

機械学習を用いた連続殺菌装置の予測制御

Predictive Control of Continuous Sterilizer Using Machine Learning

●井 原 亮*
Ryo IHARA



連続殺菌装置
Continuous sterilizer unit

飲料水などを製造する連続殺菌装置において、生産中は温度・流量・圧力を管理している。もし管理値を逸脱すれば生産を中断し、装置内の製品液は廃棄して装置を洗浄しなければならないため、装置の安定性向上に対するニーズは高い。温度・流量・圧力は、相互に影響し合うなかで目標設定値に安定させるためのループ制御をしている。しかし、一般的に使用されるPID (Proportional, Integral, Derivative) 制御は、相互影響を考慮しないことから不安定になることがある。

本報では、従来のPID制御に代わり、機械学習を用いた予測制御システムについて報告する。予測制御は、センサデータをもとに応答特性を予測した結果から相互影響を考慮しながら制御することが可能なため、温度・流量・圧力それぞれの安定性の向上が期待できる。また、機械学習により過去の稼働データから予測モデルを学習するので、制御システムの調整が不要となる。加えて、自動で定期的に学習することで予測モデルが最適化され、無駄な動作を低減でき時短や省エネルギー効果も期待できる。

In continuous sterilization systems used for the production of drinking water and similar products, temperature, flow rate, and pressure are monitored and controlled during operation. If any of these parameters deviate from their specified control values, production must be halted, the product liquid inside the equipment must be discarded, and the system must be thoroughly cleaned. As a result, there is a strong demand for improved system stability. Since temperature, flow rate, and pressure influence each other, loop control is employed to stabilize them at their target setpoints. However, the commonly used Proportional-Integral-Derivative (PID) control does not take these mutual interactions into account, which can lead to instability. This report presents a predictive control system utilizing machine learning as an alternative to conventional PID control. Predictive control enables regulation based on forecasted response characteristics derived from sensor data, allowing for control that considers the interdependencies among variables. This approach is expected to improve the stability of temperature, flow rate, and pressure. Moreover, the predictive model is trained using historical operational data, eliminating the need for manual tuning of the control system. Additionally, by implementing automatic periodic learning, the predictive model can be continuously optimized, reducing unnecessary operations and contributing to time savings and energy efficiency.

1 まえがき

株式会社イズミフードマシナリでは、飲料水や調味料など、いわゆる液体食品を生産する装置を製造・販売している。た

例えば、豆や茶葉からコーヒーやお茶を抽出する装置、砂糖や脱脂粉乳などの添加物を混ぜるタンクなどがあるが、このほかに製品液を上流から下流へ流しながら連続で加熱殺菌する連続殺菌装置がある。今回はその連続殺菌装置の予測制御

