

(続紙 1)

京都大学	博士 (総合学術)	氏名	関大吉
論文題目	Space Weather Prediction Using Ground-Based Observations (地上望遠鏡による宇宙天気予報)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>太陽面爆発 (フレア) は、太陽表面で発生する磁化プラズマに満たされた巨大な爆発現象であり、放射エネルギー、運動エネルギー、熱エネルギー、非熱エネルギーなど、さまざまな形で $10^{21} \sim 10^{25} \text{J}$ のエネルギーを放出する。これらの太陽フレアに関連して、フィラメント噴出やコロナ質量放出 (CME) など、他の形態の噴出現象が頻繁に発生する。磁場に支えられた太陽彩層に浮かぶ高密度のより冷たいプラズマであるフィラメントは、寿命の終わりに非常に不安定になり最終的に噴出する。CME は、コロナグラフで観測される質量 $10^{11} \sim 10^{13} \text{kg}$ にも達する巨大なプラズマ噴出である。これらの太陽表面爆発現象は、惑星間空間、特に地球近傍と地球の上層大気のパラズマ環境「宇宙天気」を乱す可能性があり、それにより深刻な事象を引き起こすことがある。そのため、地上と宇宙の両方での近代的な技術インフラの開発を通じて、太陽フレアやその他の付随する現象 (以下、太陽表面爆発現象) による人間社会への悪影響とそれらを正確に予測することの重要性が指摘されている。CME は、電力網を介して地磁気誘導電流を生成し、変圧器の損傷と大規模な停電 (たとえば、1989 年 3 月のカナダ、ケベック州全体の停電) を引き起こす地磁気擾乱の主要な要因として知られている。太陽フレアによる電磁波放射や加速された高エネルギー粒子線は、さまざまな人工衛星の誤動作を引き起こすことが知られている (たとえば、衛星 ASTRO-D は、2000 年 7 月の激しい太陽フレアが原因で制御を失い、観測を停止した)。したがって、人間社会への悪影響を軽減するためには、太陽活動を監視し、太陽爆発現象を予測することが重要である。</p> <p>本論文で申請者は、京都大学飛騨天文台の太陽磁場活動望遠鏡 (SMART) 搭載の観測装置 Solar Dynamics Doppler Imager (SDDI) を使用して、宇宙天気予報、特にフィラメント噴出とそれらの CME 関連の予測に焦点を当てている。フィラメント噴出はしばしば CME を伴い、CME のコアはフィラメント材料に由来すると考えられている。したがって、フィラメント噴出と CME 発生との関連性を事前に調査することは、太陽爆発現象を予測する上で有益である。地上望遠鏡は人工衛星とは異なり、太陽フレアによる故障リスクが少ないため、地上望遠鏡による宇宙天気予報は、災害リスク管理の観点からもメリットがある。したがって、弾力性のある宇宙天気予報体制を構築するために、地上望遠鏡は、現在主に宇宙搭載データのみ依存している太陽爆発現象の予報と監視のバックアップとしても使用する必要がある。</p> <p>この目標を達成するために、申請者と共同研究者らは「SMART / SDDI フィラメント消失カタログ」を作成した。このカタログには、2016 年 5 月から 2019 年 6 月までに SDDI によって観察されたほぼすべてのフィラメント噴出現象がリストされている。</p> <p>本論文は八章から構成されている。第一章では、本研究の位置付けと、太陽フレアによる電子機器と宇宙依存を基軸とした現代文明における脆弱性について述べられている。</p> <p>第二章は、フィラメント内部のプラズマの擾乱の視線方向速度を SMART/SDDI を用いて 2016 年 11 月 5 日のフィラメント噴出の予測可能性を調査するための試験を実施し、視線方向速度分布の標準偏差が噴出の 21 時間前に観測された値 ($2 \sim 3 \text{km/s}$) と比較して、噴出の 6 時間前に大きくなり ($4 \sim 5 \text{km/s}$) と増加したことに基づき、この標準偏差の増加がフィラメント噴出の前兆として扱える可能性について示した。第三章は、第二章の解析をふまえ、12 例のフィラメント噴出現象に対する統計的解析を行なった。</p>			

