

# これまで経験工学が主流だった粉粒体の混合度評価。 粉体解析ソフトウェアGranuleworksの活用により 理論的評価が可能に。

\*Granuleworksは、プロメテック・ソフトウェアがParticleworksのDEM (粉体解析) 機能をさらに改良して開発している粉体解析ソフトウェアです。正式な製品リリースは2017年を予定しています。

月島機械株式会社様は、1905年の創業以来100有余年にわたり、産業の基盤となる装置・プラント設備や、日常生活に欠かせない上下水道設備、環境保全設備など、社会とそこに暮らす人々に密接な技術を開発・提供されてきました。「最良の技術をもって産業の発展と環境保全に寄与し、社会に貢献する」という企業理念のもと、世界的な流れである地球温暖化防止のための「環境・エネルギー」技術を研鑽するとともに、新興国を中心とした海外事業も積極的に展開されています。この度は、産業事業本部プラント計画部の中田洋一様を訪問させていただき、「DEMシミュレーションにおける粉粒体の混合度を評価する方法の検討」についてお話をお伺いしました。

## プラント計画部の業務内容と、中田様の取り組まれているお仕事の内容についてお聞かせ下さい。

当社のプラント計画部では、主に化学、鉄鋼、食品産業向けに、蒸留・晶析・ろ過・分離・乾燥・計量・輸送プロセスを取り扱うプラントおよび装置の基本設計を行っており、私は乾燥プロセスを担当しています。取り扱う物質の例としては、鉄鋼原料の石炭、ポリエステル繊維やPET樹脂の中間原料であるテレフタル酸など、鉱石から化学物質まで多岐にわたり、多様な物性であるため、乾燥だけでなく上下流プロセスも総合的に検討し、お客様に最適な乾燥プロセス・装置を提供しています。CAD/CAEなどのツールの利用状況ですが、それらの機械構造設計用にFEAを、流体プロセス設計用にCFDを15年ほど前から導入しています。

## Granuleworksによる粉体解析を利用し始めたきっかけは何だったのでしょうか。

私が担当する乾燥プロセスは、粉粒体を扱う装置が多いのですが、粉粒体はとても取り扱いが難しく理論的な予測がしにくいものですので、これまではベテラン技術者による経験則に頼っていました。しかしそれをずっと続けていくわけにも

いきませんし、今はパソコンの性能が向上し、シミュレーションも進化しているので、それらの最新技術を活用してもう少し理論的なアプローチが出来ないかと考えたことが、シミュレーションの調査を始めたきっかけでした。そこでプロメテックさんにお会いして、一緒にやってみましょうということでスタートしたのです。幸いプロメテックさんの新しい粉体解析ツールGranuleworksの開発時期とタイミングが重なり、共同で研究を進められたので、私たちにとっても良い成果に繋がりました。粉体の経験工学というものをどうにかして打ち破りたい、理論を確立させて定量的に評価し、今まで出来なかった機械設計を可能にしたいということが、私たちが追及しているテーマです。



乾燥機の一例 (スチームチューブドライヤー)

## 具体的にどのような研究をされたかお聞かせ下さい。

粉粒体の混ざり具合を、数値として定量的に評価するための計算法を検討しました。まずは混ぜる操作というものについてお話し



月島機械株式会社  
産業事業本部プラント計画部  
中田洋一様

します。混合操作は、実際の粉粒体を取り扱うプロセスでは、生産物の品質に影響するものです。ですから、電池、食品、樹脂、鉱石、有機、無機材料など、様々な産業で重要視されており、厳密に評価する必要があります。また、ただ混ぜれば良いというものではなく、十分混ぜることが求められる場合もあれば、ものによってはあまり混ぜたくない場合もあります。そして混ぜ