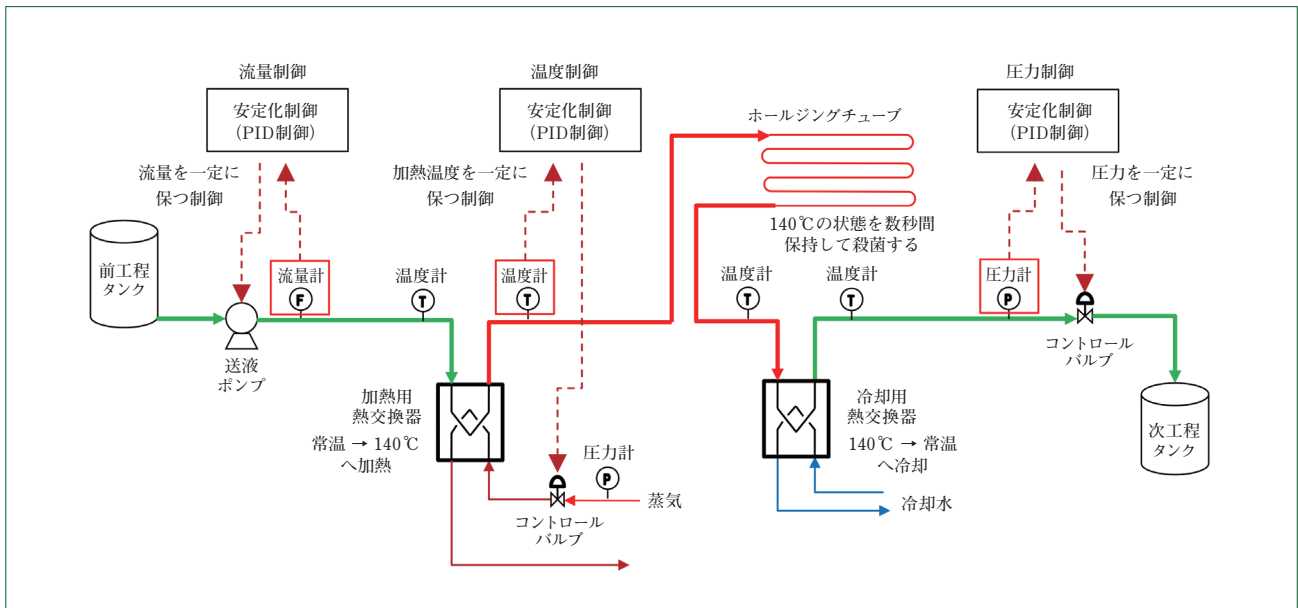


図1 一般的な連続殺菌装置の概要図
Schematic diagram of continuous sterilizer unit

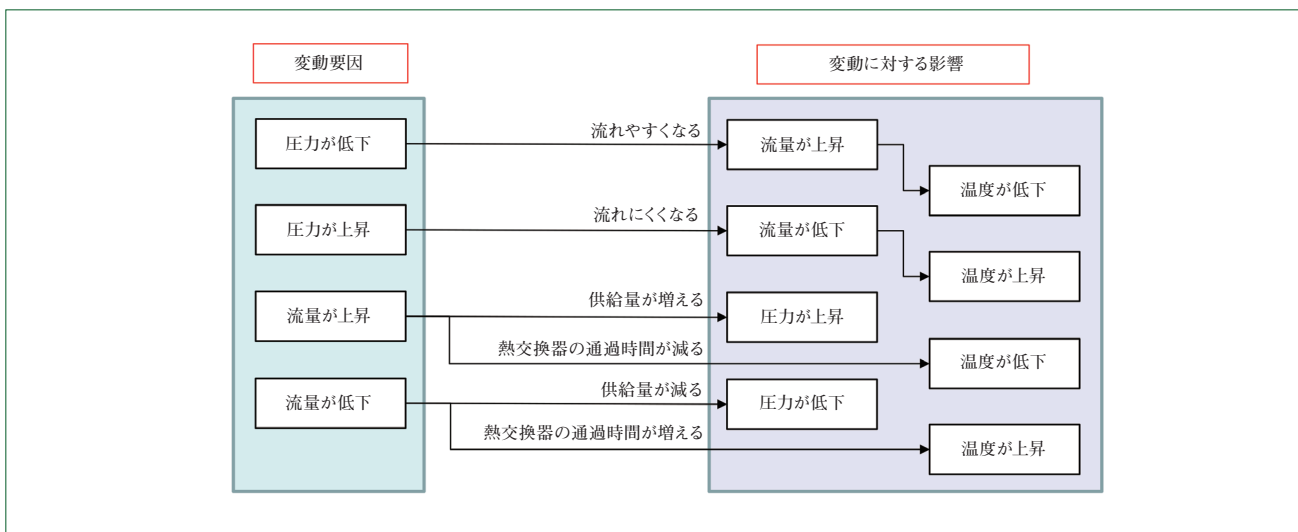


図2 変動要因に対する影響
Impact of variables

について報告する。

連続殺菌装置とは、製品液となる飲料水を熱交換器へ一定速度、一定圧力で送液しながら、温度が140℃程度になるまで加熱・滅菌し、その後常温まで冷却して次工程へ送液する装置である(図1)。

