

Verification for Constructing Digital Twin of Powder Tester: Part 2

Tatsuya TAKAHASHI¹, Shuji SASABE²

Background and Aims: In contemporary society, rapid digitalization is advancing, expanding IoT platforms in the manufacturing industry. Among these developments, interest in digital twin technology is growing. However, this technology requires advanced computational capabilities, posing significant technical challenges. Particularly in the field of powder technology, it is necessary to accurately consider the complex behavior of particles, making its realization difficult. To address these challenges, we have focused on measuring properties such as the angle of repose and bulk density using the powder property measuring device “Powder Tester”. In collaboration with DENSE Ltd., we have been developing a simulation model that forms the basis of digital twins in powder technology.

Methods and Results: To numerically evaluate the complex behavior of powders, we measured the angle of repose and bulk density using the Powder TesterTM in collaboration with DENSE Ltd. Based on these measurements, we developed a simulation model applying a coarse-grained model for irregular particles. This model enables practical time analysis in powder simulations, which typically require enormous computational costs. By incorporating these measurements into our model, we were able to simulate the behavior of powders more efficiently. The simulation results showed good agreement with experimental data, validating the model’s accuracy and effectiveness in predicting powder behavior under various conditions. Additionally, we explored different simulation scenarios to assess the model’s robustness and flexibility, further confirming its potential for practical applications in the industry.

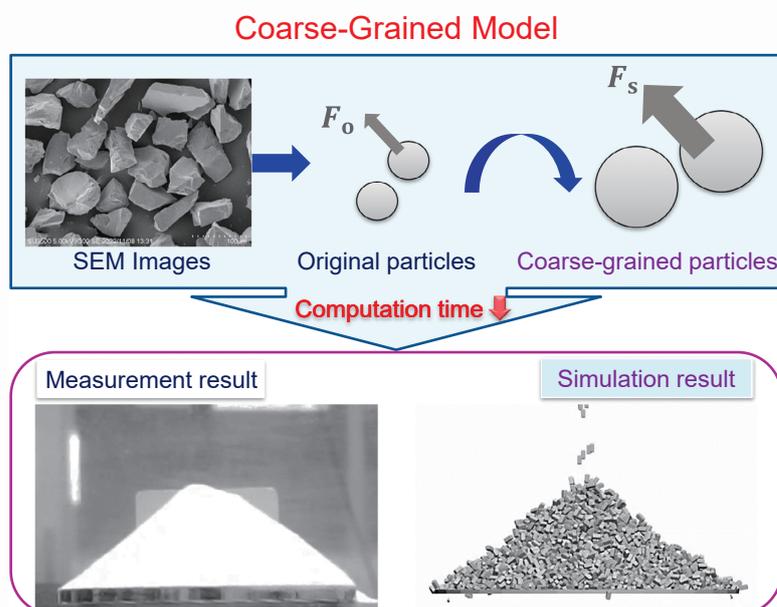
Conclusions and Outlooks: The development of this simulation model has demonstrated that the behavior of irregular particles can be analyzed within practical timeframes. This achievement is expected to contribute to advancing digital twin technology in powder technology. Future challenges include further improving this model and applying it to simulate a wider range of powder behaviors, ultimately enhancing the accuracy and efficiency of digital twins in various industrial applications. By continuing this research, we aim to overcome existing limitations and drive innovation in the field of powder technology. Our ongoing efforts will focus on integrating more complex particle interactions and refining the model to handle diverse powder properties, paving the way for more sophisticated digital twin solutions.

