

# 離散要素法シミュレーションによる 鉄鉱石造粒過程の解析

加納 純也\*・葛西 栄輝\*・齋藤 文良\*・川口 尊三\*<sup>2</sup>

Numerical Simulation Model for Granulation Kinetics of Iron Ores Based on Discrete Element Method

Junya KANO, Eiki KASAI, Fumio SAITO and Takazo KAWAGUCHI

**Synopsis :** A numerical simulation model was developed to analyze the granulation kinetics by using the Discrete Element Method (DEM). The experiment of granulation was performed to understand the actual granulation behavior of iron ore particles. The granulation rate goes up with a decrease in a particles charge ratio and with an increase in a rotational speed of a drum mixer in the experiment. The granulation could be consisted of two processes: One is “a growing process” and the other is “a breaking process”. The former would be related to the rotation of granules and the latter would be dependent on the impact, which granules receive from others and/or a drum mixer wall. Then the rotational kinetic energy and the impact energy of a granule were calculated by using the DEM simulation. A granulation energy composed of both the impact energy and the rotational kinetic energy was proposed for analyzing the granulation kinetics. It increases as the rotational speed of the drum mixer rises and as the granule charge ratio drops. The granulation energy would be correlated with the actual granulation process. When the drum mixer diameter becomes large, the granulation energy decreases. When the drum mixer is leaned, the granulation energy becomes larger than at the lean of 0 degrees. That is, the drum mixer has a possibility to improve a granulation process. When the drum mixer is leaned further, the granulation energy rapidly decreases at the lean of 60 degrees. This means that the optimum leaning angle must exist.

**Key words:** granulation; iron ore; drum mixer; impact energy; rotational kinetic energy; growing process; breaking process; DEM.

## 1. 緒言

鉄鉱石の焼結プロセスでは、まず原料をドラムミキサーにより造粒（擬似粒子化）した後、焼結機に装入し、ケーキと呼ばれる多孔質体の焼成体とし、これを破碎して焼結鉱とする。擬似粒子のサイズや構造は、焼結過程における通気性や反応性を支配し、焼結鉱の品質や生産性に大きく影響するため、従来よりその設計や制御に関する研究、開発が行われてきた。さらに、今後予想される原料の性状変化に柔軟に対応しつつ、品質や生産性を維持するための研究が継続して行われている。焼結原料の造粒に関しては、これまで擬似粒子径ならびにその分布を制御すべく、ドラムミキサーの操作条件、ドラムミキサー内での粒子の運動、水分の影響など様々な観点から追究されてきた<sup>1-10)</sup>。ところが、原料の造粒過程は極めて複雑であるために、定量的な現象の把握が困難であり、現在も経験に頼るところが大きい。

通常、造粒はドラムミキサーを用いて、散水しながら行われる。このとき造粒現象にはドラムの内径や長さ、回転速度、原料装入量、散水量など多くのパラメータが関与す

る。このような複雑な現象の把握には、コンピュータシミュレーションが大きな威力を発揮する。本研究では、粒子一つ一つの運動を追跡するシミュレーション法（離散要素法 (DEM)<sup>10-12)</sup> を造粒現象に適用し、ドラム内の粒子の運動を解析し、造粒現象を支配する因子を明確にすると共に、造粒速度についての解析を試みた。

## 2. マラマンバ鉱の造粒実験

### 2.1 実験方法

マラマンバ鉱石に10.8wt%の水分を添加し、高速攪拌ミキサーにて1min攪拌した。この原料を内径600mm、幅200mmのバッチ式小型ドラムミキサーに装入し、造粒した。造粒時間は、1~34分とし、回転数は、臨界回転速度に対する比で0.2, 0.4, 0.6とした。占積率は、8.8, 17.6, 35.2%の3種類とした。所定時間造粒後、約500gに縮分した原料の粒度分布を測定した。Fig. 1に使用した原料の粒度分布を示す。

### 2.2 実験結果

Fig. 2(a)に造粒物のメディアン径の時間変化を示す。メ

原著論文：ISIJ Int. Vol. 45 (2005), No. 4, pp. 500-505

平成18年4月12日受付 平成18年5月10日受理 (Received on Apr. 12, 2006; Accepted on May 10, 2006; originally published in ISIJ Int., Vol 45, 2005, No. 4, pp. 500-505)

