

ビーズミルの統合的性能評価のための力積型離散要素法

Impulse Based Discrete Element Method for Integrated Performance Evaluation of Bead Mills

塩入 一希*
Kazuki Shioiri

1. はじめに

本研究は、ビーズミルの統合的な性能評価として粉碎性能と摩耗の評価を対象に、大きな時間増分を用いることが可能な力積型離散要素法（IB-DEM：Impulse Based Discrete Element Method）によって計算コストを低減し、任意の装置形状を持つビーズミルに対しておのおのの評価が可能なシミュレーション手法を開発することを目的とした。開発した手法はビーズミルの粉碎性能を評価するだけでなく、装置の運用を想定した粉碎性能の時間変化までを捉えることが可能となる。

2. 主な研究成果

2.1 力積型離散要素法

衝突の順序化と安定化手法の導入をした力積型の衝突解析手法となる IB-DEM を新規に開発し、従来の DEM が持つ時間解像度の制約を大幅に緩和することで非定常解析における計算コストを低減し、固定の時間増分の設定によって系内の衝突ペア数を制限することで計算コストの上限を任意に設定可能にした。開発した IB-DEM では、理論解を持つ問題によって基本的な検証を実施し、新たに導入した安定化手法のパラメータ影響について調査をおこなった。さらに、ボールミル実験とシミュレーションを比較することで、大きな時間増分を用いた場合にも妥当な精度でボールミル内のビーズの挙動を解析可能であることを示した。

2.2 ビーズミルの粉碎性能評価手法

ビーズミルは湿式粉碎が主流であり、湿式ビーズミルの解析のためには流体の影響を考慮する必要があるため、シミュレーションで評価する場合には衝突解析のコストに流体解析のコストが加わることで全体の計算コストが高くなる傾向を持つ。また、ビーズミル内部で生じるビーズと粉碎対象物の衝突をすべて解析することは、計算要素の多さから現実的ではない。そこで、流体解析をせず

にビーズミル内部に定常的な流体場を挿入する簡易流体モデルを適用することで流体解析によるコスト増加を抑制し、ビーズのみの衝突に着目することで計算要素数の増加を抑制した。開発した粉碎性能評価手法では、IB-DEM によって大きな時間増分を用いて装置内部のビーズ衝突を解析した。その際、衝突時におけるビーズが持つ運動エネルギーを衝突エネルギーと定義し、粉碎性能の評価指標として用いた。衝突エネルギーを粉碎に必要なエネルギーの供給源と見なすことで、大きな衝突エネルギーを生じる装置形状は高い粉碎性能を持つと仮定できる。形状の異なるビーズミルを製作し、実際に粉碎実験をおこなって粉碎対象物の粒子径変化を測定した。実験とシミュレーション結果の比較から、より小さな粒子が得られる装置形状では計算によって得られる衝突エネルギーがより大きな値を示すことを確認し、粉碎性能を妥当な精度で評価できることを示した (Fig.1, Fig.2)。

2.3 ビーズミルの摩耗評価手法

ビーズミルはビーズ衝突を利用して粉碎対象物の微細化をおこなうため、摩耗が避けられない装置であるといえる。シミュレーション分野でビーズミルの摩耗解析に従来用いられている境界変形手法では、メッシュが潰れることによって計算が破綻する問題を持っていた。また、実際の摩耗現象の進行速度を再現することは数百時間や数千時間におよぶ現象をシミュレートすることとなり現実的ではない。そこで、界面捕捉型の境界変形手法を応用することで計算破綻の問題を解決し、モデルの頑健性を利用して大きな変形量を与えることによってわずか数秒間の内に生じる現象として摩耗を加速的に表現することで実質的な計算時間を短縮することに成功した。開発した摩耗評価手法である界面捕捉型摩耗モデルでは、IB-DEM によって大きな時間増分を用いて粒子衝突を計算し、加速的な摩耗を表現するため摩耗度合いを調整するパラメータに大きな値を用いる。大きな形状変化が発生した場合にも計算破綻が生じることがないことを、複雑形状の Stanford bunny を用いて検証した (Fig.3)。摩耗表現の再現精度を検証するため、実際に長時間使用されたビーズミルの実物摩耗部品の形状を三次元測定によって計測し、その形状とシミュレーションによって得られた形状を比較した (Fig.4)。ここから、ビーズミル

2024年6月27日受付
アシザワ・ファインテック株式会社 開発課
(〒275-8572 千葉県習志野市茜浜1-4-2)
Research & Development Dep., Ashizawa Finetech Ltd.
(1-4-2 Akanehama, Narashino, Chiba 275-8572, Japan)
* 連絡先 k-shioiri@ashizawa.com

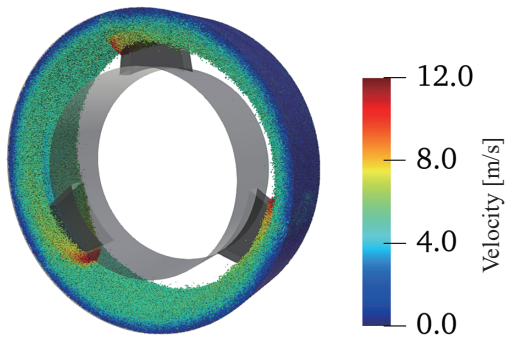


Fig. 1 Snapshot of the result of simulation. (circumferential velocity = 12 m/s)

