

共同利用(産業利用トライアルユース:先端研究施設共用促進事業
『みんなのスパコン』TSUBAME によるベタスケールへの飛翔)
成果報告書 平成 24 年度 課題種別

利用課題名 個別要素法を用いた粉末充填の大規模シミュレーション
英文: Large-scale simulation of compacting metal powder using DEM

大塚 順
Jun Otsuka

住友電気工業株式会社 解析技術研究センター
Sumitomo Electric Industries, Ltd.
<http://www.sei.co.jp/index.ja.html>

邦文抄録(300 字程度)

粉末冶金製品の製造プロセスにおいて製品品質への影響が大きい給粉工程を改善するため、貯蔵装置内の粉体挙動を向上させるための検討を行った。シミュレーション手法には、昨年度の課題で開発した TSUBAME を利用した個別要素法シミュレーション技術を適用した。まず、漏斗内の粉体挙動を精密に解析するために導入が必要であった付着力をモデルに取り入れた。その結果、“あり地獄”斜面の“土砂崩れ”を再現できるようになった。次に、インサート形状を変更することでマスフロー化を目指した。漏斗全体をマスフロー化することはできなかったが、漏斗上部で流れが改善されており、ある程度効果があることを確認した。

英文抄録(100 words 程度)

In this study, the behavior of the particles was simulated in order to improve the compacting process, which has an impact on product quality. The simulation was performed using a numerical code based on the Discrete Element Method, which had been ported to TSUBAME last year. In order to improve the analysis precision for the behavior of the particles in the storage tank, inter-particle adhesion was needed and modeled. As a result, the particles slid discontinuously in the slope of *doodlebug*, which is consistent with the observation by high-speed camera. Next, we tried to improve the flow behavior from “funnel flow” type to “mass flow” by modifying the insert shape. It has been shown that the modified insert was found to be meaningfully effective; the flow improved in the upper region of the tank, however, the entire flow did not change to “mass flow”.

Keywords: 個別要素法, DEM, 粉末冶金, 粉体シミュレーション

背景と目的

原料に粉末を用い、これを添加物と混合、成形して最後に焼結することで製造される粉末冶金製品は、各種の機械装置に部品として組み込まれており、現代の我々の生活において必要不可欠である。粉末を金型に充填する給粉工程におけるプロセス技術が製品の性能に大きく影響するが、これまで暗黙知に依存する部分が大きかった。新たな製品開発やさらなる生産性向上を図るにはシミュレーション技術の開発が重要課題である。そこで、有力なシミュレーション手法として、お互いに相互作用する個々の粒子の運動をコンピュータ上で逐次追跡する個別要素法によるプロセス設計が検討されている。

個別要素法では粒子の挙動をニュートンの運動方程

式を数値積分で求めるが、その時間刻みが非常に小さいことに加えて、シミュレーションモデルを現実近づけるには扱う粒子数を増やす必要があるため、計算時間は非常に長くなる。そこで、昨年度の利用課題「個別要素法を用いた粉末充填シミュレーションプログラムの並列化とその評価」においては、造粒体を貯蔵装置から排出するときの粉体挙動に関して、TSUBAME を利用した大規模計算技術を開発して実際の計算に役立つレベルに達することができた。

本プロジェクトでは、実際のプロセスの改良に役立つ知見を得ることを目指し、貯蔵装置内の粉体挙動を向上させる条件を検討した。まず、漏斗内の粉体挙動に関する解析精度を向上させるため、解析モデルの精密化を行った。精度検証には実験で観察した漏斗内の

“あり地獄”との比較を行った。次に、邪魔板(インサート)形状の変更によるマスフロー化を検討した。

概要

貯蔵装置内の粉体挙動を向上させることを目的として、個別要素法によるシミュレーションを実施した。まず、インサートの効果を検討するための解析精度を得るため、付着力を導入して解析モデルを精密化した。その結果、昨年度は再現できなかった“あり地獄”の斜面における“土砂崩れ”を再現できるようになった。次に、インサート形状を変更することでマスフロー化を目指したが、ある程度の効果は認められたものの、漏斗全体をマスフロー化することはできなかった。インサートの壁面付近で粒子の流れが乱れているのが問題と思われ、この解決には別の検討が必要とわかった。

