

# 粉粒体の摩砕粉化量推定のための シミュレーションモデル構築

近森 一博\*・北村 祐一郎\*・小川 正芳\*<sup>2</sup>・青木 秀之\*<sup>3</sup>・三浦 隆利\*<sup>3</sup>

Numerical Modeling of Grinding Rate in Granular Flow of Brittle Materials

Kazuhiro CHIKAMORI, Yuichiro KITAMURA, Masayoshi OGAWA, Hideyuki AOKI and Takatoshi MIURA

**Synopsis :** In an iron-making blast furnace, an operation with pulverized coal injection (PCI) causes an accumulation of powder by crushing between coke particles and decreases permeability through the coke bed.

It is so difficult to measure a mount of coke powders, so we developed a model to simulate a grinding rate with movements of particles of brittle material such as coke using Discrete Element Method (DEM).

In order to estimate the performance of our simulation model, we carried out the mutual friction of grinding test with two gypsum areas, and derived the grinding rate equation for the simulation model from the experimental results. The grinding rate of gypsum particles in a rotational drum was measured and calculated with various porosities of gypsum and the rotational speed of the drum.

As a result, the difference between predicted and measured grinding rate was larger in the case that the particle porosity was small (i.e. particle is hard) and a rotational speed of drum is high because we ignored the body breakage at contact between particles. On the other hand, the calculated grinding rate was the same as experimental one when the particle porosity was large (i.e. particle is soft).

It is concluded that DEM is useful tool for the prediction of grinding rate of particles. We expect the developed model to predict the grinding rate of coke particles in a raceway. However we might consider not only friction but also the body breakage in the simulation model to determine the correct grinding rate.

**Key words :** granular materials; simulation; grinding; particle dynamics.

## 1. 緒言

近年、高炉において炉芯への熱供給とコークス使用量の削減を目的として、羽口から空気と共に微粉炭を吹込む操業方式が盛んに実施されている。この微粉炭の吹込みにより問題となったのが、高炉レースウェイ領域のコークス粉の発生である。粉の高炉内への蓄積は高炉内部の通気性の低下を招き、高炉全体の操業効率が低下する。

粉の生成要因として考えられているものの1つに、レースウェイにおいて旋回運動するコークス粒子同士の摩砕が挙げられる。この摩砕に起因する粉については、実験炉および実炉での微粉炭吹込み操業時の測定に関する研究等が行われており、コークスの冷間強度の向上などにより粉生成量が減少する等の知見が得られている。また山口ら<sup>1)</sup>は粉生成量の抑制方法として、コストの問題から冷間強度を向上させるよりも高反応性コークスを用いることを提案している。

しかし、摩砕粉の研究は実験的手法を用いたものが主流であり、いまだにレースウェイ内の摩砕現象はブラック

ボックスとなっている。この摩砕現象の把握が可能になれば、粉の抑制方法の開発に有用な知見が得られると考えられるが、そのためには粒子同士の摩砕による粉生成量を把握する必要がある。

そこで本報では粉粒体の流動や岩盤の変形などの解析に用いられる離散要素法と呼ばれる解析手法を用いて、摩砕による粉生成速度の推算を行うモデルを開発した。

同時にモデルの妥当性の検討のため、コークスと同じく脆性材料である石膏を材料として水平回転ドラムにおいて粒子群の流動による粉生成速度を推算し、同条件において行った摩砕実験の結果と比較を行った。

## 2. 解析手法

粉粒体は多数の粒子が互いに力を及ぼしあっていることから複雑な挙動を示す。粉粒体の流動を解析する方法は粉粒体を連続体とみなす方法、不連続体とみなす方法に大別することができる。粉粒体の流動解析手法としては、粉粒体を連続体とみなしNewton流に適用されるNavier-Stokes

平成11年7月27日受付 平成11年10月30日受理 (Received on July 27, 1999; Accepted on Oct. 30, 1999)

