

立形多段焼却炉での計算機制御の応用

富士電機製造(株)公共技術第1部

安東 圭司 ○上野 健郎

第1システム開発部

伊藤 修

第1システム部

小林 一智

東京都下水道局

原田 敏郎

宮澤 裕三

1. はじめに

近年の下水道普及率の上昇に比例して、下水処理場から発生する汚泥量も増大している。現在、下水汚泥の約8割は埋立て処分されているが、昨今、都市化が進み適地確保が次第に困難となってきた。これに伴い、汚泥の減量化が不可欠となり、大都市では焼却処分が増える傾向にある。しかしながら、汚泥焼却施設の監視制御装置はいまだに人手にたよる部分が多く、デジタル化は近年ようやく始まったばかりである。また、炉の制御手法も、プラントの挙動を把握しにくいためにあまり進歩がみられなかった。

筆者らは、数値モデルを用いて立形多段焼却炉の燃焼解析を行ない、その結果により実プラントにおける計算機制御システムの制御系を計画、実施し、そのデータを収集する機会を得たので報告する。

2. 数値モデルによる解析

2-1 数値モデル

炉頂より投入された汚泥ケーキは、灰として下部より排出されるまでの間に種々の状態変化をする。それを記述可能な数値モデルが必要である。本数値モデルは基本的に、汚泥ケーキは有機物(可燃物)、無機物(灰分)および水分から成り、燃焼ガスは乾燥ガスと水蒸気から成るとし、図1に示す通り焼却炉の各段における熱収支、物質収支の式を用いて全体のモデルを構成している。その主な考え方は、①

炉内の燃焼ガスは等圧変化する。②汚泥ケーキからの水分蒸発は燃焼ガスとケーキとの温度差および燃焼ガス速度に依存する。③汚泥ケーキ中の有機物はケーキ含水率がある値(発火含水率)以下になった時燃焼を開始し燃焼ガスに変化する。等である。

2-2 数値モデルによる解析

数値モデルによる解析の対象とした多段焼却炉は12段炉で、その構成を図2に示す。解析では、汚泥性状として含水率80%、可燃分高位発熱量5000 kcal/kg、可燃分比率50% dsという値を用いた。図3に、汚泥ケーキ投入量を250 t/日から200 t/日にステップ変化させた場合の、無制御状態、燃焼段最高温度(7, 8段)による熱風量フィードバック制御(FB制御)、さらに汚泥ケーキ投入量によるフィードフォワード制御を付加した制御(FB+FF制御)の3状態のシミュレーション結果を示す。

汚泥ケーキ投入量の変化が燃焼段に達すると急激な燃焼が生じる。その結果、無制御の場合燃焼段では1000℃に達し、かつ6段目への燃焼段の移行がみられる。FB制御の場合一時的な燃焼段の移行がみられるが、温度上昇は無制御の場合に比較し抑えられている。FB制御にFF制御を付加した場合、一時的な温度の低下を生じるが温度の上昇および燃焼段の移行は抑えられ、フィードフォワード効果が確認できる。以上の考察の結果、制

