

ガス化溶融炉の簡易モデル予測制御

Simplified Model Predictive Control System for Gasification and Melting Furnaces



皆川公司*
Koji Minakawa



細田博之*
Hiroyuki Hosoda



下梨 孝**
Takashi Shimonashi



友近信行***
Nobuyuki Tomochika

ガス化溶融プロセスに存在するむだ時間や操作量の干渉の問題を解決するために、多変数モデル予測制御を核とした制御系の開発を推進してきた。この多変数モデル予測制御により制御性は格段に改善され、プラントの運転の安定性が向上することを確認しているが、^{1, 2)} 多変数モデル予測制御系の設計・調整には専門知識や経験を要するという解決すべき課題があった。

これらの課題を解決すべく、制御系を1入力1出力の簡易型とし、モデリングツールを活用して予測モデルの作成を容易にしたり、モデルの作成時に先験的知識を事前に反映するなどの改善をおこなった。その結果、制御に関する高度な専門知識がなくても迅速にモデル予測制御手法を実機に適用することが可能となり、低コストで高品質な制御が提供できるようになった。

A new simplified model predictive control system, using single-input and single-output model, is developed in order to cut down leading time in implementing into control systems of gasification and melting furnaces. Supporting tools for system identification are also developed, so that the characteristics of the furnace can be modeled by an identification technique using prior knowledge of system behavior. The new system is applied to an actual furnace of 103ton/day capacity, and with carefully choosing parameters, the system proved to have similar stability and effectiveness as the conventional multi-input/output model predictive control system. The leading time of implementation was reduced to one month including evaluation period, which is significantly shorter than that of the conventional system.

Key Words :

廃棄物処理
都市ごみ
ガス化溶融
モデル予測制御

Waste treatment
Municipal solid waste (MSW)
Gasification and melting
Model predictive control system

【セールスポイント】

制御技術に関する高度な専門知識がなくても迅速にモデル予測制御手法を実機に適用することが可能となり、低コストで高品質な制御が提供できる。

まえがき

ガス化溶融炉は、その開発から10年以上が経過し、全国各地で商業施設が稼働するスタンダードな都市ごみ処理方式の一つに成長した。当社のガス化溶融炉についても、全国で9施設が商業施設として稼働中であり、2施設が建設中という状況にある。

ガス化溶融炉は、図1に示すとおりごみのガス化、燃焼、溶融処理を一貫しておこなうプロセスであり、特に溶融炉の温度をいかに安定に保つかということが重要になってくる。そのため、ごみの供給量（供給熱量）をどう安定させるかが課題となり、各社さまざまな制御を導入し運転の安定化に努めている。

当社においては、給じん外乱（ごみの量や質の変動など）の影響を抑制でき、むだ時間と操作量の干渉に有効な多変数モデル予測制御を適用して、施設の安定運転に有効であることを確認してきた。^{1, 2)}ただし、多変数モデル予測制御系は、その導入に高度な専門知識や経験が必要となり、モデリングや調整に試行錯誤を要するという改善すべき課題があった。

これらの課題を解決するために、制御系を1入力1出力の簡易型とし、モデリングツールを活用して

予測モデルの作成を容易にしたり、モデルの作成時に先験的知識を事前に反映するなどの改善をおこなった。その結果、制御に関する高度な専門知識がなくても迅速にモデル予測制御手法を実機に適用することが可能になり、低コストで高品質な制御が提供できるようになった。

本制御を新設および既設のプラントに導入することで、運転の安定化による空気比の削減や中央制御室での運転監視の負荷軽減などの改善効果が期待できる。また、今回はガス化溶融炉の蒸気-給じん系を対象に制御を適用したが、それ以外の制御系にも対象を広げていきたい。

