

# 成形良品条件自動フィードバックシステムの開発

## Development of Automatic Feedback System of Production Conditions for Non-defective Molding

畠山 卓也<sup>\*1</sup>   小池 洋喜<sup>\*1</sup>   伊藤 暁子<sup>\*1</sup>   小浦 祐輝<sup>\*2</sup>  
 Takuya Hatakeyama   Hiroki Koike   Akiko Ito   Yuki Oura

\*1 自動車事業部 生産技術部   \*2 ITデジタル推進本部 DX推進部

### 要旨

当社長草工場で生産する自動車に取り付けられる部品のひとつにバンパーがあり、同工場の成形工程で生産されている。その生産設備である射出成形機や金型には圧力や温度等、多種多様な複数のセンサが設置されており、これらのセンサ実測値をもとに、数百個の制御パラメータの中から調整すべきパラメータを見つけ出し、その時々々の工程環境に最適な値にすることでバンパー品質を維持管理している。しかしながら製品の高機能・高品質化や生産設備の複雑・高度化によって、人の経験や勘に依存した管理が難しくなっている。今回、センサ実測値をもとに最適な制御パラメータ設定値(良品条件)を予測するAIと、予測した良品条件を設備に自動でフィードバックする品質管理システムの開発に取り組んだ。

キーワード: 射出成形, AI, IoT, 自律制御, 品質管理

### Abstract

Bumper is one of the parts attached to automobiles produced at our Nagakusa factory, and are produced in the molding factory. The injection molding machine and mold, which are bumper production facility, are equipped with a wide variety of sensors such as pressure and temperature. Based on the measured values of these sensors, the control parameters of production facility to be adjusted are found from hundreds of the parameters, and the bumper quality is maintained and managed by making the optimal values for the production environment at that time. However, due to the high functionality and quality of products and the complexity and sophistication of production equipment, it is becoming difficult to manage products that depend on human expertise and intuition.

This time, we worked on the development of an AI that optimal control parameter settings, production conditions for non-defective, based on the measured values of many sensors, and a quality control system that automatically feeds back the predicted production conditions for non-defective to the equipment.

Keywords: Injection molding, AI, IoT, Autonomous control, Quality control

## 1 はじめに

近年、製造現場のものづくりは製品の高機能・高品質化や生産設備の複雑・高度化によって工程で管理すべきデータ量が増加し、従来のような人の経験や勘に依存した管理が難しくなっている。このような背景から、大量のデータを高速かつ正確に処理できるAIの活用が生産現場においても強く期待されており、当社でもAI技術を活用した品質向上に貢献する新生産技術開発に取り組んできた。今回、自動車用バンパーを生産する成形工程において、収集したデータをもとにバンパー成形の良品条件を予測するAIと、予測した良品条件を設備に自動でフィードバックする品質管理システム(図1)の開発を行ったので紹介する。

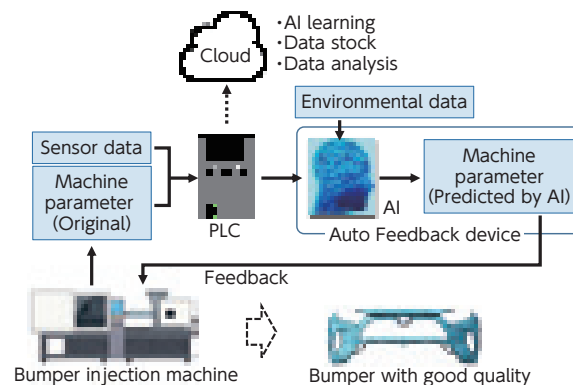


図1 成形良品条件自動フィードバックシステム概略図  
Fig.1 Schematic of automatic feedback system

## 2 バンパー成形の良品条件と課題

バンパーの生産工法である射出成形の概要を図2に示す。射出成形では約200℃の高温の熔融樹脂を高圧・高速で金型内に射出充填し、冷却固化してバンパー形状を成形する。品質の良いバンパーをつくるためには、複数の射出成形パラメータを駆使して射出成形機を最適に制御することが必要である。このとき制御するパラメータとその最適値が成形良品条件である。

