転動ミルにおける自生粉碎過程の DEM シミュレーション

DEM Simulation of Autogenous Grinding Process in a Tumbling Mill

石原 真吾^a, 曾田 力央^a, 加納 純也^a, 齋藤 文良^a, 山根 圭司^b

Shingo Ishihara, Rikio Soda, Junya Kano, Fumio Saito, Keiji Yamane

Received 11 October 2011; Accepted 11 November 2011

We have investigated on size reduction process in an autogenous (AG) grinding a solid in a tumbling mill with 12.1 cm in inner diameter and 14.7 cm in length. The model solid samples were two kinds of cubic shaped sugar particles, having 15 mm × 15 mm × 15 mm. The size reduction process of these samples was monitored by using DEM simulation as well as the experiment, both of which were conducted in ambient condition. As a result, the motion of the samples simulated has been shown by surface grinding model, and this grinding behavior explains fairly well the phenomena observed by the experiment. The fine particle production ratio observed by the experiment is in agreement quantitatively with that shown by the DEM simulation. Consequently, we have confirmed that the AG grinding process of the solid samples in the mill can be promoted by surface grinding under the present condition.

Keywords: Discrete Element Method, Autogenous grinding, Tumbling mill, Computer simulation

1. 緒 言

自生粉碎¹⁾は、ミル内で砕料自身の衝突、摩砕などの運動により微粉体を得る手法であり、完全に砕料のみを充填する“自生粉碎 (autogenous grinding)”と少量ながらボールやビーズなどの媒体を挿入するが多くは砕料を装てんして粉碎する“半自生粉碎 (semi-autogenous grinding)”の2つに分類される。その特徴は、媒体を使わないかあるいは少量使用による媒体の消費低減、媒体使用削減による媒体からの摩耗粉低減などが挙げられる。自生粉碎では砕料自身が媒体の役割も果たしており、粉碎の進行に伴い砕料の粒子径が小さくなると、粉碎の駆動力が徐々に減少する。そ

のため粉碎駆動力の維持のための原料供給のタイミング、粉碎プロセスの推移把握が必要になる。しかしながら、砕料の粉碎過程は、自生粉碎機の寸法や操作条件の他に、砕料物性にも深く関与しており、それらを網羅した解析が必要であるが、それを明確にする情報が不足している。従来の自生粉碎に関する研究は、Loveday ら²⁾による粉碎操作条件や岩石の種類の自生粉碎に及ぼす影響を検討した報告はあるが、砕料並びに粉碎条件が限定的であり、十分な情報とは言い難い。

一方、著者ら^{3, 4)}は、離散要素法 (Discrete Element Method) シミュレーションにより媒体ミルなどを用いた粉碎の最適操作条件決定法などを提案している。DEM シミュレーションは媒体の3次元運動を時間的、空間的に表示する手法であり、媒体を砕料に置き換えた場合、砕料のミル内での3次元運動が再現可能となる。そうなれば、これまで未解明であった砕料への負荷もシミュレーション可能になり、砕料粒子の破壊過程を模擬できる可能性がある。

そこで、本研究では、DEM を基盤として、砕料粒子を非球形粒子モデルとし、そのミル内での3次元

2011年度春期研究発表会 BP 賞受賞研究

^a 東北大学 多元物質科学研究所

(〒982-8577 仙台市青葉区片平2-1-1) TEL 022-217-5136
Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials,
Tohoku University
(2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 982-8577, Japan)

^b 近畿工業株式会社 開発部

(〒673-0443 兵庫県三木市別所町巴20番地 (本社/工場))
TEL 0794-82-0100
Kinki Industrial Co., Ltd.
(20 Tomoe, Bessyo, Miki, Hyogo 673-0443, Japan)

運動を解析し、非球形粒子が他の非球形粒子やミル壁と衝突することにより発生する衝突力から粒子の破壊過程を解析することを試みた。シミュレーション結果は実験結果と良好に一致し、表面粉碎により粉碎が進行する過程を再現することができた。また、微粉生成（剥離）率は粉碎時間とともに粉碎初期は急激に進行し、やがて定常状態に到達するなどの実験結果を得、シミュレーションにおいてもそれらを再現できることから、自主粉碎を解析する上で本シミュレーション手法が有用である可能性が示唆されたので、以下に報告する。

2. ミル内での非球形粒子の3次元運動のシミュレーション

2.1 DEMシミュレーション

DEMにより転動ミル内での砕料（非球形粒子群）の3次元運動をシミュレーションした。DEMは個々の粒子に働く接触力を、バネやダッシュポットでモデル化することにより求め、その運動を追跡する数値解析の手法である。Fig. 1にそのモデルを示す。ただし、接線方向には粒子接触に付随する摩擦力を表すために摩擦スライダーが挿入されている。粒子間の法線方向、及び接線方向の接触力 F_n 、 F_t はそれぞれ以下の式で表せられる。

$$F_n = K_n u_n + \eta_n \frac{\Delta u_n}{\Delta t} \quad (1)$$

$$F_t = \min \left\{ \mu F_n, K_t \Delta(u_t + r\varphi) + \eta_t \frac{\Delta(u_t + r\varphi)}{\Delta t} \right\} \quad (2)$$