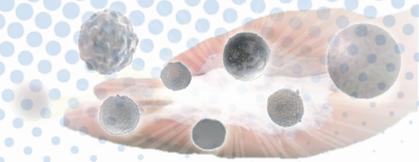
Keywords:

Digital Twin
Powder Tester
Coarse-grained
Discrete Element Method

¹ Information Development Dept., Powder Technology Research Institute, Hosokawa Micron Corporation, JAPAN

² Information Development Dept. General Manager, Powder Technology Research Institute Deputy Director, Hosokawa Micron Corporation, JAPAN





パウダテスタ[®]のデジタルツイン構築に向けた検証報告 2

高橋 達也¹, 笹辺 修司²

¹ ホソカワミクロン株式会社 粉体工学研究所 情報開発部

² 同 副所長 兼 情報開発部長

抄 録

現代社会は急速にデジタル化が進展しており、製造業界にもIoTプラットフォームの提供が広がりつつある。その中でも、デジタルツイン技術への関心が高まっているが、この技術には高度な計算能力が要求されるため、多くの技術的課題が存在する。特に粉体分野においては、粒子の複雑な挙動を正確に考慮する必要があり、その実現は困難とされている。こうした課題を克服するため、粉体の挙動を数値的に評価する実質業界標準である粉体物性測定装置「パウダテスタ[®]」の安息角やかさ密度などの測定に焦点を当て、粉体分野におけるデジタルツインの基礎となるシミュレーションモデルの開発を株式会社DENSEと共同で進めてきた。結果、一般的に膨大な解析コストを要する粉体のシミュレーションにおいて、不定形粒子を対象に粗視化モデルを適用することで、実用的な時間内での解析を可能とした。このシミュレーションモデルの内容とその検証結果について報告する。

1 はじめに

1.1 デジタルツイン

デジタルツインは、物理的な対象物やシステムをデジタル上で再現する技術である。この仮想モデルは、リアルタイムで物理的な対象物の状態を反映し、データの収集・分析を通じて最適化や予測を行うことができる。例えば、製造業では工場の機械や製品のデジタルツインを用いて、運用効率の向上や故障予知が可能とされる^[1]。デジタルツインはIoT（モノのインターネット）やAI（人工知能）の技術と組み合わせることで、その効果を最大限に引き出し、様々な産業分野での革新的な変革を推進している。

他方、測定機を使用する際には、精度の高い測定結果を得るために適切な測定条件の設定が不可欠である。しかし、粉体は多様な特性を有しており、パラメータ設定には豊富な経験と時間をかけた検証が求められる。これに対し、デジタルツイン技術を導入することで、測定条件が結果に与える影響を事前にシミュレーションし予測することが可能となる。

これにより、測定機の操作が効率的かつ最適化され、測定プロセス全体の精度と効率性が飛躍的に向上することが期待される。

1.2 粉体シミュレーション

粉体のシミュレーション研究は多岐にわたるが、測定を対象とした研究も増加している。しかし、粉体物性評価のひとつである安息角のシミュレーション研究はモデル中心で実現象との対比が十分に検討されておらず、また産業界で重視される測定条件や環境、駆動部の繰り返し精度などが考慮されていない。また、円筒容器を用いた実験は歴史が浅く、学術的検討の途上にある。最近の研究は数ミリ径の大粒子を対象としており、実現象の完全再現には至っていない。この現状を打破すべく、当社では粉体物性測定機パウダテスタ[®]を用い、より現実に近いシミュレーションモデルの構築を検討した。

パウダテスタは、粉体の物性を測定する装置の一つであり、1969年の初代モデル発売以来、多くの関連論文が発表され、約5千台以上の納入実績を持

つ実質的な業界標準装置である。しかし、粉体の特性上、測定結果の繰り返し精度が低いことが課題とされる。このため、測定装置の駆動系の繰り返し精度を高く維持することで、不安定な被測定物に対しても再現性の高い測定結果を得ることが可能となっている^[2,3]。

今回利用した粉体シミュレーションには、離散要素法 (Discrete Element Method, DEM) を採用した。DEM は個々の粒子運動を解析し、その流動を追跡する手法であり、粒子間の接触力を考慮し、並進運動と回転運動の運動方程式を解くことで粉体の挙動を再現する^[4]。この方法では摩擦力を考慮することで、表面性状の影響も取り入れ、球形だけでなく非球形の粒子の取り扱いも可能である^[5]。また、多様な相互作用を容易に組み込むことができる。ただし、DEM には高い計算コストが伴う。例えば、**図 1** に示すようにスーパーコンピュータ「富岳」を用いて 12 億個の粒子を解析するには約 1 日を要する^[6]。粒子径 10 μm の粉末で安息角を測定する場合、数百 mL の粉末は数千億個の粒子を含み、市販のワークステーションでは数日以内に計算を完了させることは困難である。この問題に対処するため、粗視化モデルを用いることで、解析モデルの粒子数を削減し計算時間を短縮する。例えば粒子径を 100 倍にすると 12 億個の粒子は約数千個に減少し、計算時間を大幅に削減できる。

