



シミュレーションを用いた 湿式ボールミル中砕料粒子挙動の解析

Analysis for Behavior of Particles in Wet Ball Milling by Means of Simulation

久志本 築¹, 石原 真吾¹, 加納 純也²
Kizuku KUSHIMOTO¹, Shingo ISHIHARA¹, Junya KANO²

¹ 東北大学多元物質科学研究所 助教
² 同 教授

¹Assistant Professor, Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, JAPAN

²Professor, Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, JAPAN

抄 録

湿式ボールミルは砕料粒子が分散したスラリー中で媒体ボールを衝突させ粉碎を行う粉碎装置の一種であり、その汎用性、粉碎性能の高さ、大型化の容易さから、多くの原料、中間製品、最終製品の製造工程で利用されている。しかしながら、粉碎が進行する様子を実験から観察および解析することが困難なため、粉碎メカニズムについて理解が十分になされないまま操業されてきた。このような現状に対し、粉碎メカニズムを詳細に理解し、湿式ボールミルを自在に制御するための新たな視点として、シミュレーションを導入することでいくつかの知見を得た事例がある。本稿では、そうした事例の中から、DEMとCFDを連成し媒体ボール周りの砕料粒子挙動を解析した事例や、Advanced DEM (ADEM)とCFDを連成した新規シミュレーション手法を開発することで、媒体ボール周りの砕料粒子の運動および破壊挙動を解析可能とした事例について紹介する。

ABSTRACT

Wet ball milling is a kind of methods grinding particles by collisions of balls in a slurry. It has been used for producing the raw materials, intermediate-products and end-products because it has features as high versatility, high grinding performance and easy to increase the size of equipment. However, the grinding by the wet ball milling has been operated without enough understanding grinding mechanisms because it is difficult to observe and analyze grinding processes. Thus, analyses by using a simulation have been introduced in order to understand the grinding mechanisms. In this paper, we introduced two examples. One example is that the behavior of particles around the balls in liquid was analyzed by the simulation method coupling DEM with CFD. The other example is that the simulation method for representing the dynamic and breakage behavior of particles around the balls in liquid was developed.

1 はじめに

粉体は医薬品、化粧品、食品などの身近なものから、セラミック、ゴム、鉄・非鉄金属などの原料、中間製品、最終製品として広く利用されている（粉体工学会，2005；日高重助・神谷秀博，2014）。こうした製品は、粉砕、造粒、混合、成形などの粉体プロセスを利用して製造されているが、中でも粉砕はその最も上流のプロセスであるため、多くの製品の品質や性能を左右する重要な単位操作であるといえる。

粉砕により得られる効果は、主に粒子の表面積の増加に起因する。例えば、反応性や溶解性の向上（粉体工学会，2001）、表面の特異な性状が支配的となることによる機能の付与あるいは性能の向上などが挙げられる（永田員形，2013）。そのため、粉砕にはさらなる微細化が求められ続けてきており、現在ではナノレベルの粒子の製造が期待されている。

微粉砕を実現する粉砕機としては、ジェットミルなどの媒体レスなものや、ローラミル、高速回転ミル、ボールミルなどの媒体を用いて機械的に粉砕を行うものなどがある（日本粉体工業技術協会，2005）。特に工業的には、ボールミルを用いることが多く、これは、ボールミルの構造が単純であるため構造的に大型化が容易であり、砕料粒子の種類に依らず汎用的であることに加え、粉砕性能も高いためである。中でも、湿式媒体攪拌型ミルや湿式遊星ボールミルに代表される湿式ボールミルの粉砕性能は高く、多種多様な粉砕現場で使用されている（日本粉体工業技術協会，2005）。しかしながら、本装置による粉砕の制御は容易ではなく、数多くの粉砕実験に関する報告が存在する現在においても（Kanda Y., 1999；近藤祥人ら，1993；田代新二郎・五十嵐秀二，1990；吉澤友一・齋藤文良，1996）、経験的知見に依存した操業に頼らざるをえないのが現状である。そのため、“粉砕の予測”はおろか“スケールアップ方法”も確立されておらず、特にナノ粒子の製造に関しては、以下の3つの現象が顕著となるため困難とされている。

- 1) 工業的に粒子を製造する場合、1 μm 程度の粒子径で粉砕速度が著しく低下する“粉砕限界”が存在すること（横山豊和ら，1991；粉体工学会，2001；日本粉体工業技術協会，2005）。
- 2) 粉砕操作にも関わらず、逆に粒子径が増大する

“再凝集”が発現すること（横山豊和ら，1991；日本粉体工業技術協会，2005）。

- 3) 媒体同士や媒体-容器壁間などの衝突による“コンタミネーション”が増加すること（中山，2014；日本粉体工業技術協会，2005）。

この背景には、実験から湿式ボールミル内部での媒体ボールの運動様式や砕料粒子の運動および破壊挙動が観察・解析困難であるため、粉砕メカニズムに対する理解があまり進んでいないという事実がある。

こうした実験では観察・解析困難な現象に対し強力なツールとしてシミュレーションが挙げられる。シミュレーションはコンピュータ上で実現象を再現する手法であり、実験では得ることの困難な媒体ボールもしくは砕料粒子個々の情報をそれらの運動に干渉することなく抽出可能という特徴がある。したがって、この特徴を応用することで、媒体ボールの運動や砕料粒子の運動および破壊挙動をつぶさに観察・解析可能となるため、粉砕メカニズムへの理解が促進されると考えられる。

