

氏 名 佐古 伸治

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1704 号

学位授与の日付 平成26年9月29日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Statistical Study of X-ray Jets using Hinode/XRT

論文審査委員 主 査 准教授 末松 芳法
准教授 花岡 庸一郎
准教授 竹田 洋一
准教授 坂尾 太郎
准教授 横山 央明 東京大学

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

X 線で観測される太陽コロナのジェット現象、X 線ジェットは、時間とともに長さが伸展する細長い構造（ジェット構造）とその足元で発生するフレア（足元フレア）で構成されている（e.g. Shibata et al. 1992, Shimojo et al. 1996）。太陽観測衛星「ようこう」に搭載された軟 X 線望遠鏡（SXT）の観測結果から、太陽コロナで起こる磁気リコネクションを発生メカニズムとした X 線ジェットのモデルが提唱された（e.g. Shibata et al. 1992, 1994, Yokoyama and Shibata. 1996）。このモデルで示唆される特徴が多くの観測結果と整合し、このモデルを元に磁気流体シミュレーションで再現されたジェットの特徴は観測的特徴を再現することが報告され、広く受け入れられている。「ようこう」/SXT の観測結果から、活動領域で発生する X 線ジェットの数が、コロナホール・静穏領域で発生する X 線ジェットの数よりも数倍多いことが報告された（Shimojo et al. 1996）。

太陽観測衛星「ひので」に搭載された X 線望遠鏡（XRT）は、「ようこう」/SXT よりも時間分解能と空間分解能の向上とともに、コロナの低温度にも感度がある X 線フィルターを使うことで、より短寿命で小さく温度の低い活動現象も観測できるようになった。「ひので」/XRT の観測から、主に 2 つの X 線ジェットに関する進展があった。一つは、コロナホール周辺で X 線ジェットが多く発生していることである（e.g. Cirtain et al. 2007, Subramanian et al. 2010）。この観測結果から、コロナホール周辺の活動が決して低くないことが示唆された。二つ目の進展は、複雑なジェット構造の運動が明らかになってきたことである（e.g. Cirtain et al. 2007, Madjarska. 2010, Moore et al. 2010）。ジェット構造は長さが伸展するだけでなく、水平方向に運動する様子や時間とともにその足元周辺で構造が膨張する様子なども報告されている。また、ジェット発生に関連して足元フレアが増光する間に、複数回のジェット構造が出現する様子が報告され、リコネクションによるエネルギー解放が複数回起きていることが示唆される。これら 2 つの進展に関する詳細な観測的研究が続けられている。

現在、「ひので」/XRT の観測データ約 7 年分が蓄積され、X 線ジェットを研究するのに適当なデータが多くある。これらのデータから多くの X 線ジェットを検出し、研究課題について統計的研究を行うことができる。出願者は、「ひので」/XRT で進展した X 線ジェットの研究課題に関連する統計的研究を行った。以下に行った結果の要旨を示す。

1) 極域周辺で発生する X 線ジェット、トランジェントブライティングの統計的研究

「ひので」/XRT の観測から、コロナホール周辺の活動度が低くないことが示唆された。この示唆が正ければジェットなどの活動現象の発生数の違いは何によって決まっているのだろうか。本研究は、X 線ジェットとトランジェントブライティングの特徴に領域依存性があるかを調べるため、極域コロナホール、コロナホール境界周辺の領域、極域静穏領域、赤道域静穏領域の 4 つの領域で X 線ジェットとトランジェントブライティングそれぞれ検出し、現象のもつ特徴を各領域別に比較した。その結果、X 線ジェット及びトランジェントブライティングのほとんどの特徴は領域で大差なかった。一方、イベントの発生頻度、X 線ジェットの噴出する方向、そして足元フレアおよびトランジェントブライティングの X

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

線カウンターの発生頻度分布は領域で違いがあることがわかった。最もイベントの発生頻度が大きいのはコロナホール境界周辺の領域であり、極域コロナホール、静穏領域の順で発生頻度が小さくなることがわかった。これらの現象の構造や寿命に大きな違いがないため、領域のイベントの発生頻度の違いは、大局的な磁場構造の違いが関与していることを示唆している。

2) コロナホール・静穏領域で発生する X 線ジェットの見つけ方の開発

「ひので」/XRT で撮像された約 7 年分の X 線画像があり、これらのデータから多くの X 線ジェットを見ることが見込まれる。しかし、X 線ジェットのジェット構造は、増光が小さく、背景の明るさとの差を認識できない場合が多くあるため、目によるジェットの検出が困難である。本研究は、ジェット検出の難しさを減らし、輝度が時間変化を示すイベントの検出の効率を上げるため、X 線観測データセットから X 線ジェットを検出するプロシージャを開発した。他の検出プロシージャと異なる点は、ジェットを認識するだけでなく、その時間発展を追跡できることである。

開発したプロシージャの検出性能を評価するため、「ひので」/XRT のデータセットを用いて検出を行い、検出したイベントを目でジェットかどうかを確認した。その結果、コロナホールで検出できたイベントの約 7 割が X 線ジェットであったが、静穏領域では検出できたイベントの約 3 割が X 線ジェットであった。さらに、目で検出した X 線ジェットの中からプロシージャで検出された X 線ジェットを調べた結果、コロナホールは目で検出した約 7 割の X 線ジェットをプロシージャで検出することができたが、静穏領域ではプロシージャで検出できたのは 3 割以下であった。静穏領域ジェットの周囲では、他の活動現象が同時に発生している場合が多くあり、ジェット構造に他の活動現象が接続して認識される場合やジェット以外の隣接した活動現象同士が 1 イベントとして認識され、細長くなっていた場合、ジェット

