

火力プラントにおけるボイラの高効率化制御

Boiler High Efficiency Control on Thermal Power Plant

近年の燃料価格の高騰により、火力プラントでの高効率運転に関する技術開発の要請はますます高まってきている。一方では、制御用計算機あるいはデジタル計装の普及によって、きめ細かな演算処理を高精度に実行できるようになってきたことから、高度な制御技術が受け入れられる機運にある。

効率制御の方法は、プラントの起動、停止時と平常運転時とでは異なるが、本稿では定格付近で長時間の運転を行なう平常時の経済性について追究する。この制御を実施する上では、プロセス雑音の中から精度良く効率を探索する技術が要求される。これの一つの解決策として、疑似ランダム信号(M系列信号)を用いた摂動形相関法の適用を図り、制御用計算機に適した逐次計算法(本文中の相関信号 $x(t)$ を用いる方法)を開発した。実機で測定したプロセス雑音を重畳したシミュレーション結果を報告する。

栗原 伸夫* Nobuo Kurihara
中野 善之** Yoshiyuki Nakano
福島 弘一郎*** Kôichirô Fukushima

1 緒 言

従来の火力プラントの制御は、種々のパラメータの定値制御が中心であって、効率向上のために連続的な制御を適用するまでには至っていない。ところが、各パラメータがあらかじめ定められた値に保持されたとしても、それぞれがプラント効率の点から最適であるとの保証はない。最近のように、プラント規模が大きくなり、わずかの効率偏差が経済的に大きな影響を及ぼすようになると、これをなおざりにすることはできなくなる。火力プラントの経済運用という観点から効率に関心をもち、熱管理を行なうことは従来から実行されており、このために管理に必要なデータの収集を自動化したデータロガーやパフォーマンスモニタが利用されている。しかし、これらは効率を自動的にかつ連続的に制御するということに必ずしも結び付くものではなかった。

火力プラントには幾つかの熱サイクルがあり、それらが効率向上の対象になることができるが、空気過剰率などの操作パラメータをもつボイラに特に効率制御の効果が期待される。例えば、利用率70%の600MWのプラントで熱効率が0.1%上がったとすると、年間で約750t(重油換算)もの燃料節約が可能であり、制御による効率向上として十分期待できる値である。以下、効率制御を実現する上での課題と統計的处理などを駆使する最適化制御技術とについて述べる。

2 効率制御とその問題点

電子計算機の普及とともに、火力プラントの起動、停止の自動化は急速に発展した。しかし、平常運転中の効率制御については、種々の検討や実験¹⁾は行なわれても実用されるに至っていない。この理由として次に述べるような制御上の問題点が挙げられる。

- (1) 効率計算値の精度及び再現性が不十分である。
- (2) プラント雑音が多く除去が難しい。
- (3) 効率に現われるまでの時定数が長い。
- (4) 効率に関係する検出器の信頼性が十分でない(O₂計の目詰まりなど)。

