

太陽フィラメント磁場構造の診断

山崎 大輝

〈国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
〒252-5210 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉
e-mail: yamasaki.daiki@jaxa.jp



太陽フィラメントは、太陽コロナ中で磁場に支えられた低温高密度プラズマ雲である。先行研究によると、太陽フィラメントの磁場強度について、数Gから数百Gまで開きがある。また、磁場構造については順極性型と逆極性型が提案されている。本研究では、太陽フィラメントの磁場強度及び磁場構造を明らかにするため、京都大学飛騨天文台ドームレス望遠鏡に搭載された近赤外偏光分光観測装置を用いて静穏領域上空の太陽フィラメント8例について、He I 10830 Åの空間スキャン偏光分光観測を行った。その結果、磁場強度は8-35 G、磁場構造は8例中1例が順極性型、7例が逆極性型とそれぞれ得られた。本研究成果は、太陽フレアに伴う太陽フィラメント噴出の加速機構や、太陽フィラメントを伝播する波動の研究への応用が期待される。

1. 太陽フィラメント

太陽大気は、温度約6000度の光球から上層に向かって、約1万度の彩層、そして数百万度のコロナによって構成される。大気中には、電離ガス（プラズマ）が存在し、磁場との相互作用から多様な磁気流体現象を示す。太陽フィラメントは、高温（数百万度）の太陽コロナ中で凝縮した低温（数万度）のプラズマ雲であり、太陽面上に存在する場合、H α 線の吸収線として観測され、黒い筋模様として見える。太陽の縁の外に存在する場合、H α 線の輝線として観測され、太陽プロミネンスと呼ばれる。太陽フィラメントとプロミネンスは、見え方が異なるだけで、構造としては同じものを指している。

太陽フィラメントが光球の磁気中性線上空でよく観測されることから、太陽フィラメントを構成する低温プラズマは太陽大気中の磁場構造によって保持されると考えられている [1]。太陽フィラ

メントを支える磁場構造は、ポテンシャル場から逸しており、太陽表面での爆発現象である太陽フレアのエネルギー源になる。また、その噴出が太陽フレアのエネルギー解放を駆動する [2, 3]。そのため、太陽フィラメントの磁場強度や磁場構造を観測的に決定することは、太陽フレアのエネルギーの見積もりや発生機構の理解にもつながる重要な研究課題である。

太陽フィラメントの磁場診断には、磁場に感度のある線スペクトルの偏光観測が鍵を握る。太陽フィラメントで吸収される中性のヘリウムの近赤外線スペクトル (He I 10830 Å) は、磁場への感度が比較的高いことから、しばしばその磁場診断に用いられる。He I 10830 Åは、ゼーマン効果によって視線方向の磁場に対応した円偏光が観測され、ゼーマン効果、散乱偏光、ハンレ効果によって面内方向の磁場に対応した直線偏光が観測される。

これまでの観測的研究から、太陽フィラメント

表1 太陽フィラメント磁場に関する先行研究

先行研究	フィラメント出現領域	磁場強度 [G]	順極性型	逆極性型
Wang et al. (2020) [19]	静穏領域	<100	—	○
Casini et al. (2003) [15]	静穏領域	10-70	—	—
Orozco Suarez et al. (2014) [20]	静穏領域	~25	—	—
Martinez Gonzalez et al. (2015) [21]	静穏領域	<20	—	○
Bommier et al. (1986) [22]	静穏領域	2-20	—	—
Leroy et al. (1984) [23]	静穏領域	5-10	—	—
Bommier & Leroy (1994) [24]	静穏領域	7.5	—	○
Leroy et al. (1983) [25]	静穏領域	6	—	—
Bommier et al. (1998) [16]	静穏領域	—	—	○
Xu et al. (2012) [26]	活動領域	600-800	○	—
Kuckein et al. (2009) [27]	活動領域	<500	—	—
Sasso et al. (2011) [28]	活動領域	100-250	—	—
Sasso et al. (2014) [29]	活動領域	~100	—	○
Diaz Baso et al. (2016) [30]	活動領域	~10	—	—
Okamoto et al. (2008) [31]	活動領域	—	—	○ ¹
Yokoyama et al. (2019) [32]	活動領域	—	—	○ ¹

¹太陽フィラメント下部の光球磁場観測から推定.