装置の運用においては、まず運転前に装置内部の洗浄と滅菌処理を行い、装置を無菌の状態にしてから運転を開始する。運転中は製品液の温度・流量・圧力を要所ごとに制御盤で常時管理し、装置内の無菌状態と製品品質を保持している。万が一管理値を逸脱してしまうと殺菌不良などの品質不良となり、装置内の製品液はすべて廃棄しなくてはならない。廃棄量は装置の大きさにもよるが、大型のものでは約1500l(500mlペットボトル飲料水の約3千本分)の廃棄となる。さら

に、装置内は品質不良に起因して汚染されたとされ、生産運転を一時停止して装置は再洗浄と再滅菌を行う必要がある。装置の洗浄と滅菌処理には約4時間もかかり、その間は生産ラインが完全に停止してしまう。1時間に約3万本作れる生産ラインの場合は、約12万本の出来高をロスすることとなり、生産に多大な損害を与えることとなる。

このことから、連続殺菌装置において、温度・流量・圧力を常に一定に保つ制御は非常に重要な要素であるといえる。

2 連続殺菌装置の課題

連続殺菌装置において、温度・流量・圧力の変動は互いに影響を与える(図2)。装置内の圧力が低下すると流体が流れやすくなるので流量が増え、逆に圧力が上昇すると流体が流