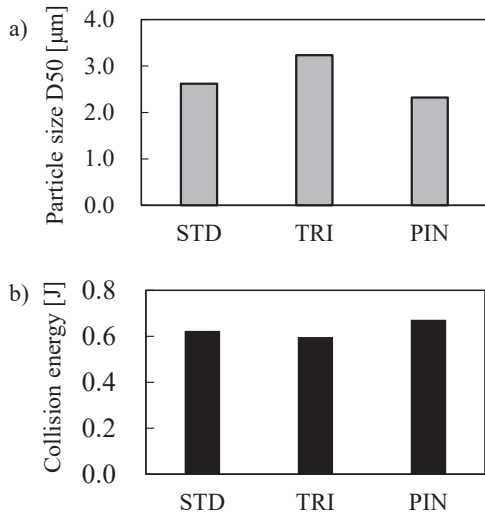


Fig. 2 Comparison of milled particle size (D50) and collision energy

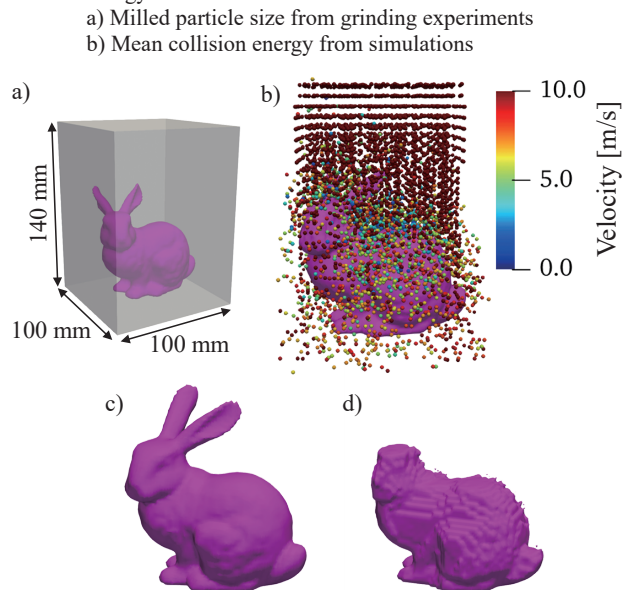


Fig. 3 Shot blast wear simulation for verification
 a) Configuration of calculation region
 b) Collision between Stanford bunny and beads
 c) Zero isosurfaces of signed distance function before wear
 d) Zero isosurfaces of signed distance function after wear

に生じる摩耗を妥当な精度で評価することが可能であることがわかる。開発した摩耗評価手法は、前項の粉碎性能評価手法に摩耗変形モデルを加えたものであるため、

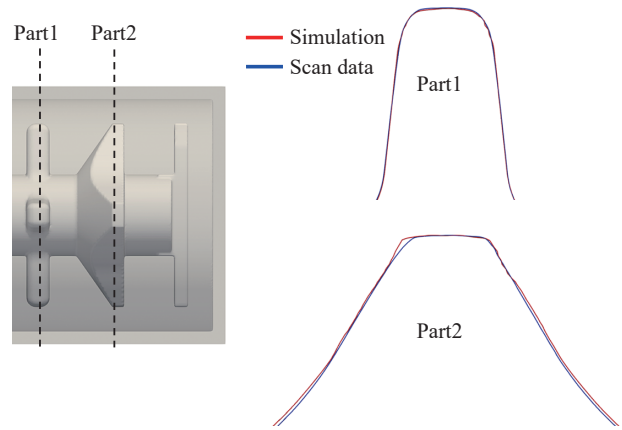


Fig. 4 Comparison of wear simulation and 3D Scan data

摩耗で部品体積が減少するに伴って変化する衝突エネルギーの傾向を同時に計算することができる。これによって、ビーズミルを試作する前に市場での使用を想定した摩耗を伴う粉碎性能の時間変化や、部品交換が必要な装置稼働時間などを定量的に評価することが可能となる。

3. 今後の展望

本研究で開発したシミュレーション手法は、任意形状のビーズミルを開発する過程で重要となる統合的な性能評価に対して、計算コストを実用的な範囲まで十分に低減し、妥当な精度で評価可能である。また開発した手法は、剛体粒子とみなせる粉体が、運動をする壁境界と衝突する系を対象としており、その境界の変形までを扱うことが可能であるため、ビーズミルに限らずさまざまな粉体関連装置に活用できると考える。

4. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、丁寧な指導ならびにご鞭撻を賜りました筑波大学大学院 システム情報系の三目直登 助教に心より感謝申し上げます。

文献リスト

- [1] K. Shioiri, N. Mitsume, M. Asai, Development of impulse based DEM with variable temporal resolution, J. JSCE, A2 76 (2020) 119–129.
- [2] K. Shioiri, H. Ohmura, M. Asai, N. Mitsume, The evaluation for wet grinding performance of beads mill using impulse based DEM, J. Soc. Powder Technol., Japan 59 (2022) 488–497.
- [3] K. Shioiri, H. Ohmura, M. Asai, N. Mitsume, Interface capturing wear model for wear simulation of bead mills, J. Soc. Powder Technol., Japan 60 (2023) 470–480.

(学位取得は 2024 年 3 月, 筑波大学)

〈著者紹介〉



2010 年 3 月千葉大学大学院 理学研究科 物理学コース 博士前期課程修了。同年アシザワ・ファインテック株式会社に入社。2021 年 4 月筑波大学大学院 システム情報工学研究群 構造エネルギー工学学位プログラム 博士後期課程に社会人博士として入学。
 専門：粉体シミュレーションおよび装置設計に関する評価技術の研究