遊星ボールミルによる液中粉碎結果と DEM シミュレーションにより 算出した衝突エネルギー分布との関係

近藤 光^{1*}, 石原 真吾², 久志本 築², 小澤 隆弘¹, 加納 純也², 内藤 牧男¹

Relationship between Grinding Results in a Planetary Ball Mill with Liquid Media and the Distribution of Ball Impact Energy Calculated by DEM Simulation

Akira Kondo^{1*}, Shingo Ishihara², Kizuku Kushimoto², Takahiro Kozawa¹, Junya Kano² and Makio Naito¹

Received 9 October 2019; Accepted 19 December 2019

Ball motions in a planetary ball mill with liquid media were simulated using the DEM. The distributions of ball impact energy were calculated from the simulation. Then, the cumulative value of the impact energy (E) and median of the impact energy at one collision ($e_{1/2}$) were calculated. Grinding tests were examined and relationships between particle sizes and the specific impact energy multiplied by grinding time ($E_w t$) were evaluated. At higher acceleration, particle sizes of ground powders decreased faster. However, from the viewpoint of the impact energy, the energy efficiency got worse. With increase of ball sizes, $e_{1/2}$ increased but the number of collisions decreased. As results, using the smaller balls, particle sizes decreased faster and the energy efficiency was also better. The amount of $E_w t$ required to obtain 0.5 μm mean diameter ($E_w t^*(0.5 \mu\text{m})$) was calculated for each test condition. The fitting curve was applied for the relation of $E_w t^*(0.5 \mu\text{m})$ vs $e_{1/2}$.

Keywords: DEM simulation, Ball motion, Wet ball milling, Particle size, Grinding, Ball impact energy.

1. 緒 言

ボールミルは長きにわたって、粉碎などの粉体処理に利用されている。しかし、その内部でのボール挙動などの現象が複雑であるため、処理条件の選定は経験によるところがいまだに大きい。しかしながら近年では、離散要素法[1] (DEM: discrete element method または distinct element method) などによるシミュレーションがボールミルにも応用されるようになり、基本的な乾式の転動ボールミルをはじめとして、遊星ボールミルや媒体攪拌式ボールミルなどの高度なミルについても、シミュレーションを用いた解析が行われるようになった。さらに液中でのボールミル粉碎についても、DEM と流体力学に関する式を連成させることによって、解析が行われるようになっている[2–6]。DEM シミュレーション手法の進歩により、

ボールミル内のボールの運動を再現する精度は向上していると考えられる。それでもなお、シミュレーションの結果と実際の粉碎などの実験結果とを照合し、検証することは依然として重要な検討事項である。

著者らは、液中転動ボールミルにおける媒体ボールの運動を、DEM シミュレーションにより模擬的に解析するとともに、実際のボールミルの内部観察および粉碎実験の結果と照合することによってシミュレーションと実験結果との関係を検討した[7]。その中で、結果を整理するために、粉碎の進行を支配する因子として、シミュレーションから算出される媒体ボールの衝突エネルギーを用いた。具体的には、異なる回転数条件において、粉碎時間を乗じた積算の衝突エネルギー (以下、積算衝突エネルギーと記載) と粒子径との関係を示す結果がほぼ 1 本の曲線上で整理され、両者の高い相関が示された。またこの相関関係は、碎料の固体濃度が増減しても、スラリーの粘度が低く、十分に流動する状態であれば、適用できることが確認できた。ただし、ボール径を変えた場合には、ボール径が大きいほど同じ粒子径まで粉碎するために要する積算衝突エネルギーは大きくなり、衝突エネルギーの観点からは効率が低下する結果となった。しかしながら、粉碎結果を衝突エネルギーで整理することにより、異なるボール径での粉碎速度の結果を、エネルギー効率で相対的に比較することができることを示した[8]。

1 大阪大学 接合科学研究所
(〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)
Joining and Welding Research Institute, Osaka University
(11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan)

