ARPS1D モデルパッケージ spicule

スピキュール（太陽彩層ジェット）

ver. 0

1 はじめに

このモデルパッケージは太陽スピキュールをシミュレーションするためのものである。スピキュールとは彩層からコロナに突き出ている細長い突起構造のことをいう。超粒状班の縁に多い。直径約 1000km、高さは 5000km － 10000km。水素の Hα 線で観測される。一本一本のスピキュールは絶えず運動している。観測的には、彩層上部から上昇して (上層速度は約 20km/s)、その後下降に転じるものと、上昇したあと消えてなくなるものがある。いずれの場合も約 5 分くらいのタイムスケールの現象である。

スピキュールの発生原因はまだよくわかっていない。有力なモデルとして、超粒状班の縁に掃き寄せられた強い磁束管に沿って、音波または磁気流体波が伝播することで発生するという説が考えられている。光球から彩層上部に波が伝播するにつれて密度は急速に減少する。そのため音波や磁気流体波の擾乱の速度は大きくなり (ときには衝撃波が発生し)、彩層上部をコロナに持ちあげることが可能となる。

本コードでは、固定された磁束管の根元に擾乱を与え、その擾乱が音波や磁気流体波として光球から彩層上部へ伝播していくときに、彩層上部がコロナに持ちあがるかどうか (スピキュールが発生するかどうか) を調べる。

2 仮定と基礎方程式

仮定は以下のとおり。(1) 磁気ループに沿った方向のは「硬い」と仮定して固定する。それに沿った 1 次元の MHD 運動（磁場はループに垂直成分のみ）・エネルギー輸送を解く。(2) 磁気ループすなわち流路は断面積が非一様。(3) 非粘性・圧縮性流体として扱い、熱伝導・放射冷却は無視する。(4) 重力を考慮する。(5) 波はソース項として運動方程式に加える。計算領域は $x \in [\,0, L]$ で、$x = 0$ はループ足元で光球面、$x = L$ は磁気ループ頂上を表す。基礎方程式は

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho S) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x S) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V_x S) + \frac{\partial}{\partial x}\left[(\rho V_x^2 + p + \frac{B_y^2}{8\pi})S\right] = \rho g S + (p + \frac{B_y^2}{8\pi})\frac{dS}{dx} \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V_y S) + \frac{\partial}{\partial x}\left[(\rho V_x V_y - \frac{B_x B_y}{4\pi})S\right] = \rho A_{\mathrm{w}} S \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(B_y S) + \frac{\partial}{\partial x}(E_z S) = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\left(\frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2}\rho V_x^2 + \frac{B_y^2}{8\pi}\right)S\right] + \frac{\partial}{\partial x}\left[\left((\frac{\gamma}{\gamma-1}p + \frac{1}{2}\rho V_x^2)V_x + \frac{B_y E_z}{4\pi}\right)S\right] = \rho g V_x S \tag{5}$$

$$E_z = V_x B_y - V_y B_x \tag{6}$$

ここで、$\gamma = 5/3$ は比熱比、S は断面積、g は重力加速度、A_{w} は波の加速度、他の記号は通常の意味。重力は

$$g = g_0 \cos[(\pi/2)x/L] \tag{7}$$

g_0 は光球（$x = 0$）での重力。磁場の x 成分は変化せず、時間発展は解かない。空間分布は第 tbd 節参照。断面積は第 tbd 節参照波の加速度は第 tbd 節参照。

3　無次元化

数値計算では、変数は以下のように無次元化して扱われる（表 1 参照）。長さ、速度、時間の単位はそれぞれ $\mathcal{H}_0$、 C_{S0}、$\tau_0 \equiv \mathcal{H}_0/C_{\mathrm{S0}}$。ここで $\mathcal{H}_0$、C_{S0} は $x = 0$（光球）での圧力スケール長 $\mathcal{H} \equiv p/(\rho g)$ と音速 $C_{\mathrm{S}} \equiv \sqrt{\gamma p/\rho}$。密度と温度とは光球面（$x = 0$）での値 ρ_0、T_0 で無次元化する。また磁場については、磁気圧 $B_0^2/(8\pi)$ を光球圧力 p_0 で無次元化する。

4　初期条件と境界条件

まず温度分布を仮定する。

$$T(z) = T_0 + (T_{\mathrm{cor}} - T_0)\left[\frac{1}{2}\left\{\tanh\left(\frac{x - x_{\mathrm{tr}}}{0.5\mathcal{H}_0}\right) + 1\right\}\right] \tag{8}$$

全空間で速度 $V_x = 0$ として、与えられた温度分布・重力分布のもとで力学平衡の式

$$\frac{dp}{dx} = \rho g \tag{9}$$

を解いて初期分布とする。磁場の y 成分は $B_y = 0$ （x 成分は tbd 節参照）、速度場は $V_x = V_y = 0$。パラメータは、遷移層の高さ x_{tr}、コロナ温度 T_{cor}。

境界条件は $x = 0$、$x = L$ とでともに

$$\partial\rho/\partial x = 0, \quad \partial p/\partial x = 0, \quad V_x = 0, \quad \partial V_y/\partial x = 0, \quad \partial B_y/\partial x = 0 \tag{10}$$