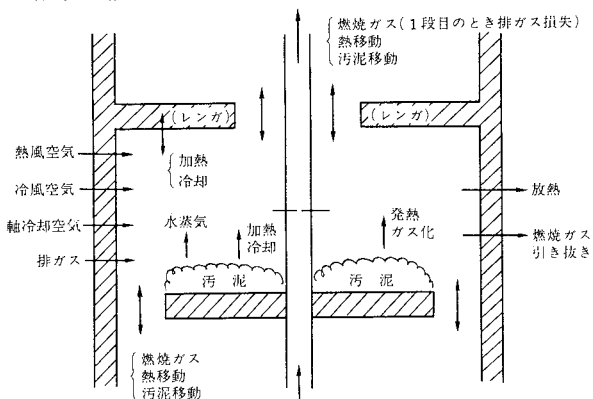


図-1 焼却炉の熱移動

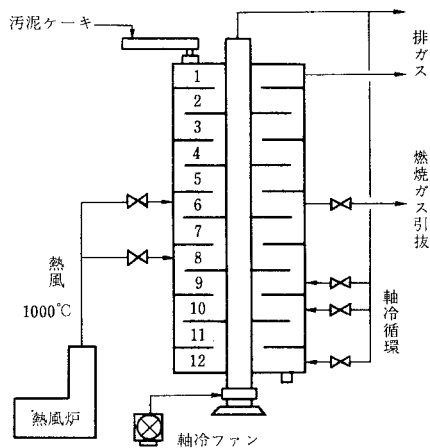
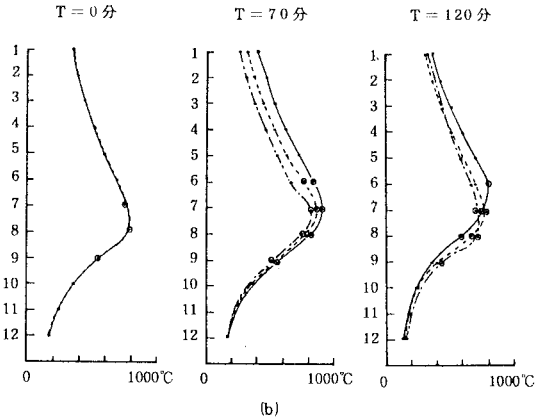
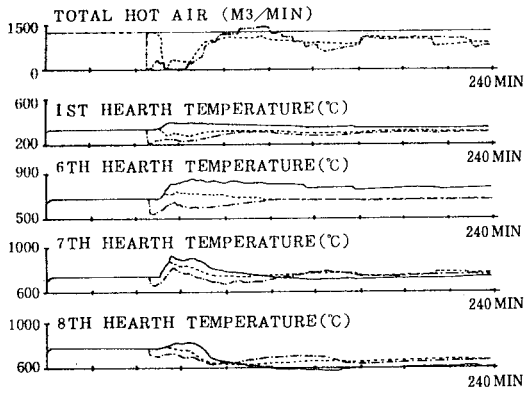


図-2 焼却炉の構成



(a)

(b)

—— 無制御, - - - - - FB制御;
 - - - - - FB+FF制御 ○ 燃焼段

図-3 投入量の変化に対する制御結果

御系にフィードフォワード要素を組入れることが炉の安定燃焼に大きな効果があることがわかり、次項以降に述べる制御システムが構築された。

3. 実プラントへの応用

3-1 計算機制御システムの構成

今回対象とした汚泥焼却施設の監視制御システム構成を図4に示す。炉は1基毎にDDCマイクロコントローラとシーケンスコントローラにより制御され、それらは光データウェイにより計算機制御システムに接続されている。計算機制御システムのソフトウェア構成は図5に示すとおりである。本システムでは、通常の情報処理、ディスプレイ、帳票記録、統計解析の各機能に加え、プロセス制御システム、運用シミュレーションシステムを組込んでいる。プロセス制御システムは本稿にて述べる

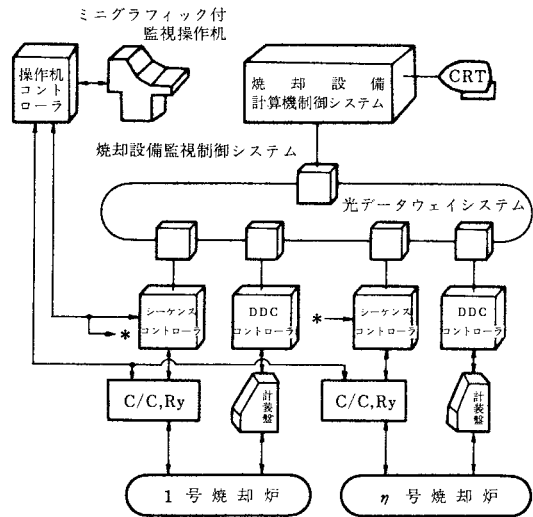


図-4 計算機制御システム構成

ケーキ投入量による外乱抑制制御段温度制御の他に、乾燥速度安定化制御、乾燥風量一定制御等も試みている。また、運用シミュレーションシステムは前述2-1項で述べた数値モデルを焼却炉の運用レベルでも使えるよう制御用計算機に組込んだもので、炉の挙動を十分に予測し実用に供している。

