

Simulation on Disruption of Solar Magnetic Arcade by Local High Pressure

理工学研究科 知能情報工学専攻メディア情報工学1

嶋和也, 坂井純一, 川田勉

kazuya@mi.iis.toyama-u.ac.jp

太陽表面には無数の微小な磁束管が存在し、太陽表面の対流によって移動・衝突を繰り返している。そこで本研究では1本の磁束管について考え、横にした磁束管の上半分を用いて磁力線のアーケードとし、その内部に強い圧力が起きたときのアーケード崩壊のシミュレーションをMHDコードを用いて行った。その結果、圧力によってアーケードの形が崩れてなくなり、圧力を与えた地点に磁場の隆起が起きることが判明した。

Keywords : MHD, solar magnetic arcade

1 Introduction

太陽は中心温度1億度以上、表面温度が約6000度の天体である。太陽のエネルギーは中心部で起こる熱核融合反応によってもたらされており、したがってプラズマ状の天体であると考えることができる。

太陽表面には無数の微小な磁束管が存在し、太陽表面の対流によって移動・衝突を繰り返している。そこで、1本の磁束管について考える。本研究では横にした磁束管の上半分を用いてアーケードとし、その内部に強い圧力が起きたときのアーケード崩壊のシミュレーションをMHDコードを用いて行う。

2 MHD Simulation

3次元のMHDコードを使用し、人工風(Artificial Wind)スキームを用いて以下のMHD方程式を解く。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho V_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho V_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}[(\rho V_i V_j + (p + B^2)\delta_{ij} - 2B_i B_j)] = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(V_j B_i - V_i B_j) = \frac{1}{Re_m} \frac{\partial^2 B_i}{\partial x_j^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho V^2}{2} + \frac{p}{\gamma - 1} + B^2 \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[V_i \left(\frac{\rho V^2}{2} + \frac{\gamma p}{\gamma - 1} + 2B^2 \right) - 2B_i B_j V_j + q_i \right] = 0 \quad (4)$$

ここで ρ, V_i, p, B_i はそれぞれ、密度、速度、圧力、磁場であり、 γ は断熱定数、 Re_m は磁気レイノルド数、 δ_{ij} はクロネッカーデルタ、 q_i は散逸磁束エネルギーである。

3 Simulation Model

図1は本研究のシミュレーションモデルである。シミュレーションサイズは $N_x = 200, N_y = 200, N_z = 300$ である。磁束管の磁場を次のように与える。

$$B_x = \frac{q B_y (z - z_c)}{a}, \quad B_y = -B_0 e^{-(r/a)^2},$$

$$B_z = -\frac{q B_y (x - x_c)}{a}, \quad (5)$$

ここで $r = [(x - x_c)^2 + (z - z_c)^2]^{1/2}$ である。磁束管の中心を $(x_c, z_c) = (100, 0)$ とし磁

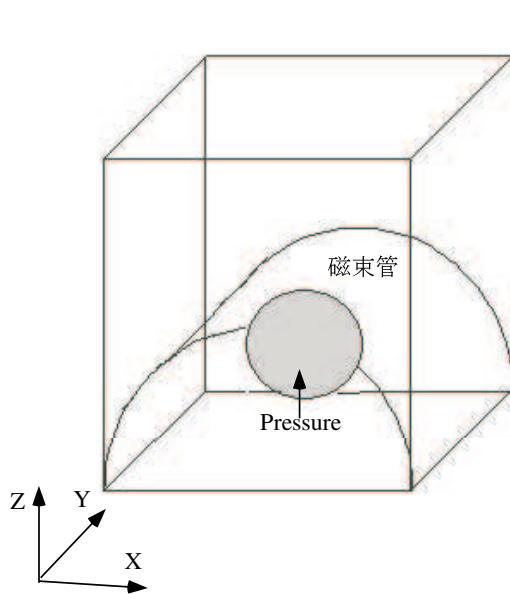


図 1: シミュレーションモデル

束管の上半分を用い、アーケードとする。半径は $a = 100$ 、twist parameter と呼ばれる電流の強さは $q = 0.1$ 、そして $B_0 = 0.1$ である。そして圧力を次のように与える。

$$p = \left(\frac{q^2}{2} - \frac{q^2 r^2}{a^2} - 1\right)e^{-2(r/a)^2} + 2 + 100e^{-\left[\frac{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}{a_p^2}\right]^6} \quad (6)$$