2 東北大学 多元物質科学研究所
(〒 980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1)
Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials,
Tohoku University
(2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan)

* Corresponding Author a-kondo@jwri.osaka-u.ac.jp

本報では、対象を遊星ボールミルに拡張、さらに検討を行った。遊星ボールミルでは、容器の公転および自転により発生する遠心加速度により、転動ボールミルよりも格段に大きなエネルギーでの粉碎が可能である。本研究では、遠心加速度およびボール径を変えて、水中遊星ボールミルにおけるボール運動のシミュレーション結果と粉碎実験による粒子径変化の結果との関係を検討した。

2. 実験方法

2.1 遊星ボールミル装置

粉碎実験用の遊星ボールミル装置として、(株)栗本鐵工所製ハイジュー BX254E を用いた。装置の公転半径は 125 mm、回転の自/公転比は 0.497 で一定（同方向）であり、公転の回転数に連動して、遠心加速度が増減する。また、この装置の回転軸は鉛直方向となっている。遠心加速度は最大 150 G まで設定が可能であり、公転の回転数がそれぞれ 314, 497, 702, 861 rpm の時に遠心加速度が 20, 50, 100, 150 G に達する。ミルポットは SUS304 製で、内径は 50 mm、内容積は 170 mL である。

2.2 DEM シミュレーション

DEM シミュレーションにおけるボール間の相互作用の計算モデルは、バネとダッシュポットを並列に挿入したフックモデルに加えて、接線方向に摩擦を考慮するための摩擦スライダーを挿入したものである。液中であるため、媒液である水から受ける浮力および流体抵抗力を計算に組み入れた。ボール運動の運動方程式と効率的な計算のための手法は既報[7,8]と同様である。液中転動ボールミルにおける運動方程式を Eq. (1) に示す。また、式の各項は Eqs. (2)~(7) のように記述される。

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (F_{ij}^n + F_{ij}^s) + F_B + F_D + m_i g \quad (1)$$

$$F^n = K_n u_n + \eta_n \frac{du_n}{dt} \quad (2)$$

$$F^s = \min \left\{ \mu F^n, K_t (u_t + r\varphi) + \eta_t \left(\frac{du_t}{dt} + r \frac{d\varphi}{dt} \right) \right\} \quad (3)$$

$$F_B = V_B \rho_s R \left(\frac{2\pi N}{60} \right)^2 \quad (4)$$

$$F_D = C_d A \rho_s \frac{u_r^2}{2} \quad (5)$$

$$C_d = \frac{23.5}{Re} + \frac{4.6}{\sqrt{Re}} + 0.3 \quad (6)$$

$$Re = \frac{d_B |u_r| \rho_s}{\gamma_s} \quad (7)$$

本計算では、公転による遠心力の方向を下として、ポットにボールおよび液（スラリー）を充填した場合の液面の高さを算出し、液面を定めた。そしてポットの回転による液面の変化は考慮せず、公転中心から見た液面の位置は変化しないものとして計算した。そして、ボールの中心が液中に存在する場合に、液体による浮力および流体抵抗力をボールに作用させることとした。また、流体速度は簡略的にミルポット内のボール座標に応じて与えることとした。具体的にはポットの中心を流速 0 とし、ポットの中心からの半径方向距離に比例して流速が増加し、ポット内壁において壁面の周速の 0.5 倍となるように設定した。計算に使用した各パラメータの値を Table 1 に示す。液体の密度と粘度には、粉体による密度と粘度の変化は考慮せず、純水の物性値を使用した。また、バネ定数 K には粉体挙動の DEM シミュレーションでよく用いられている手法に準じ[2,3]、ボール挙動の再現に適した値を使用した。バネ定数 K に用いたヤング率は 0.2 GPa であり、実際の物性値と比べると、かなり小さい