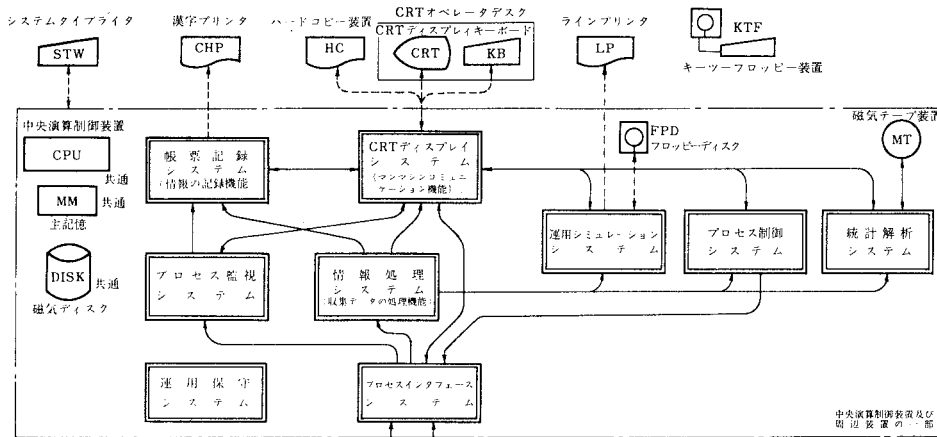


図-5 計算機制御システムのソフトウェア構成

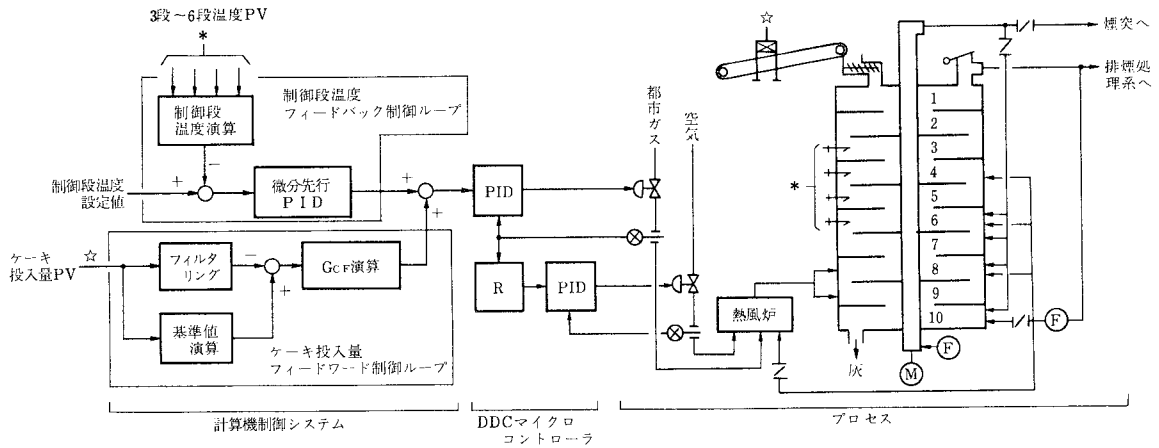


図-6 制御系とプラントの構成

3-2 制御手法

今回、筆者らがフィードフォワード制御を適用した焼却炉は300t/日の焼却能力を持つ10段炉である。その構成を図6に示す。燃料に都市ガスを使用した熱風炉方式で、燃焼ガスの途中段からの引抜きは行っていない。制御系は大きく分けて、制御段温度フィードバック制御ループとケーキ投入量フィードフォワード制御ループから成り、その特徴は次の通りである。

- (a) 制御段温度演算は3～6段温度の最高値をとり、その設定値を維持するよう熱風炉都市ガス流量を制御する。
- (b) ケーキ投入量の変動をつかまえ、制御段温度が影響を受ける前に都市ガス流量を補正する。