ここではアーケード内部に球状の強い圧力を与えている、球状の圧力の中心は $(x_1, y_1, z_1) = (100, 100, 70)$ 、半径は $a_p = 30$ である。そして磁束管内部には密度の濃いプラズマを置き、次のように密度と速度を与える。

$$\rho = \left(\frac{q^2}{2} - \frac{q^2 r^2}{a^2} - 1\right)e^{-2(r/a)^2} + 2 + 50e^{-z/100}, \quad (7)$$

$$V_x = V_y = 0, \quad (8)$$

$$V_z = 2e^{-\left[\frac{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}{a_1^2} + \frac{(z-z_1)^2}{a_2^2}\right]^6} \quad (9)$$

ここで、球状の圧力の中心から $a_1 = 10, a_2 = 30$ とすることで z 軸方向にやや強めな放射状の速度を与えている。

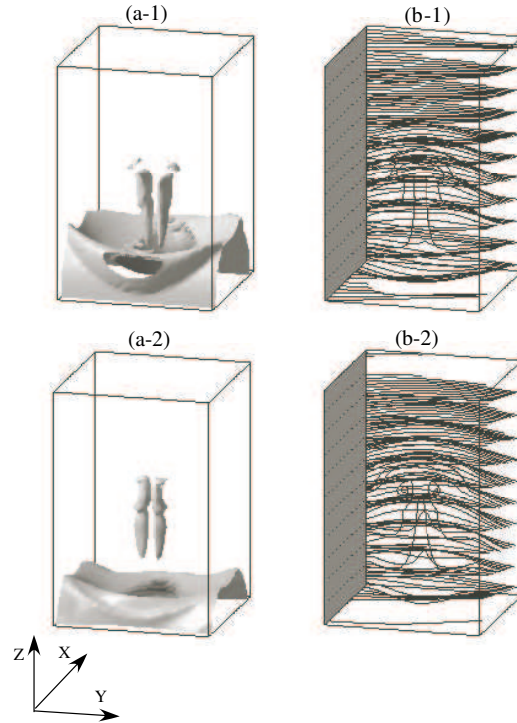


図 2: 磁場 ($|B| = 0.05$) の時間発展 $\tau_s = 0.45, 1.5$ (a-1),(a-2) と磁力線の時間発展 $\tau_s = 0.45, 1.5$ (b-1),(b-2)

4 Simulation Result

図 2 は磁場 ($|B| = 0.05$) と磁力線の 3 次元画像である。これを見るとアーケードが強い圧力によって壊れ、中央部で磁力線が隆起しているのがわかる。

図 3 は $x = 100$ の yz 平面での Density(密度)の空間分布 (gray scale) と磁場 (B_y, B_z), 速度 (V_y, V_z) の vector plot である。磁場 (B_y, B_z) の vector plot を見ると y 軸奥からマイナス方向に向かって磁場の流れが中央に近づくと上昇し、中央をすぎると下降している。これは時間が経過すると、よりはっきりとあらわれる。速度 (V_y, V_z) の vector plot を見ると上方に放射上に広がっていて、特に中央部では上向きに強くなっている。そして時間が経過すると上向きの速度は弱くなっていく。Density(密度)の空間分布 (gray scale) を見ると密度が圧力によって放射状にひろがって中央部からアーケードがやぶれて壊れている。