1.3 目的

本稿の課題と目的を整理する。

- (1) 本来は膨大な計算コストを要する粉体シミュレーションの解析時間を実用的な範囲に抑える。
- (2) パウダテストの測定結果 (実現象) とシミュレーションの解析結果が概ね一致する条件を確

認する。

本稿では、パウダテストの主要な測定項目である安息角とかさ密度を対象に、株式会社 DENSE の開発した粗視化モデルを適用し、シミュレーションのモデル構築を行った。過去には球形の粉体を測定対象とした^[7]が、本稿では難易度が高い非球形 (直方体) の粉体を対象とした。

2 測定条件

使用した粉体およびパウダテストの測定条件について説明する。

使用した粉体は、JIS Z 8901 試験用粉体 2 の No. 1 白色溶融アルミナ (以下、JIS 1 アルミナ) と、JIS 試験用粉体 2 の No. 6 白色溶融アルミナ (以下、JIS 6 アルミナ) である。アルミナの走査電子顕微鏡 (SEM) の撮影画像を **図 2** に、粒子径分布を **図 3** に示す。粒子径分布は、マイクロトラック・ベル株式会社製粒度分布測定装置 (型式:MT3300EXII, 湿式) にて測定した。

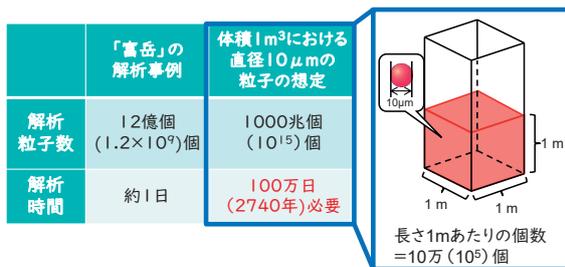


図 1 DEM の計算時間例^[6]

Fig. 1 Example of DEM calculation time^[6].

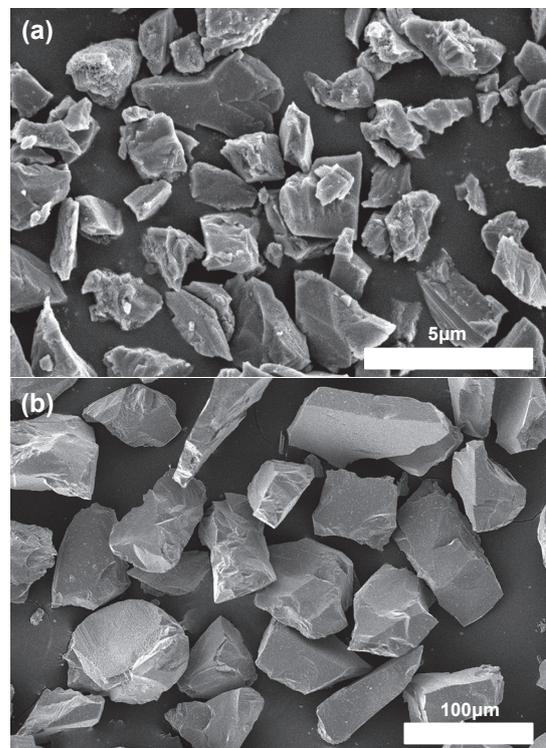


図 2 アルミナ粉末の SEM 画像

Fig. 2 SEM images of alumina powder.

