

パウダテスタ[®]のデジタルツイン構築に向けた検証報告

Verification for Constructing Digital Twin of POWDER TESTER

中村 優志¹, 笹辺 修司²

¹ ホソカワミクロン株式会社 ICT デジタル推進事業部 創造開発室

² 同 事業部長 兼 創造開発室長

Yushi NAKAMURA¹, Shuji SASABE²

¹ Creativity Development Section, ICT Digital Promotion Division, Hosokawa Micron Corporation, JAPAN

² Division Director, ICT Digital Promotion System Division & Section Manager,
Creativity Development Section, Hosokawa Micron Corporation, JAPAN

抄 録

世の中が急速にデジタル化しており、Industry 4.0 の提唱や産業界による IoT プラットフォームの提供などにより、製造業界においてもデジタル化は話題の中心に位置する。デジタルツインという概念は注目を集めているが、その実現には高度な計算が必要である。特に粉体分野では粒子の振る舞いを正確に捉える必要があり、そのためには技術的な課題が数多く存在している。これらの課題を解決すべく、粉体の挙動を数値で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[®]」の安息角とかさ密度の測定に焦点を当て、粉体分野のデジタルツインの基礎となるシミュレーションモデルについて、株式会社 DENSE と共同開発を行った。一般的に粉体のシミュレーションは解析コストが膨大となるが、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検証結果を報告する。

ABSTRACT

The world is rapidly being digitized due to the advocacy of Industry 4.0 and the provision of IoT platforms in the industrial world. As a result, digitization has become a central topic in the manufacturing industry. Among the various aspects of digitization, digital twins have attracted considerable attention. However, implementing digital twins poses many technical challenges, demanding advanced calculations, especially in the field of powders, where the consideration of particle behavior is complex. In order to solve these problems, we have focused on measuring the angle of repose and bulk density using the “POWDER TESTER” as the standard method for numerically evaluating powder behavior in practical industries. This approach allows us to develop a simulation model forming the basis of the digital twin in the powder field, in collaboration with DENSE Co., Ltd. Although powder simulations are computationally expensive in general, we managed to perform this simulation within a practical timeframe by applying a coarse-grained model. In this report, we report the construction and verification results of this simulation model.

1 はじめに

1.1 デジタルツイン

産業界によるIoTプラットフォームの提供などにより、デジタルツインが注目されている。デジタルツインとは、現実世界から収集したデータをもとに、仮想空間上に同じ環境を再現する技術である。この概念は、90年代初頭にイェール大学のデイビッド・ゲランター氏が発想を提唱したことが始まりと言われ、「ミラー・ワールド」と呼ばれるデジタル空間に再現された世界と現実世界が双方向にリアルタイムで連携をすることが可能とされる。デジタル空間内でAIやシミュレーションによって分析された結果を現実世界へフィードバックすることで、プラントや機械の予測が可能となる。デジタルツインの活用事例としては、プラントの最適運転や故障予知などが挙げられる^[1]。

一方、測定機を使用する場合、正確な測定結果を得るためには、適した測定条件の設定が必要である。しかしながら、粉体は様々な特性を持ち、パラメータの設定には、相応の経験と検証に時間を要する。これに対して、デジタルツインを適用することで、測定条件による結果への影響を予測することが可能となり、結果として効率的かつ最適な測定機のオペレーションの実現が期待される。

1.2 粉体シミュレーション

多くの粉体のシミュレーション研究が行われているが、測定を対象にしたシミュレーション研究も多く見かけるようになった。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の研究事例では、シミュレーションモデルが主体であり、産業界で重要視される測定機の測定条件や測定環境、駆動部の繰り返し精度などの要素までは考慮されていないことが多い。また、主に円筒容器を対象とした実験が行われているが、この系の安息角は歴史が浅く、学術的な検討がなされている最中である。最近の研究では、数mmオーダーの大きい粒子を対象としており、実現象をシミュレーションで正確に再現できるとは言いがたい^[2]。これらの現状に対して、当社は粉体物性測定機「パウダテスタ[®]」を使用し、より実現象に近いシミュレーションのモデル構築を検討した。

