

太陽フレアループ

ver. 0

1 はじめに

このモデルパッケージは太陽フレアループをシミュレーションするためのものである。太陽フレアは、コロナ中で磁気エネルギーの解放によっておこる現象である。発生した熱・バルク運動エネルギーは磁気ループ中に閉じ込められ、そのなかでエネルギー再配分が行われたあとやがて冷却していく。磁気ループは、そのほとんどの部分が高温低密のコロナ中に存在するが、その足元では太陽表面の高温低温大気である彩層とつながっている。コロナでフレアにより発生したエネルギーが彩層に伝わると、温度・圧力の急増をおこし、その圧力勾配により高密度プラズマのコロナへの上昇流が発生する。その結果フレアループは高密度プラズマで満たされ、その熱制動で軟 X 線を放射するのである。このようなプラズマ上昇運動は「彩層蒸発」と呼ばれて、X 線輝線の青色偏移として観測されてきた。本コードでは、エネルギー発生後のフレアループ中でおこるエネルギー再配分過程をシミュレートすることを目的としている。磁気ループは「硬い」としてその形状は変化せず、したがって磁氣的過程は無視する。ループに沿った 1 次元流体的な運動・熱過程のみ着目する。

2 仮定と基礎方程式

仮定は以下のとおり。(1) 磁気ループは「硬い」と仮定して、それに沿った 1 次元の流体運動・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・放射冷却を考慮にいれる。(4) 重力を考慮する。(5) フレアはソース項としてエネルギー方程式に加える。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

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

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

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

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

ここで、 $\gamma = 5/3$ は比熱比、 S は断面積、 g は重力加速度、 H は静的加熱、 R は放射冷却、 H_f はフレア加熱項、 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

$$S = S_0 = \text{constant} \quad (5)$$

重力は

$$g = g_0 \cos[(\pi/2)x/L] \quad (6)$$

g_0 は光球 ($x = 0$) での重力。熱伝導係数は、Spitzer モデルを採用し

$$\kappa = \kappa_0 T^{\frac{5}{2}} \quad (7)$$

ここで κ_0 は物性で決まる定数。静的加熱・放射冷却は第 tbd 節参照。フレア加熱は第 tbd 節参照。

3 放射冷却項・静的加熱項

エネルギー方程式の、放射冷却項 R と静的加熱項 H について記述する。光学的に薄い放射による冷却項は、密度・温度の関数として次のように表される。

$$R = \rho^2 \cdot \Lambda(T) \quad (8)$$

密度が高くなって、光学的に厚くなると、冷却が効きにくくなる効果を入れるため、次のように近似する。

$$R = \rho^2 \cdot \Lambda_\rho(\rho) \cdot \Lambda(T) \quad (9)$$

冷却関数 $\Lambda(T)$ は複雑な関数であるがここでは、次のような代数関数で近似する。

$$\Lambda(T) \approx \Lambda_0 \cdot 10^{\Theta(T)} \quad (10)$$

$$\theta \equiv \log_{10}(T/T_{\text{cl}}) \quad (11)$$

$$\Theta(\theta) = 0.4\theta - 3 + 3 \times \frac{2}{\exp[1.5(\theta + 0.08)] + \exp[-2(\theta + 0.08)]} \quad (12)$$

第 1 項はおもに熱制動放射の効果、第 3 項は紫外線から X 線域での輝線放射の効果である。この関数は $\theta = 0$ つまり $T = T_{\text{cl}}$ 付近で輝線効果が極大になり、そこでの値が $\Theta = 0$ つまり $\Lambda = \Lambda_0$ となる。 Λ_0 と T_{cl} とは物性・大気組成・電離度などから決まり $\Lambda_0 = 8 \times 10^{-22}$ cgs、 $T_{\text{cl}} = 2 \times 10^5$ K。光学的に厚くなったときの効果は

$$\Lambda_\rho(\rho) = (\rho_{\text{cl}}/\rho) \tanh(\rho/\rho_{\text{cl}}) \quad (13)$$