- (a) JIS Test Powders 2 White fused alumina No. 1
- (b) JIS Test Powders 2 White fused alumina No. 6

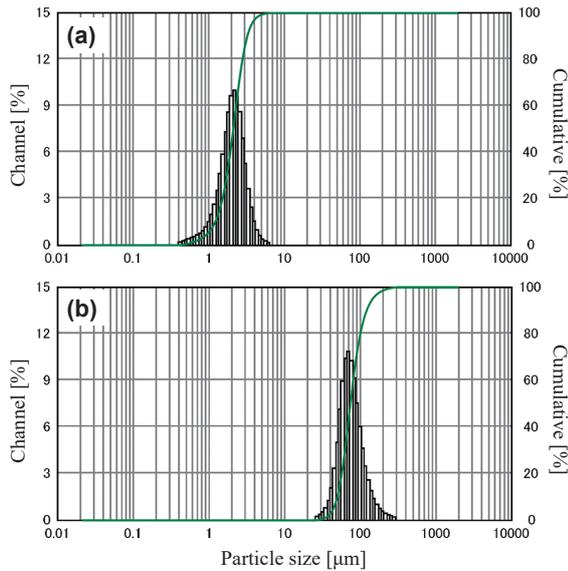


図3 アルミナ粉末の粒子径

Fig. 3 The particle size distributions of the alumina powder.
 (a) JIS Test Powders 2 White fused alumina No. 1
 (b) JIS Test Powders 2 White fused alumina No. 6

表1 パウダテスタ®の測定条件

Table 1 The measurement conditions of the Powder Tester™.

分散篩 (目開き)	JIS1 アルミナ : 150 μm JIS6 アルミナ : 1000 μm
ロート径	7 mm
タップストローク	18 mm
タップ回数	180 回
タップ速度	60 回/分

パウダテスタの測定条件を表1に示す。本条件にて、安息角、ゆるめかさ密度、および固めかさ密度の測定を行った。供給速度は、供給量と供給時間を計測値から算出し、2回測定してその平均値を記載した。この供給速度の実測値は、シミュレーション上の粉体供給速度のパラメータ値に使用した。

3 解析モデル

3.1 粗視化モデル

今回適用した粗視化モデルでは、具体的な粉体の挙動を計算するために、「オリジナル粒子と粗視化粒子間における作用力の関係性」を考慮している^[8]。

本粗視化モデルにおける主要な要素を次に示す。

要素1：作用力に寄与する各変数の関係性

- ① 同じ領域内に同質量分の粒子を均一に配置すると、各々の粒子において、運動量に関する式の関係性が成り立つ^[8]。
- ② 並進速度と回転速度は、各系内の全運動エネルギーを保持する。
- ③ 並進運動は、粗視化による運動エネルギーの変化はない。
- ④ 回転速度は、粗視化粒子はオリジナル粒子に対して中心からの距離が増加するため、オリジナル粒子に対して反比例の関係にある。
- ⑤ 粗視化粒子の粒子変形量と粒子間距離は、幾何学的相似性に由来するため、オリジナル粒子の粒子変形量と粒子間距離に比例する。

要素2：スケーリング則

- ① 粒子の挙動は連続体とみなす場合、検査体積内における作用力の総量は常に同じである^[8]。したがって、粒子の移動は、粗視化率（粒子径比）の影響を考慮する必要はない。
- ② ただし、境界面で働く接触力などの任意の粒子間作用力は、粗視化率の2乗に比例し、検査体積にかかる重力や慣性力などの任意の体積力は粗視化率の3乗に比例する。

3.2 パラメータの選定方法

表2にシミュレーション解析で使用したパラメータを示す。粒子形状はSEM画像を元に、近似形状として直方体粒子を採用した。粒子径は粗視化を適用し、1.8 mmとした。真密度、ポアソン比、反発係数については製品情報及び文献値から定めた。ヤング率は、解析時間を短縮するために、文献値より小さい範囲で適正な値とした^[9]。表面自由エネルギーは、粒子の表面の粗さによって変化するため、文献値を元に、解析パラメータとしてキャリブレーション設定した。転がり摩擦係数とすべり摩擦係数は、安息角の主要パラメータである。よって、実現象に近い挙動を示す値を設定する必要がある。所定の転がり摩擦係数とすべり摩擦係数を入力して安息角のシミュレーションを行い、パウダテスタのJIS1アルミナの測定結果（実現象）に近い解析結果が得られるパラメータ値を採用した。

これらの解析パラメータを、JIS6アルミナ及び、

表2 アルミナの解析パラメータ

Table 2 Calculation conditions of the alumina powder.

