

# 1 使い方

## 1.1 コンパイル

P3Tを展開したら、srcにあるMakefileのPS\_PATHで、FDPSのsrcにパスを設定してください。コンパイルをするときは、srcに移動して、

```
$ make
```

とすれば、main\_p3t.outが作成されます。ディレクトリにmain\_p3t.outがすでにある場合は、

```
$ make clean
```

として、一旦main\_p3t.outを削除してからコンパイルしてください。

Makefileで指定できるコンパイルオプションは以下です。

- DPARTICLE\_SIMULATOR\_THREAD\_PARALLEL -fopenmp: OpenMP 並列化を行う場合は指定してください。
- DPARTICLE\_SIMULATOR\_MPI\_PARALLEL: MPI 並列化を行う場合は指定してください。
- mavx, -mavx2: SIMD 関数に関するオプションです。-mavx, -mavx2 のいずれか一方を指定してください。ただし、国立天文台のXC50システムでは、これらだと正常に動作しないようなので、-march=core-avx2を指定してください。
- DCOLLISION: 粒子同士の衝突を入れる場合には指定してください。
- DUSE\_QUAD: ツリーによる重力計算で、四重極子まで計算する場合は指定してください。指定しない場合は単極子までの計算になります。
- DUSE\_INDIVIDUAL\_RADII: 独立カットオフ半径を使用する場合は指定してください。指定しない場合は共有カットオフ半径になります。
- DOUTPUT\_DETAIL: 最大質量や平均質量、Hard partのエネルギー誤差を計算する場合は指定してください。指定すると、出力ファイルenergy.datに最大質量と平均質量が、標準エラー出力にHard partのエネルギー誤差が出力されます。
- DCHAMBERS: 粒子の衝突破壊モデルについて、Chambers (2013) のモデルを用いる場合に指定してください。指定しない場合は、Kominami et al (2018, in preparation) のモデルになります。
- DGAS\_DRAG: 惑星円盤からのガス抵抗を入れる場合は指定してください。指定した場合、Adachi et al. (1976) のモデルによるガス抵抗が入ります。
- DMONAR: 計算には無関係のオプションです。
- DFORDEBUG: デバッグ用のオプションです。

## 1.2 実行

計算を行うディレクトリにmain\_p3t.outとparameter.datを移動し、

```
$ ./main_p3t.out monar
```

MPI 並列化を行う場合は、

```
$ mpirun -n (プロセス数) main_p3t.out monar
```

などとすれば実行されます。末尾の `monar` はなくても良いです\*1。

また、実行時に指定できるオプションは以下です。

- p: パラメータファイルを指定するオプションです。デフォルトのパラメータファイルは `parameter.dat` ですが、これ以外のパラメータファイルを用いる場合は、このオプションで指定してください。
- r: 計算を再スタートするときに指定してください。このオプションを指定すると、出力ディレクトリにあるスナップショットファイルの中で番号が最も大きいファイルから初期条件を読み込み、計算をスタートします。
- i: 初期条件ファイルを指定するオプションです。
- s: ランダムシードを指定するオプションです。

FDPS-4.0a を用いて動作確認を行っています。

## 2 パラメータ

パラメータは、`parameter.dat` で設定します。距離、質量、時間の単位は、それぞれ AU,  $M_{\odot}$ ,  $\text{year}/2\pi$  として記述してください。値の末尾に MKS や CGS とつけると、それぞれ MKS 単位系、CGS 単位系の値で記述することができます。例えば、密度の次元を持つパラメータの値に 2.0CGS を記述すると、 $2.0 \text{ g/cm}^3$  が設定されます。設定できるパラメータは以下です。各項目の ( ) の値はデフォルト値です。

### 2.1 ランダムシード

**seed:** ランダムシード (1)。初期条件の作成や、衝突破壊モデルで用いられる乱数のシードです。実行時オプションでも設定した場合は、実行時オプションの値を優先して用います。

### 2.2 入力・出力

**Init\_file:** 初期条件ファイル名 (INIT\_3000.dat)。初期条件ファイルの形式は、§3 で説明します。実行時オプションでも設定した場合は、実行時オプションの初期条件ファイル名を優先して用います。

**existsHeader:** 初期条件ファイルにヘッダがある場合に 1、ヘッダがない場合に 0 を設定します (0)。ヘッダの形式は、§3 で説明します。ヘッダがない場合、時刻は 0 となり、粒子数やエネルギーは初期条件ファイルから求められます。