\* 東北大学多元物質科学研究所 (Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku Sendai 980-8577)

\*<sup>2</sup> 住友金属工業 (株) 総合技術研究所 (R&D, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

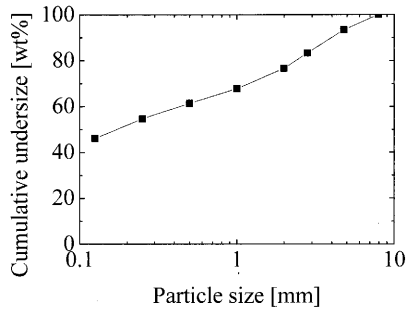
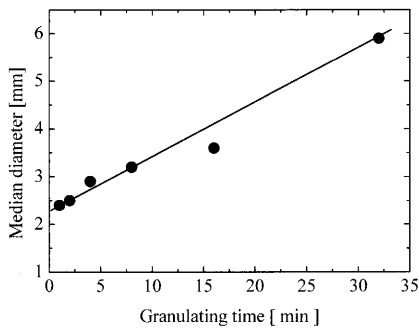
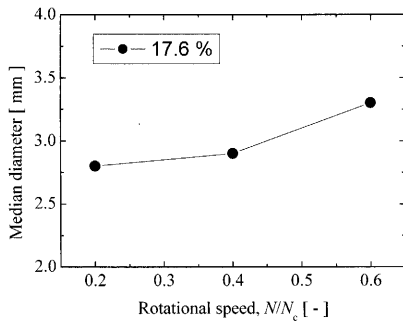


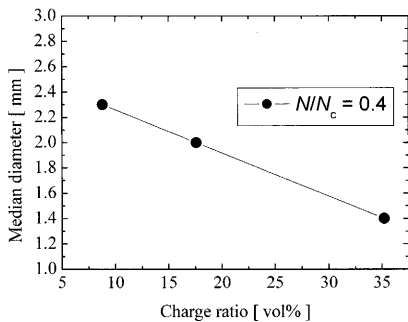
Fig. 1. Particle size distribution of the iron ore.



(a) Effect of granulation time.



(b) Effect of rotational speed of drum mixer.



(c) Effect of charge ratio

Fig. 2. Effect of granulation time, rotational speed of drum mixer and particle charge ratio on the median diameter of granules.

ディアン径は造粒時間とともに線形的に増大している。このことから、この範囲では造粒は一定速度で進行しているといえる。Fig. 2(b), (c) に造粒時間4分の造粒物のメディアン径とドラム回転速度ならびに原料占有率との関係をそ

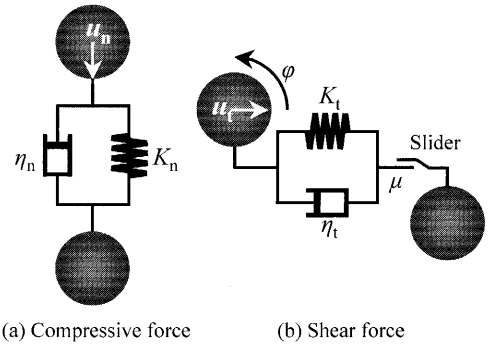


Fig. 3. Simulation model.

れぞれ示す。図中の  $N/N_c$  は臨界回転速度<sup>22)</sup> に対する回転速度の比である。擬似粒子のメディアン径、すなわち造粒速度は、回転速度が大きくなるにしたがい大きくなり、原料占有率が小さくなるほど大きくなるのがわかる。

造粒プロセスは、二つのプロセスから構成されていると考えられる。一つは、“粒子成長プロセス”。もう一つは、“粒子破壊プロセス”である。粒子成長プロセスが支配的になれば、粒子は、もちろん、成長すると考えられる。一方、粒子破壊プロセスが支配的になれば、粒子は成長しないことになると考えられる。