図 4、図 5 は $y = 96, y = 100$ の xz 平面で

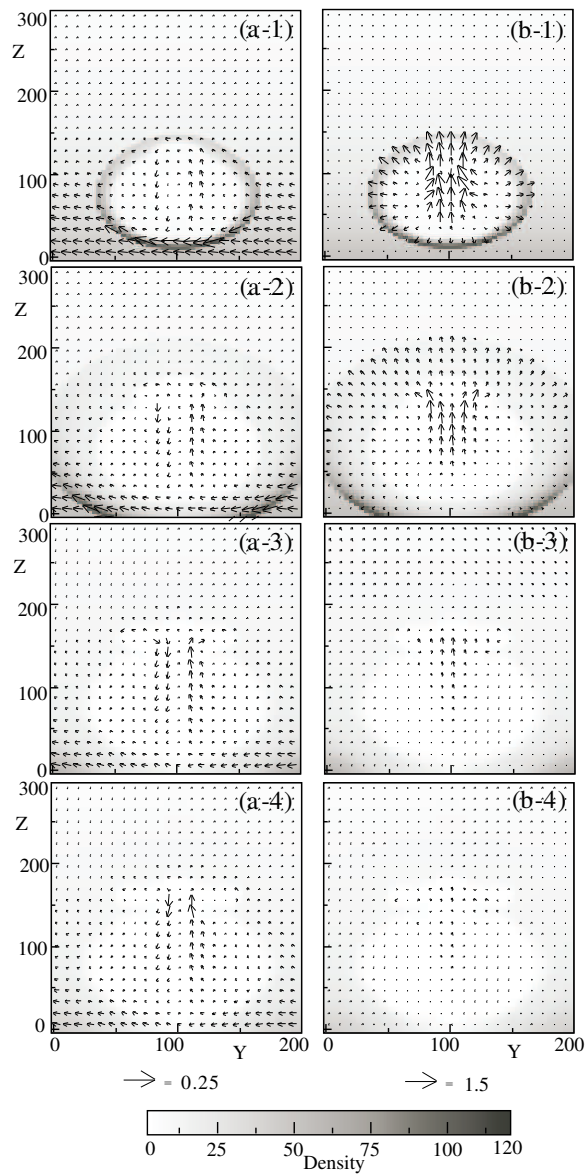


図 3: $x = 100$ の yz 平面での Density(密度) の空間分布 (gray scale) と磁場 (B_y, B_z) の vector plot の時間発展 $\tau_s = 0.15, 0.45, 1.05, 1.5$ (a-1),(a-2),(a-3),(a-4)。 $x = 100$ の yz 平面での Density(密度) の空間分布 (gray scale) と速度 (V_y, V_z) の vector plot の時間発展 $\tau_s = 0.15, 0.45, 1.05, 1.5$ (b-1),(b-2),(b-3),(b-4)。

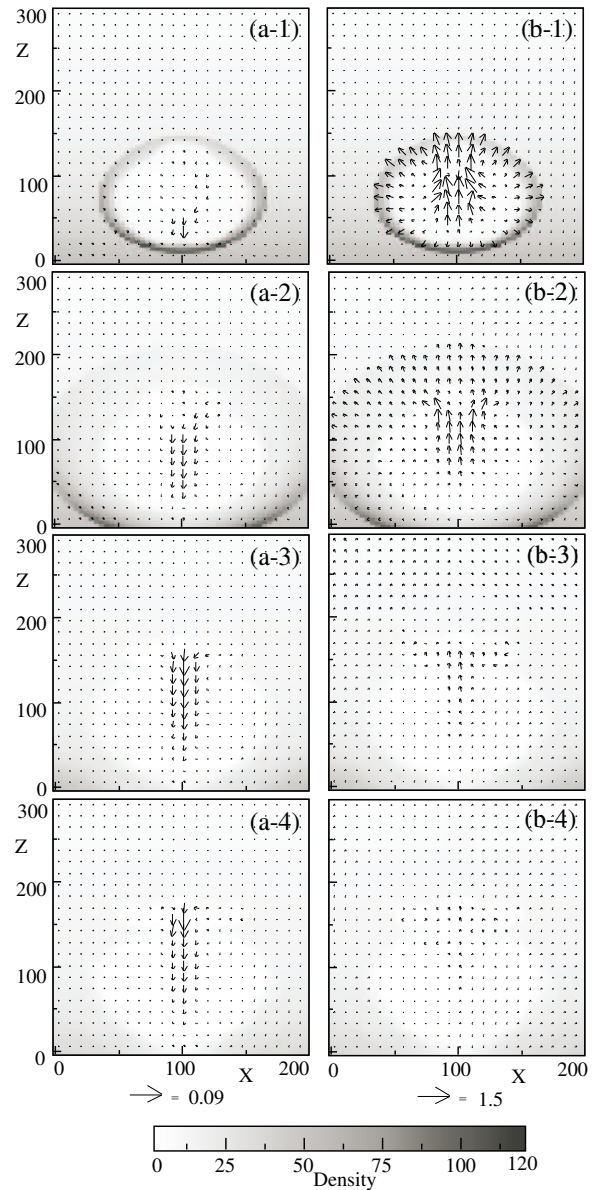


図 4: $y = 96$ の xz 平面での Density(密度) の空間分布 (gray scale) と磁場 (B_x, B_z) の vector plot の時間発展 $\tau_s = 0.15, 0.45, 1.05, 1.5$ (a-1),(a-2),(a-3),(a-4)。 $y = 96$ の xz 平面での Density(密度) の空間分布 (gray scale) と速度 (V_x, V_z) の vector plot の時間発展 $\tau_s = 0.15, 0.45, 1.05, 1.5$ (b-1),(b-2),(b-3),(b-4)。