ボイラ効率制御の概念を図1に示す。空気過剰率や再循環

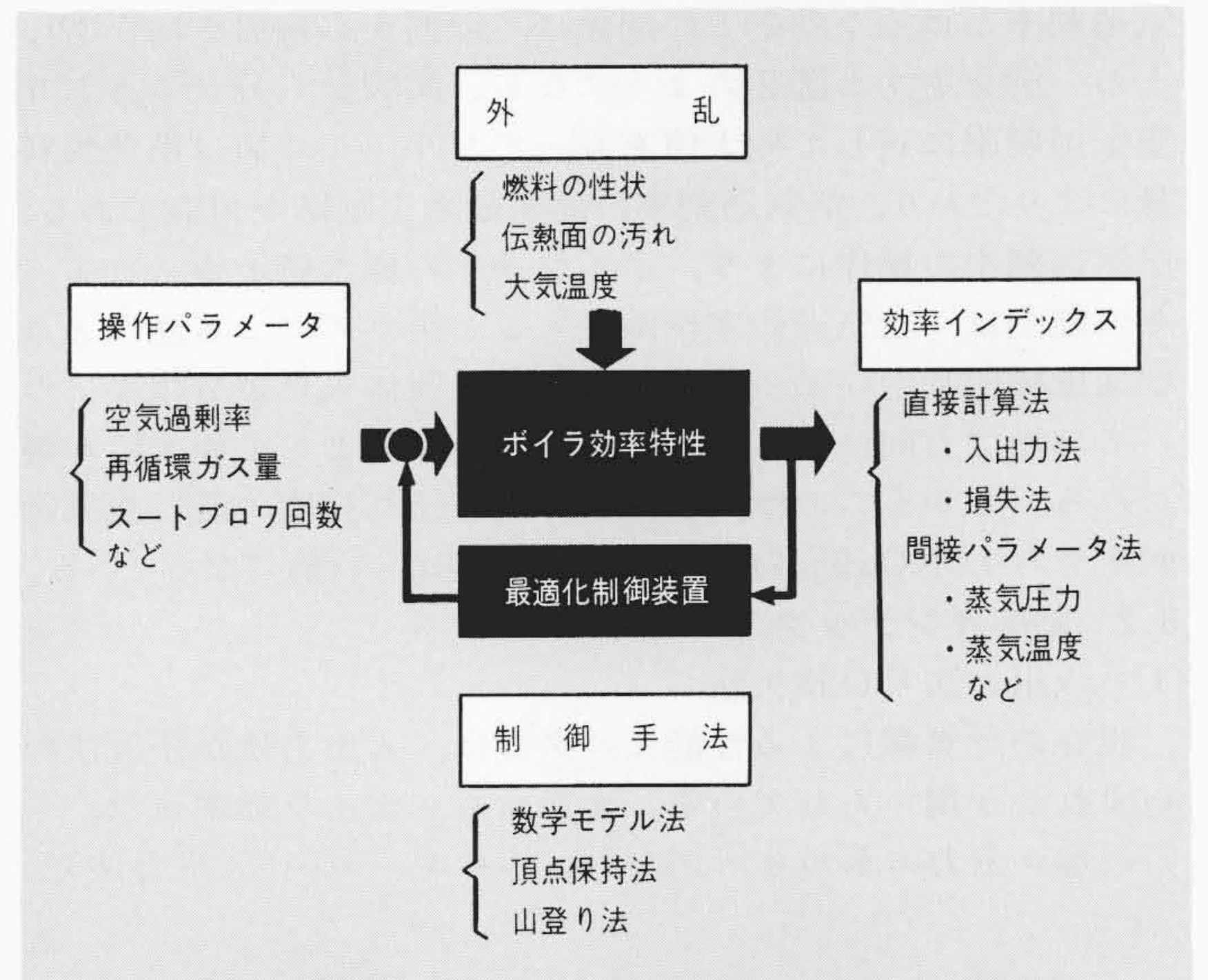


図1 ボイラ効率制御の概念 燃料の性状や伝熱面の状態により、変動するボイラ効率の最適運転条件を求める。感度の良い操作パラメータと効率インデックスを選ぶこととプロセス雑音に強い制御方式にすることがポイントである。

ガス量などの効率に関連する操作パラメータを、燃料の性状や伝熱面の汚れなどで変動に対応して最適値に調節しようとするものである。多入力、単一出力の最適化制御となるが、実際は、効率インデックスに入出力法などで直接に求めた値を用いると、上記したように感度や速応性が悪い。そのため、蒸気温度、圧力などのプロセス変数を効率の増減方向を示す指標として利用する方法を採るとすれば、制御対象は多入力、多出力と更に複雑となる。本研究では、これらの操作パラメータや効率インデックスを比較検討して、操作性、応答性の良いものを抽出して問題を単純化した。更に上記した定常的なプラント雑音に対しては、広帯域の周波数成分をもつM系列記号を注入して、統計的に処理する手法を適用した。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所機械研究所 工学博士 *** 日立製作所電力事業本部

3 効率制御対象の検討

3.1 操作パラメータ

効率制御の対象を選択するため、ボイラの主要な運転状態値を変えたときに効率に対しどれだけ影響を与えるかを計算してみると、表1に示すようになる。これらの中で効率に対する影響度が大きく、しかも負荷を変えずに機器の制限にかかわらずに操作可能な項目があれば、これが効率制御の操作対象となり得る。同表のボイラ効率に対し影響度の大きいものを拾い上げると、燃料中のH₂分、空気中の水分、節炭器出口のO₂分、スートブロワ蒸気量、スチームコンバータの蒸気量がある。これらのうち燃料中のH₂分、空気中の水分は外部条件に関するもので、制御は不可能である。またスートブロワの蒸気量、スチームコンバータの蒸気量は、ボイラ運転上必要量が流されており、効率向上だけのために操作するわけにはゆかず効率制御の対象とならない。節炭器出口のO₂量は、バーナ燃焼度やNO_x(窒素酸化物)量などに関連をもつが、発電出力に影響を与えることなく、空気過剰率を操作することにより制御が可能である。また、効率に対する影響度も大きく、ボイラの効率制御の操作対象として最も適したものといえる。空気過剰率とボイラ効率との関係は、以前から検討されており、その一例を示すと図2のようになる。同図から分かりますとおり空気過剰率に対して極大値をもっており、この値は消費燃料量により変わり、空気過剰率の効率最適化制御が可能である。空気過剰率の操作により、ボイラ効率の極大値が得られる。その理由は、空気過剰率が減少すると排ガスによる熱損失及び通風補機動力が減少するが、他方、固体未燃焼分損失については増加方向にあるため、これらの加算として極大値が得られる。しかもこの極大値は、1.0～1.5%程度の低い空気過剰率であり、NO_x低減燃焼の面からも望ましい値になっている。