### 3. 離散要素法によるドラム内鉄鉱石流動のシミュレーション

#### 3.1 造粒過程のモデル化

本研究で適用する離散要素法 (DEM) は、粉体のシミュレーション法として最も信頼性の高い方法の一つであり、ボールミリング、流動層、貯層内粒子群の挙動など様々な粉体現象に適用され、粒子の動きの解析や予測に大きな役割を果たしている<sup>11-21)</sup>。DEM のシミュレーションモデルを Fig. 3 に示す。このシミュレーションモデルは、粒子間の相互作用力を示しており、法線方向と接線方向に分けてモデル化されている。法線方向は、スプリングとダッシュポットで構成されており、それぞれ粒子の弾性的性質、非弾性的性質を表している。接線方向には、スプリング、ダッシュポットに加え、スライダが導入されている。これは、粒子間の摩擦を表したものである。この相互作用力に基づき粒子一つ一つの動きを追跡し、粒子群全体の挙動をシミュレーションする方法である。

DEM により鉄鉱石造粒過程のシミュレーションを行うモデルとしては、以下の2つが考えられる。1つは、ドラム内の鉄鉱石の単一粒子をモデル化しすべての運動を追跡する方法 (Fig. 4(a))、もう1つは造粒された粒子を1つの粒子にとらえたモデル化で、その運動を追跡する方法である (Fig. 4(b))。前者は、造粒物単体の形成メカニズムの解析までも含み極めて精緻と考えられるが、考慮すべき粒子数が多すぎて計算時間が膨大となるため、現状では非現実

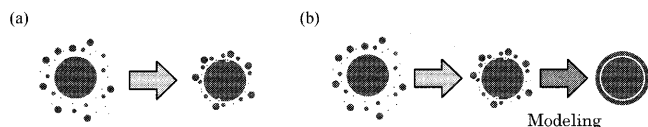


Fig. 4. Simulation model of granulation process.

Table 1. Simulation conditions.

|  |                     |                      |
|--|---------------------|----------------------|
| Drum diameter                              | 100                 | [mm]                 |
| Drum length                                | 50                  | [mm]                 |
| Granule diameter                           | 2.5                 | [mm]                 |
| Granule density                            | 2.0                 | [g/cm <sup>3</sup> ] |
| Time step                                  | 3x10 <sup>-6</sup>  | [s]                  |
| Coefficient of friction                    | 0.7                 | [-]                  |
| Young's modulus                            | 2.2x10 <sup>9</sup> | [Pa]                 |
| Rotational speed ratio to the critical one | 0.2, 0.4, 0.6       | [-]                  |
| Charge ratio                               | 10, 20, 40          | [vol%]               |
| Number of granules                         | 2881, 5762, 11524   | [-]                  |

的である。一方、後者は造粒物集団の運動を解析するだけならば、簡単かつ有効と考えられる。そこで、本研究では後者の擬似粒子の運動を追跡する方法を採用する。

一般に実機焼結機では、内径 2~6m、長さ 10~30m、傾斜角 1.6~5.0 度程度 of 円筒型ドラムミキサーが採用されている。ドラム片端から原料を投入し、逆の片端から造粒物が排出される連続処理システムになっている。このドラムミキサーにあっては、ドラムの内径と回転速度は一定であっても、占有率（ドラム体積に対する原料体積の比率）はドラム軸方向において、必ずしも一定ではない。ここでは、ドラムの径方向断面を抜き出し、そのドラム要素内でのパラメータと造粒物粒子の運動を解析した。すなわち、パラメータとしては原料占有率と回転速度があり、これらの影響について検討した。さらに、ドラム径や回転運動の傾斜角度（水平レベルとなす角）も変更したシミュレーションを実施した。

その他のシミュレーションでの仮定は、次の通りである。

- 1) 造粒物は球形で、造粒物径は均一、
- 2) 計算中において造粒物径ならびに摩擦係数などの物性値は変化せず一定。
- 3) 水分の影響は直接考慮していない。計算条件は Table 1 の通りである。