ケーキ投入量の変動分に対し、都市ガス流量設定値の補正量は、次のように求める。

$$\text{ケーキ投入量の変動分} \rightarrow -a \frac{K_2}{K_1} \frac{1+T_1 S}{1+T_2 S} e^{-LS} \rightarrow \text{都市ガス流量設定値の補正量} \dots\dots (1)$$

演算式の導出根拠は次の通りである。図6の制御系をモデル化し、ブロック線図で表わすと図7のようになる。

$$\text{制御量 } X \text{ に対する外乱 } D \text{ の影響 } X' \text{ は、} \quad X' = G_{P1} \cdot G_{CF} \cdot D + G_{P2} \cdot D \dots\dots (2)$$

$$\text{となる。外乱による影響を除去するため } X' = 0 \text{ とすると、} \quad G_{CF} = -\frac{G_{P2}}{G_{P1}} \dots\dots (3)$$

となる。ここで、 G_{P1} を1次遅れ、 G_{P2} をむだ時間+1次遅れであると想定すると、

$$G_{P1} = \frac{K_1}{1+T_1 S} \dots\dots (4)$$

$$G_{P2} = \frac{K_2}{1+T_2 S} e^{-LS} \dots\dots (5)$$

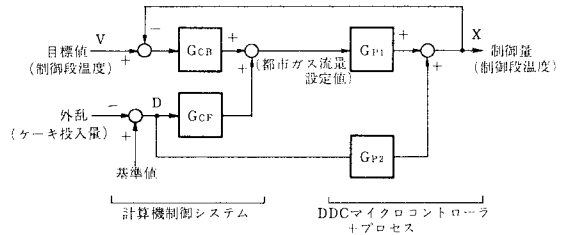
であるから、上記(3)式は、

$$G_{CF} = -\frac{K_2}{K_1} \frac{1+T_1 S}{1+T_2 S} e^{-LS} \dots\dots (4)$$

となるので、これにフィードフォワード補正の強さを調整する係数 a を掛け、(1)式を得る。

3-3 実プラントの過渡応答特性

制御系を組む上で想定した伝達関数 G_{P1} 、 G_{P2} の各パラメータを推定するため、無制御時のプラントの過渡応答を都市ガス流量および汚泥ケーキ投入量について調査



- G_{CB} : 制御段温度FB制御の伝達関数
- G_{CF} : ケーキ投入量FF制御の伝達関数
- G_{P1} : 操作量に対するプロセス(DDCマイクロを含む)の伝達関数
- G_{P2} : 外乱に対するプロセスの伝達関数