り具合の数値として混合度があるのですが、この計測が容易ではありません。この混合度を評価する際に、念頭に置きたい特徴が主に3つあります。1つ目は多成分を評価するという事です。つまり実際に取り扱う粉体というのは、粒径や成分の違う物質を何種類も混ぜるということです。2つ目は精密に混合されているかどうかです。粉体が混ざり合った後の混合度は、その一部の微量を取り出して均一になっていると、より精密に混合できていると判断できます。たくさん取り出して検査するよりも、少ない量の方がムラも細かく確認できます。ですから少ないサンプル量でも誤差がない方法がいいわけです。3つ目はムラの数値化です。局所的な混合ムラは粉体にはつきもので、ここは混ざっているとか、ここは混ざっていないという違いが出てきます。それを何らかの形で数値的に評価する必要があるということです。

既存の混合度評価の方法は、例えばAとBの粒子が散らばっている粉体の中で、一部を抜き取ります。その抜き取ったものの組成の割合を見ます。システム全体でAとBが1対1で存在し、抜き取り検査したところの組成も1対1であれば、完全に混合出来ています。これは統計工学における分散や標準偏差と言われているものですが、実はこの方法で評価すると、混合度を正しく表現できないケースが多いことがわかりました。つまり混合度の指標として、従来はLacyのmixing indexが利用されているのですが、このLacy indexでケーススタディをしますと、混合対象のAとBの粒子の数の偏りがあるシステムでは、mixing indexは0-1のレンジにならず、不安定な評価となることが判明しました。また、Lacyの方法は統計学を基礎とした式であり、サンプル数が少ないとデータの信頼性が下がります。ですから、局所的な領域で混ざり具合を測定すれば、サンプル数が少ない為にデータの信頼性が担保されず、精密混合を行うときに結果に重大な影響を及ぼす可能性があるかと予想されます。また、多成分系を統合的に取り扱うことはできませんから、この場合には単一の成分ごとにmixing indexとして整理する必要があ

り、全成分が混ざっていることを1つの数値で評価することはできず、リーズナブルではありません。つまり、多成分系を統合評価でき、少ないサンプル数でも評価できる安定性を備え、局所的な混合ムラまで捉える指標があると良いということ

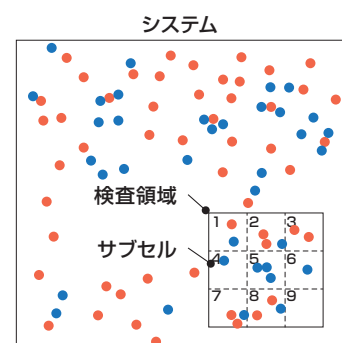


図1 Shannonの検査方法

になります。そこで、高分子材料の分散の指標として用いられたShannonのエントロピーを基礎とした混合度がこれらの要求に合い、粉粒体システムに適用できるかどうかを検討したのでご紹介します。

Shannonのエントロピーは、システムの中の乱雑さで混合度を評価するもので、完全混合になればなるほどエントロピーが大きくなるという特性があります。その評価方法ですが、検査領域を均等サイズのサブセルに分割し、それを全部合成するという方法をとっています。ここで、粒子の空間分布の偏り、異種粉体の混合度はそれぞれ、空間分布エントロピー、条件付きエントロピーにより表現されます。また、規格化エントロピーを用いることにより、混合度の絶対評価が可能となります。ただし、このままでは実験が同じように出来ず、実験も含めたような検証が出来ないということがわかりました。そこで、実験とシミュレーションを対比するような場合でも対応するよう改良したところ、上手く評価できるようになりました。次に、産業界で使う粉体システムは、かなり偏析している場合が多いので、このShannonのエントロピーがどんなシステムでも出来るかを確認しなければいけません。極端な場合は、味付けみたいにちょっと粒を入れるというようなこともありますので、そのような場合でもちゃんと評価出来ることが必要です。ですので、このグラフのように1対1から99対1まで計算してみたのですが、システム内の粒子組成が極端に振れても問題ないことがわかりました。