### 3.2 ドラムミキサー内での粒子の運動

ドラムミキサー内の造粒物の運動を Fig. 5 に示す。造粒物はドラムミキサーの回転にともなってミキサー上部に持ち上げられ、そこから、造粒物堆積斜面に沿って転動し、再び回転ドラム壁に沿って上部へと持ち上げられるという循環運動をしている。粒子の造粒においては、このような運動パターンが重要である。しかし、ドラムミキサー内で活発に粒子が運動すると、折角成長した粒子が破壊されてしまう。一方、ドラムミキサーの回転にともなって粒子が持ち上げられなければ、粒子は運動せず、粒子も成長しない。したがって、造粒物がよく循環する運動が重要な鍵を握っている。

Fig. 6 には、ドラムミキサーの回転速度を変化させた場

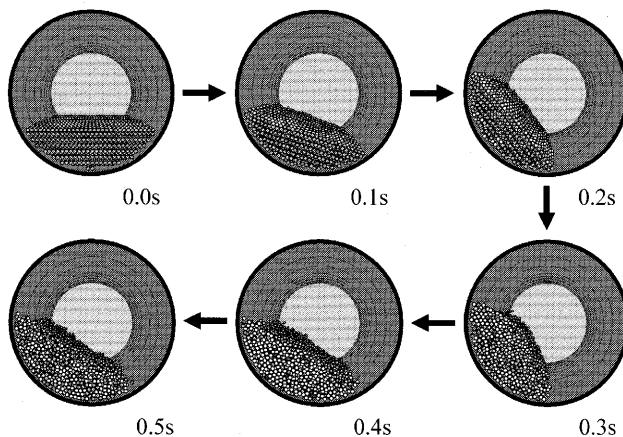


Fig. 5. Granule behavior simulated by DEM.

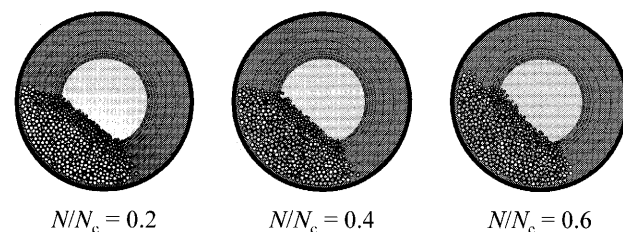


Fig. 6. Snapshots of granule motion in the drum mixer for different rotational speeds.

合の擬似粒子の運動の様子を示す。いずれの回転速度でも擬似粒子は激しく飛び跳ねることなく循環運動をしている。回転速度が大きくなるにしたがって、最大到達点の高さが高くなっていることがわかる。さらに詳しく観察するために、運動エネルギーならびに粒子の回転エネルギーの時間変化を算出した。それらを Fig. 7 に示す。ドラムミキサー回転直後に、運動エネルギー、回転エネルギーともに急激に上昇し、その後、急激に落下する。これを数回繰り返した後に、徐々に安定していく。そこで回転開始後、2~3秒の運動エネルギーと回転エネルギーの平均を算出し、Fig. 8 に示す。Fig. 8 には占有率を変化させた場合の結果も合わせて示した。これらのエネルギーは粒子一個あたりの値として示した。ドラムミキサーの回転速度が大きくなると、運動エネルギー、回転エネルギー共に増加する。一方、占有率が大きくなると、運動エネルギーは、増加するが、回転エネルギーは減少する。回転エネルギーが減少するのは次のように考えられる。基本的に回転エネルギーが大きいのは、堆積斜面の表層にある粒子である。占有率が大きくなると、表層に存在する粒子の割合が減少するからである。

### 3.3 造粒に関するパラメータ

粒子が回転すると、周りにある微粒子は、雪だるまを作るかのように付着していくであろう。一方、大きい運動エネルギーを持った粒子が、他の粒子や壁にぶつかると壊れてしまうと考えられる。造粒を進行させるためには、粒子がよく回転するようにし、かつ激しい衝突を減らすことが

