

## 公開講演会要旨

# 統計モデルを使った火力発電所の制御

日本ペーレー株式会社\* 中 村 秀 雄

(1993 年 11 月 6 日, 統計数理研究所 講堂)

### 1. まえがき

我が国の電力系統においては、火力発電プラント（以下火力プラントと略称）が電力需給調整の主役として苛酷な出力調整運転を強いられている。一方、火力プラントにおいてボイラからタービンへ供給される蒸気の圧力や温度は、このような出力変化の下でも常に定格値の上下 1% 程度の範囲内に維持することが機器の保全と効率向上の面から要求される。とくに蒸気温度 (550~600°C) は従来からもっとも制御しにくい状態量と考えられていた。

筆者は九州電力総合研究所において 1960 年代の前半からボイラ蒸気温度制御の研究に取組み、九州大学との数年間の共同研究の末に得た結論は、「ボイラのように変数間に強い相互干渉を持つ多入力多出力システムに従来形の PID フィードバック制御を適用して大幅な負荷変化に対して良好な制御結果を得るのはきわめて難しい。」ということであった。

たまたま 1970 年代のはじめに赤池教授とそのグループによって開発された時系列の解析と制御のためのプログラムライブラリ TIMSAC (Time Series Analysis and Control) が、現代制御理論の中核をなす“状態空間法に基づく最適制御”の実用化のための画期的なツールであることを知り、赤池教授の指導の下に九州電力、電力中央研究所、九州大学、ボイラ・計算機・計装メーカーとの共同研究体制を組み、シミュレーション実験と実プラントによる実験を重ねた結果、約 3 年半後の 1978 年にボイラ蒸気温度制御のための最適レギュレータシステムを完成した。

本システムはその後ボイラメーカーや制御装置メーカーに引き継がれ、筆者の知る範囲では 24 プラント (含中国 2, カナダ 1) 出力合計 12,650 MW (1993 年 3 月末現在における我が国の汽力発電所出力合計の約 12%弱) において実用されている。このような産業分野への貢献のみならず、TIMSAC の適用は、現代制御理論の実システムへの応用という学問分野での意義も大きい。

本講演ではボイラ用最適レギュレータ開発の経緯と意義、システムの概要と制御効果などについて解説する。

### 2. 発電用ボイラの制御

はじめに、統計モデルによる制御の対象である発電用ボイラの制御について概説する。図 1 は超臨界圧貫流ボイラと呼ばれる型式のボイラの内部の構造を示す例である。

図に示すようにボイラへの給水は、給水ポンプによって後部煙道内の節炭器に圧入され、こ

\* 応用システム部: 〒 410-21 静岡県田方郡菰山町原木 511.

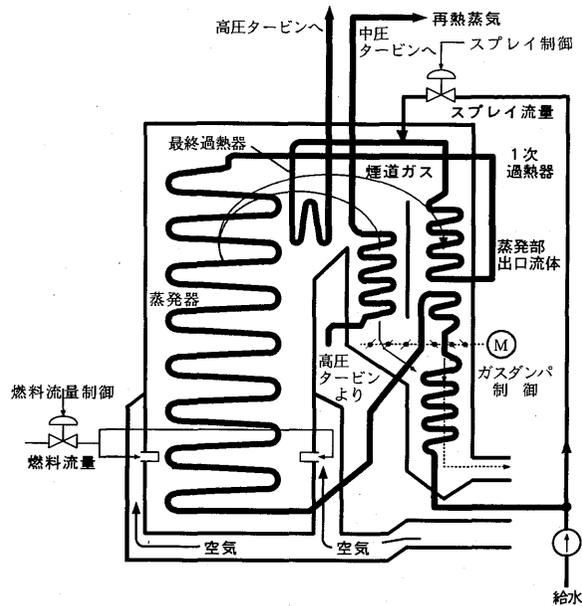


図1. 超臨界圧貫流ボイラの構造の例。

ここで予熱されたのち火炉底部および側壁に配置された火炉壁管を上昇する過程で蒸発し、ふたたび後部煙道内の1次過熱器に入る。1次過熱器を出た蒸気は、さらに火炉上部の最終過熱器を経て所定の圧力・温度を与えられ高圧タービンへ入る。高圧タービンで仕事を終えた蒸気は再度ボイラ内に入り、再熱器によって再熱されたのち中圧タービンおよび低圧タービンにおいて保有エンタルピを機械出力に変換し、そののち、復水器、給水過熱器を経てふたたびボイラ給水となる、というサイクルを繰り返す。一方、燃料はバーナによって熱エネルギーに変換され、火炉部では放射伝熱、後部煙道では高温ガスとの接触伝熱によって熱を作動流体に与える。

