粒状固体材料の粉体物性と粉砕性の関係

小 竹 直 哉,* 平 川 翔,** 八 木 則 彦***

Relation between Powder Properties and Grindability in a Particulate Material

Naoya KOTAKE[†], Sho HIRAKAWA^{††}, and Norihiko YAGI^{†††}

Comminution is an important mechanical operation in the many industries that treat particulate solid materials. The grindability or the grinding resistance (e.g. Work index, Hardgrove grindability index) of the solid material are useful for evaluating the energy efficiency of the grinding processes, the grinding circuits and the grinding machines. It is difficult to measure the grindability from the point of the view of the measuring processes, time or the cost of the testing machine. Measuring powder properties (ex. void fraction, angle of repose) is easy in comparison with determining grindability or grinding resistance.

We investigated the relationship between powder property and grindability in a particulate solid material. The solid material used was mono-sized quartz particles which were classified by dry and wet screening. The powder properties measured were the void fractions of the particle bed, with and without tapping, and the angle of repose of the particles. The grindability was defined by the mass of ground products less than the feed size per unit of crushing energy. This was determined by the compressive crushing test of the particle bed. We were able to define the correlation between the powder properties tested and the grindability; that is, we found that it was possible to evaluate the grindability or the grinding resistance of a particulate material by measuring the powder properties.

Key Words : Void Fraction, Angle of Repose, Compressive Crushing, Grindability, Quartz Particle

1. はじめに

粉砕操作は、鉱工業、エネルギー、素材開発、食料、医薬など多様な分野で利用され、処理量の大きさから粉砕装置本体や分級装置等を含む回路全体の使用方法が、エネルギー（電力）消費量と製造コストに影響する重要な操作の一つと考えられる。

固体材料の粉砕性の指標である仕事指数¹⁾やハードグローブ指数²⁾は、実操業における粉砕装置や粉砕回路のエネルギー効率を評価するときに有効であるが^{3,6)}、一定規格に基づく指数であり、厳密な測定方法より求めるために時間や手間がかかる。両指数は、相関関係があり^{7,9)}、強度、硬度、密度などの材料物性に基づく固有の値であることが示唆されているため^{10,11)}、異なる材料の粉砕性を見るのに有効であるが、粒子径^{8,12)}（分布）

や粒子形状^{13,14)}などの異なる同一材料においては、これら粒子特性の変化が粉砕性に影響するために、指数だけで粉砕性を表すのは難しい。

固体材料の強度は、一般に寸法効果¹⁵⁾により粒子径（体積）の減少とともに増加し、単位質量当りの破砕エネルギーもまた粒子径に対して強度と同様の変化を示す¹⁶⁾。これに対し、粒子層の充填性を表す空間率¹⁷⁾や流動性を示す安息角¹⁸⁾は、多くの製品や中間品の（粉砕）処理前の原料粒子として用いられる数100 μ mあるいは数10 μ m以下の粒子径域において、粒子径の減少とともに増加する傾向がある。

本研究では、同一材料において、直接的な力学的、物理学的関係性が見られない固体材料粒子群の粉体物性と粉砕性が、粒子径を媒介として何らかの関係性を示しうることを期待し、測定方法が比較的容易な空間率や安息角などの粉体物性から、測定に時間を要する粉砕性を評価、予測する可能性を検討した。このような評価が可能になると、例えば鉱山などから採掘した原料の粒子径（分布）を測定せずに、（微）粉砕装置に装入する前の適切な原料粒子の調製方法（破砕、分級を含む前処理）をあらかじめ検討できるようになると考えられる。

実験では粉砕性の評価は、火力発電所などで広く用いられるローラミル粉砕の基本的機構である粒子層の圧縮粉砕を行い、単位エネルギー当たりの粉砕量を粉砕能として測定し、粉体物性との関係を調査した。さらに、媒体ミルの代表である転動ミルによる選択関数（粉砕速度定数）と粉体物性との関係についても検討したので以下に報告する。

平成21年9月14日受付；平成21年12月8日受理

* 山形大学大学院理工学研究科物質化学工学分野

** 山形大学工学部物質化学工学科

〒992-8510 山形県米沢市城南4-3-16

*** 東海工業株式会社技術開発部

〒470-0355 愛知県豊田市大畑町393

† Department of Chemistry and Chemical Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University, 4-3-16 Jonan, Yonezawa-shi, Yamagata, 992-8510, Japan