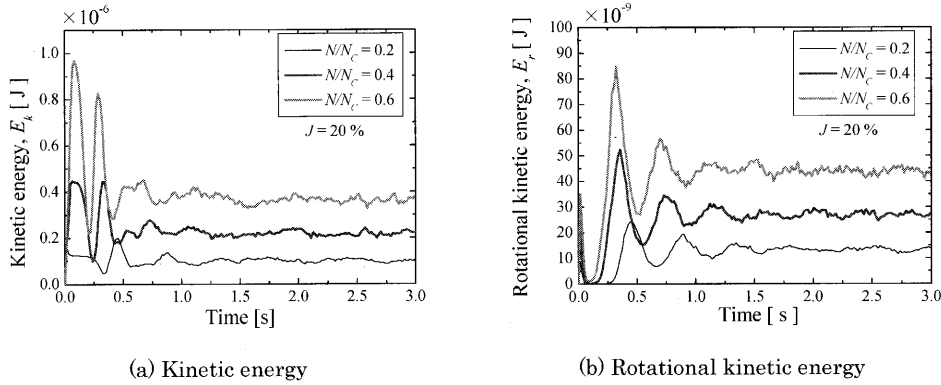


Fig. 7. Changes in the kinetic energy and rotational kinetic energy with time.

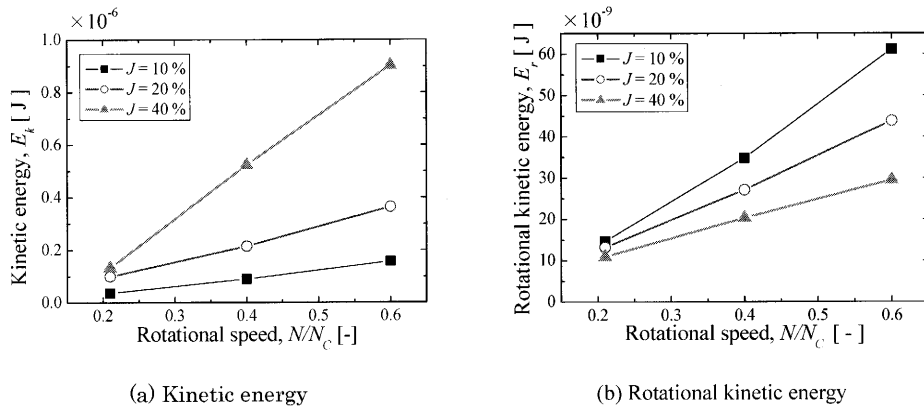


Fig. 8. Effects of the rotational speed of drum mixer on kinetic energy and rotational energy.

重要であると考えられる。したがって、造粒プロセスは、粒子成長プロセスと破壊プロセスの二つから構成されているものと考え、それぞれに対応する物理量として、回転エネルギーと衝突エネルギーに着目する。回転エネルギーが大きくなれば、造粒は進む方向に、衝突エネルギーが大きくなれば、造粒は進まない方向に作用することとなる。なお、衝突エネルギーは、次式より、算出した<sup>20,21)</sup>。

$$E_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m v_r^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $m$  は擬似粒子の質量、 $n$  は衝突回数、 $v_r$  は衝突時の相対速度の法線方向成分である。

衝突エネルギーを Fig. 9 に示す。回転エネルギーはすでに、Fig. 8(b) に示した。衝突エネルギーは、回転速度の増加にともない大きくなる。一方、占有率が大きくなると、若干ながら衝突エネルギーも大きくなる傾向にある。Fig. 2 に示した造粒物のメディアン径と占有率の関係では、占有率が大きくなるにしたがい、メディアン径は小さくなっていた。これは、衝突エネルギー増加したことよりも、回転エネルギーが減少したことが主要因だと考えられる。

造粒物の衝突エネルギーも回転エネルギーもドラムミキサーの回転速度が大きくなると大きくなる。そこで、造粒プロセスを一つのパラメータで表す必要がある。回転運動

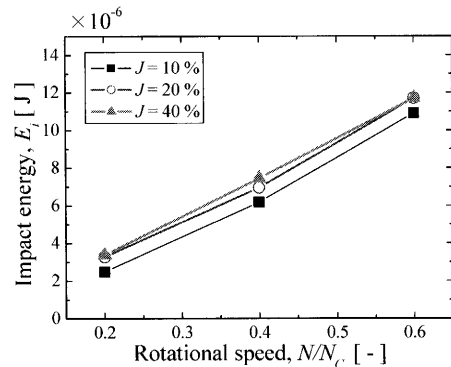


Fig. 9. Impact energy as a function of rotational speed.