さて、まえがきでも述べたように、ボイラの制御のうちで最も難しいのは、ボイラ出力（以下負荷という）変化時の過熱器出口蒸気ならびに再熱蒸気の温度制御である。ボイラから高圧タービンへ供給される過熱器出口蒸気温度（以下主蒸気温度という）の制御は基本的にはボイラへ供給される水と燃料の比（水燃比）によって行なわれるが、これと同時に全給水流量のうちの3~4%を過熱器の中間点に設けられた過熱低減器（図1上部）へ常時注入しておき、その注入量（スプレー流量）を加減することによって蒸気の過熱度を変えて蒸気温度を制御する、という方法が用いられる。スプレーによる蒸気温度制御は永続的ではないが即効性がある。一方、再熱蒸気温度の制御は主として再熱器ガスダンパによって行なわれる。図1に示すようにこの型のボイラでは後部煙道は隔壁によって仕切られ、その下流側にガスダンパが設けられている。このダンパの開閉によって再熱器側と過熱器側を流れる高温ガスの配分を変えることによって再熱蒸気温度を制御する。しかし、図から明らかなように、再熱蒸気温度を制御するためにガスダンパを操作すれば、当然その影響は過熱器側、つまり主蒸気温度に及ぶことになる。以上に述べたボイラ入力のほかに蒸気温度に影響を及ぼすのは、主蒸気加減弁開度変化にともなう主蒸気流量の変化である。

さて、火力プラントの制御装置は電力系統給電指令所から受取る負荷指令に応じて速やかに発電出力を調整するため、負荷指令変化に即応して主蒸気加減弁開度、給水、燃料、空気、煙

道ガス流量などのボイラ入力を負荷指令値に見合う値に調整し、この結果生ずる状態量の設定値からの過渡的な偏差をフィードバックして前記のボイラ入力量や過熱器スプレイ流量などを再調整する。しかし、これらのフィードバックループはボイラプロセスを介して互いに複雑に干渉するため、典型的な多変数システムを形成する。

したがって、主として1入力1出力システムを対象として発達してきた従来のPID制御理論では、多くの入力変数を適切に制御して制御ループ相互の間の干渉を補償し、出力変数を所望の変動範囲に収めることは極めて難しく、このことが火力プラントの負荷変化幅および変化率に制約を与える主な要因となっていた。

以下に述べる火力プラントの最適制御は以上の問題を解決するために計画され実用されたものである。

### 3. 最適制御の方法

状態空間法による最適制御理論は1960年代のはじめにR.E. Kalmanによって提案され、それまでのP(比例)、I(積分)、D(微分)要素から構成される制御システムに代って、制御の分野に新しい道を開く画期的な方法として、現代制御理論の名の下に広く注目を集めた。

状態空間法においては、制御対象システムの動特性を状態方程式と呼ばれる下記の数式モデルで表現する。

$$(3.1) \quad \mathbf{Z}(n+1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{Z}(n) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(n)$$

ここで

$\mathbf{Z}$  は状態ベクトル、 $\mathbf{U}$  は操作ベクトル  
 $\mathbf{A}$  は状態遷移行列、 $\mathbf{B}$  は制御行列

と呼ばれ、 $n, n+1$  は時刻を表す。

(3.1)式が得られると、最適な状態ベクトルフィードバックを与えるゲイン行列 $\mathbf{G}$ を、二次形式評価関数と呼ばれる次式を最小とするようにダイナミックプログラミング(DP)法によって求める。

$$(3.2) \quad J_I = E \sum_{n=1}^I [\mathbf{Z}'(n) \mathbf{Q} \mathbf{Z}(n) + \mathbf{u}'(n-1) \mathbf{R} \mathbf{u}(n-1)]$$