3.2 効率インデックス

(1) 入出力法及び損失法

現在の計算機による性能モニタでは、入出力法か損失法のいずれかが用いられている。すなわち、ボイラ効率 η_b は、
$$\eta_b = \text{出力エネルギー} / \text{入力エネルギー} \cdots \cdots (\text{入出力法})$$

表1 プラント状態量がボイラ効率に及ぼす影響 ボイラの主要な運転状態値を変えたときの効率への影響を示す。効率制御上の操作パラメータを検討する。

No.	項 目	各項目の変化量	ボイラ室効率に及ぼす影響(%)
1	大 気 温 度	1℃	0.039
2	燃 料 温 度	1℃	0.0045
3	燃 料 中 の H ₂	1%	0.659
4	燃 料 中 の H ₂ O	1%	0.073
5	空 気 中 の 水 蒸 気 分	—	0.104
6	排 ガ ス 温 度	1℃	0.044
7	E C O 出 口 O ₂	1%	0.253
8	スートブロワ蒸気量	1 t/h	0.132
9	ボ イ ラ ブ ロ ー 量	1 t/h	0.023
10	スチームコンバータ蒸気量	1 t/h	0.139

注：1. 燃料発熱量(高位)は1万kcal/kgとし、その他のデータは250MWクラスの値を使用した。
2. スチームコンバータ加熱蒸気の変化量は、重油加熱器以外に使用する分とした。
3. ボイラブローはすべて棄てられるものとして計算した。
4. 各項目の変化量1%とは絶対値を意味する。(例：O₂=2.0%に対する+1%とは、O₂=2+1=3%となることを意味する。)