このようなシミュレーションの特徴を応用して、実際に湿式ボールミルについても解析が行われている。湿式ボールミルのシミュレーションには、離散要素法（Distinct Element Method (DEM)）（Cundall P. A., 1979）が用いられてきた。DEMは、各要素（媒体ボールや砕料粒子）を軟体球で表現し、要素ごとに運動方程式を解くことでそれぞれの運動を追跡する手法である。したがって、バルク体の支配方程式が不要となるため、湿式ボールミル中の媒体ボールや砕料粒子の運動のように、速度や応力が不連続な現象の表現が可能である。一方でDEMは、要素数の増加に伴い計算負荷が著しく増大するため、その利用にあたっては支配的な現象を抽出する形で利用されている（加納純也，2014）。湿式ボールミルにおいては、その粉砕速度を予測したりスケールアップ方法を検討したりする場合、これらを支配しているのは媒体ボールの運動であることが多い。そのため、砕料粒子の影響は無視あるいは流体物性に組み込む形で簡略化し、流体の影響は実験式等によりモデル化することで、媒体ボールの運動を抽出して計算した事例が多く見られる。Yokoyamaらは湿式振動ミル中の媒体ボールの衝突頻度および強度を、2次元DEMにより解析し、液体粘度が増加すると媒体ボール間の衝突強度が著しく低下することを明らかとし

た (Yokoyama T. et al., 1996)。Mori らは、湿式転動ボールミル中の媒体ボールの運動について DEM により解析し、媒体ボール間の衝突エネルギーにより粉砕速度定数を予測できる可能性を示した (Mori H. et al., 2004)。曾田らは湿式ビーズミル中の媒体ボールの運動について DEM により解析し、ピン形状の最適化を試みた (曾田力央ら, 2009)。

一方で、小径ボールを用いる場合など、流体との相互作用が媒体ボールの運動に影響する場合も存在する。これに対し最近では、新たな計算モデルの登場や計算機の性能の向上により、流体と媒体ボールの運動を同時に解析することも多くなってきた。Nishiura らは DEM と Large-eddy-simulation (LES) の連成シミュレーションにより湿式媒体攪拌型ミルにおける分散機構の解析を行い、分散初期は流体のせん断力が支配的であるが、その後は媒体ボール間の衝突やせん断力が支配的となることを明らかにした (Nishiura D. et al., 2010)。Sinnott らは DEM と Smoothed-particle-hydrodynamics (SPH) の連成シミュレーションにより実際の装置のような複雑形状における媒体ボールと流体の運動を解析することに成功している (Sinnott M. D. et al., 2017)。

ここでさらに砕料粒子の運動および破壊挙動についてもシミュレーションした事例も存在する。例えば Nishiura らは、媒体ボール、砕料粒子、流体の運動を同時に解析し、凝集体の解砕は媒体ボール表面の強い流体力により進行することを明らかにした (Nishiura D. et al., 2014)。こうした解析を粉砕に応用することで、現状課題となっている粉砕限界、再凝集、コンタミネーションといった砕料粒子スケールで見られる現象への理解の促進が期待される。

そこで本稿では、最近の湿式ボールミルのシミュレーションによる解析事例として、湿式ボールミル中の砕料粒子、媒体ボール、流体の挙動を同時に解析したシミュレーション結果を示し、そこから得られた知見の一つとして粉砕限界の発現メカニズムとその突破方法について紹介するとともに、砕料粒子が液中で媒体ボールに破壊される挙動を解析可能な新規シミュレーション手法についても紹介する。

2 粉砕限界の発現メカニズム

湿式ボールミル中で砕料粒子が破壊されるために

は、衝突する媒体ボール間に砕料粒子が捕らえられることがまず必要である。そこで、砕料粒子径が捕らえられる砕料粒子体積に及ぼす影響についてシミュレーションを用いて検討した (久志本築ら, 2018)。

本シミュレーションでは、次の4つの現象を表現する必要があった。

- 1) 固体の運動 (媒体ボール, 砕料粒子)
- 2) 流体の運動
- 3) 媒体ボール-流体間相互作用
- 4) 砕料粒子-流体間相互作用

固体の運動には DEM を適用し、流体の運動に関しては有限差分法により計算を行った。媒体ボール-流体間相互作用は体積力型埋め込み境界法 (瀧口智志ら, 1998) を、砕料粒子-流体間相互作用は DEM-CFD カップリングモデル (Tsuji Y. et al., 1993) をそれぞれ採用した。計算系は図1に示し、計算条件は表1にまとめる。ここで、砕料粒子径は粉砕限界に到達する直前の $5.0\text{--}50.0\ \mu\text{m}$ とした。媒体ボールの条件については湿式媒体攪拌型ミルを、砕料粒子の条件についてはアルミナ粒子をそれぞれ想定しており、流体は純水の物性を与えた。また、媒体ボール間に砕料粒子が捕らえられる領域を“粉砕領域”として、次のように定義した。粉砕領域の概念図を図2に示す。粉砕領域は、図2中の距離 R_c (図中の粒子中心から媒体ボール同士の接触点までの距離) を半径に持つ円柱状の領域であり、媒体ボール径や砕料粒子径の大きさによってその領域の広さは変化する。

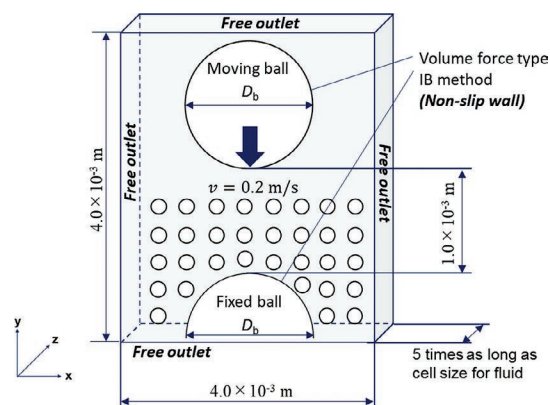


図1 シミュレーションに用いた計算系と流体の境界条件の概略図

Fig. 1 Schematic diagram of simulation system and boundary conditions for fluid.

