

氏 名 秋 山 幸 子

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第516号

学位授与の日付 平成13年3月23日

学位授与の要件 数物科学研究科 天文科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Soft X-ray High-Temperature Regions above

Solar Flare Loops

論 文 審 査 委 員	主 査 教授	藤本 眞克
	教授	櫻井 隆
	助教授	梶野 敏貴
	教授	柴田 一成 (京都大学)
	助教授	関井 隆 (国立天文台)

太陽フレアのループ上空は、フレアの発生メカニズムを議論する上で非常に興味深い領域である。なぜならば「ようこう」衛星の軟 X 線望遠鏡によりループの上空にカスプ構造が、続いて硬 X 線望遠鏡の観測によりループトップ硬 X 線源が発見され、フレアループ上空で発生する磁気リコネクションがフレアの発生メカニズムに関与していることが強く示唆されたからである。Tsuneta (1997)は 1992 年 1 月 13 日に発生したフレアの解析を行い、フレアループの上空には軟 X 線画像からも局所的な高温領域が存在することを示した。この高温領域は約 2000 万度とフレアループの平均温度より 1.5 倍ほど高温であり、体積エミッション・メジャー(VEM)についてはフレアループよりも 1 桁低い 10^{48} cm^{-3} であった。そして高温領域はフレアの軟 X 線ピーク以前に発生していることから、ループ上空の高温プラズマは彩層蒸発によるフレアループプラズマとは異なり、磁気エネルギーの解放に伴い直接的に加熱されたコロナプラズマである可能性を提案した。しかしループ上空の高温部についての詳細解析はこの一例のフレアのみであること、また「ようこう」軟 X 線画像を用いて低輝度部分の温度を求めるにはデータの慎重な取り扱いが必要なことから、上記の推測の確証は得られていなかった。

そこで我々は、「ようこう」軟 X 線画像を用いて、リムで観測された 141 例のフレアについてループ上空の温度構造を統計的に解析した。画像から温度を求めるうえでは、特に精度を下げる原因となる、衛星の微小振動と PSF がフィルター毎に異なることから生じる散乱光成分について評価を行い、一定の精度が得られる温度画像を作成した。そして解析の結果、約 4 割(64 例)のフレアにおいてループ上空が周囲より高温に観測されることを発見した。また高温領域の平均温度、平均 VEM、平均面積はそれぞれ 1500~3500 万度、 $10^{47-48} \text{ cm}^{-3}$ 、1500 万 km^2 であり、温度と面積はフレアループの値と正の相関があることが解かった。さらに高温領域は、ほぼ硬 X 線インパルス期に発生し、軟 X 線ピーク前に最高温度に到達した後、約 10 分観測されていた。これらの結果は Tsuneta(1997)の結果をさらに一歩進め、フレアループ上空のプラズマがリコネクション領域から直接的に加熱されている可能性を強く示唆するものとなった。また高温領域が観測されたフレアはされないフレアに比べて、X 線強度が強く、大きさが大きく、寿命が長いという特徴をもっていた。このことから高温領域が観測されないフレアにおいても観測精度の向上に伴って高温領域が検出される可能性があることが予測され、ループ上空の高温領域は多くのフレアに共通する重要な現象であることが推測された。またフレアに関連する現象の 1 つとして知られる硬 X 線ダブルフットポイント源に注目して、高温領域との関連を調べた。その結果高温領域は常に硬 X 線強度が強いループ足元付近に位置していることが解かった。両足元の硬 X 線強度比はその場所の磁場強度比と反比例するので、高温領域は磁気圧が低くなる磁場の弱い領域に位置する傾向があることが示唆され、これは CSHKP タイプのフレアモデルから予測される結果と一致することが認められた。

最後に一般的にフレアループは見かけ上、上昇しているように観測されるが、高温領域はフレアループより 2~5 倍速く、平均 15 km s^{-1} で上昇することが観測された。この速い上昇運動の原因は未解明であるが、エネルギー解放領域を考慮する上で非常に重要な情報を含んでいると推測される興味深い結果である。