結果および考察

《計算条件》

個別要素法は、粒子に働く力とニュートンの運動方程式を陽解法で繰り返し計算する手法である。フローチャートを図 1 に示す[1]。膨大な計算時間を短縮するため、OpenMP 並列を適用して高速化を行い、並列計算によるスピードアップは、8 並列計算で単体計算の 2.92 倍である。計算時間短縮のため、粒径を現実の 5 倍に拡大(粒子数は 1/125 倍)した。

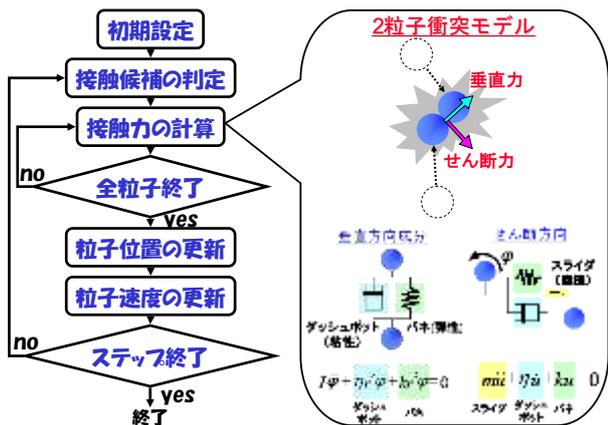


図 1 個別要素法の計算フロー

《解析モデルの精密化》

シミュレーションに必要で基本的なパラメータは昨年度までに実験的に求めていた。しかし、漏斗内の粉体挙動が定性的に実験と合わなかった: 現実には排出口

直上の表面が窪んで“あり地獄”が発生し、その斜面で粒子が不連続に流れる“土砂崩れ”に似た挙動であるが、シミュレーションでは“あり地獄”は生じたが“土砂崩れ”は生じなかった。インサートの効果を検討するには粒子の流れ方を精度良く解析できることが必要なので、現実との乖離をなくすために今回は“土砂崩れ”を再現することを目標とした。現実との乖離に関して要因分析をしたところ、付着力を導入していなかったことが主因と判明したので、今回は付着力もモデルに導入することにした。付着力を同定する手続きは、アグロボット(ホソカワミクロン製)により粉粒体の引張破断強度を測定した後、Runpf の式により2粒子間の付着力に換算する。ところが、求めた付着力をそのままシミュレーションに用いると、付着力が強くなりすぎて粉体が塊を保持し続けるという非現実的な挙動になるという問題が起きた。これは、付着力の測定に用いた粉末は粒径分布をもっていたが、求めた付着力は平均粒径におけるもので細粒においては効果が実際よりも過大に働いたことが原因と考えた。現実の挙動を再現するには、粒径毎の付着力を同定するのが正確な方法だと思われるが、今回は検討時間を短縮するために付着力の大きさを調整することで対応した。漏斗内の粉体挙動を検討することを踏まえて、粉体挙動が類似している安息角の測定実験(図 2)に対して粉体の崩れ方と安息角が現実と合うことを基準に調整した。合わせ込みにより、付着力は測定値の 0.06 倍にしたときに現実と良く合った。図 3 は付着力の効果によって崩落中の粉末は塊を維持することを示す。

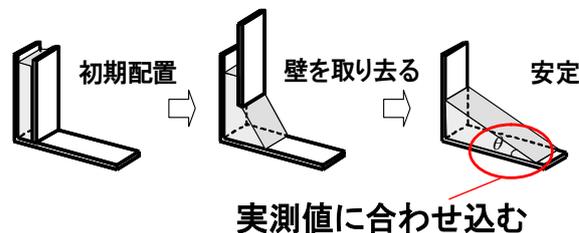


図 2 安息角の測定実験

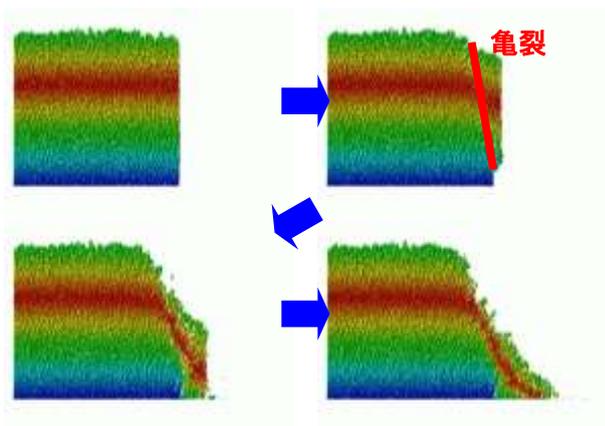


図 3 安息形成のシミュレーション

《モデルの検証》

漏斗内の粉体挙動を再現できることを確認するため、高速カメラで撮影した写真との比較を実施した。計算時間短縮のためモデル形状は擬似2次元とし、粒子数は65000個である。図4にシミュレーションの手順を示す。図の色は、充填後における粒子の高さ方向の座標を示す。図から、粉末はすり鉢状になっており“あり地獄”を形成していることとファンネルフローに近い流れであることがわかる。