	入力値	測定・参考値
粒子径	1.8 mm	JIS1 アルミナ：2 μm JIS6 アルミナ：74 μm (d_{50})
真密度	4000 kg/m ³	4000 kg/m ³ (製品情報)
ヤング率	20 MPa	~200 GPa (文献値)
ポアソン比	0.3	—
反発係数	0.3	—
表面自由エネルギー	20 mJ/m ²	~20 mJ/m ² (文献値)
転がり摩擦係数	0.3	—
すべり摩擦係数	0.5	—

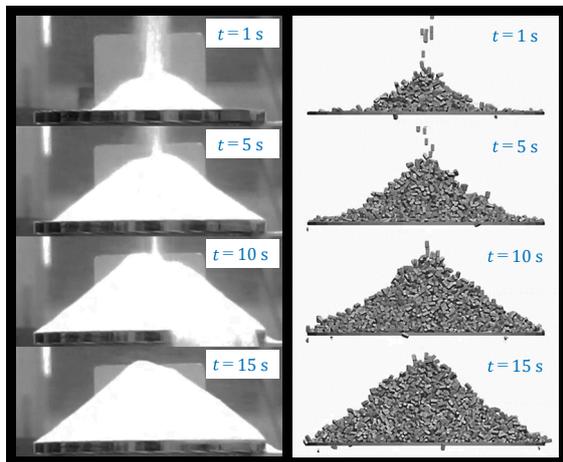


図4 パウダテスタ®とシミュレーションによる安息角形成の時系列変化

Fig. 4 Comparison of typical snapshots between the angle of repose measured by the Powder Tester™ and simulated. (JIS Test Powders 2 White fused alumina No. 6)

かさ密度のシミュレーションにも適用した。

4 検証結果

パウダテスタによる測定結果（実測データ）とシミュレーション解析結果を示す。対象とする安息角は、粉体の流動性評価において重要な指標の一つであり、これは上方から自由落下させた粉体が形成する粉体層の斜角から測定される。図4はJIS6アルミナにおける安息角の形成過程を時系列で示してお

表3 安息角の実測値と解析結果の比較

Table 3 Comparison of the angle of repose between measured result and simulated result.

アルミナ	JIS1	JIS6
実測結果	52.0 ± 0.4°	41.0 ± 1.0°
解析結果	54.0 ± 2.8°	41.5 ± 1.4°

表4 タッピング回数によるかさ密度の変化

Table 4 Comparison of the bulk density by number of tapping. (JIS Test Powders 2 White fused alumina No. 6)

タッピング回数	0回	60回	120回	180回
実測結果 [g/mL]	1.79	2.18	2.23	2.26
解析結果 [g/mL]	2.00	2.33	2.35	2.36
誤差 [%]	11.7	6.9	5.4	4.4

り、実測結果とシミュレーション解析結果は概ね一致していることが視覚的に確認できる。

次に、安息角の実測データとシミュレーション解析結果を表3に、JIS6アルミナを対象にした各タッピング回数におけるかさ密度の変化を表4に示す。これらの結果から、実測値と解析値が近似していることが確認できる。

また、粗視化モデルを適用することにより、解析に要した時間は約1.5時間となった。仮に、粗視化を適用せずに行った場合の理論想定時間は約2000万時間であることから、粗視化モデルの効果が確認できる。

結論として、非球形状の粉体においても、実用的な時間内で実現に近いシミュレーション解析を行うことができた。

5 まとめ

株式会社 DENSE が持つ粗視化モデルを適用した共同研究によって、比較的短い計算時間で粉体の動きを解析するシミュレーションモデルを構築した。過去のシミュレーションでは、球状粒子に対して安息角やかさ密度の測定のみを対象としていたが、今回は非球形状の粒子を対象とした。パウダテスタによる安息角とかさ密度の実測データ（実現象）とシミュレーション解析結果を比較することで、シミュレーションの正確性を実証した。

