

太陽ジェットの3次元MHDシミュレーション

3-dimensional MHD Simulations of Solar Jets

研究代表者：西田圭佑 (京都大学理学研究科)
nishida@kwasan.kyoto-u.ac.jp

研究目的 (Research Objective):

太陽大気中では、コリメートされたプラズマ流が噴出するジェット現象がさまざまなスケールにおいて普遍的に見られる。H α 線で観測されるスピキュールやサージ、コロナ中のX線ジェット、彩層中のアネモネジェット等である。最近では極端紫外線観測により微小な nanojets も発見された(P. Antolin, 2020)。ジェット現象は、下層での磁気リコネクションによるエネルギー解放でプラズマが加速されることで発生していると考えられており、数値シミュレーションを用いた多くの研究の結果もそれを支持する。また、ジェット現象は、太陽コロナ加熱や太陽風加速のエネルギー源として重要な役割を果たしていると考えられている。

彩層ジェットでは、磁気リコネクションによるエネルギー解放が行われていると思われる領域の光度の激しい時間変動が観測されている(K.A.P. Singh et al., 2012)。さらに、同一または隣接する箇所から次々とジェット(small scale jets)が打ち上がる(Successive jets)こともある[Fig. 1]。これらの観測的特徴は、従来の単純なジェットのモデルだけでは説明できない。観測からは、前者は電流シート中でのプラズモイドの発生(plasmoid-induced reconnection model)、後者は浮上磁場のヘリカルな磁場構造が磁気リコネクションを引き起こすことに起因することが示唆されている。

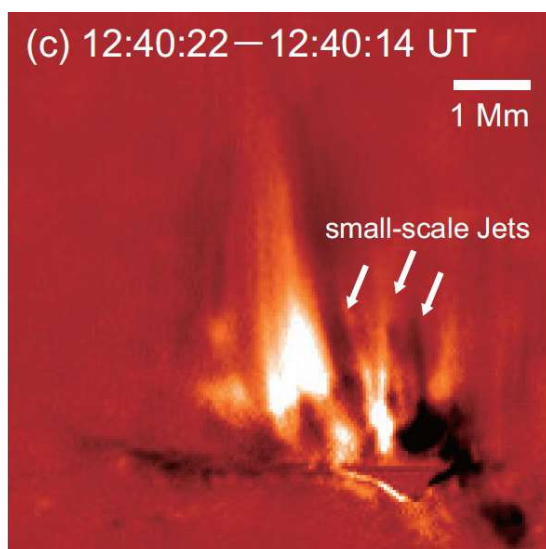


Fig. 1 太陽観測衛星「ひので」可視光望遠鏡(SOT)のCa II H フィルターで観測された彩層ジェット。2006年11月20日12:40:14UTと12:40:22の差分画像。

本研究課題では3次元MHDシミュレーションを行うことで彩層ジェットの観測的特徴を再現し、観測と物理量を比較することで、モデルの検証を行う。

計算手法 (Computational Aspects):

カーテシアン座標系で3次元MHDシミュレーションを行った。MHD計算を行うためにCIP-MOCCT法を用いた。並列化にはMPIを用いた。電流シート近傍の磁場構造を分解するため、グリッド数は 800^3 とした。電気抵抗として電流密度がある一定以上で電気抵抗がonになる、つまり電気抵抗が局所的に働く異常抵抗モデルを仮定した。

シミュレーションの初期条件としては、一様な背景磁場を持ち重力成層した光球～彩層～遷移層～コロナのモデルの光球面下にヘリカルな磁場構造を持つflux ropeを設置したものをを用いた [Fig. 2, 3]。そして摂動として微小な速度場をflux ropeに加えることにより、flux ropeをParker不安定性により浮上させ、背景磁場との間で磁気リコネクションを引き起こし、その時間発展を調べた。

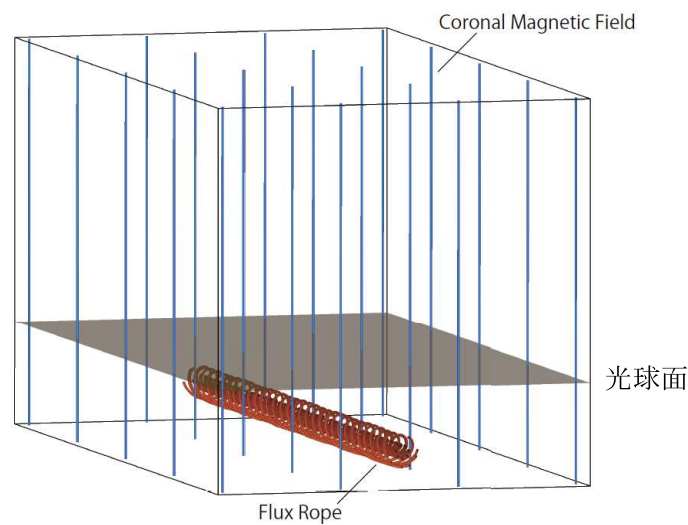


Fig. 2 初期条件(磁場構造)