\* 東北大学大学院生 (Graduate Student, Tohoku University, Aza-Aoba Aramaki Aoba-ku Sendai 980-8579)

\*<sup>2</sup> 東北大学学生 (Student, Tohoku University)

\*<sup>3</sup> 東北大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Tohoku University)

式を解く方法が一般的であった<sup>2,3)</sup>。しかし、その適用できる対象は低濃度流や高速な流れ場などの、粒子間相互作用力を無視できる場合に限定される。

離散要素法は解析対象の不連続性を前提とした解析手法である。そもそもは岩石力学の分野で、地盤を形成する岩盤が応力を受けて移動する運動の解析を目的としてCundalら<sup>4)</sup>により開発された。この手法は粉粒体を形成する個々の粒子について着目し、各粒子の軌跡を追跡することにより粉粒体の流動状態を解析するものである。そのため個々の要素間で接触が起こった場合について取扱う必要がある。

本研究では要素間の接触の判定は、解析空間を要素よりも大きい領域で分割し、近くの領域内に存在する要素同士についてのみ行った。このような接触判断方法は計算時間の削減に非常に効果があることから、多要素から成る系を対象とした解析ではほとんどの場合利用されている。

接触している要素については接触点の変位量を算出し、Fig. 1に示すVoight-Kelvinの相互作用力モデルにより各要素接触点における相互作用力を算出した。相互作用力モデルとは要素間の接触による相互作用力をモデル化したものであり、要素同士の接触による反発力を現すスプリング、エネルギーの消散を表すダッシュポット及び摩擦力を意味するスライダと呼ばれる機械的要素から構成される。

相互作用力モデルから接線方向・法線方向の相互作用力は接触点の変位量と要素間の相対速度の法線方向・接線方向成分を用いて以下の様に記述できる。

$$f_{nij} = -k_n \delta_{nij} - D_n v_{nij} \dots\dots\dots (1)$$

$$f_{sij} = -k_s \delta_{sij} - D_s v_{sij} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、相互作用力が引力として存在する場合は以下の補正を行う。

$$f_{nij} = f_{sij} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

また、接線方向相互作用力と法線方向相互作用力の比が摩擦係数を越えた場合、スライダにより以下の摩擦の条件が働く。

$$f_{sij} = \mu \left| \frac{f_{nij}}{f_{sij}} \right| \dots\dots\dots (4)$$

ここで法線方向変位  $\delta_n$ 、接線方向変位  $\delta_s$  は Fig. 2 に示す様に要素間で接触が発生し開始した点から法線方向・接線方向への変位である。また  $k, D$  はそれぞれ弾性係数、粘性係数、 $\mu$  は摩擦係数を示し、添字の  $n$  と  $s$  は法線、接線方向成分、 $i, j$  は要素の番号をそれぞれ示している。

法線成分変位量については接触する要素中心間の距離と要素半径の和との差から求めることができる。

接線成分変位量については要素間の接触が開始した点とその時点での接触点の間のベクトルと要素中心間のベクトル

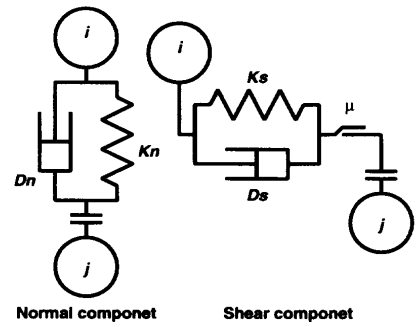


Fig. 1. Voight-Kelvin's rheology model.

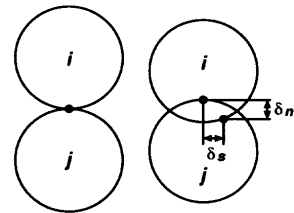


Fig. 2. Displacement of contact points.

