

低質量銀河における星間ガスの ダイナミクス

M2 結城文香

2015年10月31日

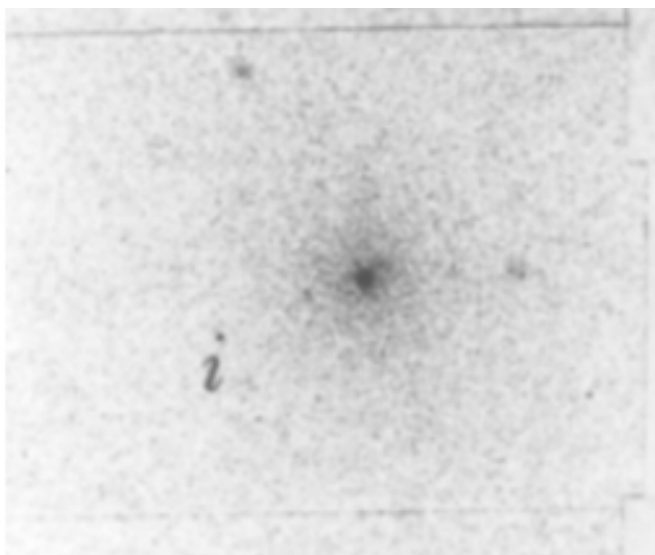
天体形成研究会

概要

- 矮小楕円銀河中心での星形成の影響
をうけた星間ガスのダイナミクスを流体シミュレーションにより調べたい。
- 流体シミュレーションは**DMH**ポテンシャル
や星の重力場の下で、放射冷却や星からの加熱
を入れたものを行う。
- 今回の研究では1次元球対称の**Godunov**スキーム
を作成し、放射冷却を入れた。
- 今回の発表では作成したスキームのテスト計算
について報告する。

背景(nucleated dEs)

■ virgo clusterには銀河中心の表面輝度が周囲より高くなっているdEsが存在する。



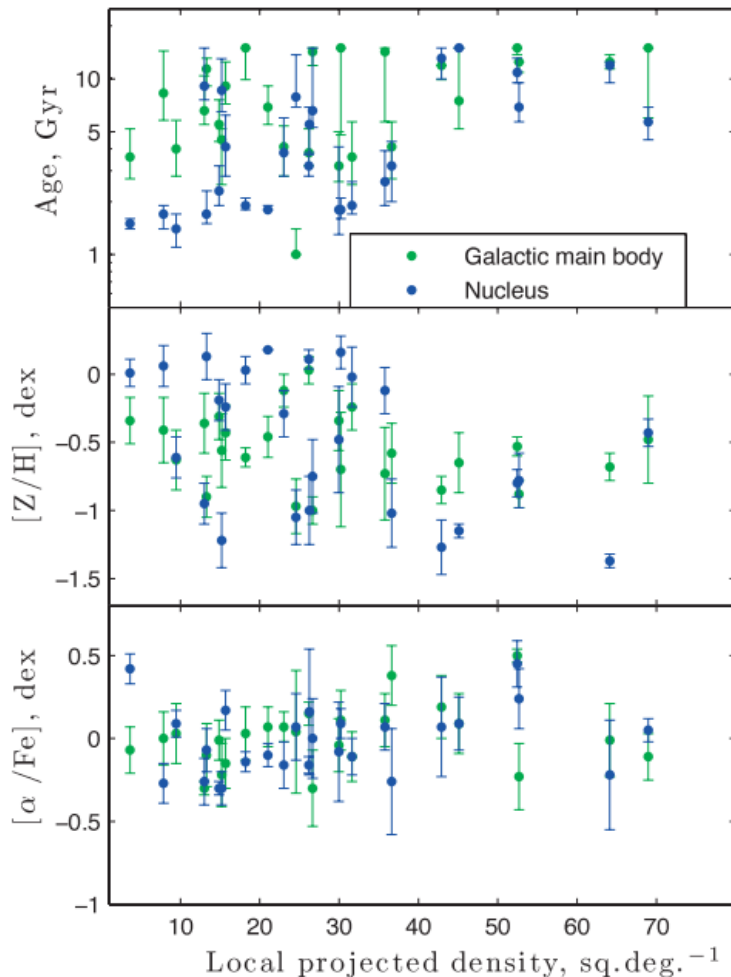
■ このようなdEsを核を持ったdEsという。

■ 核の形成過程にはいくつかのシナリオが提案されている。

(Binggeli,1994a)

背景(Paudel, Lisker and Kuntshner ,2011)

■ Paudel, Lisker & Kuntshner (2011)は観測により、中心核部分の年齢や金属量、 $[\alpha/Fe]$ の存在比を得た。



■ Local projected densityの低い領域では、よりNucleusの方が若い。

■ 中心核部分の星は、その周りの部分に存在する星より若く metal richである。

Paudel, Lisker & Kuntshner (2011)は中心核の形成シナリオとして、以下の3つを挙げている。

Van den Bergh(1996):

中心核は非常にゆっくり回転している銀河の中心に落ち込んできたガスによって星形成が起こり形成された。

Silk, Wyse & Shields, (1987) ; Babul & Rees (1992):

dEsの形成初期に銀河外に吹き飛ばされたが、周囲の星間物質に押されて降着してきたガスによって星形成が起こり形成された。

Oh & Lin (2000):

dEsの中心に球状星団が落ち込んでいくことにより形成された。

修士論文では以下に述べるような、これらとは違う形成シナリオを考えられないかを流体シミュレーションを使って検証する。

- dEsの形成期に一回ガスが全部吹き飛ばされて、帰ってこないと考える。
- 全部ガスがなくなった後、main bodyで恒星風やIa型超新星からFeを多く含むようなガスが供給される。
- 供給されたガスが中心に落ちていって星形成をする。

計算の話

- Godunov法
- 一次元球対称($S=0$)
- テスト計算(sedov解)
- 重力入り
- テスト計算(遷音速解)
- 放射冷却
- テスト計算
- 今後の予定

Godunov法

1次元のEuler方程式は以下のようにまとめて書ける。

$$\frac{dq}{dt} + \frac{dE}{dx} = S$$

$$q = (\rho v, \rho v e), \quad E = (\rho v, \rho v^2/2 + p(e + p)/\rho)$$

$$S = (M^*, \rho g p v g + G - \Lambda)$$

v : 速度

ρ : 密度

p : 圧力, γ : 比熱比
 e : 単位体積当たりの全エネルギー

M^* : 単位時間、単位体積あたりの質量流入

g : 単位質量あたりに働く外力

G : 単位時間、単位体積あたりの加熱

Λ : 単位時間、単位体積あたりの冷却

q : 状態量
流束

E :

この方程式を有限体積法を使い差分形に書き換えると、以下のように書ける。

$$q_{j+1/2}^{n+1} = q_{j+1/2}^n - \Delta t / \Delta x \{ E_{j+1/2}^n - E_{j-1/2}^n \} + \Delta t \cdot S$$

Godunov法では数値流束 $E_{j+1/2}^n, E_{j-1/2}^n$ をRiemann初期値問題の解析解で与え

■ Godunov法で書いたコードをMUSCL法を用いて空間二次精度にした。

1次元球対称(S=0)

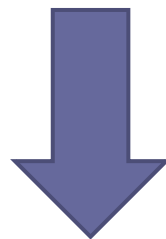
■ 1次元球対称へのコードの書き換え

1次元球対称の場合のEuler方程式より、有限体積法に基づいた差分スキームが得られる。

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{x^2} \frac{dE}{dx} = 0 \quad @2p/x@0$$

$$q = (\rho v e), E = (x^2 (\rho v^2 + p) x^2 [(e+p)v])$$

v : 速度
 ρ : 密度
 p : 圧力, γ : 比熱比
 e : 単位体積当たりの全エネルギー

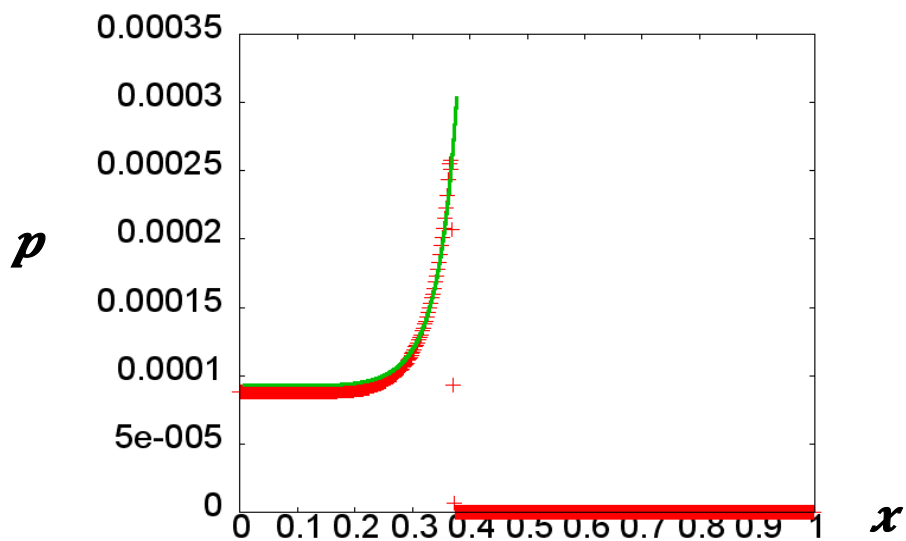
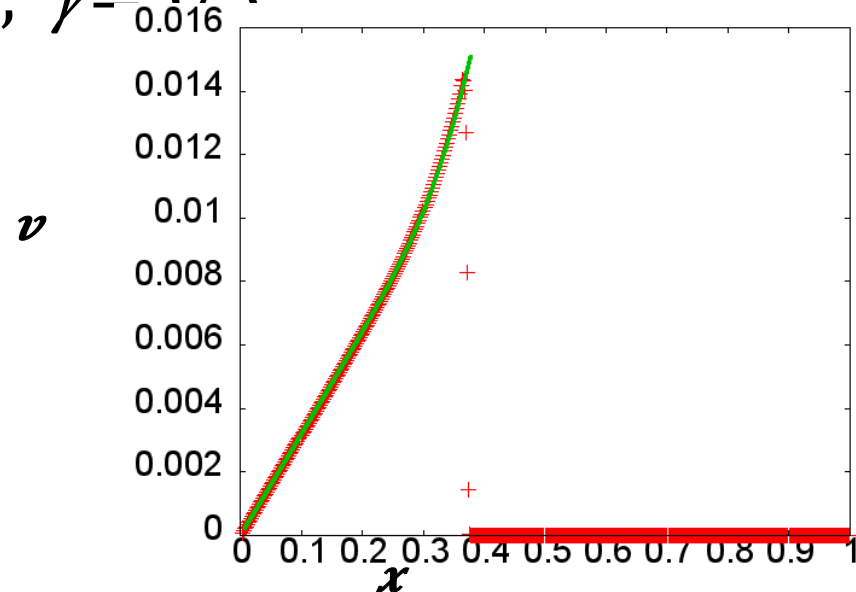
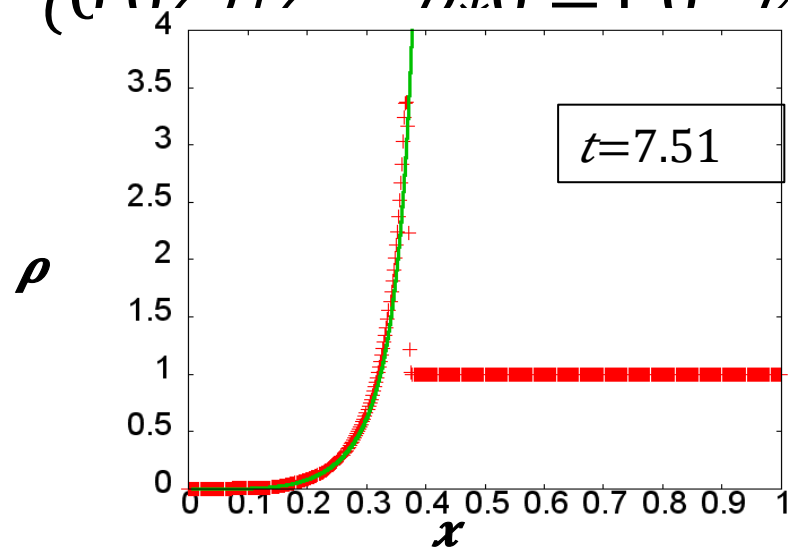


$$q_{j,n+1} = q_{j,n} - \Delta t / \Delta x \{ x_{j+1/2}^2 / x_{j,n}^2 E_{j,n} + 1/2 \uparrow n - x_{j-1/2}^2 / x_{j,n}^2 E_{j-1/2} \uparrow n \} + 1 / \Delta x S_{j,n}, S_{j,n} = (0.5 p_{j,n} / x_{j,n}^2)$$