表 1 砕料粒子挙動解析シミュレーションにおける条件
Table 1 Conditions in the simulation for analyzing the behavior of particles.

Cell size for fluid	$5.0 \times d_p$	m
Time step of CFD	1.0×10^{-6}	s
Time step of DEM	1.0×10^{-7}	s
Fluid:		
Density	1.0×10^3	kg/m ³
Viscosity	1.0×10^{-3}	Pa s
Particle:		
Diameter d_p	5.0–50.0	μm
Density	3.95×10^3	kg/m ³
Friction coefficient	0.5	-
Ball:		
Diameter	1.0×10^{-3}	m
Initial distance between balls	1.0×10^{-3}	m
Approaching speed	0.2	m/s
Friction coefficient	0.5	-

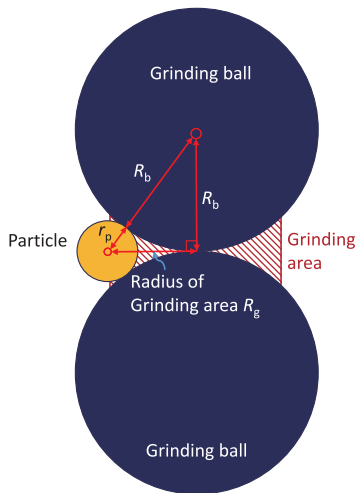


図 2 粉碎領域の概念図
Fig. 2 Schematic diagram of grinding area.

砕料粒子径が 10.0, 20.0, 30.0 μm の場合の初期状態と媒体ボール衝突直前におけるスナップショットを図 3 に示す。ここで、初期配置において斜線で塗りつぶされた領域は、粉碎領域を表す。初期配置において粉碎領域に多数存在した砕料粒子が、媒体ボールの接近に伴い粉碎領域から排除されていることがわかる。これは、媒体ボール同士の接近に伴い発生する流体流れに砕料粒子が流されたため、粉碎領域から砕料粒子が排除されたためであると考えられる。以降、この流れのことを“排除流れ”と呼ぶ

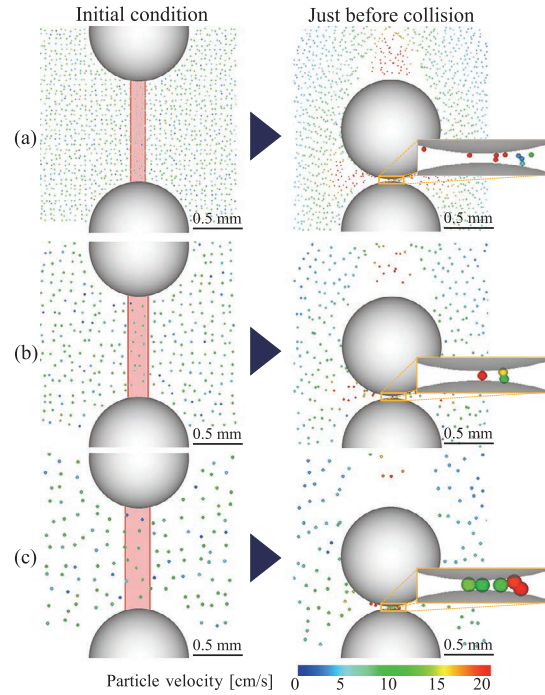


図 3 媒体ボール周りの砕料粒子挙動：(a), (b), (c) はそれぞれ砕料粒子径が 10.0, 20.0, 30.0 μm の場合
Fig. 3 Snapshots of the behavior of particles around grinding balls: particle diameters of (a), (b) and (c) are 10.0, 20.0 and 30.0 μm, respectively.

こととする。

次に、媒体ボール同士が接触した瞬間に媒体ボール間に捕らえられた（粉碎領域に存在した）砕料粒子の体積を“捕捉粒子体積”として求め、砕料粒子径とその体積の関係を求めた。その関係を図 4 に示す。砕料粒子径の減少とともに急激に捕捉粒子体積が減少していることがわかる。また、初期配置で粉碎領域に存在した砕料粒子が、媒体ボール同士が接触するまでに移動した距離の平均値を求めたものも図 4 に示した。砕料粒子の平均移動距離が砕料粒子径の減少に伴い増加していることがわかる。これらの結果は、砕料粒子径の減少により流体流れに追従しやすくなるため、媒体ボール間に捕らえられにくくなる可能性を示唆している。一方で、粒子の流体への追従性を表す無次元数として Stokes 数 St があり、 St は次式で与えられる。

$$St = \frac{\rho_p d_p^2 U}{18 \mu_f L} \quad (1)$$

ここで、 ρ_p は粒子の密度、 d_p は粒子径、 U は流れの代表速さ、 μ_f は流体の粘度、 L は代表長さであり、 St が小さいほど粒子が流体へ追従しやすいことを意

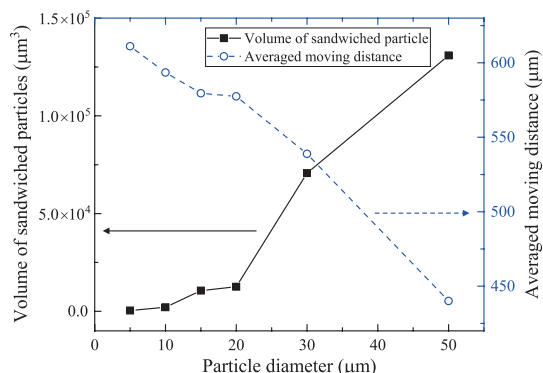


図4 砕料粒子径が捕捉粒子体積と粒子の平均移動距離に及ぼす影響

Fig. 4 Effect of particle diameter on the total volume of sandwiched particles and averaged moving distance.

