参加し、1983年にはデータ保管フォーマットとして(早くも) FITS ファイルを採用していました。

2.3 主な研究成果

岡山のマグネトグラフの研究成果は牧田¹¹⁾に

よってまとめられています。磁場ベクトルの観測から、磁気歪みの蓄積をモニターして、起こりうるフレアの規模を予測する(あるいは、起こったフレアの規模が説明できるかどうか検証する)ための基礎研究は桜井ほか^{12),13)}が発表しました。観測で得られる磁場ベクトルの横成分には向きの不定性(矢印の頭をどちらにつけるかが決まらない)があり、符号も含めて観測できる視線方向磁場からポテンシャル磁場のベクトルを計算し、これに近い方の向きを選ぶ、という現在でも標準で使われる(これでは合わない場合も多いと批判はされるのですが)方法の元祖はこの論文なのですが、会議集録であったせいもあり知名度が低いです。磁場の歪みとフレアとの定量的な関係を自分なりに納得できるまで解析できたのは、次節で述べる三鷹の装置ができてからです^{14),15)}。

川上新吾^{*2}, 牧田, 黒河宏企¹⁶⁾は、 $H\alpha$ 線で観測される彩層の筋模様と、マグネトグラフで観測される磁場ベクトルの向きの関係を調べました。磁場ベクトルは光球(太陽の表面)で観測され、彩層はそれより約2,000 km上の層なので、彩層の筋模様が磁力線に沿っているとして、両者が一致するのかどうかという問題です。それまでは、「大体合っている」と考えられていましたが、この研究では、光球の磁力線は上層に向かって立ち上がっているのに対して、彩層の磁力線はほぼ水平であると仮定すると、両者が太陽の中央付近では比較的良好に一致し、中央から離れると一致度が下がるという観測結果は、光球での磁力線の立ち上がり角が20–40度で、真上から見たときのずれ角も同じくらいあると、よく解釈できることを示しました。

牧田¹⁷⁾は、マグネトグラフの連続光チャンネルの 10^{-3} 程度の微弱な円偏光に注目しました(装置の感度は 10^{-4})。連続光は本来偏光はしません。観測している連続光の波長帯(幅15Å)にはスペ

*2 現在は文部科学省の主任教科書調査官(理科(地学)担当)をされています

クトル線も含まれますが、スペクトル線の円偏光も、ゼーマン分離した赤側と青側の成分が逆向きの偏光を示すので打ち消すはずで、ただしスペクトル線の形成層で、高さ方向に磁場強度と上下運動速度（ドップラー速度）に勾配がある場合は、完全には打ち消さずに円偏光が残ることは以前から知られていました。しかし牧田は、これでは観測された円偏光度に足りないの、別のメカニズムとして、黒点半暗部など横磁場の強い領域でできたスペクトル線の直線偏光が、上へ伝搬するにつれて一部円偏光に変換されるのではないかと提案しました。こういうことが起こるためには、横磁場の向きが下層と上層で回転していなければならず、300 kmの間に30度くらい回転していることが必要と結論しました。さらに、回転の方向は黒点の極性によらず、かつ南北両半球で同じ、右ねじの向きと結論しました。

これと関係するかどうか確信がありませんが、黒点の磁場は北半球で左ねじ、南半球で右ねじの傾向があること（ヘリシティの半球則、図6）が1990年ごろから主張され始めました¹⁸⁾。次節で述べる三鷹の観測装置でもこの傾向は確認¹⁹⁾しましたが、これが年とともに（11年周期の活動サイクルとともに）変わるかどうかを見るために、岡山のマグネトグラフのデータと組み合わせると、活動極小期にはこの傾向が逆転するように見えました²⁰⁾。その後の研究では、もう少し複雑な

振る舞いをしていることがわかりました²¹⁾が、活動極小期には極大期と逆のよじれをもった領域が確率的に多く出現するという主張は基本的には正しいようです。ヘリシティの半球則は光球面での磁場のよじれに関するものであるのに対し、先の牧田の議論はそれが高さとともにどちら向きに回転するかを述べたものなので、違う現象ですが、最近では連続光の円偏光は、半暗部の微細構造に起源を求める説が主流となっているようです²²⁾。

3. 三鷹に引き継がれた磁場観測

岡山のマグネトグラフは、偏光測光精度は高く、連続光を測定する光電増倍管では 10^{-4} を実現していました。しかし、(i) 空間分解能が低い（6-10秒角きざみで一点一点観測する）、(ii) 一領域観測するのに1時間以上かかり遅い、(iii) 偏光の波長方向分布が得られない（吸収線の翼部27-80 mÅを積分した値を測定している）、という欠点がありました。

これらの点を改善すべく、いわば第3世代の磁場観測装置として、1990年に三鷹構内に「太陽フレア望遠鏡」を建設しました²³⁾。これは4本の望遠鏡を同架した太陽観測装置で、連続光による黒点観測、H α 線による彩層の観測、磁場ベクトルの観測（波長6303Å）、ドップラー速度場の観測を同時に実施できます。磁場、速度場の観測は、波長分離用に狭帯域フィルターを用い、CCDカメラにより視野全体（640×512ピクセル）の測定を1分足らずで完了します。CCDの1ピクセルは太陽面上で0.66秒角に対応し、実際はシーイングのため2-4秒角の分解能ですが、それでも岡山のマグネトグラフよりは高解像度で、上記の課題 (i) と (ii) を解決しました。

