

部品摩耗を考慮したシミュレーションによる 粉体装置形状の最適化

Optimization of Powder Equipment Shape by Simulation considering Wear

塩入 一希¹⁾ 中島 翼²⁾ 浅井 光輝³⁾ 三目 直登⁴⁾

Kazuki Shioiri, Tsubasa Nakajima, Mitsuteru Asai and Naoto Miysume

¹⁾博 (工) アシザワ・ファインテック株式会社 (〒 275-8572 千葉県習志野市茜浜 1-4-2, E-mail: k-shioiri@ashizawa.com)

²⁾アシザワ・ファインテック株式会社 (〒 275-8572 千葉県習志野市茜浜 1-4-2)

³⁾博 (工) 九州大学大学院 工学研究院 附属 アジア防災研究センター 教授 (〒 819-0395 福岡市西区元岡 744)

⁴⁾博 (工) 筑波大学 システム情報系 助教 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, E-mail: mitsume@kz.tsukuba.ac.jp)

The design of powder equipment enables optimization using the Discrete Element Method (DEM). However, wear is inevitable in powder equipment due to collisions with powder, which leads to a decline in performance, making it difficult to maintain the effectiveness of the optimized shape over time. In this study, we propose a shape optimization system that considers wear. The proposed system integrates statistical analysis for analyzing shape parameters and the Interface Capturing Wear Model (ICWM) for accurate and robust wear simulation. We demonstrate shape optimization using a bead mill as an example, and validate its effectiveness through comparison with actual grinding experiments.

Key Words : Optimization, Wear, Interface capturing, Impulse, Discrete Element Method

1. はじめに

固体粒子の集合を粉体と呼び、粉体を取り扱う装置は粉体装置と呼ばれる。インク、食品、医薬品、二次電池、ソーラーパネル、様々な製品の原料は粉体の形を取るため、生産現場では粉体搬送、攪拌、粉碎など多種多様な粉体装置が利用されている。粉体装置は固体粒子との衝突が絶えず発生しているため摩耗が避けられず、装置性能は摩耗によって低下してしまう。特に衝突頻度を高めるためにビーズを利用した粉碎機であるビーズミル[1]は、硬質セラミックなどで作られたビーズと装置部品の衝突による摩耗が著しく、粉碎性能の低下や摩耗粉混入による製品品質の低下が問題となる[2,3]。粉体装置の摩耗に関しては実験による検討がされているが[3]、長時間の実験が必要なことから検証費用が大きくなる問題を持つ。

一方、近年では数値計算によって摩耗を評価する研究がされており、粉碎機に適用した摩耗の数値計算の研究では、固体粒子と部品の衝突で生じた負荷を利用して摩耗による部品の形状変化を時間連続的に評価している[4,5,6]。この方法では、メッシュを用いて装置壁面を表現し、メッシュ頂点を移動することで摩耗による形状変化を表現している。そのため、大きな変形を表現する際に格子が潰れることにより計算が破綻する問題を持つ。この問題に対して、界面捕捉型の変形表現を用いることで計算破綻が起こらない摩耗解析手法が開発された[7]。開発された界面捕捉型摩耗モデル(ICWM:Interface Capturing Wear Model)は、装置内の剛体壁境界を陰関数で表す壁モデル[8]で再現し、衝突に応じた運動エネルギーから陰関数の値を増減することで摩耗による壁面形状変化を再現する計算手法である。

この手法を用いることで、部品摩耗を考慮した装置性能を検討することができるようになった。

本研究では、界面捕捉型摩耗モデルを用いて複数の装置形状の摩耗を解析することで、その装置形状が持つピーク性能のみならず、製品寿命に渡る性能の変化までを評価する方法を提案する。さらに、複数条件がそれぞれ持つ性能を比較する際に統計解析を用いることで、最適な形状を決定するための最適化システムとして統合する。

