

## 講演要旨集執筆要綱（14 ポイント）

粉体工学会事務局 ○粉体 一郎, 粉体 二郎, 粉体 三郎

### 1 緒言

講演要旨の執筆にあたり、以下の各事項に準拠して下さい。講演要旨は、講演 1 件に対して図表を含めて A4 サイズ、2 ページです。書式は、2 段組み、1 段当たり 22 字 ×48 行を基準とします。マージンは、上下左右それぞれ 25 mm として下さい。フォントは、標準的なものとして、日本語は明朝体、英文は Times New Roman を推奨しますが、他のフォントでも結構です。文字の大きさは 10 ポイント以上、英数字はすべて半角にして下さい。文字数、文字間隔、行数等には厳密にはこだわりませんが、読みやすさに配慮して下さい。図表は白黒・カラーのどちらでも構いませんが、要旨集は白黒で印刷します。印刷時に鮮明になるように留意して下さい。また図表中の説明や記号などが小さくなりすぎないように注意して下さい。数式などはイタリック体で表記し、上付き/下付きの字が小さくなりすぎないようにして下さい。原則 2 ページを越す場合には事務局 (office@sptj.jp) までご相談ください。

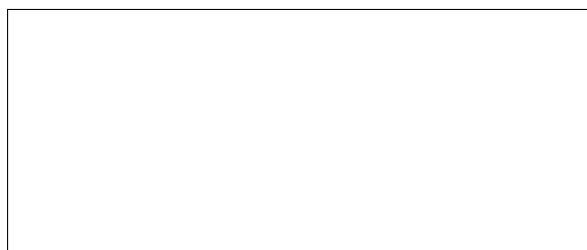


Fig.1. , 図 1 | キャプション

### 2 原稿の書き方

#### 2.1 講演情報

この見本のように、原稿 1 ページ目の左上部には講演番号を入れるための余白として第 1 行目の左マージンから 8 文字分を空白としてあげ、「研究報告」「技術報告」「技術資料」等の種別を記入して下さい。1 行あけて第 2 行目中央に、講演題目を 14 ポイントで記入して下さい。講演題目からさらに 1 行あけて第 3 行目に、発表者の所属、氏名を右寄せで記入して下さい。講演者には必ず○印を付けて下さい。連名などで 1 行に書ききれない場合は 2 行以上でも結構です。また原稿 1 ページ目下欄外に、発表者のローマ字

表記名、連絡先の電話番号、電子メールアドレスを 1 行で記入して下さい。ローマ字表記名については、氏（頭文字のみ大文字、以下小文字）、姓（すべて大文字）の順で記入して下さい。ただし 1 ページ目のみです。

#### 2.2 本文

本文は、発表者の所属、氏名から 1 行あけて書き始めて下さい。2 ページ目以降は 1 行目から書いて下さい。また偶数ページ/奇数ページにかかわらず、どのページも印字部分が用紙の中央になるように設定して下さい。

### 3 講演要旨の提出

講演要旨は、関連行事の要旨提出 URL よりご提出ください。ファイルサイズは 3 MB 以下の、pdf または word ファイル（拡張子: pdf, doc または docx）のみ受付可能です。ファイルのアップロードには、受付番号とパスワードが必要です。締切までの期間内は、講演要旨の投稿を繰り返すことができます。

### 4 DEM における Voigt モデル

離散要素法 (DEM) では、接触中の粒子対  $i-j$  を法線方向と接線方向に直交分解し、それぞれを線形ばねとダッシュポットを並列接続した Voigt 要素で近似する [1]。圧縮を正、接触法線単位ベクトルを  $n$  とする。粒子-粒子接触における Voigt モデル（ばね-ダッシュポット）の構成要素と向きを Fig. 2 に示す。

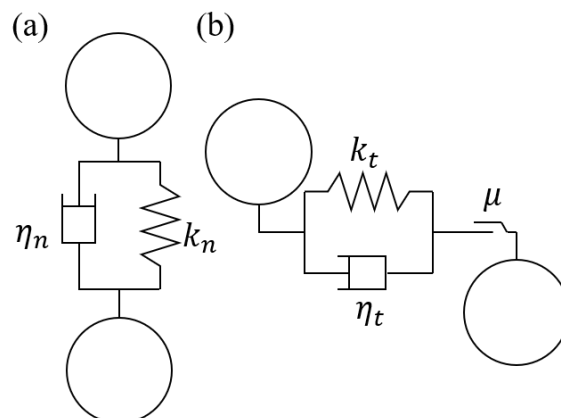


Fig.2. Schematic of particle – particle contact in the Voigt model: (a) normal interaction, (b) tangential interaction.