を支える磁場の強度は典型的に、静穏領域上空及び活動領域上空に出現するものについてそれぞれ 10 G 程度及び 100 G 程度と考えられている (表1 参照). また、磁場構造については順極性型 [4] と逆極性型 [5] の2つのモデルが提案されており (図1 参照), これまでの統計解析から静穏領域に出現する太陽フィラメントは逆極性型が多く、活動領域に出現する太陽フィラメントは順極性型が多い傾向があると報告されている. しかし、過去の観測では、偏光観測精度の制限から視線方向磁場に感度のある円偏光の強度と極性のみを用いた判定になっており、太陽フィラメントの局所的な構造のみを反映している可能性がある. そこで、本研究では太陽フィラメント8例について、2次元空間スキャン観測を行うことで、太陽フィラメントの大局的な磁場強度や磁場構造の調査から、先行研究との比較検討を行った.

2. 偏光観測と磁場診断

2.1 観測装置

太陽フィラメントの観測には、京都大学飛騨天

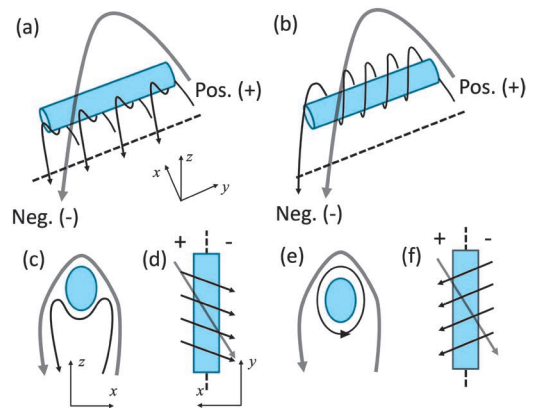


図1 順極性型及び逆極性型の磁場構造の模式図. シアンの筒状構造は太陽フィラメントを構成するプラズマ, 黒実線, グレー実線及び黒点線はそれぞれ, プラズマを支える磁力線構造, 大局的な磁力線構造及び光球の磁気中性線を表す. (a) 順極性型の3次元図, (b) 逆極性型の3次元図, (c) 順極性型の断面図, (d) 順極性型の上から見た様子, (e) 逆極性型の断面図, (f) 逆極性型の上から見た様子.

文台ドームレス太陽望遠鏡搭載 [6] の近赤外偏光分光装置を用いた. 本装置は筆者らによって開発され [7], 筆者は特に赤外線カメラの性能評価に

貢献した [8]. 本装置による太陽フィラメント観測では、典型的に1 Hzで回転する波長板によって偏光変調をかけて、入射光の偏光状態を放射強度の時間変化に変換する. 放射強度の時間変化を200 fpsで3秒間積算して、偏光復調をかけ、1組の偏光フルストークススペクトル*1を取得する. 同時に取得可能な偏光スペクトルの波長範囲には、He I 10830 Åに加えて光球磁場に感度のあるSi I 10827 Åが含まれ、太陽フィラメント磁場と光球磁場をそれぞれ同時に診断できる.

本装置を用いて、2022年4月9日、6月4日、8月11日及び8月24日に、静穏領域上空に出現した8つの太陽フィラメントの観測を行った. 図2に、2022年4月9日に観測した太陽フィラメントの例を示した. (a)はHe I 10830 Åでの放射強度、(b)は90度直線偏光度、(c)は45度直線偏光度、そして(d)は円偏光度に対応している.

また、太陽フィラメントの微細構造の様子を知るために、京都大学飛騨天文台太陽磁場活動望遠鏡 (Solar Magnetic Activity Research Telescope; SMART [9]) 搭載のH α 線の偏光撮像装置 (Solar Dynamics Doppler Imager; SDDI [10]) による観測データ及び、Solar Dynamics Observatory (SDO) 衛星 [11] に搭載された極端紫外線撮像装置 (Atmospheric Imaging Assembly; AIA [12]) による304 Å画像も用いた.

2.2 解析手法

取得した偏光スペクトルからベクトル磁場を導出するために、偏光の輻射輸送方程式の逆問題を解くHAZELコード [13] を用いた. HAZELコードは、磁場強度 ($|B|$), 磁場と視線方向のなす角 (θ), 磁場の方位角 (ϕ), 光学的厚さ (τ), ドップラー速度 (v_{Doppler}), 乱流速度 (v_{turb}), ダンピング定数 (a), フィリングファクター (ff) の8つの物理量をフリーパラメータとして、ゼーマン効果、散乱偏光、ハンレ効果を考慮した偏光プロ

