

DEM による樹脂ペレットの圧縮挙動シミュレーションの開発

Development of compression behavior for polymer pellets by the DEM simulation

- 福澤 洋平 1, (株)日本製鋼所, 広島市安芸区船越南 1-6-1, E-mail: yohei_fukuzawa@jsw.co.jp
 重石 高志 2, (株)日本製鋼所, 広島市安芸区船越南 1-6-1
 宗正 和美 3, (株)日本製鋼所, 広島市安芸区船越南 1-6-1
 富山 秀樹 4, (株)日本製鋼所, 広島市安芸区船越南 1-6-1
 山井 三亀夫 5, (株)プロメテック・ソフトウェア, 東京都文京区本郷 3-34-3
 越塚 誠一 6, 東京大学, 東京都文京区本郷 7-3-1

Yohei Fukuzawa, The Japan Steel Works Co. LTD, 1-6-1 Funakoshi-Minami, Aki-ku, Hiroshima
 Takashi Shigeishi, The Japan Steel Works Co. LTD, 1-6-1 Funakoshi-Minami, Aki-ku, Hiroshima
 Kazumi Munemasa, The Japan Steel Works Co. LTD, 1-6-1 Funakoshi-Minami, Aki-ku, Hiroshima
 Hideki Tomiyama, The Japan Steel Works Co. LTD, 1-6-1 Funakoshi-Minami, Aki-ku, Hiroshima
 Mikio Yamanoi, Prometech Software Inc., 3-34-3, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo
 Seiichi Koshizuka, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

We developed a new method to calculate compression behavior of polymer pellets in a twin screw extruder by improving the original DEM (Discrete Element Method). In this model, the diameter of the compressed particles is reduced with restoring force. For a comparison with the experiment distribution of the compression pressure in the twin screw extruder, the simulation results obtained are in a good agreement.

1. 背景

二軸押出機は主にプラスチック混練用途に使用され、混練プロセスでは固体の樹脂ペレットを供給し溶融可塑化を経て、溶融体の樹脂を押出すケースがほとんどである。我々は樹脂ペレットに DEM⁽¹⁾ (Discrete Element Method)、溶融体樹脂に MPS⁽²⁾ (Moving Particle Simulation)法を用いて、樹脂の溶融可塑化メカニズム解明を目的とした解析技術の開発を進めている。

二軸押出機内のペレットは混練部で圧縮・緻密化され、スクリュの剪断とシリンダの伝熱により溶融可塑化が進行するが、従来の DEM 演算ではペレットの圧縮を表現できず溶融可塑化の予測精度が不十分となる。そこで、より厳密な予測を行うため、DEM にペレットの圧縮を考慮したモデルを開発し、今回はそのモデル化手法と検証解析について報告する。

2. 解析手法

一般的に DEM で用いる支配方程式は並進運動(1)式と回転運動(2)式によって表される⁽¹⁾。

$$m \frac{dv}{dt} = \sum F_c + F_g \quad (1)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{T}{I} \quad (2)$$

m は粒子質量、 v は速度ベクトル、 t は時間、 F_c は粒子に作用する接触力、 F_g は重力、 w は角速度、 T はトルク、 I は慣性モーメントである。 F_c は法線方向と接線方向成分に分けられ、粒子間の相互作用はバネとダッシュポットおよび摩擦スライダから構成されるモデルを用いた。

従来の DEM 演算では、固体粒子は変形しないと仮定し、粒子どうしが接触した際にはオーバーラップ量に応じた弾性力によって粒子の反発が生じる。本演算モデルでは固体粒子の圧縮変形を考慮し、オーバーラップが生じることで粒子径を次第に縮小させ、縮小した粒子に復元力を持たせようとしてモデル化した。まず、粒子どうしが接触し、オーバーラップが生じたときに蓄積される粒子

の弾性内部エネルギー ΔW は以下で表される。

$$\Delta W_i = \sum_j \frac{1}{2V_i} k \delta_{ij} \Delta \delta_{ij} \quad (3)$$

V は粒子体積、 k はバネ定数、 $\Delta \delta$ は 1 ステップでのオーバーラップ量、 δ はオーバーラップ量の積算値、 i は着目粒子、 j は接触粒子である。この ΔW よりひずみ量 ε と粒子径 r は以下で求められる。