ここで、 u 、 φ はそれぞれ着目2粒子間の相対変位、相対回転変位、 K 、 η 、 μ は、バネ定数、粘性定数、摩擦係数である。

2.2 剛体計算手法

自生粉碎において、時々刻々と変化する砕料形状を表現するため、田中ら⁵⁾の提案した剛体計算手法を用いる。通常のDEMにおいては、粒子を球形として計算を行うが、剛体計算手法では、複数の球形粒子を連結することで、任意の形状を表現することが可能である。剛体の運動は並進運動と回転運動に分解することができる。剛体の並進運動量 P は、剛体に働く力 F により以下のように計算される。

$$\frac{dP}{dt} = F \quad (3)$$

Fig. 1 Simulation model of interactive forces between two particles

並進運動量 P から $P=mv$ より、剛体の重心における並進速度 v を求める。ここで m は剛体の質量を表す。剛体に働く力 F により回転運動が発生し、角運動量を L とすると以下の式で表すことができる。

$$\frac{dL}{dt} = r \times F \quad (4)$$

ここで r は重心から力の作用点までのベクトルである。角運動量を用いて、角速度 w は以下のように計算される。

$$w = I^{-1}L \quad (5)$$

ここで、 I は慣性テンソルである。

2.3 表面粉碎モデル

一般に、砕料には微小な欠陥等の個体差があるので、同じエネルギーを与えた場合でも破壊する場合と破壊しない場合がある。しかしながら、それらをシミュレーションで表現するのは困難なため、今回は砕料粒子に一定以上の衝突エネルギー E が加わった場合に、その粒子が必ず剥離すると考え、 E は次式により算出した。ここで、 M は砕料の質量、 V は衝突時の相対速度である。 E のしきい値は砕料全体で同一であるとした。

$$E = \frac{1}{2}MV^2 \quad (6)$$

また、本モデルでは凝集現象は考慮していない。

3. 自生粉碎実験

3.1 実験条件

自生粉碎実験を行い、シミュレーション結果と比較することで、シミュレーションモデルの妥当性を検証する。砕料には二種類の角砂糖を用いた。砕料の物性値をTable 1に示す。ミルは、内径12.1cm、長さ

Table 1 Cubic sugar samples used in the experiment

	Sample to be ground	Mass (g)	Size (mm)
(A)	Nisshin sugar	About 3.4	15×15×15
(B)	Mitsui sugar		

Table 2 Operational grinding parameters

Parameter	Value
Sample filling ratio (%)	18
Rotational speed (rpm)	80~120
Milling time (min)	0~180

Fig. 2 Wear ratio as a function of grinding time for the two kinds of cubic sugar

14.7 cm の転動ミルを用いた。粉碎実験の操作条件を **Table 2** に示す。ミル容器を一定時間回転した後、砕料全量を取り出し、剥離率 (= 剥離して生成された微粉量/全砕料全量) を測定した。

3. 2 実験結果

Fig. 2 には 2 種類の角砂糖をミル回転速度 100 rpm で自生粉碎した際の粉碎時間と剥離率の関係を示す。(B) の方が (A) よりも剥離率が大きく、(B) の角砂

Fig. 3 Wear ratio as a function of grinding time, depending on the rotational speed**Table 3** Parameters in the simulation

Parameter	Value
Time step (s)	2×10^{-6}
Frictional coefficient (Particle-Particle) (—)	0.5
Frictional coefficient (Particle-Wall) (—)	0.1
Density of particle (kg/m^3)	1924
Diameter of particle (mm)	3
Number of particles (—)	$5 \times 5 \times 5$
Threshold of impact energy (J)	2×10^{-4} , 7×10^{-4}

(a) Experiment

(b) Simulation

Fig. 4 Motion of cubic sugar sample in the mill chamber

糖の強度が相対的に弱いといえる。

Fig. 3 には角砂糖 (B) を用いて、各回転速度における粉碎時間と剥離率の関係を示す。いずれの回転速度においても、粉碎時間の経過により剥離率が上昇し、その後上昇率が低下する。また、回転速度の増加により、粉碎初期の剥離率の時間変化の傾きが大きくなっていることがわかる。

4. シミュレーション結果との比較及び考察

4. 1 モデルの妥当性の検証

転動ミル内における角砂糖の自生粉碎における各砂糖の運動をシミュレーションした。シミュレーションで用いた物性値を **Table 3** に示す。

Fig. 4 (a) には角砂糖の自生粉碎実験による角砂糖のミル内運動の観察結果、(b) には角砂糖のミル内運動のシミュレーションによる運動の様子を示す。シミュレーションにおいて、粒子の色は砂糖塊の構成粒子数を表している。すなわち、大きな塊は赤色に近く、小さな塊は青色に近づく。**Fig. 4** より、ミルの回転に伴い砂糖塊が持ち上げられ、あるところで壁から離れなだれ下降していることがわかる。一方、シミュレーションでは、モデルの摩擦係数は、実験における砂糖塊のミル内上昇高さと同様に決定したが、砕料がなだれ下降する際に示す動的安息角は実験結果とよく一致しており、角砂糖の運動は DEM シミュレー