†† Department of Chemistry and Chemical Engineering, Yamagata University, 4-3-16 Jonan, Yonezawa-shi, Yamagata, 992-8510, Japan

††† Technology and Development Div., Tokai Kogyo Co., Ltd., 393 Obatacho, Toyota-shi, Aichi, 470-0355, Japan

2. 理 論

2.1 粒子層の空間率

固体粒子の粒子径による粒子層空間率の変化は、Rollerの式¹⁷⁾を用いて次のように表せる。

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + Ax^n}, \quad A = \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) \left(\frac{1}{x_c} \right)^n \quad (1)$$

ここで、 ε は空間率、 ε_c は空間率の一定値、 x は粒子径、 x_c は空間率が一定値を示す限界粒子径、 A は定数、 n は材料の種類、充填方法などによる定数であり0~1の値をとる。

2.2 圧縮粉碎による粉碎性（粉碎能）

固体の粒子層が荷重を受けたときの粒子層内の各粒子の破壊強度（引張強度） σ_{st} は、粒子径 x の関数として次のように表せる^{19,20)}。

$$\sigma_{st} \propto x^{-b} \quad (2)$$

ここで、 b は材料の種類などによる定数であり0.2~0.9の値をとる。

粒子質量 M 当たりの粉碎エネルギー E は、強度との間に次式の関係が成立するので¹⁶⁾、

$$\frac{E}{M} \propto \sigma_{st}^{5/3} \quad (3)$$

となる。

また、圧縮荷重によって破碎して生成した粒子質量 M_p と供給した粒子質量 M は比例するので²¹⁾、式(2)と式(3)を用いると次の関係が得られる。

$$\frac{E}{M_p} = \left(\propto \frac{E}{M} \right) \propto x^{-5b/3} \quad (4)$$

したがって、単位エネルギー当たりの粉碎量 M_p/E と粒子径の関係は次式のようになる。

$$\frac{M_p}{E} = Bx^{5b/3} \quad (5)$$

ここで B は定数である。

本研究では、 M_p/E を粉碎能として粉碎性の評価に用いた。

2.3 粉体物性（空間率）と粉碎性の関係

式(1)より、粒子径は、空間率の関数として表すことができる。

$$x = \frac{1}{A^{1/n}} \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^{1/n} \quad (6)$$

上式を式(5)に代入して整理すると式(7)のようになる。

$$\frac{M_p}{E} = K \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^a \quad \left(K = \frac{B}{A^a}, \quad a = \frac{5b}{3n} \right) \quad (7)$$

ここで K と a は定数である。

式(7)の関係は、ある固体材料の粒子群が圧縮、衝撃、せん断等の粉碎力を受けて接触している、あるいは接触する粒子間でエネルギーが伝達されるような粉碎様式において成り立つものと考えられる（空間率は、粒子の接触点（配位数）の関数で表

Table 1 Properties and particle sizes of sample used.

Sample	: Quartz
Density	: 2620 kg·m ⁻³
Vicker's hardness	: 245 kgf·mm ⁻²
Mohs hardness	: 6
Young's modulus	: 87.1 GPa
Poisson's ratio	: 0.16
Particle size	: 300-250, 250-212, 212-150 μm 150-125, 125-106, 106-75 μm 75-53 μm

され、空間率が減少すると接触点の数が増加する²²⁾。)

3. 試料および実験方法

3.1 実験試料

実験試料には、Table 1に示す石英粒子を用いた。はじめに、試料を大きさ数cmの石英をハンマーとジョークラッシャーを用いて破碎し、その後、JIS試験用ふるいを用いてロータップシェーカーにより分級し、Table 1に示す300~53μmの7種類の粒子径に調製した。さらに106~53μmの2種類の粒子については、湿式ふるい分けを行って整粒した。試料粒子径の調製手順はFigure 1に示す。

3.2 粉体物性（空間率と安息角）の測定

石英粒子試料は、50℃で12h以上乾燥後、相対湿度40~50%、室温の雰囲気下に2h放冷した後、実験に用いた。粒子層の空

Figure 1 Preparation of testing sample.