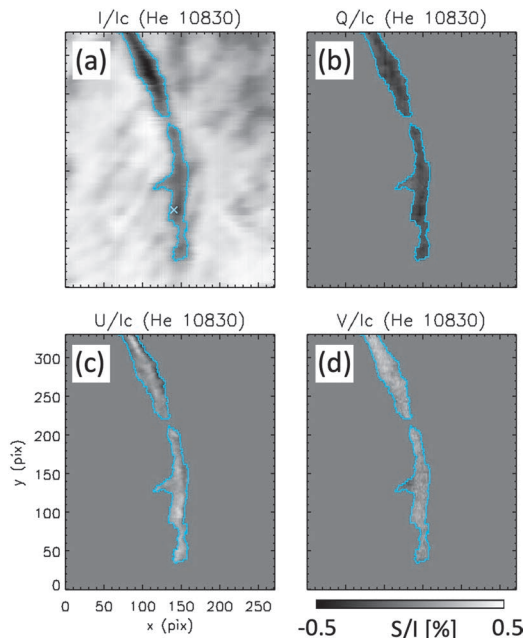


図2 2022年4月9日に観測した太陽フィラメントの空間マップ. (a) 放射強度, (b) 90度直線偏光度, (c) 45度直線偏光度, (d) 円偏光度. シアンで囲った領域が太陽フィラメントの存在する領域. ピクセルサイズは約0.5秒角, 350 kmに相当.

ファイルの再現が可能である.

本観測データへのHAZELコードの適用に当たっては、磁場の面内方向成分の向きが90度異なる時に同じ偏光スペクトルを示す、Van Vleck不定性の解決を試みた. 磁場と視線方向のなす角 (θ) について、 $0^\circ.0 \leq \theta \leq 54^\circ.74$, $54^\circ.74 < \theta \leq 125^\circ.26$, 及び $125^\circ.26 < \theta \leq 180^\circ.0$ の3通りにパラメータ範囲を区切り、それぞれをCase A, B, Cと名付けた3通りの解を得た.

3. 磁場の導出

3.1 不定性の除去

図3に、3通りの解を示した. 各パネルは、He I 10830 Å 辺りでの、放射強度、90度直線偏

*1 放射強度, 90度直線偏光度, 45度直線偏光度, 円偏光度の4成分からなるスペクトル.

光度, 45度直線偏光度, 円偏光度を表している. 黒印は, 観測によって得られたプロファイルを示しており, 破線, 実線, 1点破線はそれぞれCase A, B, Cのフィッティング結果に対応している. 各物理量は表2の通り得られた.

この3通りの解の中から, 最適なものを選択するために, 磁場3成分について2次元可視化した絵を図4に示した. (a-c) は, それぞれCase Aにおける面内成分磁場, 視線方向成分磁場, 円偏光プロファイルのフィッティング残差である. (e-g) 及び (i-k) は, それぞれCase B及びCase Cのそれらに対応する. (d) はAIA 304 Åの画像, (h) はH α 線の画像, (l) はSi I 10827 Åの観測から得られた光球の視線方向成分磁場である.

まず, 円偏光プロファイルのフィッティング残

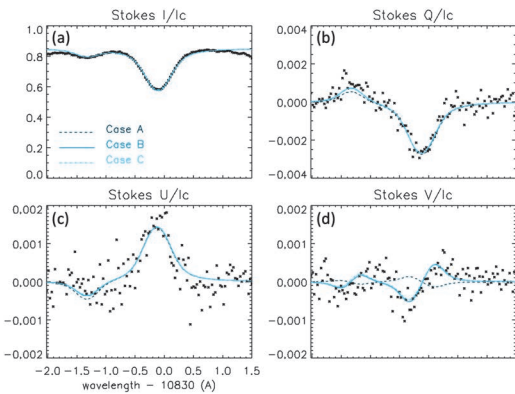


図3 HAZELコードによる逆問題の解として得られた偏光プロファイルのフィッティング結果. (a) 放射強度, (b) 90度直線偏光度, (c) 45度直線偏光度, (d) 円偏光度. 黒印は観測によって得られた値を, 破線, 実線, 及び1点破線はそれぞれCase A, B, Cのフィッティング結果を示している.

差に対応する (c, g, k) を見比べると, 明らかに (c) の残差が大きいがわかる. これは, Case Aにおいて制限を加えた磁場と視線方向のなす角の範囲内に, 適切な解が存在しなかったことを意味し, この解は棄却される. 次に, (e, i) の面内成分の磁場の向きに注目し, (d, h) の撮像観測から得られた, 太陽フィラメントの微細な筋状構造に注目すると, 概ね (e) の向きに対応することが分かる. このことから, (e) を含むCase Bの解が, 本フィラメントの磁場構造としてもっともらしいと結論づけられた.