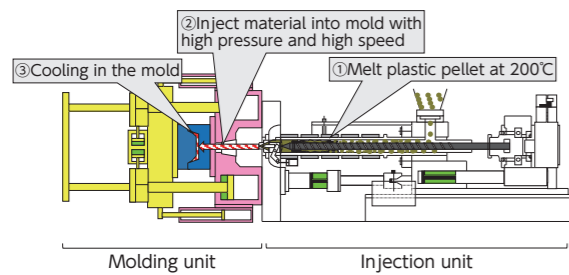


図2 バンパー射出成形プロセス概要  
Fig.2 Bumper injection molding process

成形工程では過去から継続して良品条件の確立に取り組んできた。初期は知見者のカンコツにより決定していたが、SQC手法やビッグデータ分析を活用した良品条件算出が可能となり、バンパー品質は従来から飛躍的に向上した。しかしながら、確立した良品条件(固定の制御パラメータ設定値)で生産していても現場で日々生じる様々な環境変化により、年間を通して見ると品質はばらついており、安定して良品をつくり続けるには至っていない。これを実現するためには、その時々々の環境変化に応じて制御パラメータを最適に調整する必要があるが、高温・高圧・高速下で行われる複雑な射出成形現象を正確に捉え、不良品が発生する前に良品条件を導き出すことは人の能力だけでは困難な域に達している。

### 3 開発のねらい

本取り組みでは、工程環境や設備のデータから変化を察知し、その変化に応じてAIが成形機の最適な制御パラメータ設定値を算出して成形機に自動フィードバックすることで、良品バンパーをつくり続けられるシステムの構築を目指す。

以下が本開発で取り組んだ主な内容である。

- 1) IoTネットワークの構築
  - (1) 品質影響する全データの収集・蓄積
  - (2) センサ実測値サンプリングの高速化
- 2) パラメータ最適値予測AIの構築
  - (1) ホワイトボックスなアルゴリズムの決定
  - (2) AI予測精度の向上
- 3) システム構築
  - (1) AIの実装

### 4 IoTネットワークの構築

#### 4.1 品質影響する全データの収集・蓄積

成形工程で収集するデータは、成形機と金型に

取り付けられたセンサ実測値、成形機の制御パラメータ設定値、および温度・湿度等の環境計測値である。センサ実測値とパラメータ設定値は、成形機PLCと汎用的なデータ収集PLCをLANで接続してプログラムを作成し、生産シリアルナンバーと紐付けて収集した。環境計測値は、当社DX推進部が開発した環境データ計測装置をイーサネット回線に接続し、5分間隔で工程環境データを収集した。環境計測値と生産シリアルナンバーの紐付けは、計測時刻と最も近い生産シリアルナンバーを割付ける仕組みを構築することで可能にしている。このようにして、すべてのデータを生産シリアルナンバーと紐付けて収集可能な工程IoTネットワークを構築した。また、収集したデータの蓄積環境をクラウド上に構築し、過去に遡ったデータ分析や、後述するAI学習を行えるようにした。

#### 4.2 センサ実測値サンプリングの高速化

約2秒で金型内に樹脂を充填する高速プロセスを観測するためには、経験的に50msec毎にセンサ実測値を計測することが求められる。これを可能にするには、1秒間に20回(サンプリングレート20Hz)の一定間隔でセンサ実測値を収集する装置が必要になる。対象の成形機では、収集装置が、人が見る監視用データと成形機制御用データの2種類をサンプリングしている。これらはそれぞれ成形機に付属のPCとPLCに送信されるが、PCのデータは50msec一定間隔であるのに対し、PLCのデータは500~1000msecの不規則な間隔になっていることが判明した。工程データを生産シリアルナンバーと紐付けて収集するためにはPLCを介してデータを取得する必要があるが、概念検証の段階でのデータは分析に不適切であることがわかった。50msec一定間隔のデータサンプリングが可能かつ対象成形機に適合する収集装置を探し求めた結果、最小限の設備改造で要求機能を満たす機器を発見することができた。その後、号口稼働を考慮した計画を立てて成形機を改造し、理想的なIoTネットワークを完成させた。

