



ソフトウェアで実現できるエネルギー消費削減と品質向上 —スプレードライヤー・デジタルツインによる粉ミルク製造プロセス—

中田昌彰^{1,†}, Sam WILKINSON², Amitha ASOKKUMAR²

¹シーメンス株式会社, ²Siemens Industry Software (UK)

1. はじめに

食品業界では原料費高騰、新製品上市サイクルの加速、そしてSDGsへの考慮等の複雑かつ困難な問題の同時並行解決が必須である。ハードウェアではなくソフトウェアに投資して生産性と品質向上のみならずエネルギー消費削減、そしてプラントの停止（休止）時間の削減を実現することが求められている。本記事ではその方策としてgPROMSを解説する。

gPROMSとはgeneral **PRO**cess **MO**delling **S**ystemの頭文字を使用した製品名称である。英国インペリアルカレッジのgPROMS開発チームにより1997年から市場投入された。

gPROMSは従来のシミュレータと異なる物理方程式ベースの強力な計算エンジンを持ち、定常シミュレーションとダイナミックシミュレーションの両方をシームレスに扱えることが大きな特徴となっている。これによりバッチ処理の実験データで調整されたモデルをスケールアップして連続処理のプラント設計や運転最適化に有効に活用できる。

gPROMSの優れたカスタムモデリング、Parameter Estimation（予測機能）、そしてOptimization（最適化）といった機能により迅速に最適な製造プロセスの構築やトラブル解決、最適化が可能となる。「モデリング」を活用したgPROMSによりプロセス工程を予測・可視化することによりさらなる効率化を実現して、他社に先駆け競争力のある製品で市場参入することが可能となる。

製造プロセスの複雑化および労働力減少に伴いシミュレーション活用ケースが高まっている。AIやビックデータを取り込んでより効率化を進めて行く流れは今後益々加速化していくものと思われるが、物理モデルも重要である。

製造現場では以下の懸案事項を「早期」にかつ「同時」（時として複数）に解決をすることが求められている。

- 新製品上市の開発時間短縮（例 スケールアップ）
- 不具合による廃棄物削減
- 高騰するエネルギー消費削減（CO₂削減）
- さらなる効率化

現象が複雑な粉体の世界では長年勤務している方々のいわゆる「職人技」（経験則）が幅を利かし、文字通りの肌感覚や舌の感覚などにより後進に技術伝承しているケースも散見される。経験則での技術伝承には限界があり、何故なのかを理論的に説明することは不可能である。大幅な設備変更があった場合にはその伝承さえできなくなる可能性がある。

gPROMSでは経験則を物理方程式を用いて「視覚化」することによりスケールアップや新設備導入の際に深くプロセスの知見を得ることができる。

本稿で取り上げたスプレードライヤーについては、製品に含有される水分量を如何に適切な値まで増加させるのが収益に直結する。粉ミルクメーカーのみならず食品分野にてスプレードライヤーを恒常的に利用する数多くのユーザーの「利益の源泉」の1つともいえる。

gPROMSには自社で開発したモデリング式を入力できる機能やバリデーション（検証）機能があり過去のデータをバリデーションしデジタルツインを完成させ、DCS（**D**istributed **C**ontrol **S**ystem 分散制御システム）との接続も可能となる。

デジタルツイン（Digital Twin）とは何か？総務省のホームページを参考に下記に述べる。

デジタルツインとは、現実空間を仮想空間に再現する従来からある概念である。現実世界から集めたデータを基にデジタルな仮想空間上に双子（ツイン）を構築し、様々なシミュレーションを行う技術である。実在する現実世界をコンピューター上で再現し現実世界では難しいシミュレーションを実施するために使われることが多い。

製造現場の監視、耐用テストなど現実空間では繰り返し実施しづらいテストを仮想空間上で何度もシミュレーションすることが可能となり、以下のようなメリッ

〒222-0033 横浜市港北区新横浜3-1-9 アリーナタワー 14階

† Fax: 045-478-4850, E-mail: m.nakata@siemens.com

トが期待できる。

- **生産の最適化や業務効率の向上**：最適な機器や人員の配置，リードタイム短縮のためのプロセス改善などにより最適化できる。また，仮想空間でのシミュレーションによって視覚的に結果を確認することができるため，製造時のリスク削減にも貢献する。
- **時間やコストの削減**：物理的に試験をしたり試作品を作成したりするのに比べて，仮想空間上で容易にシミュレーションができるため，物理的な検証に費やしていた時間や廃棄物を大幅に削減することができる。
- **現実世界では不可能なシミュレーションが可能**：現実世界では頻繁に発生しない現象を容易に発生させることができるため，実機ではできない様々な実験を行うことができる。

gPROMS は物理方程式を採用しているためプロセス内で発生している事象を「理論的」に説明・理解でき内容を明確にしているため，精度の高いデジタルツインを完成することができる。