間率と安息角の測定は、ホソカワミクロン（株）製のパウダーテストを用いた。

空間率の測定は、タッピング充填とタッピングしない自然堆積充填により行い、式(8)によってそれぞれの空間率 ε を算出した。

$$\varepsilon = 1 - \frac{M_s}{\rho_s V} \quad (8)$$

ここで、 M_s は粒子充填質量、 V は充填容器の内容積、 ρ_s は粒子

密度である。

Figure 2には、(a) タッピング法、(b) 自然堆積法の模式図を示す。試料粒子の充填容器は、内径50.5mm、深さ50mm、内容積0.1 dm³のステンレス製円筒形容器である。タッピング充填は、試料粒子を充填した容器を18mmの高さから50回/minで自由落下させて15 min行った。タッピングしない自然堆積充填では、図に示すロート（直径70mm、高さ95mm（円錐部高さ55mm）、排出口径4mm）を用いて試料粒子を充填容器に流入させた。

安息角の測定は、Figure 3に示すように、ロートの先端から所定の水平盤（直径54mm）上に試料粒子を流出させる注入法で行い、粒子層表面と水平面のなす角をデジタルカメラで撮影した。なお、空間率と安息角は、いずれも粒子径ごとに3～5回の測定を行い、その平均値を求めた。

3.3 圧縮粉砕による粉砕性の測定

Figure 4には、圧縮粉砕試験の装置全体の概略を示す。装置は、(1) 圧縮試験機、(2) ロードセル、(3) 荷重変位測定器、(4)

Figure 2 Measurement of void fraction.

Figure 3 Measurement of angle of repose.

Figure 4 Apparatus of compressive crushing test, (1) Pellet testing machine, (2) Load cell (3) Load-displacement measuring device (4) Displacement indicator (5) Personal computer (6) Plunger, (7) Vessel.

Figure 5 Plunger and vessel.

Table 2 Crushing test conditions.

Material of plunger and vessel	: Silicon nitride
Applied load	: 5000 N
Deforming rate	: 0.5 mm·min ⁻¹
Mass of sample	: 0.3326 g

変位指示計, (5) データ解析用PC, (6), (7) 粉砕部で構成される。(6)の粉砕部は, Figure 5に示す窒化ケイ素製の臼と杵である。圧縮試験機は, 昭和測器(株)製のペレット試験装置PTⅡである。粉砕条件は, Table 2に示すように 圧縮荷重5000 N (圧力63.7 MPa), 荷重速度0.5 mm·min⁻¹, 試料充填量0.3326 gとした。試料充填量は, 予備試験によりエネルギー効率が最も良い質量である。粉砕試験は, 1種類の粒子径に対し10回行った。粉砕エネルギー E は, 荷重-変位曲線を図積分して求めた。試験後に得られた砕成物は, 湿式ふるい分けを行い, 未粉砕粒子をふるいごと50℃で12h以上乾燥し, 室温で2h放冷した後, 電子天秤により質量を測定し, 粉砕量(ふるい下粒子生成質量) M_p を求めた。その後, 測定した M_p と E より単位エネルギー当たりの粉砕量を表す粉砕能 M_p/E を算出した。

4. 実験結果および考察

4.1 粉体物性の測定結果

Figure 6には, タッピング充填による空間率 ε_T およびタッピング充填しないときの空間率 ε_N と粒子径 x の関係を示す。この図より, いずれの充填方法においても粒子層の空間率は, 粒子径の減少とともに増加し, 粒子充填性の低下が見られる。これらの空間率と粒子径の関係は, 式(1)を用いると以下のよう

$$\varepsilon_T = \frac{1}{1 + 0.82x^{0.082}} \quad (9)$$

$$\varepsilon_N = \frac{1}{1 + 0.35x^{0.21}} \quad (10)$$

Figure 6 Relation between void fraction and particle size.