第四章では、著者が整備した SMART/SDDI によるフィラメント噴出現象カタログについて詳細に解説した。第五章では、第四章の結果に基づき、フィラメント噴出現象における動経速度と、SMART/SDDI により観測されたフィラメントの長さの積と、コロナ質量放出(CME)発生確率についての関係性を定量的・定性的に示し、閾値の存在を明らかにし、地上望遠鏡による観測により、CME 発生現象の予兆を正確に捉えられることを示した。

第六章は、地上望遠鏡の世界的ネットワークの構築により、太陽面での観測を24時間絶やさないようにすることによって、地上望遠鏡により太陽面爆発現象の予測が可能となることを提案した。

第七章は、スーパーフレアに伴う太陽光エネルギープラズマによって、人工衛星がどの程度故障する可能性があるかについて、人工衛星故障報告データと、GOES 衛星による太陽高エネルギー粒子のフラックスとエネルギー密度との関係性によって得られた結果の外挿を行いそのリスクを定量的に評価した。第八章では、人工衛星データが実際に社会に与えている利点を様々なデータカタログを構築することにより明らかにし、人工衛星データが社会と経済にどのように利用され、どのような利益をもたらすかについて調査した。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

申請者は三章で詳しく述べられている 12 例のフィラメント噴出現象に対する統計的解析の結果、以下のことを明らかにしている。(1) 12 例のイベントのうち 9 つが、視線速度の標準偏差に大きな変化がない第一フェイズ(Phase 1)を示した。(2) Phase 1 の持続時間はおよそ 0.18～42 時間の範囲であり、静止フィラメントの Phase 1 の持続時間は、他のタイプのフィラメントの約 10 倍となった。これらの結果を用いると、 1.3 ± 0.47 時間のリードタイムで明確に観測されたフィラメント噴出を予測することができ、地上望遠鏡である SDDI を使用したフィラメント噴出予測の可能性が高いことを示唆している。

申請者はまた、第四章で詳しく述べられている通り、フィラメント噴出のいくつかの物理的パラメーターとそれらの CME の関連性との関係を調査し、CME 発生に関連するカタログ内の 24 のフィラメント噴出イベントを選択すると、100km/s で正規化された最大視線速度と 100Mm で正規化されたフィラメント長の積が 0.92 の累乗で CME の発生を 0.96 の精度で適切に予測できることを明らかにした。

これらに述べた一連の結果により、申請者は、(1) SMART/SDDI による視線方向速度成分の解析を用いることにより、フィラメント内プラズマの運動に特徴的なパターンを解明し、視線方向速度成分解析によるフィラメント噴出の予測が可能であることを初めて示し、(2) 自身らが構築したデータベースを適切に解析することを通じて、フィラメント噴出の三次元速度場と、SMART/SDDI によって観測可能なフィラメント長さの情報から、その後の CME に至る爆発現象の予測が可能であることを示した。(3) これらにより、地上望遠鏡による SMART/SDDI 観測による高解像度の三次元速度場解析を用いて、太陽表面での爆発現象を早期に予測できる可能性について新たな方向性を示した。

本論文は太陽面爆発現象の予兆となる新たな指標を見いだしたことを通して、太陽磁気活動の物理の解明に向けた学術的意義を有すると共に、宇宙天気予報の実現と精度の向上に資する実践的な成果をもつものである。特に、これまでの宇宙天気予報の研究が主として人工衛星により取得される他波長のデータを駆使した高度な予測モデルの実現を目指す方向が主流だったのに対し、人工衛星そのものが宇宙天気現象に対して脆弱である点に着目し、データの質は劣るものの宇宙天気現象に対してレジリエントな地上望遠鏡のみによる宇宙天気予報の有用性を示したことは、学術研究を人類生存のための課題解決に繋げるという総合生存学の視点からも極めて高い意義が認められる。よって、本論文は博士(総合学術)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 3 年 1 月 20 日、論文内容とそれに関連した事項について試問した結果、合格と認められた。

要旨公表可能日 : 年 月 日以降