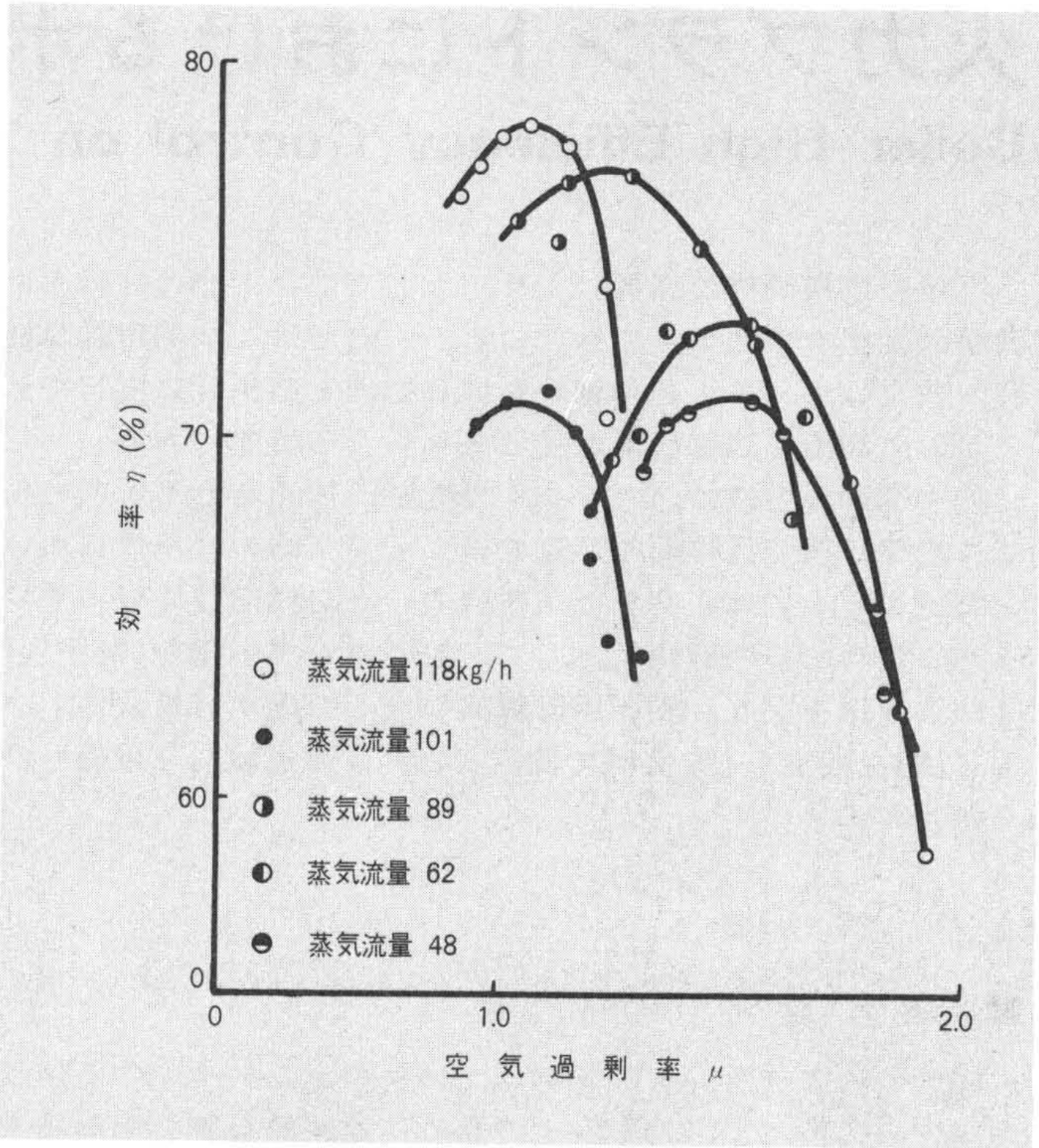


図2 空気過剰率とボイラ効率の関係 空気過剰率に対するボイラの効率山は、二次曲線で近似でき、負荷による変動が大きい。

$\eta_b = 1 - \text{熱損失} / (\text{出力エネルギー} + \text{熱損失}) \cdots (\text{損失法})$
で計算される。入力エネルギーは燃料の供給量と発熱量から、また、出力エネルギーは蒸気の重量流量とエンタルピ及び給水エンタルピからそれぞれ求める。熱損失は、乾排ガス損失、水蒸気蒸発損失、未燃焼分損失、ボイラ放射損失などの総和である。これらの方法はいずれも理論的には厳密な効率計算法であるが、効率制御で効率インデックスとして用いる場合、次の点で問題が残る。

- (a) 計算式を満足するすべてのデータを連続的に検出できない。
- (b) 計算結果の信頼度を必要な値にするために、すべての検出器、トランスミッタの精度を整合することが難しい。
- (c) 計算式はすべての変数が定常状態にあって意味をなすものであるが、各変数は常時変動している。また、多くの変数の変化時定数も大きい。

(2) 間接パラメータ法

多数の情報を使った複雑な計算の結果として効率を求める代わりに、たとえ多少の誤差があっても、効率と等価な変数を見付けて、それを連続的に測定する方法をとれば効果が大きい。以下で幾つかの変数につき考察する。

(a) 主蒸気圧力

主蒸気圧力は燃焼状態に鋭敏に反応する変数である。主蒸気圧力と空気流量との相関を調べた例を図3に示す。空気流量を方形波状に7%(p-p)で変えたとき、蒸気圧力は3%(p-p)で追従している。