ここで, ε_T はタッピングによる空間率 (-), ε_N はタッピングしないときの空間率 (-), x は粒子径 (μm) である。

Figure 7には, 同一粒子径における空間率 ε_N と安息角 ϕ_r の関係を示す。粒子層の自然充填 (= 最粗充填) による空間率と安息角との間には多くの物質について比例的関係が成立すると報告されており¹⁸⁾, この図からも空間率 ε_N と安息角 ϕ_r との間に相関性を見いだすことができる。この結果を, 最小二乗法による相関係数が最も大きくなる関数形を選択して適用すると以下の実験式が得られる。

$$\varepsilon_N = 0.33 \exp(0.62\phi_r) \quad (11)$$

ここで, ϕ_r は安息角 (rad) である。

4.2 粉砕性の測定結果

Figure 8には, 粉砕能 M_p/E と粒子径 x の関係を示す。 M_p/E は, 概ね粒子径の減少とともに減少する傾向が見られ, 粉砕性が低下していく様子がわかる。この関係は, 式(5)を用いて次

Figure 7 Relation between void fraction without tapping, ε_N and angle of repose.

Figure 8 Relation between grindability and particle size.

のように表せる。

$$\frac{M_p}{E} = 4.5 \times 10^{-3} x^{0.48} \quad (12)$$

この結果より、式(5)の b は0.29であり、先に述べたようにこれまでの研究結果の範囲内にある。

4.3 粉体物性と粉砕性の関係

Figures 9, 10には、粉砕能 M_p/E と空間率 ε_T および ε_N の関係を示す。両図の結果を式(7)を用いて整理すると以下の関係式が得られる。

$$\frac{M_p}{E} = 0.014 \left(\frac{1 - \varepsilon_T}{\varepsilon_T} \right)^{5.9} \quad (r = 0.54) \quad (13)$$

$$\frac{M_p}{E} = 0.05 \left(\frac{1 - \varepsilon_N}{\varepsilon_N} \right)^{2.3} \quad (r = 0.47) \quad (14)$$

Figure 9 Relation between grindability and void fraction with tapping, ε_T .

Figure 10 Relation between grindability and void fraction without tapping, ε_N .

Figure 11には、粉砕能 M_p/E と安息角 ϕ_r の関係を示す。同図には式(11)を式(14)に代入して得られた式(15)の関係を示している。

$$\frac{M_p}{E} = 0.64 (\exp(-0.62\phi_r) - 0.33)^{2.3} \quad (r = 0.53) \quad (15)$$

式(13)～(15)における相関係数 r は0.5近辺であるが、粒子層あるいは粒子群の粉砕能と空間率および安息角との関係がある程度推測できるようになると考えられる。

このようにある特定の粒状固体材料において粒子径が明らかでなくともその粉砕性が、測定し易い粉体物性の測定によって見積もることができる可能性があり、一定の粒状固体材料を扱う産業分野において、その粉砕性を評価し、粉砕操作条件を検討するときに有用な手段になるとと思われる。

5. 他の粉砕性指標と粉体物性の関係

転動、振動、遊星ミルなどの媒体ミル粉砕においては、粉砕性を表す一つの指標として任意の単一粒子径（粒度）における固体材料粒子群の消滅速度を示す選択関数（粉砕速度定数） S_1 がある。

$$\ln R = -S_1 t \quad (16)$$

ここで、 R は未粉砕粒子質量分率、 t は粉砕時間である。選択関数 S_1 は、数100あるいは数10 μm 以下の粒子径域において、任意粒子径の固体材料粒子が単位時間当たり粉砕される質量の割合を表し、粒子径 x との間には次式の関係が成立する^{23,24)}。

$$S_1 = Cx^\alpha \quad (17)$$

ここで C と α は定数である。

Figure 12には、一例として転動ミルによる石英の粉砕実験より得られた選択関数と粒子径の関係を示す^{25,26)}。

この図より、式(18)に示す関係が得られる。

$$S_1 = 5.3 \times 10^{-6} x^{1.1} \quad (18)$$

Figure 11 Relation between grindability and angle of repose.

Figure 12 Relation between selection function and particle size, ball mill = $\phi 144$ mm x 130 mm, alumina ball = $\phi 20$ mm, ball-filling fraction = 0.5, particle-filling fraction = 0.36, ratio of critical mill speed = 0.9^(25, 26).

Figure 13 Relation between selection function and void fraction.

Figure 14 Relation between selection function and angle of repose.