**output\_dir:** 出力ディレクトリ名 (OUTPUT)。ここで設定した名前のディレクトリに計算結果が出力されます。その名前のディレクトリがカレントディレクトリにない場合は、その名前のディレクトリが作成されます。

**is\_Restart:** 計算を再スタートさせる場合は 1、そうでない場合には 0 を設定します (0)。この値に 1 を設定すると、出力ディレクトリにあるスナップショットファイルの中で番号が最も大きいファイルから初

---

\*1 コンパイルオプションで `-DMONAR` を指定しているとき、実行時の引数に `monar` または `MONAR` を渡すと、FDPS の開始メッセージにモナーが登場します。

期条件を読み込み、計算をスタートします。実行時オプションでも `-r` を指定した場合は、`is_Restart` の値に関わらず計算は再スタートされます。

## 2.3 微惑星円盤の初期条件

ファイルから初期条件を読み込む場合には使われません。微惑星円盤の面密度  $\Sigma_d$  は、

$$\Sigma_d = 10f_d\eta_{ice} \left( \frac{r}{1 \text{ AU}} \right)^{-p} \text{ g/cm}^{-2} \quad (1)$$

のように表されること前提にしています。

**makeInit:** 粒子の初期条件をプログラム内で作成する場合に 1、ファイルから読み込む場合に 0 を設定します (0)。この値に 1 を設定すると、初期条件ファイルが設定されていたとしても、無視してプログラム内で粒子の初期条件を作成します。

**n\_init:** 初期粒子数  $n_{\text{init}}$  (0)。

**m\_init:** 初期粒子質量  $m_{\text{init}}$  (0.0)。  $n_{\text{init}}$ ,  $m_{\text{init}}$  のどちらか片方が指定された場合、(1) に従うようにもう一方の値が設定され、(1) の分布に従って粒子が配置されます。どちらも指定された場合は、 $f_d$  を無視した (1) の分布に従って粒子が配置されます。どちらも指定されない場合は、エラーとなります。

**p:**  $\Sigma_d$  の  $r$  についての冪  $p$  (1.5)。

**f\_dust:**  $\Sigma_d$  のスケーリングファクター  $f_d$  (0.71)。

**eta\_ice:** 雪線の外側領域における雪線境界ファクター  $\eta_{ice}$  (4.2)。

**a\_in:** 初期微惑星のリング領域の内側境界  $a_{\text{in}}$  (0.98)。

**a\_out:** 初期微惑星のリング領域の外側境界  $a_{\text{out}}$  (1.02)。

**a\_ice:** 雪線の半径  $a_{ice}$  (2.0)。

## 2.4 ガス円盤

ガス抵抗を考えない場合には使われません。ガス円盤の面密度  $\Sigma_g$  は、

$$\Sigma_g = 2400f_g \left( \frac{a}{1 \text{ AU}} \right)^{-p} \text{ g/cm}^{-2} \quad (2)$$

のように表され、ガス密度  $\rho_g$ 、円盤温度  $T$  が、

$$\rho_g = 1.4 \times 10^{-9} f_g \left( \frac{r}{1 \text{ AU}} \right)^{-\alpha} \text{ g/cm}^{-3} \quad (3)$$

$$T = 2.8 \times 10^2 \left( \frac{r}{1 \text{ AU}} \right)^{-\beta} \text{ K} \quad (4)$$

のように表されることを前提にしています。ガス抵抗は、Adachi et al. (1976) のモデルに従います。

**alpha\_gas:**  $\rho_d$  の  $r$  についての冪  $\alpha$  (11.0/4.0)。

**alpha\_gas:**  $T$  の  $r$  についての冪  $\beta$  (0.5)。

**f\_gas:**  $\Sigma_g$  のスケーリングファクター  $f_g$  (0.71)。

**tau\_gas:** ガス円盤の散逸時定数  $\tau_g$  (0)。この値を 0 以外に設定すると、 $\rho_g$  が  $\exp(-t/\tau_{\text{gas}})$  に従って減少します。 $t$  は系の時刻です。この値を 0 に設定すると、 $\rho_g$  は  $t$  に伴った減少はしません。

C\_d: 無次元のガス抵抗係数  $C_D$  (1.0).

mu: ガスの平均分子量  $\mu$  (2.34).