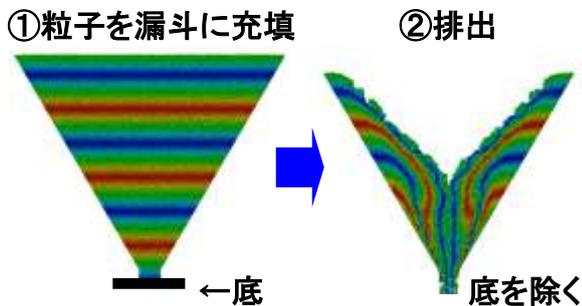


図 4 漏斗シミュレーション

“あり地獄”の拡大図を図5に示す。図より、“あり地獄”の斜面では粒子は不連続に流れており、“土砂崩れ”に似た挙動であるとわかる。図より、そのメカニズムは次のように推定される。①表層に亀裂が生じる、②亀裂の下部が滑り落ちる、③亀裂の下部で粒子が少なくなる、④亀裂の上部で粒子が滑り落ちる。これらの粉体挙動は、実験と傾向が良く一致しているので、インサートの検討が可能になったと判断した。なお、付着力を無視したモデルでは、表面は平らを保ったまま流れるので現実の挙動とは異なる。

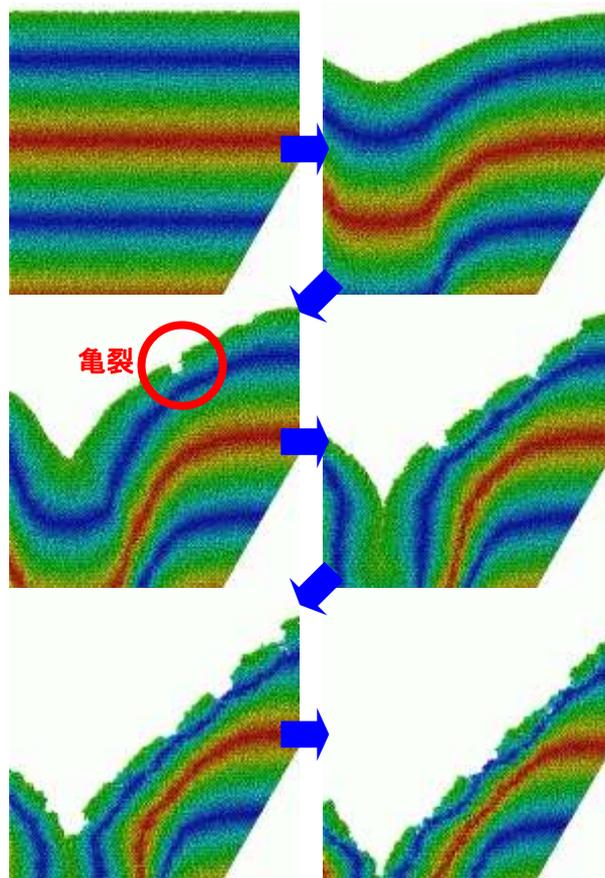


図 5 あり地獄の拡大図

《インサート形状の検討》

一般的には貯蔵装置内の粉体の流れ方はマスフローが理想的で、ファンネルフローであれば改善する必要があると考えられている。先行研究[2]によると、“逆八の字型”のインサートを使用することでマスフロー化できると主張されている。今回、逆八の字型のインサートを挿入したときの効果に関して、インサート形状を変更したときの粉体挙動の変化を検討した。インサート形状は、角度、設置高さ、板長さをそれぞれ5水準で変更した。図6に今回検討した中ではもっともマスフローに近い流れが得られた条件における粉体挙動のスナップショットを示す。漏斗上部では縞々が保たれているのでマスフローに近くなったと考えられるが、下部ではインサート壁面で流れが遅くなりマスフローにならなかった。仮にマスフロー化できれば、漏斗の全領域で縞々を保ったまま粉体が流れるはずだが、そのような条件は見出せなかった。文献のようにうまくいかなかった理由としては、今回検討している粉末においては付着力の効