### 5 パラメータ最適値予測AIの構築

#### 5.1 ホワイトボックスなアルゴリズムの決定

前述したように成形機制御パラメータの最適値は、従来は人が検討して決定していた。その際、図3に示すように良品と不良品のセンサ実測波形を

比較し、不良品の波形が良品の波形(理想波形)に戻るよう制御パラメータ設定値を調整する。しかし、現実的には大量のデータの交互作用や背反事象等を同時に考慮して最適な制御パラメータ設定値を決定するのは人の能力では不可能である。その一方で、このような人と同じ思考ロジックを持ったAIが構築できれば、成形固有技術に基づいた制御パラメータ設定値の予測が可能になると考え、AIインテグレーター企業と協業してAI開発に取り組んだ。AI構築において、まず制御パラメータ設定値を複数水準用意し、設定値とその設定値で成形したセンサ実測値を収集した。その後、設定値の変更量と実測値の変化量の因果関係を最適なアルゴリズムを用いて学習した。アルゴリズムの選定は、複数のアルゴリズムを比較検証し、高い予測精度と予測結果のホワイトボックス性を両立できる勾配ブースティング決定木のひとつであるXGBoostを採用した。

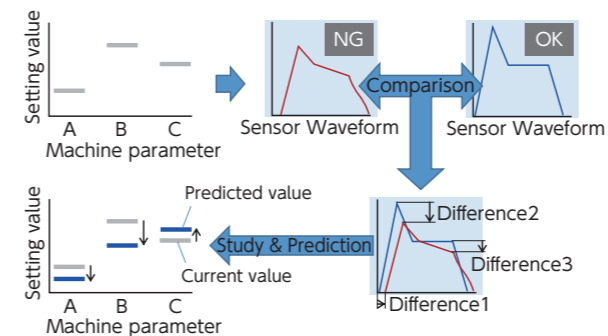


図3 制御パラメータ設定値の調整プロセス  
Fig.3 Adjusting process of control parameters

#### 5.2 AI予測精度の向上

AIが予測した制御パラメータで成形機を稼働するためには、少なくとも人間同等の確からしさが必要である。まずAI精度を定量的に評価するための評価方法と指標を確立した。評価は、学習には用いなかった10パターンの未知のテストデータを使ってAIに制御パラメータ設定値を予測させ、正解値と予測値の差を比較する方法で行った。指標には10回のテストにおける予測誤差率を1から引いた予測精度値(式1)および、予測誤差率の標準偏差(式2)を用いた。

$$\text{予測精度値} = 1 - \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{(式1)}$$

$$\text{標準偏差 } \sigma(X) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{(式2)}$$

N: 予測データ個数  
y: 正解値  
 $\hat{y}$ : 予測値

開発初期の精度指標は目標に大幅未達であったが、AI学習に用いる目的変数と特徴量の最適化、データ前処理方法の工夫により、予測精度値および標準偏差ともに目標を達成することができた(図4a、図4b)。

