

恒星 08a 太陽浮上磁場-コロナアーケード相互作用によるプラズマ放出現象の 2.5 次元シミュレーション

金子岳史 (東京大学 地球惑星科学専攻 M1)

E-mail: kaneko@eps.s.u-tokyo.ac.jp

太陽浮上磁場-コロナアーケード相互作用によるプラズマ放出現象の発生メカニズム及びそのパラメーター依存性について、2.5 次元シミュレーションを用いて理論的考察を行った。パラメーターについては、浮上磁場の磁場強度及び出現位置について調べ、放出の可否を決める条件を求めた。結果、いくつかのケースでプラズモイドの形成及び放出が見られ、放出メカニズムについては、I. アーケード圧縮によるものと II. 浮上磁場-コロナアーケード間での多点リコネクションによるものの 2 通りが得られた。メカニズム I については放出の可否を決める条件を定式化することができた。メカニズム II についても、放出条件について定性的な考察を行った。

1. 序論

太陽フィラメント放出、コロナ質量放出 (CME) は太陽大気中で見られる低温プラズマ放出現象である。これらの放出現象の発生メカニズムについては様々な説が唱えられているが、その一つに太陽浮上磁場とコロナアーケード磁場の相互作用が挙げられる。Feynman & Martin(1995)、Wang & Sheeley(1999) では新たに出現した浮上磁場とコロナアーケード磁場の相互作用がトリガーとなったイベントの観測が報告されている。また、Feynman & Martin(1995) では統計的な解析によって浮上磁場の向きとコロナアーケード磁場の向きが反平行 (リコネクションフェイバー) である場合に放出が起りやすいことが示されており、リコネクションが放出現象のトリガーとして重要な役割を担っていることが示唆されている。一方で、その詳細な物理的メカニズムは明らかにされていない。本研究では、浮上磁場とコロナアーケード磁場相互作用によるプラズマ放出現象について 2.5 次元シミュレーションを行い、放出に至る物理的メカニズムを明らかにする。また、浮上磁場の磁場強度、出現位置についてパラメーター解析を行い、放出が起こる条件について議論する。

2. シミュレーションモデル

初期背景ガスは、温度構造が太陽大気を模した 4 層構造 (対流層、光球/彩層、遷移層、コロナ) となっており、密度成層している。さらにコロナアーケードとしてフォースフリー条件を満たすアーケード型磁場を配置し平衡状態としている。浮上磁場として Gold-Hoyle 型の磁束管を対流層内に配置し、磁気浮力によって浮上させる。x 軸を水平方向、y 軸を鉛直方向とし、磁束管の軸が z 軸となるように磁束管を配置する。z 軸方向の物理量は一様として、x-y 平面内で、一様重力を仮定した抵抗性 2.5 次元 MHD 方程式を解いた。抵抗には異常抵抗モデルを用いた。熱伝導、放射は考慮していない。境界条件は、左右を周期境界、上下を自由境界とし、スキームは改良 Lax-Wendroff 法を用いた。

3. 結果

磁気浮力によってコロナに到達した浮上磁場とコロナアーケードが相互作用を起こすことにより、いくつかのパラメーターにおいて放出現象が見られた。放出に至るメカニズムについては、アーケード圧縮によるもの (以下、メカニズム I とする) と、浮上磁場-アーケード磁場境界での多点リコネクションによるもの (以下、メカニズム II とする) の 2 通りが見られた。図 1 にメカニズム I の時間発展を示す。高 β 領域である対流層に存在していた磁束管は低 β 領域であるコロナへ到達すると急激に膨張する ($t=70$)。アーケード磁場は膨張する浮上磁場により圧縮されることで磁場強度が強まり ($t=100$)、アーケード内部の電流