テスト計算 (sedov解)

初期条件 : $p|_0 = 10^{1-10} + (1 - 10^{1-10})e^{1-x^2} /$

$(0.02)^{1/2} \quad \rho|_0 = 1.0 \quad v|_0 = 0, \quad \gamma = 5/3$



黄緑 : 解析解
赤 : 計算結果

1 次元球対称(外力入り)

■外力 g を持つ場合を考えると、
球対称 1 次元のeuler方程式は以下のように書ける。

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{x^2} \frac{dE}{dx} = \left(\frac{0}{x^2} - \rho g \right)$$

$$q = (\rho v), E = \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + p \right)$$

■外力 g として点源質量からの重力を考えると、

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{x^2} \frac{dE}{dx} = \left(\frac{0}{x^2} - \rho \frac{GM_*}{x^2} \right)$$

G :万有引力定数
 M_* :点源質量

テスト問題(太陽風の遷音速解)

■ 初期条件として定常解である太陽風の遷音速解を考え、時間的に解が変化しないかを確認する。

■ 内側の境界を太陽表面と考え、

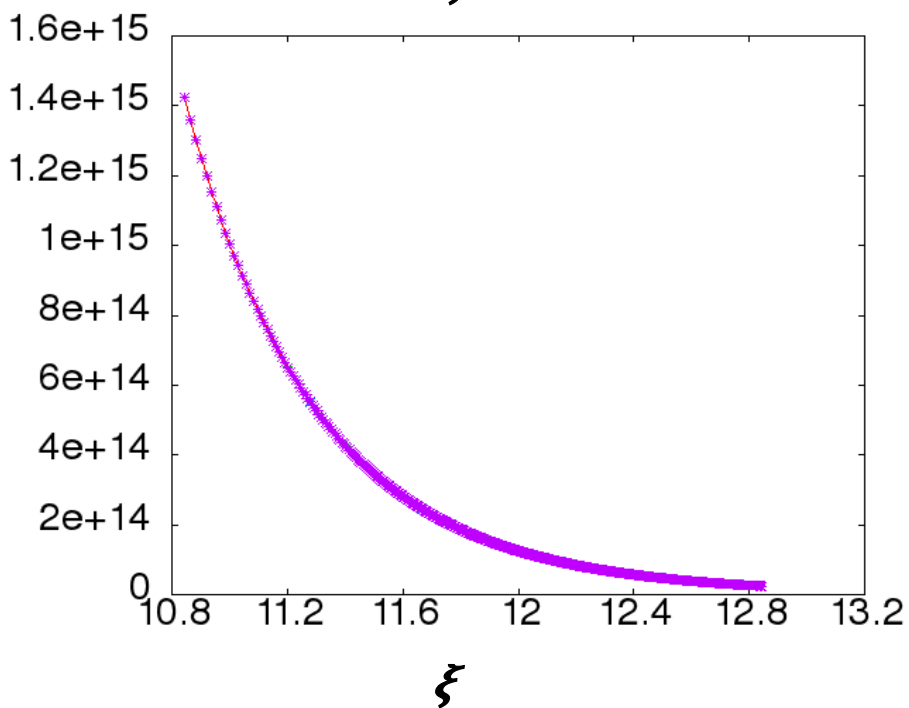
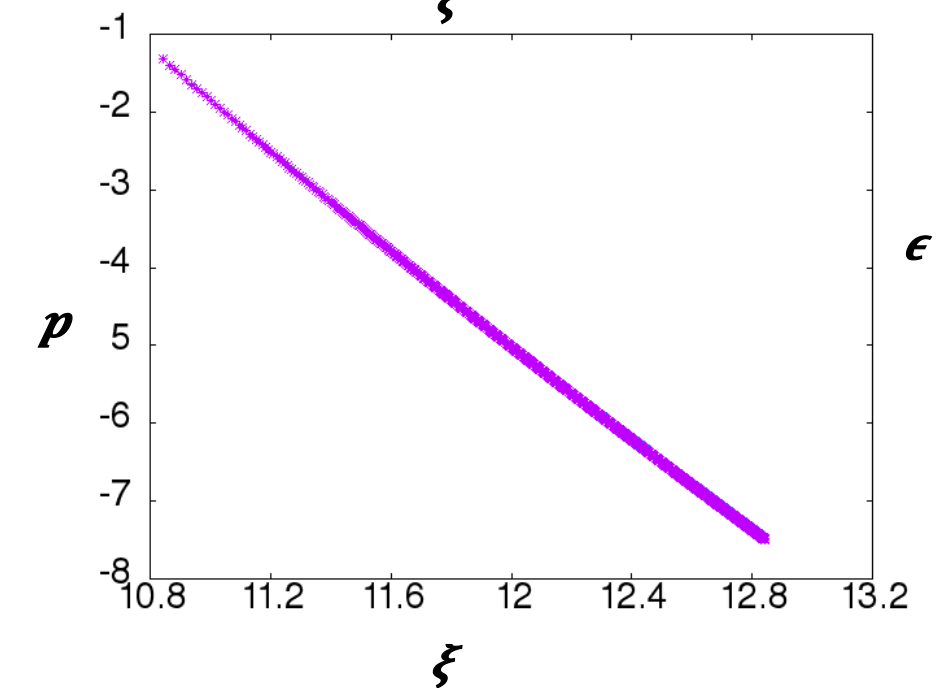
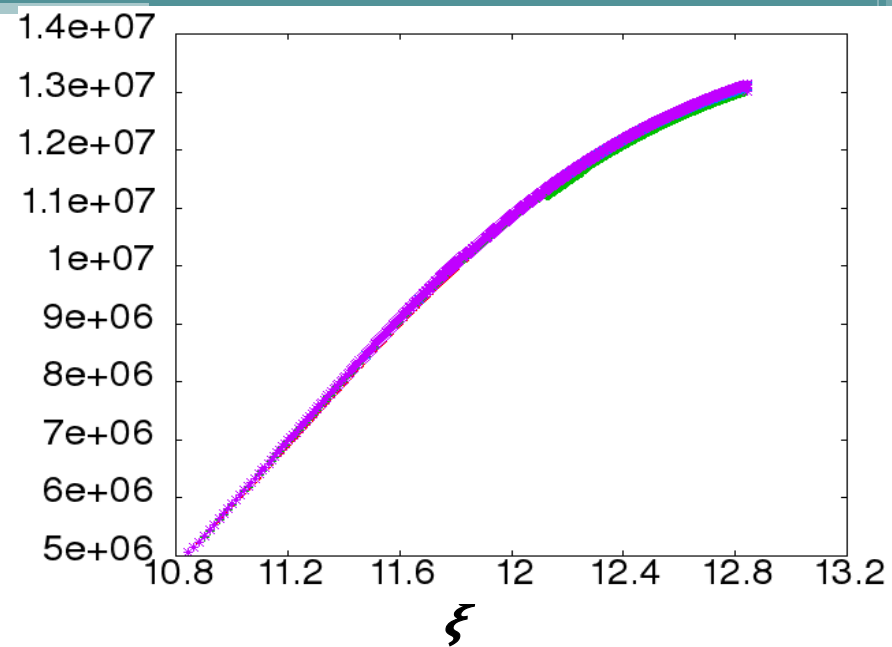
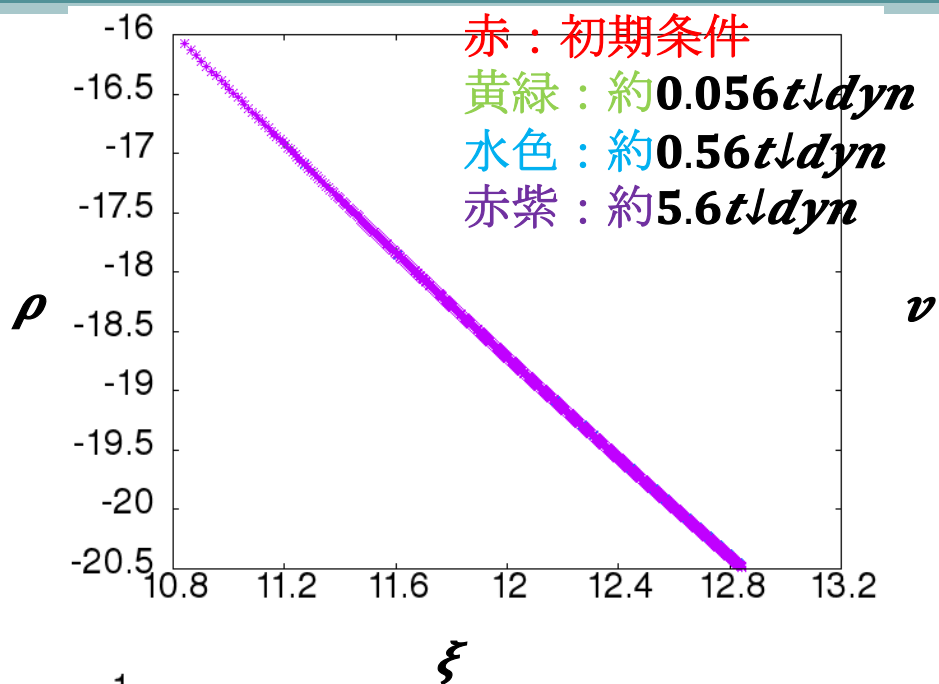
$$x_{\text{lin}} = 6.96 \times 10^{10} [\text{cm}], n^* = 1.0 \times 10^{18} [1/\text{cm}^3], \mu = 0.5, \gamma = 1.4$$

とし、遷音速点の位置 x_c を与えた場合の遷音速解を理論式から作成した。

■ $1R_{\text{sun}}$ から $50R_{\text{sun}}$ まで計算した。

■ 境界条件として、ゴーストメッシュを初期条件で上書きするとした。

結果



放射冷却

■放射冷却を計算に取り入れる。

■放射冷却は1次元球対称の場合、euler方程式に以下のような形で入る。

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial(e+p)}{\partial r} v + 2(e+p)/r v = -n \sigma_H T^2 \Lambda(T)$$