ここで'はベクトルの転置を表し、また $\mathbf{Q}$ と $\mathbf{R}$ はそれぞれ状態ベクトルの2乗と操作ベクトルの2乗に与える重み行列である。(3.2)式の $I$ を十分大きくとればゲイン行列 $\mathbf{G}$ はほぼ一定の値に近づくからこの $\mathbf{G}$ を用い、 $\mathbf{u}(n) = -\mathbf{G} \cdot \mathbf{Z}(n)$ として状態ベクトルフィードバック制御を行なう。

## 4. 統計モデルによるシステム解析と制御

### 4.1 状態方程式の導出

最適制御をプラントに適用するためにはまず対象プラントの動特性を表現する状態方程式を導くことが必要である。しかし現実には多くの状態変数と操作変数から構成され、しかもこれらの変数が相互に干渉する複雑なプラントについて、実用に耐える状態方程式を導くことは容易でなく、これが永年状態空間法の実用を阻んで来た大きな要因であった。以下に述べる赤池の方法(赤池・中川(1972))は、多次元の統計モデルすなわち自己回帰(AR)モデルを応用し

て状態方程式を得る方法で、これにより最適制御実用化への道を開いた画期的な方法である。

赤池の方法では、プラントの動特性を代表する変数（以下システム変数と呼ぶ）を選定し、これらの変数の時系列に多次元 AR モデルをあてはめる。この際モデルの次数、すなわち過去何時点まで遡ってデータをモデルに取り入れるべきか、という問題が生ずる。この問題に明確な理論的根拠を与えたのが、赤池情報量規準 AIC である。

さて AIC によってモデルの次数が定まると、(3.1) 式に対応する状態方程式が次の形で得られる。

$$(4.1) \quad \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0(n) \\ \mathbf{x}_1(n) \\ \mathbf{x}_2(n) \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{M-1}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 & \mathbf{I} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{a}_2 & 0 & \mathbf{I} & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{a}_3 & 0 & 0 & \mathbf{I} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ \mathbf{a}_M & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0(n-1) \\ \mathbf{x}_1(n-1) \\ \mathbf{x}_2(n-1) \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{M-1}(n-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \\ \mathbf{b}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{b}_M \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}(n-1)$$

$$\mathbf{Z}(n) = [\mathbf{x}_0(n), \mathbf{x}_1(n), \dots, \mathbf{x}_{M-1}(n)]'$$

$$\mathbf{Z}(n-1) = [\mathbf{x}_0(n-1), \mathbf{x}_1(n-1), \dots, \mathbf{x}_{M-1}(n-1)]'$$

ここで、 $\mathbf{Z}(n)$ 、 $\mathbf{Z}(n-1)$  はそれぞれ時刻  $n$  と  $n-1$  における状態ベクトル、 $\mathbf{u}(n-1)$  は時刻  $n-1$  における操作ベクトル、 $\mathbf{A}$  は状態遷移行列、 $\mathbf{B}$  は制御行列である。

(4.1) 式をブロック線図で表すと図2の通りである。図2から (4.1) 式の状態ベクトル  $\mathbf{Z}(n)$  の要素  $\mathbf{x}_k(n)$ ,  $k=1, 2, \dots, M-1$  は、それぞれ  $n-1$  時点で予測した  $1, 2, \dots, M-1$  時点先の状態ベクトル  $\mathbf{x}$  の予測値を表すことがわかる。

状態方程式が得られると、前述のように DP 法によって状態ベクトルフィードバックのためのゲイン行列  $\mathbf{G}$  を求め、各制御時刻ごとに下式によって計算した操作量  $\mathbf{u}(n)$  をプラントに送出して制御を行なう。

$$(4.2) \quad [\mathbf{u}(n)] = -[\mathbf{g}_1 \ \mathbf{g}_2 \ \dots \ \mathbf{g}_M] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0(n) \\ \mathbf{x}_1(n) \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{M-1}(n) \end{bmatrix}$$

