CANS2d モデルパッケージ md_corjet

太陽コロナジェット

ver. 0

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

仮定は以下のとおり。(1) 非粘性・圧縮性・有限抵抗磁気流体として扱う。(2) 2 次元 (3) 重力あり。(4) 抵抗は、異常抵抗モデル。計算領域は $x \in [\,0, 20\mathcal{H}_0]$、$y \in [\,-4\mathcal{H}_0, 40\mathcal{H}_0]$ である。基礎方程式は

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ここで、γ は比熱比、$g_x = 0$、$g_y = \mathrm{const.}$ は重力、他の記号は通常の意味。

3　異常抵抗モデル

$$\eta = \begin{cases} 0 & \text{for } v_d < v_c, \\ \alpha \left(v_d / v_c - 1\right)^2 & \text{for } v_d \geq v_c, \end{cases} \tag{11}$$

4　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 $\mathcal{H}_l$、 C_{S0}、$\tau_0 \equiv \mathcal{H}_0 / C_{\mathrm{S0}}$。ここで $\mathcal{H}_0$・C_{S0} はそれぞれ、光球面（$y = 0$）での圧力スケール長・音速である。密度と圧力とは $y = 0$ での値 ρ_0、p_0 で無次元化する。また磁場については、磁気圧 $B^2/(8\pi)$ を圧力単位 p_0 で無次元化する。

5　初期条件と境界条件

初期状態は、x 方向は一様な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。まず温度分布を仮定する。

$$T(y) = T_0 - \left(a \left| \frac{dT}{dy} \right|_{\mathrm{ad}} \right) y \qquad \text{for } \ y < 0 \tag{12}$$

$$T(y) = T_0 + (T_{\mathrm{cor}} - T_0) \left[\frac{1}{2} \left\{ \tanh \left(\frac{y - y_{\mathrm{tr}}}{0.5 \mathcal{H}_0} \right) + 1 \right\} \right] \qquad \text{for } \ y \geq 0 \tag{13}$$

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。次に磁場の強度を決めるが、直接与えないでプラズマベータ

$$\beta(y) = \frac{8\pi \, p(y)}{B(y)^2} \tag{14}$$

の分布を与えることで間接的に決める。

$$\frac{1}{\beta(y)} = \frac{1}{\beta} \left[\frac{1}{2} \left\{ \tanh \left(\frac{z - z}{w} \right) + 1 \right\} \right] \left[\frac{1}{2} \left\{ - \tanh \left(\frac{z - z}{w} \right) + 1 \right\} \right], \tag{15}$$

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

$$\frac{d}{dy} \left\{ p(y) + \frac{B^2(y)}{8\pi} \right\} + \rho(y) g_y = 0., \tag{16}$$

を解いて初期分布とする。パラメータは、遷移層の高さ y_{tr}、コロナ温度 T_{cor}。

不安定性を誘起するために、初期に擾乱を与える。

$$V_z = A \ \cos \left(2\pi \frac{x - X_{\mathrm{max}}/2}{\lambda_p} \right), \tag{17}$$

境界条件は、すべて対称境界。

パラメータ	変数	無次元値
非熱比	γ	2.0
x 磁場	B_x/B_0	0.75
密度比	ρ_1/ρ_0	0.125
圧力比	p_1/p_0	0.1
負側 x 速度	$V_{x0}/C_{\mathrm{S}0}$	0
負側 y 速度	$V_{y0}/C_{\mathrm{S}0}$	0
負側 y 磁場	B_{y0}/B_0	1
正側 x 速度	$V_{x1}/C_{\mathrm{S}0}$	0
正側 y 速度	$V_{y1}/C_{\mathrm{S}0}$	0
正側 y 磁場	B_{y1}/B_0	-1
計算領域長	L	1
負側密度	ρ_0	1
負側圧力	p_0	1
負側音速	$C_{\mathrm{S}0}$	1

表 1: パラメータと無次元化単位

6 パラメータ

表 1 参照。

7 グリッド

グリッド点は $i \in [1,\ 1001]$。グリッド間隔は、0.001。