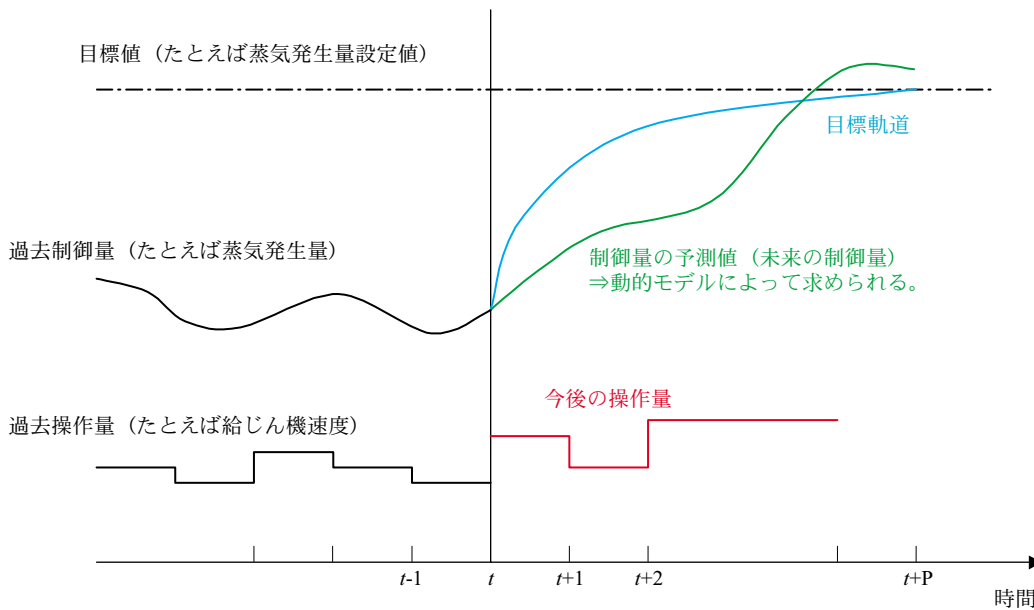
1. モデル予測制御

1.1 モデル予測制御の概要

産業界で古くから使用されている制御手法のひとつにPID制御がある。PID制御は、比例（P）動作、積分（I）動作、微分（D）動作を利用することで、制御量と目標値の偏差をもとに操作量をフィードバック制御している。しかし、操作量の変化が制御量にすぐに反映されない系（むだ時間が存在する系）においては、そもそも制御量と目標値に偏差が発生するまで時間がかかることから、PID制御などのフィー



図1 流動床式ガス化溶融炉



この評価関数 J を最小化するように操作量を求める。

$$J = \sum \{ \alpha (\text{予測値} - \text{目標軌道})^2 + \beta (\Delta \text{操作量})^2 \} \quad (\alpha, \beta \text{ は重み係数})$$

予測値と目標軌道の差異
操作量の大幅な変更を防止するために追加される項

図2 モデル予測制御の概念図

ドバック制御手法では十分な制御性能をえることは困難である。

一方、モデル予測制御は、図2に示すように、プロセスの動的モデルに基づいて未来の制御量の変化を予測し、求めた制御量の予測値と制御量の目標値ができるだけ近づくよう操作量を決定する手法である。

これは、車に乗っていてカーブに差し掛かった時に例えると、「これくらいのスピードの場合、これくらいハンドルを切ればこのように車の進行方向は変化する：プロセスの動的モデル」に基づいて、「このままハンドルを変化させなければどういった進行方向になるか：制御量の予測値」と「カーブを曲がるためにはどういった進行方向にすればよいか：制御量の目標軌道」との偏差から、「現時点でどの程度ハンドルを切ればよいか決定する：操作量の決定」という手続きをおこなうことに相当する。このように、モデル予測制御の基本的な概念は理解しやすい。³⁾