Table 1 Parameters for DEM simulation

Parameters	Unit	Value
Mill pot		
Inner diameter	[m]	50×10^{-3}
Depth	[m]	87×10^{-3}
Motion of the pot		
Radius of revolution (R)	[m]	125×10^{-3}
Rotation/revolution ratio	[-]	0.497 (same direction)
Revolution speed (N)	[rpm]	314, 497, 702
(acceleration)	([G])	(20), (50), (100)
Ball parameters		
Diameter ($2r$)	[m]	1, 2, 3, 5 ($\times 10^{-3}$)
Density	[kg/m ³]	6000
Mass	[g]	230 (Volume of the ball layer: 40 vol%)
Fluid parameters		
Fluid volume	[mL]	40
Fluid density (ρ_s)	[kg/m ³]	1000
Fluid viscosity (γ_B)	[mPa·s]	0.89
Friction coefficient (μ)	[-]	0.4 (particle-particle, particle-wall)

値に設定した。また、弾性スプリングと粘性ダッシュポットを有する一自由度の振動方程式において、もっとも減衰が早い条件として、粘性係数 η には Eq. (8) により算出した値を用いた[9]。

$$\eta = 2\sqrt{mK} \quad (8)$$

さらに今回は、遊星ボールミルのミルポットの運動を前項の粉碎用遊星ミル装置の仕様に合わせて設定し、計算を行った。ここで、シミュレーション計算中のすべり摩擦係数の値は、既報[7,8]での水中転動ボールミルの検討で、ボール運動がよく合致する条件として最終的に選定し、衝突エネルギーを算出した際に用いた値と同じ 0.4 とした。

上記のように本検討のシミュレーションは、既報[7,8]で行った転動ボールミルでの計算方法が転用できるものと仮定して計算されている。既報[7,8]で行ったような内部観察が遊星ボールミルでは難しく、比較ができていないため、仮定した方法が十分かどうかの判断はできないが、この仮定の条件下での結果として検討を進める。

2.3 水中遊星ボールミル粉碎実験

上述の遊星ボールミル装置を用いて、水中粉碎実験を行った。砕料として、既報[7,8]と同じアルミナ粒子（住友化学（株）製 A26）を用いた。この粉体試料のレーザー回折散乱法による平均粒子径は 40 μm 程度であるが、0.4 μm 程度の一次粒子が部分的に結合した 2 次粒子構造となっている。媒体ボールには、ジルコニアボール（ニッカトー（株）製 YTZ）を用いた。ボール充填率は 40% とした。また、粉碎スラリーの固体濃度は 15 vol% とし、スラリー充填量は、ボール層中の空隙の 1.5 倍の体積とした。ボール径を 1, 2, 3, 5 mm, 遠心加速度を 20, 50, 100 G とそれぞれ変えて粉碎実験を行い、所定の時間で少量のスラリーを粒子径分布測定用のサンプルとして採取した。粒子径分布測定装置にはレーザー回折散乱式粒子径分布測定装置（マイクロトラックベル（株）製 MT-3300EXII）を用いた。測定用の分散媒として 0.05 mass% ヘキサメタリン酸ナトリウム水溶液を用い、サンプルスラリー数滴を希釈し、150 W の超音波ホモジナイザーで 60 秒分散処理した後、測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 水中遊星ボールミルの DEM シミュレーション結果

Fig. 1 に、DEM シミュレーションにより計算された水中遊星ボールミルにおけるボール運動の例を示す。図中に示した垂直の線は、公転中心の方向を指しており、すなわち、公転による遠心力の方向を下にして、ポット内の様子を示している。たとえば Fig. 1 (a) を見ると、この図の向きでは、容器の右部分で、ボールの層が容器内壁に接しながら容器の自転に伴って図の上方に移動し、あるところから壁面を離れ、容器の中心近くを通過して図の下方に流れていくような循環運動を行っている。本報における条件設定では、いずれの遠心加速度、ボール径に