2. 提案手法

装置内部を動き回る粉体の挙動を解析するために、力積型離散要素法 (IB-DEM:Impulse Based Discrete Element Method)[9]を用いる。固体粒子同士の衝突をシミュレーションする場合、バネによる反発モデルを用いる DEM[10]を用いる場合が多い。しかしながら、バネモデルを用いた DEM はバネの剛性に基づいた時間解像度の制約が厳しく、計算コストが高くなる傾向にある。IB-DEM は、二体衝突を仮定した運動量交換則によって固体粒子同士の衝突を解く手法であるため、バネモデルを用いた DEM に比べて時間解像度の制約が大幅に緩和されている。そのため、大きな時間増分を用いた IB-DEM でシミュレーションすることで、装置内部の粒子挙動を高速に解くことが可能となる。

装置内部の剛体壁を再現するために、符号付距離関数 (SDF:Signed Distance Function) を用いた壁モデル[8]を用いる。物体内部を正の SDF、物体外部を負の SDF、SDF の空間勾配から壁面の法線方向を求める。一辺が h の長さの立方体で構成された構造格子を計算空間内に配置し、格子節点に SDF の値を格納する。格子内の任

意の位置における壁からの最短距離は、周囲の節点を持つ SDF から線形補間することによって求める。求めた壁からの距離を用いて粒子との衝突を検知し、IB-DEM の計算に用いる。

装置内壁の摩耗による形状変化を再現するために、界面捕捉型摩耗モデル (ICWM: Interface Capturing Wear Model)[7] を用いる。ICWM では粒子運動を再現する IB-DEM の計算と、SDF で表現された壁の形状変化の計算を逐次時差解法 [11] によって連成する。

ICWM では、SDF を時間微分得られる以下の Hamilton-Jacobi 方程式に従って形状変化を計算する。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \Delta V |\nabla \phi| = 0 \quad (1)$$

ϕ は SDF の値、 ΔV は SDF の変形量である摩耗体積を表す。摩耗体積には Finnie 則 [12] を用い、以下の式で表される。

$$\Delta V_k = \begin{cases} \beta \frac{m_i}{2} |\mathbf{v}_{i-\partial\Omega}|^2 (\sin(2\theta) - 3 \sin^2(\theta)) & \tan(\theta) \leq \frac{1}{3} \\ \beta \frac{m_i}{2} |\mathbf{v}_{i-\partial\Omega}|^2 \left(\frac{\cos^2(\theta)}{3} \right) & \tan(\theta) > \frac{1}{3} \end{cases} \quad (2)$$

k は格子番号、 m_i は粒子 i の質量、 $\mathbf{v}_{i-\partial\Omega}$ は粒子 i と壁境界 $\partial\Omega$ の相対速度、 θ は衝突角度、 β は摩耗定数である。摩耗定数 β は、計算効率を上げるために時間増分あたりの SDF 変形量を増加させるように大きな値を用いる。

3. 摩耗を考慮した最適化例

最適化の例として、乾式ビーズミルを対象に解析をする。回転する円筒部品の周囲に円柱形状のピンが取り付けられたピンロータを基準形状とする。ピンロータのビーズミルは、ピンの形状が粉砕性能に大きな影響を与えることが知られている [2]。そのことから、基準形状に対して、ピンの太さを 3 水準、ピンの本数を 3 水準を与え、全 9 通りの形状の条件から、最も粉砕性能が高くその粉砕性能を摩耗する中で維持できる形状を最適形状とする。また、粉砕性能は装置内部に投入されたビーズ同士の衝突エネルギーと良い相関を持つことが知られている [13]。そのため、ICWM を用いたシミュレーションでは、全ての形状条件に対して同じ回転速度で稼働するビーズミルの内部で運動するビーズの衝突エネルギーを評価することで粉砕性能を予測する (図-1)。

