

(論文)

ガス化溶融炉のモデル予測制御システム

Model Predictive Control for Pyrolytic Gasification and Melting Furnaces



友近信行*

Nobuyuki Tomochika



前田知幸*

Tomoyuki Maeda



中山万希志*(工博)

Dr. Makishi Nakayama



細田博之**

Hiroyuki Hosoda

This paper proposes an automatic operation system based on multivariable model predictive control (MMPC) for pyrolytic gasification and melting furnaces (PGMF) with a boiler. MMPC (specifically manipulating waste feeder speed, a steam control valve and primary air flow) can be used to stabilize boiler drum pressure, steam generation rate, fluidized bed temperature and furnace other conditions. This method was implemented in the first fluidized bed type municipal PGMF in Japan and has been in practical use for more than four years.

まきがき = わが国では年間約 5,000 万トンもの都市ごみを排出しているが、ダイオキシン類問題をはじめとした環境負荷の低減、リサイクルの推進、エネルギーの有効利用などが叫ばれる中、次世代のごみ処理技術としてガス化溶融炉が注目されている。ガス化溶融とは、廃棄物を直接燃焼するのではなく、還元雰囲気中で熱分解ガス化し、発生した可燃ガスを一気に燃焼・高温化し、その熱を利用して焼却残渣を溶融するもので、以下の特長を有する¹⁾。

廃棄物の持つエネルギーを利用して灰の溶融を可能にし、焼却残渣の減容化・再資源化ができる。

低温域かつ還元雰囲気中で熱分解ガス化されるため、廃棄物中の有価金属を元に近い形で回収できる。

処理に必要な空気量が少ないため、排ガス量が少なく、装置をコンパクトにできる。

溶融炉での高温燃焼により、ダイオキシン類などの微量有害物質の抑制が可能である。

高温排ガスからの熱回収によって、熱回収効率を向上することができる。

ガス化溶融炉は、国内では 2000 年に商用運転が開始された非常に新しい設備である。したがって、ガス化溶融炉が本格的に普及するためには、運転方法の確立とともに、運転の自動化が重要となっている。

当社では、これまで、高効率熱回収型流動床式ごみ焼却炉の実証炉において、多変数モデル予測制御技術を用いた制御システムを構築してきた²⁾。さらに、商用稼働中の流動床式ごみ焼却炉において、給塵外乱の影響を考慮した予測モデルと、操作入力のみを用いた予測モデルを組み合わせることによって予測精度を向上させ、実用に耐えうるモデル予測制御システムを開発してきた³⁾⁷⁾。

本報告では、国内初の都市ごみ向け流動床式ガス化溶融施設である中部上北清掃センターにおいて、多変数モ

デル予測制御システムを構築し、早期に運転の自動化を実現した結果について報告する。

1. ガス化溶融炉の概要

制御対象である流動床式ガス化溶融炉の処理フローを図 1 に示す。ホッパに投入されたごみは、給塵機によって炉内に供給され、押込空気により流動化している砂層に取込まれる。ごみは、還元雰囲気中で熱分解ガス化し、ガスやチャーとなって溶融炉へ供給される。溶融炉では、燃焼用空気(ごみ顕熱が不足する場合は重油も使用)によって未燃ガス分が燃焼し、高温雰囲気中で灰分が溶融してスラグを生成し、出滓口より連続排出される。また、ガス化溶融プロセスで発生した熱は下流のボイラによって回収され、蒸気が発生する。ボイラドラム圧力や蒸気発生量は、主蒸気弁によって調節することができる。さらに、排ガスは冷却されたのちバグフィルタで除塵され、煙突から排出される。

さて、ガス化溶融炉においては、ごみの量や性状の突発的変動に対して、炉内各部温度を適切に保ち、発生した熱エネルギーを効率よく回収することが重要である。しかし、本プロセスにはむだ時間が存在し、各操作量から各制御量への干渉が存在する。したがって、1 入力 1 出力のフィードバック制御では制御性能に限界がある。このような制御対象については、多変数モデル予測制御⁴⁾⁵⁾が有効であると考えられる。