Fig. 1 Snapshot images of the simulated ball motions at various ball sizes (acceleration: 50 G), (a) 1 mm balls, (b) 2 mm balls, (c) 3 mm balls, (d) 5 mm balls

おいても、このような循環運動が示された。

各条件のシミュレーションより、ボールの衝突エネルギーを算出した。算出方法は既報[7,8]と同様であり、1 秒あたりの衝突エネルギーの累積値 E は Eq. (9) で表される。式中の m はボールの質量、 v_R はボール間の相対速度である。ボール同士の衝突とともに、ボールとポット内壁との衝突もこの式に当てはめて積算した。ここで、Eq. (9) 中の演算子 Σ 内が個々の衝突のエネルギー e を表す式である。ここで、正面衝突以外の場合は、垂直方向と接線方向の速度成分に分け、それぞれに衝突エネルギーを計算したものを合算した。

$$E = \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{2} m v_{Rj}^2 \right) \quad (9)$$

まず、遠心加速度を 20, 50, 100 G と変えた場合の衝突エネルギー分布の比較を Fig. 2 に示す。ここでは、ボール径 3 mm の場合の例を示した。横軸は 1 回の衝突エネルギー e をとっており、図の下段は e の値に相当するエネルギーでの衝突回数 n_e の度数分布を示し、中段は e と n_e の積のエネルギー量に換算した $(e \cdot n_e)$ の分布曲線を示す。そして上段は $(e \cdot n_e)$ の累積分布曲線を示し、その最大値が単位時間での衝突エネルギーの累積値 E に相当する。図のように、遠心加速度の増大に応じて、衝突エネルギーの累積値 E が増大している。次に、Fig. 3 にボール径を 1, 2, 3, 5 mm と変えた場合の衝突エネルギー分布の例を示す。ここでは遠心加速度 50 G の場合の例を示す。ボール径の違いにより、1 回の衝突エネルギーが分布するエネルギーの領域が大きく異なり、ボール径が大きいほど高エネルギー域に分布している。一方、ボール径が小さいほど分布するエネルギー域は低エネルギー側であるが、衝突の回数は格段に大きくなっている。ここで、エネルギーの分布域の代表値として、累積値 E の 1/2 に相当する累積エネルギーでの横軸の値をエネルギー分布の中央値 $e_{1/2}$ と定義し、図示した。

Fig. 2 Distributions of impact energy at various acceleration (ball size: 3 mm), (a) Number of collisions (n_e), (b) Product value, ($e \cdot n_e$) and (c) Cumulative value of ($e \cdot n_e$)

Fig. 3 Distributions of impact energy at various ball sizes (acceleration: 50 G), (a) Number of collisions (n_e), (b) Product value, ($e \cdot n_e$) and (c) Cumulative value of ($e \cdot n_e$)

Fig. 4 Variation of $e_{1/2}$ and E as a function of acceleration at various ball sizes

Fig. 5 Comparison between the electric load and the impact energy (ball size: 3 mm)

Fig. 4に各条件での衝突エネルギー分布の中央値 $e_{1/2}$ (下段) と、衝突エネルギーの累積値 E (上段) の計算結果を示す。上述のように、 $e_{1/2}$ は遠心加速度の増大とともに大きくなるが、ボール径の増大によっても大きく増大する。そして、 E は遠心加速度の増大とともに増大する。また、今回の結果では、ボール径が大きいほど E がやや小さくなっている。ボール径を変化させた際の E の大小関係は、ボール充填量、ポット内径などの設定条件に影響される場合があるが、今回の検討において設定した条件では、ボール径が大きいほど E が小さくなる傾向を示した。

ここで、シミュレーションから計算された衝突エネルギーと、実際の装置の運転動力を比較するため、**Fig. 5** にボール径 3 mm の場合の例を示した。遊星ボールミル