味する。したがって、粒子径の減少に対し、 St は二乗で小さくなるため、排除流れに追従しやすくなったと考えられる。

粉碎限界について、これまでは、粉碎に伴う表面エネルギーの著しい増加に伴い凝集エネルギーが増大し、砕料粒子の凝集と破壊が動的平衡状態になるとき発現すると考えられてきたが(粉体工学会, 2001; 八嶋三郎, 1982), 本解析の結果は粉碎限界の発現メカニズムの一つとして排除流れの影響も考慮すべきであることを示している。

3 操作条件の砕料粒子挙動への影響

粉碎限界の発現メカニズムが排除流れに砕料粒子が追従するためであることが前節より明らかとなった。このことから、排除流れ自体を抑制するか、砕料粒子を排除流れに追従しづらくすれば、粉碎限界を突破できる可能性があるといえる。そこで、これらに影響を及ぼすと考えられる湿式ボールミルの操作パラメータとして次の2つの影響について調査した。

- 1) 媒体ボール径
- 2) 媒体ボール接近速度

なお、シミュレーション方法は第2節と同様とした。

まず、媒体ボール径が捕捉粒子体積に及ぼす影響を検討するために、媒体ボール径を0.25–2.0 mmまで変化させて、第2節と同様の解析を行った。このとき、砕料粒子径は10 μmで固定し、その他のパラメータについては表1と同様とした。媒体ボール径

と捕捉粒子体積の関係を図5に示す。媒体ボール径の増加に伴い捕捉粒子体積が減少していることがわかる。さらに、媒体ボール径が0.5 mmと1.5 mmの場合について、媒体ボールが接触する直前の流体流れの速度ベクトルを図6に示す。媒体ボール径が小さいとき、排除流れが抑制されていることがわかる。これらのことから、媒体ボール径が減少すると、排除流れを抑制できるため、砕料粒子が捕らえられやすくなると考えられる。

既存の報告では、媒体ボール径の減少に伴い同一体積でも多くの媒体ボール個数を得られるため、媒体ボールの衝突頻度が増加し、微細化が進行しやすくなるとされてきた(中山, 2014; 日本粉体工業技術協会, 2005)。しかしながら、本結果は、媒体ボールの小径化は衝突頻度だけではなく排除流れの抑制

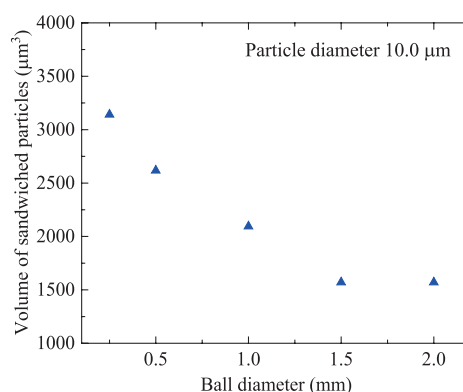


図5 媒体ボール径が捕捉粒子体積に及ぼす影響
Fig. 5 Effect of grinding ball diameters on the total volume of sandwiched particles.

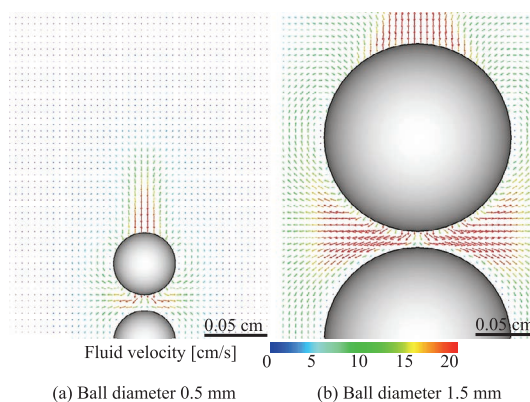


図6 媒体ボール周りの液体の流れ: (a), (b)はそれぞれ媒体ボール径が0.5, 1.5 mmの場合

Fig. 6 Snapshots of the liquid flow around grinding balls: ball diameters of (a) and (b) are 0.5 and 1.5 mm, respectively.

解説

にも効果があるため、微細化が進みやすくなることを示している。

次に、媒体ボールの接近速度の捕捉粒子体積に対する影響について検討した。媒体ボール径は 1.0 mm で固定し、媒体ボール接近速度は 0.2–1.0 m/s まで変化させ、それ以外は媒体ボール径に関する検討と同様とした。媒体ボール接近速度と捕捉粒子体積の関係を図 7 に示す。媒体ボール接近速度の増加とともに捕捉粒子体積が増加していることがわかる。さらに、砕料粒子の平均移動距離も図 7 に示した。平均移動距離は媒体ボール接近速度の増加とともに減少していることがわかる。これは、媒体ボールの接近速度が増加すると、式 (1) 中の代表速度 U が増加するため、 St も増加することとなり、砕料粒子は排除流れに追従しづらくなるためである。したがって、媒体ボール接近速度を増加させたほうが、砕料粒子は排除流れに追従しづらくなるため、媒体ボール間に捕らえられやすくなると考えられる。

これまでの報告では、媒体ボールの接近速度が増加すると、媒体ボールが砕料粒子に与える粉碎エネルギーが増大するため粉碎が進行しやすくなるとされてきたが (日本粉体工業技術協会, 2005), 砕料粒子を捕らえやすくする効果もあることを本結果は示している。