$n \sigma_H T^2 \Lambda(T)$:放射冷却率

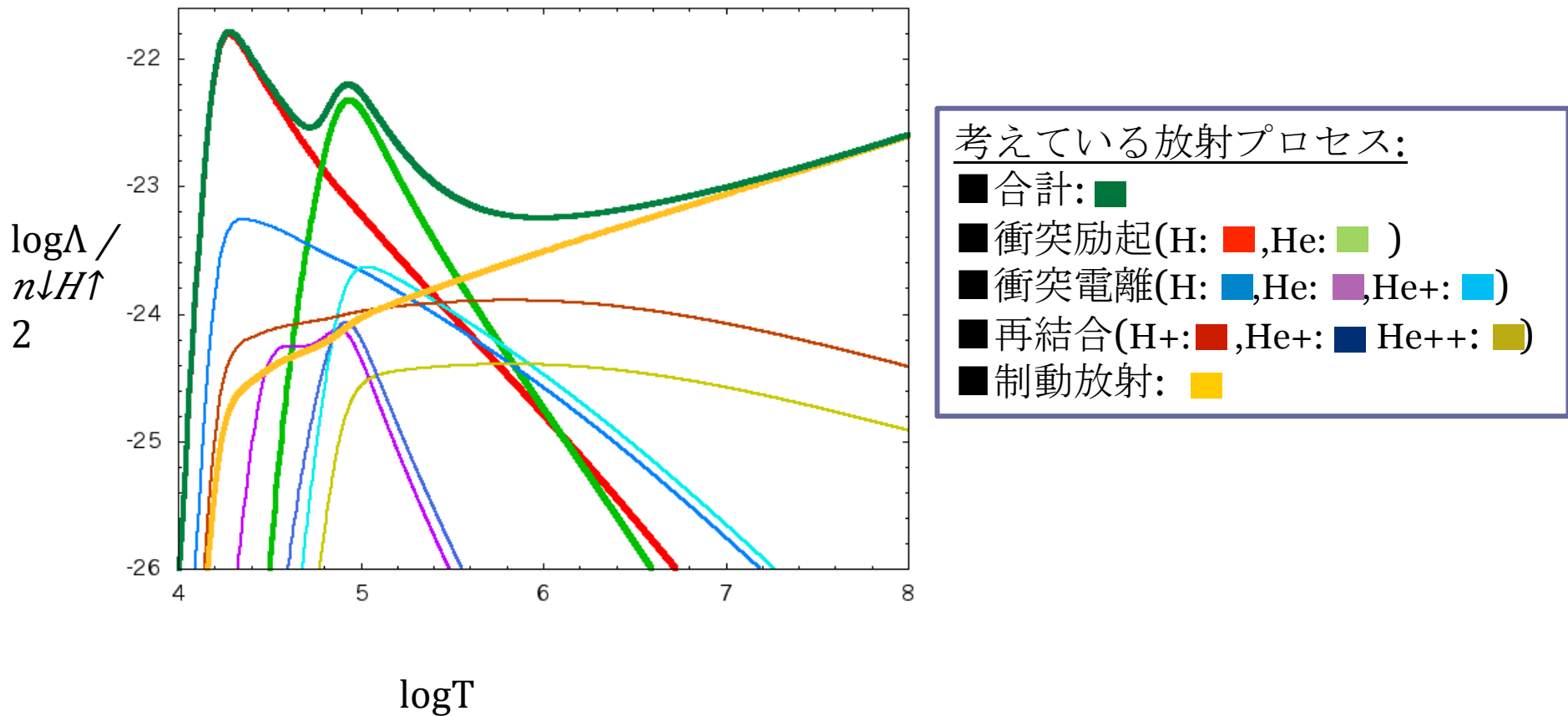
■星間ガスが冷却される時間は放射冷却率を用いて、

$$t_{cool} = \gamma/(\gamma-1) \cdot p/n \sigma_H T^2 \Lambda(T)$$

と書くことが出来る。

放射冷却率

- 今研究では、Black(1981) を参考に放射冷却率を計算した。
- 衝突電離平衡を仮定し、ガスは光学的に薄く、背景放射のない場合を計算した。



放射冷却を入れたテスト計算（冷却が効かない場合）

- テスト計算として太陽風の遷音速解の安定性をみる計算に放射冷却を入れて計算した。

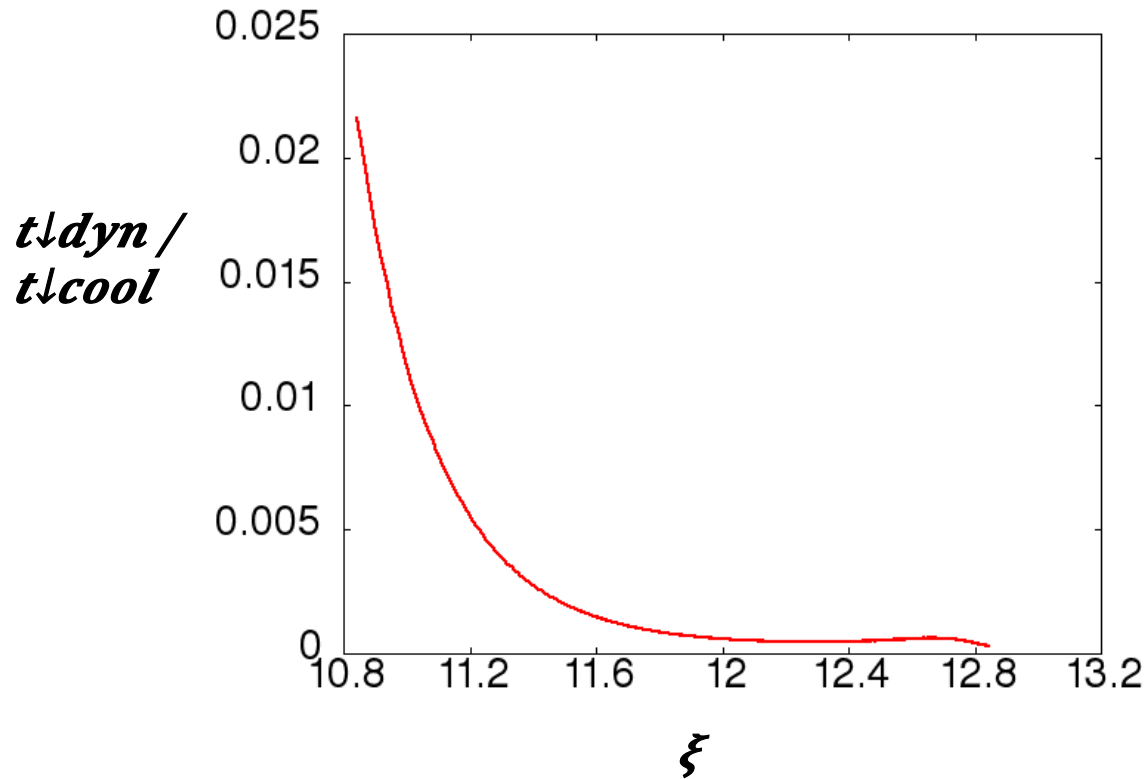
内側の境界を太陽表面と考え、

$x_{in} = 6.96 \times 10^{10} [cm]$, $n^* = 1.0 \times 10^{18} [1/cm^3]$, $\mu = 0.588235294$, $\gamma = 1.4$
とし、遷音速点の位置 x_c を与えた場合の遷音速解を理論式から作成した。

- $1R_{sun}$ から $50R_{sun}$ まで計算した。

- 境界条件として、ゴーストメッシュを初期条件で上書きするとした。

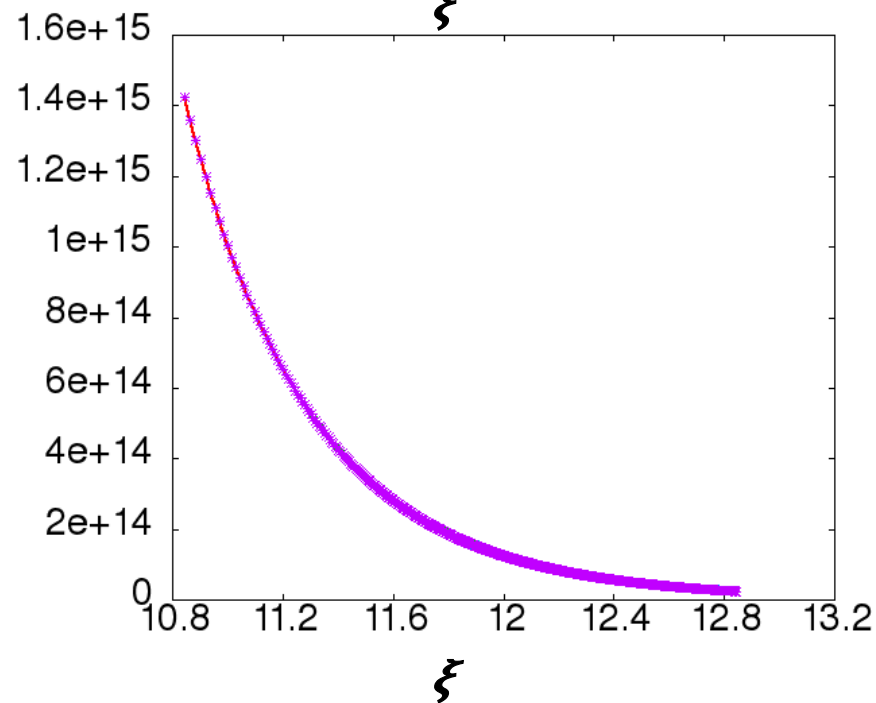
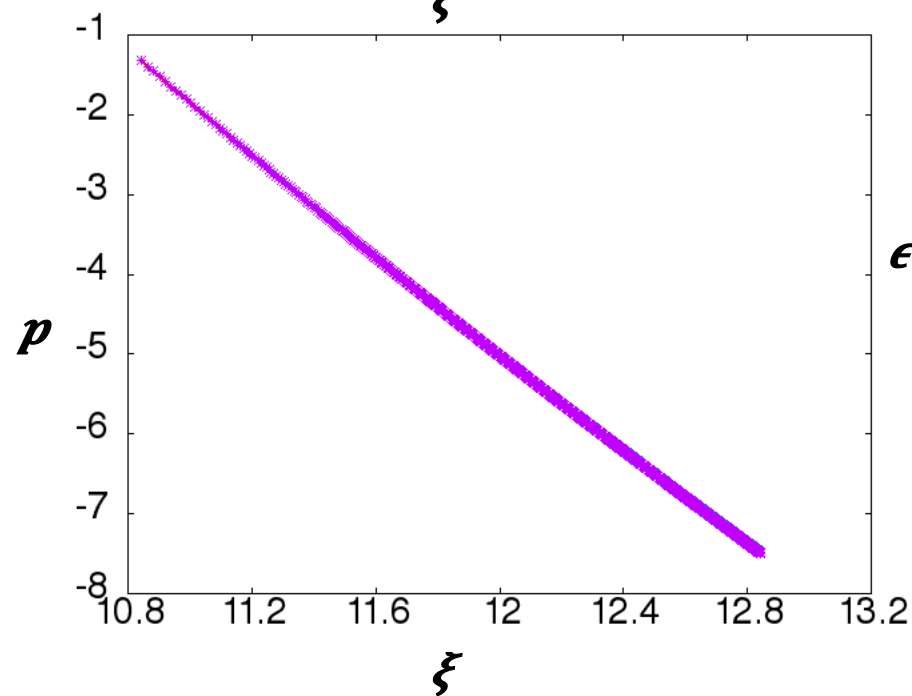
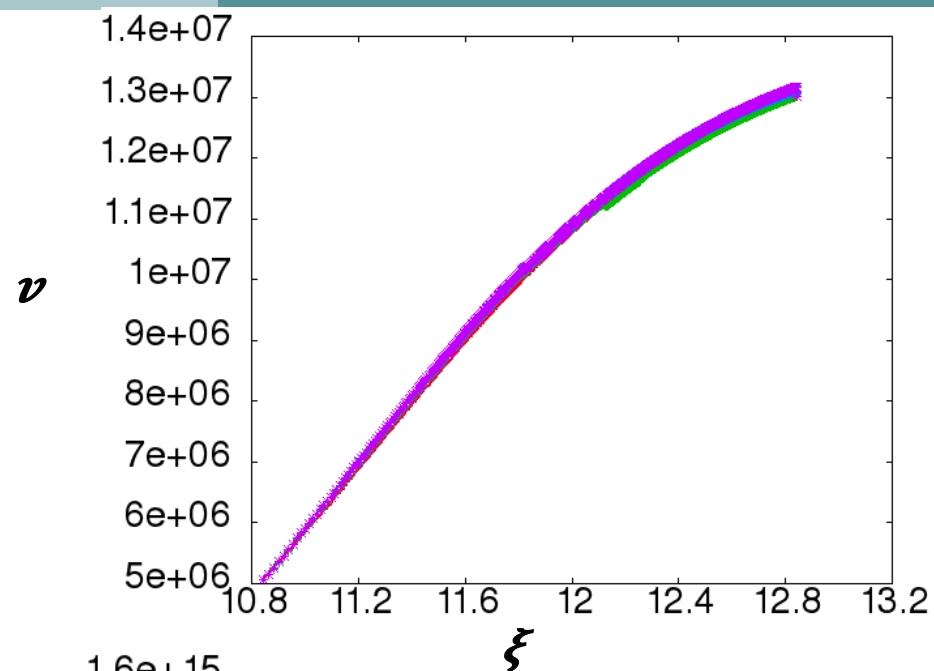
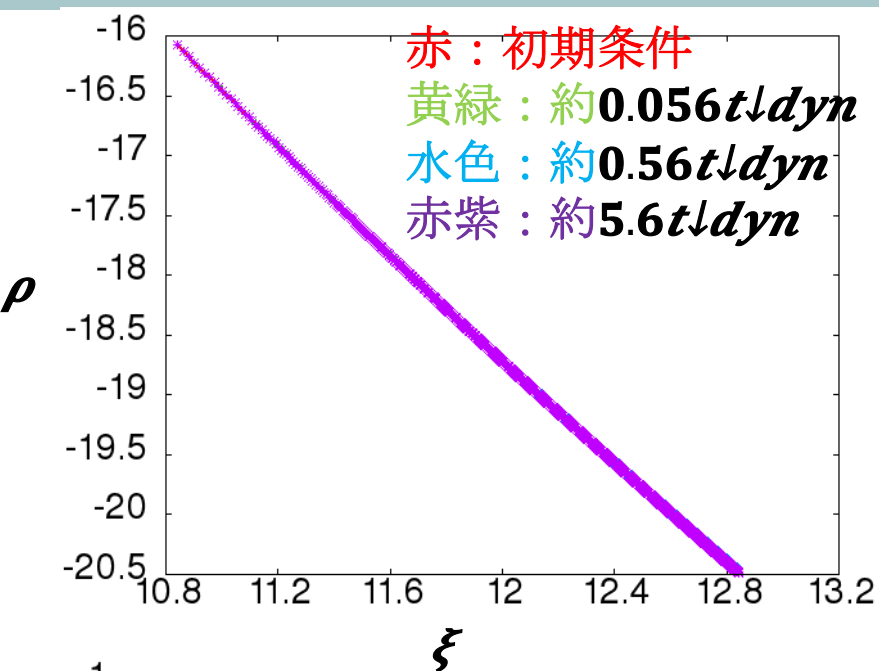
冷却時間の見積もり



$$t_{cool} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{p}{n} \frac{1}{H^2 \Lambda(T)}$$