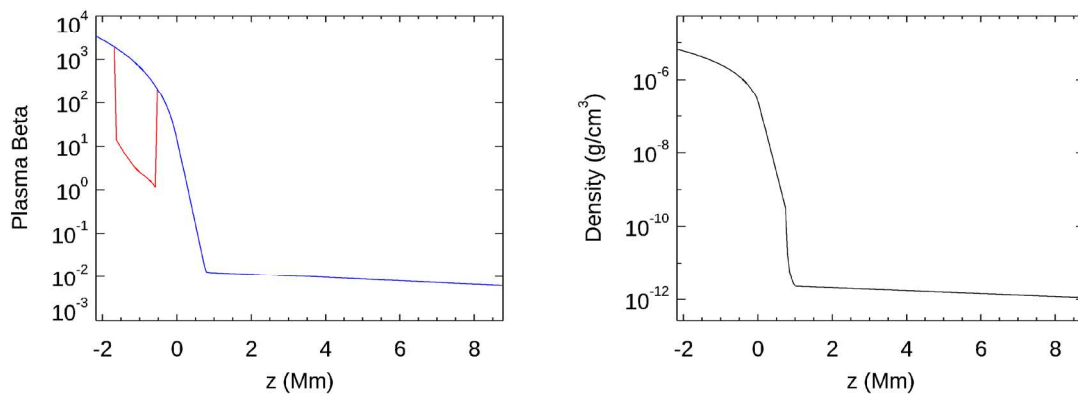


Fig. 3 初期条件 (Plasma beta と密度の鉛直方向分布)。赤実線はflux rope内、青実線はflux rope外のplasma betaを示す。

研究成果 (Accomplishments) :