#### 4.1 法線方向

重なり  $\delta_n$  と法線相対速度  $v_n = (\mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{n})$  から、法線力は

$$\mathbf{F}_n = (k_n \delta_n - \gamma_n v_n) \mathbf{n}, \quad (1)$$

で与える。  $k_n$  は法線ばね定数、  $\gamma_n$  は法線減衰係数である。

#### 4.2 接線方向

Cundall–Strack に従い [1]、接触座標系で積分した接線ばね伸び  $\xi_t$  を用いる。接線相対速度は

$$\mathbf{v}_t = \mathbf{v}_{ij} - (\mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} - R_i (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{n}) - R_j (\boldsymbol{\omega}_j \times \mathbf{n}), \quad (2)$$

で与える。接線力の試行値と最終値は

$$\mathbf{F}_t^* = -k_t \xi_t - \gamma_t \mathbf{v}_t, \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_t = -\min\left(\|\mathbf{F}_t^*\|, \mu \|\mathbf{F}_n\|\right) \frac{\mathbf{F}_t^*}{\|\mathbf{F}_t^*\|}, \quad (4)$$

で与える。ここで  $\mu$  はクーロン摩擦係数である。

#### 4.3 転がり摩擦

球粒子は接線摩擦のみでは過大回転しやすいため、接触点まわりの転がり抵抗モーメント  $\boldsymbol{\tau}_r$  を導入して回転を抑制する [2]。有効半径は  $R^* = R_i R_j / (R_i + R_j)$ 、相対角速度は  $\boldsymbol{\omega}_{\text{rel}} = \boldsymbol{\omega}_i - \boldsymbol{\omega}_j$  と表される。回転ばね角度履歴  $\boldsymbol{\theta}_r$  を用いて

$$\boldsymbol{\tau}_r^* = -k_r \boldsymbol{\theta}_r - \gamma_r \boldsymbol{\omega}_{\text{rel}}, \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\tau}_r = -\min\left(\|\boldsymbol{\tau}_r^*\|, \mu_r \|\mathbf{F}_n\| R^*\right) \frac{\boldsymbol{\tau}_r^*}{\|\boldsymbol{\tau}_r^*\|}. \quad (6)$$

静的・動的の転がり抵抗を統一的に表現でき、安息角や回転率の再現性が高い。

#### 5 時間積分

本研究では、粒子の並進・回転運動をシンプレクティック・オイラー法で時間積分する。粒子  $i$  の質量を  $m_i$ 、慣性モーメントを  $I_i$ 、位置を  $\mathbf{r}_i$ 、速度を  $\mathbf{v}_i$ 、角速度を  $\boldsymbol{\omega}_i$ 、回転角（姿勢パラメータ）を  $\boldsymbol{\theta}_i$ 、作用する合力・合モーメントをそれぞれ  $\mathbf{F}_i$ 、 $\boldsymbol{\tau}_i$  とすると、運動方程式は

$$m_i \dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{F}_i, \quad \dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{v}_i, \quad I_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \boldsymbol{\tau}_i, \quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_i = \boldsymbol{\omega}_i. \quad (7)$$

シンプレクティック・オイラー法による更新は、まず速度・角速度を更新し、その新しい値で位置・角度を更新する。

$$\mathbf{v}_i^{n+1} = \mathbf{v}_i^n + \Delta t \frac{\mathbf{F}_i^n}{m_i}, \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\omega}_i^{n+1} = \boldsymbol{\omega}_i^n + \Delta t \frac{\boldsymbol{\tau}_i^n}{I_i}, \quad (9)$$

$$\mathbf{r}_i^{n+1} = \mathbf{r}_i^n + \Delta t \mathbf{v}_i^{n+1}, \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\theta}_i^{n+1} = \boldsymbol{\theta}_i^n + \Delta t \boldsymbol{\omega}_i^{n+1}. \quad (11)$$

#### 6 シミュレーション条件

本研究のシミュレーションに用いた主要パラメータを Table 1 に示す。

Table 1. Simulation parameters.

| Symbol     | Parameter                  | Value                 | Units                   |
|------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| $\rho$     | density                    | $2.50 \times 10^3$    | $\text{kg m}^{-3}$      |
| $R$        | particle radius (all same) | $1.00 \times 10^{-3}$ | m                       |
| $k_n$      | normal spring              | $1.00 \times 10^4$    | $\text{N m}^{-1}$       |
| $\gamma_n$ | normal dashpot             | $1.00 \times 10^{-3}$ | $\text{kg s}^{-1}$      |
| $k_t$      | tangential spring          | $6.00 \times 10^3$    | $\text{N m}^{-1}$       |
| $\gamma_t$ | tangential dashpot         | $1.00 \times 10^{-3}$ | $\text{kg s}^{-1}$      |
| $\mu$      | Coulomb friction           | $5.00 \times 10^{-1}$ |                         |
| $\eta_r$   | viscous rolling resistance | $2.00 \times 10^{-8}$ | $\text{N m s}$          |
| $k_r$      | rotational spring          | $1.00 \times 10^{-6}$ | $\text{N m rad}^{-1}$   |
| $\gamma_r$ | rotational dashpot         | $1.00 \times 10^{-8}$ | $\text{N m s rad}^{-1}$ |
| $\mu_r$    | rolling friction           | $5.00 \times 10^{-2}$ |                         |

#### 参考文献

- [1] P. A. Cundall and O. D. L. Strack, *Géotechnique*, **29** (1979) 47–65.
- [2] K. Iwashita and M. Oda, *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, **124** (1998) 285–292.