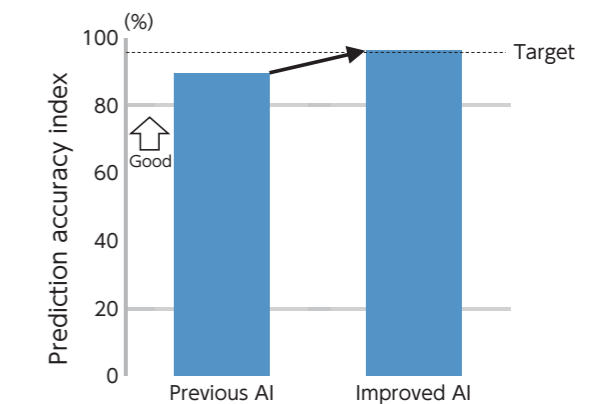


図4a AI予測精度値  
Fig.4a Prediction accuracy index of AI

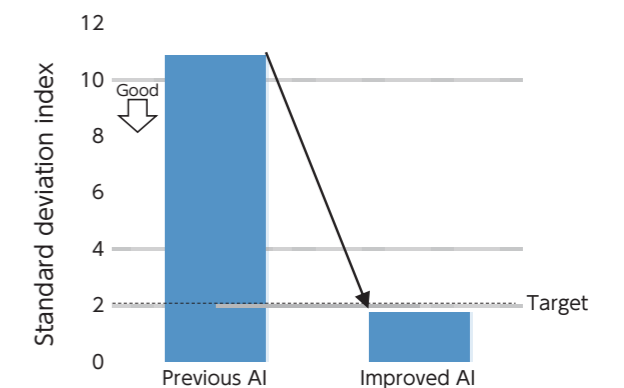


図4b AI予測精度の標準偏差  
Fig.4b Standard deviation index of AI prediction accuracy

特に難しかったのは時間に関する制御パラメータの予測である。先述の通り、射出成形は極めて高速なプロセスであるため、学習に用いるデータにおいて、すべてのセンサの時間軸が正確に揃っている必要がある。時間軸がわずかでもズレたデータではAI精度が低下し、予測誤差が大きくなることが判明した。精度確保のためには、学習に用いるすべてのセンサ実測値の計測開始タイミングを同じにしなければならない。そこで、基準となるセン

サを1つ選定し、その波形のある点をゼロ秒とした新たな時間軸を定義した後、同時に計測した他センサの波形にもこの時間軸を適用する方法を考案し、計測開始タイミングを合わせた。具体的には、金型内への樹脂充填を最初に開始する射出装置内の圧力センサの波形において、20MPaを超えた点をゼロ秒として全波形の時間軸を補正した。当初はサンプリングレートと同じ50msec毎のデータのまま時間軸補正を行っていたが、これを10倍の5msec間隔で2点間の線形補間をすることによって高精度の時間軸補正を可能とし、予測精度を大幅に向上することができた(図5)。この補正方法は、次項で説明するシステムにデータ前処理として実装し、実際の生産で収集したセンサ実測値データに対しても行われる。

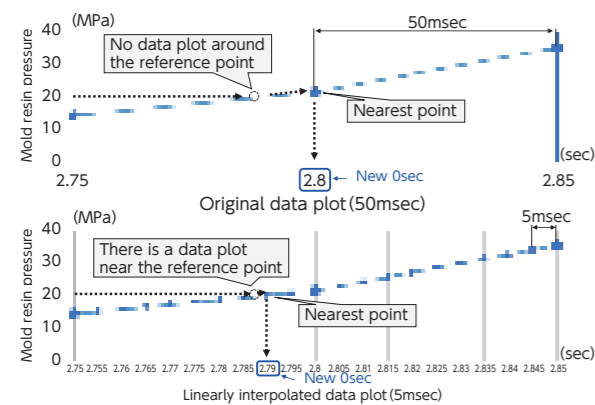


図5 5msec線形補間による時間軸補正  
Fig.5 Time axis correction by 5msec linearly interpolated

## 6 システム構築

### 6.1 AIの実装

予測精度を向上したAIの実装には、当社DX推進部が開発している全社IoT標準基盤GAUDI(以降GAUDI)を活用した。GAUDIはデータを「とる」「ためる」「活用する」「フィードバックする」という4つの要素で構築されているが、すべての要素を使う事例は今回が初めてであり、現場での使い勝手や要求レスポンス等、開発を進めなければ決まらないような仕様が多かった。そこでユーザーとなる製造部門と連携し、アジャイル開発方式で進めた。その結果、生産に連動してリアルタイムにシステム稼働するためにクラウドとエッジに以下7機能を最適構築した。システム構成の概要を図6に示す。

