

IoT活用による粉体プロセスのパラダイムシフト

ホソカワミクロン株式会社 笹辺 修司
Shuji SASABE

1. はじめに

高度情報化の波は、世界的にも時代のトレンドとなっている。各種ニューメディアの発達、ビジネスのみならず、私達の日常生活までもを根本的に変えようとする大きなうねりとなっている。最先端の高度情報化機器を用いることで、時間の差や空間的な距離を超越したネットワーク社会が、国際的に生まれようとしている。

今日の豊かな社会は、3度の産業革命を経て築かれたとされる。産業革命のテーマは、農業から工業、そして情報へと歴史的に変遷してきた。言い換えると、機械化が多くの労働力を補い、情報化は知的活動を代替したといえる。世界はまさに知識集約型の社会構造へと変化したのである。これらの変化は、第四次産業革命あるいはインダストリー4.0と呼ばれている。

このインダストリー4.0は、多品種少量生産が可能な高度にIT化されたスマート工場と流通も含めた製販一体の生産システムを世界共通のプラットフォーム上に構築することを目的としたドイツの産官学共同プロジェクトとして始まった。

これは、デジタル化によって、設計～生産～販売までのデータとマーケットニーズや生産プロセスのデータをつなぎ、多品種少量生産をさらに進化させた変種変量生産に対応した柔軟で自律的な生産現場を創出するものである。

現在の生産現場は、コツや設定といった“すり合わせ”の塊で構成されており、そこに日本企業の強みがある。しかし、今後は製造業のデジタル化が進み、すり合わせ自体の付加価値が相対的に減っていくことが危惧される。

従来の部分的な効率化に留まらず、製造業の全バリューチェーンを通じたデジタル技術のフル活用がインダストリー4.0の本質であり、それは質の高い膨大なデータが生まれる仕組みであるとも

いえる。

2. ビッグデータ

最近頻繁に耳にするビッグデータという言葉は、直訳すれば「大きいデータ」であり、ボリュームが多いデータ群という印象が強いが、それはひとつの側面を捉えているに過ぎない。ビッグデータとは、既存の一般的な技術では管理することが困難な大量のデータ群と定義されるべきものである。

このように定義されるビッグデータは、比較的簡便に収集が可能である。ここでは当社の簡単な粉碎システムを例に挙げて説明する。

図-1に当社の衝撃型分級機構内蔵型微粉碎機ACMのフローを示す。この図中の②の粉碎機・分級機と③の集じん機の配管にオンライン式粒子径分布測定装置オプティサイザXOを設置し、粒子径分布をリアルタイム計測するとして。

表-1には、図-1のフローで得られるデータの一部を示した。

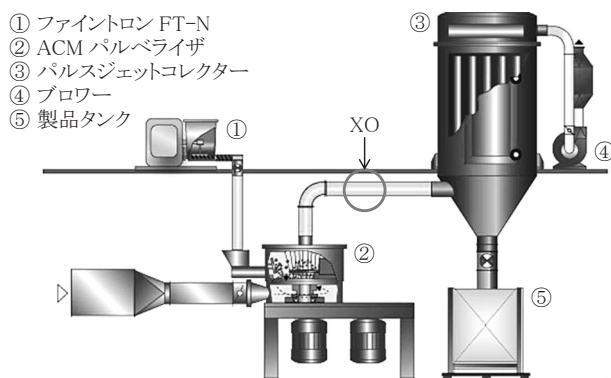


図-1 衝撃型分級機構内蔵型微粉碎機ACMとXOを付加したフロー

取得する主な計測データは、3種の積算ふるい下粒子径、供給速度、粉碎部回転速度、分級回転速度、風量の7項目であり、これらを5秒間で平均化した値を対象とする。そうすると、1分間に7項目から得られるデータ数量は、84個となり、

