

氏 名 高 橋 正 昭

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第265号

学位授与の日付 平成9年3月24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 Thermal Evolution in Impulsive Solar Flares

論文審査委員 主 査 教 授 小杉 健郎

教 授 小平 桂一

教 授 櫻井 隆

助 教 授 渡邊 鉄哉

教 授 牧島 一夫(東京大学)

## 1 Introduction

Impulsive 太陽フレアの減衰相におけるプラズマの振る舞いは、熱的プラズマを理解する上で非常に重要である。Moore et al. (1980) は、Skylab の結果から「フレアを起こした磁気ループの放射によるエネルギー減少率が熱伝導によるエネルギー減少率よりも大きい」、「これらのエネルギー減少率の合計は磁気ループ内の熱エネルギーの減少率よりも大きい」ことを主張している。Sylwester et al. (1993) が行った SMM の BCS の CaXIX 輝線を用いた観測結果は、準定常的な加熱があるフレアと加熱が全くないフレアがほぼ同数であった。つまり、減衰相での温度と密度の変化には特徴的な相関関係が見つけられなかったことになる。シミュレーションの結果からは、磁気ループトップの温度と密度の関係には準定常的な加熱がない場合を基本として、時間的にゆるやかに減衰する加熱を付加することによって、準定常的なループの温度と密度の変化も再現できることを示している (Jakimiec et al. 1992)。このモデルを適用するにあたって Jakimiec et al. (1992) は、空間分解能を持たない BCS による CaXIX 輝線から得られる温度と磁気ループトップの温度とはほぼ同じであるということを用いて考察している。実際に観測される磁気ループが、このモデルにどの程度あてはまるのかについては、多温度プラズマにおける磁気ループのシミュレーション或は多波長同時観測を待たなければならないが、磁気ループトップに領域を絞った観測が必要不可欠であると考えられる。ここでは、「ようこう」の軟 X 線望遠鏡によって観測された太陽フレアについて、観測領域を絞った解析を試みて、磁気ループ内のプラズマパラメータの特徴について考察する。

## 2 Data Criterion

観測対象としたフレアは、以下の条件を満足しているものである。

- (1) GOES 衛星で観測されるピークフラックスが C-class ( $10^{-6}$  watt/m<sup>2</sup>) の Impulsive フレア。
- (2) 「ようこう」でフレアモード (時間分解能  $\sim$  2 秒、空間分解能 2.45 arcsec) で観測されているフレア。
- (3) 「ようこう」軟 X 線望遠鏡で Be フィルター (厚さ 119  $\mu$ m) と Al フィルター (厚さ 12  $\mu$ m) で撮像されているフレア。
- (4) フレアモード中に X 線強度が、その時間中の最大強度の 0.7 まで減少するフレア。

1992年に起こったフレアで、(1)を満たすフレアは272、(1)と(2)を満たすものは156、そして、4つの条件を満たすものは59個であった。

### 3 Results

各フレアループでループトップとフットポイントでは、プラズマパラメータにどのような違いが見られるだろうか。まず、温度の違いであるが、フットポイントに対するループトップの比は  $0.98 \pm 0.06$  であった。つまり、フレア減衰相では熱伝導が非常に良く効いて、磁気ループ内の温度がほぼ一定あることを意味する。圧力及び密度の比はともに  $1.4 \pm 0.2$  であった。この圧力差は、理論的には 100 秒程度で解消されるはずであるが、フレア減衰相の間中続いている。

フットポイントの断面積に対するループトップの断面積を計ってみると  $0.83 \pm 0.29$  となるので、SXT で観測される幾何学的形状によるとコロナ中の磁気ループの断面積はフットポイントとループトップで大きな違いがない。それに対して、エネルギー収支を考えると、熱エネルギーの減少率は熱伝導と放射によるエネルギー減少率よりも小さいことわかった。

### 4 Discussion

そこで、ループのフットポイントとループトップの圧力比から求められる filling factor を考慮した熱伝導による冷却を、観測される冷却に合計させると、冷却によるエネルギー減少率が磁気ループ内の熱エネルギーの減少率とほぼ同等となることが分かった。