三鷹の磁場観測装置のように、分光器でなく狭帯域フィルターで特定の波長を取り出し、CCDなど2次元撮像装置でデータを取るものをビデオマグネトグラフまたはフィルターマグネトグラフと呼びます。1992年から岡山のマグネトグラフ

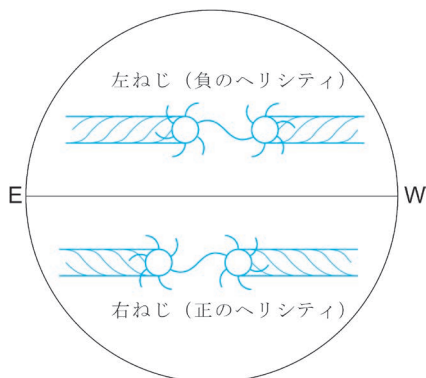


図6 太陽磁場の系統的よじれ (半球則)。

と平行運用を行い、信頼性も確立したので、1995年末で岡山のマグネトグラフは定常運用を打ち切りました。マグネトグラフの光学系と電気系は現在、三鷹・太陽塔望遠鏡の地下展示スペースに保管されています。

課題 (iii) については、磁場観測の主力が三鷹に移った後、岡山のマグネトグラフの検出器を CCD に替えて偏光スペクトルを得る実験を 2002 年まで行いましたが、いい結果が得られませんでした。小さい CCD に対して太陽像が大きすぎ、広い領域を短時間で観測できないのみならず、光量不足のため露出時間が長く、像の揺らぎで出る偽偏光が大きかったためです。2010 年に、三鷹の太陽フレア望遠鏡の観測システムを更新し、ゼーマン効果の大きい赤外域の吸収線 ($\text{Fe I } 1.56 \mu\text{m}$) を分光器と赤外カメラで観測するシステム (赤外スペクトロポラリメータ) を製作して解決しました²⁴⁾。この装置は太陽全面を約 2 秒角の解像度で 1 時間半ほどかけて観測するもので、再び遅い装置にはなりましたが、研究目的がフレアというよりは周期活動なので、これで合目的的であると考えています。

4. おわりに

私が初めて岡山の太陽望遠鏡で観測したのは 1975 年で、最初は写真ポラリメータ、つづいてマグネトグラフ、その CCD 化と続き、合計で約 70 回、400 日くらい岡山に滞在したことになります。その後、三鷹や乗鞍の望遠鏡、京都大学飛騨天文台のドームレス望遠鏡なども使いましたが、岡山の太陽望遠鏡が最も慣れた装置で、目をつむっても操作できる (誇張) ほどです。装置の運用は終了しましたが、今後もデータは活用して研究を続けようと考えています。

謝 辞

岡山天体物理観測所の歴代所長と職員の皆さん、太陽望遠鏡の建設や装置製作を進められた

方々、それらを使った研究者の方々、地元および関係各署の皆様に感謝します。

参考文献

- 1) 石田五郎, 1968, 天文月報, 61, 96
- 2) Unno, W., 1956, PASJ, 8, 108
- 3) 西恵三, 1976, 天文月報, 69, 108
- 4) Nishi, K., 1962, PASJ, 14, 325
- 5) Nishi, K., & Makita, M., 1973, PASJ, 25, 51
- 6) 田中捷雄, 1975, 天文月報, 68, 165
- 7) Kawakami, H., 1983, PASJ, 35, 459
- 8) 牧田貢, 1983, 天文月報, 76, 284
- 9) Makita, M., et al., 1985, PASJ, 37, 561
- 10) Makita, M., 1986, Solar Phys., 103, 1
- 11) Makita, M., et al., 1993, IAU Colloq., 141, 180
- 12) Sakurai, T., et al., 1985, in Theoretical Problems in High Resolution Solar Physics, ed. H. U. Schmidt (Max-Planck Institut für Physik und Astrophysik, Garching), 313
- 13) Sakurai, T., 1987, Solar Phys., 113, 137
- 14) Li, H., et al., 2000, PASJ, 52, 465
- 15) Li, H., et al., 2000, PASJ, 52, 483
- 16) Kawakami, S., et al., 1989, PASJ, 41, 175
- 17) Makita, M., 1986, Solar Phys., 106, 269
- 18) Seehafer, N., 1990, Solar Phys., 125, 219
- 19) Hagino, M., & Sakurai, T., 2004, PASJ, 56, 831
- 20) Hagino, M., & Sakurai, T., 2005, PASJ, 57, 481
- 21) Gao, Y., et al., 2013, MNRAS, 433, 1648
- 22) Borrero, J. M., & Ichimoto, K., 2011, Living Rev. Solar Phys., 8(4)
- 23) Sakurai, T., et al., 1995, PASJ, 47, 81
- 24) Sakurai, T., et al., 2018, PASJ, 70, 58

Solar Telescope of Okayama Observatory and Its Polarimetric Instruments

Takashi SAKURAI

National Astronomical Observatory of Japan,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: The 65-cm aperture solar telescope of Okayama Observatory was constructed in 1968. Based on Unno's (1956) theory on the Zeeman effects on spectral lines, a photographic polarimeter was constructed in the 1970s. In 1982 a more sensitive instrument using photomultipliers, the Vector Magnetograph, was constructed and had been used till 1992 when a new instrument was built at Mitaka. The open use of the telescope was continued till FY1995. Here I will review the research highlights of the photographic polarimeter and the photoelectric vector magnetograph, and later development of magnetic field measurements at Mitaka.