2. モデル予測制御系の構成

2.1 モデル予測制御アルゴリズム

モデル予測制御の概念を図 2 に示す。モデル予測制御は、予測モデルを用いて制御量の未来の挙動を予測し、その挙動が参照軌道とできるだけ一致するような操作入力を求め、現サンプル点における操作入力のみ実際に印

*技術開発本部 生産システム研究所 **(株)神鋼環境ソリューション 技術開発本部 プロセス技術開発部

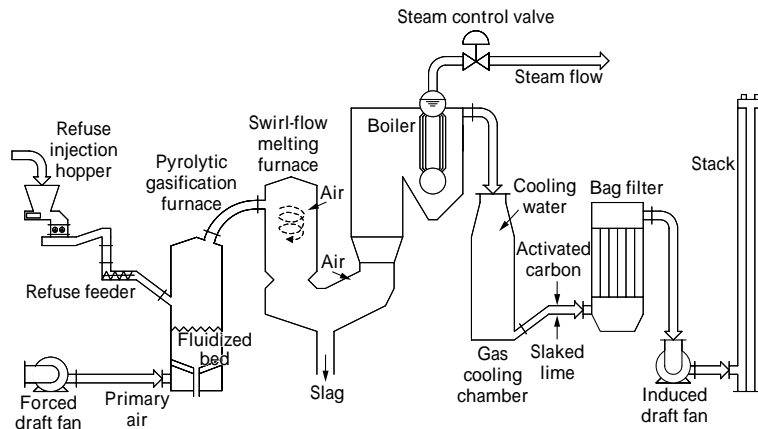


図1 流動床式ガス化溶融炉の処理フロー

Fig. 1 Process flow diagram of fluidized bed pyrolytic gasification and melting furnaces

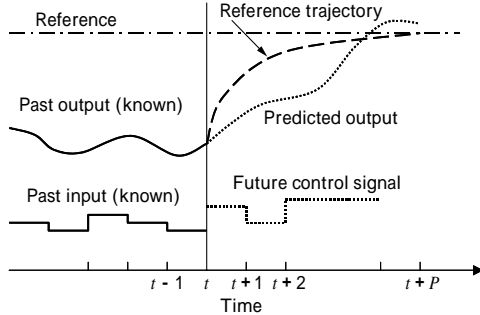


図2 モデル予測制御の概念

Fig. 2 Model predictive control strategy

加し、これらの手続きを各サンプル点ごとに繰返す制御手法である。一般的な特長として、以下のことが挙げられる。

- 制御アルゴリズムの基本的概念が理解しやすい。
- むだ時間系，多変数系に対応できる。
- 操作量の上下限など，制約条件が考慮できる。
- 現場での調整がしやすい。

2.2 予測モデルの同定⁶⁾

制御対象であるガス化溶融プラントに対し，入力応答実験をおこなった。操業上許される範囲内で試験入力をステップ状またはM系列状に変化させた。

採取した各種の入出力データに対し，デシメーション（サンプリング間隔の調整），トレンド除去，正規化などの前処理をおこなった後，部分空間法により多入力多出力モデルを同定した。なお，サンプリングタイムは3秒とした。

モデルの入力は，給塵機回転速度，押込空気流量，蒸気弁開度の三つであり，出力は，ボイラドラム圧力，砂層温度，蒸気発生量の三つである。本モデルをモデルと表記し，モデルによる予測結果と実データを図3に示す。なお，縦軸は，平均値からの偏差を表す。予測値と実際の挙動の傾向が一致しており，モデルによって実プラントの挙動を予測できることがわかる。ここで，モデルの予測誤差は，主に給塵外乱の影響であると考えられる。実際の給塵プロセスにおいては，多かれ少なかれ給塵量やごみ質が変動するが，この給塵外乱の影響は，給塵機回転速度だけでは考慮できないからである。