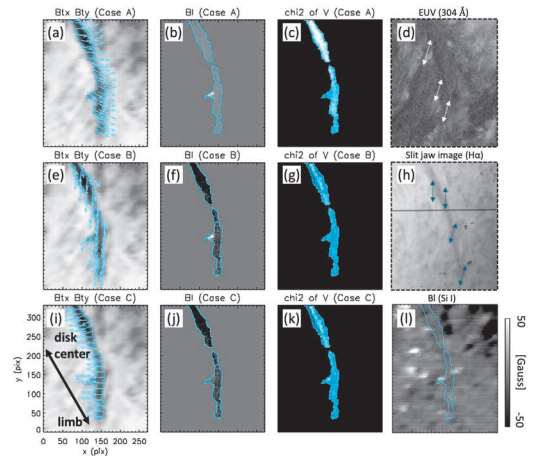


図4 (a, e, i) He I 10830 Å放射強度および面内成分磁場ベクトル (Case A, B, C), (b, f, j) 視線方向成分磁場 (Case A, B, C), (c, g, k) 円偏光プロファイルのフィッティング残差 (Case A, B, C), (d) 極端紫外線によるSDO/AIA 304 Å撮像画像, (h) H α 線による撮像画像, (l) Si I 10827 Åで得られた, 光球視線方向成分磁場. いずれの図についてもシアンで囲った領域が太陽フィラメントの存在する領域.

表2 3通りのパラメータ空間での逆問題の解

	$ B $ [G]	θ [deg]	ϕ [deg]	τ	v_{turb} [km/s]	v_{Doppler} [km/s]	a	ff^1
“Case A”	4.0	24.1	-11.7	0.80	5.0	-11.6	0.76	1.0
“Case B”	18.4	99.7	130.0	0.80	5.0	-11.6	0.74	1.0
“Case C”	14.0	156.4	156.8	0.79	5.0	-11.6	0.76	1.0

¹すべての場合について, フィッティングファクターは1とした.

表3 観測した太陽フィラメントの磁場3成分の空間平均値及び磁場構造（本稿中で結果を示したのは#2）

フィラメント ID	$ B $ [G]	θ [deg]	ϕ [deg]	τ	磁場構造
#1 ¹	35	63	52	0.63	逆極性型
#2	26	99	136	0.61	逆極性型
#3 ¹	21	69	54	0.70	順極性型
#4	8	105	105	0.76	逆極性型
#5	11	80	13	0.49	逆極性型
#6	17	88	89	0.58	逆極性型
#7 ¹	15	80	87	0.57	逆極性型
#8	11	76	94	0.38	逆極性型

¹ 白斑領域上空に出現した太陽フィラメント。

3.2 磁場強度と磁場構造

Case Bの解に基づく、本フィラメントの平均磁場強度は26 Gであった。加えて、図4(e)の青矢印の向きと (I) を基に考えられる大局的な磁場構造を比べると、(e) では右上から左下へ向かうのに対して、(I) では白（正極）から黒（負極）へ向かって左下から右上へ向かうことが分かる。この結果より、本フィラメントの磁場構造は逆極性型であると考えられる（図1参照）。

以上の解析及び検討を、紹介した以外の7つの太陽フィラメントについても行い、磁場強度は8-35 G、8例中7例が逆極性型、8例中1例が順極性型の磁場構造であることがわかった（表3及び[14]参照）。本結果は、[15]の静穏領域上空の太陽フィラメントについて磁場強度が10-70 G程度とする結果と概ね一致する。また、磁場構造については、[16]のHe I D3 5876 Åの観測に基づく静穏領域型の太陽プロミネンスについて296例中264例が逆極性型であったとする統計解析の結果と一致している。

4. まとめと今後の展望

本研究では、静穏領域の太陽フィラメントについて、複数のサンプルについて2次元スキャン観測から磁場強度及び磁場構造を決定することに成功した。今後の研究では、観測ターゲットを活動

領域型の太陽フィラメントに拡張し、また、磁場構造と太陽フィラメントを構成するプラズマの質量流との関係を明らかにすることを目標としている。一方で、最近の類似研究では、He I 10830 Åのスペクトル形成に太陽フィラメントでの吸収/放射だけでなく、視線方向に太陽フィラメントと重なった背景放射の影響が指摘されている [17, 18]。特に、磁場が比較的強い活動領域上空の太陽フィラメントについては、He I 10830 Åのスペクトル形成高度を慎重に検討する必要がある、今後の研究課題である。