以下モデル予測制御をガス化溶融炉の制御に導入する過程について説明する。

1.2 モデル予測制御の構築の手順

モデル予測制御を構築するには一般的に次の作業が必要になる。

- (1) 操作量，制御量の決定
何（制御量）を何（操作量）によって制御するか決定する。
- (2) 制御対象の同定実験
操作上許される範囲内で同定入力をステップ状あるいはランダムに変化させ、制御対象の動特性に関する基礎データを収集する。
- (3) 予測モデルの作成
同定実験によってえられたデータをもちいて制御対象の伝達関数を求める。
- (4) 予測モデルの実装
同定した予測モデルのパラメータをモデル予測制御システムに実装する。
- (5) 制御パラメータの調整
制御ゲインを決定する制御パラメータ（図2の式の α, β ）や参照軌道などを調整する。必要に応じて予測モデルを見直す。

1.3 モデル予測制御の実機適用における課題

多変数モデル予測制御系は安定運転に有効であることはすでに確認しているが、モデリングおよび調整に専門知識と経験を要していた。一般的に多入力多出力系の高精度な予測モデルを同定するには専門知識が必要であり、試行錯誤と時間を必要とする。また、変数が多くなると調整すべきパラメータが多くなるため、精細な調整にも知識と経験を必要とする。とくに、制御性能を確認しながら短時間で調整するには熟練が不可欠である。

とくに、今回のガス化溶融炉においては給じん外乱が比較的大きく、プラントの季節特性も踏まえた制御系の構築に数カ月の期間を要するため、プラントの試運転期間内に十分な調整を完了することができない可能性があった。

これらの課題を解決するために、次の対策を講じることで、高精度で信頼性のあるモデルを短期間で構築する技術を確立することができた。

- ① 1入力1出力の簡易型のモデル予測制御とした。
- ② モデリングツール^{注)}を作成することで、制御技術に関する専門知識がなくても取得した入出力データから半自動的にモデリングが可能となった。
- ③ 外乱の大きなデータ、時間の短いデータからでも、高精度で信頼性の高いモデルを作成できるよ

うに、制御対象に対する先験的知識に合致するモデルがえられるようにした(図3)。

注) モデリングツール

モデルを自動的に作成できるソフトで、制御対象に関する先験的知識をモデル作成時に反映させることができるもの。

2. 簡易モデル予測制御

次に、今回開発した簡易モデル予測制御について説明する。実機(103 t/d 炉)に適用し、その効果について確認した。

2.1 1入力1出力系のモデル予測制御

モデル予測制御を導入する上で、「どの制御量をどの操作量で制御するか」を適切に選択することが重要である。これまでは、蒸気発生量、ボイラドラム圧力、ガス化炉砂層温度を制御量とし、給じん機速度、主蒸気弁開度、押込空気量の操作量で制御する3入力3出力の多変数モデル予測制御を基本としていた。これを給じん機速度とその結果がもっとも顕著に表れるボイラの蒸気発生量の1入力1出力系の簡易モデル予測制御とし、それ以外はルールベース制御やPID制御にて対応することで簡略化を図った。図4にシステム構成を示す。