5　磁場の x 成分と断面積の分布

磁場の x 成分は変化せず、時間発展は解かないその空間分布は、圧力の初期分布から以下の式で決定する。

$$B_x = \sqrt{\frac{1}{\beta} 8\pi p} \quad \text{at} \quad t = 0 \tag{11}$$

β がパラメータ。また断面積の分布は、B_x の分布から決定して

$$SB_x = \text{constant} \tag{12}$$

とする。右辺は、0 でない値であればなんでもよい。計算結果には影響しない。

6　波の励起

波の加速度は次のような、時間と空間との関数として与える。

$$A_{\mathrm{w}} = A_{\mathrm{w0}} \cdot q(t) \cdot f(x) \tag{13}$$

$$q(t) = \sin(2\pi t/P_{\mathrm{w}}) \tag{14}$$

$$f(x) = \exp\left[-\frac{x^2}{2w_{\mathrm{w}}^2}\right] \tag{15}$$

パラメータは、注入加速度 A_{w0}、注入周期 P_{w}、注入範囲 w_{w}。

7　パラメータ

表 1 参照。

パラメータ	変数	無次元値	有次元値
ループ半長	L	590	118000 km
遷移層高さ	x_{tr}	12.5	2500 km
コロナ温度	T_{cor}	200	2 MK
プラズマ β	β	1	
波の加速度	A_{w0}	3	1.5km s^{-2}
波の注入範囲	w_{w}	0.75	150 km
波の注入周期	τ_{f}	10	200 s
光球温度	T_0	1	10^4 K
光球密度	ρ_0	1	10^{17} cm^{-3}
光球圧力スケール長	$\mathcal{H}_0$	1	200 km
光球音速	C_{S0}	1	10 km/s
光球音波横断時間	$\tau_0 \equiv \mathcal{H}_0/C_{\mathrm{S0}}$	1	20 s
光球重力	g_0	$1/\gamma$	270 m/s^2
光球圧力	p_0	$1/\gamma$	10^5 erg cm^3
光球磁場	B_0	$\sqrt{8\pi/(\beta\gamma)}$	1600 G

表 1: パラメータと無次元化単位

8　グリッド

グリッド点は $i \in [1,\ 2001]$。グリッド間隔は、遷移層の少し上空 ($x < 1.3x_{\mathrm{tr}}$) まで一様 $\Delta x = \Delta x_0 = 0.015\mathcal{H}_0$、それより上では等比級数的に増える ($\Delta x_{i+1} = 1.02\Delta x_i$)。ただし $\Delta x \leq 0.5\mathcal{H}_0$ で最大値を抑えて

ある。

9　計算結果

10　参考文献

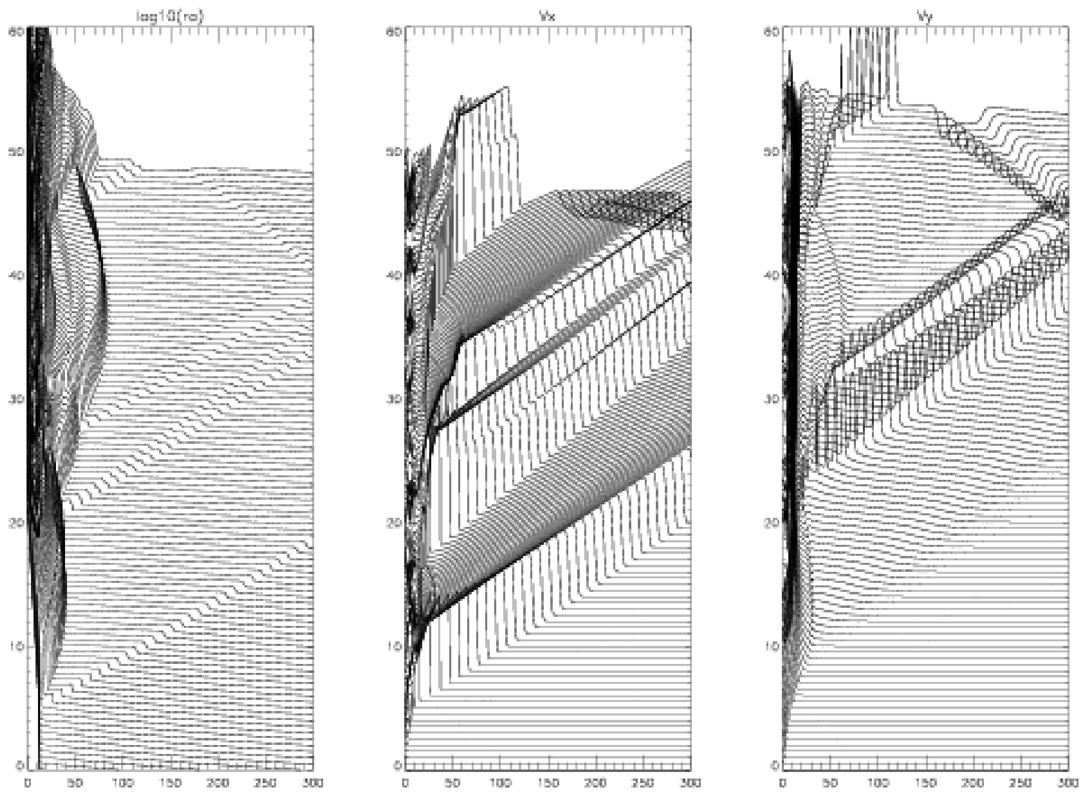

図 1: 計算結果

（工藤哲洋／柴田一成）