

氏 名 下 条 圭 美

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第390号

学位授与の日付 平成11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 Studies of Solar Coronal X-ray Jets

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 岡 本 功
教 授 櫻 井 隆
助 教 授 渡 邊 鉄 哉
教 授 黒 河 宏 企 (京 都 大 学)
助 教 授 柴 田 一 成 (国 立 天 文 台)

論文内容の要旨

The soft X-ray telescope (SXT: Tsuneta *et al.* 1991) aboard *Yohkoh* (Ogawara *et al.* 1991) has discovered X-ray jets in the solar corona (Shibata *et al.* 1992, 1994, Strong *et al.* 1992, Shibata, Yokoyama and Shimojo, 1996). According to Shibata *et al.* (1992), these X-ray jets are transitory X-ray enhancements with an apparent collimated motion, and have the following observed characteristics: 1) The typical size of the jet is $5 \times 10^3 - 4 \times 10^5$ km, and the apparent velocity is $30 - 300$ km s⁻¹. 2) The kinetic energy is estimated to be $10^{25} - 10^{28}$ erg. 3) Many jets are associated with small flares in X-ray bright points (XBPs), emerging flux regions (EFRs) or active regions (ARs). On the other hand, Shibata *et al.* (1992) and Yokoyama and Shibata (1995, 1996) proposed that the X-ray jets are produced by the magnetic reconnection. The two-dimensional MHD numerical simulations of this scenario were performed by Yokoyama and Shibata (1995, 1996) and they succeeded in reproducing observed characteristics of the X-ray jet and the H α surge. These results, however, were obtained from one month data taken during November 1991 (~ 20 jets).

The purpose of this thesis is to elucidate the statistical properties of solar X-ray jets, to clarify physical conditions of X-ray jets, and to understand the formation mechanism of X-ray jets using many events and high resolution data. Thus, this thesis is organized into 6 chapters. The extended abstracts of the subsequent chapters follow:

Chapter 1. Introductory Review .

In this chapter, we briefly mention the properties of X-ray jets which have been found by previous studies, and summarized characteristics of other jet phenomena in the solar atmosphere since these are very important to understand X-ray jets.

Chapter 2. Statistical Study of Solar X-Ray Jets .

We have found 100 X-ray jets in the database of full Sun images taken with the Soft X-ray Telescope (SXT) aboard *Yohkoh* during the period from 1991 November through 1992 April. A statistical study for these jets results in the following characteristics: 1) Most are associated with small flares (microflares – subflares) at their footpoints. 2) The lengths lie in the range of a few $\times 10^4 - 4 \times 10^5$ km. 3) The widths are $5 \times 10^3 - 10^5$ km. 4) The apparent velocities are $10 - 1000$ km s⁻¹ with an average velocity of about 200 km s⁻¹. 5) The lifetime of the jet extends to ~ 10 hours and the distribution of the observed lifetime is a power law with an index of ~ 1.2 . 6) 76% of the jets show constant or converging shapes; the width of the jet is constant or decreases with distance from the footpoint. The converging type tends to be generated with an energetic footpoint event and the constant type by a wide energy range of the footpoint event. 7) Many jets ($\sim 68\%$) appear in or near to

active regions (AR). Among the jets ejected from bright-point like features in ARs, most ($\sim 86\%$) are observed to the west of the active region. 8) 27% of the jets show a gap ($> 10^4$ km) between the exact footpoint of the jet and the brightest part of the associated flare. 9) The X-ray intensity distribution along an X-ray jet often shows an exponential decrease with distance from the footpoint. This exponential intensity distribution holds from the early phase to the decay phase.

This chapter has been published by Shimojo *et al.* (1996).

Chapter 3. Magnetic Field Properties of Solar X-Ray Jets .