2. 乾燥のモデリングと推算

ダノン社ではスプレードライヤーによる粉ミルク製造時に後述する様々な問題を抱えており gPROMS を利用したデジタルツインで問題解決をした。

スプレードライヤーでは，製造の過程である粒径制御，水分量制御，粒子の形状に影響する因子などをシミュレーションすることにより，製品品質のばらつき制御や装置のスケールアップ（大型化）を検討できる。

モデリングにおいては，Population Balance（物質収支）式に基づき粒径分布を計算し，さらに粒子の乾燥経過を計算している，壁面への付着を表現することも

シミュレーションにおける重要な要件である。

ダノン社ではスプレードライヤープラント制御のためにリアルタイム水分予測を「物理モデル」によるシミュレーションを行った。プロセスの最適化および希望する品質そして乾燥条件を設定することができた。

一例のみモデル式を掲載する。

i) 準平衡計算式（乾燥の物理モデル）

平衡時は $\Delta X = 0$ であるが，実際には平衡からずれる。

$$X_{po} = X_{ao} + \Delta X$$

平衡からのずれは，供給液の固形分濃度の関数となる

$$\Delta X = A_x (DS_c - DS_{c,ref}) + B_x$$

X_{po} : equilibrium moisture content of outlet dry air (kg/kg)

X_{ao} : moisture content of outlet dry air (kg/kg)

ΔX : difference from equilibrium (kg/kg)

A_x, B_x : product and dryer dependent parameter

$DS_c, DS_{c,ref}$: dry solids content and reference dry solids content of feed (kg/kg)

ii) 流動層内部方程式（流動層の物理モデル）

iii) 吸着等温式（水分含有量と相対湿度）

操作範囲を設定するためにプラント操業条件（乾燥空気温度，流量，湿度），および，噴霧された製品の分析データ（粒度分布，残留液分）を入力することにより付着予想カーブを推算する機能をもたせている（図1）。

また，GSA（Global System Analyze）機能によりオフラインで数多くの予測（バーチャル実験）を実施できる

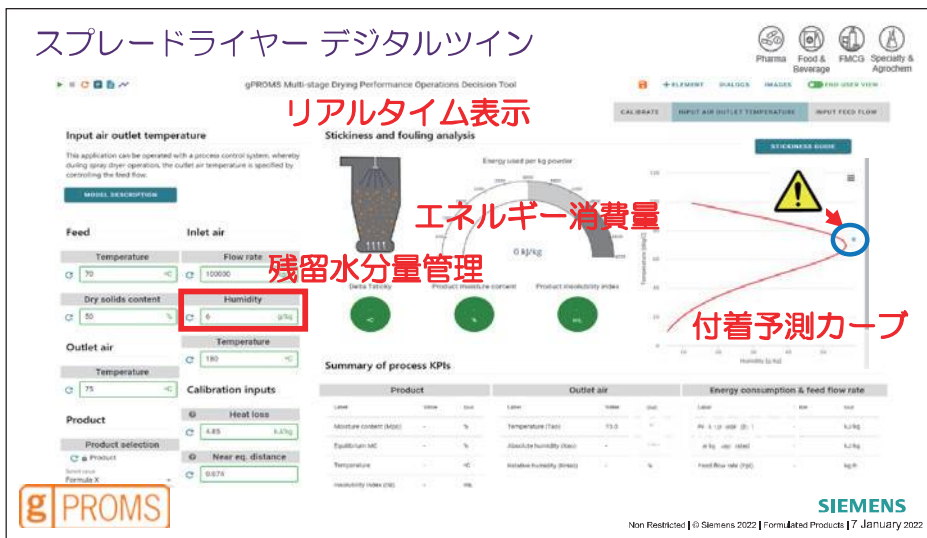


図1 デジタルツイン（付着予想カーブ，丸印は現時点での操業ポイント）

ため、従来よりも広範囲なデザインスペース（スプレードライヤー操業領域の計算例）構築によりプロセスパラメータを深く理解することが可能となる（図2）。

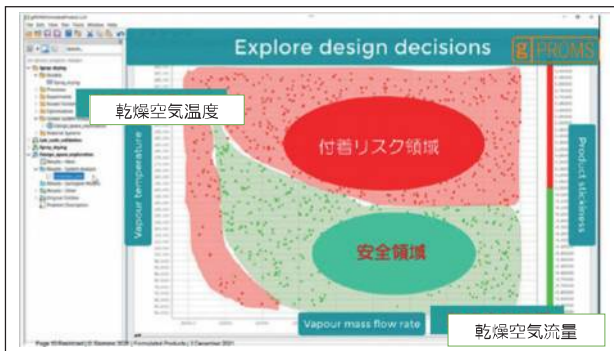


図2 スプレードライヤー操業領域の計算例（デザインスペース）

モデリングベースのgPROMSを採用することにより、より深くプロセスを洞察できた。そして従来の高度制御システムにgPROMSを導入した。

ダノン社は設置しているスプレードライヤーの生産性を大幅に高めることを実現した。また、過乾燥を抑制し最終製品に含有される水分量を精密に制御できたため、水分含有変動幅が小さくなり収益性を大幅に向上させることに成功した（図3）。