そこで，給塵外乱も含めた給塵量を反映するものとして，IDF（誘引送風機）回転速度に着目した。給塵量が

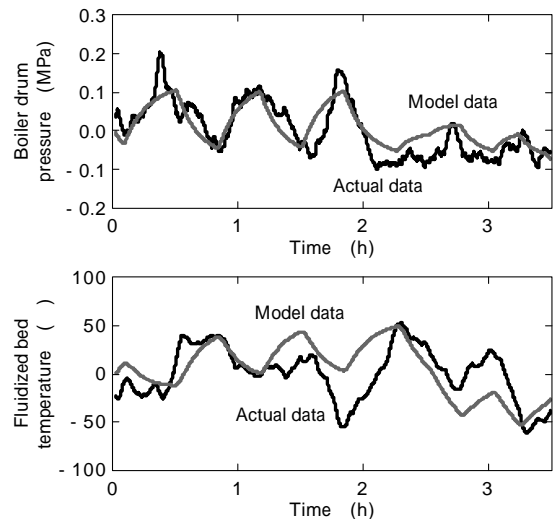


図3 モデルの同定結果

Fig. 3 Identification results of Model

増大すれば IDF 回転速度が増大し，排ガス流量も増大する。給塵量が減少すれば IDF 回転速度が減少し，排ガス流量も減少する。これは，炉内圧力を一定に保つために IDF 回転速度が増減しているからである。さらに，給塵量の変動による応答時間を解析した結果，IDF 回転速度が最も早かったからである。

なお，厳密には，押込空気流量によっても IDF 回転速度は変動する。しかし，押込空気流量の変動範囲は，IDF によって誘引される排ガス流量変動の1割程度にすぎず，押込空気流量と IDF 回転速度との相関係数も0.25程度にすぎない。一方，排ガス流量のうち給塵量に依存する部分（＝全排ガス流量－押込空気流量－その他供給空気流量）と IDF 回転速度との相関係数は0.90程度である。実際，本制御対象は小型のガス化溶融炉であるため，中型・大型のガス化溶融炉に比べて給塵外乱の与える影響が相対的に大きく，支配的である。以上の理由により，IDF 回転速度を給塵量の指標とみなして差支えないといえる。

そこで，給塵機回転速度の代わりに IDF 回転速度を用い，さらに，押込空気流量，蒸気弁開度と合わせた三つを入力とし，ボイラドラム圧力，砂層温度，蒸気発生量の三つを出力とする予測モデルを同定した。