From a list of X-ray jets made by Shimojo *et al.* (1996), we selected events for which there were magnetic field data from NSO/Kitt Peak. Using co-aligned SXT and magnetograms, we examined the magnetic field properties of X-ray jets. We found that 8% of studied jets occurred at a Single Pole (SP), 12% at a Bipole (BP), 24% in a Mixed Polarity (MP) and 48% in a Satellite Polarity (ST). If the satellite polarity region is the same as the mixed polarity region, 72% of jets occurred at the (general) mixed polarity region.

We also investigated the magnetic evolution of jet-producing area in active regions NOAA 7067, NOAA 7270 and NOAA7858. It is found that X-ray jets favored regions of evolving magnetic flux (increasing or decreasing).

This chapter has been published by Shimojo *et al.* (1998).

Chapter 4. Physical Parameters of Solar X-ray Jets .

We derived the physical parameters of X-ray jets and associated flares using the high resolution data (PFI) taken with the soft X-ray telescope (SXT) aboard *Yohkoh*. We analyzed 16 X-ray jets and found the following properties of the jet and flare: 1) the temperature is 3 – 8 MK (Average : 5.6 MK). 2) the density is $0.7 - 4.0 \times 10^9$ cm^{-3} (Average 1.7×10^9 cm^{-3}). 3) The temperature of the jet is similar to that of the flare. 4) The thermal energy is $10^{27} - 10^{29}$ ergs, which are $\frac{1}{4} - \frac{1}{7}$ of that of the flare. 5) The apparent velocity is usually slower than sound speed. 6) There is a correlation between the temperature of the jet and the size of the flare. On the basis of these results, we find that the temperature of the jet and the flare are controlled by the balance between the heating flux and the conductive flux, and that the mass of the jet is comparable to the theoretical value based on the balance between the conductive flux and the enthalpy flux carried by the evaporation flow.

Chapter 5. 1D & Pseudo 2D Hydrodynamic Simulation of Solar X-ray Jets .

We present results of 1-dimensional hydrodynamic simulations of the chromospheric evaporation produced by a microflare in a large scale loop as a model of X-ray jets. The initial condition of the simulations is based on the actual observation of the X-ray jet and we deposit the thermal energy ($\sim 1 \times 10^{28}$ ergs) in the corona. This

thermal energy is comparable to that of the microflare associated with the X-ray jet observed on 3 September, 1992. The deposited energy is rapidly transported to the chromosphere by heat conduction, heating dense plasma in the upper chromosphere. As a result, the gas pressure is enormously increased and drives strong upflow of dense hot plasma along magnetic loop. This upflow (i.e., evaporated flow) is identified as an X-ray jet. We computed soft X-ray intensity distributions of the simulated jets seen in bandpass filter of *Yohkoh*/Soft X-ray Telescope (SXT), and compare X-ray intensity distributions and the physical parameters (temperature, density, and thermal energy) of the simulated jets with those of the X-ray jet observed with *Yohkoh*/SXT on 3 September 1992. We found that the evaporation flow in the simulations reproduced the observed properties of the X-ray jet. We also found that the multiple-loop model reproduced the observed properties of the X-ray jet better than the single loop model. Since the reconnection leads to successively heated multiple loops, these results suggest that X-ray jets are evaporation flows which are produced by magnetic reconnection.

Chapter 6. Summary and Discussion .

We summarized this thesis in this section and also discussed some of difference between X-ray jets and other jet phenomena in the solar atmosphere. In particular, we discussed some jet-phenomena which have been observed by new orbital solar observatory, SoHO and TRACE. Finally, we discussed the future direction of the study of X-ray jets.

