国立天文台天文シミュレーションプロジェクト 成果報告書

太陽プロミネンス噴出の磁気流体シミュレーション研究

金子 岳史(名古屋大学)

利用カテゴリ XC-B

太陽プロミネンス噴出について、磁気流体シミュレーションによる研究を行なった。
プロミネンスとは、高温プラズマ大気(コロナ)中に出現する低温高密度プラズマ雲である。太陽プロミネンスはしばしば宇宙空間へ噴出し、コロナ質量放出となって地球周辺のプラズマ環境へも影響を与える。プロミネンス噴出はコロナ磁場の不安定化によって発生する。近年の観測により、噴出前にプロミネンス内部速度場の標準偏差が上昇することが、複数のイベントにおいて確認された(Seki et al., 2019)。これは前兆現象の一種であると考えられ、噴出の事前予測に応用できる可能性がある。一方、コロナ磁場の不安定化とプロミネンス内部の速度場の変化にどのような因果関係があるかは不明である。コロナ磁場は直接観測することができないため、磁気流体シミュレーションを活用した研究を行う必要がある。本研究では、磁気流体シミュレーションによってプロミネンス噴出を再現し、コロナ磁場不安定化過程におけるプロミネンスの役割について調査した。

シミュレーション概要

光学的に薄い放射冷却、非等方非線形熱伝導、重力を考慮した磁気流体方程式を数値的に解いた。磁気流体方程式と熱伝導方程式は、オペレータスプリッティングにより解いた。磁気流体方程式は、時間積分に4段Runge-Kutta法、空間微分に4次精度中心差分を用いて解いた。人工粘性はRempel (2014)で提案されたものを用いた。熱伝導に関しては、高温コロナでは熱伝導係数が非常に大きく、タイムステップ数が多くなる傾向がある。計算量を削減するため、時間積分に2次精度super time-stepping法を用い、空間微分は2次精度中心差分で解いた。また、非等法熱伝導を多次元で数値的に安定に解くため、Sharma (2006)で提案されたフラックスリミターを用いた。
初期コロナ磁場は線形フォースフリー磁場とした。下部境界の電場を変化させ、コロナ磁場と逆極性の浮上磁場を導入し、コロナ磁場、コロナプラズマがどのように応答するか検証した。

結果

まず、コロナ磁場と浮上磁場のリコネクションにより、ねじれた磁束管構造が形成される。磁束管内には密度の高いプラズマが取り込まれ、放射冷却による暴走的な熱エネルギー損失により低温高密化し(放射凝縮、熱不安定)、プロミネンスが形成される。このプロミネンス形成メカニズムは、申請者の先行研究(Kaneko & Yokoyama, 2015, 2017, 2018)で提案したリコネクション凝縮モデルに沿ったものである。本研究ではさらに長時間計算を行った。結果、プロミネン

スとコロナの間の速度シアによりKelvin-Helmholtz不安定(KHI)が発生し、プロミネンスの変形と、複雑な流れ場が形成され、最終的に磁束管が不安定化し、プロミネンスは噴出した(図1)。観測で報告された噴出前の速度標準偏差の増加は、KHIにより定量的に再現された(図2)。KHIの非線形成長率は上昇流の方が下降流より強かった。これは上空に行くほど磁場強度が弱くなり、KHIの成長が抑制されにくくなるためである。また、KHIによるプロミネンス変形により、副次的な磁気リコネクションが発生し、磁束菅がより多くの磁束を獲得することが分かった。これらの効果により、磁束管は磁気流体不安定性の一種であるトーラス不安定の臨界高度へ到達しやすくなる。

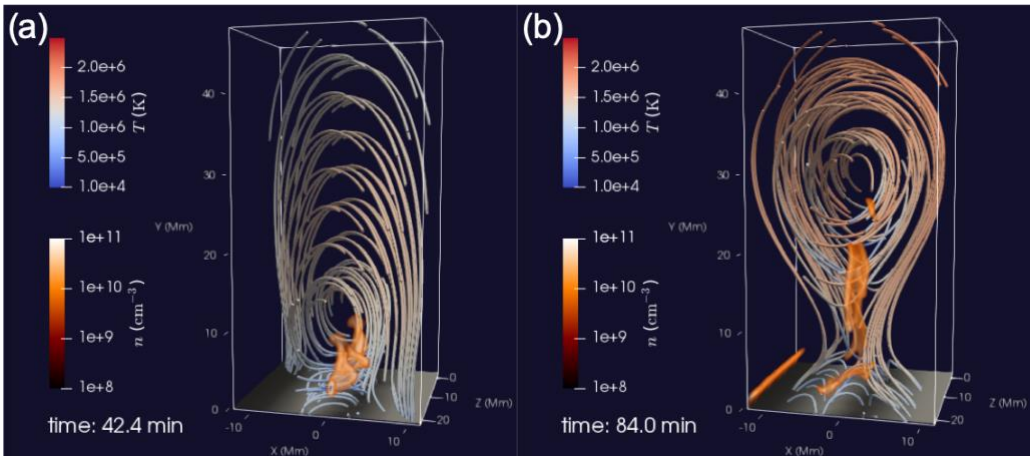

図 1: シミュレーションの結果。線は磁力線、線の色は温度、オレンジ色の部分は密度が$4 \times 10^9\ \mathrm{cm}^{-3} - 1 \times 10^{11}\ \mathrm{cm}^{-3}$ の高密度部分を表しており、プロミネンスに対応する。(a)はコロナ磁場不安定化前で、磁束管内のプロミネンスが Kelvin-Helmholtz 不安定により変形している。(b)はコロナ磁場不安定化後。

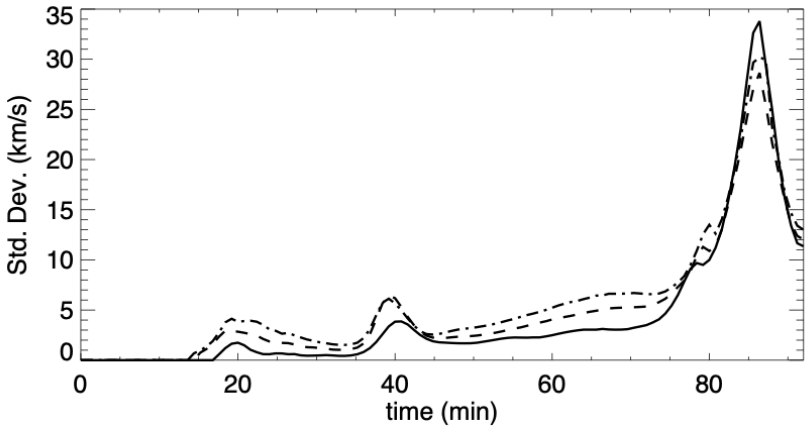

図 2: 再現された速度標準偏差の上昇。実線は温度10^4 K以下のプラズマの速度(可視光観測に対応)、破線と一点鎖線はそれぞれ$1 \times 10^4\ \mathrm{K} - 1 \times 10^5\ \mathrm{K}$、$1 \times 10^5\ \mathrm{K} - 3 \times 10^5$ Kの温度帯(極紫外光観測に対応)のプラズマの速度から求めた速度標準偏差の時間発展を表す。