今回の結果は、粉体分野におけるデジタルツイン技術の実用化に繋がるものと考えます。今後、様々な形状の粉体や測定項目の影響、他の粉体物性測定についての検討を進めることで、シミュレーションモデルの精度向上と適用範囲の拡大が期待される。

当社では、長年にわたり蓄積してきた粉体および測定技術に加え、IIoT技術を融合させることで、お客様に新たな価値を提供するための取り組みを進めていく。

References

- [1] 濱口 謙一, 藤井 正和, “デジタルツイン・シミュレーションによる予測技術の開発”, IHI 技報, 59 (2019) 25–29. https://www.ihico.jp/technology/techinfo/contents_no/_icsFiles/afieldfile/2023/06/17/268a24960d77782ad-03bac59f5f7e22a.pdf accessed29072024.
- [2] 清水 健司, “～粉体特性測定の世界的スタンダード～ホソカワ/ミクロンパウダテスタ最新型の紹介”, 産業機械, 10 (2011) 53–55. <https://www.hosokawamicron.co.jp/jp/files/items/2576/File/201110sgk.pdf> accessed29072024.
- [3] 北村 智浩, 笹辺 修司, “マイナーチェンジしたパウダテスタ「PT-X 型」の技術的特徴”, 粉砕, 60 (2017) 76–80. Kitamura T., Sasabe S., Technical Note of a minor changed Powder Tester “PT-X”, The Micromeritics, 60 (2017) 76–80. <https://doi.org/10.24611/micromeritics.2017015>
- [4] Cundall P.A., Strack O.D.L., A discrete numerical model for granular assemblies, Géotechnique, 29 (1979) 47–65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
- [5] 山井 三亀夫, 中田 洋一, “離散要素法 (Discrete Element Method) の基礎と適用事例”, 精密工学会誌, 84 (2018) 615–619. Yamanoi M., Nakata Y., Basics and applications of discrete element method, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 84 (2018) 615–619. <https://doi.org/10.2493/jjspe.84.615>
- [6] 古市 幹人, “富岳による実用的な大規模個別要素法 (DEM) シミュレーションの実施”, HPCIシステム利用研究課題利用報告書, 高度情報科学技術研究機構 (RIS) (2021) hp210054. <https://www.hpci-office.jp/output/hp200162/outcome.pdf> accessed29072024
- [7] 中村 優志, 笹辺 修司, “パウダテスタ® のデジタルツイン構築に向けた検証報告”, 粉砕, 67 (2024) 93–98. Nakamura Y., Sasabe S., Verification for constructing digital twin of Powder Tester, The Micromeritics, 67 (2024) 93–98. <https://doi.org/10.24611/micromeritics.2024016>
- [8] Washino K., Chan E.L., Nishida Y., Tsuji T., Coarse grained DEM simulation of non-spherical and poly-dispersed particles using Scaled-Up Particle (SUP) model, Powder Technology, 426 (2023) 118676. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118676>
- [9] Washino K., Chan E.L., Tanaka T., DEM with attraction forces using reduced particle stiffness, Powder Technology, 325 (2018) 202–208. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.11.024>

著者紹介



高橋 達也 Tatsuya TAKAHASHI

〔経歴〕 2015年関西学院大学大学院理工学部物理学科卒業。同年ホソカワミクロン株式会社入社。粉体工学研究所 テストセンター、測定分析センターを経て2021年10月より現職。

〔専門〕 半導体工学と流体シミュレーション。

〔連絡先〕 ttakahashi@hmc.hosokawa.com



笹辺 修司 Shuji SASABE

〔経歴〕 1991年日本工業大学大学院工学研究科修士課程修了。ホソカワミクロン株式会社入社。粉体工学研究所、技術本部、新規事業開発プロジェクトリーダー、ナノパーティクルテクノロジーセンター長、研究室室長。測定分析センター長などを経て、2021年10月から現職。

〔専門〕 粉体工学と静電気。最近ではIIoT関連技術の開発に取り組んでいる。

〔連絡先〕 ssasabe@hmc.hosokawa.com