Fig. 5 Shape of the cubic sugar samples before and after grinding

Fig. 6 Wear ratio as a function of grinding time, depending on the impact energy of cubic sugar samples in the mill

ションでよく再現できるといえる。また、シミュレーション結果より、粉碎時間の経過により砂糖塊が徐々に表面粉碎され崩壊し、形状を変化させている様子がわかる。

Fig. 5 には、実験とシミュレーションにおける粉碎前後の碎料の様子として、左から粉碎前、短時間の粉碎後、長時間の粉碎後を示す。実験では、粉碎前の角砂糖は立方体形状であるが、粉碎時間の経過とともに角砂糖はそれ自身あるいはミル壁との衝突により徐々に角が取れ、球状に近づくようになることがわかる。一方、シミュレーションの結果においても実験と同様、粉碎時間と共に粒子形状は立方体から球形に変化する傾向にあり、その過程は表面粉碎により碎料の粉碎が進行することがわかる。

4. 2 シミュレーション結果

Fig. 6 には、衝突エネルギーのしきい値を変化させたときの粉碎時間と剥離率の関係を示す。**Fig. 6** より、衝突エネルギーのしきい値が上昇することで剥離率の上限が減少し、粉碎初期の傾きが小さくなることがわかる。衝突エネルギーのしきい値は碎料の強度と対応し、その値が高いほど強度が強いといえる。衝突エネルギーのしきい値には、実験結果と良く相関する値を

Fig. 7 Wear ratio as a function of grinding time, depending on the rotational speed of the mill

用いた。

Fig. 7 には、ミル回転速度を変化させた時の粉碎時間と立方体碎料の剥離率の関係を示す。**Fig. 7** では、**Fig. 2** と同様に粉碎時間の増加に伴い剥離率が上昇し、一定の値に漸近する。また、ミル回転速度の上昇に伴い剥離率の上限が上昇し、粉碎初期の傾きが大きくなっていることがわかる。

これらシミュレーション結果と実験結果の比較から、実験により得られた碎料の粉碎過程が定性的に再現できたといえる。ただしこの関係は、現時点では定量的には実験と一致しない。その理由として、碎料を構成する1次粒子径が挙げられ、シミュレーションでは計算負荷低減から構成粒子径を3mmとしたが、実験で検証した角砂糖から剥離した微粉は3mmより細かく、両者の違いが定量的な一致の阻害要因と考えられる。また、角砂糖は個々の強度のばらつきが大きく、シミュレーションでもそのことを考慮する必要があると考えられる。その方法として、角砂糖を構成するそれぞれの粒子に異なる衝突エネルギーのしきい値を持たせること等を検討中である。

5. 結 言

本研究では自生粉碎における碎料の粉碎過程を解析するため、非球形粒子として立方体を想定し、その粒子の転動ミル内における運動をDEMを用いてシミュレーションした。一方、実験では角砂糖を碎料とし、シミュレーションと同じ条件での転動ミルによる角砂糖の自生粉碎を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. 立方体碎料の転動ミル内での3次元運動がシミュレーションでき、その結果は、角砂糖を碎料

とした自生粉碎におけるミル内運動と良好に一致した。

2. 自生粉碎における立方体砕料の粉碎過程のシミュレーション結果より、砕料は表面粉碎により進行することが判明し、そのことは実験によっても確認できた。

3. 自生粉碎による立方体砕料の剥離率の変化は、シミュレーションによって定性的に再現することができた。

なお、今後は、砕料を構成する1次粒子の粒径や凝集力を正確に模擬できるモデルを考慮し、自生粉碎による砕料の粉碎過程をより詳細に把握する所存である。

References

- 1) Wills, B. A.: "Mineral Processing Technology", 4th Edition, pp. 596-634, Pergamon Press, Toronto (1988)
- 2) Loveday, B. K. and D. Naidoo: "Rock abrasion in autogenous milling", *Minerals Eng.*, **10**, 6, 603-612 (1997)
- 3) Kano, J., N. Chujo and F. Saito: "A method for simulating the three-dimensional motion of balls under the presence of a powder sample in a tumbling ball mill", *Adv., Powder Technol.*, **8**, 39-51 (1997)
- 4) Soda, R., J. Kano and F. Saito: "Analysis of effect of Pin Configuration on Beads Motion in a Stirred Mill by DEM", *J. Soc. Powder Technol. Japan*, **46**, 180-186 (2009)
- 5) Tanaka, M., M. Sakai and S. Koshizuka: Transactions of JSCES, Paper No. 2007007 (2007)