

熱不安定による太陽フィラメント形成の 2.5 次元磁気流体シミュレーション

金子 岳史 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

太陽フィラメントは高温のコロナ内に出現する低温高密度プラズマ雲であり、高密度プラズマは磁場によって支えられていると考えられている。低温高密度プラズマの生成機構として有力なものの一つに熱不安定を通じたメカニズムが提案されており、シミュレーションによる検証も行われている。一方、現在の熱不安定モデルは観測で示唆されている磁束管型磁場構造の形成過程は考慮されていない。本研究では磁束管の形成から低温高密度プラズマ生成までを一括して理解する新たなフィラメント形成メカニズムを提案し、非等方非線形熱伝導、放射冷却、重力を考慮した 2.5 次元抵抗性磁気流体シミュレーションによる実証を試みた。結果、磁束管構造の形成は、低温高密度プラズマ生成に本質的な役割を果たすことが分かった。

1 Introduction

太陽フィラメントは、高温のコロナ (100 万 K) 内に出現する低温高密度プラズマ雲 (温度は 1-10 万 K、密度はコロナの 10-100 倍程度) である。高密度プラズマは磁場によって支えられていると考えられており、観測からは、フィラメントは磁束管であると示唆されている。現在、低温高密度プラズマ生成と磁束管形成の理論モデルは互いに独立に議論されている。低温高密度プラズマの生成機構については、長いコロナループの足元に局在化した加熱を与えることで、熱不安定により低温高密度プラズマが形成されることが熱伝導、放射、重力を考慮した 1 次元流体シミュレーションによって詳細に調べられており (Karpen et al. 2003)、最近では 2 次元磁気流体シミュレーションによる検証も行われている (Xia et al. 2012)。一方、熱不安定モデルは観測で示唆されているようなフィラメントの磁束管型磁場構造の形成過程は考慮されていない。磁束管の形成メカニズムについては、コロナアーケード磁場の磁気中性線 (polarity inversion line; PIL) へ向かう光球面収束運動や PIL に沿ったシア運動、あるいは PIL 付近への浮上磁場の出現などのモデルがあるが、いずれのモデルも熱伝導と放射は考慮されておらず、低温高密度プラズマの生成は説明できない。そこで、本研究では、磁束管の形成から低温高密度プラズマ生成までを一括して理解す

る新たなフィラメント形成メカニズムを提案し、非等方非線形熱伝導、放射冷却、重力を考慮した 2.5 次元抵抗性磁気流体シミュレーションによる実証を試みる。

2 Simulation Model

基礎方程式はエネルギー方程式以外は通常の磁気流体方程式を用いる。エネルギー方程式については、磁力線に沿った方向の熱伝導 $\nabla(\kappa \mathbf{b} \mathbf{b} \nabla T)$ と、放射冷却項 $n^2 \Lambda(T)$ 、背景加熱項 H を加える。 $\Lambda(T)$ はコロナの放射冷却関数であり、簡略化したものを用いる。初期状態は、一様重力の下に密度成層した等温コロナ内に、フォースフリー条件を満たすアーケード磁場を配置し、力学平衡状態とする (図 1)。また、背景加熱項 H と初期の放射冷却項をつり合わせ熱平衡状態とする。磁束管の形成メカニズムについては、アーケード磁場 PIL への浮上磁場出現モデルを採用する。浮上磁場は下部境界条件を時間変化させることによって導入する。左右を対称境界とし、アーケードの半分だけを数値的に解く。