表-1 ACM+XO フローの代表的なデータ

x_{10} (μm)	x_{50} (μm)	x_{90} (μm)	供給 速度 (kg/h)	粉碎部 回転速度 (min^{-1})	分級 回転速度 (min^{-1})	風量 (m^3/h)	タイムスタンプ
0.71	2.09	9.06	9	4,749.6	3,195.1	2,281.2	2017/1/12 11:10:14
0.71	2.13	9.56	9	4,751.7	3,187.6	2,279.2	2017/1/12 11:10:18
0.71	2.13	9.24	9	4,751.2	3,184.2	2,273	2017/1/12 11:10:23
0.71	2.07	8.95	9	4,753.2	3,185.2	2,270.7	2017/1/12 11:10:28
0.71	2.11	9.19	9	4,752.7	3,182.3	2,271.3	2017/1/12 11:10:33
0.73	2.21	7.68	9	4,755.5	3,185.4	2,271.5	2017/1/12 11:10:38
0.72	2.14	7.86	9	4,754.7	3,184.5	2,268.8	2017/1/12 11:10:43
0.73	2.18	8.42	9	4,753.1	3,198.2	2,269.9	2017/1/12 11:10:48
0.72	2.11	8.76	9	4,751.7	3,190.6	2,271.7	2017/1/12 11:10:53
0.72	2.24	9.68	9	4,752.3	3,189.2	2,272.1	2017/1/12 11:10:58
0.71	2.08	9.24	9	4,759.9	3,188.5	2,271.6	2017/1/12 11:11:03
0.71	2.08	8.92	9	4,759.0	3,200.1	2,272.3	2017/1/12 11:11:08
0.71	2.08	8.79	9	4,753.6	3,185.6	2,269.3	2017/1/12 11:11:13

これを8時間稼働した場合は、約40,000個程度のボリュームとなる。しかし、実際には、データの取得は1秒間に設定していることから、1日の稼働でこの5倍のボリュームのデータが得られることになる。

“データ”と簡単に表現したが、それは単に存在する情報ではなく、目的を持って計測して得られた情報が初めてデータと呼べるものとなることがポイントである。

3. オンライン粒子径分布測定装置オペティサイザ XO

当装置は、プロセスライン中を流れる粉体の粒子径分布をリアルタイムで連続的に測定し、パソコン・制御部画面上でモニタリングが可能なオンラインの粒子径分布測定装置である。図-2に構造図を示す。本装置は、レーザー回折・散乱法を用いて粒子径分布を測定する。エジェクターの負圧効果を利用し、粉体空気輸送ラインに設置したサンプリングノズルから粉体を吸引・分散し、測定セルへ導いて粒子径測定を行う。測定後の粉体は再び粉体空気輸送ラインに戻されるため、製品ロスがない。測定した粒子径データはパソコンに送られ、専用ソフトで解析・表示される。さらに解析データを外部出力することで、粉体空気輸送ラインへのフィードバック制御も可能である。本

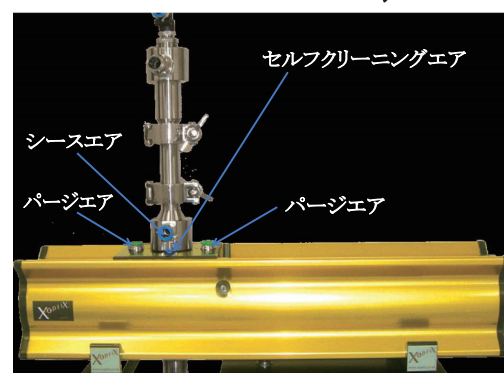
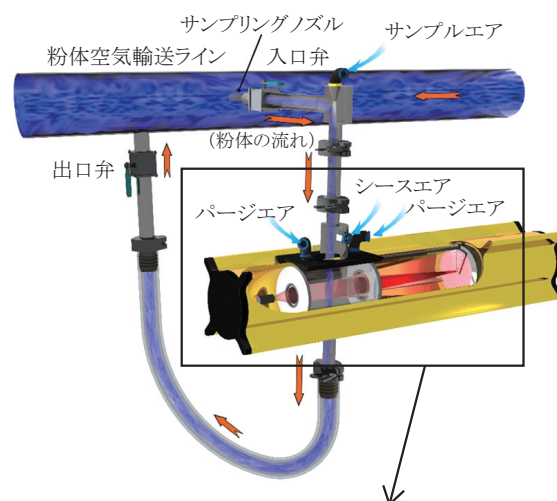