(b) ドラム圧力

ドラム圧力は蒸発部の状態変化をよく表現するが、対流伝熱部の熱吸収量変化の影響は小さいので、総合的なインデックスとしては不十分と考える。

(c) 蒸気流量

蒸気流量は蒸気圧力と相似形の応答を示すことが確認さ

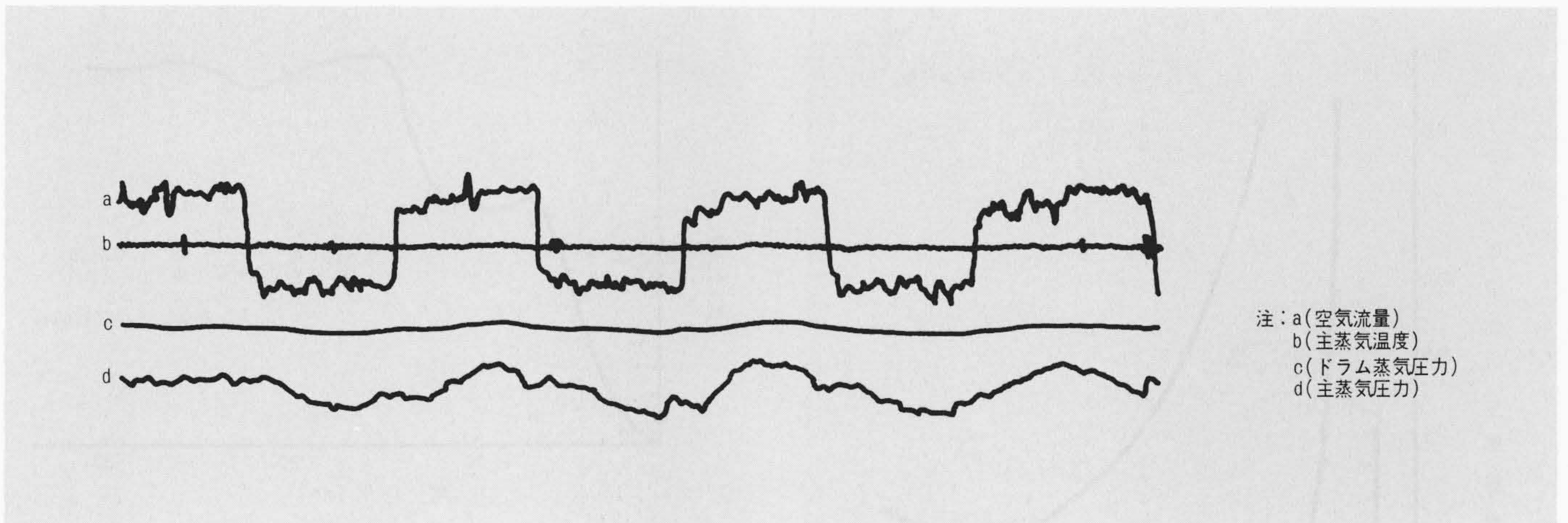


図3 空気流量方形波状変化に対する応答 空気流量変化に対して主蒸気圧力の変動が大きく、一次遅れに近い応答を示している。

れているが、流量計は圧力計に比べて精度の点で劣り、特に指示中心値が負荷とともに大幅に変わるので効率インデックスとするには問題である。

(d) 蒸気温度

図3のデータから分かるように、蒸気温度は蒸気圧力に比べて変化量も少なく、また遅れも大きい。

(e) 発電出力

プラントの総合的な効率インデックスとなり得るものであるが、蒸気流量と同様に検出精度の点で難しく、またタービン関係の影響も入るので、ボイラ効率インデックスには適さない。

以上から、操作パラメータとして主蒸気圧力が最も適すると言える。

4 M系列信号による効率変化の探索

4.1 プロセス雑音と探索信号

操作パラメータ及び効率インデックスが決定したとしても、効率変化を探索し、検出する方法について特別な工夫が必要である。図3から分かるように、プロセスには定常雑音が多く、また負荷変動があった場合には、操作パラメータによる効率変化との識別がいっそう難しい。前者の問題に対しては、操作パラメータの変化幅をできるだけ大きくすること、適当なフィルタを使用するなどの対策も効果があると思われるが、後者の問題は特に負荷追従運転で燃料量、給水量が変化するときには、その対策が必要である。これに対する一つの解決策として、操作パラメータにプロセス雑音や負荷変動とは相関のない探索信号を注入する方法が考えられる。

探索信号として正弦波や方形波を用いる方法もあるが、本研究ではプラント変数の揺動と相関をもたない疑似ランダム信号(M系列信号)の適用を図る。このM系列信号 $\hat{x}(t)$ は図4に示すように自己相関関数 $\phi_{\hat{x}\hat{x}}(\tau)$ がインパルス形状に近く、また2値信号であるため簡単に作成できるなどの利点をもっている。

4.2 M系列信号のパラメータと探索誤差

M系列信号は図4に示すように、振幅 a 、最小パルス幅 Δ 、最大シーケンス N のパラメータをもち、適用に際して探索誤差を考慮して、これらの設定を適切に行なうことが肝要である。

M系列信号を入力に用いた場合、プロセスのインパルス応答 $g(\alpha)$ は、入力 $\hat{x}_1(t)$ と出力 $y(t)$ との相関関数 $\phi_{\hat{x}_1 y}(\alpha)$ を計算することから求められる。

$$g(\alpha) = \frac{2N}{(N+1) \cdot \Delta \cdot a} \left\{ \phi_{\hat{x}_1 y}(\alpha) - \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \phi_{\hat{x}_1 y}(\alpha) d\alpha \right\}$$

$$= \frac{2N}{(N+1) \cdot \Delta \cdot a} \left\{ \phi_{\hat{x}_1 \hat{y}}(\alpha) - \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \phi_{x_1 y}(\alpha) d\alpha \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 α_1, α_2 はバイアス補正項で、 $N \cdot \Delta$ に近い値を選ぶ。いま、プロセス特性 $g^*(\alpha)$ と(1)式で求められた $g(\alpha)$ との偏差から、次の(2)式で表わす評価式で探索誤差 ε を検討する。

$$\varepsilon = \frac{\int_0^L |g^*(\alpha) - g(\alpha)| d\alpha}{\int_0^L |g(\alpha)| d\alpha} \dots \dots \dots (2)$$

図5に、プロセス特性 $g^*(\alpha)$ を(3)式として、探索誤差 ε を計算した結果を示す。

$$g^*(\alpha) = e^{-\frac{\alpha}{T}} \dots \dots \dots (3)$$

図5で、最小パルス幅 Δ とプロセス時定数 T の比(BT)に対して探索誤差 ε は極小値をもつことが分かる。この理由は、 BT が小さすぎると(1)式中のバイアス補正項が正しく求められなくなり、また BT が大きすぎるとM系列信号の自己相関