➡ $t_{dyn} / t_{cool} \ll 1$ であるから、この計算では冷却が効かないはずである。

結果



今後の予定

- 冷却が効く場合のテスト計算を行う
- Ia型超新星爆発による加熱を導入する。
- 中心付近での星形成およびII型超新星爆発による加熱を導入する。

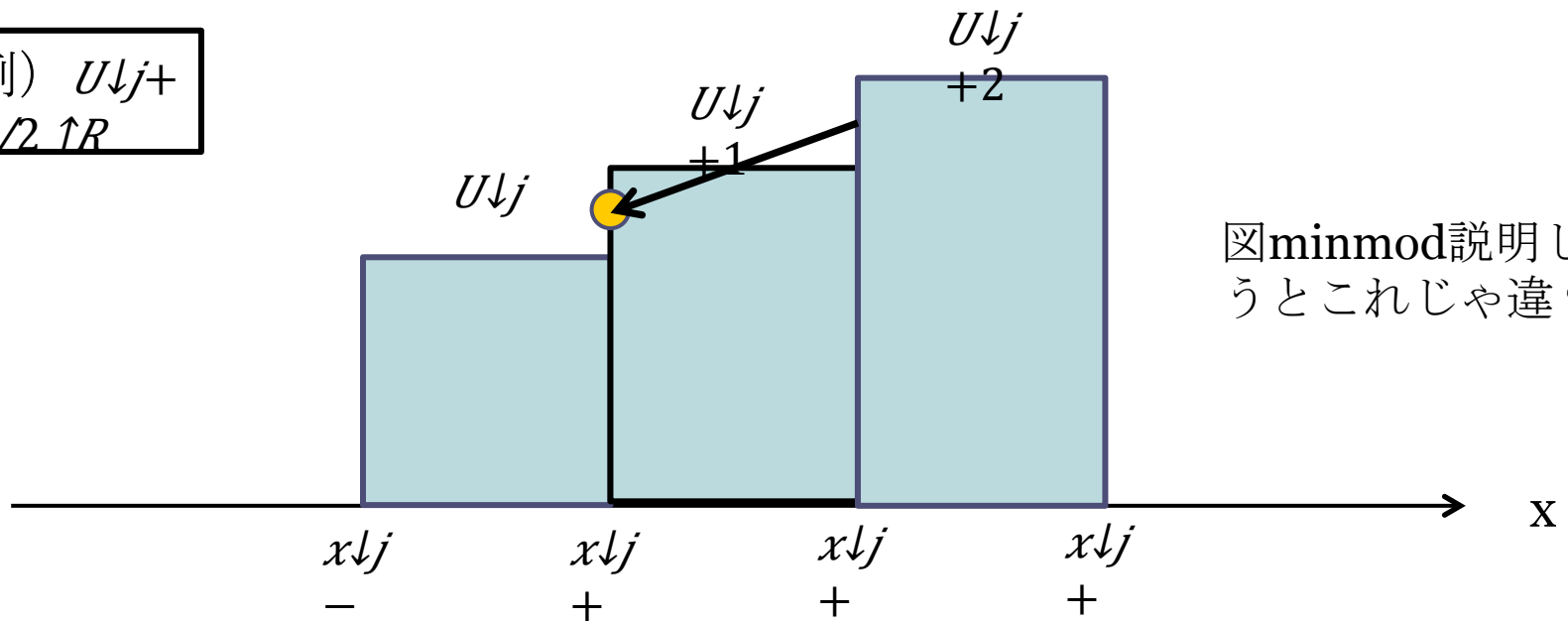
2 次精度化(MUSCL法)

境界上の物理量 U を以下のように 2 点で内挿して与える。

$$U_{j+1/2}^R = U_{j+1} - 0.5 * (U_{j+2} - U_{j+1})$$

$$U_{j+1/2}^L = U_j + 0.5 * (U_j - U_{j-1})$$

例) $U_{j+1/2}^R$



実際には内挿によって不連続面などで極大が生じないようにminmod制限関数を用いて以下のように与える。

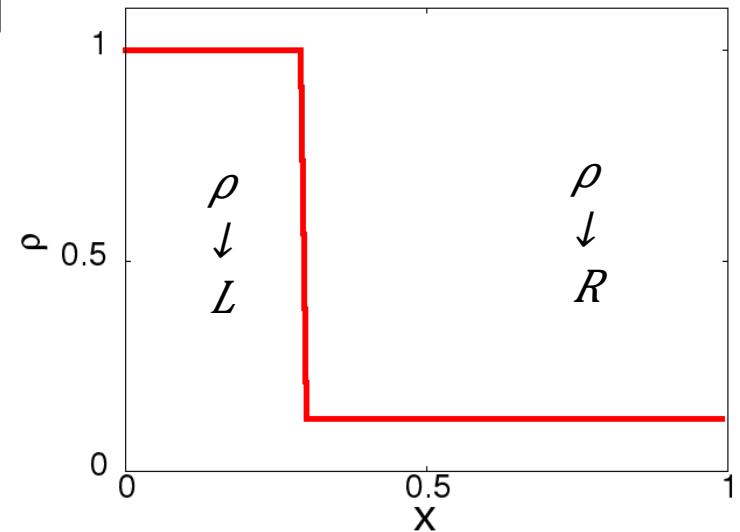
$$U_{j+1/2}^R = U_{j+1} - 0.5 * \minmod(U_{j+2} - U_{j+1}, U_{j+1} - U_j)$$
$$U_{j+1/2}^L = U_j + 0.5 * \minmod(U_j - U_{j-1}, U_{j+1} - U_j)$$

minmod関数を用いることにより
不連続面などでは1次精度に落として計算できる
ため、安定に計算できる。

テスト計算

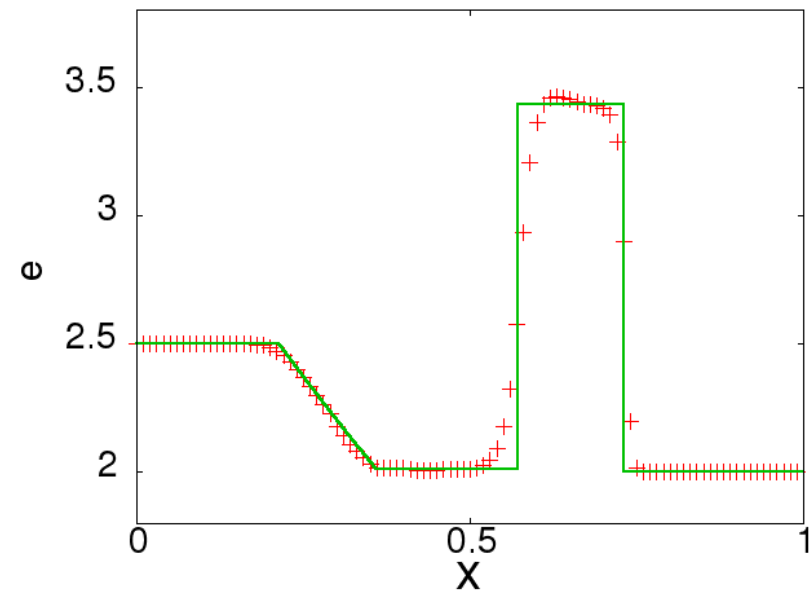
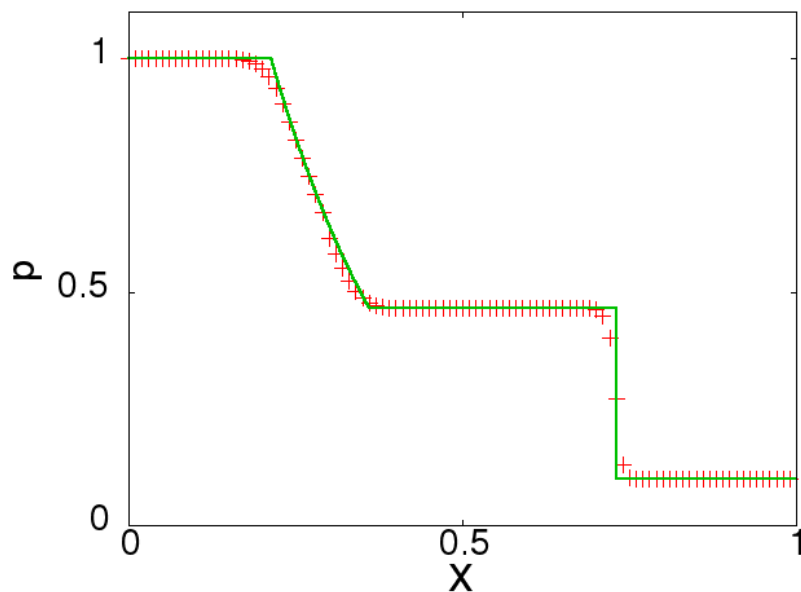
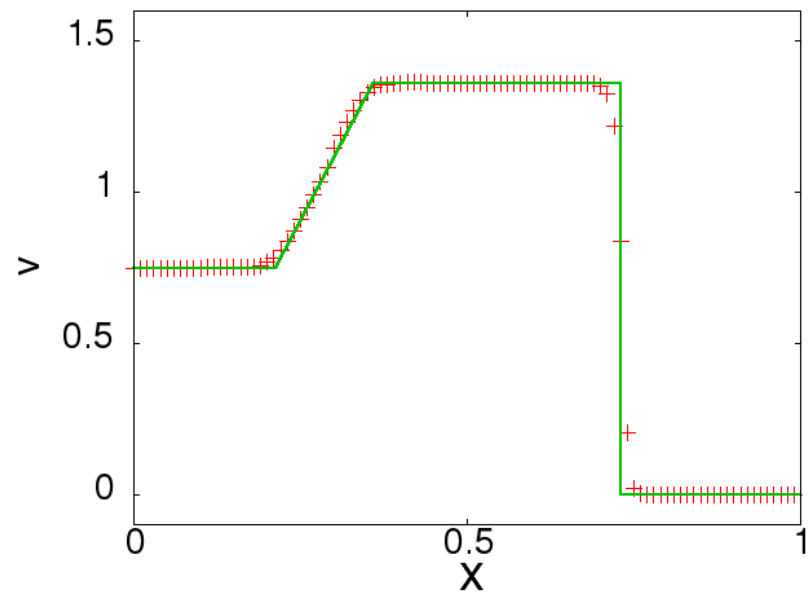
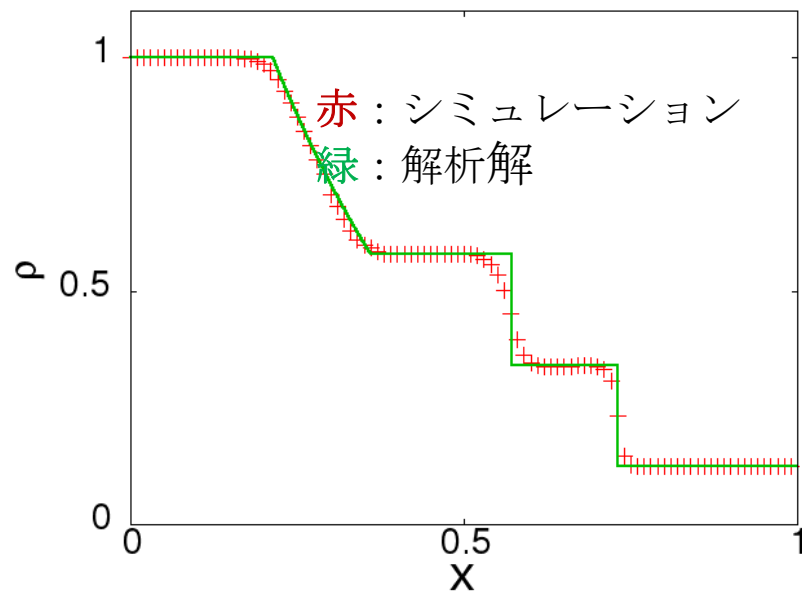
例) Test1の ρ