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta W_i}{K} \quad (4)$$

$$r_i = r_0 \exp(\varepsilon_i / 3) \quad (5)$$

K は体積弾性率、 r_0 は初期粒子径、 ε はひずみ量の積算値である。 i, j 粒子間に作用する力 F_{eij} は弾性内部エネルギーより次式で求められる。

$$F_{eij} = (W_i + W_j) A n \quad (6)$$

A は i と j 粒子の平均断面積、 n は i, j 粒子の単位法線ベクトルである。

以上の定式化により、粒子の圧縮状態をモデル化した。

3. 圧縮試験シミュレーションによる検証

本解析手法の有用性を示すため、図 1 に示す圧縮試験装置を用いて樹脂ペレットの圧縮挙動を定量的に評価した。

実験では円筒容器内 (内径: 36 mm、高さ: 64 mm) にポリプロピレン (PP ノバテック FY4; 日本ポリプロ株式会社) を 30 g 投入し、温度 30°C の条件下でピストンによりペレットを圧縮する。この圧縮の際に固体樹脂に与えた圧力とピストン位置をオートグラフ (島津製作所製 AG-20kNG) で測定した。

解析では粒子径 3.72 mm、粒子数 1235 個を容器内に配置させ、実験と同じ条件で圧縮試験シミュレーションを実施した。また、解析で用いた(4)式中の体積弾性率 K は単引張試験により測定したヤング率 $E = 1.06$ GPa を用いて(7)式より求めた。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (7)$$

ポアソン比 $\nu=0.4$ 、 $K=1.77$ GPaである。

図 2 に実験と解析により得られた圧縮試験での圧力と容器内体積の関係を示す。実験と解析結果ともに圧力を加えることで容器内の体積が減少し、両者を比較するとこの体積減少の割合はほぼ一致している。解析では粒子が完全な球形を維持したまま圧縮するのに対して、実際の樹脂ペレットは楕円形状など完全な球形で圧縮されないことから、解析と実験結果では多少の差異が確認できるが、これらを考慮すると十分な予測精度を有していると判断できる。

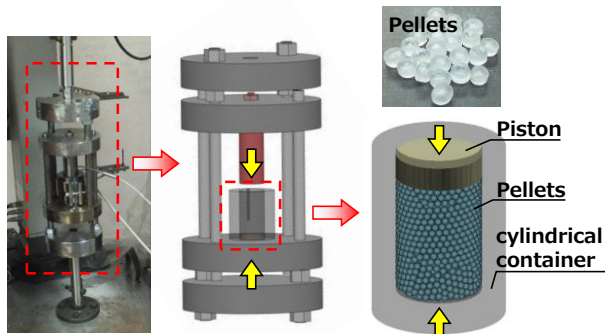


Fig. 1 Outline of compression testing machine.

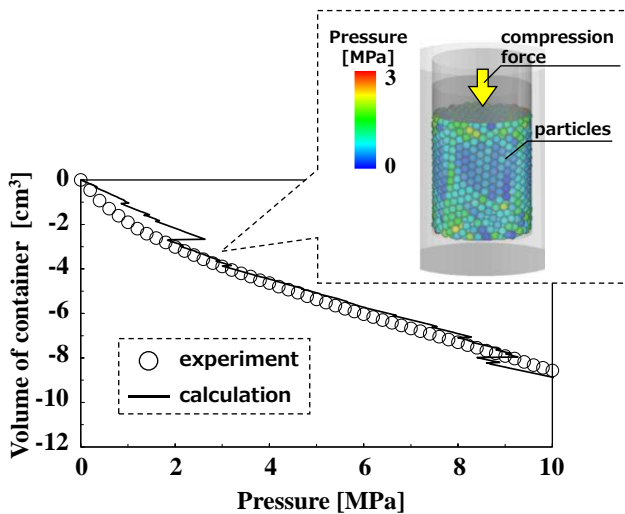


Fig. 2 Calculation and experiment results of compression test.