パウダテスタ[®]は粉体の物性を測定する測定機の

一つである。1969年に初代のモデルが発売されたことから歴史が古く、関連論文が数多くある。販売以来、約5千台の納入実績があり、実質的な業界標準装置である。一方で、粉体の特性に起因する課題も存在する。粉体は不安定な性質を持っており、測定結果の繰り返し精度が一般的に低い。よって、被測定物が不安定である以上、最新型番では測定値への影響が比較的大きな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、再現性のある測定結果が得られることが特徴である^[3-4]。

今回利用した粉体シミュレーションは、離散要素法 (Discrete Element Method, DEM) とした。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る^[5]。DEMでは、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いて粉体の挙動を再現する。この方法では、摩擦力を考慮することで表面性状による影響も取り入れられる。また、球形の粒子だけでなく、非球形の粒子の取り扱いも可能である^[6]。さらに、さまざまな相互作用を容易に組み込むことができる。ただし、個々の粒子の解析は現実の現象に、より近い挙動を適切に表現することが重要であるが、多数の粒子を扱うことから高い計算コストがかかるという課題がある。例えば、粉体シミュレーションの最新研究によると、スーパーコンピュータ「富岳」を使用して12億個の粒子の動きを解析するには、約1日がかかると報告されている^[7]。仮に粒子径30 μm のジルコニア粉末を使用し、安息角測定を行おうとする場合、**図1**に示すように必要な粉末量220gは約23億個の粒子数となる。スーパーコンピュータを使用しても数日かかるため、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不可能である。この課題に対応する

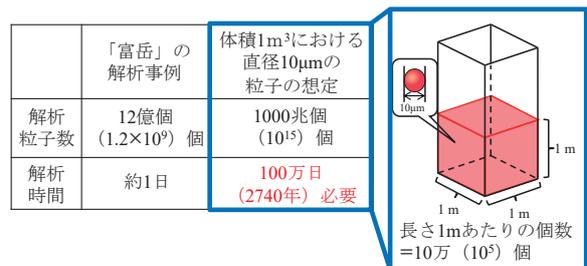


図1 DEMの計算時間例^[7]

Fig. 1 Example of DEM calculation time^[7].

方法として、解析モデルの粒子数を削減し、計算時間を短縮する粗視化モデルがある。粒子数は粒子径の4乗に反比例するため、12億個の粒子を含むモデルを60倍の粒子径にすると約11,000個になる。その結果、計算時間を大幅に削減することができる。

1.3 目的

今回対象とするシミュレーションのモデル構築における課題を以下に整理する。

- (1) 粉体のシミュレーションでは、粒子の数が多く、計算コストが膨大になる。課題となる解析に要する時間を実用的な範囲に抑えること。
- (2) パウダテスタ[®]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こと。

本稿では、パウダテスタ[®]の主要な測定項目である安息角・かさ密度を対象に、シミュレーションのモデル構築を行った。また、株式会社DENSEの開発した粗視化モデルを適用し、解析を行った。

2 測定条件

使用した粉体およびパウダテスタ[®]の測定条件について説明する。

使用した粉体は、東ソー株式会社製TZ-B30ジルコニア（以下、ジルコニア）である。ジルコニアの走査電子顕微鏡（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）を使用して測定した。平均粒子径（ d_{50} ）は、28.58 μm であった。

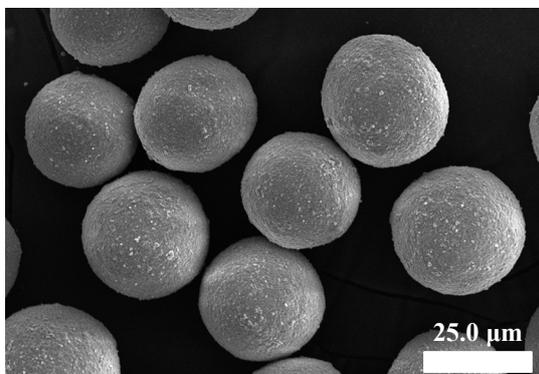


図2 ジルコニア粉体のSEM画像
Fig. 2 The SEM image of the zirconia powder.