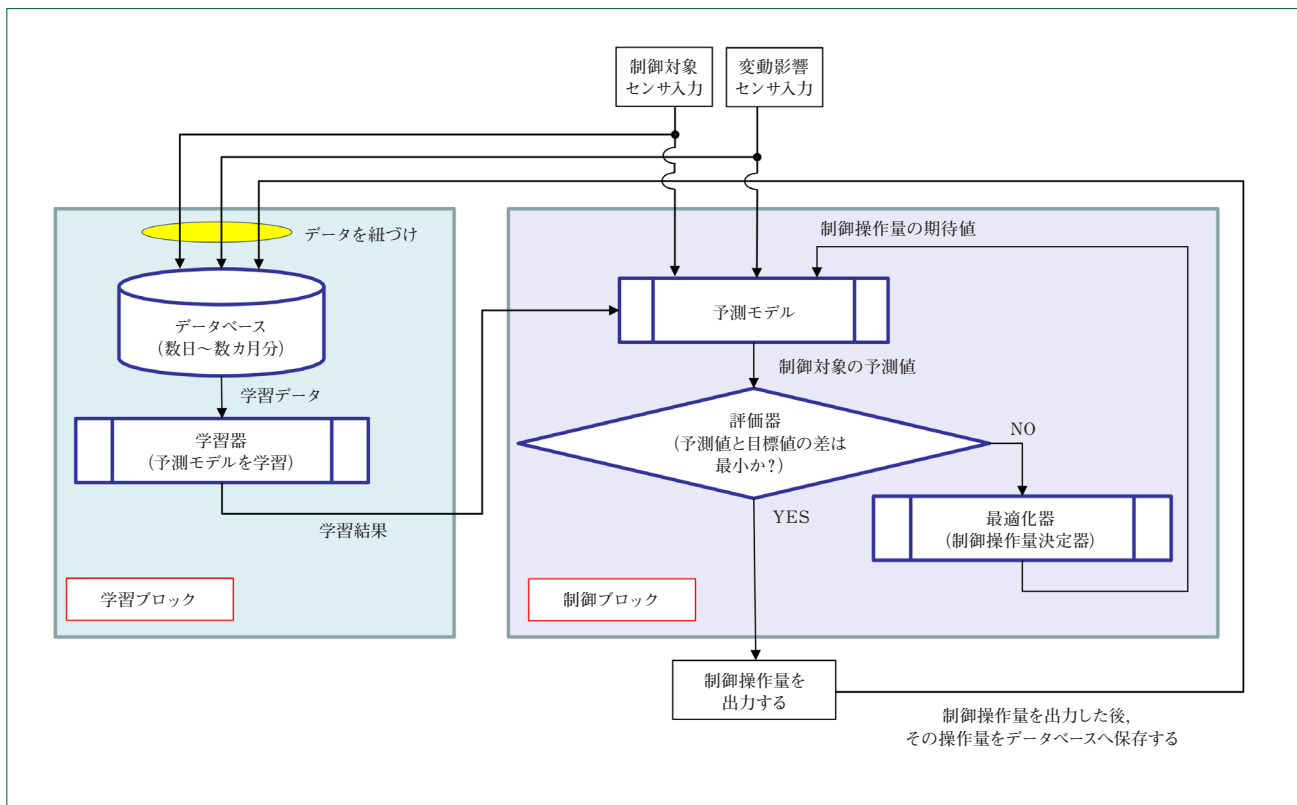


図3 予測制御システムのフローチャート図
Flowchart diagram of predictive control system

れにくくなり流量が減少する。つまり圧力の安定化制御には流量を一定に保つ必要があり、流量の安定化制御には圧力を一定に保つ必要がある。流量と圧力のバランスが崩れ始めると互いに制御が交錯し合い不安定になってしまう。さらに流量の変動に影響して温度も安定を保てなくなる。

既存の連続殺菌装置では、安定化ループ制御に指示調節計によるPID制御を使うことが一般的である。PID制御とは、安定化対象の測定値と安定化目標値の差分値から比例 (Proportional)、積分 (Integral)、微分 (Derivative) の計算値を足し合わせて制御操作量を求める方式である。このPID制御は、製造現場では主流の方法として信頼と実績があり、さらに計算が単純なことから装置のコストを抑えることができるというメリットもある。しかし、対象値と目標値の差分値から計算するため、対象値以外の入力数を増やすことができない。つまり、安定化対象の測定値以外のセンサで外乱変動要因を検出できたとしても、それを安定化制御に生かすことができないというデメリットがある。また、PID制御のパラメータ調整は、エンジニアの経験や勘で行われることが多く、現場でオペレータが調整するのは難しいというのが現状である。

3 予測制御システム

3.1 予測制御システムの概要

入力数を増やす制御手段として、モデル制御 (MPC制御: Model Predictive Control)⁽¹⁾を採用する。MPC制御とは制御

対象の応答特性、いわゆる振る舞いを予測して、その結果から予測値と目標値が一致するように、制御操作量の最適化を行う制御方法である。MPC制御には入力数および出力数に制限がなく、各入力を考慮した制御が可能である。このことから、変動要因をセンサなどで検出したときに、その後の振る舞いを予測して先読み制御させることが可能で、今回のターゲットである連続殺菌装置のように2つ以上の制御が影響し合う装置の場合に、それぞれの制御対象を協調させて制御することができるというメリットがある。

一方で、制御対象の振る舞いを予測するために予測モデルの構築が必要となることがデメリットとして挙げられる。この予測モデルには複雑な計算をするプログラムが必要で、構築には専門知識を持つエンジニアが求められる。また、制御対象の振る舞いが少しでも変化すると予測モデルの再調整が必要となるので管理が難しく、現場での調整は現実的ではない。

そこで、このデメリットを解決する手段として挙げられるのが、機械学習を用いて過去の稼働データから学習し、高い柔軟性を持つ予測モデルを採用することである。この予測モデルは、初期パラメータの調整を除き、これまでに装置が稼働したデータを用いて定期的に学習させることで最適化され、パラメータの調整が不要な予測制御システムとして最適状態を半永久的に維持することができる。