より算出した。接触開始点の座標は要素間の接触開始時の要素の中心座標を保存し、中心座標の移動と要素の回転運動による変化を補正することにより算出した。一般に接線成分変位量を求める際には、接線方向変位の時間ステップごとの積算や接線方向の変化による補正が必要であるが、今回の計算方法を用いることによりそれらの作業が不要となり、要素の運動方程式の時間積分手法を自由に選択することができる。

法線方向弾性定数はHertz理論により次式から要素材料のヤング率とポアソン比を用いて算出される<sup>5)</sup>。

$$k_n = \frac{\sqrt{D_p} E}{3(1-\nu^2)} \dots\dots\dots (5)$$

一方で接線方向弾性係数は次式で算出される。

$$k_s = \frac{2\sqrt{D_p} G}{3(2-\nu)} \sigma^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

さらに法線方向粘性係数は要素間の反発係数より算出される。

$$D_n = -2 \frac{\log \varepsilon}{\sqrt{\pi^2 + (\log \varepsilon)^2}} \sqrt{mk_n} \dots\dots\dots (7)$$

ここで  $\varepsilon$  は反発係数、 $E$  はヤング率、 $\nu$  はポアソン比、 $D_p$  は要素直径をそれぞれ示す。法線方向粘性係数には明確な定義は無いが、便宜上法線方向と同等の値を用いた。弾性係数が大きい場合は計算が不安定になるため、積分時間ステップを小さくする必要があるが、弾性係数の解析値に与える影響が非常に小さいため、計算時間短縮のため後述する運動方程式の積分時間ステップとの兼合いにより値

を決定した。また粘性係数に関しては辻ら<sup>5)</sup>の解析例を参考に反発係数を0.9として算出した。

また要素間接触時の摩擦係数は斜面上に設置した石膏試験片が斜面を滑り落ちずに停止する最大の傾斜角を測定し、角度を摩擦係数へ変換した。

相互作用力モデルにより得られる相互作用力の総計は要素中心に作用するとして並進運動に寄与する応力とする。さらに接線方向成分応力の総計は要素の回転運動へも寄与するものとして扱った。

各要素に加わる相互作用力の総計を求めることにより、各要素について次式に示す運動方程式を導出することができる。

$$m_i \ddot{x}_i = \sum_j (f_{nij} + f_{sij}) + m_i g \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$I_i \ddot{\theta}_i = \sum_j N_{ij} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで  $m$  は要素質量,  $N, I$  は回転モーメントと慣性モーメント,  $x, \theta$  は変位, 角変位をそれぞれ示す。導出した運動方程式を各粒子ごとに時間積分することにより要素の時刻依存の位置・速度を得た。運動方程式の時間積分手法には4次のAdams-Moulton法を採用した。

### 3. 粉生成量推算モデルの開発

粉粒体は流動に伴う個々の要素間の接触により粉を生じる。そのため粉粒体の流動による摩砕粉生成量を推算するためには、粒子個々の衝突時における粉生成量を把握する必要がある。

同種の材料から成る2平面を一定速度・圧力下で接触させた場合、摩砕による粉生成速度は次式で与えられる<sup>6)</sup>。

$$Q = aAv^bS^c \quad \dots\dots\dots(10)$$

$v$  は試験片の接触相対速度,  $S$  は接触応力,  $A$  は接触面積,  $a, b, c$  は定数である。粉生成速度の算出は要素間の衝突時に粉生成速度式を用いて行う。粉生成速度式中の変数, 接触相対速度, 接触応力, 接触面積のうち相対速度は直接, 接触応力は相互作用力モデルから求めることが可能である。

要素間接触面積は要素間接触時における要素の重複部の面積から求めることも可能であるが、解析では計算の安定を目的として相互作用力モデルのパラメータに実際とは異なる値を用いているため、要素間の幾何学的位置に誤差が生じると考えられる。そこで本モデルでは要素が完全な球体かつ均質な材料であると仮定し、Hertz理論により接触点に生じる接触面の面積を算出することにした。Hertz理論により2つの球体間の接触面に生じる円の面積は次式で示される。

$$A_c = \pi \left\{ \frac{3}{8} F_n D_p \left( \frac{1-\nu^2}{E} \right) \right\}^{2/3} \quad \dots\dots\dots(11)$$