#### 1) 学習機能

蓄積した成形データを学習し、AIを作成

#### 2) シミュレーション機能

AIの量産適用テストを仮想環境で実施

#### 3) 監視機能

センサ実測値を監視し品質良否を判定

#### 4) 予測機能

品質NG時にAIが制御パラメータ設定値を算出

#### 5) 条件フィードバック機能

AI算出値が安全範囲内かチェック

成形機に設定値を自動フィードバック

#### 6) 通知機能

品質判定結果やシステム状態を管理者に通知

#### 7) 配信機能

コンテナファイル\*をシステム端末に配信

\*動作に必要なシステム設定やプログラムをパッキングしたファイル

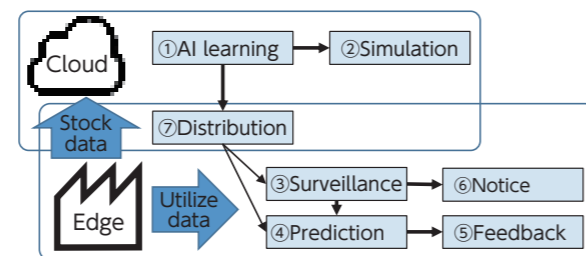


図6 新規構築した7つのシステム機能  
Fig.6 Seven newly constructed system functions

機能構築において工夫した点は主に3つある。1つ目は学習処理の高速化である。量産での運用に求められる学習時間実現のために、クラウド環境のメリットを活かし、GPU搭載の仮想マシンを並列実行(最大100台)する処理方式を採用した。2つ目は運用における利便性の確保である。各機能の処理には独立しているものがあり、当初は処理を個々に実行する必要があったが、これをワンアクションで簡単に実行できるようにした。例えば、学習機能では「学習」→「AIの精度評価」→「コンテナファイル作成」→「システム端末に配信」までが単一操作で完了する。3つ目は全社展開を見据えた汎用性の確保である。各機能への入出力情報のフォーマットを標準化することで、機能の仕様変更や増減、組み換えに容易に対応できるシステム構成とした。

7機能のシステム実装において最大の課題となったのは、生産に連動可能な処理レスポンスの担保である。生産に連動して制御パラメータ設定値を自動フィードバックするには、成形ショットのサイクルタイム以内で予測設定値を成形機に転送する必要があった。しかし、センサ実測値を

50msec毎に収集したデータ容量は大きく、データ前処理に多大な時間を消費しており、従来の技術では監視開始から予測設定値の出力までの時間の要求値20秒を実現することは不可能であった。しかし、開発の早い段階からクラウドサービスの提供企業と共同で高速データ通信を可能にする技術開発に並行して取り組んでおり、これをシステムに織り込むことで5秒以内という超短時間で予測値出力を可能にした(図7)。

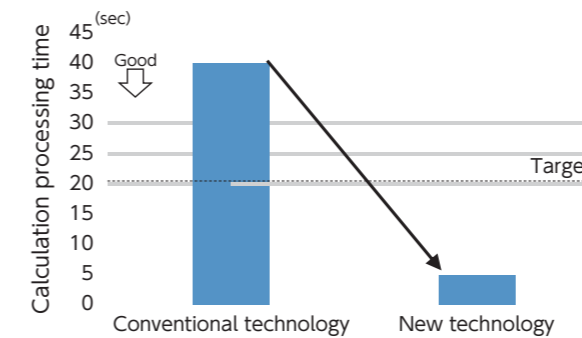


図7 監視開始から予測設定値出力の計算処理時間  
Fig.7 Calculation processing time of predicted set value output from the start of monitoring

## 7 まとめ

過去から生産技術部が蓄積してきたものづくりノウハウやSQC活用によるデータ分析力に、社内外のデータサイエンスと情報システムの技術を融合させることで、画期的な成形良品条件自動フィードバックシステムを構築することができた。現在、本システムは生産環境下での精度信頼性やシステム堅牢性を評価し、製造部門と協力して量産での本格運用に向けて取り組みを継続している。

### 開発の経緯と開発者の思い

バンパー成形品質は、図面SEや金型検討技術の向上、SQC手法を活用した生産準備段階での品質作り込みのおかげで飛躍的に向上し、現在工程の不良率は極めて低い。しかし1本でも不良品が発生する可能性があれば、検査工程を設けて流出防止を行う必要がある。今回、品質保証レベルを流出防止から発生源対策に引き上げるとともに、100%良品工程という究極の目指す姿を掲げて2016年にスタートした。生産工程でのAI活用は我々の誰もが未経験であったが、各分野の技術力を集結し、着実にステップアップしていくことで結果に結びつけることができた。これは1工程の1設備の取り組みにすぎないが、AIを活用した新たな生産技術の事例をつくることができ、究極の目指す姿に1歩近づけたと感じる。

### 著者紹介



畠山 卓也 小池 洋喜 伊藤 暁子 小浦 祐輝