として誤認識する場合がある。その結果、静穏領域ジェットの検出効率の低下が生じてしまうことがわかった。

3) X 線ジェットの加速機構に関する観測的研究

磁気リコネクションによって発生する X 線ジェットのモデルでは、3 つの独立した加速機構で加速されるジェットが示唆されている（彩層蒸発ジェット、リコネクションジェット、ねじれジェット）。ジェットの加速機構を観測結果に基づいて分類した研究はほとんどなく、また、活動領域、静穏領域、そしてコロナホールで 3 種類のジェットが本当に存在するのかが、観測的に明らかになっていない。

本研究は、磁気力で加速されるリコネクションジェットとねじれジェットを磁気加速ジェットとし、彩層蒸発ジェットと磁気加速ジェットに予想される温度・速さと各領域で観測されたジェットの温度・速さを見積もり、観測と比較した。磁気リコネクションで解放されるエネルギーが彩層上部に突入し、全て熱化したと仮定することで足元フレアの熱エネルギーからジェットの温度を見積もった。ジェットの速さは、見かけの速さを用いた。それぞれの値と予想した値を比較した結果、各領域にリコネクションジェット及び彩層蒸発ジェットがあることを示すことできた。また、いくつかの特徴について活動領域と静穏

(別紙様式 2)

(Separate Form 2)

領域・コロナホールのジェットで違いがあることがわかった。各領域のジェット温度及び個数密度の違いは、コロナ磁場強度の違いに関連することが示唆される。

Summary of the results of the doctoral thesis screening

1990年代、太陽観測衛星「ようこう」により初めて発見された X 線ジェット(X-ray jet)は、軟 X 線で観測される太陽コロナ中のジェット現象で、その形状、時間発展から磁力線再結合による磁気エネルギーの解放が、ジェットの駆動源と考えられている。2006年9月に打ち上げられた太陽観測衛星「ひので」搭載の X 線望遠鏡 (XRT) は「ようこう」の軟 X 線望遠鏡より、低い温度プラズマの熱放射にまで感度を持ち、時間分解能も高い。そのため、「ようこう」の時には温度の高い活動領域の X 線ジェット検出が主であったのに対し、太陽全面で至る所に X 線ジェットを検出できるようになり、高空間分解能で詳細な時間発展を追跡できるようになった。本研究は、高精度の「ひので」X 線望遠鏡で得られた大量の X 線ジェット・データからその発生環境、物理的特性を抽出し、未解明の X 線ジェットの駆動機構の詳細を解明したものである。

本研究ではまず、X 線ジェットの発生環境の特徴を調べるため、従来 X 線ジェットがほとんど起こらないと思われていた太陽極域、静穏領域の XRT データの統計解析を行っている。これらの領域は、活動領域に比べ、磁場構造が比較的単純であるため、特徴抽出には最適の場所である。また、X 線ジェットだけでなく、ジェットを伴わない短時間 X 線増光現象 (transient brightening) にも注目し、小規模磁力線再結合現象を包括的に研究している点が特徴である。背景 X 線強度により領域を 3 つ (コロナホール領域、静穏領域、両者の境界領域) に分類し比較したところ、X 線ジェット及び短時間 X 線増光現象の外観的特徴には差異が見られないが、両者の発生頻度が境界領域において他領域よりも格段に大きいことを新たに見出した。このことは、磁力線再結合現象に必要な環境には、浮上磁場だけでなく背景の磁場構造も寄与していることを示唆しており、当該分野の研究推進に大いに貢献する結果である (本結果は主著査読論文 Sako et al., 2013, ApJ 775:22(10pp) に出版済み)。

続いて X 線ジェットの加速機構の詳細を解明するため、XRT データより X 線ジェットの物理パラメータを導出し、予想される先行理論モデルとの適合性を検証した。磁力線再結合モデルでは、磁気圧・磁気張力で直接加速する「磁気加速機構」と、解放される磁気エネルギーが熱化し下層の低温彩層を熱化蒸発させることによる「ガス圧加速機構或は彩層蒸発機構」が、X 線ジェットの起源として考えられる。それぞれのモデルが、ジェットの温度と速度で差別化できることに注目し、観測量と比較するため、モデルを特徴付ける X 線ジェットの物理パラメータの定量的関係を導いている。150 例に及ぶ X 線ジェットの観測データ解析の結果、ジェットの形状は領域で違いがないにも関わらず、活動領域のジェットは他領域に比べ、ジェット足元及びジェット自身の温度が高く、速度も大きいことが分かった。X 線ジェットの駆動機構については領域に依らず、「磁気加速機構」「彩層蒸発機構」両者が併存しており、一つのジェット現象に両者が共存している例も見つかった。このような加速駆動機構の違いを観測的に明確に捉えた結果は初めてで、理論モデルの改善につながる重要な結果であり、現在、国際的な学術雑誌への査読論文として投稿準備中である。

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

また、出願者独自の、X線ジェット自動検出アルゴリズムも実用化しており、こちらも査読論文として投稿準備中である。

本研究は「ひので」XRT高精度観測を有効に使い、X線ジェットの発生環境、加速駆動機構に関する新しい知見をもたらしたものである。出願者が解析から議論にいたるまで主体的に研究を進めたことも十分に認められる。従って、審査委員会は全会一致で本論文が博士論文として優れたものであることを認め、合格であると判断する。