

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	古谷 侑士
論文題目	Theoretical and Observational Studies of Small-Scale Flares and Associated Mass Ejections / Jets (太陽で起きる小規模なフレアと付随する質量放出・ジェットに関する理論的・観測的研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本博士論文では、太陽で起きる小規模なエネルギー解放現象 (フレア) とそれに付随する質量放出・ジェットに関する理論的・観測的な特徴について論じている。太陽・恒星では様々な規模で突発的な増光現象 (爆発現象; フレア) とそれに伴ったプラズマの噴出現象が観測されている。典型的な太陽フレア ($10^{29} - 10^{32}$ erg) については、これまでに理論的・観測的研究が盛んに行われており、磁力線のつながり替え (磁気リコネクション) によって磁気エネルギーが解放されていることや、また、その結果生じる太陽大気の大規模な熱力学・流体力学的な応答についての標準的なモデルが確立している。一方で、太陽ではより小さなフレア ($10^{24} - 10^{29}$ erg) とプラズマの噴出現象が頻発している。しかし、太陽での小さなフレアに関して、典型的な太陽フレアと同様の物理機構で説明できるのかについては、理論的にも観測的にも十分に検証されていない。そこで、本博士論文では、太陽で起きる小さなフレアとそれに付随するプラズマ噴出の物理機構を解明するために、特に典型的な規模の太陽フレアとの比較に焦点を当てることで、その理論的・観測的な研究に取り組んだ。</p> <p>第2章では、太陽静穏コロナでの小さなフレアについて、極端紫外線 (Extreme Ultraviolet; EUV) での撮像観測と、$H\alpha$ 線での撮像分光観測を実施し、25例のイベントについて、その熱力学的な性質に着目して解析を行った。$H\alpha$ 線の観測には、京都大学飛騨天文台太陽磁場活動望遠鏡 (Solar Magnetic Activity Research Telescope; SMART) に搭載された観測装置 Solar Dynamics Doppler Imager (SDDI) による、太陽全面$H\alpha$ 線撮像分光データを使用した。抽出された25例のイベントは、$H\alpha$ 線の青側のウィングで減光を示しており、これは、彩層プラズマの噴出現象に伴うシグナルであると考えられる。解析の結果、コロナ温度に対応するEUVでの増光に対応して、$H\alpha$ 線では線中心での増光を伴う赤方偏移が半数以上のイベントで観測された。また、EUVのデータから導出されるコロナでのエミッションメジャーと温度が、フレアの放射強度が最大となる時刻で、大規模なフレアについて調べられたスケール則と整合的な振る舞いを示すことがわかった。スケール則から推定されたコロナ磁場の値は5 - 15 Gであり、この値は静穏コロナの平均磁場強度とよく一致している。さらに、時間発展を調べたところ、半数以上のイベントで温度が電子密度に先行して最大値に達することがわかった。これらの結果は全て、典型的な太陽フレアの場合と同様に、コロナでの磁気リコネクションによって発生した熱が彩層に伝搬して彩層が急激に加熱された結果、高密度の上昇流/下降流 (彩層蒸発/彩層凝縮) が生じることによると考えられる。</p> <p>第3章では、抽出された25例の太陽静穏コロナでの小規模フレアについて、小さなフレアに伴う彩層温度の噴出物の物理量とフレアのエネルギーの相関関係を調べた。さらには、より大規模な太陽フレアや恒星フレアとの比較を初めて実施した。その結果、噴出物の質量は、フレアのエネルギーの$2/3$乗におおよそ比例することがわかった。さらに、簡単な仮定から、この式を説明するスケール則を理論的に導出することに成功した。また、噴出物の速度と運動エネルギーについても、フレアのエネルギーと相関関係があることが確認された。</p> <p>第4章では、光球を想定した環境での磁気リコネクションの3次元磁気流体計算を</p>			

実施した結果を示している。磁気リコネクション自体は、コロナを想定した数値計算の場合と同様に発生したが、コロナでのプラズマの噴出流（ジェット）の加速機構は大きく異なり、光球ではリコネクションで形成される遅い衝撃波が背景磁気プラズマ中を伝搬していくことで、細長い構造に沿って密度が上昇することを示した。つまり、噴出流ではなく波の伝搬の結果として、ジェット状の細長い構造が現れることを明らかにした。また、今回の数値計算で、磁気リコネクションによって生じた磁気流体波は、彩層加熱やスピキュール形成に影響を与えるだけのエネルギーを持つことも確認した。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

近年の太陽観測装置の発展により、小規模な活動現象（フレア・噴出現象）が、太陽大気のあらゆる層（光球・彩層・コロナ）で続々と観測されている。これらは、典型的な太陽フレアと共通の定性的な性質をいくつか持つことが知られている。これら太陽での小さなフレアは、コロナ加熱問題に寄与している可能性が指摘されていることから、その物理機構の解明は、磁気リコネクションのスケール依存性に関する興味だけでなく、小さなフレアに伴う加熱・運動が太陽大気に与える影響を議論するための基礎となる。

第2章では、太陽静穏領域での小さなフレアや噴出現象について、極端紫外線および、 $H\alpha$ 線による観測データの解析により、その熱力学的な性質を調べた。 $H\alpha$ 線の観測には、京都大学飛騨天文台SMART望遠鏡搭載の観測装置SDDIを用いているが、その広視野（太陽全面）の強みを生かして、静穏コロナでの小さなフレアの $H\alpha$ 線スペクトルの統計的解析が世界で初めて可能になった。これらの熱力学的な振る舞いが、典型的な規模のフレアと整合的であることを世界で初めて示した。このことから、小規模なフレアでも、コロナでの磁気リコネクションによって発生した熱が彩層に伝搬して彩層が急激に加熱された結果、彩層蒸発・彩層凝縮が生じていると考えて矛盾ないことを示した。この結果は、静穏コロナでの小さなフレアと典型的な太陽フレアとの新たな類似点について明確な観測的証拠を示すだけでなく、コロナの加熱源として注目されているごく小規模なフレアである「ナノフレア」に対して、その理論的性質や妥当な検出方法について示唆を与えるものである。

第3章では、抽出された25例の太陽静穏コロナでの小規模フレアについて、噴出物の質量や速度などの物理量を導出し、エネルギー規模が10桁にも及ぶ範囲で成り立つ相関関係を示すに至った。これらの結果は、太陽での小さなフレアの物理機構だけでなく、恒星フレアに伴う彩層温度のプラズマ噴出の性質を理解するための基礎的な相関関係を提供したという意味で、天文学的な意義も大きい。

第4章では、光球を想定した3次元磁気流体計算を世界で初めて実施した結果を示している。これは、コロナ・彩層・光球で起きる磁気リコネクションによるダイナミクスの統一的理解を目指したものである。その結果、磁気リコネクションによって生じた磁気流体波は、彩層加熱やスピキュール形成に影響を与えるだけのエネルギーを持っていた。この研究を通して、コロナ・彩層・光球におけるフレア（磁気リコネクション）現象の統一モデルの基礎を築くことに成功した。

これらにより、本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。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