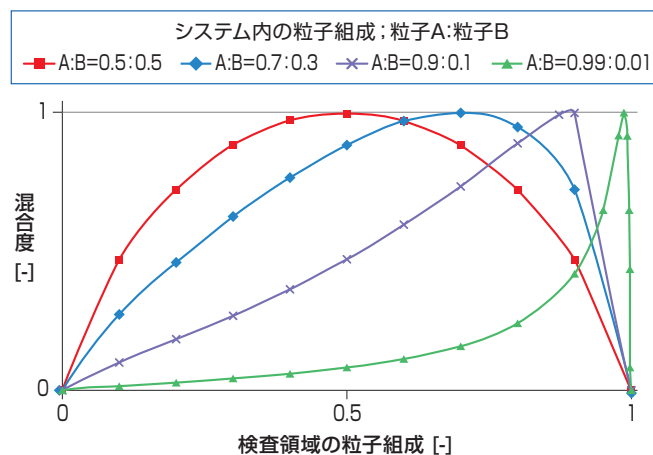


図2 Shannonエントロピー改良版での検証

実際に粉体システムの混合度の評価が本当に出来るかを、シミュレーションと実験の両方で2種類の容器を使って検討してみました。一つは中が空洞になっている円筒容器、もう一つは中に回転するロッドがついているロッド付き円筒容器です。その中に、容器内を2分割するように黄色が平均粒径2mm、黒が平均粒径3mmの2種類のセラミックの粒子を入れて、所定回転数で容器を回します。すると黄色と黒が混ざっていくのですが、実験の場合は手前を透明板で仕切っていますので、それをビデオカメラで観察しました。また、所定回転毎に検査領域を1~5か所決めて、そこで粒子の位置、数、およびその割合を測定して、規格化条件付きエントロピーを算出し混合度データを取得しました。シミュレーションについては、セラミックの粒子に微妙に粗さとうねりがあるので、その分の回転抵抗を入れており、また、実験の粒子と同じ粒子径分布でシミュレーションを行っています。なお、粉体が粉体らしい挙動をしているかということですが、実験の前に、ただ単に上から落として跳ね具合や飛び散り具合を合わせるために、接触力のばねとダンパーの係数を調整しています。そして、**図4**がシミュレーションの結果です。この結果から、黒が混ざっていく様子の軌道が大体合っているという感じがします。この際、円筒容器が回転する転動運動いわゆるキルンアクションで経験的に分かっているのが、滞留部が出てくるということです。つまり、異なる粒子を混ぜる際に機械的な力を受けて回転した時の慣性力の大きさが違うので、慣性力が大きく活力の大きい方が外側に寄り、慣性力の小さい方が中央に寄ってきます。我々現場にいるものは経験として知っていますが、シミュレーションでもこれが表現出来ているのがわかり、これはすごいという印象を受けました。また、円筒容器を使うと中央と外側で偏析するのですが、中にロッドのような横切るもの

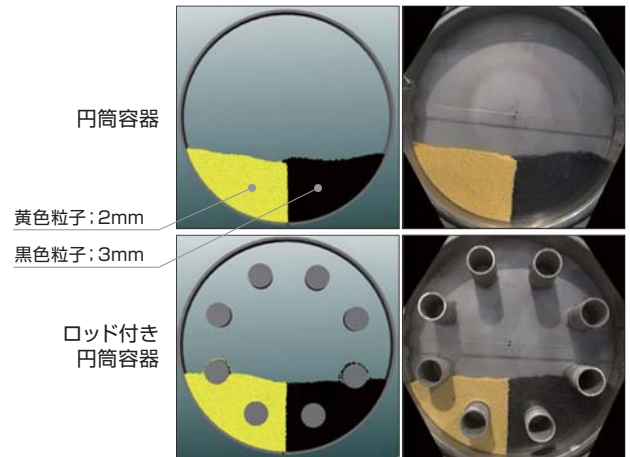


図3 シミュレーションモデル(左)と実験モデル(右)

を入れると混ざりは均一化されるのがわかっています。現に、円筒容器とロッド付き円筒容器を比べてみると、シミュレーションの結果の画像からもロッド付きの方が良く混ざっていることがわかります。これをちゃんと数値として捉えられるかということで、混合度を比較しました。実験では、ある回転数で機械を止めて中身を吸い取り、上層、中間層、下層の組成を測ります。シミュレーションではGranuleworksのポスト処理機能を使って、それぞれの層の組成を測っています。それを所定の回転毎に何回もやりなおして計測しています。今回のシミュレーションは、開発中で改良されているGranuleworksを使っているのですが、そのGranuleworksの物理モデルでかなり合っていました。以前のバージョンの古いモデルと比較しても、最新のモデルでは傾向が定性的に合っていて、今開発中のGranuleworksはかなり使えるという印象を持ちました。