本モデルをモデルと表記し，モデルによる予測結

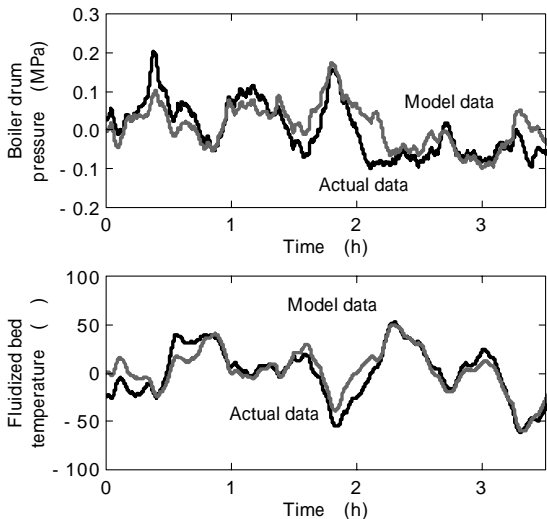


図4 モデルの同定結果
Fig. 4 Identification results of Model

果と実データを図4に示す。給塵機回転速度を入力とするモデルに比べて、高精度な予測ができることがわかる。

2.3 制御系の構成

前節で同定したモデルを使ったモデル予測制御系の構成方法について示す³⁾(図5)。まず、モデルを用いて、「現在の操作入力を現時点以降もそのまま入続けた場合、出力予測値が参照軌道とどれだけ誤差をもつか(つまり図5のFuture errors)」について計算する。モデルを用いることによって、現時点までの給塵外乱を考慮した高精度な予測ができることになる。ここで、仮に、出力予測値が参照軌道に一致すれば、現在の操作量をそのまま保持すればよいことになる。つぎに、出力予測値と参照軌道との誤差を補償するような操作入力をモデルによって計算する。モデルでは給塵機回転速度を直接求めることができないからである。

上記コンセプトに基づいて、制御系を構成する。なお、以下において、 k は現サンプル時点、 z^{-1} は遅延演算子、 $I = 1 - z^{-1}$ とし、操作量ベクトルの次数 $l = 3$ 、制御量ベクトルの次数 $m = 3$ とする。

モデルが次式で表されるとする。

$$A(z^{-1})y_{2M}(k) = B(z^{-1})u(k) \dots \dots \dots (1)$$

$$A(z^{-1}) = I + A_{21}z^{-1} + A_{22}z^{-2} + \dots + A_{2n}z^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = B_{21}z^{-1} + B_{22}z^{-2} + \dots + B_{2n}z^{-n}$$

ただし、

- $y_{2M}(k) \in R^m$: 制御量ベクトル
- $u(k) = [u_0(k) \ u_A(k) \ u_i(k)]^T \in R^l$: 入力ベクトル
- $u_0(k) \in R$: IDF回転速度
- $u_A(k) \in R$: 押込空気流量
- $u_i(k) \in R$: 蒸気弁開度
- $I \in R^{m \times m}$: 単位行列
- $A_{2i} \in R^{m \times m} (i = 1, \dots, n)$: 係数行列
- $B_{2j} \in R^{m \times l} (j = 1, \dots, n)$: 係数行列

であり、 $n = 5$ である。

式(1)に対し、次式のDiophantine方程式

$$I = (1 - z^{-1})E_2(z^{-1})A_2(z^{-1}) + z^{-j}F_2(z^{-1}) \dots \dots \dots (2)$$

$E_2(z^{-1}) \in R^{m \times m} (j = 1, \dots)$: z^{-1} に関する多項式行列

$F_2(z^{-1}) \in R^{m \times l} (j = 1, \dots)$: z^{-1} に関する多項式行列

を用いれば、 j ステップ先のモデルの値は、次式で表すことができる⁴⁾。

$$y_{2M}(k+j) = y_{2M}(k) + G_{2j} \tilde{y}_{2M} + H_{2j} \tilde{u}_2 + L_{2j} \tilde{v}_{2j} \dots \dots (3)$$

$$\tilde{y}_{2M} = \begin{bmatrix} y_{2M}(k) \\ y_{2M}(k-1) \\ \vdots \\ y_{2M}(k-n+1) \end{bmatrix} \in R^{m \times n}$$

$$\tilde{u}_2 = \begin{bmatrix} u_A(k-1) \\ u_A(k-2) \\ \vdots \\ u_A(k-n+1) \end{bmatrix} \in R^{l \times (n-1)}$$

$$\tilde{v}_{2j} = \begin{bmatrix} u_0(k) \\ u_0(k+1) \\ \vdots \\ u_0(k+j-1) \end{bmatrix} \in R^{l \times j}$$

ここに、 $G_{2j} \in R^{m \times m \times n}$ 、 $H_{2j} \in R^{m \times l \times (n-1)}$ 、 $L_{2j} \in R^{m \times l \times j}$ はそれぞれ係数行列である。