ここで、 S_1 は選択関数 (s^{-1}), x は粒子径 (μm) である。

Figure 13には、同一粒子径における選択関数と2種類の空間率との関係を、Figure 14には、選択関数と安息角の関係を示す。それぞれの図には、式(18)に式(9), (10)を用いて得られた式(19), (20)の関係と、式(20)に式(11)を代入して得られた式(21)の関係を示している。

$$S_1 = 7.6 \times 10^{-5} \left(\frac{1 - \varepsilon_T}{\varepsilon_T} \right)^{13.4} \quad (r = 0.982) \quad (19)$$

$$S_1 = 1.3 \times 10^{-3} \left(\frac{1 - \varepsilon_N}{\varepsilon_N} \right)^{5.2} \quad (r = 0.990) \quad (20)$$

$$S_1 = 0.41 (\exp(-0.62\phi_r) - 0.33)^{5.2} \quad (r = 0.978) \quad (21)$$

このように媒体ミルを用いた集合粉碎においても圧縮粉碎（それを基本とするローラミル粉碎）と同様に粉体物性による粉碎性の評価を行える可能性が考えられる。また、今回の実験において圧縮粉碎に比べて媒体ミル粉碎による粉碎性と粉体物性との相関がより強く現れている。その原因の一つとして、粉碎性の測定時における実験規模の大きさの違いが挙げられ、一回の実験用試料質量が、媒体ミル粉碎では圧縮粉碎の約600倍 (200 g)^(25, 26) と多いことから、粒子形状のばらつきによる粉碎性への影響⁽¹⁴⁾ が小さくなり、圧縮粉碎では大きく現れたことが考えられる。

6. むすび

粒状固体材料として石英粒子を使用し、粒子径を数100～数10 μm の範囲で変えて粒子層の空間率と安息角の測定を行った。また、石英粒子層の圧縮粉碎試験を行い、空間率、安息角と本研究で測定した粉碎能（単位エネルギー当りの粉碎量）との関係を検討した。さらに粉体物性と媒体ミル粉碎による選択関数との関係も調査した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 粒子層の空間率と粒子径の関係は、Rollerの式を用いて表すことができた。
- 2) 安息角は、空間率との間に式(11)に示す関係を得た。
- 3) 本研究で測定した粉碎能と粒子径の関係は、概ね式(5)の関係（式(12)）によって表すことができた。
- 4) 粒子層の空間率および安息角の測定によって、粒子径が不明な粒状固体材料における粉碎性評価の可能性を示した。
- 5) 媒体ミルにおいても粉体物性の測定による粉碎性評価の可能性を示唆した。

今後は、石英粒子の粒子径分布または粒子形状、他の粒状固体材料における検討が必要と考えている。

Nomenclature

- A : Constant in equation (1) (μm^{-n})
 a : Exponent in equation (7) (-)
 B : Coefficient in equation (5) ($kg \cdot kJ^{-1} \cdot \mu m^{-5b/3}$)
 b : Exponent in equation (5) (-)
 C : Coefficient in equation (17) (μm^{-a})
 E : Grinding energy (kJ)
 K : Coefficient in equation (7) (-)
 M : Mass of feed particles in compressive crushing (kg)

M_s : Mass of particle bed of sample in determining of void fraction (kg)
 M_p : Mass of product less than the feed size (kg)
 M_p/E : Grindability ($\text{kg} \cdot \text{kJ}^{-1}$)
 n : Exponent in equation (1) (–)
 R : Mass fraction of unground particles at a size x (–)
 r : Coefficient of correlation (–)
 S_1 : Selection function (= Grinding rate constant) (s^{-1})
 t : Grinding time (s)
 V : Volume of cylindrical vessel in determining of void fraction (m^3)
 x : Particle size (μm)
 α : Exponent in equation (17) (–)
 ε : Void fraction (–)
 ε_N : Void fraction without tapping (–)
 ε_T : Void fraction with tapping (–)
 ϕ_r : Angle of repose (rad)
 ρ_s : Particle density of sample ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
 σ_{st} : Particle strength (Pa)

