CANS2d **モデルパッケージ** md_corjet

太陽コロナジェット

2006. 2. 13.

1　はじめに

このモデルパッケージは太陽コロナジェットをシミュレーションするためのものである。磁気浮力により太陽表面から浮上した磁場と、もともと大気中に存在したコロナ磁場とが磁気リコネクションすることでプラズマを加熱放出する。その際、磁力線に沿って流れが発生するのでジェットとして観測される。

2　仮定と基礎方程式

流体は非粘性・圧縮性・有限磁気拡散の磁気流体とする。計算領域は 2 次元デカルト座標（xy 平面）で $\partial/\partial z = 0$、$V_z = 0$、$B_z = 0$ と仮定する。解くのは、 密度 ρ、圧力 p、速度 V_x、V_y、磁場 B_x、B_y についての 2 次元 MHD 方程式

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V_x) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho V_x^2 + p + \frac{B^2}{8\pi} - \frac{B_x^2}{4\pi}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho V_x V_y - \frac{B_x B_y}{4\pi}\right) = \rho g_x \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V_y) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho V_x V_y - \frac{B_x B_y}{4\pi}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho V_y^2 + p + \frac{B^2}{8\pi} - \frac{B_y^2}{4\pi}\right) = \rho g_y \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(B_x) + \frac{\partial}{\partial y}(cE_z) = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(B_y) - \frac{\partial}{\partial x}(cE_z) = 0 \tag{5}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{p}{\gamma-1} + \frac{1}{2}\rho V^2 + \frac{B^2}{8\pi}\right) \quad &+ \quad \frac{\partial}{\partial x}\left((\frac{\gamma}{\gamma-1}p + \frac{1}{2}\rho V^2)V_x - c\frac{B_y E_z}{4\pi}\right) \\ &+ \quad \frac{\partial}{\partial y}\left((\frac{\gamma}{\gamma-1}p + \frac{1}{2}\rho V^2)V_y + c\frac{B_x E_z}{4\pi}\right) = \rho g_x V_x + \rho g_y V_y\end{aligned} \tag{6}$$

$$cE_z = -V_x B_y + V_y B_x + \eta J_z \tag{7}$$

$$J_z = \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \tag{8}$$

$$p = \frac{k_{\mathrm{B}}}{m}\rho T \tag{9}$$

$$B^2 = B_x^2 + B_y^2, \quad V^2 = V_x^2 + V_y^2 \tag{10}$$

である。

3 無次元化

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 $y=0$（光球面）での圧力スケール長 $\mathcal{H} \equiv p/(\rho g)$ と音速 $C_{\mathrm{S}} \equiv \sqrt{\gamma p/\rho}$。密度は光球面（$y=0$）での値 ρ_0 で無次元化する。

変数	規格化単位
x, y	$\mathcal{H}_0$
V_x, V_y	C_{S0}
t	$\mathcal{H}_0/C_{\mathrm{S0}}$
ρ	ρ_0
p	$\rho_0 C_{\mathrm{S0}}^2$
B_x, B_y	$\sqrt{\rho_0 C_{\mathrm{S0}}^2}$
T	$T_0 \equiv C_{\mathrm{S0}}^2/(\gamma k_{\mathrm{B}}/m)$

表 1: 変数と規格化単位

4 パラメータ・初期条件・計算条件・境界条件

$0 < x < X_{\max}$、$Y_{\min} < y < Y_{\max}$ の領域を解く。重力は y 負方向一様で

$$g_x = 0, \qquad g_y = -\frac{1}{\gamma} C_{\mathrm{S0}}^2/\mathcal{H}_0$$

となる。磁気拡散は以下のように異常（局所）抵抗モデルを仮定する。

$$\eta = \begin{cases} \eta_{\mathrm{st}} & \text{for } v_d < v_c, \\ \eta_{\mathrm{st}} + \eta_{\mathrm{an}} \left(v_d/v_c - 1 \right)^2 & \text{for } v_c \le v_d \le v_{\mathrm{dmax}}, \\ \eta_{\max} & \text{for } v_d \ge v_{\mathrm{dmax}}, \end{cases} \tag{11}$$

ただし、v_{dmax} は、η が $\eta_{\max}$ と等しくなるときの v_d の値。

初期状態は、y 方向に成層する、力学平衡状態である。y 方向の分布は以下のようにして求める。温度分布は以下のようなもの。

$$T(y) = T_0 - \left(a \left| \frac{dT}{dy} \right|_{\mathrm{ad}} \right) y \qquad \text{for} \quad y < y_{\mathrm{cnv}} \tag{12}$$

$$T(y) = T_0 + (T_{\mathrm{cor}} - T_0) \left[\frac{1}{2} \left\{ \tanh \left(\frac{y - y_{\mathrm{tr}}}{w_{\mathrm{tr}}} \right) + 1 \right\} \right] \qquad \text{for} \quad y \ge y_{\mathrm{cnv}} \tag{13}$$