密度が強まることでリコネクションが発生し ($t=130$)、プラズモイドが形成されると共にリコネクションアウトフローによってプラズモイドが放出される ($t=150$)。次に図 2 にメカニズム II の時間発展を示す。浮上位置がアーケード中央近傍になると、浮上磁場によって圧縮されるアーケードは存在しないため、メカニズム I による放出は起きなくなる。しかし、浮上磁場とアーケード磁場がリコネクションフェイバーである場合には、浮上磁場とアーケード磁場の境界の複数点でリコネクションによりプラズモイド構造が形成され ($t=150$)、さらに、ある地点のリコネクションアウトフローが他の地点のリコネクションインフローに接続される形で 1 箇所のリコネクションが卓越し ($t=172$)、プラズモイドが放出される ($t=200$)。浮上磁場の磁場強度、浮上位置についてのパラメーター解析の結果を図 3、図 4 に示す。ここで、順配置 (co-arranged) アーケードとは $x = -80 \sim 0$ に位置しているアーケードで極性の並びが浮上磁場と同じもの、逆配置 (counter-arranged) アーケードとは $x = 0 \sim 80$ に位置しているアーケードで極性の並びが浮上磁場と逆であるものと定義する。縦軸は浮上磁場とアーケード磁場の磁束比、横軸は浮上磁場の出現位置のアーケード中央からの距離であり、アーケード幅によって規格化している。破線より右がメカニズム I による放出が見られる領域、破線より左がメカニズム II による放出が見られる領域である。●印は放出あり、△印はプラズモイドは形成されるが放出なし、×印はプラズモイドの形成が無いことを示す。

4. 議論

パラメーター解析の結果が図 3、図 4 のような傾向を示す理由について議論する。

4.1 メカニズム I

磁束の保存により、浮上磁場は膨張するにつれて磁場強度が減少する。一方、アーケード磁場は圧縮により磁場強度を増すため、浮上磁場の膨張は、膨張後の浮上磁場の磁気圧と圧縮後のアーケードの磁気圧の釣り合うことで止まると考えられる。浮上磁場が出現する位置も考慮した浮上磁場とアーケード磁場の磁気圧の釣り合いから、放出が起きる条件は以下のように表すことができる。

$$\frac{\zeta}{1/2 + \chi} > \kappa \quad (1)$$

ここで、

$$\zeta = \frac{\Phi_{ef}}{\Phi_{ar}} \quad (2)$$

$$\chi = \frac{2L \pm x_0}{2L} \quad (+ : \text{co}, - : \text{counter}) \quad (3)$$

Φ_{ef} , Φ_{ar} はそれぞれ浮上磁場の磁束量、アーケード磁場の磁束量、 x_0 は浮上磁場の出現位置、 L はアーケードの幅である。 κ はリコネクションが起こるアーケード圧縮率に対応しており、磁場の形状やグリッド幅などに依存すると考えられるため、正確な値を求めるのは難しい。順配置 (co-arranged) アーケードの場合は $\kappa = 9.0$ (図 3 実線)、逆配置 (counter-arranged) アーケードの場合は $\kappa = 10$ (図 4 実線) とするとパラメーター解析の結果をよく説明できる。式 (1) より、浮上磁場が強く、出現位置がアーケードに近いほど放出が起きやすいことが分かる。

4.2 メカニズム II

パラメーター解析の結果を見ると、逆配置アーケードの場合にしか放出が起きないことが分かる。これは、逆配置アーケードの場合は浮上磁場とアーケード磁場が完全にリコネクションフェイバーであるためである。また、メカニズム I とは違い、磁場強度の小さい浮上磁場の場合のみ放出が起こる。メカニズム II で放出を起こすためには 2 つのリコネクションがカップルする必要があるため、浮上磁場の膨張半径が小さい磁場強度の小さい浮上磁場のみで放出が見られたと考えられる。