一方、ループトップの温度とエミッションメジャーの各常用対数の減衰相での傾きは、4.6 付近をピークとした正規分布に近似できる。つまり、エミッションメジャーは温度の 4.6 乗に比例していることを意味している。Jakimiec et al. (1992) の数値シミュレーションによると、減衰相で磁気ループに加熱がないならば、温度はエミッションメジャーの 1 乗に比例する。また、Rosner et al. (1978) の定常的なコロナループのモデルを適用した場合には、温度がエミッションメジャーの 4 乗に比例する。したがって、この結果は後者に近い。しかしながら、減衰相における準定常的な加熱の源については全く分からないのである。

それよりも、減衰相で磁気ループへの加熱がないとして、filling factor を導入することによって、磁気ループ内の圧力差を解消するばかりでなく、磁気ループ内のエネルギー収支をも説明できることが、減衰相の理解として妥当であると考えている。つまり、filling factor の導入によって、太陽フレアの減衰相では、

「磁気ループに沿った方向の温度、密度、圧力が一定である」

「磁気ループ内のプラズマの冷却は、熱伝導と放射によるものである」

ということがこの論文で明らかになった。

## 論文の審査結果の要旨

本論文は、太陽フレア時に明るく輝くX線ループに着目し、科学衛星「ようこう」の軟X線望遠鏡、硬X線望遠鏡、及び軟X線ブラッグ分光器を用いて観測的に、そのエネルギー収支と圧力平衡を論じたものである。

論文は4章から構成されている。第1章は太陽コロナに普遍的に見られるX線ループ、特にフレア時のX線ループに関するこれまでの研究のレビューであり、本論文の主題に深く関わる以下の項目がコンパクトにまとめられている。(1) ループ内の温度と圧力、長さの関係を定式化した「スケーリング則」、(2) フレア初期に見られる非熱的電子からの硬X線放射と特性X線の青方偏移の関係、(3) フレア減衰期のX線ループ内でのエネルギー輸送の観測と理論の問題点。

第2章は、出願者が中心となって解析した1992年8月17日のフレアの詳細報告である(既に雑誌論文として出版済)。スケーリング則と温度/エミッションメジャー図を援用することで、画像からだけでは確定しがたい2本のX線ループの存在を確認し、この2本のループ(磁束)の衝突・合体仮説により無理なく観測が説明できることを示している。

第3章では、フレア初期に見られる硬X線バーストを非熱的電子の彩層への流入に伴う制動放射とする通説を採用したうえで、この非熱的電子の熱化が引き起こす「彩層蒸発」現象により、特性X線の青方偏移として観測されるプラズマ上昇流と高温・高密なX線ループの形成が、定量的に説明できることを示した。

第4章では、59例のフレアを解析して、フレアの減衰期におけるX線ループのエネルギー収支と圧力平衡を論じている。「ようこう」軟X線望遠鏡の画像からループの各部の見かけ上の温度・密度・圧力を求めると、ループに沿って温度はほぼ一樣になるが、密度と圧力は頂上付近で高くなり圧力平衡が成り立っていない。また、ループ内のエネルギーの減少率が熱伝導と放射により失われるエネルギーより小さくなってしまう。出願者は、X線ループを解像されていない微細磁束管の集合体であると考え、微細磁束管の断面積が下方に向かって縮小しているとすれば、エネルギー収支と圧力平衡の困難が解決することを示した。さらに、非熱的電子の形でX線ループの中で解放されるエネルギー量が、X線ループが保持するエネルギー及び熱伝導と放射によりX線ループから失われるエネルギーの和にほぼ等しくなることを示した。この結果は、これまで不可解とされてきた謎を解決する方向を示したものとして高く評価できるものである。〔出願者はエネルギー収支の困難を解決するものとして断面積の下方での縮小モデルを提出し、結果としてこれが圧力平衡の困難をも解決するという方向に論を進めているが、観測的にはエネルギーより圧力の方がより正確に決定できる物理量であるから、議論の進行方向を逆にした方がベターであろう。なお、この点は本論文の結論に影響を与えるものではなく、本論文の本質的価値に関わるものではない。〕

本論文は、出願者を筆頭著者として雑誌に発表した第2章を含め、出願者が中心的役割を果たした研究の結果を記述したものである。審査委員は全員一致で、本論文が博士(理学)の学位にふさわしいものと判定した。