ここで $|dT/dy|_{\mathrm{ad}} \equiv (\gamma - 1)/\gamma (T_0/\mathcal{H}_0)$ は断熱温度勾配、a は温度勾配パラメータで無次元数。磁場分布は、以下のように仮定する。

$$B_x(y) = [8\pi p(y) \alpha(y)]^{1/2} + B_{\mathrm{add}} \tag{14}$$

$$\alpha(y) = \alpha_f f(y) \tag{15}$$

$$f(y) = \frac{1}{4}\left[\tanh\left(\frac{y-y_0}{w_f}+1\right)\right]\left[-\tanh\left(\frac{y-y_1}{w_f}\right)+1\right] \tag{16}$$

対流層から浮き上がる磁束の初期分布は α_f で決め、コロナ中の磁場は $B_{\rm add}$ であたえている。全空間で速度 $V_x = V_y = 0$ 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

$$\frac{d}{dy}\left\{p(y) + \frac{B^2(y)}{8\pi}\right\} = \rho(y) g_y, \tag{17}$$

を解いて初期分布とする。不安定性を誘起するために、初期に擾乱を与える。

$$V_x = 0$$

$$V_y = A\cos(2\pi x/\lambda_p)\frac{1}{2}\left[\tanh\frac{x+3\lambda_p/4}{w_p} - \tanh\frac{x-3\lambda_p/4}{w_p}\right]\frac{1}{2}\left[\tanh\frac{y-y_{p1}}{w_p} - \tanh\frac{y-y_{p2}}{w_p}\right]$$

以上の式に現れた $w_{\rm tr}$、w_f、w_p は数値的な振動を防ぐための遷移幅でいずれも 0.5 にとっている。

パラメータ	値	コード中での変数名	設定サブルーチン名
境界の位置 x 方向 $X_{\rm max}$	20	`xmax`	`model`
境界の位置 y 方向 $Y_{\rm min}$、$Y_{\rm max}$	-4、40	`ymin`、`ymax`	`model`
比熱比 γ	5/3	`gm`	`model`
コロナ温度 $T_{\rm cor}$	25	`tcor`	`model`
対流層温度勾配係数 a	2	`tadg`	`model`
対流層・光球境界高さ $y_{\rm cnv}$	0	`zcnv`	`model`
遷移層高さ $y_{\rm tr}$	8	`ztr`	`model`
光球重力 g_y	$-1/\gamma$	`g0`	`model`
磁束シートベータ値の逆数 α_f	0.25	`rbetaf`	`model`
磁束シートの範囲 $y_{\rm f1}$、$y_{\rm f2}$	-2、0	`zf1`、`zf2`	`model`
コロナ磁場強度 $B_{\rm add}$	-0.1	`bxadd`	`model`
擾乱の振幅 A	0.05	`amp`	`pertub`
擾乱の x 方向の波長・印加範囲 λ_p	20	`xptb`	`pertub`
擾乱の y 方向の印加範囲 y_{p1}、y_{p2}	-2、0	`yptb1`、`yptb2`	`pertub`
一様背景磁気拡散 $\eta_{\rm st}$	0	`etst`	`etaanom`
局所磁気拡散係数 $\eta_{\rm an}$	0.01	`etan`	`etaanom`
臨界ドリフト速度 $v_{\rm c}$	1000	`vdcri`	`etaanom`
磁気拡散限界値 $\eta_{\rm max}$	1	`etmax`	`etaanom`

表 2: おもなパラメータ

境界条件は、x 境界では対称境界、すなわち V_x、B_y は「絶対値が等しく符号反転で鏡面配置」、ρ、p、V_y、B_x は「絶対値・符号が等しく鏡面配置」。y 境界では、ρ、p、V_x、B_x は「絶対値・符号が等しく鏡面配置」。V_y、B_y は「絶対値が等しく符号反転で鏡面配置」。サブルーチン `bnd` で設定する。

計算パラメータは以下の通り（表 3 参照）。

パラメータ	値	コード中での変数名	設定サブルーチン名
グリッド数 x 方向	108	`ix`	`main`
グリッド数 y 方向	108	`jx`	`main`
マージン	4	`margin`	`main`
終了時刻	100	`tend`	`main`
出力時間間隔	1	`dtout`	`main`
CFL 数	0.4	`safety`	`main`
進行時刻下限値	10^{-10}	`dtmin`	`main`

表 3: おもな数値計算パラメータ。マージンとは、境界の値を格納するための配列の「そで」部分の幅のこと。進行時刻下限値とは、各計算ステップの Δt の値がこの値を下回ったときに計算を強制終了するための臨界値。

5 参考文献

Shibata, K. et al. 1992, PASJ
Yokoyama, T. & Shibata, K. et al. 1996, PASJ