ただし  $\mathbf{G} = [\mathbf{g}_1 \ \mathbf{g}_2 \ \dots \ \mathbf{g}_M]$ 。

このように、各時刻ごとに状態変数の未来値を予測し、これに DP 法で求めた最適ゲイン行列を乗じて操作量を決めるため、従来の PID 制御に比して格段にすぐれた制御性能を実現することができる。

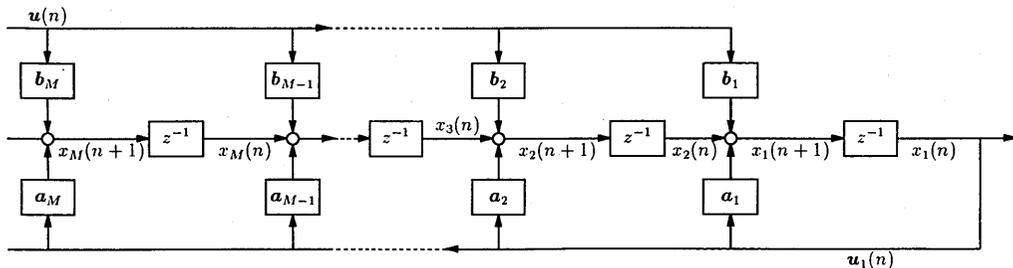


図2. (4.1) 式のブロック線図。

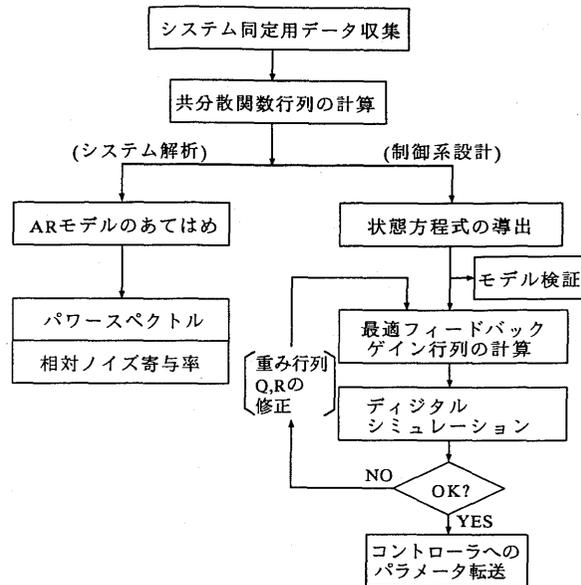


図3. TIMSAC (Time Series Analysis and Control) ライブラリ。

#### 4.2 TIMSAC による制御系設計

最適制御系の設計は、赤池らによって開発された TIMSAC ライブラリ (図3) を用いて下記の手順で行なわれる。本制御系では、ボイラプロセスと PID 制御系より構成される通常のプラントを最適制御の対象とし、デジタル演算部で求めた最適制御信号を PID 制御装置よりの制御信号に加算して制御を行なう。そこで、デジタル演算部からの信号印加点に互いに独立なランダム信号を注入し、約5ないし8時間のデータを収録して AR モデルのあてはめを行なう。AR モデルのあてはめにおいては、モデルの次数を漸次大きくしながら、その都度 AIC を計算し AIC を最小とする次数を最適なモデルの次数とする。このための計算は Levinson-Durbin の逐次形アルゴリズムによって効率よく行なわれる。

AR モデルができれば、これを用いてシステムの解析を行ない、その結果に基づいて図3の右側の枝の手順に従って制御系の設計を行なう。

#### 5. 実プラントへの適用

本制御系は1978年に九州電力豊前発電所1号機(出力500MW超臨界圧貫流ボイラ)に適用され好成績を収め、次いで数多くの火力プラントへ適用され、出力変化幅と変化率の向上の故に電力システムの周波数制御に貢献している。図4に本制御方式による500MWプラントの営業運転時の記録の例を示す。図中の矢印の時刻に最適制御演算部からの制御指令がプラントへ印加され、それ以前のPID制御に比して格段に制御特性が改善されていることが認められる。

以上に述べた統計モデルによる最適レギュレータの実用例は火力プラントの制御に大きなインパクトを与え、以後その技術はボイラメーカー・計装制御システムメーカーに引き継がれて、国内、国外における多くのプラントに適用されるに至った。表1に筆者の知る範囲内での本方