現時点における制御量の実測値を $y(k) \in R^m$ とすれば、モデルに対する実測値の偏差は、

$$y_A(k) = y(k) - y_{2M}(k) \dots \dots \dots (4)$$

となる。この偏差が未来にわたって続くと仮定すると、時刻 $k+j$ における制御量の予測値は、

$$y(k+j) = y_{2M}(k+j) + y_A(k) \\ = y(k) + G_{2j} \tilde{y}_{2M} + H_{2j} \tilde{u}_2 + L_{2j} \tilde{v}_{2j} \dots \dots \dots (5)$$

となる。ここで、 \tilde{v}_{2j} の項をIDF回転速度に関する項と、それ以外の項に分割すると、

$$L_{2j} \tilde{v}_{2j} = L_{21j} \tilde{v}_{21j} + L_{22j} \tilde{v}_{22j} \dots \dots \dots (6)$$

$$L_{21j} = L_{2j} S_{1j}^T$$

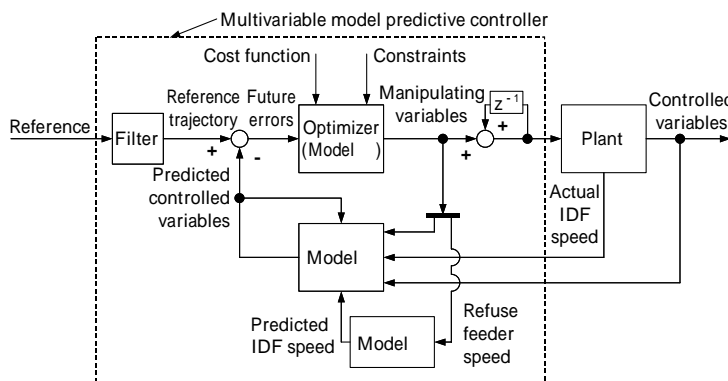


図5 流動床式ガス化溶融炉における制御システム構造

Fig. 5 Structure of control system for fluidized bed pyrolytic gasification and melting furnaces

$$\tilde{v}_{21j} = S_{1j} \tilde{v}_{2j}$$

$$L_{22j} = L_{2j} S_{2j}^T$$

$$\tilde{v}_{22j} = S_{2j} \tilde{v}_{2j}$$

$$S_{1j} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & & & 0 \\ & 1 & 0 & 0 & & \\ & & 1 & 0 & 0 & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & 1 & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad R^{j \times i \cdot j}$$

$$S_{2j} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & & & 0 \\ 0 & 0 & 1 & & & \\ & & & 0 & 1 & 0 \\ & & & 0 & 0 & 1 \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & 0 & 1 & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R^{2j \times i \cdot j}$$

となる。式(6)を式(5)に代入して、
 $y_{2M}(k+j) = y(k) + G_{2j} \tilde{y}_{2M} + H_{2j} \tilde{u}_2 + L_{21j} \tilde{v}_{21j} + L_{22j} \tilde{v}_{22j} \dots (7)$
 を得る。

さて、今後操作量を変更しなかった場合、制御量の挙動がどうなるかについて考える。給塵機回転速度、押込空気流量、蒸気弁開度を変更しなかった場合、まず、 \tilde{v}_{22j} が零ベクトルとなる。また、IDF回転速度の変動分 \tilde{v}_{21j} は、給塵機回転速度とIDF回転速度の関係を表す別のモデル(モデル)から推定され、この推定値を \tilde{v}_{0j} とする。

ここで、モデルの構造は、実際のプロセスに即して個々の伝達関数を組合わせたものであり、図6に示すように構成されている。給塵機回転速度から発生ガス量までの伝達関数を「むだ時間+一次遅れ」で近似し、IDF回転速度から排出ガス量までの関係を「一次遅れ」で近似している。さらに、発生ガス量と排出ガス量との差が炉内に滞留し、これを積分したものがガス化炉内圧力に比例すると仮定し、このガス化炉内圧力を目標値に制御するために、PI制御によってIDF回転速度が操作される。なお、時定数やゲインの各パラメータは、実データにフィッティングして求めた。

