

産業界における粉粒体プロセスを最適化する

機械工学専攻
准教授 辻 拓也 講師 鷲野 公彰
株式会社 DENSE
代表取締役 若松 知哉

1. はじめに

皆さんの身の周りに粉粒状のものがいないだろうか？一般的に工業原料の 75wt%以上は粉粒体，工業製品の 50wt%以上は粉粒体そのもの，もしくは製造過程で粉粒体を一度は経由すると言われている．最終消費材としての薬品，食品，洗剤や化粧品等に加えて，材料としての鉄，ガラスやプラスチック，エネルギー源としての石炭やバイオマスなどを思い浮かべて頂くと，これらの数字も大げさではないと感じて頂けるのではなかろうか？資源の採取から工業製品として消費者の手元に届くまでに，掘る，運ぶ，砕く，固める，反応させる，混ぜる，分ける等，粉粒体を対象とした多様なプロセスが存在する．その膨大な量と関連する分野の広さを考えると，これらの粉粒体関連プロセスを少しでも効率化できれば，経済性に加え，省エネルギーや低環境負荷の観点から大きなインパクトを生むと考えられる．一方，産業の現場において「粉は魔物」と言われており，取り扱いが難しいことが知られている．現在においても，熟練したエンジニアやオペレータの経験と勘に大きく依存しており，十分な効率化がなされているとは言い難い．本稿では，粉粒体数値シミュレーション技術の社会実装を目指した阪大発ベンチャーである株式会社 DENSE と，その創業の趣旨について簡単に紹介させて頂く．

2. 粉粒体は固体，流体？

粉粒体とは何者なのだろうか？固体だろうか，それとも流体だろうか？一粒として見れば固体と言えようが，集団としてはどうだろうか？砂時計を例に考えると，流下している最中の粉粒体はあたかも液体のようであるが，流下後は急峻な山を作り，その形状を維持したまま固まってしまう．これは固体の振る舞いである．さらに，再度上下反転させると，容易に流動化し再び流体的な振る舞いへと戻る．粒子サイズや形状，表面での摩擦などの粒子レベルや，充填率などの集団レベルでの特性に応じて，流体的にも固体的にもなる粉粒体の振る舞いは大変複雑である．このような挙動は基礎的な物理問題としても未解決であり，現在も活発に研究が行われている．産業の現場における粉粒体プロセスでは，周囲の気体や液体，静電気などの付加的な物理因子の影響を受けることが一般的であり，その振る舞いはさらに複雑で多様なものとなる．

3. 阪大発ベンチャー

工学研究科機械工学専攻複合流動工学領域（田中敏嗣教授，辻拓也准教授，鷲野公彰講師）では，粉粒体系を対象とした数値計算モデルの開発と現象の解明を行っており，特に

個々の粒子の運動を追跡する離散要素法 (DEM) に基づくモデル開発を進めてきた。これまでに、産業界から粉粒体に関する多くの相談が寄せられてきたが、大学での研究テーマとして設定しにくい課題については、その多くをお断りしているような状況にあった。このような背景の下、大阪大学 Innovation Bridge グラント【起業シーズ育成グラント・起業プロジェクト育成グラント】等のご支援を頂き、粉粒体数値シミュレーション技術の社会実装を目指した阪大発ベンチャーである株式会社 DENSE を 2020 年 6 月に創業した。DENSE は濃厚粉粒体系の“濃厚”を意味し、また“Discrete Element Numerical Simulations for Every-industry”の略語でもある。そのモットーは、「サイエンスに基づく知識の活用により、“全て”の粉粒体関連プロセスを最適化し、持続可能で安全・安心な社会の構築に貢献する」である。これまでに培ってきた DEM および DEM と数値流体力学(CFD)のカップリング (DEM-CFD) モデルに関する豊富な知識と、最新の粉粒体シミュレーション技術を産業界が容易に利用できる形で提供することにより、経験と勘の世界からの脱却とサイエンスに基づく問題解決を目指し、日夜活動を行っている。

4. 実用問題を対象とした粉粒体シミュレーション

産業界における実用的な粉粒体問題は、複数の物理因子の影響を受け、多数のパラメータにより特徴づけられる。また、膨大な数の粒子を含むことが一般的であり、個々の粒子を追跡する DEM シミュレーションは高い精度が期待できる一方、計算完了までに数年必要といったような現実的ではない状況に容易になり得る。このような問題に対して、数値シミュレーションを用いて有益な情報を提供するには、以下の 4 点が重要であると考えられる。

(i) 多様な要素物理モデル

産業界における粉粒体プロセスは千差万別であり、必要な要素物理モデルもおのずと異なる。これまでの大学研究にて多様なモデルの開発を行ってきた。一例としては、非球形モデル、大粒径比モデル、熱伝導モデル、熱輻射モデル、周囲環境との相互作用については、気相・液相とのカップリングモデル、固気液三相モデル、液架橋モデル、粒子表面の濡れモデルや固結モデルなどがある。