果が大きく壁面付近で粒子の流れ方が乱れるため、単純にインサート形状を変更するだけではマスフロー化することができないと考えている。

本検討の計算時間に関しては、TSUBAME の複数ノードを使用して 125 個の条件を同時に計算できたため、計算時間を大幅に短縮することができた。

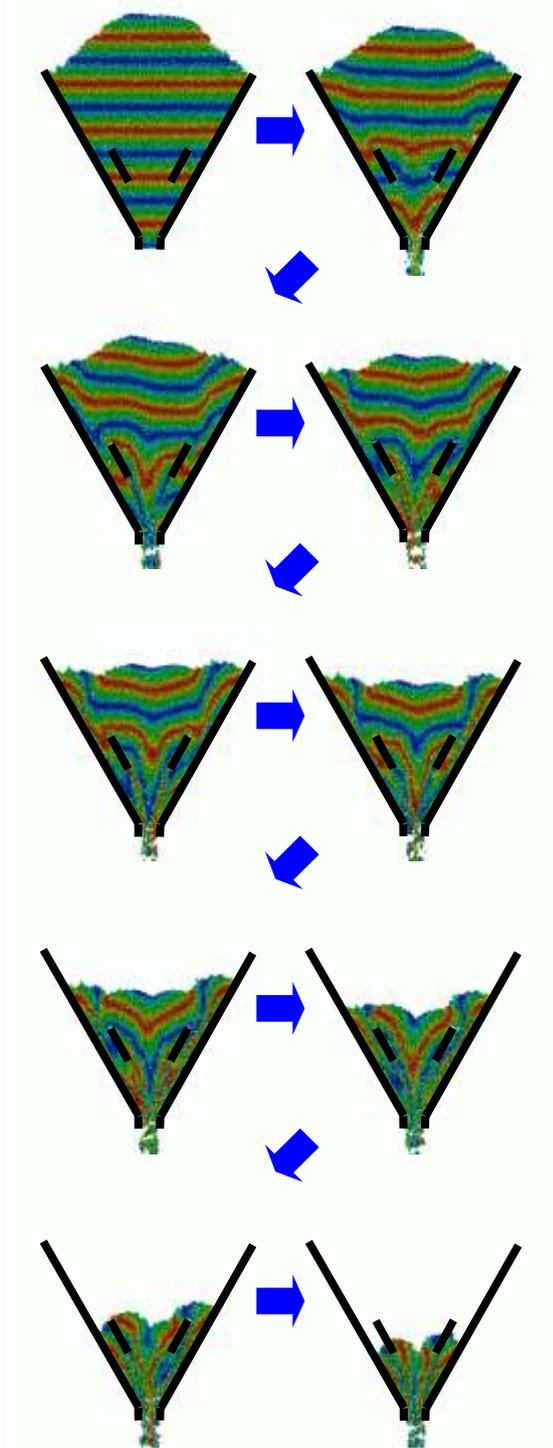


図 6 インサート挿入後の漏斗内の粉体挙動

まとめ、今後の課題

《解析モデルの精密化》では、漏斗内の挙動を精度良く解析するため、昨年度は考慮していなかった付着力をモデルに導入した。実測の 0.06 倍に調整することで安息角の形成を再現できるようになった。《モデルの検証》では、漏斗内で生じる“あり地獄”を実験と比較し、傾向を再現できることを確認した。《インサート形状の検討》では、インサート形状を変更してマスフロー化を目指した。漏斗上部は改善してインサートの効果があることは確認できたが、漏斗全体をマスフロー化することはできず、そのためにはインサート形状を変更すること以外の検討が必要と思われる。本プロジェクトの反省点としては、《解析モデルの精密化》に時間がかかり過ぎ、マスフロー化に関して十分な検討を実施できなかったことである。今後は、インサート形状の最適化の検討を続けて、シミュレーションで求めた最適形状を実機で効果を検証する予定である。

参考文献

- [1] 粉体工学会 編(1998), 『粉体シミュレーション入門—コンピュータで粉体技術を創造する』, 産業図書
- [2] J. Wu, *et al.*, Advanced Powder Technology 20 (2009) 62-73