3.2 予測制御システムのアルゴリズム

予測制御システム (図3) は、学習ブロックと制御ブロック

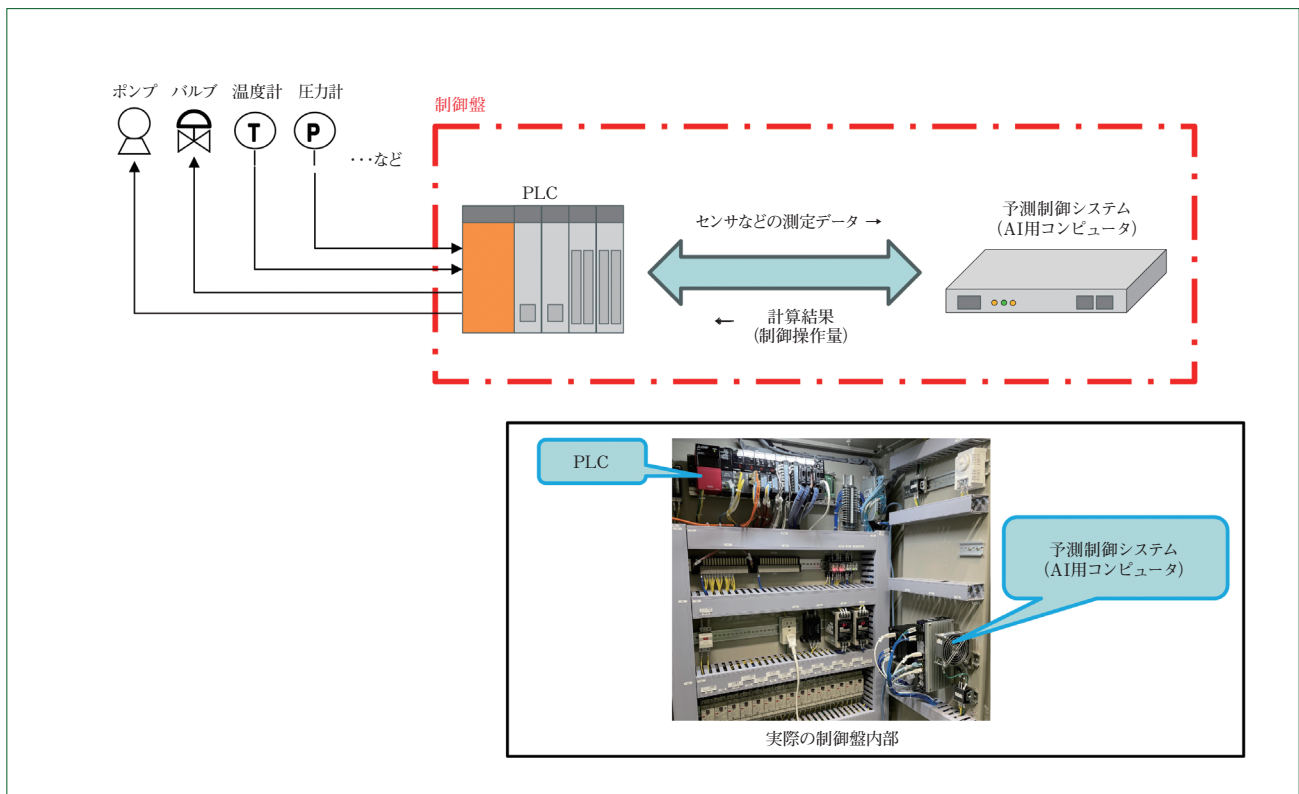


図4 予測制御システムの実装方法
Implementing a predictive control system

の2つのブロックで構成され、学習ブロックには学習のもととなるデータベースと、予測モデルを学習させるための学習器が備わっている。また、制御ブロックには予測モデル、最適化器および評価器が備わっている。学習ブロックと制御ブロックは、同時に処理させることができる。

学習ブロックでは、過去の数日から数カ月に及ぶ膨大な制御対象センサ値と、変動影響センサ値を紐づけたかたちでデータベースに蓄積する。このとき、制御操作量も紐づけたかたちで保存しておく。次に学習器では、データベース内に保存されている膨大なデータを用い、予測モデルを学習する。これは装置の仕様にもよるが、1日に1～2回の頻度で自動的に行われる。この学習では、温度・流量・圧力などの装置の応答特性を予測モデルに学習させて未来の状態を予測することが可能である。また、制御操作量を紐づけて学習することで、後述する制御操作量の期待値に対する応答特性も予測できる。予測の精度は過去に学習したデータが多いほど向上するため、装置を稼働させた分だけ予測精度が向上することが期待できる。

制御ブロックでは、まず予測モデルに制御対象のセンサ値を入力し、合わせて変動影響に関係するセンサ値を入力する。このとき、影響センサ値は1つに限らず、複数を入力することができる。たとえば制御対象が温度の場合は、変動影響に関係する流量のほか、加熱前の温度や、蒸気などの加熱媒体の圧力・量を計測するセンサ値を入力して、変動影響を考慮することができる。さらに、制御操作量を予測した値、い