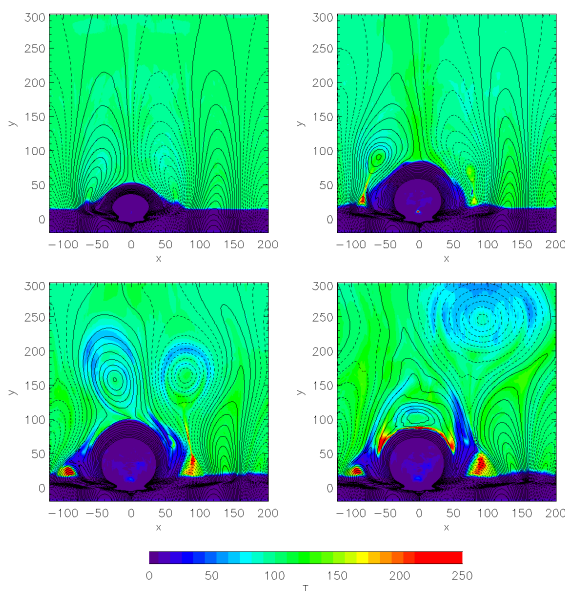


Fig. 1 メカニズム I の時間発展の様子。カラーは温度を表す。順配置アーケードを実線、逆配置アーケードを破線、浮上磁場を実線で表している。

参考文献

- (1) Feynman, J. & Martin, S.F., 1995, *J. Geophys. Res.*, 100, 3355-3367
- (2) Wang, Y.-M. & Sheeley, N.R. Jr., 1999, *ApJ*, 510, L157-L160

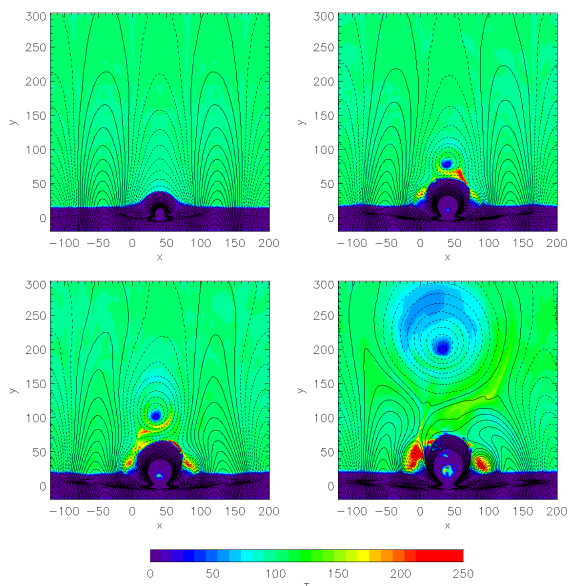


Fig. 2 メカニズム II の時間発展の様子。カラーは温度を表す。順配置アーケードを実線、逆配置アーケードを破線、浮上磁場を実線で表している。

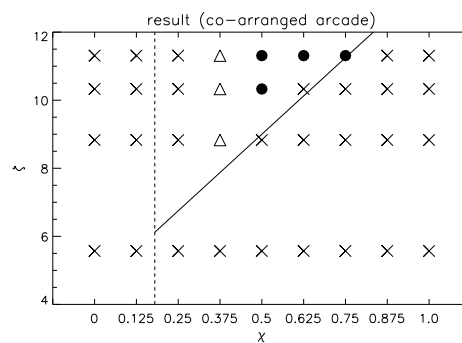


Fig. 3 パラメーター解析の結果 (順配置アーケード)

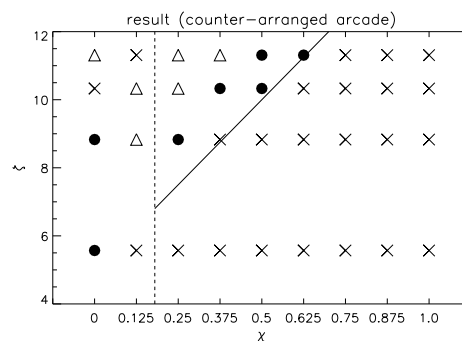


Fig. 4 パラメーター解析の結果 (逆配置アーケード)