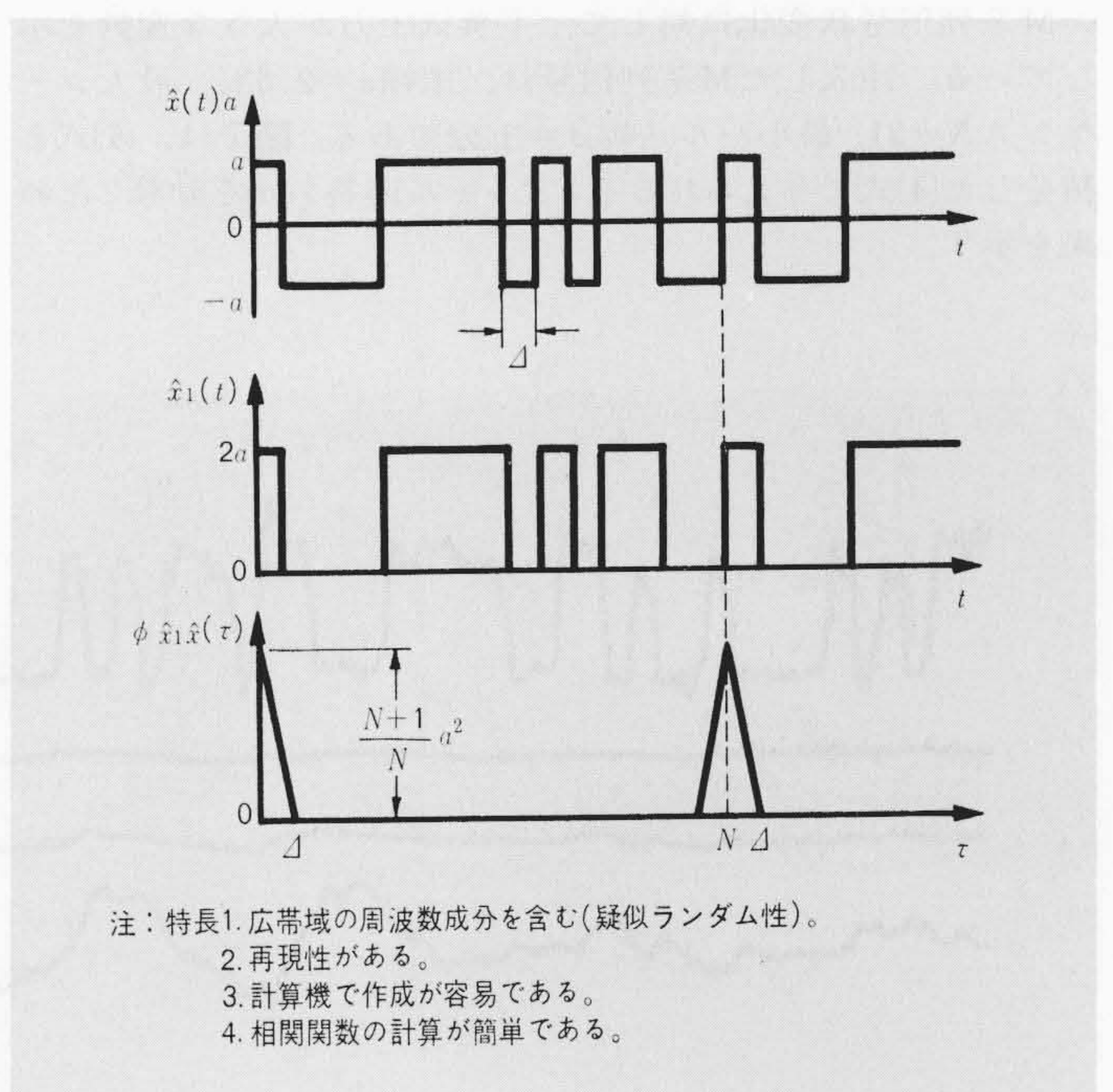


図4 M系列信号の特性 振幅 $2a(p-p)$ のM系列信号は、振幅 a^2 のインパルス信号に相当する。

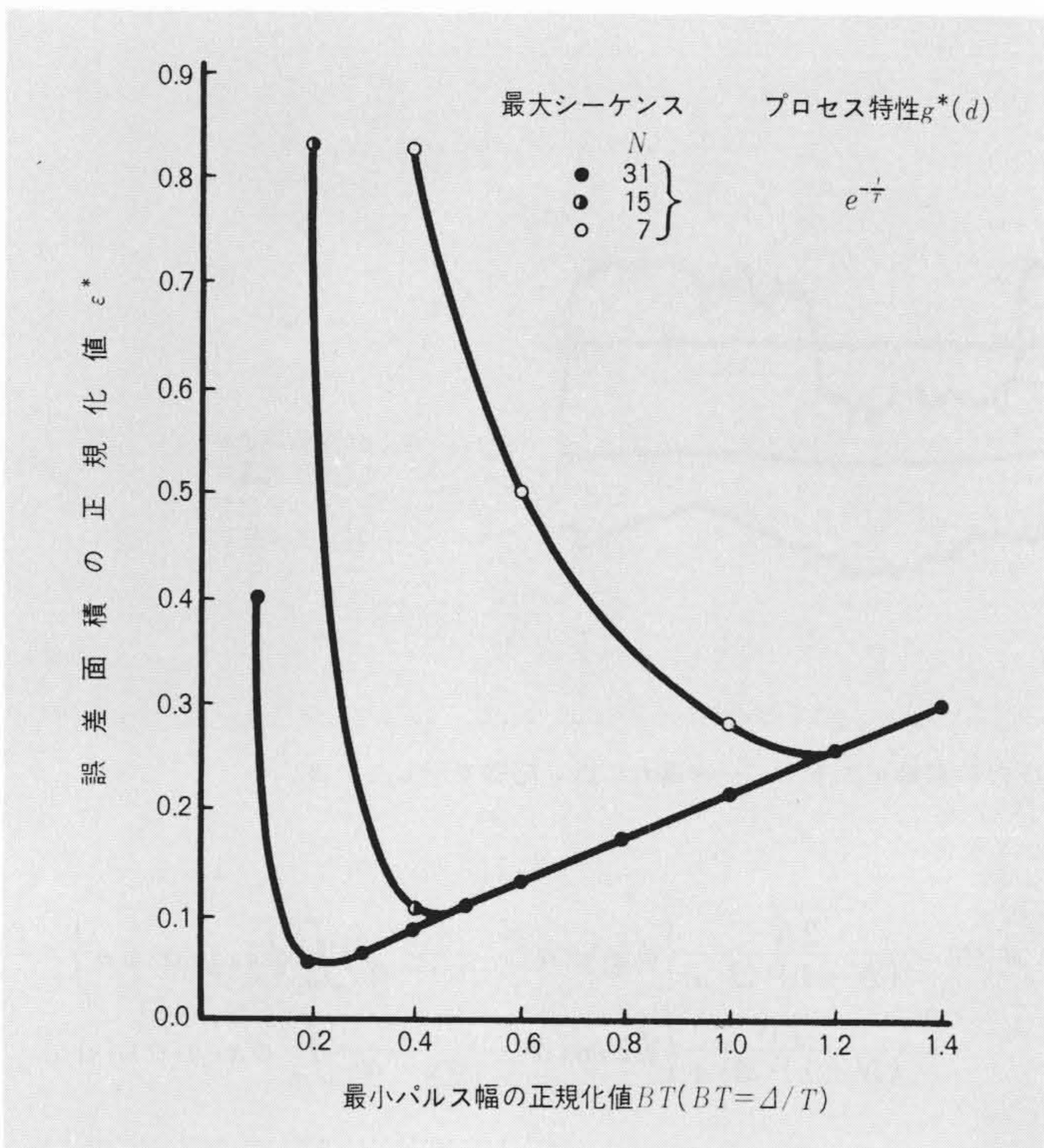


図5 最小パルス幅と同定誤差 M系列信号の使用に際しては、最小パルス幅 Δ 、最大シーケンス N を対象プロセス時定数 T に対して適切に定める必要がある。

関数 $\phi_{\hat{x},x}$ が三角波であり、インパルス形状からずれることに起因する。また、最大シーケンス N が大きくなるにつれ探索誤差は少なく、 BT の最適値は小さくなる。 $N=31$ を選ぶと BT の最適値は0.2で、これはM系列信号の周期 $N \cdot \Delta$ がプロセス時間数のほぼ6倍に相当する。

4.3 実機試験

発電出力175 MW用のドラムボイラを用いて、押込通風機の操作系にM系列信号を注入した例を図6に示す。空気流量のM系列信号状変化に対して、主蒸気圧力が大きな変動を示している。注入したM系列信号は、振幅 $a=2.5\%$ 、最大シーケンス $N=31$ 、最小パルス幅 $\Delta=1$ 分である。図7は、(1)式を積分した(4)式で与えられるインデシャル応答 $\gamma(\alpha)$ を計算した結果を示す。

