

国立天文台 天文学データ解析計算センター
成果報告書 (平成16年度)

提出期限：平成17年3月14日(月)17:00 必着

応募カテゴリ（いずれかを選択） A

システム（いずれかを選択） VPP

プロジェクト ID: rst03a

研究代表者（現在のユーザ ID : tanumasn）

氏名	田沼俊一	
所属機関名	京都大学大学院 理学研究科 附属天文台	
連絡先住所	〒 607-8471 京都市山科区北花山大峰町 1 7 京都大学大学院 理学研究科 花山天文台	
電話番号	075-581-1235	
E-mail	tanuma@kwasan.kyoto-u.ac.jp	
職または学年	日本学術振興会特別研究員 PD	
研究代表者が学生の場合には指導教官の氏名		

研究課題名

(和文)	太陽フレアにおける磁気リコネクション・ジェット中の多重衝撃波と乱流による粒子加速
(英文)	Particle Acceleration by Multiple Shocks and Turbulence in the Magnetic Reconnection Jet in the Solar Flares

研究分担者

[illegible]

成果に関連して出版、もしくは印刷、投稿中の論文リスト

(1) このプロジェクト（同様の過去のプロジェクトも含む）での成果

今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）

(2) これまでのプロジェクトの今年度中の成果

今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）

※ 評価資料として利用いたしますので、様式・順序は任意ですが、学術論文については題名、著者、発行年月、雑誌名、巻、ページが記載されていること。

(1) このプロジェクト（同様の過去のプロジェクトも含む）での成果

査読誌

1. Tanuma, S. & Shibata, K. 2005, submitted to ApJL（2月28日現在、投稿中）, 'Internal Shocks in the Magnetic Reconnection Jet in Solar Flares: Multiple Fast Shocks Created by the Secondary Tearing Instability'

国際会議

1. Tanuma, S. 2005, ISSS7 – 7th International School/Symposium for Space Simulations (2005.3.26-3.31, Kyoto Univ.), 'Internal Shocks in the Magnetic Reconnection Jet: 2D MHD Simulations of a Bursty Time-Dependent Reconnection'
2. Tanuma, S. 2005, 5th US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection, Plasma Merging, and Magnetic Jets "Astrophysical Reconnection and Particle Acceleration" – Magnetic Reconnection 2005 (2005.3.8-10, Awajishima), 'Internal Shocks in the Reconnection Jet'

研究会発表

1. 田沼俊一 2005, 京大花山天文台日英共同研究国内会議 (2005.2.24, 京大花山), 「リコネクション・ジェットの内部衝撃波」

(2) これまでのプロジェクトの今年度中の成果

査読誌

1. Hirose, S., Litvinenko, Y. E., **Tanuma, S.**, Shibata, K., Takahashi, M., Tanigawa, T., Sasaqui, T., Noro, A., Uehara, K., Takahashi, K., & Taniguchi, T. 2004, Astrophysical Journal (ApJ), 610, pp1107-1116, 'Numerical Examination of the Stability of an Exact Two-Dimensional Solution for Flux Pile-Up Magnetic Reconnection'

国際研究会集録

1. Tanuma, S. & Shibata K. 2004, Multi-Wavelength Investigation of Solar Activity, IAU (International Astronomical Union) Symp. 223 (2004.6.14-19, St.Petersburg), eds. A. V. Stepanov, E. E. Benevolenskaya, & A. G. Kosovichev (Cambridge University Press), in press, '2D MHD Simulations of Internal Shocks and Turbulence in the Reconnection Jet'

国際会議

1. Tanuma, S. & Shibata, K. 2004, East-Asia Numerical Astrophysics Meeting (2004.11.30-12.2, Mitaka), 'Internal Shocks in the Reconnection Jet in Solar Flares'
2. Tanuma, S. 2004, 'Solar Physics with the Nobeyama Radioheliograph' (2004.10.25-29, Kiyosato), 'Internal Shocks in the Reconnection Jet in Solar Flares'
3. Tanuma, S. 2004, Chapman Conference on Solar Energetic Plasmas and Particles (2004.8.2-6, Turku), 'Internal Shocks in Reconnection Jet in the Solar Flares' (+short oral talk)
4. Tanuma, S. & Shibata, K. 2004, IAU (International Astronomical Union) Symp. 233, 'Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity' (2004.6.14-19, St.Petersburg), '2D MHD Simulations of Internal Shocks and Turbulence in the Reconnection Jet'