2.2 予測モデルの作成

モデルを作成するため、同定実験により制御対象

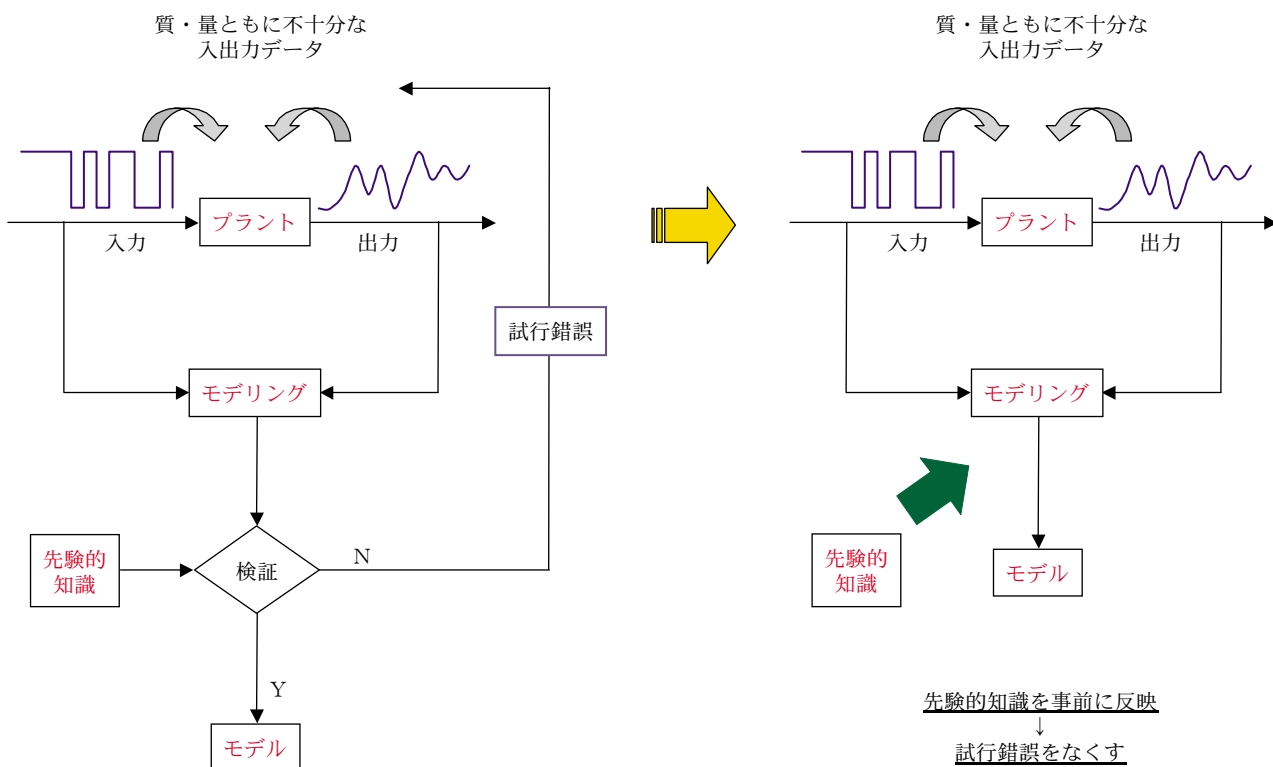
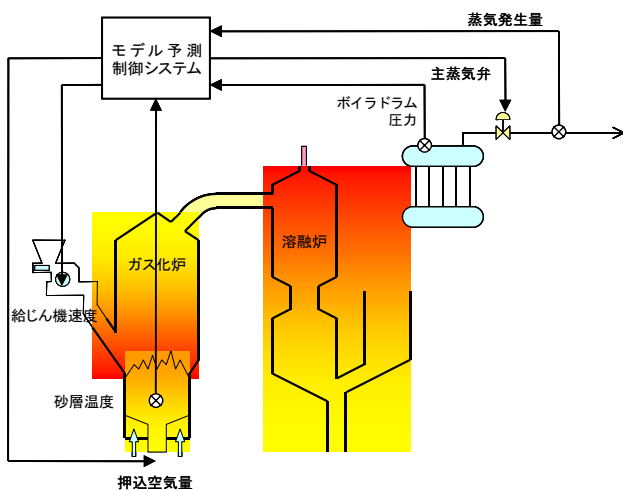
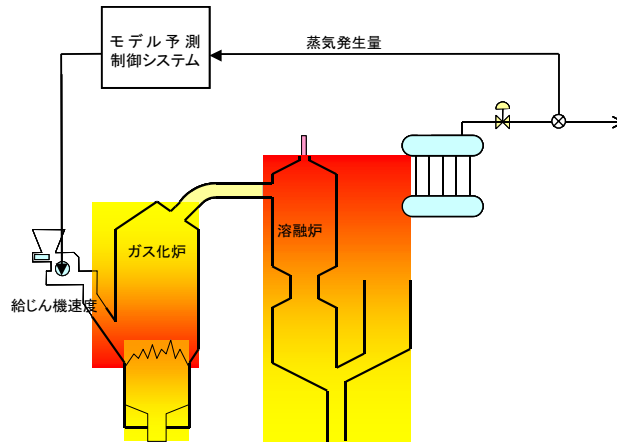