テスト計算として、以下の5つのRiemann初期値問題を計算した。

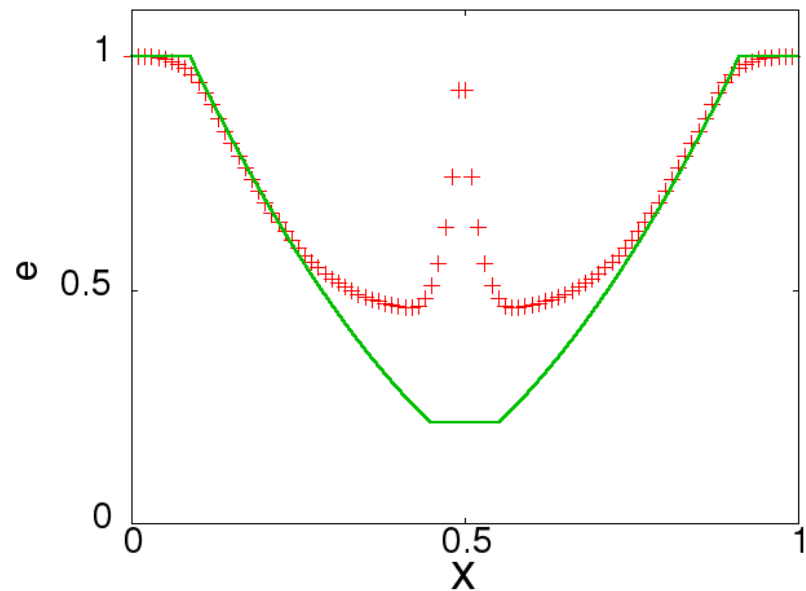
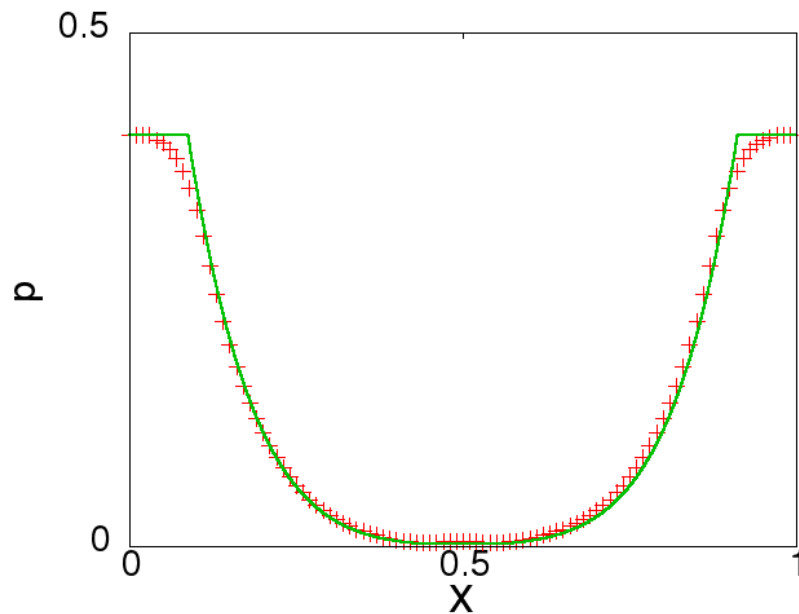
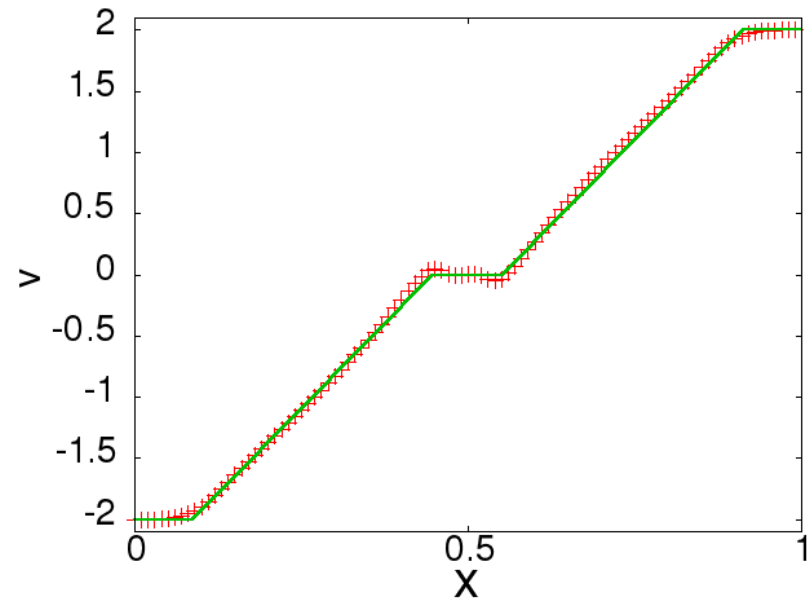
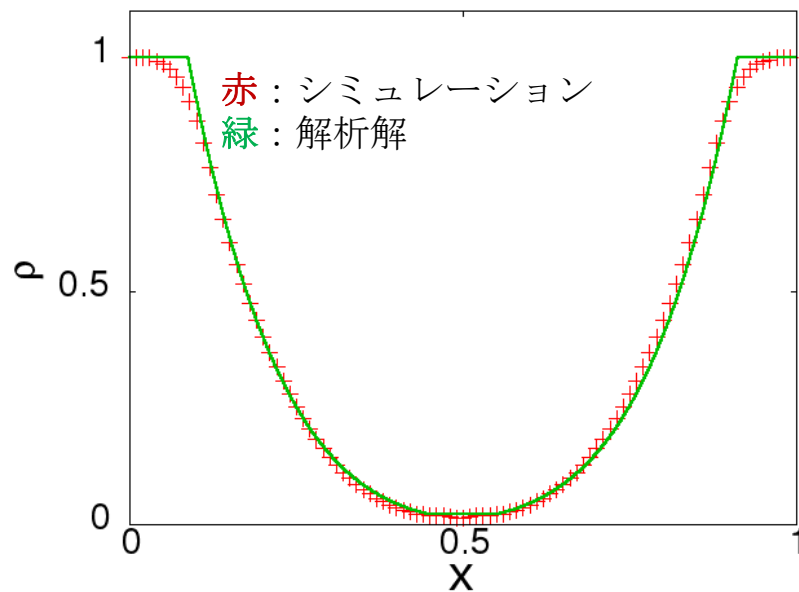


Test	$\rho \downarrow L$	$v \downarrow L$	$p \downarrow L$	$\rho \downarrow R$	$v \downarrow R$	$p \downarrow R$
Test1	1.0	0.75	1.0	0.125	0.0	0.1
Test2	1.0	-2.0	0.4	1.0	2.0	0.4
Test3	1.0	0.0	1000.0	1.0	0.0	0.01
Test4	5.99924	19.5924	460.894	5.99242	-6.19633	46.0950
Test5	1.0	-19.59745	1000.0	1.0	-19.59745	0.01

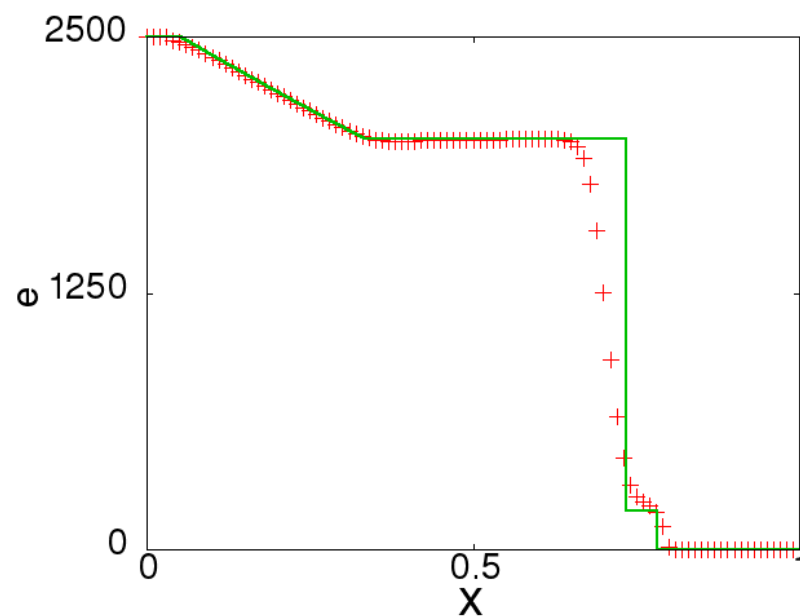
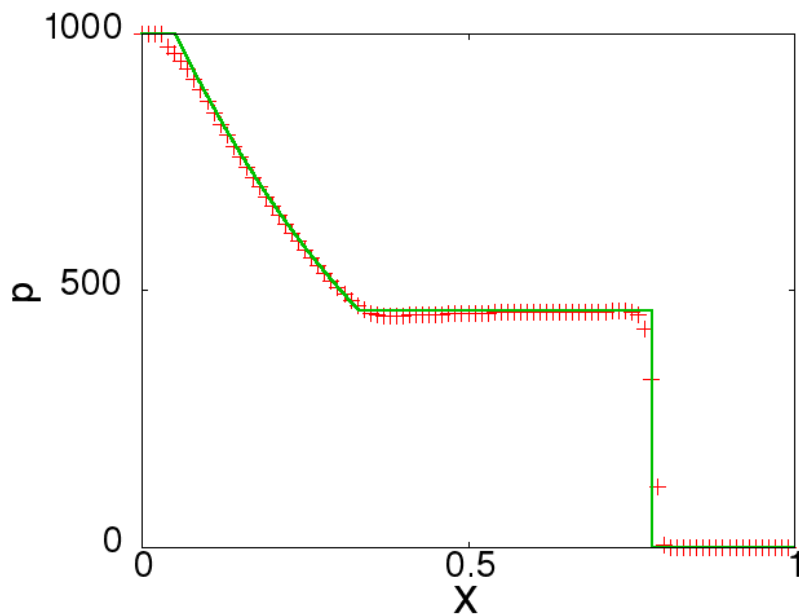
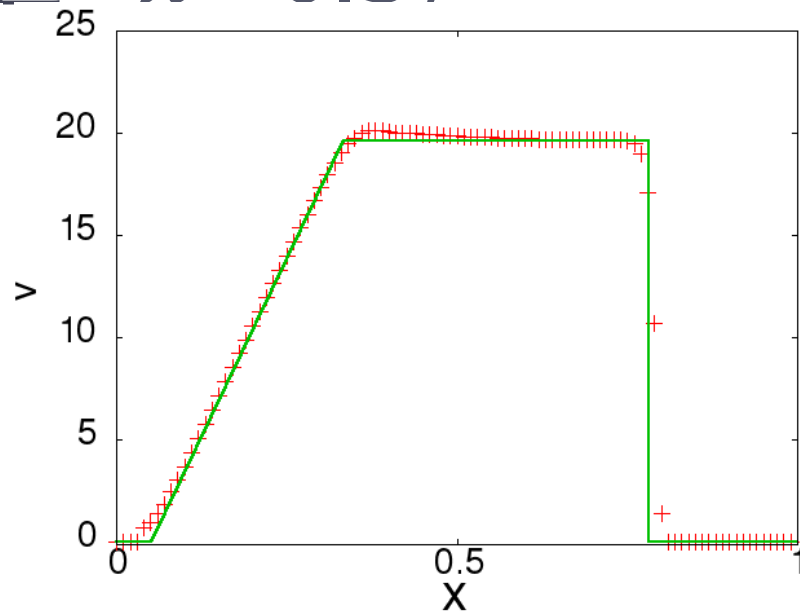
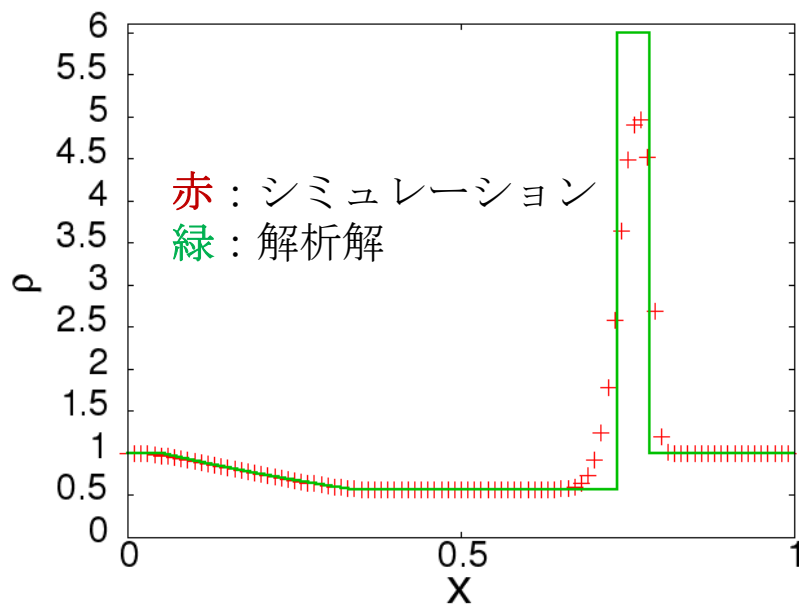
テスト問題 1 (境界の位置: $x=0.3$)