装置の公転回転数は、モーターに電流を供給するインバータの周波数を変えることにより、制御されており、そのインバータの出力電力 P_B が計測できる。この遊星ボールミル装置では、重量バランスをとるためにポットを2個設置して回転させている。ボールと水をシミュレーションと同条件の量だけ充填したポット2個を設置して運転し、計測された出力電力 P_B の1/2と衝突エネルギーの累積値 E を比較した。図に示されるように、 $1/2P_B$ 、 E ともに遠心加速度の増大に伴って、単調増加している。 $1/2P_B$ の方が E よりもかなり大きな値となっているが、この理由は、実際の装置ではボールを運動させるだけでなく、ポットおよびポットを取り付けているホルダー部品も回転させるために動力が使われているためと考えられる。したがって、 E の大きさや遠心加速度との関係は、出力電力の結果に照らして、大きく矛盾するものではないと考えられる。

そこで以下では、シミュレーションから算出されたボールの衝突エネルギーを、粉碎を進行させる因子として、粉碎実験結果の整理に採用し、両者の関係を検討した。

3.2 遊星ボールミルによる水中粉碎実験結果と衝突エネルギーの関係

粉碎実験の結果より、まず、遠心加速度の影響を示すため、ボール径3 mmで、遠心加速度を20, 50, 100 Gと変えた実験の結果を示す。**Fig. 6**は粉碎時間による碎製物の粒子径の変化を示す。図中の曲線は、両軸の対数に3次の多項式をフィッティングした相関曲線である。図に示されるように、遠心加速度が大きいほど、短い時間で小さい粒子径に到達している。次に、衝突エネルギーの累積値 E を、単位粉体質量あたりの量に換算した E_w に、粉碎時間 t を乗じた積算衝突エネルギー $E_w t$ を横軸にとって整理したグラフを**Fig. 7**に示す。図中に示すように、遠心加速度が大きいほどプロットが上方に位置しており、ある粒子径まで粉碎するために、より大きな積算衝突エネルギーを要している。すなわち、衝突エネルギーの観点では、遠心加速度が大きい方が、効率が低下する結果となった。

Fig. 6 Relationship between particle size (d_{50}) and grinding time (t) at various acceleration (ball size: 3 mm)

次に、ボール径の影響を示すため、遠心加速度を50 Gとし、ボール径を1, 2, 3, 5 mmと変えて実験を行った結果を示す。**Fig. 8**は粉碎時間による粒子径の変化を示す。図より、ボール径が小さいほど、短い時間で小さい粒子径に粉碎できることがわかる。これを同様に積算衝突エネルギー $E_w t$ で整理すると、**Fig. 9**に示すように、小

Fig. 7 Relationship between particle size (d_{50}) and $E_w t$ at various acceleration (ball size: 3 mm)

Fig. 8 Relationship between particle size (d_{50}) and grinding time (t) at various ball size (acceleration: 50 G)

Fig. 9 Relationship between particle size (d_{50}) and $E_w t$ at various ball size (acceleration: 50 G)

さいボール径ほど、ある粒子径に粉碎するために要するエネルギーが小さくなっている。検討した条件の中では、ボール径 1 mm がもっとも粉碎時間が短く、少ない衝突エネルギーで効率よく粉碎ができる結果となった。

今回の結果のように、ボールミル粉碎で、小さいボールの方が高い粉碎速度を示すという傾向は、定性的にはよく知られている。遊星ボールミルを用いた水中粉碎でのボール径の粉碎速度への影響についても、たとえば、横山らの報告[10]で示されている珪砂での粉碎結果において、同一の回転速度では、ボール径が小さい方が短い時間で、小さい粒子径に到達していることから、所要エネルギーの観点からの効率も高いことも示されていると考えられる。ただし、横山らの報告[10]ではエネルギーで整理された結果は示されていない。仮に装置の運動動力からエネルギーを算出したとしても、装置自体を駆動させるためのエネルギーが含まれてしまうため、粉碎現象との相関関係を細かく解析するための指標としては不向きであると考えられる。一方、本報のシミュレーションでは、ボール運動そのものに起因するエネルギーが算出されており、粉碎現象との相関関係を検討するために有効であると考えられる。また、シミュレーションから算出される衝突エネルギーの分布なども利用することにより、さらに詳しく各因子の相関関係を検討することが可能になると考えられる。そこで、衝突エネルギーを用いた検討をさらに進め、以下に示した。