エネルギーは、造粒を進行させる方向に、衝突エネルギーは造粒を妨げる方向に作用するので、両エネルギーの比である (2) 式の  $G'$  指数を定義した。

$$G' = \frac{E_r}{E_i} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $E_r$ 、 $E_i$  は、それぞれ回転エネルギーと衝突エネルギーである。ただ、この  $G'$  だと実験結果との対応が良好でなかったので、さらに回転エネルギーを乗算し、造粒指数として定義した。

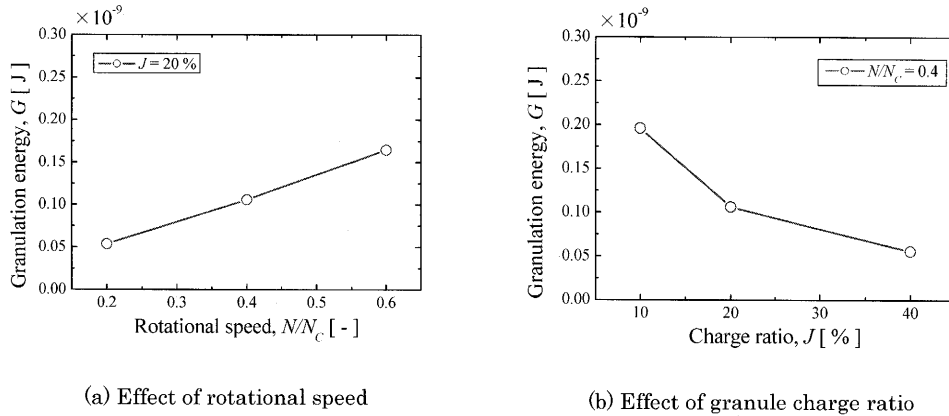


Fig. 10. Granulation energy as functions of rotational speed of drum mixer and granule charge ratio.

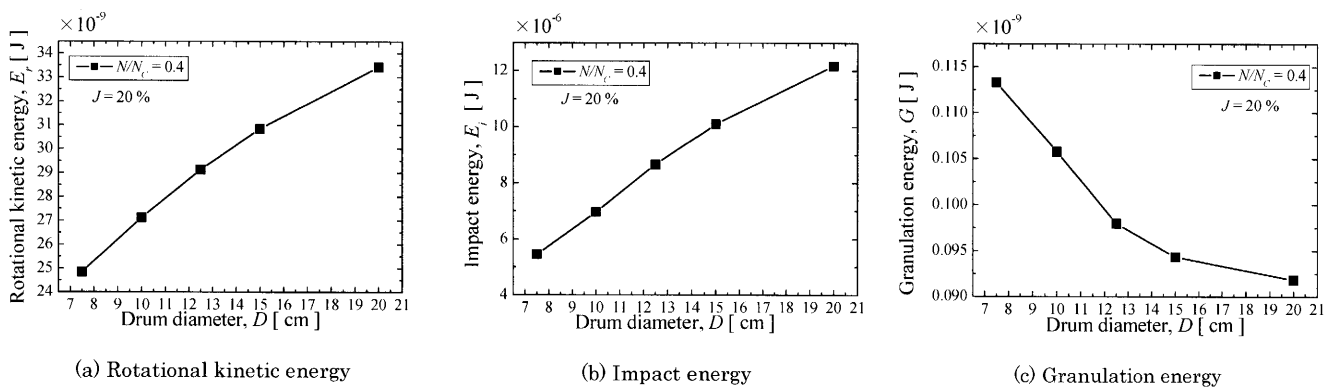


Fig. 11. Effects of drum mixer diameter on three energies.

$$G = \frac{E_r}{E_i} E_r \dots\dots\dots (3)$$

この造粒指数を Fig.10(a), (b) に示す。Fig.10(a) は、ドラムミキサーの回転速度の影響、Fig.10(b)は、占有率の影響である。それぞれ実際の実験結果である。Fig. 2(b), (c) と比べるとその傾向は、それぞれ一致していることがわかる。この造粒指数は、造粒プロセスをよく表しているといえる。

