

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	山崎大輝
論文題目	Observational and Numerical Studies of Solar Coronal Magnetic Field (太陽コロナ磁場の観測的及び数値的研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>太陽フレアは、太陽大気中における突発的なエネルギー解放現象であり、高温のコロナ中に浮かぶ低温高密のプラズマ雲、ダークフィラメントの噴出に伴う磁気リコネクションが駆動する。ダークフィラメントは、コロナ中の捻れた磁力線の束である磁気フラックスロープに支えられていると考えられている。しかし、観測上の制限からコロナの磁場を直接計測することは難しく、ダークフィラメントの磁場構造については、Kippenhahn & Schlüter (1957) が提案した順極型と、Kuperus & Raadu (1974) が提案した逆極型の2種類のモデルで議論が続いている。加えて、フラックスロープの形成過程や噴出の加速機構も、未だ明らかになっていない。</p> <p>第2章と第3章では、フラックスロープを含む3次元コロナ磁場の時間発展を調査するために、Solar Dynamics Observatory衛星のHelioseismic and Magnetic Imager望遠鏡によって取得された太陽面 (光球) のベクトル磁場を用いて、非線形フォースフリー仮定に基づく磁場の外挿、およびデータ拘束型磁気流体シミュレーションをそれぞれ行った。本研究では、2017年9月の活動領域NOAA 12673で複数観測されたフレアと、2021年10月の活動領域NOAA 12887で観測されたX1フレアに注目した。NOAA 12673の研究 (第2章) から、まず、Mクラス (中規模) フレアが1つのフラックスロープ上空の磁場のつなぎ替えによってこれが不安定化することにより発生したこと、またそれに伴い、2日後に発生するXクラス (大規模) フレアに関わるフラックスロープが一旦安定化させられたことを明らかにした。NOAA 12887の研究 (第3章) からは、噴出を伴うXクラスフレアのフラックスロープの加速には、トーラス不安定性とフラックスロープ下部における磁気リコネクションで形成された磁気アーケードによる押し上げ効果の両方が寄与したことを明らかにした。</p> <p>第4章では、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡に搭載した偏光感度、3.0×10^{-4}を達成する近赤外偏光分光観測装置を開発し、静穏領域のダークフィラメント8例をHe I 10830 Åラインで観測することにより、その磁場構造を調査した。偏光分光データの解析から、ダークフィラメントの磁場強度を8~35 Gと見積もり、また磁場の方位角分布を導出した。そして、フィラメントの磁場ベクトルと光球磁場の大局的な分布を比較することにより、それぞれのフィラメントを支える磁場構造が順極型であるか逆極型であるかを決定した。</p> <p>第2章の新規性は、同一活動領域中での複数のフラックスロープの発展と複数のフレア活動の関係を明らかにした点に、第3章の新規性は、観測データに基づく仮想シミュレーションを駆使して、先行研究で示唆されたフラックスロープの加速機構 (トーラス不安定と磁気リコネクション) の寄与を切り分けて調査した点にある。また、第4章では、独自に開発した装置を用いた観測によって、フィラメントの磁場の2次元分布から磁場構造を決定した点に新規性がある。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

太陽コロナの磁場は、エネルギーを蓄積し突如不安定化して大規模な爆発を起こすと共に、大量のプラズマを宇宙空間に放出する。とくにダークフィラメント（高温コロナに浮かんだ比較的低温なプラズマの雲）は、捻れた磁束（磁気フラックスロープ）に支えられており、その磁場構造や崩壊過程は、プラズマ素過程の連鎖として諸現象の理解を目指す太陽物理学および、現代社会において喫緊の課題となっている宇宙環境予測にとって重要な研究テーマとなっている。本博士論文は、太陽コロナにおける磁気フラックスロープの構造およびダイナミクスを、数値計算と観測の両面から探求したものである。

数値計算による研究の1つめでは、フレアを連発したある活動領域について、領域内の3つのフラックスロープに注目し、観測で得られた太陽面（光球）の磁場情報からフォースフリー近似を用いてコロナ中の磁場構造の時間発展を追跡した。その結果、まず上空を覆う大規模な磁場が磁気リコネクションすることによって1つのフラックスロープが不安定化して中規模のフレアと噴出を発生、その結果後に大規模フレアの原因となる隣のフラックスロープを一時的に安定化させ、大量のエネルギー蓄積に一役買った可能性があることを示した。2つめでは、大規模なダークフィラメントの噴出について、やはりフォースフリー磁場から出発し、磁気流体力学に基づくその後の動的な時間発展を数値的に追跡した。その結果、これまで背反的に論じられてきた2つの不安定化機構（トーラス不安定と磁気リコネクションに伴う圧力増加）が、同等に噴出へ寄与していることを明らかにした。これらの研究において、解析は既存の計算ツールを用いたものであるが、それをこれまでになかった着眼点で観測データに適用し、フラックスロープの連鎖的な発展や、不安定化機構の共存など、新たな描像を提案したことは、この研究分野における新規的かつ重要な貢献であると言える。

観測的な研究においては、飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡に設置した偏光分光装置を用いて、HeI 1083nmにある彩層ラインの高精度偏光観測をおこなうことにより、8つのダークフィラメントについて磁場の構造を導出し、その強度を決定すると共に、光球磁場に対する向きの順極型・逆極型を識別した。ダークフィラメントを形成するフラックスロープの極性は、エネルギーの蓄積量やその後の不安定化過程にとって極めて重要な要素であり、さらにそれを太陽面上の偏光分光観測から直接的に決定したのは世界で始めてである点において、本研究の重要性と新規性は高く評価することができる。また、申請者が偏光分光装置の開発にあたって、重要な貢献をしたことも評価に値する。

以上のことから、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年1月13日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降