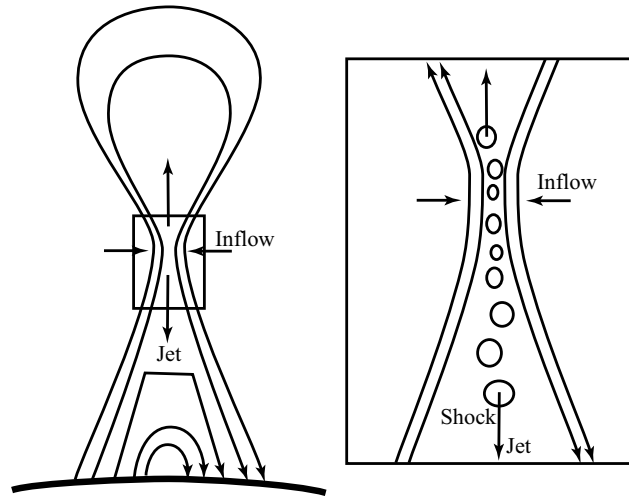
学会

1. (基調講演) 田沼俊一, 柴田一成 2004, 日本天文学会 2004 年秋季年会 (C10a)(2004.9.21-23, 岩手大), 「磁気リコネクションによる銀河団高温ガスの加熱の可能性」

研究会発表

1. 田沼俊一 2005, 第9回シミュレーション・サイエンス・シンポジウム・平成16年核融合科学研究所共同研究「大型シミュレーション研究」合同研究会 (2005.1.11-13, 核融合研), 「リコネクションジェット内の多重衝撃波」
2. 田沼俊一 2004, 京大柴田グループ葉山MHDゼミ合宿 (2004.8.22-24, 総研大葉山), 「リコネクション・ジェットの内部衝撃波」
3. 田沼俊一, 柴田一成 2004, 日本流体力学会年会 2004(D323)(2004.8.22-24, 名大), 「太陽フレアにおける磁気リコネクション・ジェット内部の多重衝撃波」
4. 田沼俊一 2004, 京大花山天文台日英共同研究国内会議 (2004.7.29, 京大花山), 「リコネクション・ジェットの内部衝撃波」
5. 田沼俊一 2004, 京大宇宙物理学教室火曜雑誌会 (理論雑誌会)(2004.6.8, 京大宇物), 'Internal Shocks in Magnetic Reconnection Jet in the Solar Flares'
6. 田沼俊一 2004, 京大宇宙物理学教室・花山／飛騨天文台合同研究発表会 (2004.4.14, 京大宇物), 「太陽フレアにおけるリコネクション・ジェットの内部衝撃波の発生と高エネルギー粒子の加速」

成果の概要



太陽フレアのリコネクションジェットの内部衝撃波の模式図。

イントロダクション-太陽フレアにおける粒子加速

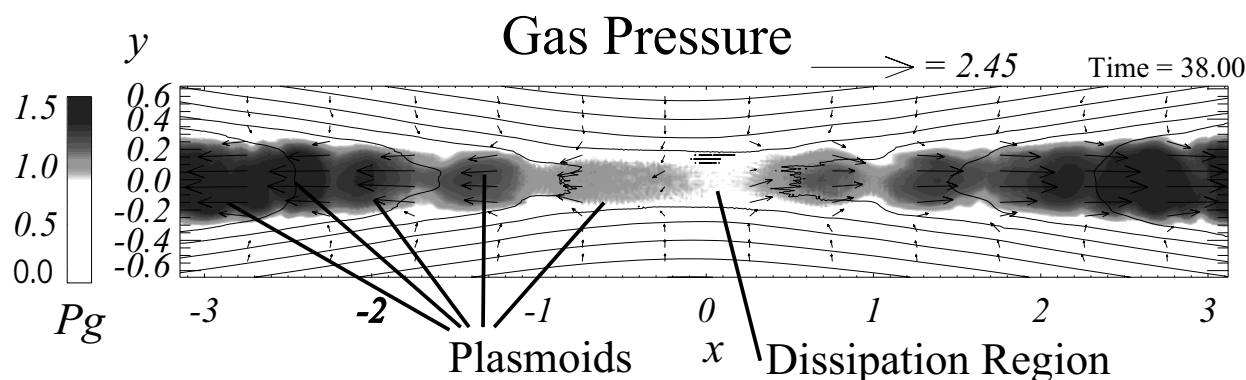
太陽フレアは磁気リコネクションによって発生すると考えられている。その際、短時間のうちに磁気エネルギーが解放され、高温ガスや高エネルギー電子が作り出される。それらが放射する X 線や γ 線は、Yohkoh や RHESSI 衛星などによって観測されている。特に高エネルギー電子から出る硬 X 線源は、磁気ループの頂点（ループトップ）と足元に分布している (Masuda et al. 1994)。しかし、高エネルギー電子がどのようにして加速され、ループトップと足元閉じ込められるのかについては、いまだに分かっていない。例えば、Tsuneta & Naito (1998) は、ループトップのファストショックが斜め衝撃波になると、スローショックであらかじめ 10-20 MK に加熱されたガスは、1 次のフェルミ加速によって瞬時に加速可能であると提案した。しかし、いずれのモデルを使っても、すべての太陽フレアの高エネルギー電子の生成・振る舞いを完全に説明できるわけではない。

そこで我々は、ジェットがループトップのファストショックにたどり着く前に、ジェットの内部で衝撃波を作る（そして、その結果粒子加速が起こる）のではないかと考え、高分解の 2 次元 MHD シミュレーションを行なって調べた。