### 3.4 ドラムミキサー径の影響

コンピュータシミュレーションでは、容易に様々な因子の影響について検討することができる。そこで、ドラムミキサーの径を大きくした場合について考察する。Fig.11(a), (b), (c) にドラムミキサーを大きくしたときの回転エネルギー、衝突エネルギー、造粒指数をそれぞれ示す。このときの条件は、占有率  $J=20\%$  で比回転速度  $N/N_c=0.4$  である。ドラム径が大きくなると、回転エネルギー、衝突エネルギーともに増加し、運動状態が激しくなることがわかる。これに対し、造粒指数は、ドラムミキサーの径が大きくなるにしたがい、小さくなる。この結果は、ドラムミキサー径の小さな模型実験で良好な造粒物が得られたとしても、実機のような径の大きなミキサーになると同様に良好な造粒物が得られない可能性を示唆している。ドラム径の影響については、大径の方が造粒速度が大きいとする考えと、逆に小さいとする考え<sup>24)</sup>があり、一致した見解に至って

いない。本検討では、ドラム径が70~200mmまでの極めて小径条件での検討であり、メートルサイズでも同様の傾向があるのかは重要で、今後、本手法を展開し、明確にせねばならない課題である。

### 3.5 垂直面でない循環運動の影響

ドラムミキサーや皿型造粒機では必ずしも垂直面で循環運動をしているわけではない。当然ながら傾斜状況の応じて造粒物の運動状態が異なるので、回転エネルギー、衝突エネルギー、造粒エネルギーに与える影響について検討した。それぞれを Fig.12 に示す。回転エネルギーは、傾斜角が大きくなるにしたがい、大きくなり、60度になると急激に減少する。回転エネルギーが傾斜角の増加とともに大きくなるのは、傾くことにより、堆積斜面表層にある粒子の割合が増加し、回転しやすくなったためと考えられ、一方、60度で急激に減少するのは、傾き角が大きくなりすぎたため、ポテンシャルエネルギーが小さくなり、造粒物が転げ落ちなくなってしまったためと考えられる。

衝突エネルギーは、傾斜角が大きくなるにしたがい、減少し、60度になると急激に小さくなる。これは、傾斜角が大きくなると、ポテンシャルエネルギーが小さくなっていくことが主要因だと考えられる。

造粒指数は、傾斜角が大きくなる大きくなり、45度で最大値を示し、その後減少へと転じる。

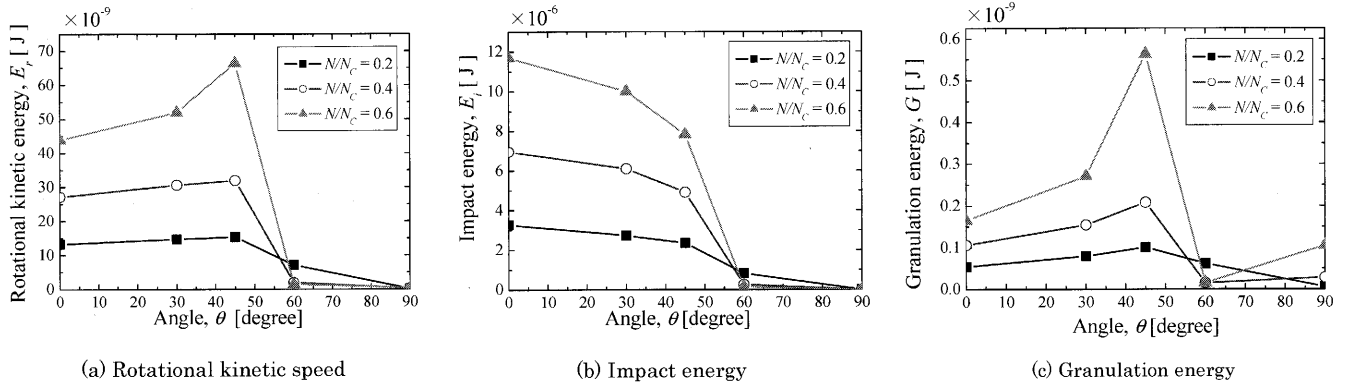


Fig. 12. Effect of lean of the drum mixer on three energies.

