

特集

粉と化学工学

粉体は食品・薬品・化粧品・日用品・化学品など様々な分野で存在し、活躍している。ものづくりの観点で粉体制剤化を考えてみると、形状は球形・フレーク状・中空状など様々であり、プロセスにおいても乾燥・粉碎・造粒など特殊な技術分野となっている。本特集では粉体がどのようにして作られ、技術開発に取り組んでいるのか、化学工学からの視点で紹介していきたい。構成としては、「総論」、「ハンドリング技術」、「粒径・形状コントロール技術」、「粉体の評価・解析技術」、「各分野への粉体化技術の取組み」の順で紹介する。

(編集担当：西尾 拓)†

粉体プロセスのさらなる高度化のために

加納 純也

1. はじめに

我々の生活の身近にある医薬品や食品、化粧品、さらには、粉体と一見縁がなさそうな鉄、電子部品、プラスチック製品なども粉体プロセスシステムを通して製造されている。それらの製造プロセスにおいては、原料、中間製品あるいは最終製品が粉体の状態にあり、粉碎、造粒、混合、分散、分級などを担う重要な粉体プロセスが活躍している。これらの粉体プロセスの設計と操作は、材料の特性に大きな影響を及ぼすため、そのプロセス内での粉体の動きを精緻に制御することが必要とされている。しかしながら、その制御は、いまだ経験に大きく頼っているのが現状である。これは、粉体プロセス内の粉体の状態の観察や計測が難しいことが最大の要因である。装置内での粉体の状態を詳細に把握することができれば、粉体プロセスの設計と操作の高効率化あるいは最適化が促進されるものと期待できる。

たとえば、粉碎プロセスは、小麦を粉碎して粉にしたのを起源として、食品はもちろん先端材料の製造・開発など幅広い分野で活用されている。長い歴史がある粉碎プロセ

スにおいても、さらに微細化したい、より速く微細化したい、粒子径分布を制御したい、摩耗粉の混入を抑制したいなど未だ多様なニーズがある。また、近年は材料機能のさらなる高機能化やプロセスの高効率化が強く求められるようになってきた。これは粉碎プロセスに限ったものではなく、造粒、混合、分級などの各種粉体プロセスへの要求でもある。これらの要求に速やかに対応するために数理的方法の利用が期待されており、その一つにコンピュータシミュレーションが挙げられる。コンピュータシミュレーションを用いれば、プロセス内部の粉体挙動を詳細に観察することや、様々な情報を抽出することが可能になり、工学解析において重要なカギとなる手段となってきた。ここでは、粉体に関するシミュレーションの最近の動向ならびに、粉碎や造粒、混合に対するシミュレーションの活躍を紹介する。

2. 粉体シミュレーションの最近の動向

粉体シミュレーション法としてもっとも代表的なものは、DEM(Distinct Element Method)である。DEMは、1970年代にCundallら¹⁾によって提案され、当初は土木工学を対象とした数値解析に使われてきた。開発された当時は二次元計算のみであったことや、コンピュータの性能が充分でなかった時代背景もあり、それほど注目されていなかった。



For Further Sophistication of Powder Processing
Junya KANO (正会員)

1995年 同志社大学大学院工学研究科工業化学専攻博士課程後期課程単位取得退学

現在 東北大学多元物質科学研究所 教授
連絡先：〒980-8577 仙台市青葉区片平二丁目1番1号

E-mail kano@tagen.tohoku.ac.jp

2013年12月6日受理

† Nishio, T. 平成25, 26年度化工誌編集委員(3号特集主査)
ライオン(株)生産技術研究センター

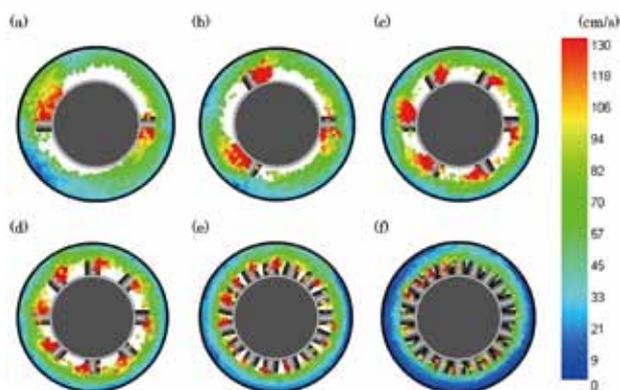


図1 媒体攪拌ミル内のビーズの速度分布
(ジルコニアビーズ径=2 mm, ビーズ充填率=57%,
回転速度=600 rpm)
(a)2-pin, (b)3-pin, (c)6-pin, (d)8-pin, (e)15-pin,
(f)20-pin