以上によって、今後操作量を変更しなかった場合における現時点以降の制御量は、

$$y(k+j) = y(k) + G_{2j} \tilde{y}_{2M} + H_{2j} \tilde{u}_2 + L_{21j} \tilde{v}_{0j} \dots (8)$$

となる。

いま、制御量の目標値 $r(k+j)$ R^m に対して、参照軌道を次式で設定する。

$$y(k+j) = (I - C^j)(k+j) + C^j y(k) \dots (9)$$

$$C = \text{diag}(c_1, \dots, c_m) \quad 0 \leq c_i < 1 (i=1, \dots, m)$$

この参照軌道は、現時点 $y(k)$ から $r(k+j)$ に一定の割合で近づけていくものであり、式(9)のCを零行列にすれば、参照軌道 $y(k+j)$ は、目標値 $r(k+j)$ そのものに一致する。

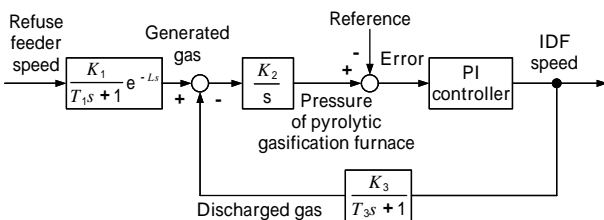


図6 IDF回転速度予測モデルのブロック線図(モデル)
 Fig. 6 Block diagram of IDF speed prediction model (Model)

ここで、今後の操作量を変更しなかった場合、制御量が参照軌道とどれだけずれるかについて考える。この偏差を $y_A(k+j)$ R^m とすると、

$$y_A(k+j) = y_A(k+j) - y(k+j)$$

$$= (I - C^j)(k+j) + C^j y(k) - (y(k) + G_{2j} \tilde{y}_{2M} + H_{2j} \tilde{u}_2 + L_{21j} \tilde{v}_{0j})$$

$$= (I - C^j)(y(k+j) - y(k)) - G_{2j} \tilde{y}_{2M} - H_{2j} \tilde{u}_2 - L_{21j} \tilde{v}_{0j} \dots (10)$$

となる。この $y_A(k+j)$ が現時点以降の操作入力によって、補償しなければならない値となる。

そこで、現時点以降の操作入力と制御量との関係を表すモデルを用いて、式(10)の $y_A(k+j)$ を補償することを考える。

モデルが次式で表されるとする。

$$A(z^{-1})y_{1M}(k) = B(z^{-1})u(k) \dots (11)$$

$$A(z^{-1}) = I + A_{11}z^{-1} + A_{12}z^{-2} + \dots + A_{1n}z^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = B_{11}z^{-1} + B_{12}z^{-2} + \dots + B_{1n}z^{-n}$$

ただし、

- $y_{1M}(k)$ R^m : 制御量ベクトル
- $u(k) = [u_{1M}(k) u_A(k) u_1(k)]^T$ R^l : 操作量ベクトル
- $u_{1M}(k)$ R : 給塵機回転速度
- A_{1i} $R^{m \times m} (i=1, \dots, n)$: 係数行列
- B_{1j} $R^{m \times m} (j=1, \dots, n)$: 係数行列

であり、 $\hat{n} = 5$ である。

式(11)をモデルと同様に变形すると、

$$y_{1M}(k+j) = y_{1M}(k) + G_{1j} \tilde{y}_{1M} + H_{1j} \tilde{u}_1 + L_{1j} \tilde{v}_{1j} \dots (12)$$

$$\tilde{y}_{1M} = \begin{bmatrix} y_{1M}(k) \\ y_{1M}(k-1) \\ \vdots \\ y_{1M}(k-n+1) \end{bmatrix} \quad R^{m \cdot n}$$

$$\tilde{u}_1 = \begin{bmatrix} u(k-1) \\ u(k-2) \\ \vdots \\ u(k-n+1) \end{bmatrix} \quad R^{l \cdot (n-1)}$$

$$\tilde{v}_{1j} = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+j-1) \end{bmatrix} \quad R^{l \cdot j}$$