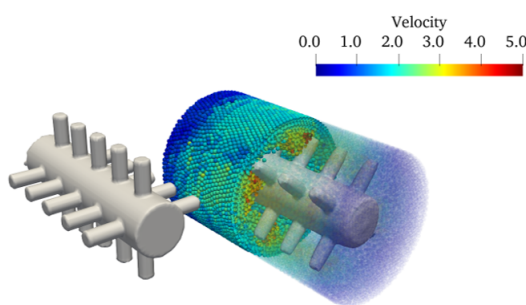


図-1 基準形状に関する ICWM の解析例

それぞれの形状条件に対してシミュレーションした結果を図-2 に示す。横軸はシミュレーションにおける

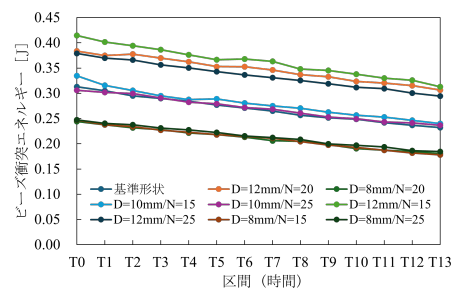


図-2 各形状条件のビーズの衝突エネルギーの時間変化

摩耗進行の時間を表し、縦軸は計算空間内で発生したビーズの衝突エネルギーを表す。形状条件はピン径を D で示し、ピン本数を N で表す。図-2 から、衝突エネルギーが最も大きく、摩耗の進行とともにその順位を変えない形状である $D=12\text{mm}$ かつ $N=15$ の形状が最適であると判断できる。

講演では、計算条件の詳細と最適形状の選択根拠とともに、実機を製作した検証実験についても報告する。

4. おわりに

固体粒子の衝突によって発生する摩耗形状の変化を再現可能な ICWM を用いることで、粉体装置が持つ性能を摩耗を伴う条件下で最適化が可能であることを示した。統計解析を併用したパラメータ最適化であり、部品長さや穴径や部品個数など様々な設計諸言をパラメータとして扱うことが出来るため、複雑な形状を持つ装置の形状最適化に適用可能である。また、目的性能と整合性の高い計算値が既知である場合には、ICWM によって妥当な精度で性能を予測することが出来る。

参考文献

- [1] T. Ishii, Grinding and dispersion techniques using beadmill, *J. Jpn. Soc. Colour Mater.*, Vol.81 (2008) pp.169-177.
- [2] R. Soda, A. Sato, J. Kano, F. Saito, Development of prediction method of wear rate during wet stirred milling by using DEM, *Journal of the Society of Powder Technology, Japan*, Vol. 51 (2014) pp.436-443.
- [3] D. Sterling, D. Schons, S. Breitung-Faes, A. Kwade, Effects of axial grinding media distribution on the disc wear behavior of a stirred media mill, *Minerals Engineering*, Vol.185 (2022) 107702.
- [4] P. W. Cleary, Predicting charge motion, power draw, segregation and wear in ball mills using discrete element methods, *Minerals Engineering*, Vol.11 (1998) pp.1061-1080.
- [5] C. T. Jayasundara, R. Y. Yang, A. B. Yu, D. Curry, Prediction of the disc wear in a model IsaMill and its effect on the flow of grinding media, *Minerals Engineering*, Vol.24 (2011) pp.1586-1594.

- [6] D. Boemer, J. P. Ponthot, A generic wear prediction procedure based on the discrete element method for ball mill liners in the cement industry, *Minerals Engineering*, Vol.109 (2017) pp.55-79.
- [7] K. Shioiri, H. Ohmura, M. Asai, N. Mitsume, Interface Capturing Wear Model for Wear Simulation of Bead Mills, *Journal of the Society of Powder Technology, Japan*, Vol. 60 (2023) pp.470-480.
- [8] Y. Shigeto, M. Sakai, Arbitrary-shaped wall boundary modeling based on signed distance functions for granular flow simulations, *Chemical Engineering Journal*, Vol.231 (2013) pp.464-476.
- [9] K. Shioiri, H. Ohmura, M. Asai, N. Mitsume, The evaluation for wet grinding performance of beads mill using impulsebased DEM, *Journal of the Society of Powder Technology, Japan*, Vol. 59 (2022) pp.488-497.
- [10] P. A. Cundall, O. D. L. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, pp.47-65, 1979.
- [11] C. Farhat, M. Lesoinne, Two efficient staggered algorithms for the serial and parallel solution of three-dimensional nonlinear transient aeroelastic problems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.182 (2000) pp.499-515.
- [12] I. Finnie, Erosion of surfaces by solid particles, *Wear*, Vol.3 (1960) pp.87-103.
- [13] D. Gudin, R. Turczyn, H. Mio, J. Kano, F. Saito, Simulation of the movement of beads by the DEM with respect to the wet grinding process, *AIChE J.*, Vol. 52 (2006) pp.3421-3426.