

特集

[生産支援システム]

食品製造の品質の安定化や生産効率改善に貢献 実機では見えない製造プロセスを可視化する 粒子法流体・粉体シミュレーションソフト

株式会社構造計画研究所 SBD エンジニアリング部 川原 眞実加

1 はじめに

従来、食品製造業において、新しいラインの立上げやトラブル発生時の対応は、実機試験を中心に行われてきた。しかし、実機試験では、タンクや配管など装置の中が見えないことも多く、限られた情報から推測し、過去の経験や知識で対応策を決める必要がある。さらに、改善ができた場合にも、最終的にできた製品の品質を評価することは可能だが、装置内で製造される途中仮定でどのような現象が不具合や改善の要因となったのかを定量的に評価することは難しい。そのため、トラブルを改善した経験を形式知として共有することができず、以下の機会損失となっている。

- ・ 将来の同様のトラブルが発生しても対応に時間がかかる
- ・ 製品の付加価値向上のための開発に時間が割けない
- ・ 関連する他部門に知見を共有できない
- ・ 過去の知見を若手社員の教育に活用できない

このような課題を解決するために注目されているのが、流体・粉体シミュレーションの活用である。

製造プロセスを検討する過程で、シミュレーションを活用して試作回数を減らすことは、コ

スト削減にもつながる。さらに、近年は、試作過程で廃棄される原料の削減がSDGsへの貢献に繋がることが決め手となり、食品製造業でシミュレーションが導入されるケースが増えている。

弊社にも多くの食品製造業のお客様からお問い合わせがあり、流体・粉体シミュレーションを用いた製造プロセス改善体制の立上げを支援している。

本記事では、食品製造プロセスで最も活用されている粒子法流体シミュレーションソフト「Particleworks」、粉体シミュレーションソフト「iGRAF」の特徴や活用事例について紹介する。

2 粒子法流体シミュレーションソフト「Particleworks」

Particleworksは、流体を多数の粒子の集まりとしてモデル化し、特に、自由表面を持つ複雑な液体挙動（攪拌、充填など）の解析を得意とする粒子法流体シミュレーションソフトである。計算ソルバーは、東京大学大学院工学系研究科の越塚誠一教授が考案したMPS法（Moving Particle Simulation）を採用している。

また、食品で取り扱うことが多い高粘度液体は、従来の流体シミュレーションソフトでは計算が不安定になりやすいが、Particleworksでは安定して計算できる工夫が取り入れられている。

製品概要

<https://www.sbd.jp/products/flow/particleworks.html>

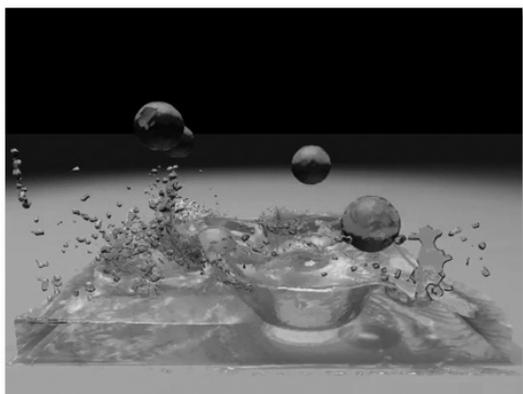


図1 Particleworks シミュレーション例

3

粒体シミュレーションソフト「iGRAF」

iGRAFは、離散要素法 (DEM: Discrete Element Method) に基づく粉体シミュレーションソフトである。粉体シミュレーション分野の権威である東京大学の酒井幹夫教授を特別技術顧問に迎え、最先端の解析技術やノウハウを取り入れながら弊社で開発をしている。

一般的に、液体に比べて粉体のシミュレーションは計算時間が長くなる傾向がある。しかし、iGRAFでは複数の粉体をまとめて1つの粉体として扱う粗視化機能が搭載されており、より効率良く計算することが可能である。

製品概要

<https://www.sbd.jp/products/powder/igraf.html>

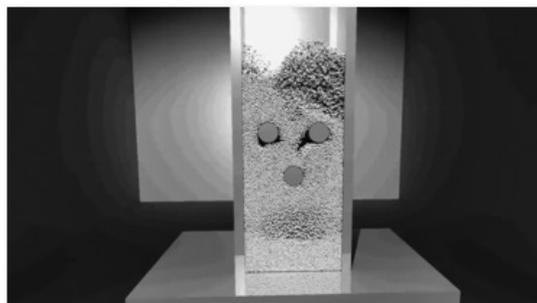


図2 iGRAF シミュレーション例

4 活用事例

4-1 高粘度液体の攪拌翼選定

食品メーカーにとって、すべての製品を一定の品質で作ることは重要な課題である。この課題に対して、原料を均一に混ぜるというプロセスの影響は大きい。均一に混合されていなければ、製品の品質が安定しない。