接触面積  $A_c$  を粉生成量速度式へ適用すると以下の式が得られる。

$$Q_c = aA_c^{1-c} v_s^b F_n^c \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここで求められる粉生成速度  $Q_c$  は接触点当たりの値であるため、接触する二つの要素に対して、それぞれ半分の粉生成速度を与えるものとした。要素ごとに粉生成速度の総計を採り、時間積分することにより粉生成速度の時間変化を推算することができる。

### 4. ドラム内粒子群摩砕実験

実験に用いた水平回転ドラムの模式図を Fig. 3 に示す。粒子の材料には、本来コークスを用いるべきであるが、コークスは加工性が低く成形が困難であるため、代替材料として石膏を採用し、成形時の石膏と水の混合比の異なる Gypsum A (密度  $1369 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 気孔率 0.405), Gypsum B (密度  $1320 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 気孔率 0.426) の2種類の石膏を用いた。石膏は品質が一定で加工性が高く、成形時の混合水量を変化させることにより異なる物性値の試料が得られるという利点を持つ。

実験に使用したドラムの大きさは直径40 cm長さ20 cmであり、ドラムの曲面部の壁面の材質はコンクリート、底面部の壁面には内部を観察できるように透明アクリル板を用いた。

水平ドラム内には直径15 mmの石膏粒子を1000個、層高約80 mmになるように装填し、回転速度5, 10および20 rpmでドラムを10分間回転し、容器回転中の粒子群の流動状態を観察した。石膏粒子については実験前と実験後に質量を測定し、実験前の質量と実験後の質量との差を摩砕粉生成量とした。実験後の質量の測定は回転停止後に石膏粒子を取り出し、水で洗浄・乾燥後に行った。

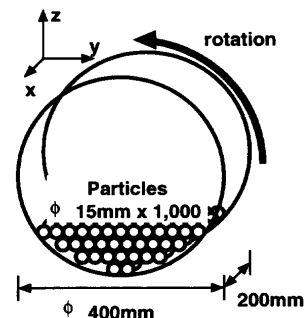


Fig. 3. Experimental apparatus of mutual friction of grinding rate for gypsum.



## 6. 結果と考察

### 6.1 流動解析結果

回転ドラムの回転速度を変化させた場合の粒子群の分布形態を Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 にそれぞれ示す。粒子群はドラムの円筒壁面に沿って両端の底面部分の壁面に平行となる様に整列し、ドラムの回転と共に壁面に沿って押し上げられドラム径の半分の高さまで達すると粒子層が崩壊する現象が見られた。崩壊した粒子群はドラム下部付近の領域で滞留・衝突を繰返し、粒子が存在する領域の左端へ落下した粒子から、再びドラム円筒壁面に追従して運動を開始した。

またドラム回転数が高い場合ほど粒子層の崩壊度合いが大きく各粒子の軌跡の長さが増加するという結果が得られた。しかし、粒子の軌跡の長さはドラムの回転数の違いほどには大きな差異が見られなかった。

### 6.2 粒子群分布

実験時の水平回転ドラム内の石膏粒子群の分布形態を

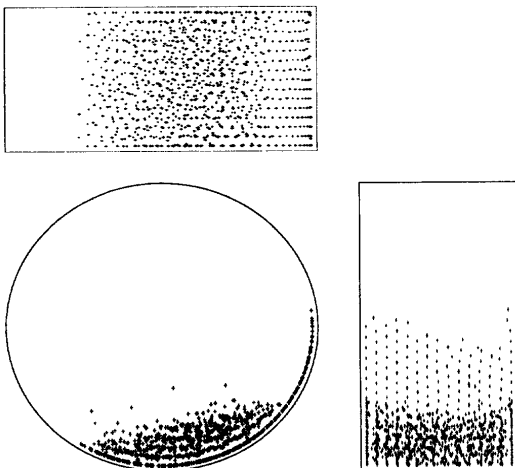


Fig. 7. Particle distribution within the rotary drum. (5 rpm, Gypsum A; Upper:  $y-x$ , Left:  $y-z$ , Right:  $x-z$ )