わゆる制御操作量の期待値を入力する。この制御操作量期待値の初期値は、その時点で出力している制御操作量を仮にセットしておく。

予測モデルでは制御対象センサ値、変動影響センサ値および制御操作量期待値の3つの入力から、制御対象の応答特性を予測する。次に、評価器で制御対象の予測結果と目標値の差を評価して、差が最小であるかを判断する。最小でないと判断した場合、最適化器で制御操作量期待値を加算もしくは減算して、最適と思われる値へ更新した後、再度予測モデルへ入力して制御対象の応答特性を予測する。この動作を繰り返し、制御操作量期待値を最適化していく。一方で評価器が最小であると判断したときは、最適化された制御操作量期待値を制御操作量に更新して制御対象センサへ出力する。

この動作を一定周期でリアルタイムに繰り返すことにより、常に安定を保つことができるようになる。本システムでは、1秒間に4回の周期で制御操作量を最適値に更新して出力している。

3.3 予測制御システムの実装方法(図4)

殺菌装置の制御盤内にはPLC (Programmable Logic Controller) が設置されている。PLCには、装置の工程ごとの各制御目標値があらかじめ設定されており、装置全体の運転制御を担いながら各種センサ値を入力して、インターロックを管理しつつバルブ開度やポンプ速度などを操作している。

予測制御システムは専用のAI用コンピュータ内で動作し、

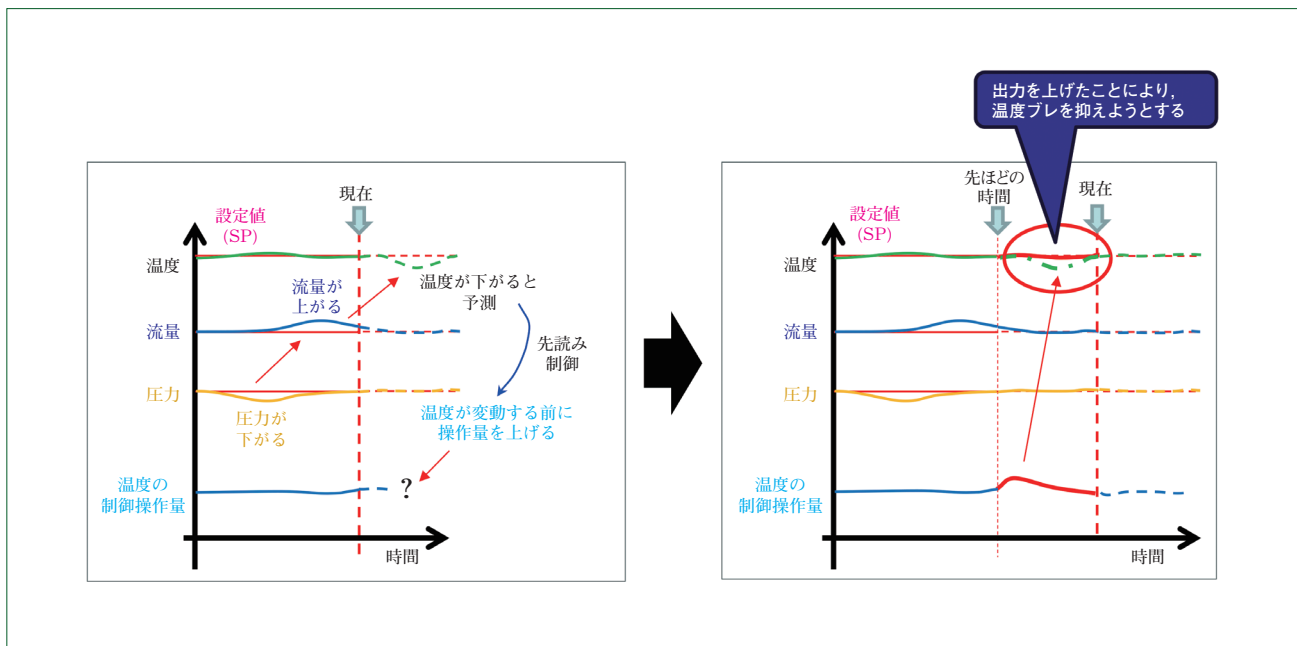


図5 外乱影響に対する安定性の向上
Improved stability against disturbance effects

PLCとEthernet通信で接続される。PLCは、各種センサの情報や各制御目標値を予測制御システムへ送信し、予測制御システム内で安定化制御の計算を行い、制御操作量をPLCへ返す。PLCは返された制御操作量にもとづいて、バルブ開度やポンプ速度を操作する。この動作を繰り返すことにより、安定化ループ制御の動作が可能となる。