3次元 MHD シミュレーションの結果を Fig. 4 に示す。

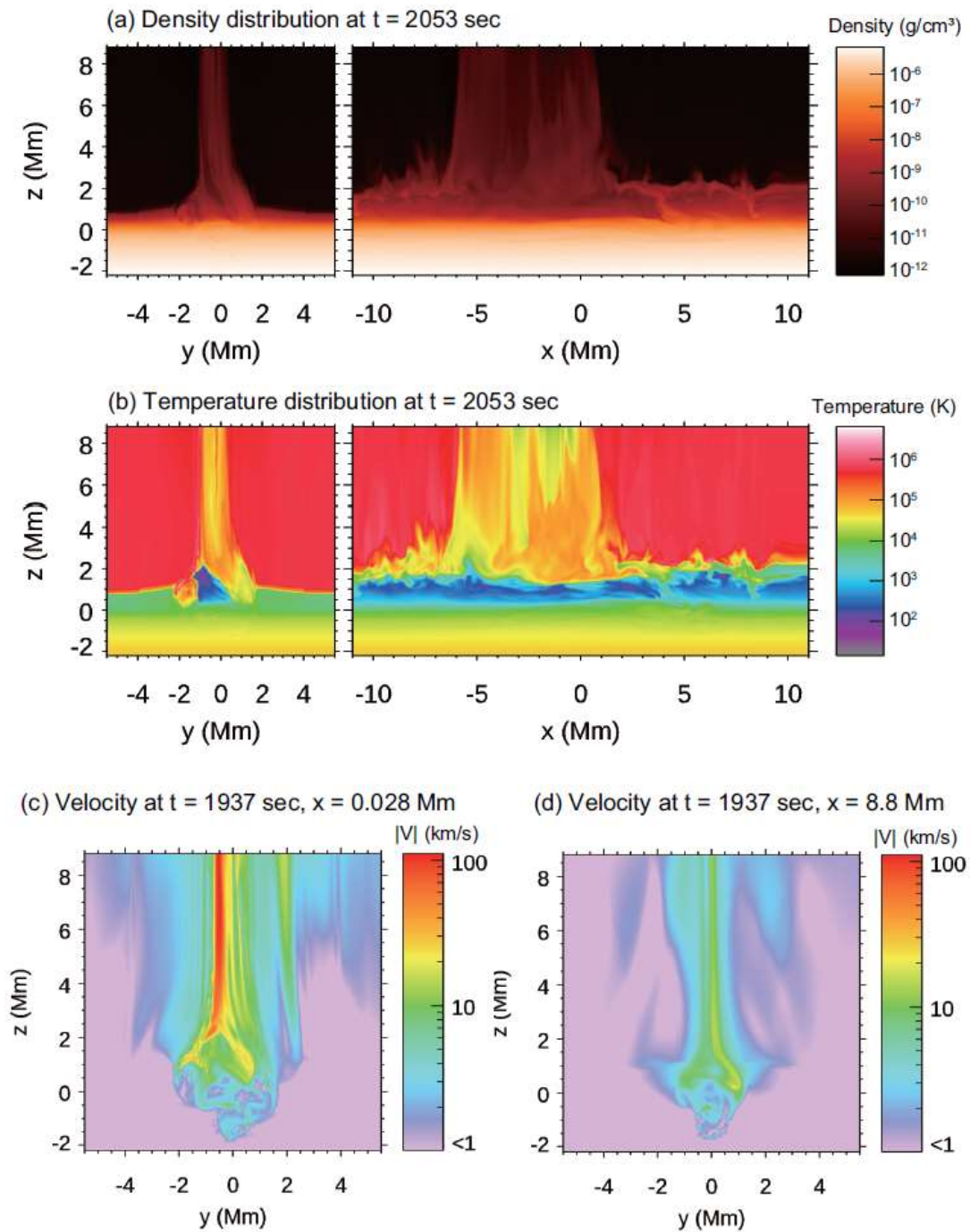


Fig. 4 (a) 密度分布、(b) 温度分布、(c) 速度場分布

浮上した flux rope と周囲の磁場との間での磁気リコネクションの結果、 100km/s を超える高速のジェットが発生した。これは磁気リコネクションが local Alfvén speed の高い上層部で発生したことを示す。また、ジェットの足元では断熱膨張により低温の領域が出現した。ジェットは時間経過とともに広がっていく successive jets

の特徴を示し、これは太陽観測衛星「ひので」可視光望遠鏡(SOT)で観測された彩層ジェットの特徴と一致する。Fig. 5に今回のシミュレーションで再現した successive jets の模式図を示す。ヘリカルな磁場構造(flux rope)とコロナ背景磁場の間での磁気リコネクションの発生場所が移動し、それに伴いジェットが発生する位置も左に移動していく。今回は最も単純な初期条件(従来の2次元モデルをそのまま奥行き方向に拡張した2.5次元的なモデル)を用いたが、今後は観測結果を定量的に説明できるよう、より現実の磁場構造に近いモデルを用いて計算を行う予定でアル。

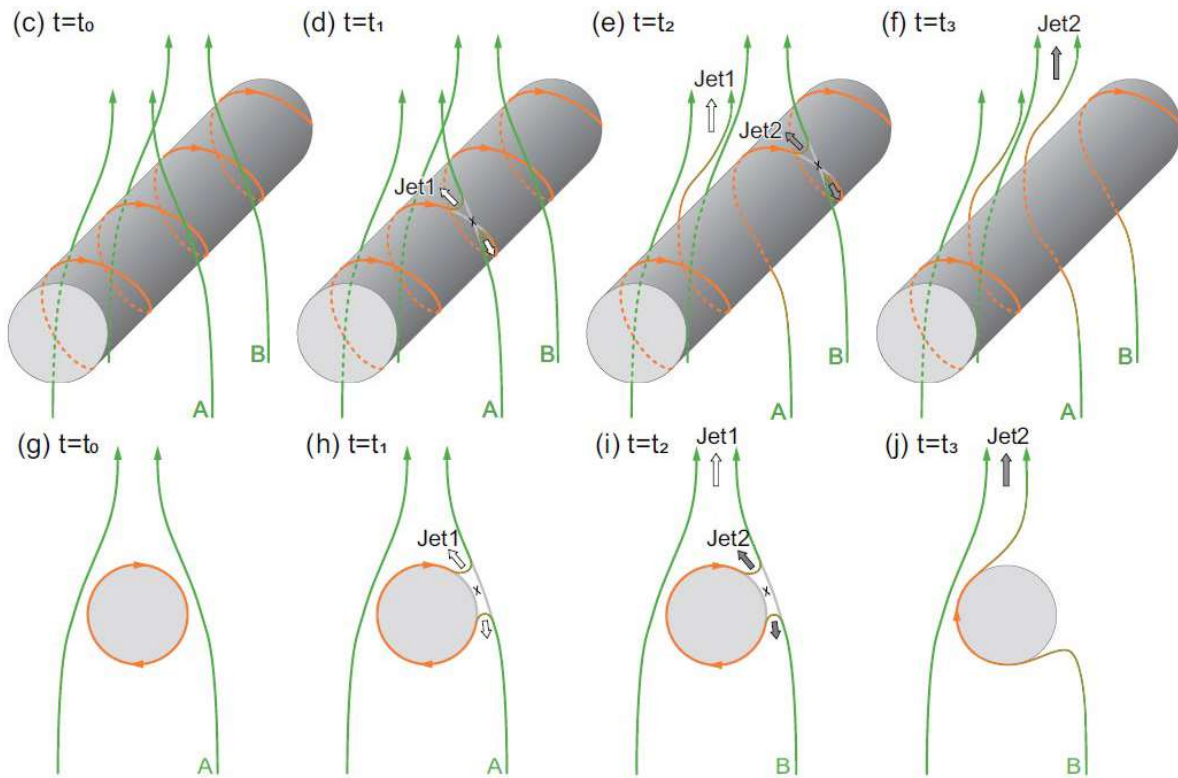


Fig. 5 磁場構造の模式図。緑の実線がコロナ磁場、オレンジの実線が flux rope の磁場を示す。

公表状況 (Publications) :

観測とシミュレーションの定性的な比較結果に関する論文投稿を準備中である(バナラス・ヒन्दゥー大学の K.A.P. Singh 氏との共著)。