論文の審査結果の要旨

秋山幸子氏の学位論文は「太陽フレアループ上空の軟X線高温領域の研究」と題される。1991年8月に打ち上げられた太陽観測衛星「ようこう」は、X線望遠鏡により多くの太陽フレアを観測し、そのエネルギー解放機構が磁気リコネクションであることを示すいくつかの決定的な証拠を見いだした。磁気アーケード型フレアに見られるカスプ型構造、ループ型フレアに見られる、軟X線フレアループ上空の硬X線源と軟X線高温領域、フレアに高い確率で付随するプラズマ放出現象、などがそれである。しかしこれまでの解析は、比較的大きなフレアを中心に少数の代表的な観測例に対してなされたものであった。本研究は、フレアの大多数をしめる小さなフレアまで含めたとき、磁気リコネクションを示唆するこれらの性質が、多くの事例によって統計的にも裏付けられるのかどうか、を究明しようとしたものである。

論文第1章では、ようこう衛星によるこれまでのフレア観測の結果とその解釈について述べている。フレアループの主たる部分は、エネルギー解放の結果として太陽彩層のプラズマが熱せられて上昇ループを満たすことによって作られる。一方、フレアループの頂上付近に現れるまわりより高温の領域は、磁気リコネクションのエネルギー解放で直接作られる可能性を指摘し、このような領域が多くのフレアで見られるかどうかで、磁気リコネクションモデルを検証しようという動機が述べられる。

第2章では、今回の研究で重要な温度解析の誤差の評価を行ない、後で述べる結果が十分有意となるよう、衛星の姿勢擾乱の補正、望遠鏡鏡面でのX線の散乱の補正などの方法を確立している。

第3章では、一定の基準で選んだ161個のフレアを解析し、その中の64例について、高温領域が見いだされたことを述べている。フレアループ本体の温度が平均1100万度であるのに対し、ループ頂上の高温領域の平均温度は1900万度であること、高温領域は大規模なフレアほど高い確率で見つかること、フレアループ本体より2～3倍速い上昇速度を示すこと、などが新たに見いだされた性質である。熱伝導による冷却を考えると、高温領域の温度と高度の関係は磁気リコネクション過程により説明できる。高温領域の上昇速度については一意的な解釈はできないが、逆に、高温領域がリコネクション過程の中のどの物理的プロセスに対応するかについて重要な情報を与えていると思われる。今後、数値シミュレーションの結果との比較などが必要となろう。

第4章では、非熱的粒子が作ると考えられる、ループ足元の二つ目玉硬X線源と、第3章で解析した軟X線高温領域の位置関係を調べ、高温領域は、硬X線強度の強い方のループ足元の側に現れる傾向があることを見いだした。非熱的粒子は磁場の弱い方の足元により多く流れ込むと考えられていることから、高温領域も磁場の弱い方に寄って形成されることになる。この結果は、磁場強度が非対称な配置の中でのリコネクション過程について、重要な情報を与えている。

また、軟X線観測で検出されるプラズマ放出現象との関係も調べたが、これと高温領域とは有意な位置関係の相関は見られなかった。この結果は予想とは反するものであったが、プラズマの放出方向はフレア領域のまわりの磁場構造にも依存するので、フレアの磁気リコネクションモデルと矛盾はしないと考えられる。

本研究は、太陽フレアの磁気リコネクションモデルの正当性について極めて大きな意味を持つ、フレアloop上空の高温領域について、初めて多数の観測例をもとにその性質を総合的に論じたものである。数値シミュレーションや実験室プラズマとの比較により物理過程の定量的理解を得ることが今後の課題として残っているものの、観測データの解析と解釈から得られた新しい知見は太陽フレアのエネルギー解放機構の研究に大きな進歩をもたらすものであり、博士学位論文として十分の内容を備えたものと判断した。なお、この研究の一部は既にAstrophysical Journal誌、及び国際シンポジウム集録1編に発表されている。