図-2 オンライン粒子径分布測定装置オペティサイザ XO の構造図

体はレーザー発振部と検出部が一体の構造となっており、測定セルの脱着による光軸への影響がないため、測定セルの清掃や交換が容易にできる。独自のエア洗浄方式を採用し、パージェエア、

シーエアおよびセルクリーニングエアによって粉体が測定セルに付着し難い構造となっている。また、リアルタイムでモニタリングを行うことで、プロセスラインの最適化による製造能力および品質の最適化やエネルギーコストの削減が比較的安価なイニシャルコストで実現できる。

4. 現在の制御の限界

当社の本社（大阪府枚方市）と東京支店（千葉県柏市）のテストセンターでは、国内外のお客様から寄せられる要望について、毎日10件程度の材料加工テストを行っている。粒子設計と呼ばれる粒子の複合化や形状制御を目的とする加工以外は、目標とされる粒子径に対し、最大能力の追求がテスト内容の大半を占める。

粉体プロセスの制御は、ある一定範囲の許容粒子径域（上限/下限）を目的に実施する場合、対象となる目標の粒子径はひとつとなる。しかし、この目標に加えて、処理能力や消費エネルギー効率の向上、あるいはこれら二つのバランスをとった条件での運転を行うことは、パラメーターが多いことや条件間の関係性が定量的に掴めないことから、人間では理解不能に陥る。また、数値化できない条件のため、多変量解析も利用できない。

このように制御の限界に関する課題に対し、ビッグデータの解析技術の活用が注目されている¹⁾。

5. HOSOKAWA GEN 4

当社の英国子会社 HOSOKAWA Micron Ltd.（以下、HML）は、当社で目指すインダストリー 4.0 を実現するためのデジタルサービス取り組みのブランド名として、HOSOKAWA Gen 4を提案している（図-3）。



図-3 ブランドロゴ²⁾

既に世界では、現実の製品や工場などを、デジタルデータをもとにサイバー空間にそっくりそのままに構築（再現）するデジタルツイン（Digital Twin）、自動車メーカーであるスウェーデンのVolvo 社は、Microsoft 社の HoloLens を活用した自動車のデザインなどをVRで実用段階に入っており、デジタル化の波は凄まじい勢いで進んでいる。

Hosokawa Gen 4は、Digital Twin、VRそして、プロセスの AI 運転を行う XpertRule システムを主軸とした取り組みを行っている。