4 予測制御システム導入による効果

4.1 外乱影響に対する安定性の向上(図5)

予測制御システムは、外乱影響の変動などを考慮しながら30秒先、60秒先の変化を予測し、予測した結果から安定化制御をする。たとえば圧力が下がり流れやすくなったことで流量が上がってしまったとする。流量が上がると熱交換器での加熱時間が減り、結果として温度が下がってしまうことが予想される(図5左)。このようなときに予測制御システムでは温度が下がることを予測できるので、制御操作量を上げて温度が下がらないように対処することができる(図5右)。これにより、従来では温度ブレが生じていた事例でもブレを抑えて製品品質を担保し、安定した生産を実現することが可能となる。

4.2 学習による最適化と時短や省エネルギー効果(図6)

実際の装置で従来のPID制御と予測制御で温度のみを加熱制御したときの結果をグラフに示す。PID制御では設定値に到達するまでにオーバーシュートした部分も含めて、約90秒かかっている(図6左上)が、約1カ月間学習させた予測制御では70秒ほどで設定値に到達している(図6中央上)。さらに6カ月間学習させた予測制御では、動作が最適化されており約55秒で設定値に到達している(図6右上)。この結果から、装置を稼働させれば学習して最適化され、さら

に学習が進めばより効果が発揮されると推測できる。この結果から到達時間が早いと、より早く次の工程へ進むことができるので時間短縮となり、その間のエネルギーを削減することができる。

図6下のグラフ3点は、加熱熱媒である蒸気の使用量を示している。制御が最適化され時短が進んだ結果、装置の規模や仕様によって効果の程度は変わるが、この装置ではPID制御で約16.5kg必要だった蒸気使用量が、予測制御では約6.6kgまで60%削減することに成功した。加熱時や工程変化時のこのような動きは1日の生産運転を通して数十回程度だが、この20~40秒の時短が積み重なり、1カ月~1年を通せば一定の省エネルギー効果が期待できると考える。

5 予測制御システムの課題と今後の展望

本システムは、機械学習により日々蓄積された膨大な稼働データから学習して最適化する仕組みだが、新規に設置した装置や大幅な改造を施した装置など、有効な学習データが十分に蓄積されていない状態では期待した制御ができずに不安定となる。この点を解消するために、現状では従来のPID制御システムを予測制御システムと合わせて実装し、学習データが十分に蓄積するまでの期間はPID制御をある程度動作をさせる必要がある。つまり、PID制御の振る舞いを予測制御システムに真似させるというイメージである。学習データが十分に蓄積された後に予測制御システムへ切り替えるため、装置の立ち上げには2種類の制御方法を個別に調整する必要があり、従来の方法より多くの時間を要する。