コンピュータの性能の発展に伴う計算可能粒子数の増加によって、不連続挙動や粒子偏析挙動²⁾が表現できるようになり、粉体工学に加えて機械工学、化学工学、薬学など幅広い分野で用いられるようになってきている。DEMは、運動状態にある粉体のミクロ的、マクロ的な各物理量の詳細な観察を可能にし、いまや粉体现象のモデル的考察には欠かすことのできない重要なツールになりつつある。

粉体シミュレーションの最近の動向としては、固相のみをシミュレーションするのに加え、CFD (Computational Fluid Dynamics) とカップリングし、固相と気相あるいは固相と液相との混相流への展開がますます盛んになってきている。川口らは、流動層のような高濃度固気二相流に対してDEMとCFDをカップリングしたモデルを構築し、個々の粒子運動の視点に基づく数値シミュレーションを可能にし³⁾、様々な応用研究がおこなわれるようになってきている。木下らは、MPS (Moving Particle Semi-implicit) とカップリングした混相流への取り組みを進め、固相から液相への相変化を考慮した粉体溶解挙動のシミュレーションを可能にした⁴⁾。

これらの報告に代表されるように、粉体シミュレーションは既存のシミュレーション法の確かな発展と、流体シミュレーション法との融合により日進月歩の成長を遂げている。

3. 粉体プロセスの高度化のためのシミュレーション

シミュレーションを活用することのメリットは、一般に以下の点が挙げられる。(1)実験では観測できない物理量、状態量を時間的、空間的に任意に得ることができる。(2)実際に装置を作製する必要がなく、異なる装置形状における数値実験を容易におこなうことができる。(3)実験室では困難な実験、あるいは自然界では起こらない思考実験が

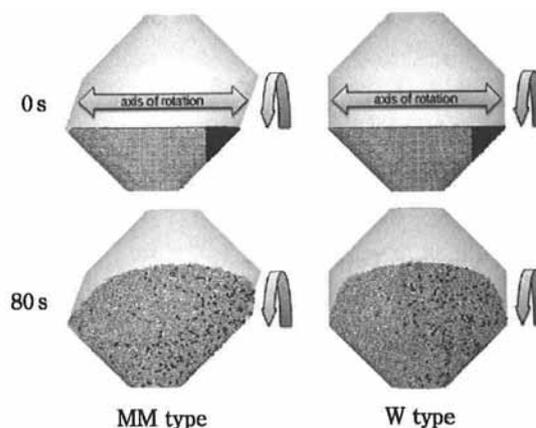


図2 MMタイプ混合機とWタイプ混合機における混合状態の比較

可能である。以下にそれぞれについて例を挙げて紹介する。

3.1 実際に観測できない物理量・状態量の観察

粉碎・分散プロセスにおいて非常に重要な地位を占めてきた媒体攪拌ミル内のビーズ運動を例に考えてみる。通常は装置内の運動状態を観察することは不可能であり、たとえ一部を透明な部材に置き換えた場合でも表層は観察できるが、その内部に関する詳細な情報を取得することは不可能である。図1⁵⁾に媒体攪拌ミル内のビーズの挙動をDEMを用いてシミュレートした結果を示す。ビーズの運動状態を詳細に観察することが可能であり、アジテータがビーズ運動におよぼす影響も明確にすることが可能である。なお、図中の色は速度分布を表しており、赤は速度が大きく、青は小さい。当然のことながらピンの数はビーズの運動に大きな影響を与え、最適なピンの本数があることが指摘されている。

3.2 幾何学形状が粒子挙動に及ぼす影響

装置の幾何学的形状や寸法等を変えて実験するには、それらの装置が必要で、時間的・経済的に負担が大きい。シミュレーションではそれらを数値的に変更するだけで取り扱うことが可能であるので、種々の条件における比較を容易におこなうことができる。図2⁶⁾は混合機の一つである円筒型混合機が抱えていた特定の箇所にある粒子が混ざることによって時間を要していた課題をシミュレーションが解決した例である。シミュレーションをきっかけとして実際に混合機が設計・製作され、商品化されている。その商品にて実際に混合実験がおこなわれ、従来の混合機よりも混合時間が約30分の1になった成功例がある。

混合機には、容器が回転するタイプとアジテータが回転するタイプの、二つのタイプがある。アジテータの形状は、混合状態を大きく支配することが知られているが、その明確な設計法が未だ提示されていない。そこでシミュレーションによって、様々なタイプのアジテータを設計し、そ