4 砕料粒子の運動および破壊挙動の表現

以上の検討から砕料粒子が媒体ボール間に捕らえられやすくなる条件としては、媒体ボール径の小径化と、媒体ボール接近速度の増加が重要であることが明らかとなった。しかしながら、その条件で砕料粒子が破壊されるかどうかは別問題である。加えて、液体中で媒体ボール間に捕らえられた砕料粒子が破壊される挙動を解析可能なシミュレーション手法自体が存在しなかったため、まずはこうした挙動を解析可能なシミュレーション手法を新たに開発した。

新規シミュレーション手法では、第 2 節から 3 節までに使用してきた手法に加えて、砕料粒子の破壊現象も取り扱う必要があった。こうした破壊現象をシミュレーションにより扱うことのできる計算モデルとしては、石原らにより提案された Advanced Distinct Element Method (ADEM) がある (石原真吾ら, 2014)。この手法は、砕料粒子を DEM で表現さ

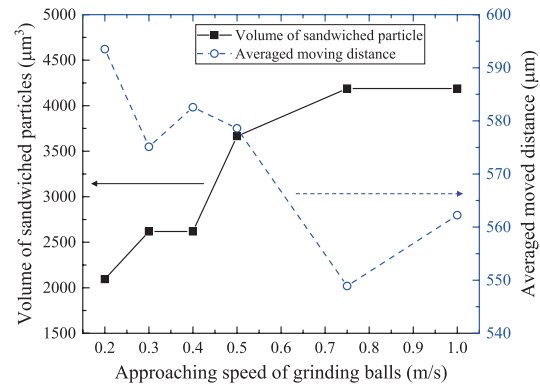


図 7 媒体ボールの接近速度が捕捉粒子体積と砕料粒子の平均移動距離に及ぼす影響

Fig. 7 Effect of approaching speed of the grinding balls on the total volume of sandwiched particles and averaged moving distance.

れる構成粒子の集合体として表現する手法であり、構成粒子間には仮想的に連結バネを設置し、ひずみに応じて破断させることで、砕料粒子の脆性材料としての挙動を解析可能としている。しかしながら、ADEM を流体計算と連成した事例はなく、そうした方法も開発されていなかった。そこで、新たに Advanced Distinct Element Method-Computational Fluid Dynamics (ADEM-CFD) モデルを開発し (久志本築ら, 2019), 流体中での砕料粒子の破壊現象の再現を行い、妥当性の検討を行った。

本モデルの妥当性の検討のために、液中で一つの砕料粒子が一つの媒体ボールにより破壊される挙動を観察するモデル実験を行った。実験装置の概略図を図 8 に示す。モデル実験では、直径 2.0 mm の砂糖でできた砕料粒子をエタノールで満たされた容器中に沈め、直径 30.0 mm の鉄球を砕料粒子に向けて落下させた際の砕料粒子挙動を高速度カメラ (1200 fps) で撮影することで、砕料粒子の運動および破壊挙動を観察した。このとき、媒体ボールと砕料粒子の位置関係を定量的に表すために図 8 に示すような“接触角度”を定義した。

モデル実験と同様のシミュレーションを ADEM-CFD モデルを適用することで再現し、実験結果と比較することで、ADEM-CFD モデルの妥当性の検討を行った。なお、砕料粒子の硬さや脆さは単粒子圧縮試験により得られた荷重変位曲線が一致するように、ADEM のパラメータ (構成粒子間の連結バネのバネ定数および最大ひずみ) を決定することで表現した。その他条件も含め表 2 にまとめ、計算系につ

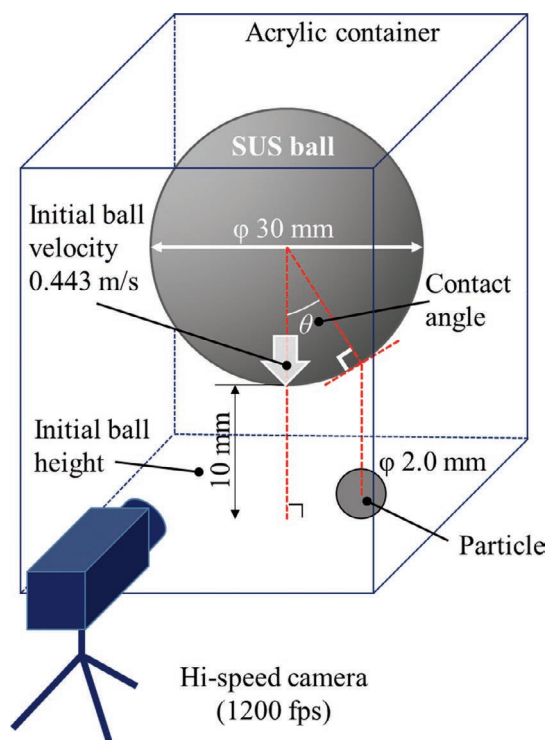


図8 実験装置の概略図と接触角度の定義
Fig. 8 Schematic diagram of the experimental apparatus and definition of contact angle.