参考文献

- 1) JIS M 4002 (2000).
- 2) JIS M 8801 (2008).
- 3) Salman, A. D., Ghadiri, M., Hounslow, M. J.: Handbook of Powder Technology vol.12, Particle Breakage, (Elsevier B. V., The Netherlands, 2007), pp.535-539.
- 4) 石原透: 試験用ミルによる Work-Index 試験結果について, Journal of MMIJ (日本鉱業会誌), **80**, 924-928 (1964).
- 5) E. Honma: Operating Work Index of Cement Grinding Mills, Journal of the Research Association of Powder Technology, Japan, **8**, 505-512 (1971).
- 6) Tanaka, T., Yoshimoto, K.: Application of Bond Theory to Large Grinding Mill, R & D Kobe Steel Engineering Reports, **35**, 34-37 (1985).
- 7) Bond, F. C.: Crushing and Grinding Calculations Part I, British Chemical Engineering, **6**, 378-385 (1961).
- 8) 石原透: 各鉱山提供試料による W_i 試験の結果と現場ミルの W_i との比較解析, Journal of MMIJ (日本鉱業会誌), **81**, 1064-1071 (1965).
- 9) 本間榮五郎, 磯野直貞, 井上敏雄: セメント用諸原料の粉砕仕事指数と被粉砕性との関係, 粉体工学研究会誌, **4**, 916-920 (1967).
- 10) Tanaka, T.: Work-Index Theoretically Related to Rate Function of Grinding Kinetics, Journal of Chemical Engineering of Japan, **8**, 82-83 (1975).
- 11) 神田良照, 長谷川政裕, 本間寅二郎, 八嶋三郎: ビールビンガラスを基準試料としたボールミル粉砕性とビッカース硬度からの仕事指数の推定, Journal of MMIJ (日本鉱業会誌), **101**, 422-426 (1985).
- 12) Smith, R. W. and Lee, K. H.: A Comparison of Data from Bond Type Simulated Closed Circuit and Batch Type Grinding Tests Trans, AIME, **241**, 91-101 (1968).
- 13) 神田良照, 山下隆司, 佐々木寿人, 新井山忍: 衝突破砕実験後の未破砕粒子の粒子径と形状指数の測定, 粉体工学会誌, **24**, 635-639 (1987).
- 14) 神田良照, 幕田芳穂, 今村敏彦: 粉砕性に与える粒子形状の影響 – 破砕確率と形状指数の関係 –, 資源と素材, **105**, 995-999 (1989).
- 15) 横堀武夫: 材料強度学, 技報堂出版, pp.84-87 (1955).
- 16) 神田良照, 佐野茂, 斎藤文良, 八嶋三郎: 単粒子破砕における粒径と破砕エネルギーの関係, 化学工学論文集, **10**, 108-112 (1984).
- 17) Roller, P. S.: The Bulking Properties of Microscopic Particles, Industrial and Engineering Chemistry, **22**, 1206-1208 (1930).
- 18) 大坪健: 粉粒体の集合特性の役割 – 安息角に関する実験法則について –, 粉体工学研究会誌, **2**, 179-188 (1955).
- 19) Knudsen, F. P.: Dependence of Mechanical Strength of Brittle Polycrystalline Specimens on Porosity and Grain Size, Journal of the American Ceramic Society, **42**, 376-387 (1959).
- 20) 田中達夫: 粉体プロセス入門 (改訂版) 工学図書 pp.205-206 (1981).
- 21) 神田良照, 高橋俊介, 畑勇治, 本間寅二郎: 粉体層の圧縮粉砕, 粉体工学会誌, **25**, 292-296 (1988).
- 22) Gotoh, K., Masuda, H. and Higashitani, K.: Powder Technology Handbook (2nd ed., rev. and expanded), (Marcel Dekker Inc., New York, 1997), pp.305-311.
- 23) Kelsall, D. F., Reid, K. J. and Restarick, C. J.: Continuous Grinding in a Small Wet Ball Mill Part I .A Study of the Influence of Ball Diameter, Powder Technology, **1**, 291-300 (1968).
- 24) 趙千秋, 神保元二: 遊星ミルの粉砕速度におよぼす粉砕媒体の影響, 粉体工学会誌, **25**, 603-608 (1988).
- 25) Kotake, N., Suzuki, K., Asahi, S. and Kanda, Y.: Experimental study on the grinding rate constant of solid materials in a ball mill, Powder Technology, **122**, 101-108 (2002).
- 26) Kotake, N., Daibo, K., Yamamoto, T. and Kanda, Y.: Experimental investigation on a grinding rate constant of solid materials by a ball mill – effect of ball diameter and feed size, Powder Technology, **143/144**, 196-203 (2004).