## 2.5 領域分割

coef\_ema: 領域分割の指数移動平均の平滑化係数 (0.3).

nx,ny:  $x, y$  方向のルートドメインの分割数  $n_x, n_y$  (プロセス数  $n_{\text{proc}}$  に対して,  $n_x = \sqrt{n_{\text{proc}}}$  に最も近く,  $n_{\text{proc}} = n_x n_y$  となる整数).

## 2.6 ツリー

theta: ツリーの見込み角  $\theta$  (0.5).

n\_leaf\_limit: ツリーを切るのをやめる粒子数の上限 (8).

n\_group\_limit: 相互作用リストを共有する粒子数の上限 (256).

## 2.7 タイムステップ

t\_end: プログラムを終了する系の時間  $t_{\text{end}}$  (1/4).

dt\_tree: ツリーのタイムステップ  $\Delta t_{\text{tree}}$  (1/32). 2 の冪乗でなければなりません.

dt\_snap: 出力の時間間隔  $\Delta t_{\text{snap}}$  (1/32).  $\Delta t_{\text{tree}}$  の整数倍でなければなりません.

dt\_min: Hermite 法におけるタイムステップの最小値  $\Delta t_{\text{min}}$  (1/8192). 2 の冪乗でなければなりません.  
また,  $\Delta t_{\text{min}} < 0.5 \Delta t_{\text{tree}}$  でなければなりません.

eta: Hermite 法におけるタイムステップを決めるパラメータ  $\eta$  (0.01).

eta\_0: Hermite 法における初期タイムステップを決めるパラメータ  $\eta_0$  (0.001).

alpha: Hermite 法におけるタイムステップを決めるパラメータ  $\alpha$  (0.1).

## 2.8 重力相互作用

m\_sun: 中心星質量  $m_{\text{Sun}}$  (1.0).

dens: 粒子密度  $\rho_{\text{planet}}$  ( $5.049667 \times 10^6$ ).

eps: 重力の Softening パラメータ  $\epsilon$  (0.0).

R\_cut: 粒子のカットオフ半径を決めるパラメータ  $\tilde{R}_{\text{cut}}$  (1.0). 粒子の外側カットオフ半径  $r_{\text{out}}$  は,

$$r_{\text{out}} = \tilde{R}_{\text{cut}} r_{\text{Hill}} \quad (5)$$

となります.  $r_{\text{Hill}}$  は粒子の Hill 半径です.

R\_search0, R\_search1: 粒子の探索半径を決めるパラメータ  $\tilde{R}_{\text{search0}}, \tilde{R}_{\text{search1}}$  (1.0, 1.0).  $\tilde{R}_{\text{search0}} \geq \tilde{R}_{\text{cut}}$  でなければなりません. 粒子の探索半径  $r_{\text{search}}$  は,

$$r_{\text{search}} = \tilde{R}_{\text{search0}} r_{\text{Hill}} + \tilde{R}_{\text{search1}} v_{\text{disp}} \Delta t_{\text{tree}} \quad (6)$$

となります.  $v_{\text{disp}}$  は粒子の速度分散です.

**gamma:** 粒子の外側カットオフ半径, 内側カットオフ半径の比  $\gamma = r_{\text{in}}/r_{\text{out}}$  (0.1).

**rHill\_min:**  $r_{\text{out}}, r_{\text{search}}$  を設定するときの  $r_{\text{Hill}}$  の最小値  $r_{\text{Hill,min}}$  ( $3.155574 \times 10^{-4}$ ). 粒子の質量, 軌道長半径から計算される Hill 半径を  $r_{\text{Hill}}^*$  として, (5), (6) で使われる  $r_{\text{Hill}}$  は,  $r_{\text{Hill}} = \max(r_{\text{Hill}}^*, r_{\text{Hill,min}})$  となります.