この関数は、 $\rho/\rho_{\text{cl}} \ll 1$ のとき $\Lambda_\rho \approx 1$ で、 $\rho/\rho_{\text{cl}} \gg 1$ のとき $\Lambda_\rho \approx \rho_{\text{cl}}/\rho$ となる。いま $\rho_{\text{cl}} = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ と仮定している。静的加熱項は

$$H = \rho h(x) \quad (14)$$

で仮定する。加熱と冷却とが初期につりあっているとして $h(x)$ を求める。

$$h(x) = R/\rho \quad \text{at } t = 0 \quad (15)$$

4 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 $x = 0$ (光球) での圧力スケール長 $\mathcal{H} \equiv p/(\rho g)$ と音速 $C_S \equiv \sqrt{\gamma p/\rho}$ 。密度と温度とは光球面 ($x = 0$) での値 ρ_0 、 T_0 で無次元化する。

5 フレア加熱

フレア加熱は次のような、時間と空間との関数として与える。

$$H_f = H_{f0} \cdot q(t) \cdot f(x) \quad (16)$$

$$q(t) = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \tanh \frac{t}{0.1\tau_0} \right\} \left\{ 1 - \tanh \left(\frac{t - \tau_f}{0.1\tau_0} \right) \right\} \quad (17)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - L)^2}{2w_f^2} \right] \cdot \frac{1}{2} \left\{ 1 + \tanh \left(\frac{x - 20H_0}{3H_0} \right) \right\} \quad (18)$$

この式の最後の $1/2\{1 + \dots\}$ の部分は、フレア加熱が直接彩層以下に注入するのを防ぐための措置である。パラメータは、注入エネルギー H_{f0} 、注入時間 τ_f 、加熱範囲 w_f 。

6 初期条件と境界条件

まず温度分布を仮定する。

$$T(z) = T_0 + (T_{\text{cor}} - T_0) \left[\frac{1}{2} \left\{ \tanh \left(\frac{x - x_{\text{tr}}}{0.5H_0} \right) + 1 \right\} \right] \quad (19)$$

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

$$\frac{dp}{dx} = \rho g \quad (20)$$

を解いて初期分布とする。こうして得られた初期分布は、力学平衡状態ではあるが、エネルギー平衡状態ではないので、計算開始直後から遷移領域で、熱伝導による温度拡散がおこる。しかしフレア加熱のほうかはるかに大きな値なので実際の結果には大きく影響しない。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 $x = 0$ 、 $x = L$ とともに

$$\partial\rho/\partial x = 0, \quad \partial p/\partial x = 0, \quad V_x = 0 \quad (21)$$

7 パラメータ

表 1 参照。

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 ($x < 1.3x_{\text{tr}}$) まで一様 $\Delta x = \Delta x_0 = 0.01H_0$ 、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 $\Delta x \leq 0.5H_0$ で最大値を抑えている。

パラメータ	変数	無次元値	有次元値
ループ半長	L	130	26000 km
遷移層高さ	x_{tr}	12.5	2500 km
コロナ温度	T_{cor}	200	2 MK
フレア加熱	H_{f0}	5×10^{-4}	$3 \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$
フレア範囲	w_{f}	30	6000 km
フレア時間	τ_{f}	12	240 s
熱伝導強度	κ_0	3×10^{-11}	10^{-6} cgs
冷却強度	Λ_0	10^9	$8 \times 10^{-22} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^3$
冷却基準温度	T_{cl}	20	$2 \times 10^5 \text{ K}$
冷却臨界密度	n_{cl}	10^{-5}	10^{12} cm^{-3}
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	$\tau_0 \equiv \mathcal{H}_0/C_{\text{S0}}$	1	20 s
光球重力	g_0	$1/\gamma$	270 m/s^2
熱伝導時間	$\tau_{\kappa} \propto \rho_0 \mathcal{H}^2 / (\kappa_0 T_0^{5/2})$	3×10^{10}	
冷却時間	$\tau_{\Lambda} \propto T_{\text{cl}} / (\rho_0 \Lambda_0)$	2×10^{-8}	

表 1: パラメータと無次元化単位