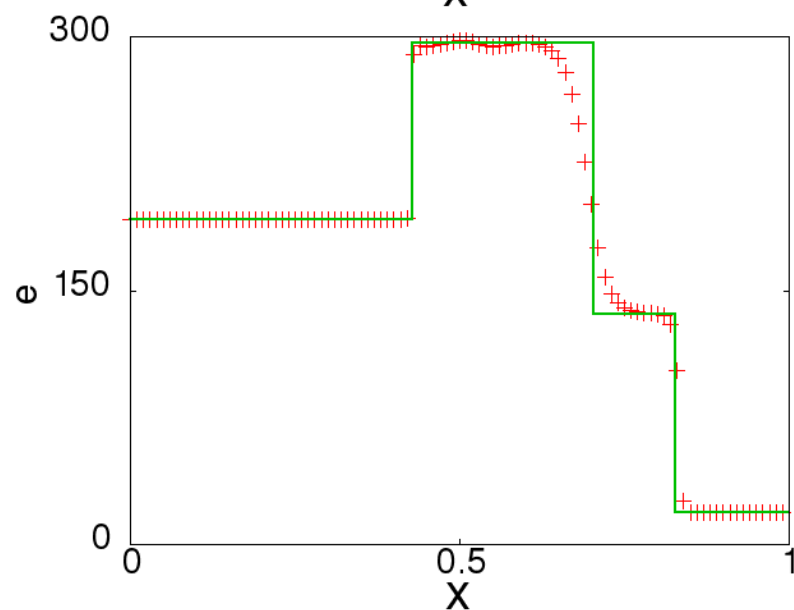
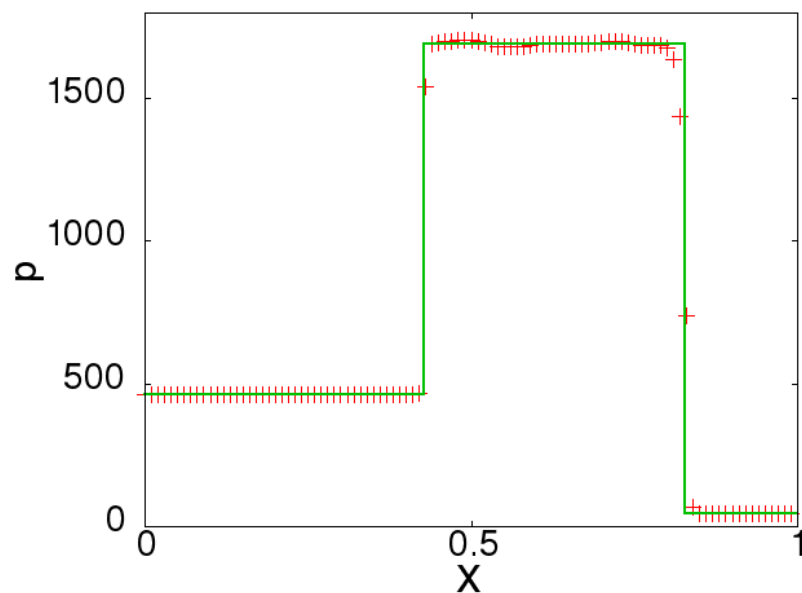
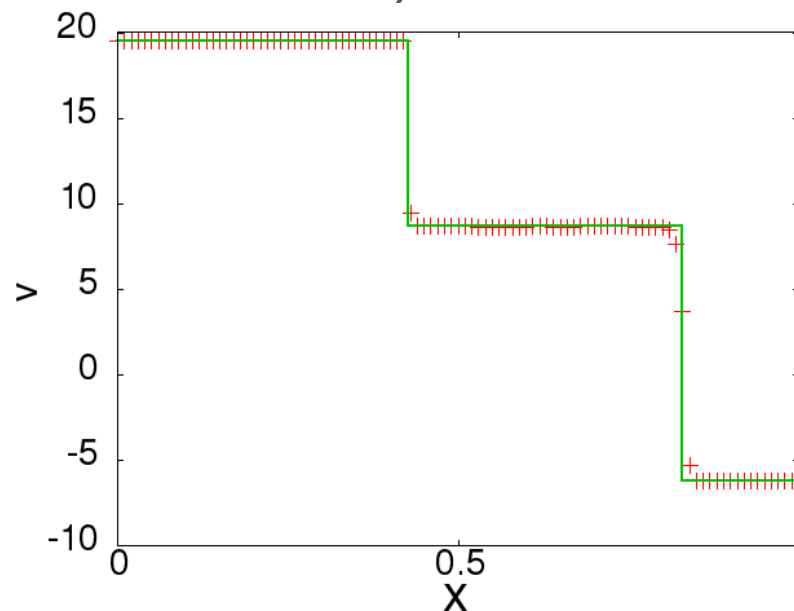
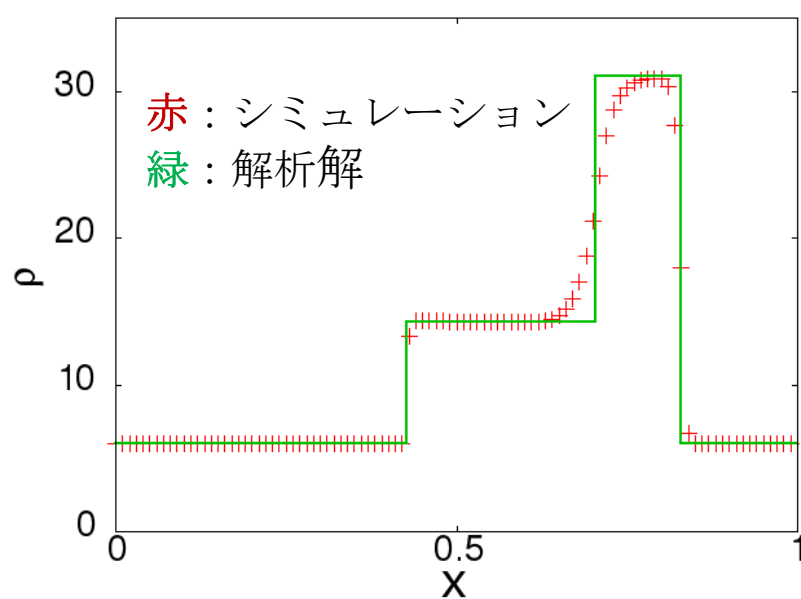
テスト問題 2 (境界の位置: $x=0.5$)



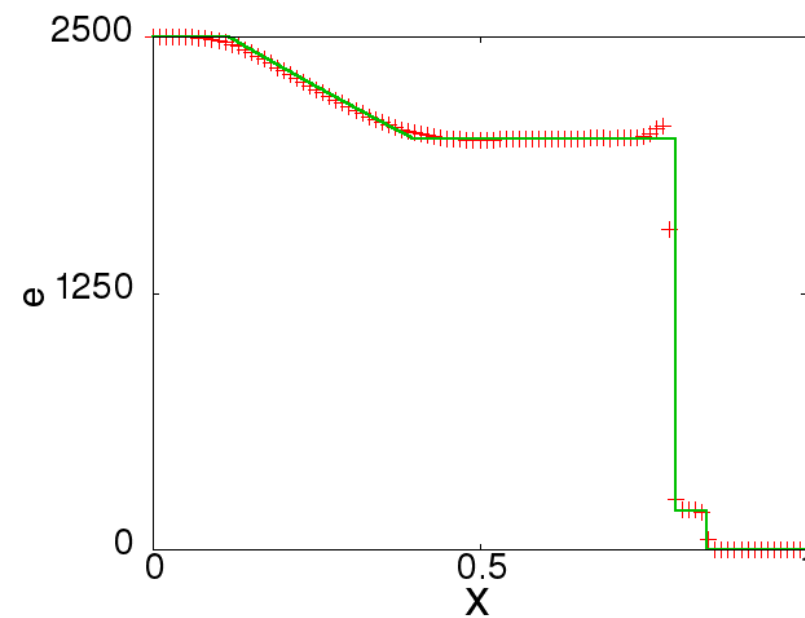
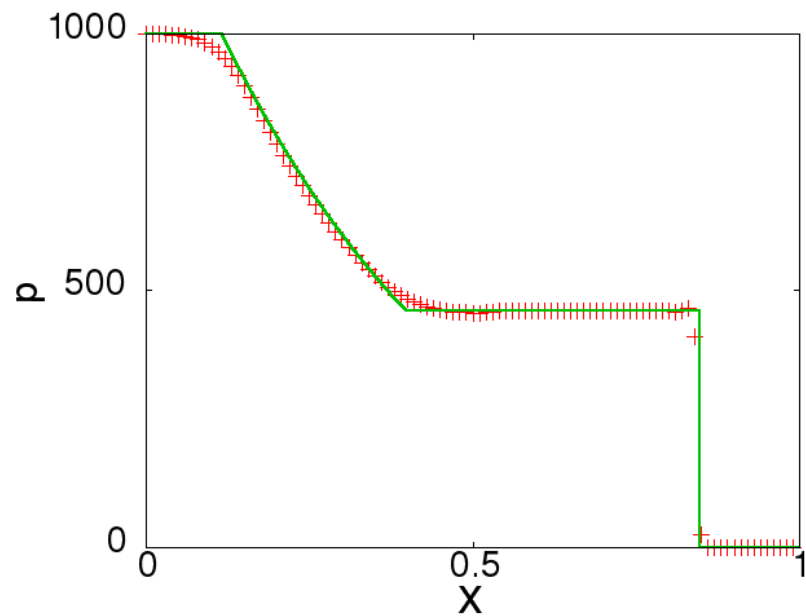
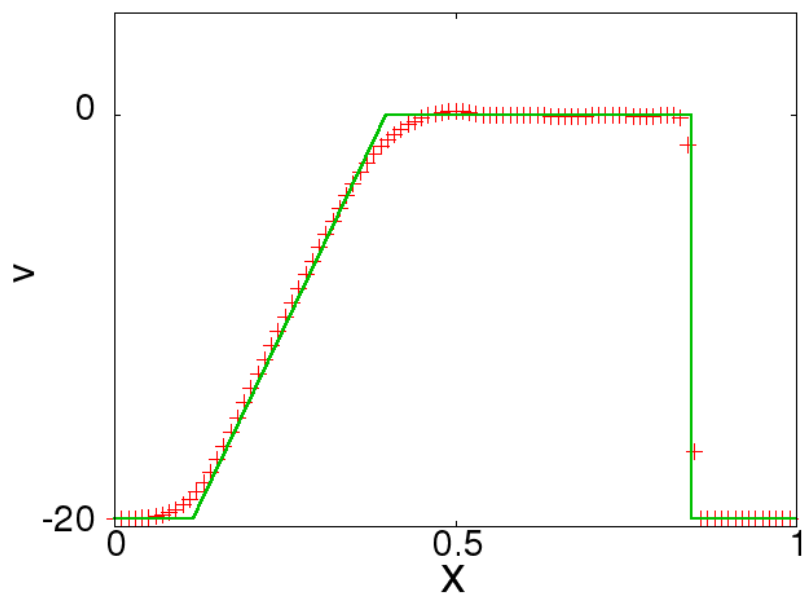
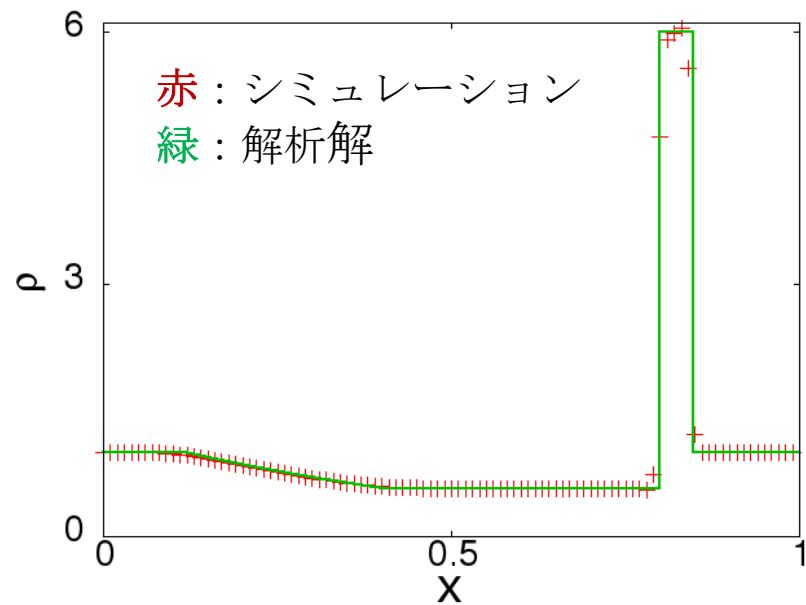
テスト問題3 (境界の位置: $x=0.5$)