ダノン社では以下のような課題があった。

- 粉ミルク工場の収益の向上
- 最終製品に含有される水分量の適切な増加
- エネルギー消費の削減
- 幅広い製品群に対応

上記の課題に対してgPROMSを用いて以下のようなシステムを構築した。

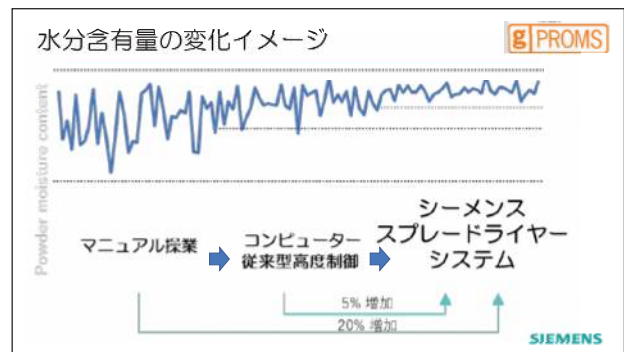


図3 水分含有量変化

- モデリングによるスプレードライヤーのデジタルツイン化（図4）
 - 現状の高度制御システムにデジタルツインをソフトセンサーとして適用
 - リアルタイムモニタリングによる最適化
- その結果、下記のような導入効果を得ることができた。
- 水分含有量を5%増加させられた。
 - 水分含有量変動幅を30%低減できた。
 - エネルギー消費量の削減ができた。

1時間あたり7.5トンの粉ミルクを製造している工場を想定して上述のような項目でコスト試算をしたところ、既存の生産設備で隠されている「潜在的」な損失が年間1億5千万円以上あると思われる。この大部分を占めているのが「乾燥過多」であり損失は9100万円と試算された。（その他の要因としては非効率なエネルギー消費、ピークタイムの生産機会損失、プラントの追加試験、含有水分の変動、突然の操業停止が考えられる。）

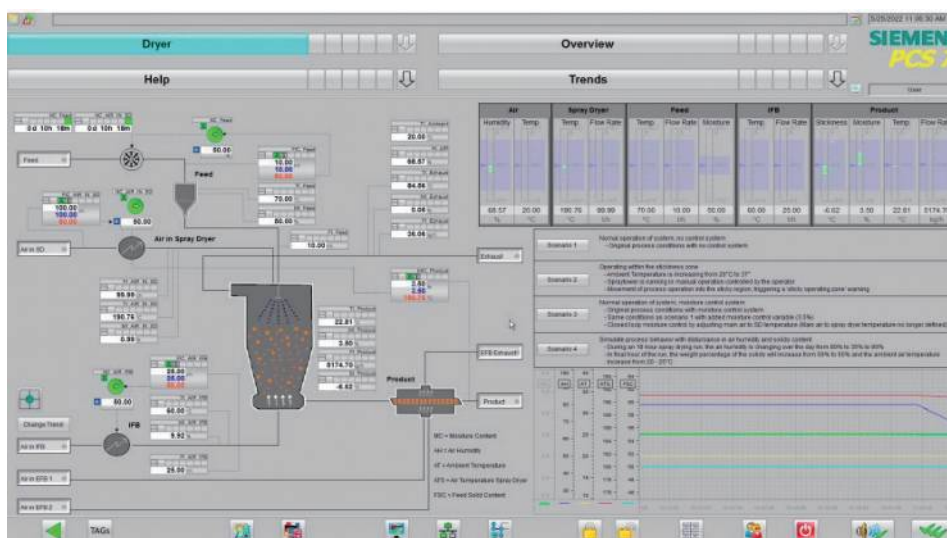


図4 ダノン社 DCS（分散型制御システム）

3. お わ り に

デジタルツイン化で実現できることは下記の通りである。

- 適切な水分量増加による収益向上
- エネルギー消費および CO₂ 削減
- 生産性向上
- 付着防止による洗浄回数削減 (CIP)
- 隠されていた損失を利益に変換する
- モデリングにより経験則ではなく現象が論理的に説明可能となることによる効果的な技術継承

従来のコンピューター高度制御に「物理モデル」を搭載することにより、エネルギー消費削減とそれによる二酸化炭素削減そして生産量の増加と品質向上を達成して「環境改善と収益改善」を「同時実現」することが可能となるのがデジタルツインによる SDGs 加速の世界である。

謝 辞

Danone Nutricia Research, Netherlands に深くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 令和5年版 情報通信白書第1部第3章第1節2-(2) デジタルツイン

参 考 U R L

- i) Sustainable production excellence. IDM International Dairy Magazine, 07-08-2023
https://blmedien.aflip.in/IDM_07-08_2023#page/17
- ii) Energy Saving Spray Drying on Siemens Website
<https://www.siemens.com/global/en/industries/food-beverage/use-cases/spray-drying.html>
- iii) Danone Spray Dryer Digital Twin, Webinar PSE Webinar 2022
<https://contentpath.siemens.com/c/Food-Beverage-Danone-Spray-Dryer-Digital-Twin?x=07sqXh&lx=ObMaXD>
- iv) <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r05/html/nd131220.html>