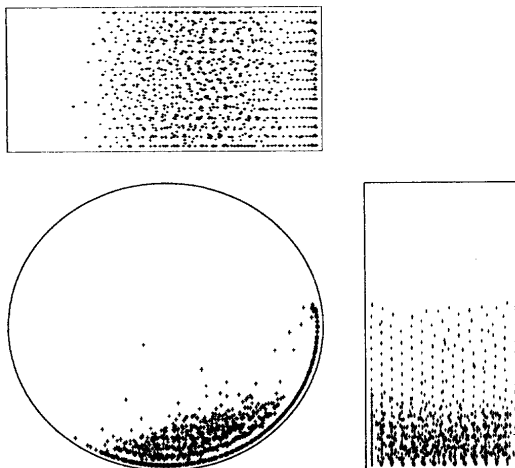


Fig. 8. Particle distribution within the rotary drum. (10 rpm, Gypsum A; Upper:  $y-x$ , Left:  $y-z$ , Right:  $x-z$ )

Fig.10に示す。解析結果に比べ粒子間の間隙が狭く、かつ運動形態も穏やかである。これは数値解析では粒子群を完全な球体と扱っているのに対し、実験に用いた粒子が不完全な球体であるため、その分だけ転がり抵抗が大きく、粒子の回転運動が円滑に発生しなかったことが原因と考えられる。

また粉粒体の安息角については実験値との間に誤差が生じた。これは Voight-Kelvin の粘弾性モデル内で定められた摩擦に関する式が、接線方向成分の法線方向成分に対する上限値を定めているにすぎず、摩擦による影響を過小に見積もっているためと考えられる。その結果、要素間に速度差が大きい程誤差が大きくなったものと思われる。

一方でドラム円筒壁面付近の粒子挙動に関しては、実験値と解析値の間には良好な一致が見られた。

### 6.3 粉生成速度

実験と解析によりそれぞれ得られた単位粒子質量当たりの粉生成速度を Fig.11, Fig.12 に示す。粒子材料が Gypsum A の場合には単位質量当たりの粉生成速度はどのドラムの回転速度においても実験結果と良好に一致した。一方、気孔率の小さい Gypsum B の場合はドラム回転速度が増加するに伴い、誤差が増加した。これは気孔率の小さい固い粒子の場合、モデルでは取り扱っていない体積破壊による粉生成量が、摩擦による粉生成量に比べて無視できない量に

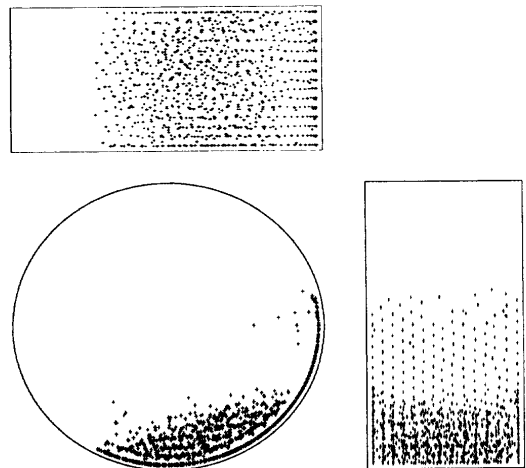


Fig. 9. Particle distribution within the rotary drum. (20 rpm, Gypsum A; Upper:  $y-x$ , Left:  $y-z$ , Right:  $x-z$ )



Fig. 10. Particle distribution in the experiment. (20 rpm)