Fig. 10 に、遠心加速度およびボール径を変えた全部の条件での d_{50} vs E_{wt} の結果をプロットした。各条件でのプロットの位置の幅が大きく、このままでは統一した関係を見出すことがむずかしい。そこで、データをさらに詳しく整理するため、各条件の結果の代表値として、 d_{50} が $0.5 \mu\text{m}$ になるまで粉碎するために要した積算衝突エネルギーを $E_{wt}^*(0.5 \mu\text{m})$ として、各データの相関曲線から求め、用いた。図中には遠心加速度 20 G、ボール径 5 mm での例を示す。得られた $E_{wt}^*(0.5 \mu\text{m})$ とエネルギー分布の中央値 $e_{1/2}$ との関係を Fig. 11 に示す。 $e_{1/2}$ は、遠心加速度あるいはボール径が大きくなるほど大きいが、 $e_{1/2}$ が大きいほど、粉碎に要する積算衝突エネルギーが大きくな

Fig. 10 All plots of particle size (d_{50}) vs E_{wt}

る傾向が示されている。ここで、横軸の $e_{1/2}$ の対数と、縦軸の $E_{wt}^*(0.5 \mu\text{m})$ とで、最小自乗法による 4 次の多項式の相関曲線を定め、図中に示した。

またここで、既報[8]の転動ボールミルにおける衝突エネルギー分布を参照すると、3 mm ボールを用いて回転速度を 60~157 rpm と変化させた場合の $e_{1/2}$ は、 $3.9 \times 10^{-7} \sim 2.1 \times 10^{-6} \text{ J}$ と算出され、今回の遊星ボールミルの検討での 1 mm ボールでの $e_{1/2}$ の変化の範囲にとどまっている。一方、遊星ボールミルでは、同じボール径で格段に $e_{1/2}$ は大きくなり、さらに今回の検討では、ボール径の種類も変えて検討したので、 $e_{1/2}$ を広い範囲で変化させて、個々のボールの衝突エネルギー（代表値 $e_{1/2}$ ）と、ある粒子径までの粉碎に要する積算衝突エネルギーの相関関係を検討することができた。

Fig. 11 に示されるように、本実験の条件の中では、遠心加速度 20 G、ボール径 1 mm において、 $e_{1/2}$ が最小であり、 $E_{wt}^*(0.5 \mu\text{m})$ の値も最小となっている。そこで、この条件を基準として、さらに $E_{wt}^*(0.5 \mu\text{m})$ vs $e_{1/2}$ の相関曲線から求められる相対比を係数に用いて換算し、 d_{50} vs E_{wt} の結果を改めて整理した。整理した結果を Fig. 12 に示す。ここで、換算後の積算衝突エネルギー $E_{wt}^\#$ は以下の式 Eq. (10) で表される。

Fig. 11 Relationship between $E_{wt}^*(0.5 \mu\text{m})$ and $e_{1/2}$

Fig. 12 All plots of particle size (d_{50}) vs $E_{wt}^\#$

$$E_{wt}^{\#} = E_{wt} \cdot \frac{E_{wt}^{*}(0.5\mu m) \text{ at } 20 G, 1 mm}{E_{wt}^{*}(0.5\mu m) \text{ at } e_{1/2}} \quad (10)$$