図3 先験的知識の反映



従来:多変数モデル予測制御(3入力3出力)



今回:簡易モデル予測制御(1入力1出力)

図4 制御システム構成

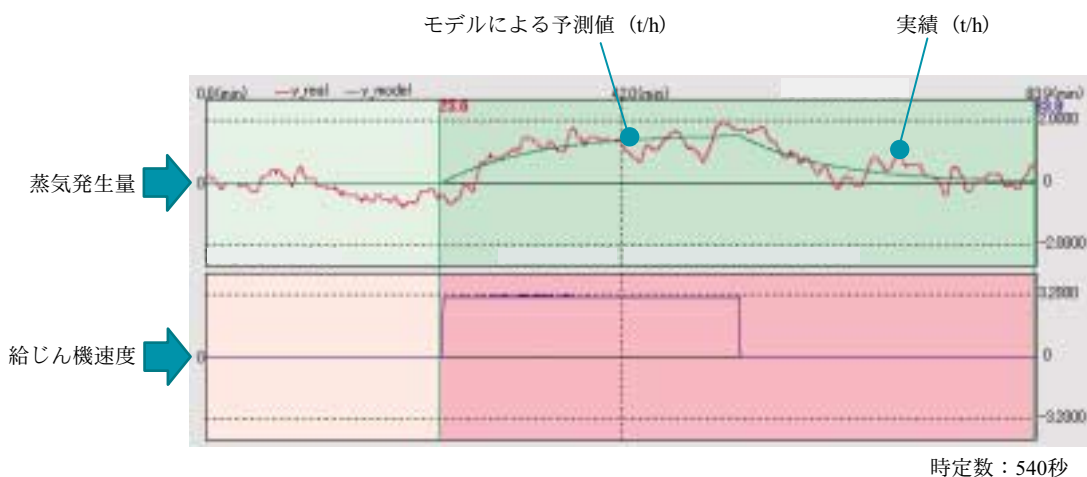


図5 同定実験結果の一例

の入出力データを取得した。その結果を図5に示す。給じん機速度（操作量）をステップ状やランダムに操作した場合の蒸気発生量（制御量）の変化データを取得し、これよりモデルを作成した。モデルの作成はモデリングツールをもちいて実施した。図5には同定実験の結果とあわせて、作成した予測モデルによる予測値を示した。給じん機速度をステップ状に変化させることで蒸気発生量に変化しているが、作成したモデルでその応答を的確に再現することができる。

2.3 実機適用例

103 t/d 炉の実機プラントにおいて簡易モデル予測制御を適用する試験運転を実施した。

2.3.1 制御系の構築に要する期間

簡易モデル予測制御導入の目的の一つに調整期間の短縮がある。従来の多変数モデル予測制御は、制

御の専門知識を有した専門員が試行錯誤を繰り返し精細に調整してきたが、今回は専門員の指導を受けながら制御に関する高度な専門知識のない担当者がモデルの作成から運転の調整までを実施した。

導入に要した期間は図6に示すとおりで、実質1カ月に満たない期間で調整ができています。従来は専門員が制御の設計・調整に数カ月かけて実施していたことと比較すると、かなりの改善効果が見られる。これまでの課題であった専門性および調整期間の問題が解消されたことから、実機への適用が容易になった。今後必要になると想定されるプラントの季節特性などを踏まえた調整に対しても、調整が容易になったことで短期間で調整できると考える。

2.3.2 制御性の改善

簡易モデル予測制御を実機に適用して運転した結果を図7に示す。PID制御は給じん機速度が大きく

08年度							
	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
同定実験 データ取得	→ 3日						
モデリング		→ 2日	→ 2日				
制御パラメータ の調整		→ 4日	→ 5日				
運用開始					→		