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、かさ密度、および固めかさ密度の測定を行った。尚、測定粉体であるジルコニアの流動性が十分に高いことから、分散篩の振動は行わない設定とした。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。

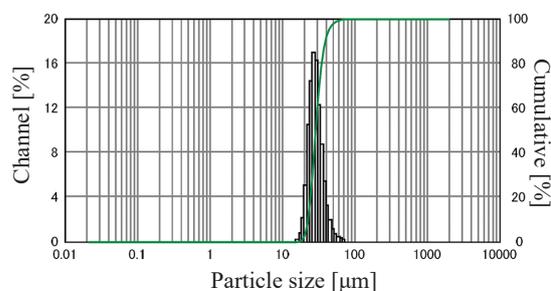


図3 ジルコニア粉末の粒子径
Fig. 3 The particle size distribution of the zirconia powder.

表1 パウダテスタ[®]の測定条件

Table 1 The measurement condition of the Powder Teaster.

分散篩（目開き）	1700 μm
ロート径	2.5 mm
供給速度	5.01 g/s
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

- 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、その回転速度は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：スケージング則

- 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にジルコニアのシミュレーション解析で使用するパラメータを示す。粒子形状はSEM画像に示した通り、球形粒子とした。粒子径は粗視化率を60に定め、測定結果の d_{50} の値をもとに1.8mm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

表2 ジルコニアの解析パラメータ
Table 2 Calculation conditions of the zirconia powder.

	入力値	測定・参考値
粒子径	1.8 mm (粗視化率 = 60)	30 μm (d_{50})
真密度	6050 kg/m ³	6050 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	0.3 (文献値)
反発係数	0.3	—
表面自由エネルギー	40 mJ/m ²	~40 mJ/m ² (文献値)
転がり摩擦係数	調査	—
すべり摩擦係数	調査	—

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した。

所定の転がり摩擦係数とすべり摩擦係数を入力して行った安息角のシミュレーション結果を図4に示す。縦軸は転がり摩擦係数を、横軸はすべり摩擦係数を示し、パウダテスタ[®]の測定結果に近い解析結果を図中の領域に示している。実測定の安息角は26.0度であり、転がり摩擦係数は0-0.01、すべり摩擦係数は0.1の範囲で近い値を示した。本結果から得られた転がり摩擦係数とすべり摩擦係数の数値を、次章で説明する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[®]の測定結果（実測結果）とシミュレーションの解析結果を示す。対象とする安息角は、流動性を評価するうえで重要な指標の一つであり、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注入法である。図5は安息角形成の時系列変化を示しており、目視にて実測結果と解

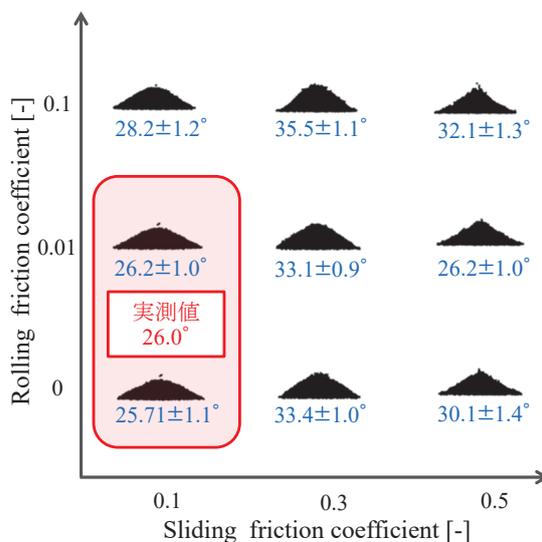


図4 各転がり摩擦係数とすべり摩擦係数における安息角のシミュレーション結果

Fig. 4 Simulated results of angle of repose for each rolling friction coefficient and sliding friction coefficient.



図5 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. 5 Comparison of typical snapshots between the angle of repose measured by the powder tester and simulated.

表3 安息角とかさ密度の実測値と解析結果の比較

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

	安息角	ゆるめかさ密度	固めかさ密度
実測結果	26.0°	3.46 g/ml	3.79 g/ml
解析結果	28.0°	3.65 g/ml	3.80 g/ml

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.