on corelation curve of $E_{wt}^{}(0.5\mu m)$ vs $e_{1/2}$*

図のように、上記の換算を行うことにより、積算衝突エネルギーと粒子径の関係は、ほぼ一本の曲線上にまとめられた。このことは、遠心加速度およびボール径の条件の違いによって、ある粒子径まで粉碎するために要する積算衝突エネルギーは異なるが、その比率は代表値とした $0.5 \mu m$ のみならず、この図で示した粒子径の範囲（たとえば、ボール径 $5 mm$ では $d_{50} = 0.2 \sim 2 \mu m$ ）では変わっていないことを意味している。ここでは代表値として $0.5 \mu m$ を選んだが、それに限らず、プロットが1本の曲線上にまとめられている範囲のほかの粒子径を選んでも、ほぼ同様の結果が得られると推定される。また上記の比率は、算出された衝突エネルギーが有効に粉碎に利用される効率と見なすことができる。このような基礎データを、基礎実験により得ることができていれば、粉碎データが得られている条件以外の任意の条件での粉碎による粒子径の変化を、その条件での $e_{1/2}$ から推定することができると考えられる。

以上のように、粉碎結果とシミュレーションによる衝突エネルギーの相関関係を、実験データより求めた相対的な比率を係数に用いた換算を行うことにより示した。係数の値が決まる要因には、粉碎条件による衝突エネルギーの観点からのエネルギー効率の違いがあり、遠心加速度あるいはボール径が大きいほど、一回の衝突のエネルギーは大きい、粉碎のエネルギー効率は低下していた。その原因には、ボールの衝突エネルギーが粒子に伝えられる際の効率と、粒子に伝えられた衝突エネルギーによって粒子が破壊される際の効率の、それぞれに複数の原因が関わっている可能性が考えられる。たとえば、ボール径の影響については、久志本らが、本検討とは別にミクロスケールで、DEM シミュレーションを用いて検討した報告[11]で、ボール径が大きくなるほど、液中でボール同士が接近する際に起こる排除流れによって、粒子がボールの衝突点から遠くに逃げってしまう現象を指摘している。また、遠心加速度については、加速度が大きいほど粒子が高い遠心力でポット壁面に誘導されること

で、粒子がボール層の隙間に均一に存在せずに、壁面近傍に偏析することにより、ボールの衝突が有効に粒子に作用しない可能性が考えられる。

上記の原因とそのほかの可能性のある原因について、現象の解明さらには定量的な解明はまだ十分に進んでおらず、それらは今後の検討課題である。今回は、上記のような未解明の因子についても、衝突エネルギー分布と直接的もしくは間接的に連動して生じると見込み、衝突エネルギー分布の中央値を代表的な因子としてまとめ、整理した。実際にはさまざまな要因の影響が考えられるが、ここではエネルギー効率の比を示す係数と一緒に含めて考え、実験データよりその係数を求めて相対的な評価を行った。また本検討では、シミュレーションによるボール運動の結果を観察によって検証していないため、算出された衝突エネルギー自身にも誤差が含まれる可能性を考慮しておく必要があると考えられる。しかしながら今回は、この誤差の可能性もエネルギー効率の係数に含めて、実験データを衝突エネルギーで整理することで、有用な相関関係を示すことができたと考えられる。

4. 結 言

遊星ボールミルでの水中粉碎実験結果と、DEM シミュレーションから算出されるボールの衝突エネルギー分布の関係を検討し、以下の知見を得た。

- (1) 遠心加速度あるいはボール径が増大するほど、ボールの衝突エネルギーが分布するエネルギー領域（代表値 $e_{1/2}$ ）が、より高エネルギー域となるが、遊星ボールミルによる水中粉碎実験では、粉碎に要する積算衝突エネルギーが大きくなり、衝突エネルギーの観点からは効率が低下する傾向が示された。
- (2) 水中遊星ボールミルでの、積算衝突エネルギー E_{wt} と粉碎粒子径との関係は、エネルギー分布の中央値 $e_{1/2}$ に応じた係数による換算を行うことにより、グラフにおいて1本の曲線上にまとめられた。

[謝辞] 本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）の研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）の助成を受けて行われた（Grant No. JPMJTS1615）。ここに記して謝意を表する。

