CANS1D モデルパッケージ mhdwind

MHDwind

ver. 1

1 はじめに

このモデルパッケージは MHD wind をシミュレーションするためのものである。ここで MHD wind とは磁場と回転の効果を含む天体風 (太陽／恒星風または降着円盤風) である。天体外層のコロナのガス圧が磁気圧よりずっと大きいときは熱圧風 (パーカー風) となり、磁気圧がガス圧よりずっと大きいときは磁場による力で加速された流れ (磁気遠心力風または磁気圧風) となる。流れが回転軸の方向に細くコリメートされると、ジェットと呼ばれる。いずれの場合でも、MHD wind/jet にともなう磁気トルクによる角運動量輸送は、天体の構造・進化に大きな影響を及ぼす。

１次元定常解の場合は Weber and Davis (1967) が初めてきちんと定式化し、解を求めた。１次元非定常シミュレーションで定常解を得る試みについては、Kudoh and Shibata (1997) が降着円盤から噴出するジェットの場合について、広範なパラメータサーベイを行なっている。(２次元定常解については Sakurai (1985) が初めてセルフコンシステントな数値解を得た。)

2 仮定と基礎方程式

仮定は以下のとおり。(1) 流れは軸対称、赤道面対称であると仮定して、1.5 次元の MHD 運動・エネルギー輸送を解く。(2) 非粘性・圧縮性流体として扱う。(3) 重力を考慮する。計算領域は $x \in [\,R, 11R\,]$ で、$x = R$ は星の表面、R は星の半径を表す。基礎方程式は

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V_x S) + \frac{\partial}{\partial x}\left[(\rho V_x^2 + p + \frac{B_y^2}{8\pi})S\right] = \rho\left[g_x + (V_y^2 - \frac{B_y^2}{4\pi\rho})\frac{1}{R}\frac{dR}{dx}\right]S + (p + \frac{B_y^2}{8\pi})\frac{dS}{dx} \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V_y R S) + \frac{\partial}{\partial x}\left[(\rho V_x V_y - \frac{B_x B_y}{4\pi})RS\right] = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{B_y S}{R}\right) - \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{E_z S}{R}\right) = 0 \tag{4}$$

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

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

$$B^2 = B_y^2, \quad V^2 = V_x^2 + V_y^2 \tag{7}$$

$R(x)$ は回転軸からの距離

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}、$\tau_0 \equiv \mathcal{H}_0/C_{S0}$。ここで $\mathcal{H}_0$、C_{S0} は $x = R$（星表面）での圧力スケール長 $\mathcal{H} \equiv p/(\rho g)$ と音速 $C_S \equiv \sqrt{\gamma p/\rho}$。密度と温度とは表面（$x = R$）での値 ρ_0、T_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。

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

$R < x < x_{\rm hs}$ では温度 $T_0 = 1 =$ 一定の等温コロナ (静水圧平衡) であり、$R > x_{\rm hs}$ では温度 $T_{ism} = 0.01$ の等温星間物質 (静水圧平衡にはない) とする。全空間で速度 $V_x = 0$ とする。コロナでは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している。星間物質のところは温度、密度 ($\rho_{ism} = 1.0 \times 10^{-8}$、圧力 (温度と圧力より状態方程式を用いて決まる) のすべてを一定とする。こうして得られた初期分布は、力学平衡状態にはなく、計算開始直後からショックチューブのような現象 (流れ) が発生し、時間とともに次第に定常解 (太陽風のパーカー解) に近付いていく。これからもわかるようにコロナと星間物質の初期の圧力差が太陽風が発生する直接の原因である。

境界条件は $x = 0$、$x = L$ とでともに

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

5　パラメータ

表 1 参照。

6　グリッド

グリッド点は $i \in [1,\ 1001]$。グリッド間隔は、すべて一様 $\Delta x = \Delta x_0 = 0.06\mathcal{H}_0$。

7　参考文献

Kudoh, T. and Shibata, K. 1997, ApJ 474, 362
Sakurai, T. 1985, A & A 151, 121
Weber, E. J. and Davis, L. Jr. 1967, ApJ 148, 217

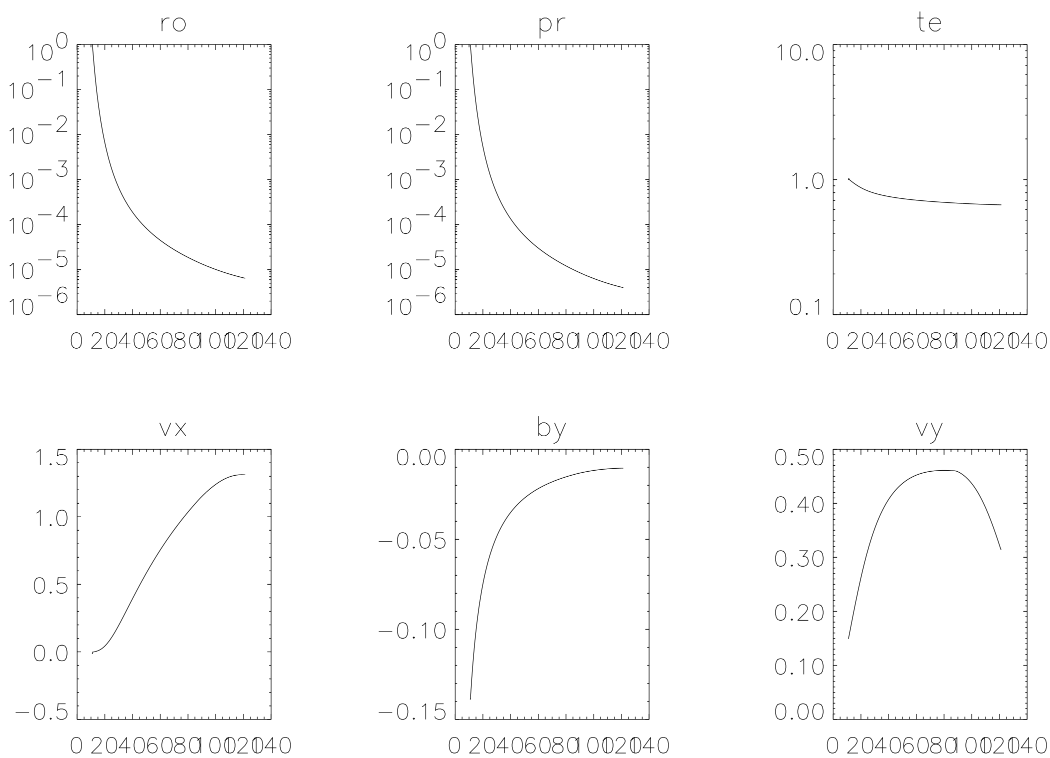

図 1: 結果の図

パラメータ	変数	無次元値	有次元値
星の半径	R	6	700,000 km
星コロナ温度	T_0	1	2×10^6 K
星コロナ密度	ρ_0	1	10^8 cm^{-3}
星コロナ圧力スケール長	$\mathcal{H}_0$	1	12000 km
星コロナ音速	C_{S0}	1	180 km/s
星コロナ音波横断時間	$\tau_0 \equiv \mathcal{H}_0/C_{\mathrm{S0}}$	1	300 s
星コロナ音波横断時間	$\tau_0 \equiv \mathcal{H}_0/C_{\mathrm{S0}}$	1	300 s
比熱比	γ	1.1	1.1
星表面重力	g_0	$1/\gamma$	270 m/s^2

表 1: パラメータと無次元化単位