

CANS1D モデルパッケージ md_wind

恒星風 (太陽風)

ver. 0

0.1 はじめに

このモデルパッケージは恒星風 (太陽風) をシミュレーションするためのものである。恒星風 (太陽風) は、コロナのガス圧によって生じる流れである。

0.2 仮定と基礎方程式

仮定は以下のとおり。(1) 流れは球対称であると仮定して、1次元の流体運動・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

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V_x S) + \frac{\partial}{\partial x}[(\rho V_x^2 + p)S] = \rho g S \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho V_x^2 \right) S \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} p + \frac{1}{2} \rho V_x^2 \right) V_x S \right] = \rho g V_x S \quad (3)$$

$$p = \frac{k_B}{m} \rho T \quad (4)$$

ここで、 $\gamma = 1.1$ は比熱比、 S は断面積、 g は重力加速度、 k_B は Boltzmann 定数、 m は 平均粒子質量、他の記号は通常の意味。断面積分布は

$$S = x^2 \quad (5)$$

重力は

$$g = g_0 \frac{R^2}{r^2} \quad (6)$$

g_0 は光球 ($x = R$) での重力。

0.3 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。

0.4 初期条件と境界条件

まず温度分布を仮定する。

$$T(z) = T_0 + (T_{\text{ism}} - T_0) \left[\frac{1}{2} \left\{ \tanh \left(\frac{x - x_{\text{hs}}}{0.5\mathcal{H}_0} \right) + 1 \right\} \right] \quad (7)$$

$R < x < x_{\text{hs}}$ では温度 $T_0 = 1$ = 一定の等温コロナ (静水圧平衡) であり、 $R > x_{\text{hs}}$ では温度 $T_{\text{ism}} = 0.01$ 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

$$\frac{dp}{dx} = \rho g \quad (8)$$

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 ($\rho_{\text{ism}} = 1.0 \times 10^{-8}$ 、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、力学平衡状態ではなく、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 $x = 0$ 、 $x = L$ とともに

$$\partial \rho / \partial x = 0, \quad \partial p / \partial x = 0, \quad V_x = 0 \quad (9)$$

0.5 パラメータ

表 1 参照。

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	$C_{\text{S}0}$	1	180 km/s
星コロナ音波横断時間	$\tau_0 \equiv \mathcal{H}_0 / C_{\text{S}0}$	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

0.6 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 $\Delta x = \Delta x_0 = 0.06\mathcal{H}_0$ 。

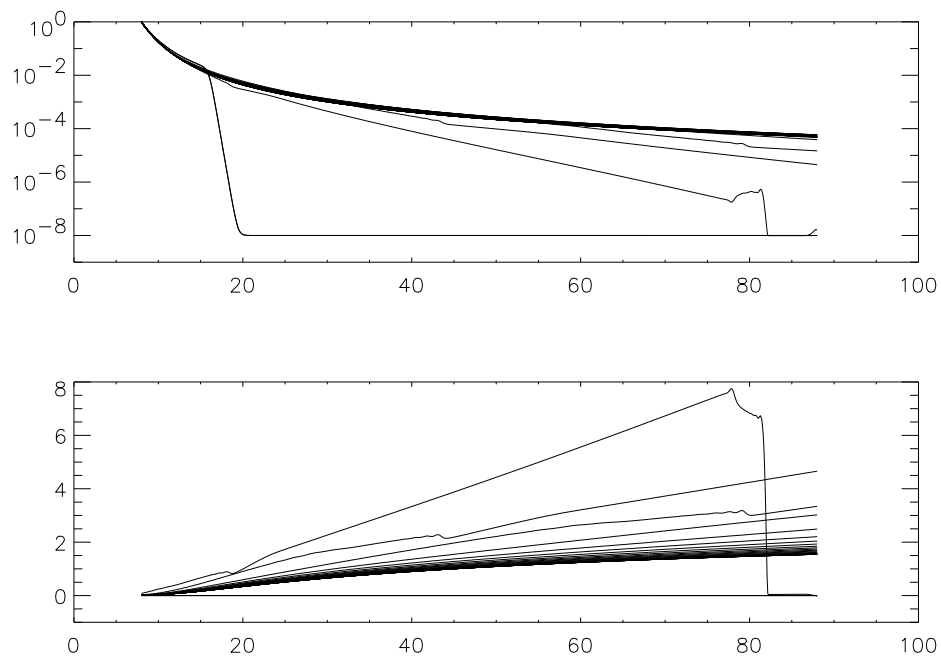


図 1: 密度・速度分布。この図は pldt.pro で作り、横軸 x に対する密度分布（上）と速度分布（下）を、時間が 10 増えるごとに重ねて表示している。初期条件で一様に仮定した星間物質の温度と速度が、時間が経つに連れ定常状態になっていくのが分かる。

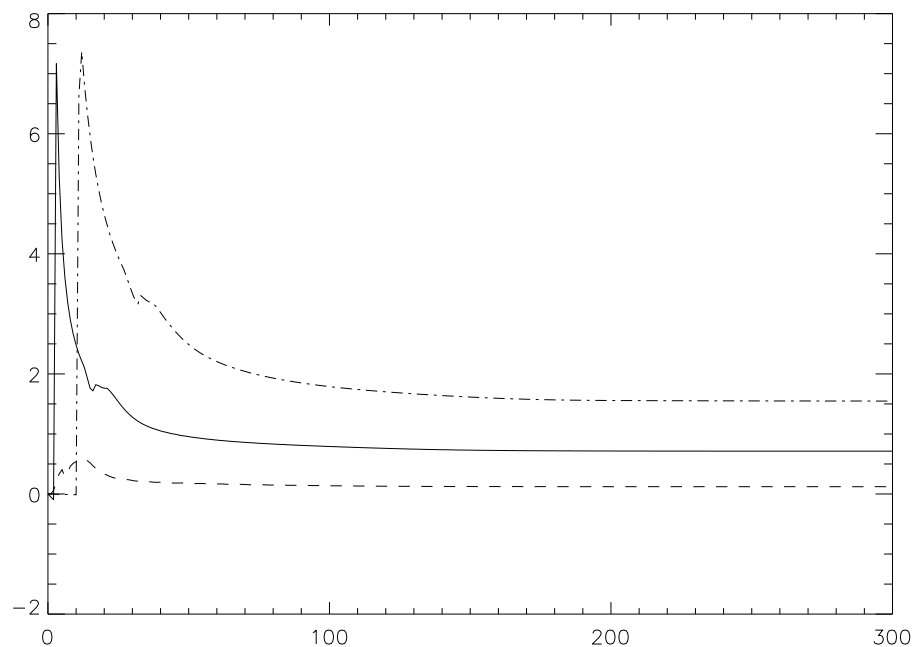


図 2: ある点での速度の時間変化。横軸は時間で縦軸は速度。この図は vel.pro で作り、実線・破線・半破線は、それぞれ $x = 32, 13.6, 88$ の点での速度の時間変化を示している。時間が経つにつれて定常状態になっていくのが分かる。