謝辞

本稿は [14] 及び、筆者の博士学位論文に基づく内容です。指導教員の京都大学一本潔名誉教授には親身なご指導をいただきました。観測及びデータ解析にあたっては、京都大学飛騨天文台の教職員の皆さま、大学院生の皆さまにも多大なご協力をいただきました。この場を借りて、改めて感謝申し上げます。本稿執筆の機会をいただきました鳥海森博士、2023-2024年度の天文月報編集委員の方々にも大変お世話になりました。岡本文典博士には、本稿の推敲にあたって非常に丁寧な添削をいただきました。ありがとうございました。本研究は、MEXT/JSPS 科研費JP21J14036 およびJP23K19078の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Babcock, H. W., & Babcock, H. D., 1955, ApJ, 121, 349
- [2] Priest, E. R., & Forbes, T. G., 2002, A&A Rev., 10, 313
- [3] Shibata, K., & Magara, T., 2011, Living Reviews in Solar Physics, 8, 6
- [4] Kippenhahn, R., & Schlüter, A., 1957, ZAp, 43, 36
- [5] Kuperus, M., & Raadu, M. A., 1974, A&A, 31, 189
- [6] Nakai, Y., & Hattori, A., 1985, Memoirs Faculty of Sciences University of Kyoto, 36, 385
- [7] Ichimoto, K., et al., 2022, Tech. Rep. from Astron. Obs. Grad. School of Science, Kyoto Univ. 6-3
- [8] Yamasaki, D., et al., 2022, Tech. Rep. from Astron. Obs. Grad. School of Science, Kyoto Univ. 6-2
- [9] UeNo, S., et al., 2004, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series,

5492, 958

[10] Ichimoto, K., et al., 2017, *Sol. Phys.*, 292, 63
 [11] Pesnell, W. D., et al., 2012, *Sol. Phys.*, 275, 3
 [12] Lemen, J. R., et al., 2012, *Sol. Phys.*, 275, 17
 [13] Asensio Ramos, A., et al., 2008, *ApJ*, 683, 542
 [14] Yamasaki, D., et al., 2023, *PASJ*, 75, 660
 [15] Casini, R., et al., 2003, *ApJ*, 598, L67
 [16] Bommier, V., & Leroy, J. L., 1998, *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.*, 150, 434
 [17] Díaz Baso, C. J., et al., 2019a, *A&A*, 625, A128
 [18] Díaz Baso, C. J., et al., 2019b, *A&A*, 625, A129
 [19] Wang, S., et al., 2020, *ApJ*, 892, 75
 [20] Orozco Suárez, D., et al., 2014, *A&A*, 566, A46
 [21] Martínez González, M. J., et al., 2015, *ApJ*, 802, 3
 [22] Bommier, V., et al., 1986, *A&A*, 156, 79
 [23] Leroy, J. L., et al., 1984, *A&A*, 131, 33
 [24] Bommier, V., et al., 1994, *Sol. Phys.*, 154, 231
 [25] Leroy, J. L., et al., 1983, *Sol. Phys.*, 83, 135
 [26] Xu, Z., et al., 2012, *ApJ*, 749, 138
 [27] Kuckein, C., et al., 2009, *A&A*, 501, 1113
 [28] Sasso, C., et al., 2011, *A&A*, 526, A42
 [29] Sasso, C., et al., 2014, *A&A*, 561, A98
 [30] Díaz Baso, C. J., et al., 2016, *ApJ*, 822, 50
 [31] Okamoto, T. J., et al., 2008, *ApJ*, 673, L215
 [32] Yokoyama, T., et al., 2019, *PASJ*, 71, 46

Observational Diagnostics of Magnetic Field Configuration of Solar Dark Filaments

Daiki YAMASAKI

Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa 252-5210, Japan

Abstract: Solar filaments are dense, cool plasma clouds in the solar corona. They are supposed to be supported in a dip of the coronal magnetic field. However, the models still disagree between two types of field configuration; one is the normal polarity model, and the other is the reverse polarity model. To understand the mechanism that makes the filaments become unstable before eruption, it is critical to know the magnetic structure of solar filaments. We performed spectropolarimetric observations in the He I 10830 Å line to investigate the magnetic field configuration of dark filaments. The observations were carried out with the Domeless Solar Telescope at Hida Observatory. We obtained eight samples of filaments in quiet regions. As a result of the analysis of full Stokes profiles of filaments, we found that the field strengths were estimated as 8–35 G. By comparing the direction of the magnetic field in filaments and the global distribution of the photospheric magnetic field, we determined the magnetic field configuration of the filaments, and we concluded that one out of the eight samples has normal polarity configuration, and seven out of the eight have reverse polarity configuration. This study is expected to apply for understanding the acceleration mechanism of the erupting solar filaments in association with the solar flares and the wave propagation through filaments.