

論文審査の結果の要旨

氏名 石川 真之介

磁気プラズマ中での粒子加速は、宇宙で普遍的な現象であり、太陽フレアはその最も身近な現場の一つである。1991年に打ち上げられた日本の太陽衛星「ようこう」は、軟X線から硬X線まで広帯域で高い角分解能を実現し、10年の長きにわたり活躍した。中でも1992年1月13日に起きた太陽フレアの際に、名古屋大学の増田智らにより、軟X線は磁気ループを満たす高温プラズマから放射されるのに対し、硬X線はループの2つの足元に加え、ループ頂上のやや上空からも放射されていることが発見された。この「磁気ループ上空放射源」は、磁力線の繋ぎかえで解放されたエネルギーが粒子加速に転化される核心部分と見られるが、例数が少なく、また「ようこう」のエネルギー分解能が限られていたため、その本質には未解明の部分が多かった。

そこで申請者は、2002年に打ち上げられた米国の太陽観測衛星 RHESSI (Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager)を用い、米国グループと共同でこの現象の探求を行った。論文では第1章の導入に続き、第2章では太陽フレアの基礎過程と先行研究の結果が説明され、「磁気ループ上空放射源」の重要性が述べられる。第3章では、RHESSI 衛星の搭載装置とその基本性能がレビューされる。「ようこう」の後継機に当たる同衛星は、小田稔らが開発した回転すだれコリメータをゲルマニウム検出器と組み合わせ、3 keV の軟X線から 17 MeV のガンマ線まで、太陽フレアに対して、撮像と分光の高い能力を有する。

第4章で申請者は、RHESSI が打ち上げ後に受けた太陽フレアのうち、ガンマ線領域 (> 300 keV) で検出できた 26 例を統一的に解析し、うち 21 例で、「ようこう」では手の届かなかった 150-450 keV の帯域で、フレア画像の合成に成功した。結果は多くの場合、ループ足元に対応する「2つ目玉」の構造をもつ。これは従来から知られていたように、磁気ループ頂上部などで加速された電子がループ両端へと下降し、足元に突入するさい非熱的制動放射を放射する結果と解釈できる。2つの放射源のガンマ線強度比は、硬X線エネルギー域 (50-100 keV)での強度比と、誤差の範囲で一致した。これは加速された電子がループ両端へと降下する仕組みが、電子のエネルギーに大きく依存しないことを意味する、新しい結果である。しかし他の研究者がすでに発見していた1例を除き、ガンマ線領域では「磁気ループ上空放射源」は検出されなかった。

そこで申請者は第5章で、より低エネルギーでの画像を探查した結果、2003年10月22日のフレアの際、30-100 keV の硬X線領域で、太陽光球面から約 2.5 万 km 上空のコロナ中に浮かぶ

「磁気ループ上空放射源」を検出し、その硬 X 線強度の最大時刻より 8 秒ほど遅れて、足元硬 X 線源の明るさが最大になることを発見した。さらに、空間分解した分光解析からは、磁気ループ上空硬 X 線源のスペクトル (30-100 keV) が非熱的であること、またその光子指数は足元硬 X 線のものに比べて約 1.5 だけ軟らかいことが明らかになった。

第 6 章では、このフレアの観測結果が理論的に解釈された結果、ループ上空硬 X 線源には $2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ の高い密度をもつ非熱的電子が充満し、熱的プラズマの密度はずっと低いことが示された。さらにループ上空源と足元源の間に見られる、スペクトルや時間変化の違いから、加速された電子がまずループ上空で 10-20 秒にわたり閉じ込められ、そこで「薄い標的」型の非熱的制動放射を行なった後、ループ足元に降下して太陽彩層部で「厚い標的」型の非熱的制動放射を行なったと解釈できることを示した。これは「ループ上空放射源」の理解を大きく進める新しい研究成果である。

第 7 章と第 8 章では、太陽フレアのより高感度な撮像分光観測を目指し、米国のロケット実験 FOXSI 計画に向けた開発実験の成果が記述される。申請者は、硬 X 線反射鏡の焦点に置く撮像型硬 X 線検出器として、75 μm のピッチをもつ両面ストリップ型テルル化カドミウム検出素子を中心となって開発し、2011 年に予定されているロケット実験への見通しを開いた。

以上のように申請者は、太陽フレアにおける電子加速の過程に新しい知見を導き、将来の観測に向けて展望を拓くことにも成功した。よって本研究は博士 (理学) の学位を授与するに値することを、審査員の全員一致により確認した。本研究は、米国カリフォルニア大学ロバート・リン教授、サム・クルッカー博士、東京大学/JAXA の高橋忠幸教授らとの共同研究であるが、その中で申請者は、データ解析や結果の解釈、検出器の開発などにおいて主導的役割を果たしており、共同研究者からの同意承諾書も完備している。