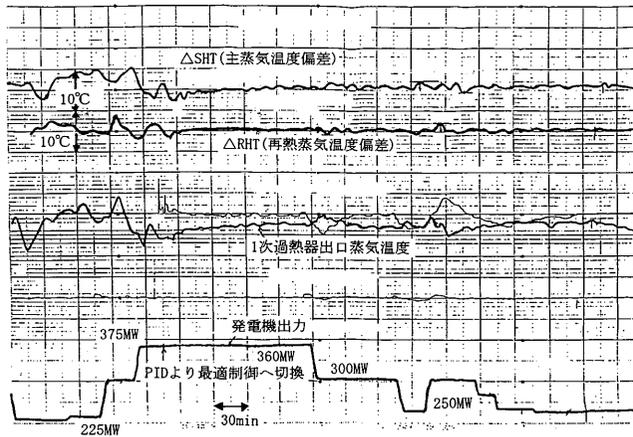


図4. PID制御と最適制御の制御特性の比較.

表1. TIMSACによる最適制御適用火力発電所.

No.	発電所名	容量/燃料	適用年度
1	豊前1号	500 MW/油	1978
2	新小倉3号	600 MW/ガス	1980
3	新小倉4号	600 MW/ガス	1981
4	豊前2号	500 MW/油	1983
5	碧南1号	600 MW/油	1984
6	碧南2号	600 MW/石炭	1985
7	川内2号	500 MW/油, ガス	1985
8	Shajiao No.1 (中国)	350 MW/石炭	1987
9	Shajiao No.2 (中国)	350 MW/石炭	1987
10	下松3号	700 MW/油	1988
11	赤穂2号	500 MW/油	1988
12	仙台3号	175 MW/石炭	1989
13	新仙台3号	375 MW/油	1990
14	Nanticoke No.7 (カナダ)	500 MW/石炭	1991
15	東扇島2号	1,000 MW/ガス	1991
16	新潟4号	250 MW/油, ガス	1991
17	仙台2号	175 MW/石炭	1991
18	南港3号	600 MW/石炭	1991
19	碧南3号	700 MW/油, ガス	1992
20	広野4号	1,000 MW/油, ガス	1992
21	能代2号	600 MW/石炭	1993
22	仙台1号	175 MW/石炭	1993
23	荅北1号	700 MW/石炭	1994 予定
24	姉崎4号	600 MW/油, LNG, LPG	1994 予定
25	下松3号 (*No.1のリプレース)	700 MW/油, ガス	1994 予定

その他

アメリカ電力研究所 (EPRI: Electric Power Research Institute) による超々臨界圧プラントモデル (渥美3号 700 MW) のTIMSACによる最適制御の研究 (1992年10月)

式の適用例および適用予定を示す。

表1に示すように本システムの適用または適用予定の火力プラントは1994年2月現在で12,650 MW (リプレース分を除く) に達しており、この数字は1993年3月末現在の事業用汽力発電所 (1 MW 以上) の出力合計108,485 MW (資源エネルギー庁公益事業部調) の約11.7% に相当し、今後もその適用は拡大する見込みである。

## 6. む す び

以上に述べたように、赤池によって提案された統計モデルを利用する制御系設計法は火力プラントの制御に大きく寄与しているが、このほか一般の工業プロセスへの適用例も多数報告されている。

本講演では、専ら統計モデルの実用面における成果について述べたが、統計モデルによる最適レギュレータの火力プラントへの適用例は、産業界のみならず学界へも大きなインパクトを与えた。1960年代から1970年代にかけて、状態空間法による最適制御理論の実用性を疑問視する議論がしきりに行なわれた時期があったが、統計モデルによる本格的な最適レギュレータの実現によって、最適制御の有用性が広く認識され、今日制御研究者の間では最適制御理論の実用は当然のことと受けとめられている。

## 参 考 文 献

- 赤池弘次, 中川東一郎 (1972). 『ダイナミックシステムの統計的解析と制御』, サイエンス社, 東京.  
Nakamura, H. and Akaike, H. (1981). Statistical identification for optimal control of supercritical thermal power plants, *Automatica*, **17**(1), 143-155.