次に、XpertRule システムを紹介する。

6. ビッグデータ解析技術

ビッグデータの解析技術は、「クロス集計」、「ロジスティック回帰分析」、「決定木分析」、「アソシエーション分析」、「クラスター分析」など、さま

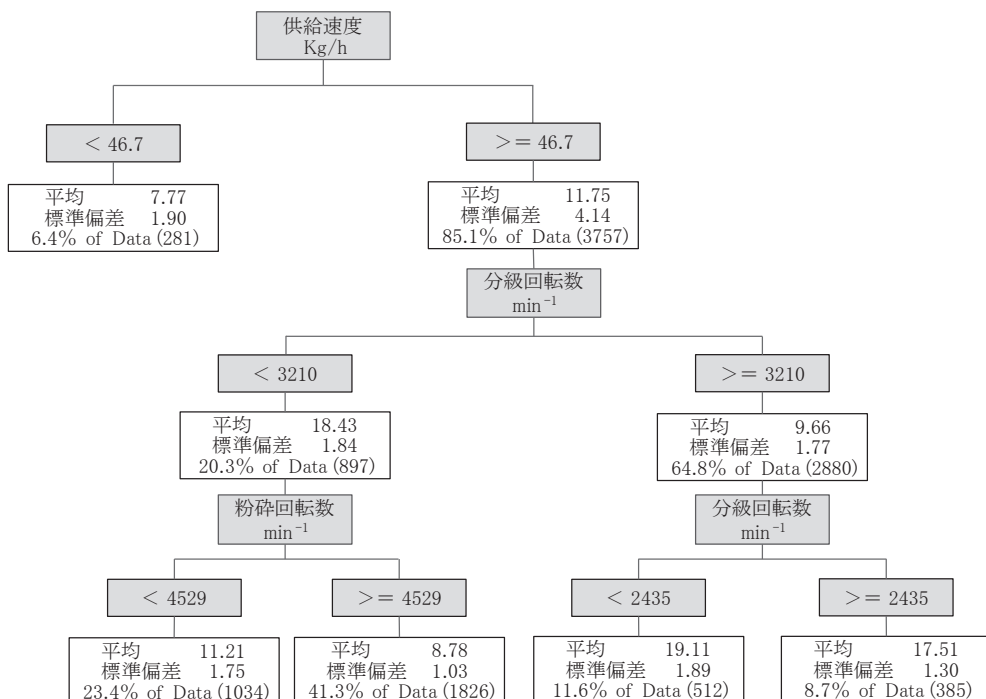


図-4 XpertRule による衝撃型分級機構内蔵型微粉砕機 ACM 粉砕条件のデータマイニングの決定木結果

ざまな方法が提案されている。

HMLと英国XpertRule社では、XpertRule社のデータマイニング機能を備えた制御ソフトウェアによる粉体プロセス制御の検討を始めている。

本技術は、主に決定木分析 (Decision Tree Analysis)、遺伝的アルゴリズム、ファジー化の組合せで構成されている。

決定木分析は、樹木状のモデルを使って要因を分析し、その分析結果から境界線を探して予測を行うデータマイニング手法のひとつである³⁾。

図-4に当社の衝撃型分級機構内蔵型微粉碎機ACMで重質炭酸カルシウムを処理した際のデータを元にXpertRuleで解析した結果を示す。

データセットは、オペティサイザXOの x_{10} 、 x_{50} 、 x_{90} %径 (μm)、集じん機の差圧、風量、粉碎ローターの回転数、運転時の負荷、分級ローターの回転数、運転時の負荷、供給速度 (kg/h) の各操作条件を変更し、約4,500点のデータを元に決定木解析を行った。

最も重要なパラメーターは供給速度で、46.7 kg/h の供給速度によって、得られる粒子径に影響を及ぼす結果となった。図中に記載がないものを含め、以降、重要なパラメーターは、分級ローター回転数、粉碎ローター回転数、風量、粉碎ローター回転数の順となった。計算結果として、これらの条件下で得られる粒子径とその標準偏差の計算結果ならびに使用された全データに対する割合とそのデータ数が各操作条件に表示される。

ここで使用されるデータ数は、総数の1/3~1/4であり、使用されなかったデータは、解析後のシミュレーション用途に用いられる。

一方、図-4の結果にある分級ローターの回転数を制御する場合、 $3,210\text{min}^{-1}$ より 1min^{-1} でもずれると制御プログラムが動作してしまうことが課題とされている。これは、プロセス制御であるマニュアル制御、PID (Proportional Integral Derivative) 制御などに共通する問題である。

本技術は、過敏に反応しすぎてシステムが安定を欠くことを回避するため、決定木における各枝の数値に対して、ある程度の幅 (マージン) をもたせる作業をプログラムが自動的にを行い、決定木のファジー化を実施している。

このように目的とする粒子径の処理に加え、処理量の向上、消費エネルギーの低減など、複数の条件を満足する運転条件の計算は、一般的なアルゴリズムによってファジー化された決定木を組み

合わせることで実現させている。また、各パラメーターに重み付けを設定することも可能である。解析に用いられる操作条件のデータは、図-5に示すようにリアルタイムでスマートフォンやPCなどへ表示することもでき、解析結果も表示させることが可能であり、海外の生産現場の状況把握などへの利用に期待できる。



図-5 XpertRule モニタリング画面

図-6には、XpertRuleの解析によって得られた操作条件とその予測粒子径と、その操作条件によって得られた実際の粒子径の比較を示す。無作為に7点程度の目標値を定め、その目標に対し、検証運転を実施した。横軸にXpertRule解析による粒子径、縦軸に実際に検証した粒子径を示す。予測条件で検証した結果は、相関係数0.9799で目標に対して、あるレベルにて予測が行える可能性がある結果となった。

