

## ”force” の数式解説 (force.cpp, force.h)

Open DEM Japan

2025 年 10 月 12 日

本稿では `force` に含まれるアルゴリズムを離散要素法の枠組みで記述する。粒子  $i$  が受ける運動はニュートンの運動方程式

$$m_i \ddot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{F}_i^c + \mathbf{F}_i^{\text{ext}} \quad (1)$$

に従い、接触力は近接粒子集合  $\mathcal{N}_i$  に対する和で

$$\mathbf{F}_i^c = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \left( k_n \delta_{ij} \mathbf{n}_{ij} - \eta_n \dot{\delta}_{ij} \mathbf{n}_{ij} + k_t \boldsymbol{\xi}_{ij} - \eta_t \dot{\boldsymbol{\xi}}_{ij} \right) \quad (2)$$

と書ける。ここで  $\delta_{ij}$  は法線方向の重なり、 $\boldsymbol{\xi}_{ij}$  は接線方向の相対変位であり、粘弾性係数  $k_n, \eta_n, k_t, \eta_t$  はモデル依存の定数である。

外力項は体積力や計算セル境界からの作用を内包して

$$\mathbf{F}_i^{\text{ext}} = \mathbf{F}_i^{\text{body}} + \mathbf{F}_i^{\text{fix}} + \mathbf{F}_i^{\text{bc}} \quad (3)$$

の形で分解される。ファイル `force` が提供する処理は、粒子状態  $(\mathbf{r}_i, \mathbf{v}_i)$  と時刻  $t$  に依存する演算子

$$\mathbf{F}_i^{\text{fix}} = \mathcal{G}_{\text{force}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{v}_i, t) \quad (4)$$

として捉えられ、制御対象の運動を数値的に制約する。得られた仕事量は

$$E(t + \Delta t) = E(t) + \sum_i \mathbf{F}_i^{\text{fix}} \cdot \mathbf{v}_i \Delta t \quad (5)$$

によりエネルギーバランスへ反映され、離散要素シミュレーションの収束性と境界条件の整合性を確保する。