図6 制御調整に要した期間

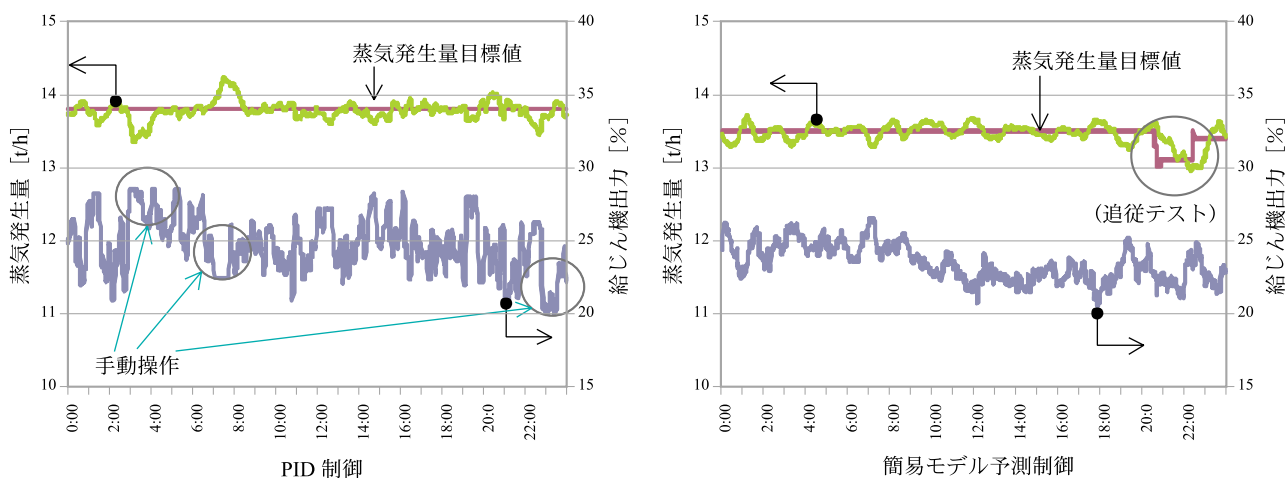


図7 制御性の改善

変化しているが、モデル予測制御ではそれが改善されている。その結果、時々必要であった給じん量の過不足により運転員が給じん機を直接操作する手動介入操作がなくなった。試験期間中に実施した蒸気発生量の目標値変更運転にもよく追従しており、本制御系による変動抑制効果が確認できた。

むすび

従来の多変数モデル予測制御系にかわり1入力1出力を前提とした簡易モデル予測制御系を開発した。簡易モデル予測制御用のモデリングツールを活用するとともに、制御対象に対する先験的知識をモデリングに反映させる機能を設けたことで、制御に関する高度な専門知識がなくてもモデルの作成が可能になるとともに、モデリングやパラメータ調整に要していた時間を大幅に短縮することができた。ステッ

プ応答などの基礎試験が必要であることを除けば従来のPID制御と同じ感覚でパラメータ調整をすることが可能である。

モデル予測制御は、むだ時間のある制御系や操作入りに上下限のある制御対象に効果を発揮する。今後、今回対象としたガス化溶融炉の蒸気—給じん系以外の制御系への適用を検討していきたい。

[参考文献]

- 1) 細田ら：神鋼環境ソリューション技報「モデル予測制御に基づくガス化溶融炉制御システム」, Vol.2(1), p.47-53, (2005)
- 2) 友近ら：システム制御情報学会論文誌「ガス化溶融炉におけるモデル予測制御システムの開発」, Vol.17(8), p.26-36, (2004)
- 3) 大嶋ら：システム／制御／情報「モデル予測制御Ⅰ」, Vol.46(5), p.286-293, (2002)

*商品市場・技術開発センター プロセス技術開発部 廃棄物処理室 **環境プラント事業部 第一技術部 計電装技術室 *** (株)神戸製鋼所 生産システム研究所 制御技術研究室