Boundary conditions:	Unit [mm]
Free outflow	X=20, Y=25, Z=0, Z=40
Symmetry	X=0
Non-slip wall	Y=0
Initial position of the center of the ball (The surface of the ball is Non-slip wall.)	X=0, Y=25, Z=20

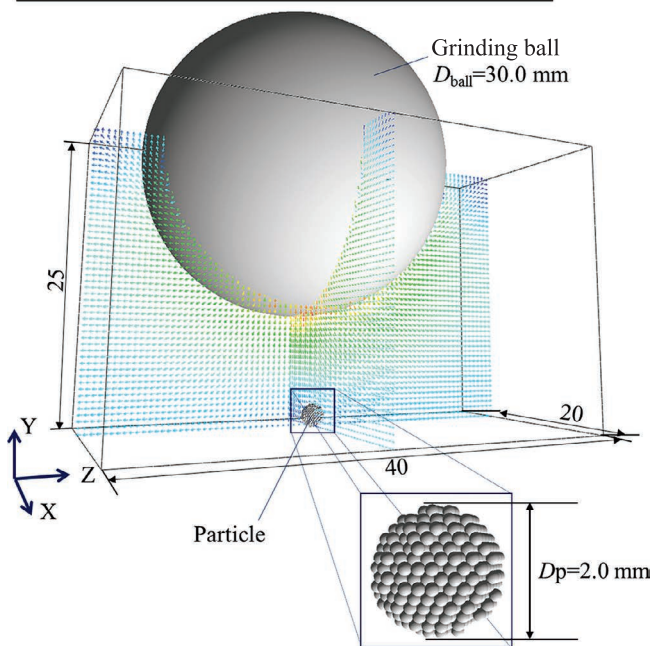


図9 計算系と境界条件
Fig. 9 Simulation system and boundary conditions.

表2 砕料粒子の運動および破壊挙動のシミュレーションにおける条件

Table 2 Conditions in the simulation for representing the dynamic and breakage behavior of a particle.

Time step for CFD	1.0×10^{-6} s
Time step for ADEM	1.0×10^{-8} s
Fluid:	
Density	7.9×10^2 kg/m ³
Viscosity	1.2×10^{-3} Pa s
ADEM parameters:	
Normal joint spring constant $K_{n,JS}$	9.5×10^4 N/m
Tangential joint spring constant $K_{t,JS}$	9.5×10^{-1} N/m
Maximum strain ϵ_{max}	0.0059 -
Particle:	
Primary particle diameter	2.0×10^{-4} m
Particle diameter D_p	2.0×10^{-3} m
Density of particle	1.61×10^3 kg/m ³
Number of primary particles	694 -
Ball:	
Initial height	0.01 m
Initial speed	0.443 m/s
Friction coefficient	0.0115 -
Diameter	0.03 m
Density	7.8 kg/m ³
Wall:	
Friction coefficient	0.0115 -

いては図9に示す。

接触角度が5.2°, 20.1°, 27.0°のそれぞれ場合について、実験とシミュレーションで得られた砕料粒子挙動を図10に示す。接触角度が5.2°のときは、砕料粒子が破壊されており、媒体ボールと容器底面の接触点付近では粉々に、遠ざかるにつれて大きな破砕片が存在していることが見て取れる。またその様子は、実験とシミュレーションで良く似ていることがわかる。接触角度が20.1°, 27.0°のときは、砕料粒子が媒体ボールの周りの排除流れにより流され、捕らえられなくなっている挙動が確認できる。この回避挙動を実験とシミュレーションについて定量的に比較するために、粒子の移動距離とその場所での移動速度の関係を求めた。その関係を図11に示す。実験とシミュレーション結果が定量的に一致していることが確認できる。以上から、ADEM-CFDモデルにより、液中で接近する媒体ボール周りの砕