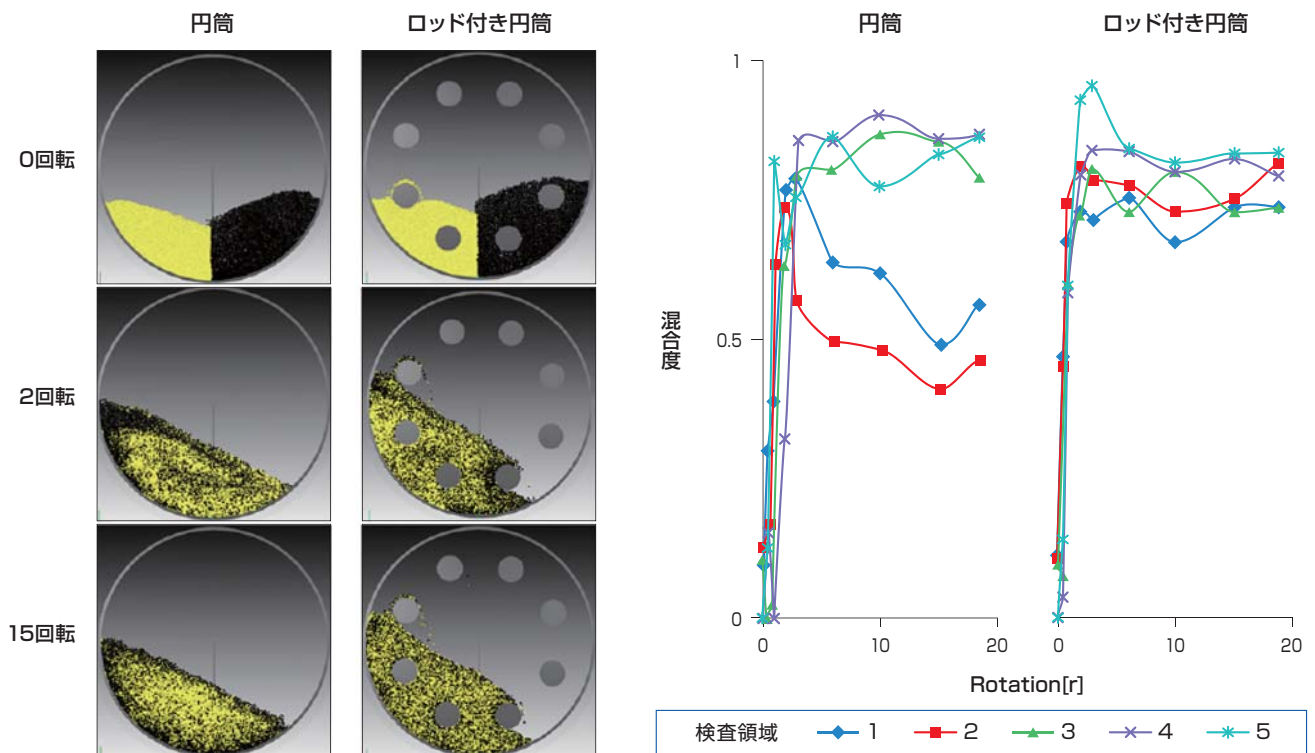


図4 シミュレーション結果



私が設計している乾燥機で扱う実際の粉体は、今回の検証で用いたセラミックの粒子のような理想的な状態とは異なります。表面の流れが常に一定で起こるのではなく、ある程度溜まるとずるっと地滑りのように滑るという現象が起こります。今は、そのような本物の粉体を取り扱ったときに、どういう状態になるのかという検証を始めています。実験は実物よりは小さい機械で行うのですが、1種類だと正しく検証出来ているかわからないので、小型機と直径2mくらいの中型機で実験をしています。この実験でも粉体らしい挙動が再現出来ており、実際の粉体を入れたときにロッドで粉が持ち上げられて、カーテン状にざらざらっと丸まりながら落ちるのが確認できました。このような実際の粉体は理論的な予測が出来ないような結構複雑な運動をしているのですが、これがシミュレーションでも同じ動きで結果が出ていることも確認しました。そういう一連の研究で、実際の粉体でもDEMでシミュレーションが出来そうだということを今掴めつつあります。