攪拌工程では、混合性を良くするために、攪拌翼や回転数などの要素を検討する必要がある。

本事例では、Particleworksを用いて高粘性流体の攪拌シミュレーションを行う。

●
攪拌性能の良い攪拌翼を選定する。

選定候補の攪拌翼を以下の8つとする。

- ・ 3枚後退翼
- ・ 4枚パドル翼
- ・ 4枚傾斜パドル翼
- ・ 6枚タービン翼
- ・ アンカーパドル
- ・ スクリュー
- ・ リボンミキサー
- ・ 門形パドル

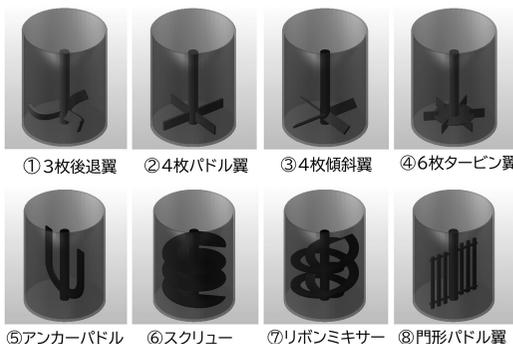


図3 8種類の攪拌翼

容器形状を以下に示す。

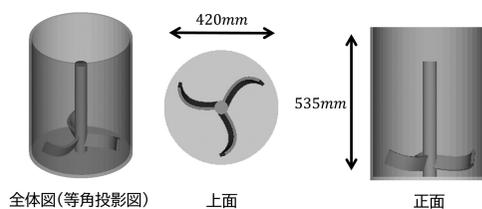


図4 攪拌槽

液体物性を以下に示す。

表1 液体物性

物性値 (高粘度液体、チョコレートを想定)		
密度	kg/m ³	1,270
粘度	Pa·s	4.953
仕込み量	mm	375 ※底面からの高さ(図3参照)

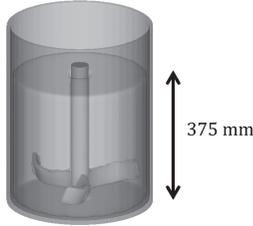


図5 液体の初期投入量

その他の解析条件を以下に示す。

- ・回転条件
 - 0 秒：静止状態
 - 0~0.5 秒：加速状態
 - 0.5~60 秒：60rpm 一定で回転
- ・シミュレーション時間：60 秒

液体の流動評価のため、高粘度液体を三層に分割して初期配置する。

流体を3層に分割

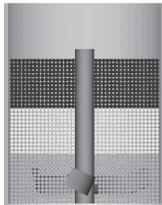


図6 液体の分割表示

シミュレーション結果を以下に示す。

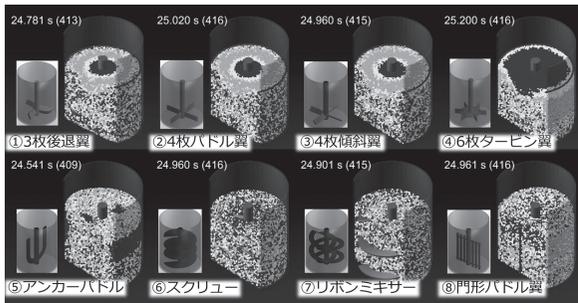
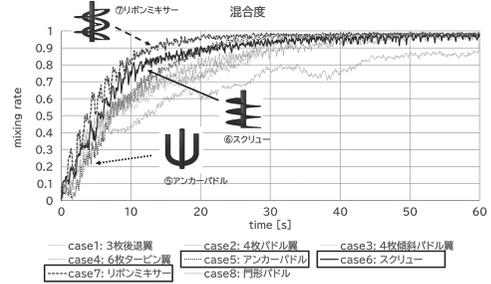