3 Results

図 2 に熱不安定発生後の様子を示す。背景のカラーは左が温度、右が密度を表す。浮上磁場とアーケード

ド磁場のリコネクションによって $0 < x < 15$, $0 < y < 50$ の領域に磁束管が形成されており、内部に低温高密度プラズマが形成されている。

実際のフィラメントの物理量を説明するためには更に高解像度のシミュレーション、及び3次元シミュレーションが必要である。

4 Discussion

磁束管内部の低温化は、磁束管がコロナ底部の比較的高密度なプラズマをトラップしたまま上層へ持ち上げ、磁束管内の放射冷却が背景加熱を上回ることにより生じる。磁束管の磁力線は閉じているため、磁束管外部への熱伝導は制限される。一方、磁束管内の放射冷却は上記の理由により強くなるため、熱伝導の典型時間が放射冷却の典型時間より大きくなり、熱不安定が生じる。熱不安定発生後は、放射による内部エネルギーの急減少によりガス圧が下がった部分へプラズマが集積し、高密度プラズマ層が形成される。熱不安定による低温高密度化を正しく計算するためには、低温化した部分と周囲のコロナの境界領域を十分に解像する必要がある (Koyama and Inutsuka, 2004)。実際のコロナの物理量を用いる場合、今回用いたグリッド幅の $1/10$ のグリッド幅が必要となる。この問題を回避するために、今回は放射項に上限を設けることにより、一定の温度以下の放射の効果制限した。放射の効果制限した状況でも低温高密度化は生じたが、集積したプラズマの温度、密度は実際に観測されるフィラメントの温度、密度とは合致していない。実際のフィラメントの物理量を説明するためには、さらに高解像度の計算を行い、放射を制限することなくシミュレーションを行う必要がある。また、本シミュレーションは2.5次元であり、紙面垂直方向の熱伝導が働かないため熱不安定が生じやすくなっている。フィラメントが形成される条件を議論するためには3次元シミュレーションを行う必要がある。

5 Conclusion

太陽フィラメントの磁束管形成および低温高密度プラズマの生成過程を一括して理解するモデルを考案し、熱伝導と放射を考慮した2.5次元磁気流体シミュレーションによる定性的な検証に成功した。実

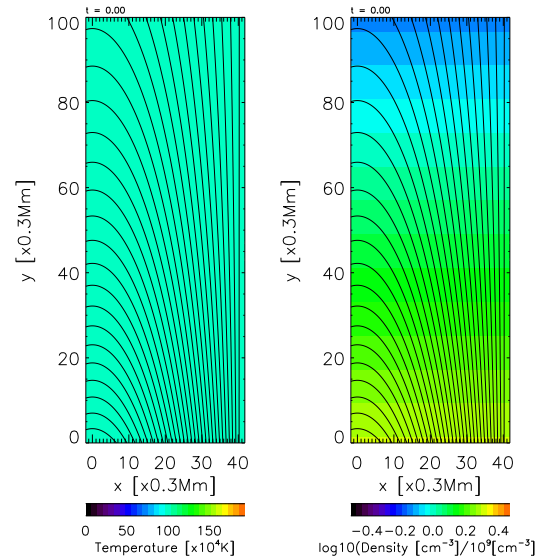


図 1: 初期状態。背景のカラーは左が温度、右が密度、黒線は磁力線を表す

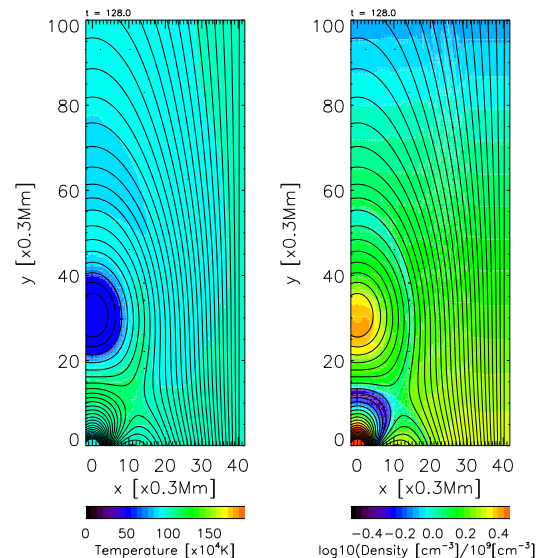


図 2: 熱不安定発生後。背景のカラーは左が温度、右が密度、黒線は磁力線を表す。

2013 年度 第 43 回 天文・天体物理若手夏の学校

Reference

J.T.Karpen, S.K.Antiochos, and J.A.Klimchuk 2003.
ApJ

C.Xia, P.F.Chen, and R.Keppens 2012. ApJL

H.Koyama, and S.Inutsuka 2004. ApJL