テスト問題4 (境界の位置： $x=0.4$)



テスト問題5 (境界の位置: $x=0.8$)



有限体積法

Euler方程式

$$\iint_D \left(\frac{dq}{dt} + \frac{dE}{dx} \right) dx dt = 0$$

時刻 $t \uparrow n$ から $t \uparrow n+1$ の間の状態量 q の変化

||

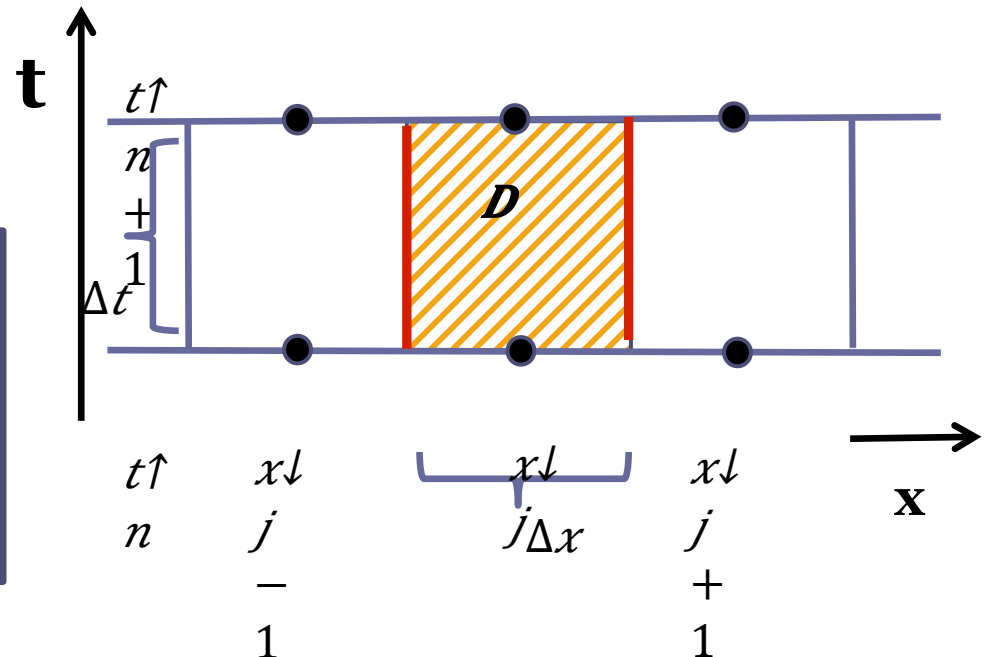
その間にメッシュ境界から出入りする流束 E の差



有限体積法に基づいた差分スキーム

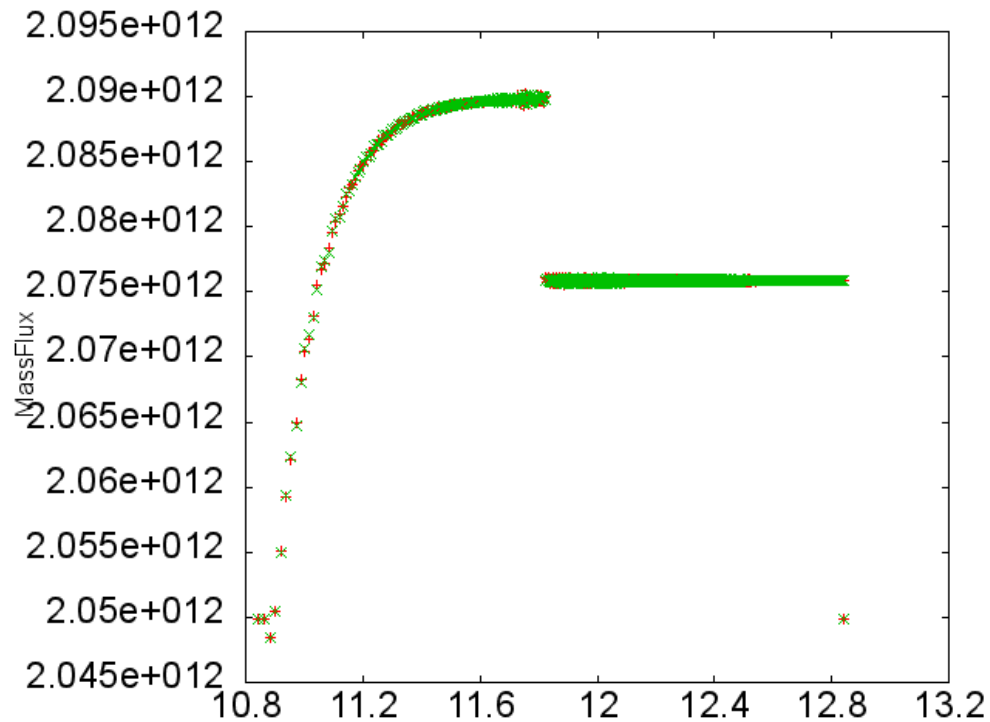
$$q_{j \uparrow n+1} = q_{j \uparrow n} - \Delta t / \Delta x \{ E_{j+1/2 \uparrow n} - E_{j-1/2 \uparrow n} \}$$

が得られる。



質量流束の保存

■ 各場所の質量流束 $M = \rho v r^2$ を約3fftと10fftで比較した。

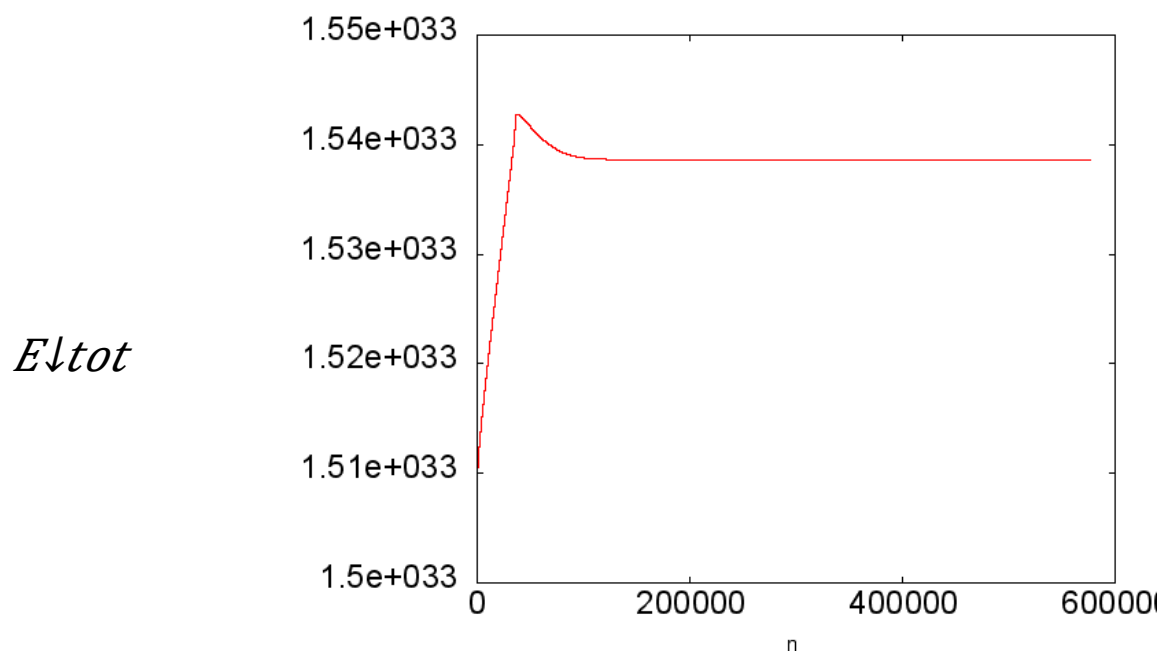


$x \downarrow c \sim 11.8$

エネルギー保存の確認

■ 全エネルギー $E = 1/2 \rho v^2 + \gamma p / \gamma - 1 - \rho G M_* / x$ を各時間ごとに全空間に積分した量 E_{tot} の時間変化を見た。

■ $n=200000$ (約3fft)までは、差分によって生じた圧力勾配によって波が立つ。その波が収まった後の保存している。



時間ステップ数

全エネルギー E の保存は、以下の式のように書くことができる。

$$\int V \frac{\partial E}{\partial t} dV = -4\pi [f_{\text{in}} x_{\text{in}}^2 - f_{\text{out}} x_{\text{out}}^2]$$

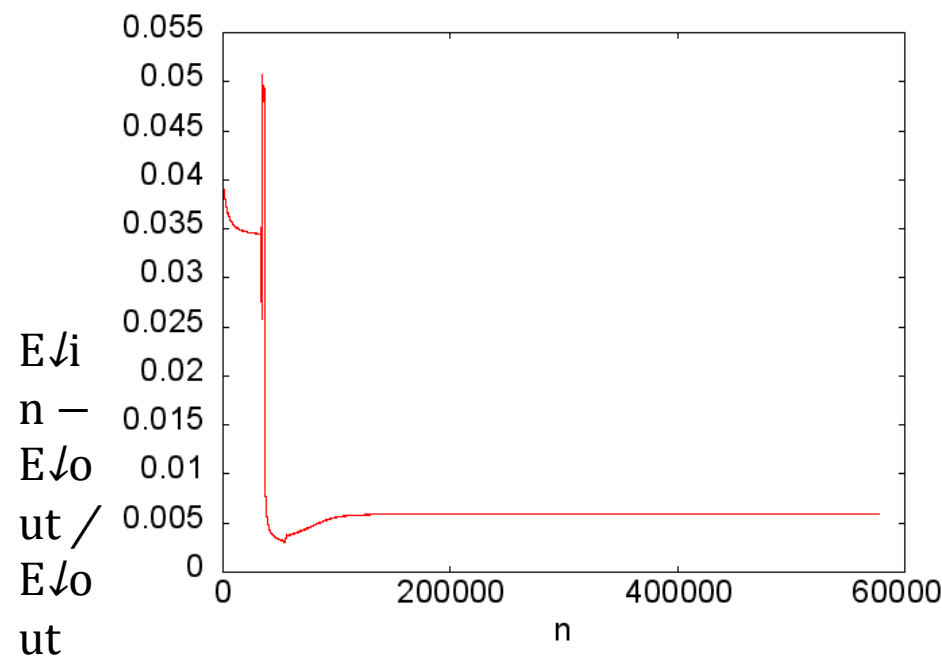
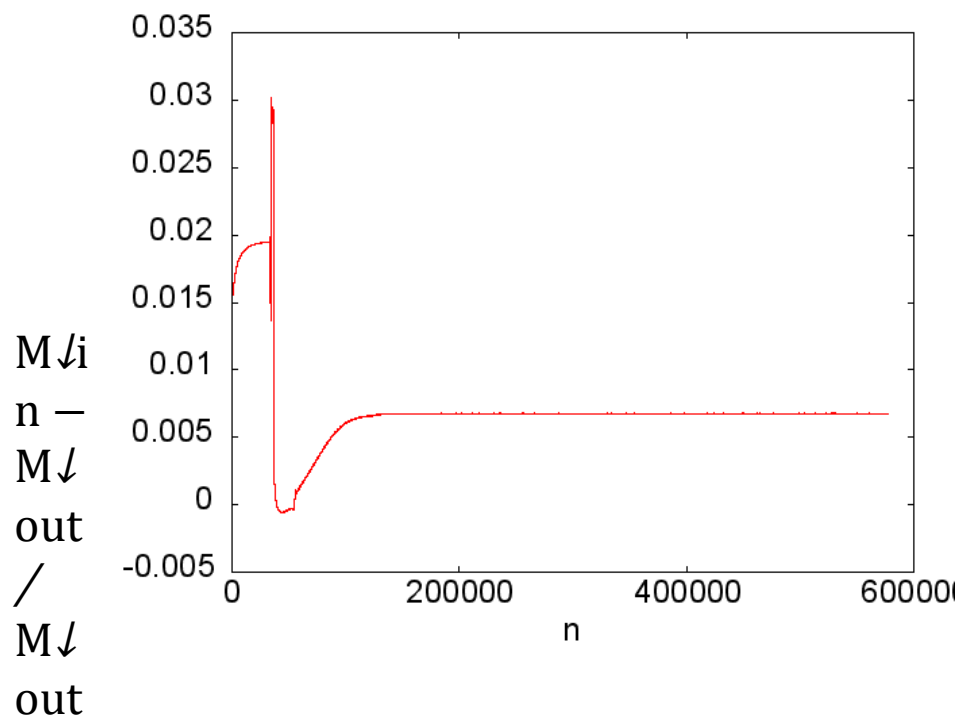
f_{in} : 内側の境界から流入する flux, x_{in} : 内側の境界の位置