もちろん、ドラムミキサーにあつては傾斜角 5 度以下なので、実質的には傾斜角の影響は無視しうる程度であるが、転動造粒における傾斜角度は重要なパラメータである。従つて、傾斜角を大きく制御できる皿形造粒機が使用されているが、本結果は、皿型造粒機における傾斜角度の影響傾向とよく一致している<sup>23)</sup>。このように本シミュレーションにあつては、ドラムミキサーばかりでなく、皿型造粒機にあつても運動状態の解析が可能である。

#### 4. 結言

マラマンバ鉱石を用いたドラムミキサー造粒実験と離散要素法シミュレーションによる造粒物の運動解析を実施した。その結果、次の知見を得た。

- (1) 造粒速度は、比回転速度が大きくなるほど、また占有率が小さくなるほど、大きくなる。
- (2) 造粒物の回転エネルギーと衝突エネルギーの関数である造粒指数は、比回転速度が大きくなるほど、また占有率が小さいほど大きくなる。
- (3) 造粒指数は造粒実験結果と相関しており、造粒プロセスの予測に非常に重要な指標となりうる。
- (4) 比回転速度を一定にしてドラムミキサー径を大きくすると、造粒指数は減少する。
- (5) 循環運動する断面を傾斜させると、造粒指数は増加し、45 度で最大値を示した後、急激に減少する。

#### 文 献

1) N.Sakamoto: *ISIJ Int.*, **42** (2002), 834.

- 2) N.Ouchiyama and T.Tanaka: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **21** (1982), 29.
- 3) N.Ouchiyama and T.Tanaka: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **21** (1982), 35.
- 4) P.C.Kapur and D.W.Fuerstenau: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **8** (1969), 56.
- 5) M.Matsumura and T.Kawaguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 86.
- 6) Y.Hosotani, N.Konno, J.Shibata, T.Sato and H.Suzuki: *Tetsu-to-Hagané*, **81** (1995), 34.
- 7) *Zouryu Handbook*, Nihonfuntakougogyojutsukyokai, O-musha, (1991), 143.
- 8) I.Mekiguchi and H.Tohata: *J. Chem. Eng.*, **32** (1968), 1012.
- 9) T.Moriwaki: *J. Soc. Powder Technol. (Jpn.)*, **25** (1988), 150.
- 10) T.Ogawa, K.Ishino and Y.Sawahata: *J. Soc. Powder Technol. (Jpn.)*, **9** (1972), 153.
- 11) P.A.Cundall and O.D.L.Stack: *Geotechnique*, **29** (1979), 47.
- 12) H.Kiyama and H.Fujimura: *Proc. Jpn. Soc. Civ. Eng.*, **133** (1983), 333.
- 13) *Funtai Simyureishon Nyuumon*, Funtai Kougakkai, (1998).
- 14) J.Kano, F.Saito, A.Shimosaka and J.Hidaka: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **23** (1997), 687.
- 15) J.Hidaka, J.Kano and A.Shimosaka: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **18** (1995), 78.
- 16) T.Kawaguchi, T.Tanaka and Y.Tsuji: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **61** (1995), 71.
- 17) S.Yuu, T.Abe, T.Saitoh and T.Umekage: *Adv. Powder Technol.*, **6** (1996), 259.
- 18) B.K.Mishra and R.K.Rajamani: *Kona*, **8** (1990), 92.
- 19) J.Kano, F.Saito, A.Shimosaka and J.Hidaka: *J. Chem. Eng., Jpn.*, **31** (1998), 936.
- 20) J.Kano and F.Saito: *Powder Technol.*, **98** (1998), 166.
- 21) J.Kano, H.Mio and F.Saito: *AIChE*, **46** (200), 1964.
- 22) *Zouryu Handbook*, Nihonfuntakougogyojutsukyokai, O-musha, (1991), 149.
- 23) *Zouryu Handbook*, Nihonfuntakougogyojutsukyokai, O-musha, (1991), 142.
- 24) N.Oyama, H.Sato, K.Takeda, T.Ariyama, S.Masumoto, T.Jinno and N.Fujii: *ISIJ Int.*, **45** (2005) 817.