となる。ここに、 G_{1j} $R^{m \times m \cdot \hat{n}}$ 、 H_{1j} $R^{m \times l \cdot (\hat{n}-1)}$ 、 L_{1j} $R^{m \times l \cdot j}$ はそれぞれ係数行列である。

さて、式(12)において、現時点以降の操作量による変動分を表すものは右辺最終項の $L_{1j} \tilde{v}_{1j}$ であるので、

$$y_A(k+j) = L_{1j} \tilde{v}_{1j} \dots (13)$$

となるように操作量を決定すれば、時刻 $k+j$ において制御量が参照軌道に一致することになる。

実際には、現時点以降のある区間において、式(13)が成立つような操作入力を求めればよい。すなわち、評価関数

$$J = \sum_{j=1}^P (y_A(k+j) - L_{1j} \tilde{v}_{1j})^2 + \sum_{j=1}^Q u(k+j-1)^2 \dots (14)$$

$$j = \text{diag}(j_1, \dots, j_m) \quad j_i \geq 0 (i=1, \dots, m)$$

$$j = \text{diag}(j_1, \dots, j_l) \quad j_i \geq 0 (i=1, \dots, l)$$

$$P \geq Q \geq 1$$

$$x := (x^T x)^{1/2}, \quad x \in R^n, \quad n \geq 1$$

を最小化する制御入力を求めればよい。

しかし、実際のプラントにおいては、操作入力に上下制限が存在し、急激な操作変動を避けるため操作入力の変動幅についても制限が存在する。また、制御出力に

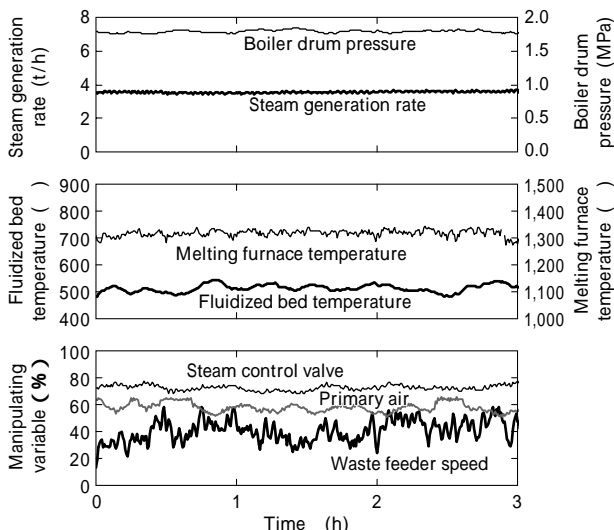


図7 モデル予測制御による制御結果
Fig. 7 Control results of model predictive control

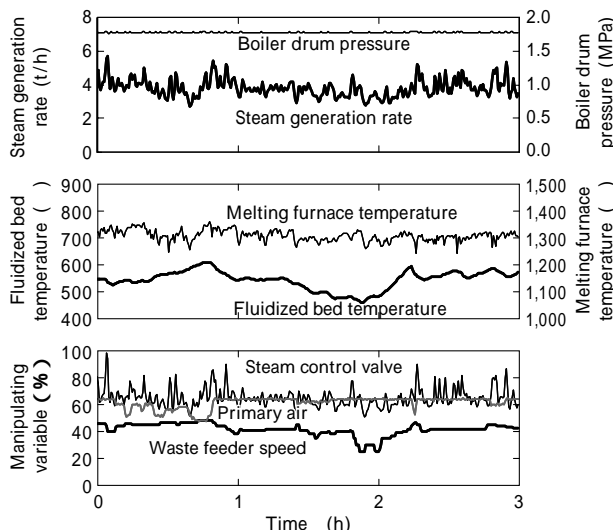


図8 従来法 (PID 制御 + 手動補正) による制御結果
Fig. 8 Control results of PID control with manual adjustment