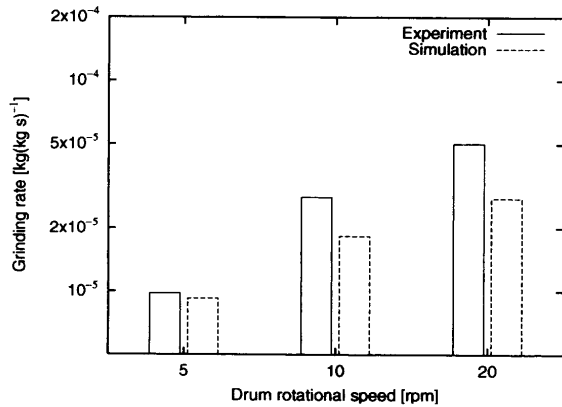


Fig. 11. Comparison with grinding rate of Gypsum A.

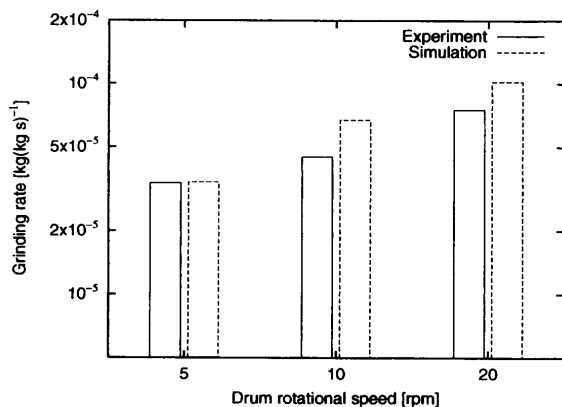


Fig. 12. Comparison with grinding rate of Gypsum B.

なったためと考えられる。そのため、より正確な粉生成速度を推算するためには、粒子間衝突時の摩擦による粉生成だけでなく体積破壊機構についても考慮する必要があると考えられる。

## 7. 結言

本報では離散要素法を用いた粉生成速度推算モデルの開

発を行った。またモデルの精度を検証するために、水平回転ドラム内における粒子群の流動に伴う粉生成速度を推算し、同条件の実験により得られた粉生成速度との比較を行った。

本論文で得られた知見を以下に示す。

(1) 気孔率の大きい材料を用いた場合、粉生成速度はどのドラムの回転速度においても実験と良好に一致したが、気孔率の小さい材料の場合はドラム回転速度が増加するに伴い、誤差が増大するという結果が得られた。これは気孔率の小さく固い粒子の場合、ドラムの回転速度が大きくなるに従い、モデルで考慮されていない体積破壊による粉の生成の比率が大きくなり、無視できなくなったためと考えられる。そのため、より正確な粉生成速度を推算するためには粒子間衝突時の体積破壊機構についても考慮する必要があると考えられる。

(2) 今回開発された粉生成速度推算モデルにより得られた粉生成速度はドラム回転速度が大きく体積破壊が無視できない条件では誤差を生じたものの、それ以外の条件においては実験結果と良好な一致が見られ、モデルの有用性が確かめられた。今後、試料にコークスを用いることにより、高炉下部のコークス粉の摩砕現象への応用が期待できる。

## 文 献

- 1) K.Yamaguchi, T.Uno, T.Yamamoto, H.Ueno, N.Konno and S.Matsuzaki: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 641.
- 2) P.C. Johnson and R.Jackson: *J. Fluid Mech.*, **176** (1987), 67.
- 3) J.T.Jenkins and E.Askari: *J. Fluid Mech.*, **223** (1991), 497.
- 4) P.A.Cundall and O.D.L.Strack: *Geotechnique*, **29** (1979), 47.
- 5) 辻 裕, 田中敏嗣, 川口寿祐: 離散粒子シミュレーション入門, 日本混相流学会, 大阪, (1996), 27.
- 6) P.J.Blau: *J. Mater. Sci.*, **27** (1992), 4732.