タッピング回数	0回	60回	120回	180回
実測結果 [g/ml]	3.46	3.75	3.78	3.79
解析結果 [g/ml]	3.65	3.78	3.80	3.80
誤差 [%]	5.2	0.8	0.5	0.3

析結果は、概ね一致していることがわかる。

次に、安息角とかさ密度の実測結果と解析結果を表3に、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。本結果から、実測結果と解析結果は、近い値を示していることがわかる。また、粗視化モデルを適用することによって、解析に要した時間は1.5時間と実用化が視野に入ってくる範囲に収まった。

結論として、計算時間の大幅な削減を果たし、実用的な解析時間で実現象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

本研究では、株式会社 DENSE が開発した粗視化モデルを適用し、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のモデルを構築した。また、パウダテスタ®の安息角とかさ密度の実測値(実現象)と、シミュレーションの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示した。

本結果から、粉体分野におけるデジタルツイン技術の実用化の可能性が高まったと考えられる。

今回のシミュレーションでは、球状粒子に関する

安息角やかさ密度の測定を取り上げたが、今後は異なる形状の粉体や異なる測定項目の影響についても検討を進め、シミュレーションモデルの精度向上を目指す。

当社では、長きにわたり培った粉体・測定技術とIIoT技術を組み合わせることで、お客様へ新しいサービスの提供に向け、取り組んでいく。

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.
 [2] 中田 洋一, 山井三亀夫, “シャノン・エントロピーによる粉粒体の混合度の定量評価”, 粉体工学会誌, 54 (2017) 296–304. Nakata Y., Yamanoi M., Quantitative Evaluation of Mixed States of Granular Systems with Shannon Entropy, Journal of the Society of Powder Technology, Japan, 54 (2017) 296–304. <https://doi.org/10.4164/sptj.54.296>
 [3] 清水 健司, “～粉体特性測定の世界的标准～ホンカワ/ミクロンパウダテスタ最新型”, 産業機械, 10 (2011) 53–55.
 [4] 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>

[5] 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>
 [6] 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>
 [7] 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>
 [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>

テクニカルノート

ミニ粉体技術

安息角と流動性の関係

Relationship between Angle of Repose and Flowability

一般的には、安息角や充填率によって流動性を評価する簡易的な方法が用いられることが多い。しかし例えば、表 1 に示したように、安息角が低いにも関わらず、流動性が悪い粉体が存在するため、この方法で流動性を評価することはあまり望ましい方法ではない。一方、パウダテスタ[®]では、R.L. Carr 氏が提唱した方法により、粉体特性値の基本である、安息角や凝集度などの 7 種類の粉体特性値と、固めかさ密度など 3 種類の値を 1 台で測定し、それらの総合評価によって「流動性」を求めることが可能である。

図 1 に示す通り、パウダテスタ[®]による測定値は人間の感覚的な指標と良好な相関関係にあることが報告されており、実際の現象をうまく反映した値とみなされている。

表 1 安息角と流動性指数

サンプル名	安息角 [°]	流動性指数 [-]	流動性の程度
炭素材料	26.1	57	低い
化学薬品	34.0	55	低い
ピッチ	36.1	52.5	低い
食用色素	36.3	38.5	かなり低い
化粧品材料	37.8	50.5	低い
磁性粉	38.1	59	低い
ナノサイズシリカ	38.2	43	低い
ナノサイズ炭酸カルシウム	38.4	36	かなり低い

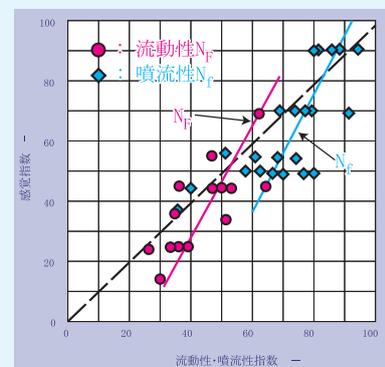


図 1 流動性指数・噴流性指数と感覚指数の関係 (粉体工学会誌, 1972 年 9 巻 2 号 p 90–97)