数値シミュレーション

初期条件として $B_x = B_0 \tanh(y/1.0)$, $B_z = 0$, $p_g = p_0 + (B_0^2/8\pi)[1 - \tanh(y/1.0)^2]$ で与えられるハリス型の電流シートを作った。プラズマ β (=ガス圧/磁気圧) は、 $\beta = 8\pi p_0/B_0^2 = 0.2$ ($|y| \gg 1$)。全圧 (ガス圧+磁気圧)・温度・音速は全体で一様、ガス圧・密度・磁場強度は電流シートの外側で一様である。計算領域は $(L_x, L_y) = (208.0, 20.8)$ 、メッシュサイズは $(\Delta x, \Delta y) = (0.013, 0.013)$ (一様メッシュ)、メッシュ数は、 $(N_x, N_y) = (16000, 1600)$ とした。境界は、上下が対象境界、左右が周期境界である。本研究では、計算領域を広く取り、境界の影響を防いでいる。この計算では異常抵抗モデルを仮定し、ドリフト速度 ($v_d = |j|/\rho$) が閾値 v_c を越えると、その部分に局所的に大きな電気抵抗が働くようにしてある。具体的には、 $\eta = \eta_0$ (if $v_d < v_c$), $\eta = \eta_0 + \alpha(v_d/v_c - 1)^2$ (if $v_d \geq v_c$) という式で与え、 $\eta_{max} = 1$ を越えないようにした。パラメータは、 $\eta_0 = 0.005$, $v_c = 20$, $\alpha = 10$ である。ここで、 η_0 の値は数値誤差から来る数値的電気抵抗よりも大きく取っている。磁気レイノルズ数は、 $R_m = L_x V_A/\eta_0 \sim 10^5$ である。そして初期摂動として、電流シートの中心部分に短時間だけ電気抵抗を与えた。

その結果、電流シートは、(i) テアリング不安定性による電流シート thinning、(ii) その非線形段階における Sweet-Parker リコネクション、(iii) 細長くなった電流シート中でのセカンダリー・テアリング不安定性と、プラズモイドの発生・噴出、(iv) プラズモイド噴出直後の異常抵抗の励起と、Petschek リコネクションの開始、という順に変化した (Tanuma et al. 1999, 2001, 2003)。



散逸領域周辺のカス圧の分布図。

そして、このとき、散逸領域中でセカンダリー・テアリング不安定性が発生し続けた。その結果、リコネクションは Bursty で非定常なものになり、リコネクションジェット中の多重衝撃波が発生した (Tanuma & Shibata 2005)。

まとめと議論

本研究により、世界で初めて、リコネクションジェットの内部衝撃波を分解できた (Tanuma et al. 2001 などにも現れているが、初期摂動として電流シートの外側に点源爆発をひとつ置いている上、今回よりメッシュが粗い)。本研究では、こうしてジェット内部の多重衝撃波が作ることが明らかになった。また一部のパラメータ化ではリコネクション・アウトフローがケルビンヘルムホルツ (KH) 不安定性的に振動することも分かった。このような KH 的振動は、これまでもハイブリッドシミュレーション (Arzner & Scholer 2001) や high- β での MHD シミュレーション (Biskamp et al. 1998) の結果に現れており、太陽フレア内部で実際に発生すれば、粒子加速をにとって重要な現象となる。しかし、この KH 的振動の原因に関しては、今後詳しく調べる必要がある。またさらに他のパラメータを使った計算では、散逸領域で出来た大きなプラズモイドが電流シートに沿って飛ばされる際、その全面にバウショックを発生させることも分かった。この現象も今後詳しく調べる予定である。

こうして作られる衝撃波が実際の太陽でも作られているとすれば、太陽における粒子加速に効くはずである。そして、この結果は Tsuneta & Naito (1998) などの提案を補うものになる。また、最近 TRACE 衛星によって、磁気ループ上空からダウフローが間欠的に降り注いでいる様子が観測されている。このような現象は、磁気ループ上空で発生したリコネクションによって、プラズモイドが間欠的に噴出されるために発生している可能性がある。また、このようなリコネクションジェットの内部衝撃波は、太陽と同様にリコネクションが起こっている地球磁気圏や銀河の粒子加速にも効くはずである。

参考文献

- Arzner, K. & Scholer, M. 2001, JGR, 106, 3827
- Biskamp, T., Schwarz, E., & Zeiler, A. 1988, Phys. Plasmas, 5, 2485
- Masuda, S. et al. 1994, Nature, 371, 495
- Tanuma, S., Yokoyama, T., Kudoh, T., Matsumoto, R., Shibata, K., & Makishima, K. 1999, PASJ, 51, 161
- Tanuma, S., Yokoyama, T., Kudoh, T., & Shibata, K. 2001, ApJ, 551, 312
- Tanuma, S., Yokoyama, T., Kudoh, T., & Shibata, K. 2003, 582, 215
- Tanuma, S. & Shibata, K. 2005, submitted to ApJ
- Tsuneta, S. & Naito, T. 1998, ApJ, L67