Nomenclature

A : projection area of a ball	[m ²]	F^n : normal force	[N]
C_d : drag coefficient	[-]	F^s : shear force	[N]
d_{50} : 50% particle diameter	[μm]	F_B : buoyant force	[N]
E : impact energy (cumulative value)	[J/s]	F_D : drag force	[N]
e : impact energy at one collision	[J]	g : gravitational acceleration	[m/s ²]
$e_{1/2}$: median of the distribution of the impact energy	[J]	K : spring coefficient	[N/m]
E_w : specific impact energy	[J/s/kg]	P_B : Electric load of the planetary mill	[J/s]
E_{wt} : specific impact energy multiplied by time	[J/kg]	m : mass of a ball	[kg]
$E_{wt}^{*}(0.5 \mu m)$: E_{wt} at $d_{50} = 0.5 \mu m$	[J/kg]	n : number of collisions	[1/s]
$E_{wt}^{\#}$: modified value of E_{wt}	[J/kg]	n_e : number of collisions at the value of e	[1/s]

N : Revolution speed	[rpm]	V_B : volume of a ball	[m ³]
R : radius of revolution	[m]	γ_B : viscosity of slurry	[mPa·s]
r : radius of a ball	[m]	η : damping coefficient	[Ns/m]
Re : Reynolds number	[-]	μ : friction coefficient	[-]
t : time	[s]	ρ_s : density of liquid media	[kg/m ³]
t_s : simulation time	[s]	φ : relative angular displacement	[rad]
u : relative displacement	[m]		
u_r : relative velocity between a ball and liquid media	[m/s]	Subscript	
v_i : velocity of the ball	[m/s]	n : normal direction	
v_R : relative velocity of balls on collision	[m/s]	t : tangential direction	

References

- [1] P. A. Cundall, O. D. L. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique* 29 (1979) 47–65.
- [2] The society of powder technology, “Huntai Simulation Nyuumon”, Sangyo-tosyo (1998).
- [3] M. Sakai, “Huntai no Suuchi Simulation”, Maruzen (2012).
- [4] J. Kano, N. Chujo, 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 (1997) 39–51.
- [5] J. Kano, F. Saito, Correlation of powder characteristics of talc during planetary ball milling with the impact energy of the balls simulated by the Particle Element Method, *Powder Technology* 98 (1998) 166–170.
- [6] H. Mori, H. Mio, J. Kano, F. Saito, Ball mill simulation in wet ball milling and its correlation to grinding rate, *Powder Technology* 143–144 (2004) 230–239.
- [7] A. Kondo, S. Ishihara, K. Kushimoto, T. Kozawa, J. Kano, M. Naito, Correlation between grinding results in a tumbling ball mill with liquid media and the analysis of ball motions using DEM simulation, *J. Soc. Powder Technol., Japan* 56 (2019) 148–155.
- [8] A. Kondo, S. Ishihara, K. Kushimoto, T. Kozawa, J. Kano, M. Naito, Correlation between grinding results in a tumbling ball mill with liquid media and the distribution of ball impact energy calculated by DEM Simulation, *J. Soc. Powder Technol., Japan* 56 (2019) 608–614.
- [9] R. Watanabe, K. Kushimoto, S. Ishihara, J. Kano, Determination method of coefficients of particle and rolling friction in distinct element method, *J. Soc. Powder Technol., Japan* 56 (2019) 218–225.
- [10] T. Yokoyama, Y. Taniyama, G. Jimbo, Q. Q. Cho, The grinding equilibrium size of in-water grinding of silica sand by a planetary ball mill, *J. Soc. Powder Technol., Japan* 28 (1991) 751–758.
- [11] K. Kushimoto, S. Ishihara, J. Kano, Analysis for behavior of particles to be ground between grinding balls in wet ball milling, *J. Jpn. Soc. Powder Metallurgy* 65 (2018) 664–672.