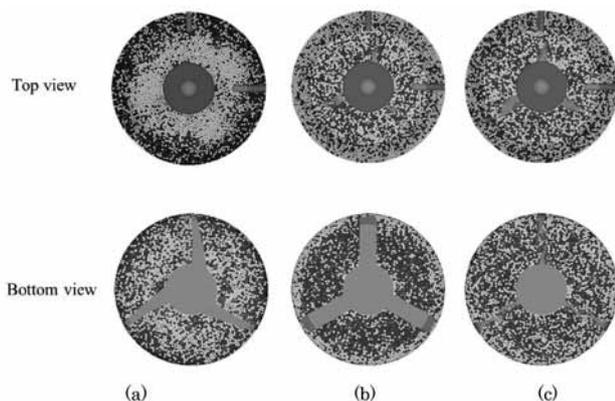


図3 アジテータの形状が粉体混合に及ぼす影響

のアジテータを用いて数値実験が可能になってきた。その一例を図3⁷⁾に示す。本混合機には(a)のタイプのアジテータが設置されているが、その形状を(b)と(c)のタイプに代えた場合に混合挙動の変化をシミュレーションによって検討した。その結果、タイプ(c)は他のタイプ(a)や(b)よりも速やかに混合することが可能であることがシミュレーションによって示された。

3.3 大規模数値実験

製鉄プロセスに設置されている造粒プロセスを例に考える。製鉄プロセスにおける造粒プロセスは大規模であり、そのための実証実験も研究室レベルの大きさではなく、数メートルサイズである。図4⁸⁾は直径0.6 m、長さ3 mの実証実験のための造粒プロセスにおける粒子挙動のシミュレーションのスナップショットである。回転しているドラムミキサーの中に右端から粒子が供給され、左端の出口までの粒子の挙動をシミュレーションしている。粒子の占積率は実験値とほぼ一致しており、操作の最適化あるいはドラムミキサーの最適化設計に貢献するものと考えられる。

4. おわりに

以上のように、今、粉体プロセスの設計や最適化に対して、シミュレーションは大きな貢献をし始めている。実際の実験のみではアイデアがあったとしてもその具現化にはかなりの時間を要していたが、現在ではシミュレーションによってその効果の度合いをあらかじめ予測することが可能になってきた。今、コンピュータシミュレーションです

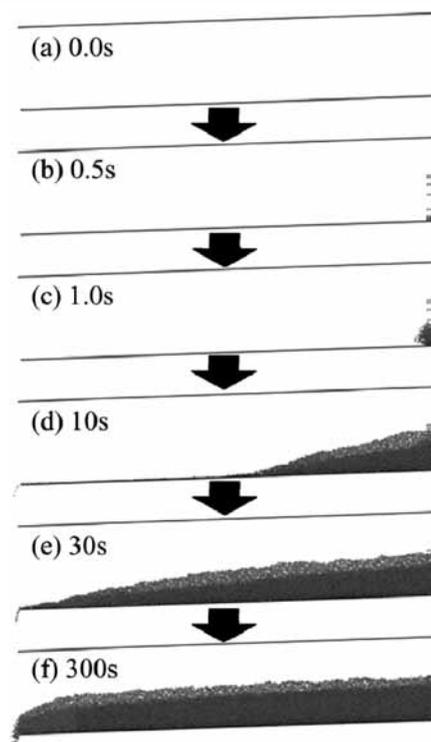


図4 連続式ドラムミキサーにおける粒子群の運動の様子

べての粉体プロセスを再現できる様になったわけではないが、今後もシミュレーションの発展、コンピュータの進化、そして最も重要な、粉体プロセスの本質をとらえたモデル化が進行し、シミュレーションに実装されれば、経験に大きく依存してきた粉体プロセスの設計や操作条件最適化が格段に短縮されることは間違いないであろう。

参考文献

- 1) Cundall, P. A. and O. D. L. Strack: "Discrete numerical model for granular assemblies," *Geotechnique*, **29**, 47-65 (1979)
- 2) Wu, S., M. Kou, J. Xu, X. Guo, K. Du, W. Shen and J. Sun: DEM simulation of particle size segregation behavior during charging into and discharging from a Paul-Wurth type hopper, *Chem. Eng. Sci.* **99**, 314-323 (2013)
- 3) 川口寿裕, 田中敏嗣, 辻裕: "離散要素法による流動層の数値シミュレーション(噴流層の場合)", 日本機械学会論文集, **58-551B**, 2119-2125 (1992)
- 4) 木下秀則, 下坂厚子, 白川善幸, 日高重助: "MPS法を用いた粉体塗料溶融挙動の解析", 日本機械学会第20回計算力学講演会講演論文集, 489-490 (2007)
- 5) 曾田力央, 加納純也, 齋藤文良: DEMによる媒体攪拌ミル攪拌ロータのピン形状が媒体運動に及ぼす影響の解析, 粉体工学会誌, **46**, 180-186 (2009)
- 6) 吉次寛, 寺下敬次郎, 久田浩史: "斜円筒型混合機の混合性能について", 粉体工学会誌, **50**, 523-526 (2013)
- 7) 山本通典, 石原真吾, 加納純也: 粉体工学会誌, **50**, 851-856 (2013)
- 8) Soda, R., A. Sato, J. Kano, E. Kasai, F. Saito, M. Hara and T. Kawaguchi: Analysis of granules behavior in continuous drum mixer by DEM, *ISIJ International*, **49**, 645-649 (2009)