図7 解析結果

⑥スクリューと⑦リボンミキサーの混合は、他の翼に比べて進んでいることが確認できる。

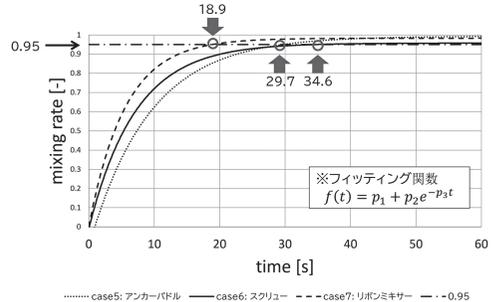
混合度の評価結果を以下に示す。



グラフ1 混合度

⑤アンカーパドル、⑥スクリュー、⑦リボンミキサーについて、混合度のグラフを指数関数でフィッティングしたグラフを以下に示す。

- ・混合度 0.95 を超えた時間を混合所要時間 t_m と定義
- ・攪拌の早さは t_m を用いて評価する



グラフ2 混合度フィッティング

⑦リボンミキサーが最も早く完全混合に到達する。なぜ⑦リボンミキサーの攪拌時間は短いのか。高粘性流体は動力を得られる場所から離れると流動できないため、混ざりにくくなる。速度分布(図8)が示すように、リボンミキサーを用いた場合、攪拌槽内に上下に移動する流れが確認できるため短時間での混合が可能となる。

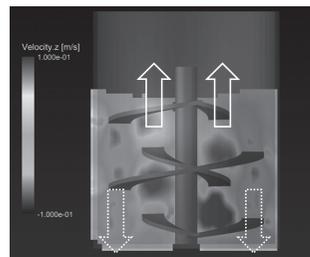


図8 速度分布 リボンミキサー

●
 本事例では、Particleworksを用いて高粘性流体の攪拌シミュレーションを行った。8種類の翼を比較すると、リボンミキサーが最も混合速度が高いことが分かった。さらに、速度分布表示により、リボンミキサーでは高粘度液体の攪拌で重要となる上下循環の流動が活発であることが確認できた。

4-2 ホッパーの粉体排出

混合した材料をタンクから排出する際に、ホッパーの形状や表面摩擦によっては、ファネルフロー（排出口上部の領域のみが流動し、壁面付近の粉体が流動しない状態）が顕著になることがある。排出されない要因をシミュレーションで特定し、対策案の効果を評価する。

本事例では、iGRAFを用いてホッパーの粉体排出シミュレーションを行う。

●
 以下にシミュレーション対象のモデル概要を示す。

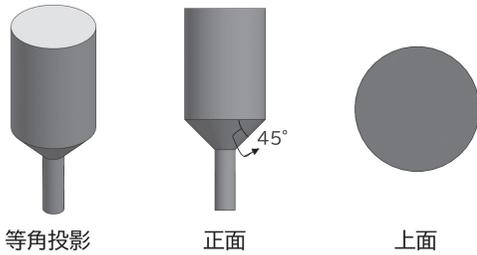


図9 ホッパー形状

粉体物性、運転条件を以下に示す。

表2 粉体物性 運転条件

物性値(粉体)		
粉体粒子径	mm	1.3
密度	kg/m ³	1000
バネ定数	N/m	100
反発係数	-	0.9
摩擦係数	-	0.5
回転抵抗係数	-	0.1
解析パラメータ		
計算時間	秒	6

粉体の各層の排出挙動の違いを可視化するため、下図のとおり、粉体を6層に分割した状態で初期配置をした。

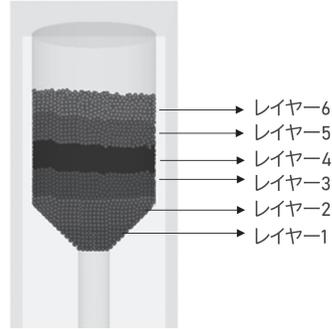


図10 粉体の6層分割表示

以下にシミュレーション結果を示す。

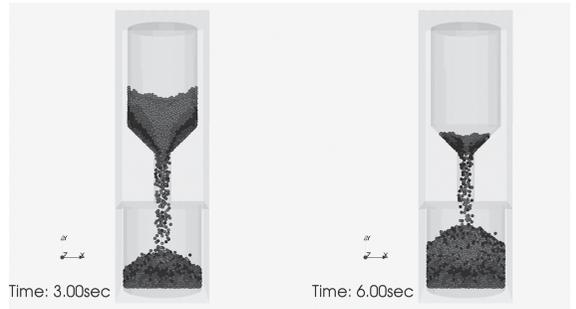


図11 ホッパー排出解析結果 (左: 3秒時点、右: 6秒時点)