**今後DEMでの解析業務や研究をどのように進められたいのですか。**

今回の事例でもお話しした通り、粉粒体が絡む現象は理論的予測が難しいケースが多く、設計に際しては主に実験などを行い、粉体挙動を実測して、多大なヒト・モノ・カネを要しています。一方、シミュレーションは実験に比べて極めて省コストな検討手段です。今後はDEMが実用的な設計手段として発展すれば、実験とシミュレーションの複合的な検討により、設計リードタイム

の短縮と省コスト化、装置改良につながるイノベーションが起これるとの展望を持っています。同時に、この実現にはユーザー側にも積極的な関与が求められると感じていますので、これまでのように共同での研究を進められればと思っています。

**Granuleworksや、プロメテックに対する今後の期待をお聞かせ下さい。**

現状のGranuleworksは開発途上とのことですが、粉体混合などベーシックなシステムでは、実現象と高精度に一致する解が得られています。この結果に驚嘆しており、今後の発展にも非常に期待しています。DEMは接触力のバリエーション、熱・物質移動現象への拡張、混相系の扱いなど高度な課題はあるものの、近年は日進月歩で研究成果が挙がっています。プロメテックさんには、これら高度な研究成果の中から産業界に有用なものをいち早く製品としてご提供いただき、今後も先端技術と産業の現場をつなげるフロントランナーであり続けてほしいと願っています。

**貴重なご意見ありがとうございます。まだ開発中であるGranuleworksをご活用いただき、成果が出ているとのこと、プロメテックとしても大変嬉しくお話を聞かせていただきました。今後さらにより良い研究、製品開発にお役に立てるよう、プロメテック一同ご支援させていただきます。この度は、業務のお忙しい中事例紹介にご協力下さいまして誠にありがとうございました。**

#### 参考資料

Prometech Simulation Conference 2015 講演資料

取材日 2015年12月10日

**TSK 月島機械株式会社**

月島機械株式会社  
TSUKISHIMA KIKAI CO.,LTD.

本社所在地：東京都中央区晴海三丁目5番1号

創業：1905年8月

事業内容：産業事業（エンジニアリング全般、単位操作技術）、水環境事業（浄水処理設備、下水処理設備）

ホームページ：<http://www.tsk-g.co.jp/>



Granuleworksは、粉体シミュレーションの手法としてもっとも代表的な離散要素法（DEM）の理論に基づく粉体解析ソフトウェアです。食品、医薬品、化学品、輸送機器、電子材料など、粉体を使った様々な製造プロセスや粉体加工、粉体装置の設計・改良に活用することができ、混合、搬送、充填、圧粉など粉体現象を容易に解析することができます。

開発元・国内、海外総販売店

**PROMETECH.**

**プロメテック・ソフトウェア株式会社**

本社 〒113-0033 東京都文京区本郷三丁目34番3号 本郷第一ビル8階  
TEL: 03-5842-4082 FAX: 03-5842-4123

西日本支社 〒460-0008 愛知県名古屋市中区栄一丁目3番3号 朝日会館7階  
TEL: 052-211-3900 FAX: 052-211-3901

URL: [www.prometech.co.jp](http://www.prometech.co.jp)

E-mail: [sales@prometech.co.jp](mailto:sales@prometech.co.jp)

プロメテック・ソフトウェア株式会社に事前の承諾を得ることなく、本記事の全部または一部を使用（複製・改ざん・頒布・送信・上映）することを禁止します。また、ダウンロード、プリントアウトされた複製物を、不特定または多数の人へ送信・配布することはできません。

本記事の内容は、取材時2015年12月の情報です。製品の機能および構成などは取材時より変更されている可能性がありますので、予めご了承下さい。最新の情報については、プロメテック・ソフトウェア([sales@prometech.co.jp](mailto:sales@prometech.co.jp))までお問合せください。