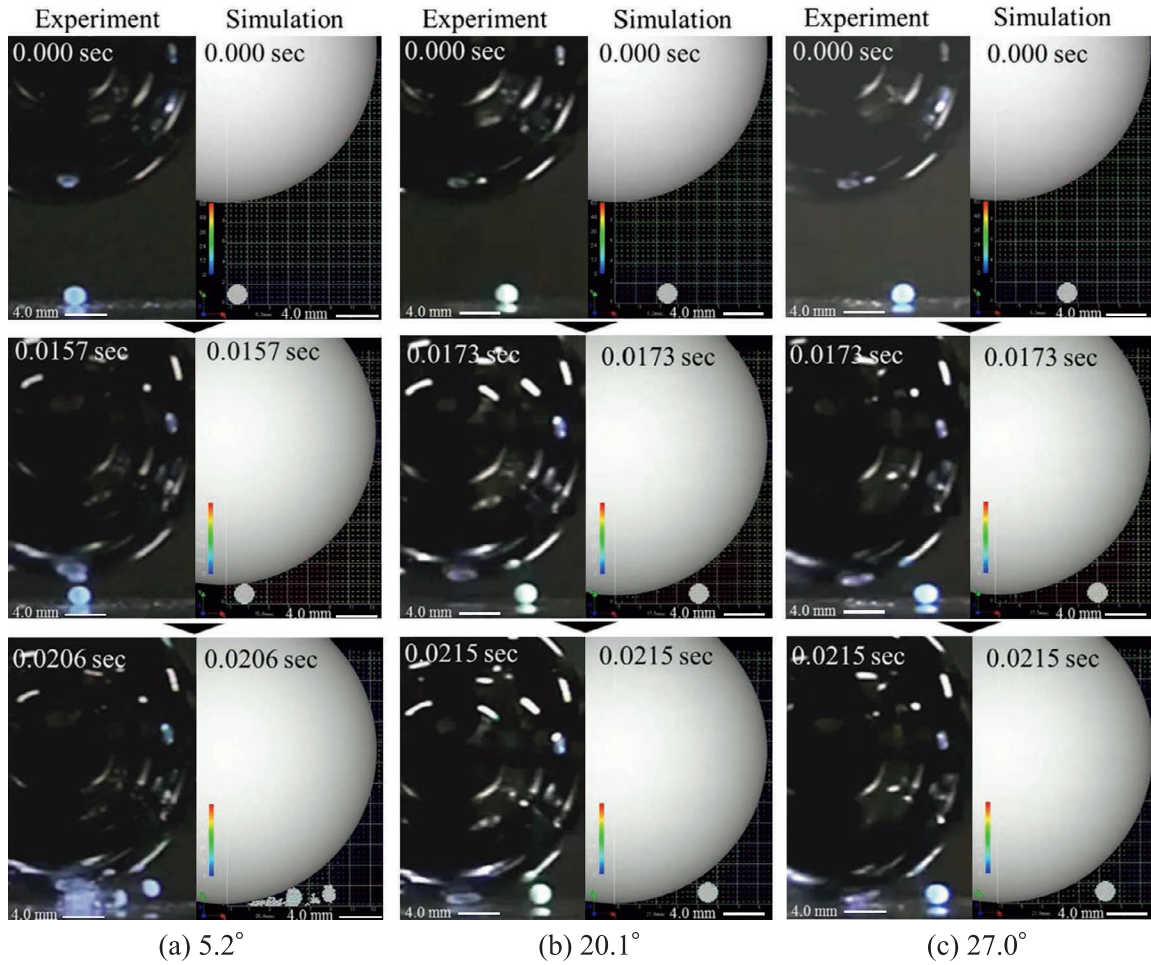


図 10 液体中で接近する媒体ボール周りの砕料粒子の運動および破壊挙動：(a), (b), (c) はそれぞれ接触角度 5.2°, 20.1°, 27.0° の場合
 Fig. 10 Dynamic and breakage behavior of a particle around grinding ball in liquid: collision angles of (a), (b) and (c) are 5.2, 20.1, 27.0 degrees, respectively.

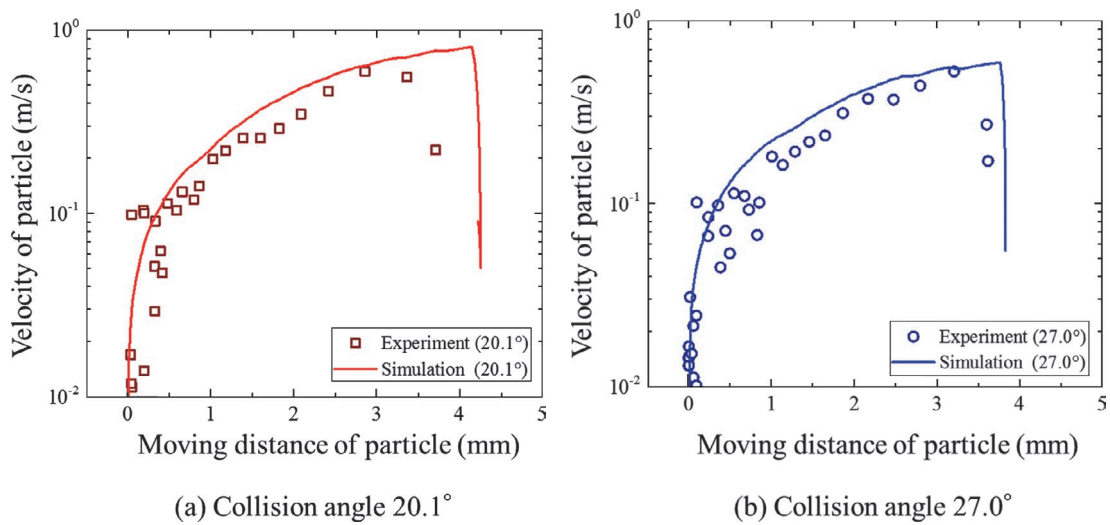


図 11 排除流れに流される砕料粒子の速度：(a), (b) はそれぞれ接触角度 20.1°, 27.0° の場合
 Fig. 11 Velocity of a particle swept away by the liquid flow around a falling ball: collision angles of (a) and (b) are 20.1 and 20.7 degrees, respectively.

料粒子の運動および破壊挙動を表現することが可能であることを検証できた。

5 おわりに

本稿では、湿式ボールミル中の砕料粒子挙動に関するシミュレーション結果について大きく2つ紹介した。一つは、湿式ボールミルにおける課題の一つである粉碎限界の発現メカニズムに加え、その突破方法に関する方針と方策をこれまでの知見を交えてその理由とともに示した。もう一つは、液中で接近する媒体ボール周りの砕料粒子の運動および破壊挙

動を表現可能な新規シミュレーションモデルを紹介した。これにより、これまで観察・解析が困難とされてきた湿式ボールミル内の砕料粒子粉碎メカニズムに関する検討が進展するものと期待される。

しかしながら、実用的に湿式ボールミルを制御し所望の粉体を製造するためには、粉碎限界の突破だけでなく再凝集やコンタミの抑制も考える必要があり、これらを総合的に満足する装置設計指針が必要である。したがってまずは、こうした諸現象の発現メカニズムを個別に明らかとし、湿式ボールミルによる粉碎の実態を把握することが当面の課題と考えられる。