論文の審査結果の要旨

科学衛星「ようこう」に搭載された軟X線望遠鏡は、そのすぐれた分解能と連続撮像によって、太陽コロナ中で起こるさまざまな新しい現象を発見した。X線ジェットはその一つであり、細長い高温プラズマ構造が長さの方向に時間と共に伸びていく現象と定義されている。本申請者は、この新しい現象であるX線ジェットがどのような物理的性質を持つのか、どのようにして発生するのか、等を明らかにするために、以下の研究を行った。

1. X線ジェットの統計的研究

X線ジェットが発見されたのは、申請者が研究を始める2年前であったが、当時はまだ予備的データ解析の論文が2、3あるのみで、多数のジェット観測データに基づく統計的な研究は手が着けられていなかった。そこで、本申請者はそれまでの研究を進展させ、観測例100例に基づいてジェットの性質を調べた。その結果、ほとんどのジェットは小フレアを伴って発生するが、フレアの発生場所はジェットの足元でなく、そこからわずかに離れた所であることを発見した。また、ジェットの長さ・幅・見かけの速度・寿命の個数分布を明らかにし、更に軟X線強度分布がジェットに沿って指数関数的に減少していることを見出した。

2. X線ジェットの発生領域の磁場分布の研究

近年「ようこう」により、(比較的大きな)フレアが磁気リコネクションによって引き起こされていることが明らかにされていた。ジェットも同様なメカニズムで発生していることが考えられるため、本申請者は、キットピーク天文台のマグネトグラフによる観測データを使用して、ジェットの発生領域の磁場分布を調べた。その結果、ジェットの発生領域は、磁極が混在している領域、中でもとくに磁束の増加・減少が激しい領域であることが明らかになった。これは、事前の予想と一致し、ジェットが磁気リコネクションで解放されたエネルギーをエネルギー源にしていることが確かめられた。

3. X線ジェットの物理量の研究

次の課題はジェットの加速機構の解明である。可能なメカニズムとして考えられていたのは、ジェットが磁気リコネクションで生じた一次的なアウトフロー(磁氣的加速流)そのものか、それともリコネクションによって解放されたエネルギーが原因で発生する彩層蒸発(熱圧力加速流)のような二次的なものであるか、という二つである。そこで、本申請者は、「ようこう」軟X線望遠鏡のプラズマ診断能力を使ってジェットの温度と密度を導出し、以下の事実を明らかにした。(1)ジェットの温度は同時に発生するフレアの温度と同程度である。(2)ジェットとフレアの温度はともにエネルギー注入と熱伝導のバランスで決定されている。(3)ジェットの質量は、彩層蒸発より推定される高温プラズマの質量と同程度である。これらの結果は、検討された二つのメカニズムのうちの後者、すなわち、ジェットが彩層蒸発による高温プラズマ流であることを強く示唆している。

4. 一次元および疑似二次元流体シミュレーションによるX線ジェットの研究

本申請者はジェットが彩層蒸発による高温プラズマ流である可能性を更に確認するため、次に彩層蒸発流の数値モデルを作り、それがX線ジェットの観測結果を再現できるかどうかを検討した。まず、初期条件を観測データから採り、彩層蒸発流の数値シミュレーションを行なった。その結果、彩層蒸発流モデルにより、観測されたジェットの軟X線強

度の空間分布（指数関数的減少）やジェットの温度・密度をよく説明できることが分かった。更に、リコネクションを考慮したエネルギーの注入法を用いると、彩層蒸発流モデルはよりよく観測事実を説明することが明らかになった。

本申請者の以上の研究成果は、「ようこう」によって発見された新しい現象であるX線ジェットについて多数のデータを用いて観測的性質を初めて詳細に明らかにしただけでなく、これらの観測結果と数値シミュレーションを組み合わせることによって、ジェットが磁気リコネクションによって二次的に誘起された彩層蒸発による高温プラズマ流であることを突き止めるなど、その形成機構の解明にも大きく貢献しており、当該分野の発展にきわめて重要な役割を果たしたものと評価される。

本申請者は学位論文として、第1章に太陽表面上の様々な活動について観測面及び発生機構面から概観し、2～5章に以上の研究成果を記述し、最終章にサマリーと将来の研究方向を述べている。英文による学位論文は独創性及び記述内容等の観点からしても高い水準にあると認められる。

以上を勘案して本審査委員会は、全員一致して、本論文が博士（理学）の学位を受けるにふさわしい内容を持つものと判定した。