についても上下制限が存在する。たとえば、流動床式ガス化溶融炉においては、ガス化を安定して促進するため、一般の焼却炉よりも砂層温度の管理が特に重要となる。

そこで、操作入力 $u(k+j)$ を求める際に、以下の制約条件を考慮する。

$$U_{j, \min} \leq u(k+j) \leq U_{j, \max} \dots\dots\dots(15)$$

$U_{j, \min}$ R^l : 操作量の変動幅下限値

$U_{j, \max}$ R^l : 操作量の変動幅上限値

$$U_{j, \min} \leq u(k-1) + \sum_{i=0}^j u(k+i) \leq U_{j, \max} \dots\dots\dots(16)$$

$U_{j, \min}$ R^l : 操作量の下限値

$U_{j, \max}$ R^l : 操作量の上限値

$$Y_{j, \min} \leq y(k+j) + L_{1j} \tilde{v}_{1j} \leq Y_{j, \max} \dots\dots\dots(17)$$

$Y_{j, \min}$ R^m : 制御量の下限値

$Y_{j, \max}$ R^m : 制御量の上限値

式(15)~(17)の制約条件を考慮したうえで、式(14)を最小化する操作入力を求めればよい。この問題は、二次計画問題として解かれ、現時点における操作入力の偏差ベクトル $u(k)$ が求まる。

現時点の操作入力 $u(k)$ は、

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \dots\dots\dots(18)$$

となり、この $u(k)$ に基づいて実炉の操作をおこなえばよい。

3. 実炉適用結果

前章で構成したモデル予測制御システムを実操業中のガス化溶融炉(中部上北清掃センター)に適用した結果を図7に示す。なお、制御周期は3秒である。比較のため、従来制御(PID制御によるボイラドラム圧力制御+押込空気流量と給塵機回転速度の手動補正)の結果を図8に示す。本モデル予測制御手法では、所期のとおり、給塵外乱に応じて給塵機回転速度が操作され、外乱の影響が抑制されていることがわかる。また、他の操作量も多変数制御演算によってバランスよく決定されているた

め、ボイラドラム圧力・蒸気発生量ともに、目標値に対して $\pm 5\%$ 以内に変動を抑制できている。さらに、砂層温度は510付近で安定に保たれており、溶融炉の温度も安定溶融の目安となる1,300以上に保たれている。各変動量を標準偏差で比較した場合、蒸気発生量の変動は従来の約1/10、砂層温度変動が従来の約2/5、溶融炉内温度変動が従来の約3/5に低減されている。以上のことから、安定的なガス化溶融を実現できていることがわかる。

むすび=国内初の流動床式ガス化溶融炉である中部上北清掃センターにて、多変数モデル予測制御システムを構築した。その特長は以下のとおりである。

- (1) 多変数モデル予測制御系を構成することで、操作量の干渉を考慮したうえで、蒸気系と炉内各部温度を安定に制御できる。
- (2) 本制御システムによって、ガス化溶融炉の運転自動化が実現できる。中部上北清掃センターでは、すでに4年半以上にわたって、本制御による自動運転を続けている。

本制御手法は、他のごみ処理プラントにも応用可能であり、積極的に活用していきたい。

参考文献

- 1) 武田信生: 環境技術, Vol.28, No.12 (1999) p.858.
- 2) 友近信行ほか: システム制御情報学会論文誌, Vol.14, No.3 (2001) p.146.
- 3) 友近信行ほか: 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.7 (2004) p.713.
- 4) 松山久義ほか: プロセスシステム工学, (1992), オーム社.
- 5) E. F. Camacho et al.: Model Predictive Control, (1998) Springer.
- 6) 足立修一: 制御のためのシステム同定, (1996), 東京電機大学出版局.
- 7) 友近信行ほか: 第43回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, (1999) p.663.