References

- Cundall P.A., A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, 29 (1979) 47–65. doi: 10.1680/geot.1979.29.1.47
- Kanda Y., A fundamental study of dry and wet grinding from the view point of bending tests of glass, *International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources*, 7 (1999) 195–209. doi: 10.5188/ijmsr.7.195
- Kushimoto K., Ishihara S., Junya K., Development of ADEM-CFD model for analyzing dynamic and breakage behavior of aggregates in wet ball milling, *Advanced Powder Technology*, 30 (2019) 1131–1140.
- Mori H., Mio H., Kano J., Saito F., Ball mill simulation in wet grinding using a tumbling mill and its correlation to grinding rate, *Powder Technology*, 143–144 (2004) 230–239. doi: 10.1016/j.appt.2019.03.008
- Nishiura D., Sakaguchi H., Shimosaka A., Wet dispersion mechanism of fine aggregates in multiphase flow with solid beads under simple shear, 60 (2014) 4076–4085
- Sinnott M.D., Cleary P.W., Morrison R.D., Combined DEM and SPH simulation of overflow ball mill discharge and trommel flow, *Minerals Engineering*, 108 (2017) 93–108. doi: 10.1002/aic.14614
- Tsuji Y., Kawaguchi T., Tanaka T., Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed, *Powder Technology*, 77 (1993) 79–87. doi: 10.1016/0032-5910(93)85010-7
- Yokoyama T., Tamura I., Usui H., Jimbo G., Simulation of ball behavior in a vibration mill in relation with its grinding rate: Effects of fractional ball filling and liquid viscosity, *International Journal of Mineral Processing*, 44–45 (1996) 413–424. doi: 10.1016/0301-7516(95)00048-8
- 石原 真吾, 張 其武, 加納 純也, ADEMによる粒子破壊過程のシミュレーション, *粉体工学会誌*, 51 (2014) 407–414. doi: 10.4164/sptj.51.407
- 加納 純也, 粉体シミュレーションの進歩と粉体プロセス開発への展開, *粉砕*, 57 (2014) 51–58. doi: 10.24611/micromeritics.2014010
- 久志本 築, 石原 真吾, 加納 純也, 湿式ボールミリングにおける媒体ボール間の砕料粒子挙動の解析, *粉体および粉末冶金*, 65 (2018) 664–672. doi: 10.2497/jjspm.65.664
- 近藤 祥人, 橋塚 豊, 中原 理栄, 横田 耕三, 石崎 幸三, 回転式ボールミルによるアルミナの粉碎特性に及ぼすボール径の組み合わせ及び回転速さの影響, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 107 (1993) 819–823. doi: 10.2109/jcersj.101.819
- 曾田 力央, 加納 純也, 齋藤 文良, DEMによる媒体攪拌ミル攪拌ローターのピン形状が媒体運動に及ぼす影響の解析, *粉体工学会誌*, 46 (2009) 180–186. doi: 10.4164/sptj.46.180
- 瀧口 智志, 梶島 岳夫, 三宅 裕, 固体粒子と乱流の相互作用の数値計算法, *日本機化学会論文集 (B編)*, 64 (1998) 2804–2810. doi: 10.1299/kikaib.64.2804
- 田代 新二郎, 五十嵐 秀二, 湿式ボールミルの粉碎速度に及ぼす粉碎ボール径と粉末粒子径の影響, *日本セラミックス協会学術論文誌*, 98 (1990) 1082–1087. doi: 10.2109/jcersj.98.1082
- 永田 員也, 高分子系ナノコンポジット材料の開発と応用, *粉砕*, 56 (2013) 48–51. doi: 10.24611/micromeritics.2013010
- 中山 勉, 超微粒子・ナノ粒子をつくるビーズミル, *工業調査会*, 2010. ISBN: 978-4-7693-4238-0
- 日本粉体工業技術協会, 先端粉碎技術と応用, 有限会社エヌジーティ, 2005. ISBN: 4-9902720-3-X

日高 重助, 神谷 秀博, 基礎粉体工学, 日刊工業新聞社, 2014. ISBN: 978-4-526-07185-0
 粉体工学会, 粉砕・分級と表面改質, 有限会社エヌジー
 ティー, 2001. ISBN: 978-4990272074
 粉体工学会, 粉体工学叢書 第2巻 粉体の生成, 日刊工
 業出版プロダクション, 2005. ISBN: 4-526-05480-1
 八嶋 三郎, 最近の粉砕技術における話題, 鉄と鋼, 10 (1982)
 178-183. doi: 10.2355/tetsutohagane1955.68.10_1656

横山 豊和, 谷山 芳樹, 神保 元二, 趙 千秋, 遊星ミルに
 よる珪砂の水中粉砕における粉砕平衡粒度, 粉体工
 学会誌, 28 (1991) 751-758. doi: 10.4164/sptj.28.751
 吉澤 友一, 齋藤 文良, 湿式粉砕におけるアルミナボー
 ルからの摩耗粉の特性と加熱過程での相変態,
 Journal of the Ceramic Society of Japan, 104 (1996)
 668-672. doi: 10.2109/jcersj.104.668

〈著者紹介〉



久志本 築 Kizuku KUSHIMOTO

〔経歴〕 2019年3月 東北大学大学院環境科学研究科先進社会環境学専攻 博士後期課程修了。同年4月より、東北大学多元物質科学研究所 助教に着任。

〔専門〕 粉体プロセス, シミュレーション。

最近は、湿式ボールミルにおける粉砕限界の突破、再凝集およびコンタミネーションの抑制方法に関する研究に取り組んでいる。

〔連絡先〕 kizuku.kushimoto.d2@tohoku.ac.jp



石原 真吾 Shingo ISHIHARA

〔経歴〕 2015年3月 東北大学大学院環境科学研究科環境科学専攻 博士後期課程修了。同年4月より、東北大学多元物質科学研究所 助教に着任。

〔専門〕 粉体プロセス, シミュレーション。

最近は、独自に開発したADEMシミュレーションをさらに発展させ、鉄鉱石などの軟化溶融挙動のモデリングに関する研究に取り組んでいる。

〔連絡先〕 ishihara@tohoku.ac.jp



加納 純也 Junya KANO

〔経歴〕 1995年5月 同志社大学大学院工学研究科工業化学専攻博士後期課程 単位取得退学。1995年 東北大学素材工学研究所 助手, 2005年東北大学多元物質科学研究所 講師, 2008年同准教授を経て, 2012年より教授 (現職)。

〔専門〕 粉体プロセス, シミュレーション, 水素製造プロセス。

最近は、持続可能な社会の創生のために、粉体プロセスの省エネルギー化やバイオマスからの水素製造技術の確立を目指した研究に取り組んでいる。

〔連絡先〕 kano@tohoku.ac.jp