(ii) 計算コストを大幅に低減できる計算負荷低減モデル

DEM を用いて実用問題を対象とした計算を行うには、計算コストの低減が必要不可欠である。計算上、個々の粒子を膨らませることにより、取り扱う総粒子数を減らし計算コストを低減する粗視化モデル¹⁾(図 1)や、粒子の剛性を低減させ、考慮する時間スケールを大きくする剛性低減モデル²⁾などの開発を行っており、いずれも大幅な計算時間の低減が可能である。

(iii) 容易かつ低コストな計算機ハードウェア環境構築

前述の計算負荷低減モデルを用いたとしても、その計算負荷は依然高く、多くの場合並列計算機が必要となる。クラウド上にパーソナルなハイパフォーマンスコンピュータ環境を自動構築するシステムの開発を進めている。

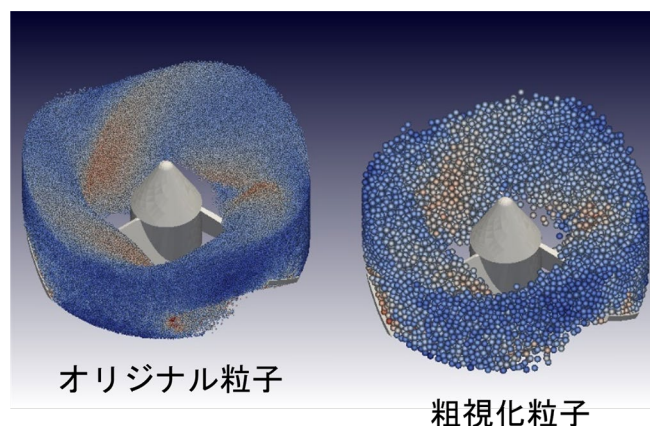


図 1 粗視化モデル

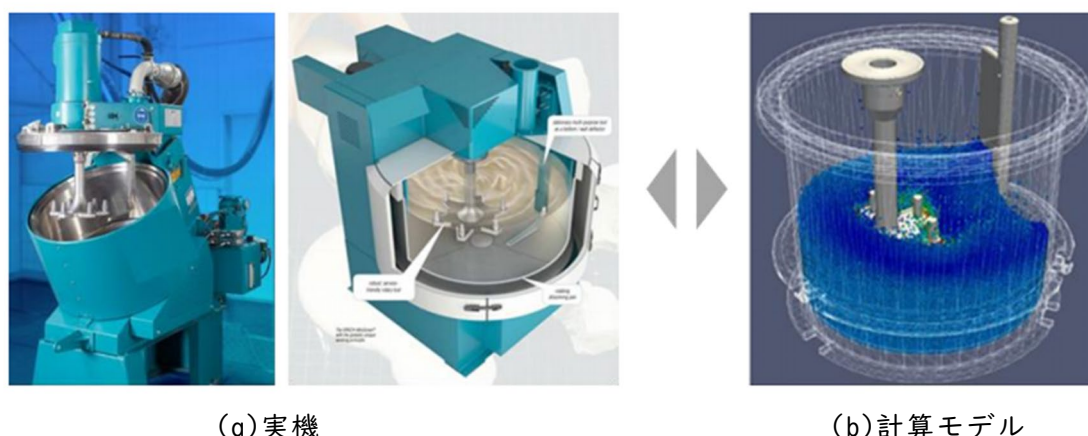


図2 デジタルツインモデルの例

ハードウェア・ソフトウェアを併せて従量課金制とするサービスの提供に向けて準備を進めている。

(iv) モデルを最適に組み合わせることができる目利き力：

限られた時間で計算を適切かつ効率的に実行するには、前述の計算負荷低減モデルを用いるのは前提とした上で、ある物理因子は考慮する一方、その他は無視するといった目利きが必要不可欠である。これは十分な経験があるものにしかできず、特に粉粒体の場合その複雑さ故に、初心者には極めて困難であり、ノウハウの塊であるともいえる。計算モデル構築のコンサルテーションを行うと共に、未経験者であっても、プロが構築を行ったモデルをそのままクラウド環境で使用可能なデジタルツインモデル(図2)の開発を行っている。

5. おわりに

阪大発ベンチャーである株式会社 DENSE とその創業主旨について紹介した。私達の挑戦はまだ始まったばかりである。多くの既存の粉粒体プロセスに加えて、全固体電池、3D プリンター、水素還元製鉄やメタネーションなど、今後の低炭素化社会で特に重要と考えられる新技術の多くも粉粒体関連プロセスであり、大学研究で培ってきた粉粒体シミュレーション技術を最大限活用することにより、社会貢献したいと考えている。幅広い分野におられるテクノネットの読者各位には、暖かいご支援とお力添を頂くことを切に願う。

参考文献

- 1) K. Washino et al., Powder Technol., 426, 118676 (2023).
- 2) K. Washino et al., Chem. Eng. Res. Des., 203, 501-519 (2024).

(辻 拓也, 九州大学 先端エネルギー工学 前期 2000 年, 後期 2004 年, 鷲野 公彰, 機械 前期 2007 年, シェフィールド大学 PhD 2011 年, 若松 知哉, 機械 前期 2012 年)