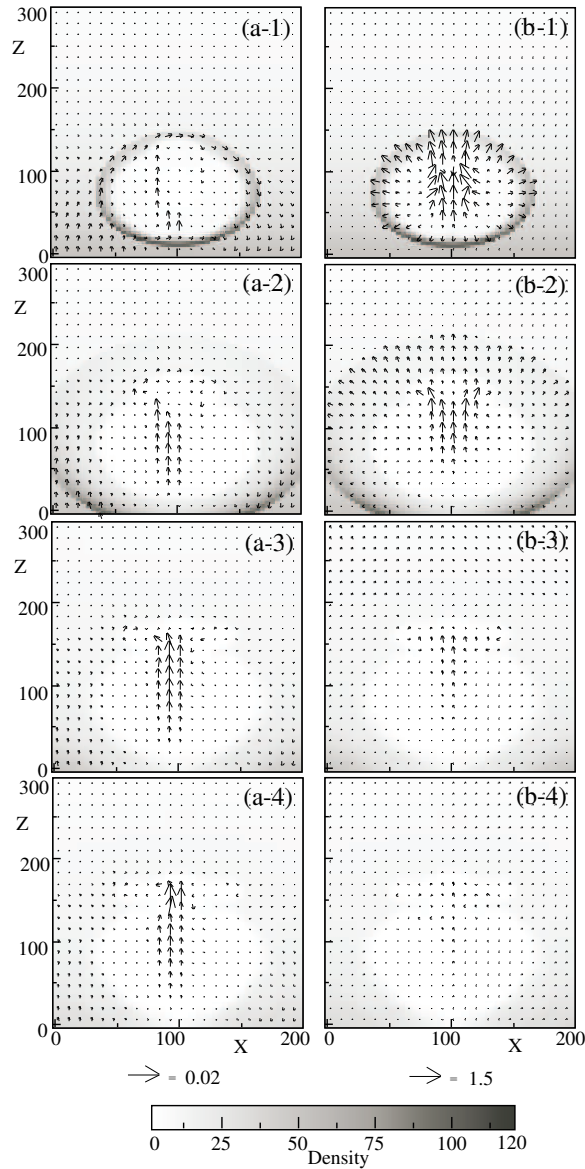


図 5: $y = 100$ の xz 平面での Density(密度) の空間分布 (gray scale) と磁場 (B_x, B_z) の vector plot の時間発展 $\tau_s = 0.15, 0.45, 1.05, 1.5$ (a-1),(a-2),(a-3),(a-4)。 $y = 100$ の xz 平面での Density(密度) の空間分布 (gray scale) と速度 (V_x, V_z) の vector plot の時間発展 $\tau_s = 0.15, 0.45, 1.05, 1.5$ (b-1),(b-2),(b-3),(b-4)。

の Density(密度) の空間分布 (gray scale) と磁場 (B_x, B_z), 速度 (V_x, V_z) の vector plot である。図 4 の磁場 (B_x, B_z) の vector plot では中央部に下方向に磁場が流れており、図 5 では上方向に磁場が流れており、時間が経過すると強くなっている。速度 (V_y, V_z) の vector plot は図 4、図 5 とともに図 3 の (V_y, V_z) の vector plot とほぼ同じ形をしている。Density(密度) も同様にほぼ同じ形をしている。

以上の結果から、アーケードは強い圧力により形が崩れてなくなり、圧力が起きた中央部に磁場の隆起が起きることが解った。

5 結論

磁力線のアーケードの中に強い圧力を与えるシミュレーションを行った結果は、圧力によってアーケードの形が崩れてなくなり、図 2 は磁場と磁力線の 3 次元画像と図 3 の yz 平面での磁場 (B_y, B_z) の vector plot を見るとわかるように、圧力を与えた地点に磁場の隆起が起きるといふ結果になった。

参考文献

- [1] J.I.Sakai, K.Nishi and I.V.Sokolov, *Astrophys.J* **584**, 1095 (2003)
- [2] J.I.Sakai, K.Nishi and I.V.Sokolov, *Astrophys.J* **576**, 519 (2002)