**r\_max:** リング領域の外側境界  $r_{\text{max}}$  (40). 粒子と中心星の距離がこの距離より大きくなったらその粒子を消します.

**r\_min:** リング領域の外側境界  $r_{\text{min}}$  (0.1). 粒子と中心星の距離がこの距離より小さくなったらその粒子を消します.

## 2.9 衝突・破壊

**f:** 粒子の半径のふくらまし係数  $f$  (5.0).

**m\_min:** 破片粒子の最小質量  $m_{\text{min}}$  ( $9.426628 \times 10^{-12}$ ). Kominami et al (2018, in preparation) のモデルにおいて,  $b_{\text{fragment}} = m_{\text{min}}/m_{\text{init}}$  となる.

**a\_frag:** Kominami et al (2018, in preparation) のモデルで, 1 回の衝突における粒子の破片の総質量を決めるパラメータ  $a_{\text{fragment}}$  (0.5).

## 3 出力ファイル

出力ディレクトリには, スナップショットファイル `snap?????.dat` と, `energy.dat`, `collision.dat`, `param.dat` が出力されます.

スナップショットファイルの形式は, 最初の行がヘッダー, 2 行目からが各粒子の情報です. ヘッダーには, 系の情報が,

$$\begin{array}{ccccccc} t & n & E_{\text{tot,init}} & E_{\text{kin,init}} & E_{\text{sun,init}} & E_{\text{planet,init}} & - E_{\text{disp,init}} \\ & & E_{\text{tot,now}} & E_{\text{kin,now}} & E_{\text{sun,now}} & E_{\text{planet,now}} & - E_{\text{disp,now}} \end{array}$$

の順に記述されます.  $t$  は系の時刻,  $n$  は粒子数,  $E_{\text{tot}}, E_{\text{kin}}, E_{\text{sun}}, E_{\text{planet}}, E_{\text{disp}}$  はそれぞれ全力学エネルギー, 運動エネルギー, 中心星重力ポテンシャルエネルギー, 粒子間相互作用ポテンシャルエネルギー, 散逸したエネルギーで, init,now はそれぞれ初期と時刻  $t$  における値を表します.

2 行目からの各粒子の情報は,

$$\text{ID} \quad m \quad x \quad y \quad z \quad v_x \quad v_y \quad v_z \quad n_{\text{neighbor}}$$

の順に記述されます. ID は粒子 ID,  $m$  は粒子の質量,  $\mathbf{r}_i = (x, y, z)$  は粒子の位置,  $\mathbf{v}_i = (v_x, v_y, v_z)$  は粒子の速度,  $n_{\text{neighbor}}$  は粒子の近傍粒子数です.

初期条件ファイルも, スナップショットファイルと同じ形式で記述されていること前提にしています. ただし, 初期条件ファイルの  $n_{\text{neighbor}}$  は, 計算には影響しないので, 仮の値を設定しておけば良いです. また, パラメータファイルの `existsHeader` が 0 の場合は, 初期条件ファイルのヘッダーは省略されていることを前提に粒子の情報を読み込みます.

`energy.dat` には, スナップショットファイルを出力するごとに系の情報が,

$$t \quad n \quad E_{\text{tot,now}} \quad \text{error} \quad T_{\text{Soft}} \quad T_{\text{Hard}} \quad n_{\text{largestcluster}}$$

の順に記述されます。error は全エネルギーの相対誤差,  $T_{\text{Soft}}, T_{\text{Hard}}$  は直前の 1 ステップについての Soft part, Hard part のそれぞれの計算時間,  $n_{\text{largestcluster}}$  は, 直前の 1 ステップの最大粒子数の neighbor cluster の粒子数です。コンパイル時に `-DOUTPUT_DETAIL` を指定している場合は, この後に, 最大質量, 平均質量も出力されます。

`collision.dat` には, 衝突に関する情報が出力されます。出力する内容は, `collisionA.h` の関数 `Collision0::write2File` で指定される内容が出力されます。

`param.dat` には, 計算に用いられたパラメータが出力されます。

不明な点やバグ等あれば, 石城 (y.ishigaki@stp.isas.jaxa.jp) までご連絡ください。