今後これを解決するには、新規の装置を導入する際に学習済みのシステムをあらかじめ準備できるような仕組みを確立させなければならない。その1つの方法として、装置の仕様

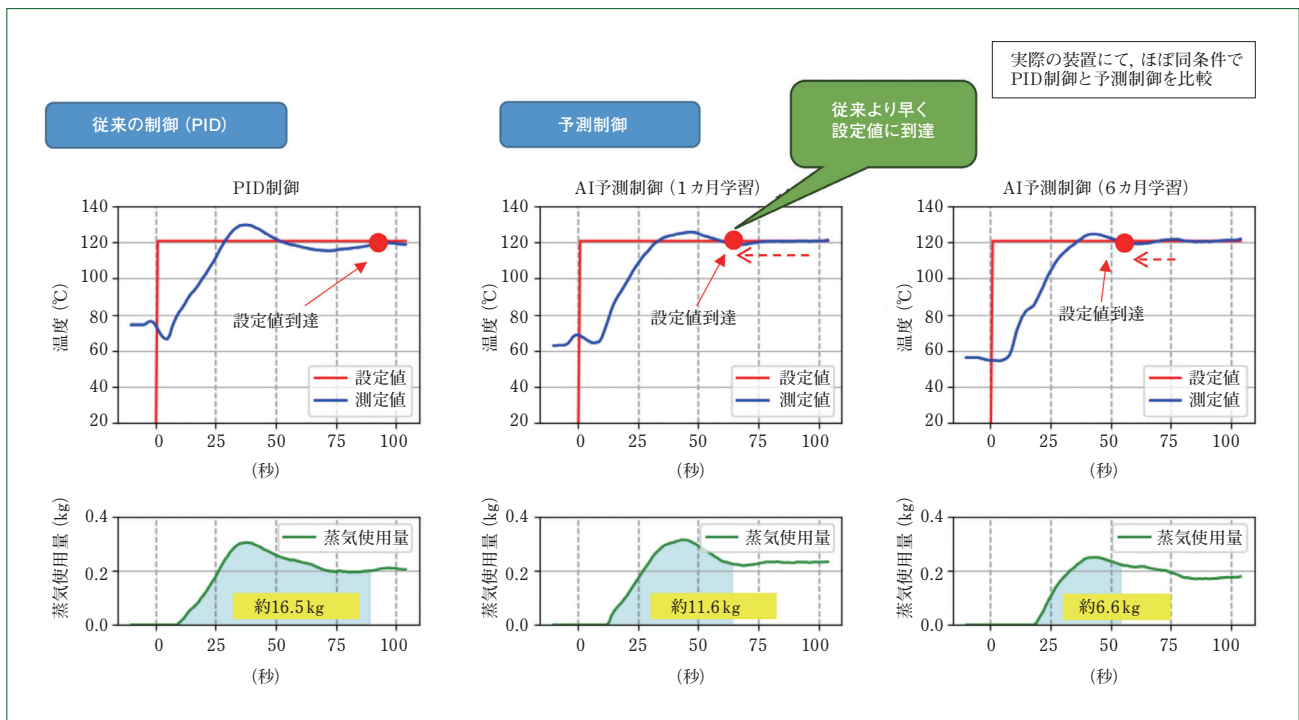


図6 学習による最適化と、時短、省エネ効果
Optimization through learning, time saving, and energy saving effects

や熱交換器の動特性をコンピュータ上でシミュレートすることができれば、強化学習などの手法を用いて学習させることができるのではないかと考える。この実現にはシミュレータを開発することや、異なる仕様の装置でさらなる導入実績を積み重ね、多くのデータを収集することが必要である。

予測制御システムを動作させるコンピュータは、稼働データを収集することを目的として、住友重機械グループ共通基盤プラットフォームSHICuTe⁽²⁾と接続することができる。SHICuTeは独自の閉域通信網とクラウド機能を有し、安全にデータ収集ができるプラットフォームである。SHICuTeと接続することにより、すでに導入した装置の日々の稼働データと学習の結果などを記録した各種ログを、定期的に収集・分析することができ、今後の開発に役立てていくことができる。

6 むすび

- (1) 予測制御システムは、制御対象以外の変動要因をセンサが検出したとき、その後の振る舞いを予測して制御することができるため、殺菌装置のような制御が影響し合う装置では、協調して制御できるというメリットがある。
- (2) 機械学習を用いることで、定期的に予測モデルが最適化されて制御の精度が向上することから、時短や省エネルギーの効果が期待できる。
- (3) 学習データが蓄積されていない新規の装置などの場合は、期待通りの制御ができず、従来のPID制御で装置を稼働させて学習させなければならないという課題

が残されているが、これは今後開発を重ねて解決していく。

(参考文献)

- (1) 足立修一, モデル予測制御の基礎, 日本ロボット学会, 32-6 (2014), 499-502.
- (2) 明渡豊, 村上憲司, 住友重機械グループ共通基盤プラットフォーム SHICuTe, 住友重機械技報, 209(2023), 1-4.

※「SHICuTe」は、住友重機械工業株式会社の登録商標です。