f_{out} : 外側の境界から流出する flux, x_{out} : 外側の境界の位置

上で3fft以降では全エネルギー E が保存していることが確認されたので、境界から流入出しているエネルギーも一定になっているはずである。

境界からの流入、流出の確認

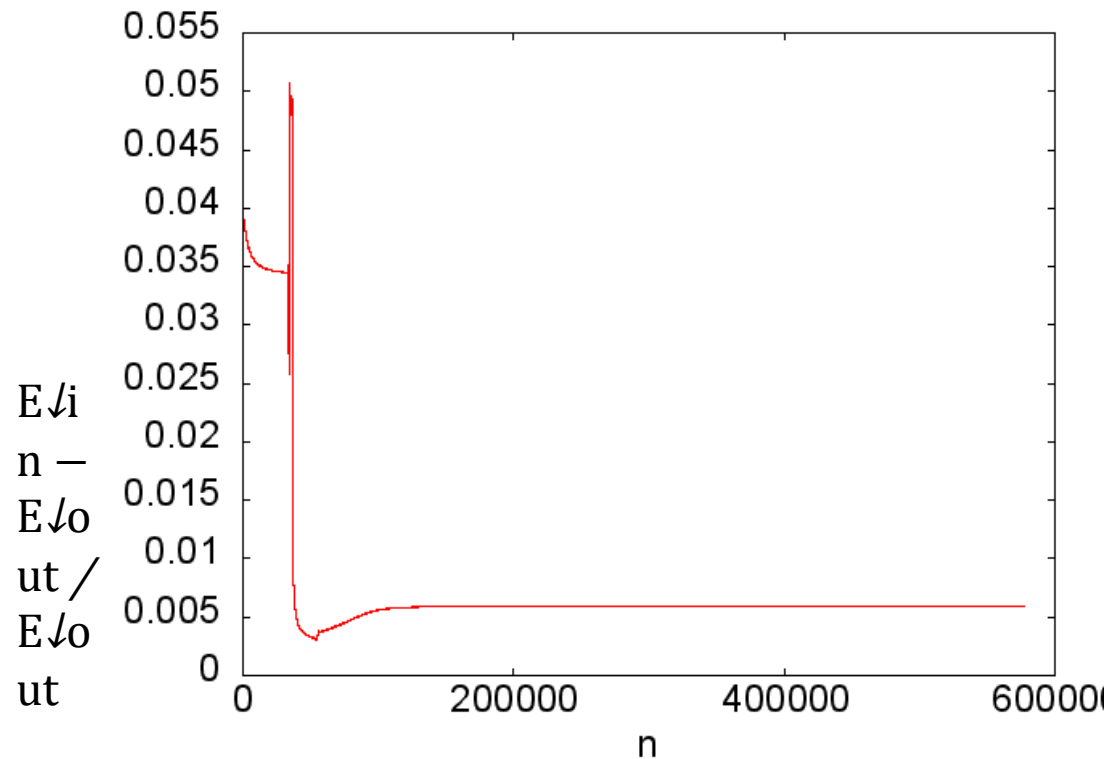
■境界からの質量とエネルギーの流入、流出を調べる。



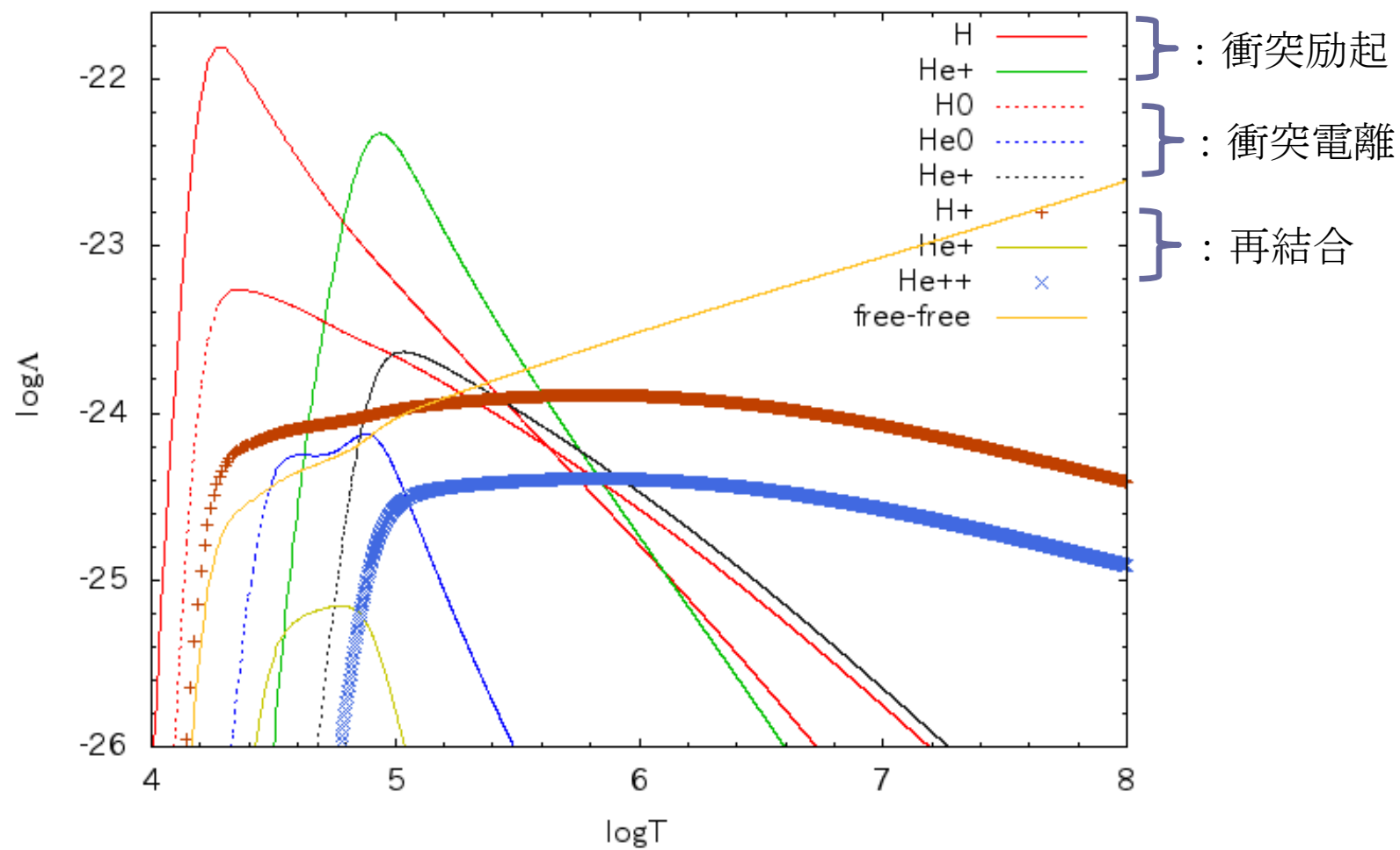
■約300,000が経過した後は、流入流出はほぼ一定となっている。

境界からの流入、流出の確認

■境界からのエネルギーの流入、流出を調べる。



■約300,000が経過した後は、流入流出はほぼ一定となっている。



参考文献

- [1] Godunov, S.K. : A Finite Difference Method for the Numerical Computation of Discontinuous Solutions of the Equations of Fluid Dynamics, *Mathmaticheskii Sbornik* , 47,271-306(1959).
- [2]坂下志郎 ,池内了[著],[宇宙流体力学],培風館,1996
- [3] Sod, G.A.,“A survey of several finite difference methods for systems of nonlinear hyperbolic conservation laws”, *Journal of Computational Physics* (1978), 27,pp.1–31.
- [4]Toro,E.F:*Riemann solvers and Numerical Methods for FluidDynamics*,A Practical Introduction,Third Edition, Springer. (2009).

■ 中心領域にガスが落ち込み、星形成が起こっているのではないかというアイデアを導入する。

■ globular clusterやdEsの中心領域では、理論的に予測されるよりもガスが溜まっていないことが観測により示されている。

→ 1 A型超新星による超新星爆発などで吹き飛ばされているのではないか？



矮小銀河の中心で星形成が起こり、ガスが吹き飛ばされる様子をシミュレーションで確認したい。

Godunov法

1次元のEuler方程式は以下のようにまとめて書ける。

$$\frac{dq}{dt} + \frac{dE}{dx} = 0 \quad q = (\rho v, \rho v^2 + p, (\rho e + p)v)$$

v : 速度 ρ : 密度 p : 圧力, γ : 比熱 e : 単位体積 当たり状態エネルギー q : 全エネルギー流束 E :

この方程式を有限体積法を使い差分形に書き換えると、以下のように書ける。

$$q_{j+1/2}^{n+1} = q_{j+1/2}^n - \Delta t / \Delta x \{ E_{j+1/2}^n - E_{j-1/2}^n \}$$

Godunov法では数値流束 $E_{j+1/2}^n, E_{j-1/2}^n$ をRiemann初期値問題の解析解で与え

■ Godunov法で書いたコードをMUSCL法を用いて空間二次精度にした。

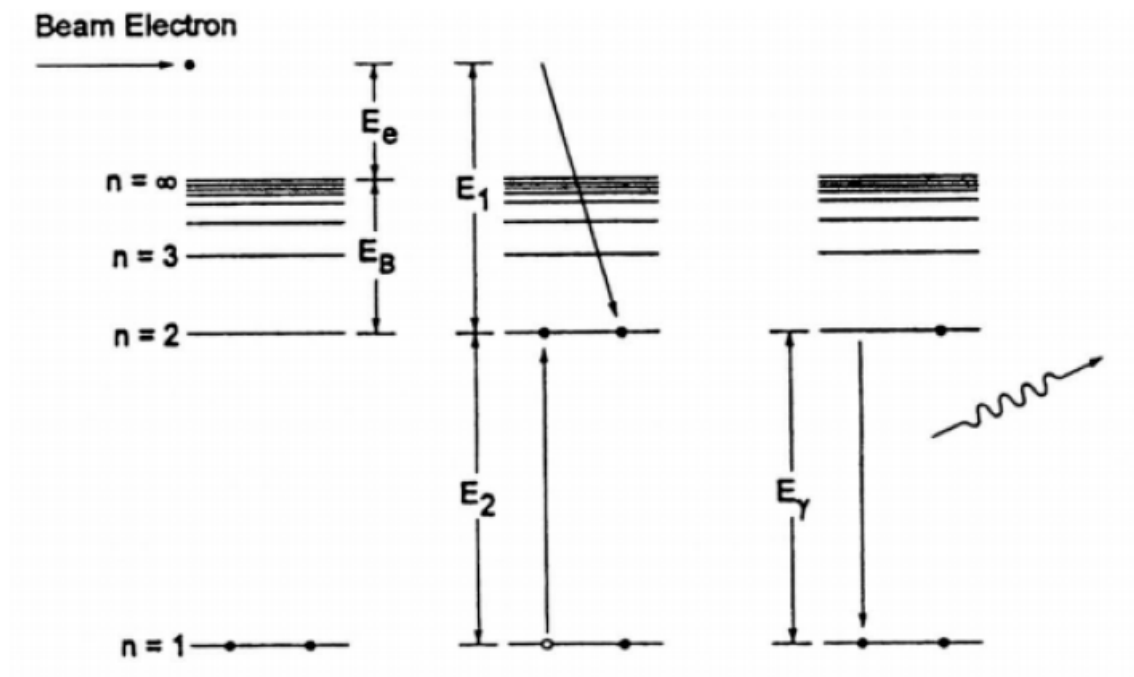


図 2: 2 電子性再結合