図-7 制御系のブロック線図

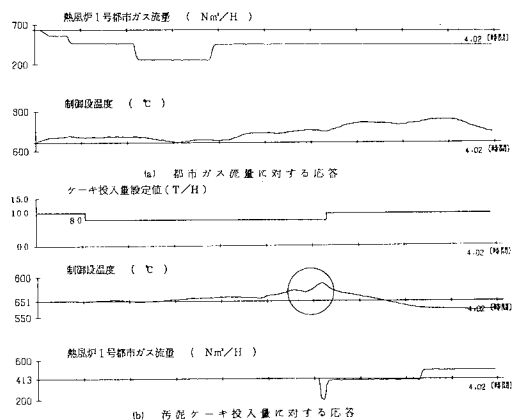


図-8 過渡応答特性

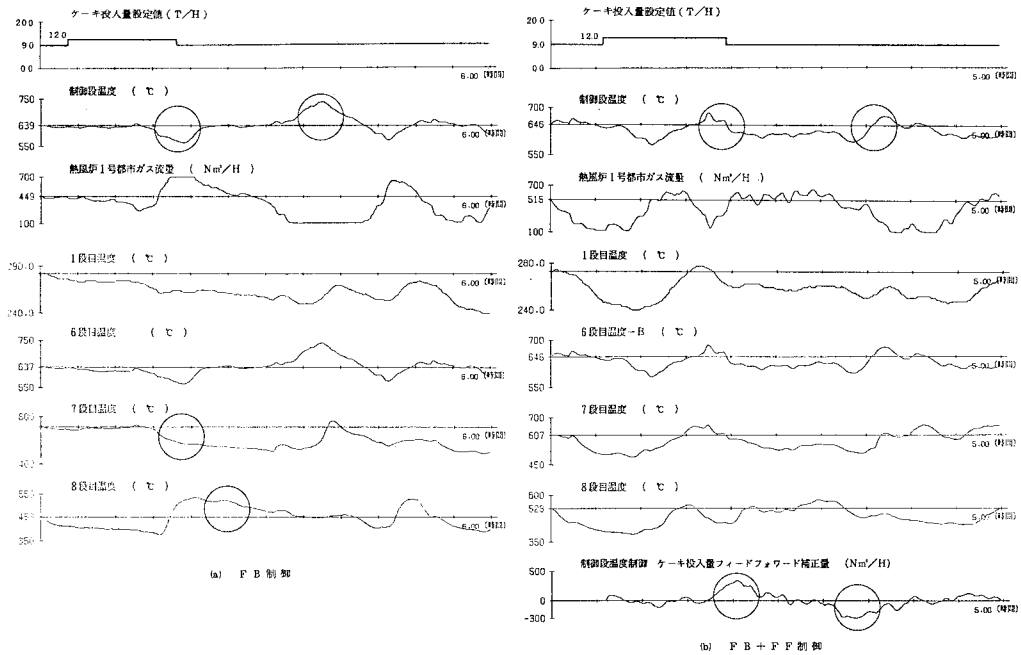


図-9 制御応答特性

した。その結果を図8(a), (b)に示す。この調査結果により、都市ガス流量の伝達関数 (G_{P1}) の各パラメータは $K_1 = 0.205 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Nm}^3/\text{h}$ 、 $T_1 = 1.4.4$ 分と推定される。また、ケーキ投入量の伝達関数 (G_{P2}) の各パラメータは $K_2 = 3.9.5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{t}/\text{h}$ 、 $T_2 = 1.1.2$ 分、 $L = 9.1.3$ 分と推定される。

3-4 FB制御とFB+FF制御の比較

FB制御時のプロセス応答を図9(a)に、FF制御時の応答を図9(b)に示す。FB制御のみの場合、投入量を増加するとその影響が約70分後に現われ、制御段温度が約80°C降下した。投入量を減少した場合は約90分後に影響が現われ、制御段温度が約100°C上昇した。さらに、8段目温度が上昇し、燃焼段が7段目から8段目へ移動した可能性もうかがえる。

一方、FB制御+FF制御の場合は、フィードフォワード補正の効果により、投入量増加の約60分後に一時的に約40°Cの上昇があるもののほぼ安定している。また、投入量を減少した場合も同様に、一時わずかな温度上下はみられるものの安定している。さらに、7~8段目温度も安定しており、燃焼段の移動を示すような温度の動きはみられない。

両者を比較すると、FB制御では温度変動巾が約180°Cにも達したが、FB+FF制御では温度変動巾は約100°Cにおさえられ、FF制御を付加したことにより、温度変動を大幅に減少できることが確認できた。

4. おわりに

汚泥焼却炉の制御方式は省エネルギーと経費削減を旨として自然に関する研究がさかんである。本稿では補助燃料を必要とする場合について述べたが、今後、自然への制御の応用を試みてゆく所存である。

尚、本稿の執筆にあたって御指導頂いた自治体の関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 加藤・宮沢：DDCによる多段汚泥焼却炉の省エネルギー計装，第20回下水道研究発表会講演集
- (2) 伊藤・臼井：立形多段焼却炉の汚泥燃焼シミュレーション(その1)，第19回下水道研究発表会講演集
- (3) 伊藤 ほか：立形多段焼却炉の汚泥燃焼シミュレーション(その2)，第20回下水道研究発表会講演集
- (4) 臼井 ほか：下水汚泥処理の監視制御システム，富士時報，53，4