4. 二軸押出機内の樹脂ペレット圧縮シミュレーション

二軸押出機内での樹脂ペレットの圧縮挙動の観察と圧力値について定量評価を実施した。

図 3 に実験に用いた二軸押出機 TEX30 α (シリンダ径 ϕ 32 mm ; 日本製鋼所製) の装置構成を示す。樹脂は PP を用い、押出量 20 kg/h、スクリュ回転数 100 rpm、シリンダ温度 30 $^{\circ}$ C の条件である。二軸押出機はペレットの搬送や圧縮状態をスクリュ構成によって制御可能であり、実験では圧縮状態を形成できるスクリュ構成とした。この圧縮部に石英ガラスを使用した可視化シリンダを装着し、押出機内部を高速度カメラ (Casio 製 EXILIM ; EX-F1) により撮影した。また、シリンダに樹脂圧力センサーを 6 ヶ所設置し圧力値を測定した。解析条件は実験と同条件とし、解析結果については定常状態 (40 s) に達したものをういて評価した。

図 4 に実験と解析結果の圧縮挙動と圧縮部での圧力分布を示す。実験と解析結果ともに、圧縮部に搬送された樹脂ペレットは充満に応じて圧力が徐々に上昇し、圧縮部を通過すると圧力が低下する。実験値と解析値を比較すると、この傾向は両者一致しており、測定した 6 ヶ所の圧力値においてもほぼ同じ値を示している。一方で、圧縮部の充満状態においては解析よりも実験の方が密に詰まった状態である。この原因として、実際のペレットは圧縮部で圧縮することで平坦な形状に変形し、且つスクリュの剪断作用によって分断・緻密化されているため、充満状態が見かけ上増していると推察できる。これらを踏まえると十分な予測精度と判断でき、従来の DEM に圧縮変形モデルを導入することで、二軸押出機内での樹脂ペレットの圧縮挙動を再現することが可能となった。

参考文献

- (1) P. A. Cundal and O. D. L. Strack, *Geotechnique*, **29**, 47 (1979)
- (2) S. Koshizuka and Y. Oka, *Nucl. Sci. Eng.*, **123**, 421 (1996)

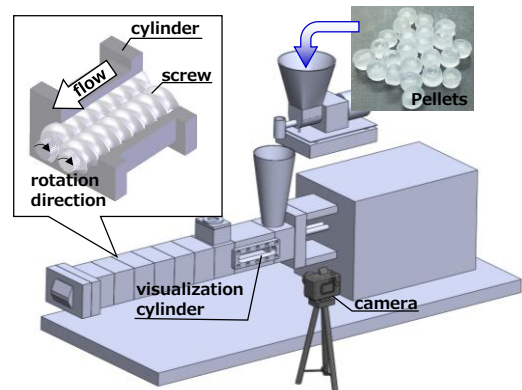


Fig. 3 Outline of twin screw extruder.

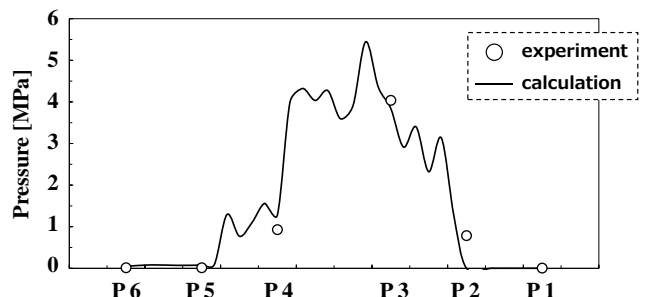
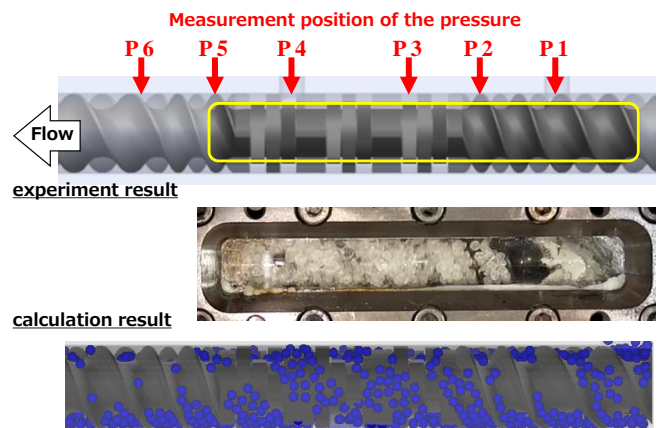


Fig. 4 Calculation and experiment results of the pressure for polymer pellets in twin screw extruder.