以下に3秒時点での速度分布を示す。

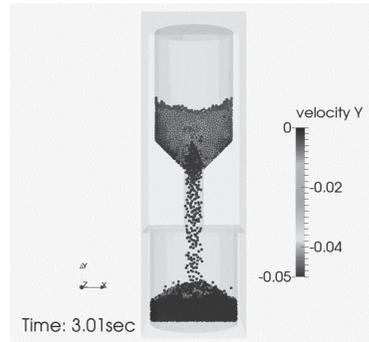
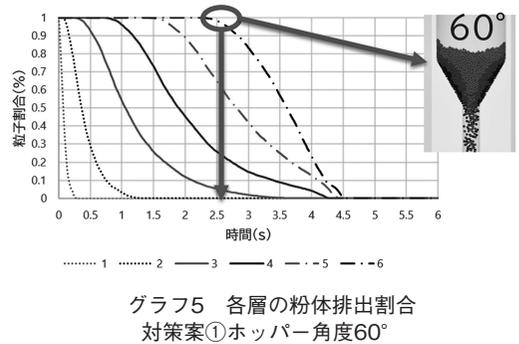
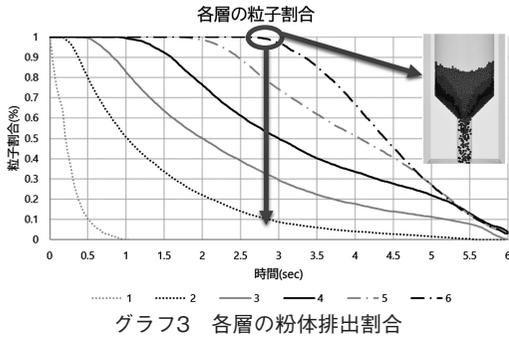


図12 速度分布表示

中央で粉体速度が速くなり、壁付近で遅くなり、ファネルフローが発生していることが分かる。

各層で排出される粉体の割合の時系列変化を示す。



最上のレイヤー（レイヤー6）が排出され始める時間を確認することで、粉体レイヤー2, 3, 4, 5も存在していることが確認できる。5.3秒以降、粉体レイヤー4, 5, 6の排出する粒子割合が同等となっていることが確認できる。ファネルフローを改善するため、対策案「ホッパーの角度の変更」について検討を行った。ホッパー角度が45°と60°における粉体挙動の可視化結果を以下に示す。

ホッパーの角度を60°に変更することで、以下を確認することができた。粉体が完全に排出される時間が6秒から4.5秒に短縮されていることが確認できる。最上のレイヤー（レイヤー6）の排出開始時に、同時に排出される粉体層の数を4層（粉体レイヤー2, 3, 4, 5）から2層（粉体レイヤー4, 5）に減らすことができた。

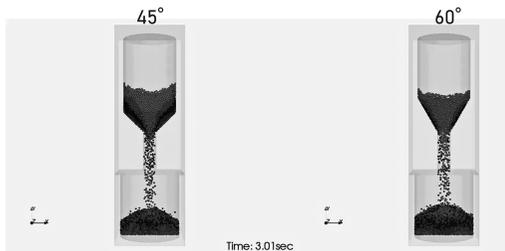
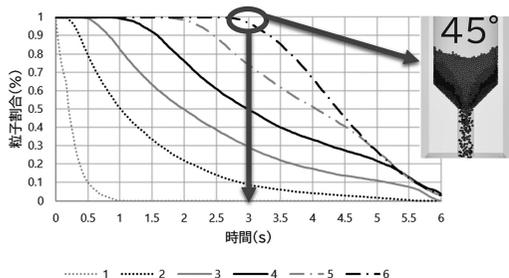


図13 ホッパー排出解析結果
(左：ホッパー角度45°、右：ホッパー角度60°)

ホッパーの角度60°の場合、壁面付近に残る粉体層が減少し、ファネルフローの影響が小さくなっていることが確認できる。

各層で排出される粉体の割合の時系列変化を以下に示す。



5 終わりに

今回ご紹介した攪拌やホッパー排出をはじめとする多くの食品製造プロセス（充填、ボールミル、搬送など）の課題を、粒子法流体・粉体シミュレーションを用いて検討し、装置内部でどのようなパラメータが不具合や改善の要因となったのか定量的に評価することが可能である。そして、経験を形式知化して組織内で共有し、冒頭で挙げた以下のような課題を達成していくための体制づくりに貢献することができる。

- ・将来のトラブル発生時の対応スピード向上
- ・製品の付加価値向上のための開発
- ・部門内外の知見の共有
- ・形式知化された資料での若手社員の教育

弊社では、今後、粒子法流体・粉体シミュレーションが、さらに、食品製造の品質の安定化や生産効率改善に貢献できるよう、食品製造プロセスでのシミュレーション適用範囲拡大のための解析機能の開発や、検討効率向上のための機械学習を用いた予測技術の強化などに取り組んでいく。

■本記事のお問い合わせ先

株式会社構造計画研究所
SBDエンジニアリング部

〒164-0012

東京都中野区本町4-38-13

日本ホルスタイン会館内

T E L : 03-5342-1053

Email : sbdseminar@kke.co.jp

Web : <https://www.sbd.jp/>