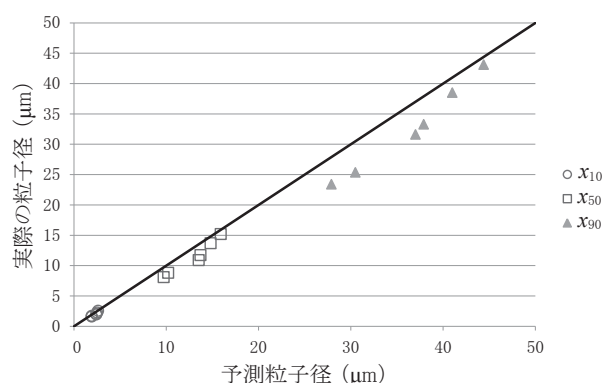


図-6 解析した操作条件による実証テスト結果 (粒子径)

図-7には、消費電力について解析した予測値 (横軸) と実証テストの結果 (縦軸) を示す。予測の結果に対し、その操作条件で検証テストを行った結果、良好な相関関係を示した⁴⁾。これら

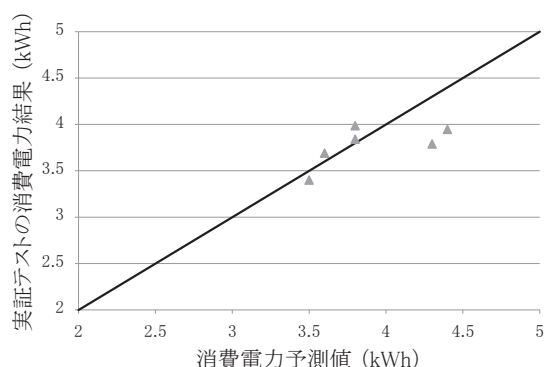


図-7 解析した操作条件による実証テスト結果（消費電力）

のデータを継続して収集・解析を続けることによって、より、高精度な解析が期待できると考える³⁾。

このように、リアルタイム計測によって、最適に近い運転を行うことで、従来トレードオフの関係で、困難とされてきた安定した高品質な商品の生産と高効率化を両立できる可能性が出てきたと考える。

7. おわりに

本稿では、粒子径と高い生産性（処理量）あるいは低い消費エネルギーを両立する現在開発中の下記の取り組みを紹介した。

- ①各種センシングによるビッグデータの構築
- ②運転条件のルール化
- ③安定制御のための前処理
- ④遺伝的アルゴリズムによる決定木の組合せ
また、センシングするデータ種類を増やすこと

で、システムの子知保全やお客様のより高度な要求にも応えられる粉体処理装置の開発の可能性があると考えている。

さらに粒子径を対象とした粉体設計に、当社グループが持つ粉体評価技術を融合させることで、従来の概念を覆す粉体特性を制御した製品作りを図っていく。今後益々多様化するであろうお客様の新製品に最適な粉体加工を可能にする粉体プロセスのパラダイムシフトに向け、早期のサービス提供を目指す所存である。

参考文献

- 1) 笹辺修司：“IoT 活用による粉体プロセスのパラダイムシフト”、先進セラミックス第124委員会第155回会議資料、p. 9-13 (2018)
- 2) <https://www.hosokawagen4.com/>
- 3) Iain Crosley, The Internet-of-Things, Opportunities to Improve Manufacturing Processes, The Micromeritics, **60**, p. 33-45 (2017)
- 4) 笹辺修司、北村智浩：“IoT 活用による粉体プロセスのパラダイムシフト”、産業機械、**807**、p. 22-27 (2017)



ささべ しゅうじ
笹辺 修司

ホソカワミクロン(株) 粉体工学研究所
測定分析センター センター長

〒573-1132 大阪府枚方市招提田近1-9
TEL: 072-855-2386 FAX: 072-855-2730
E-mail: ssasabe@hmc.hosokawa.com