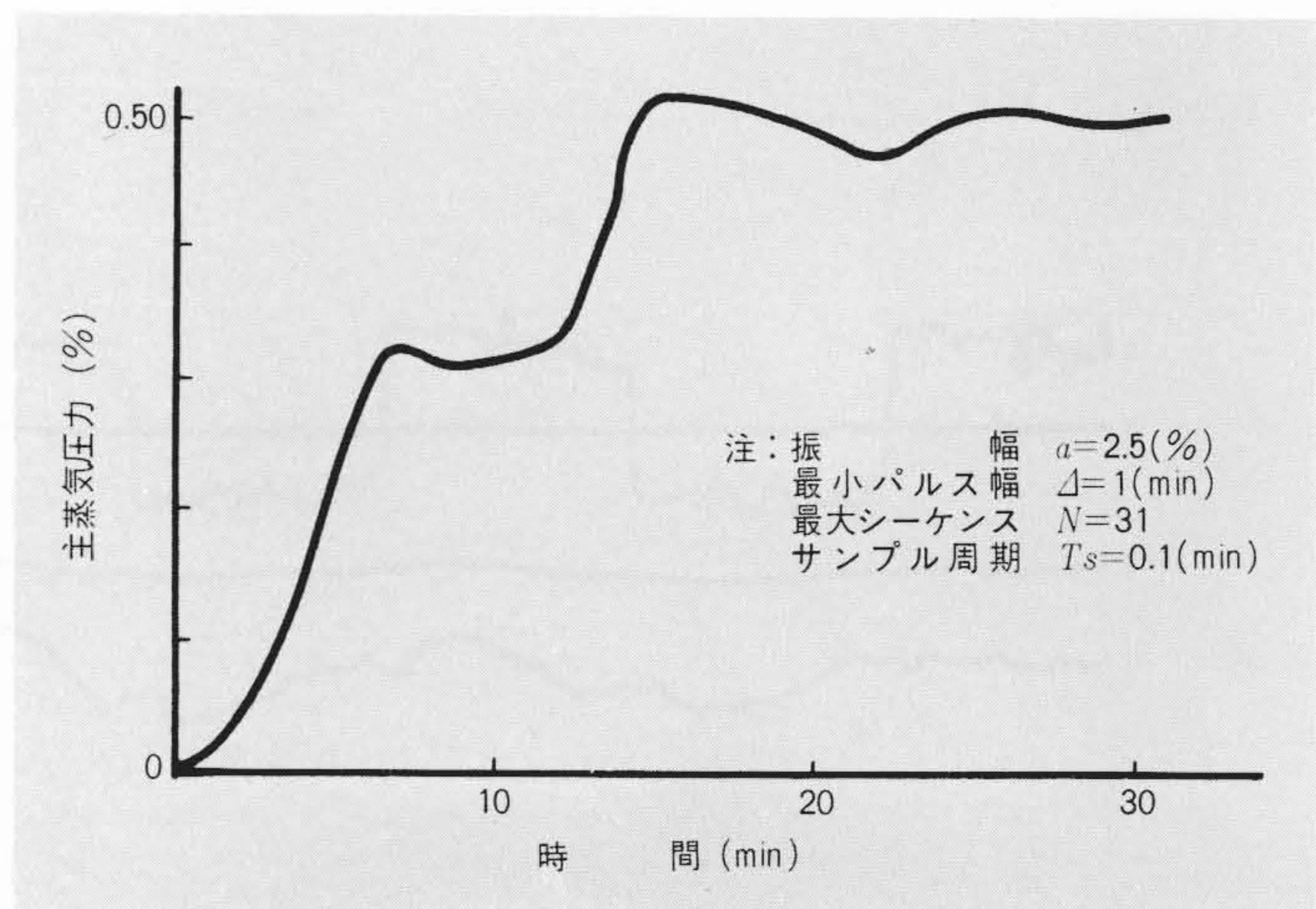


図7 主蒸気圧力のインデシャル応答例 図6の実験データから求めたM系列信号によるインデシャル応答の計算例を示す。

$$\gamma(\alpha) = \int_0^{\alpha} g(\alpha) d\alpha \quad \dots\dots\dots (4)$$

図7から、空気流量の変化に対する主蒸気圧力の応答は、時定数5分の一次遅れでおおむね近似できそうである。この場合、 $BT=0.2$ となりM系列信号のパラメータ設定は適切であると言える。

5 最適化制御方法

ボイラ効率最適化制御を実施する上では、プロセス雑音の中から精度良く効率を探索する手法が必要である。この解決のため、効率探索に雑音の影響を受けにくい相関法による制御方式を採用し、探索信号に疑似ランダム性をもつM系列信号を導入した。ところで、制御方式の立案に際し、この効率制御を制御用計算機あるいはマイクロコンピュータなどで実施させることを念頭に置くと、相関法は他の手法、例えば頂点保持法などに比べてアルゴリズムが複雑であり、また演算に要するデータ量も多いので、計算機の処理時間や記憶容量を少なくする工夫も重要となる。このような観点から、以下に示す制御アルゴリズムを開発した。

最適化制御を行なうプロセスの伝達関数(効率特性)は、操作パラメータ $\bar{x}$ 及び不確定パラメータ(外乱) u の関数であり、これを $G(s, \bar{x}, u)$ と表わす(s はラプラス演算子)。効率特性の

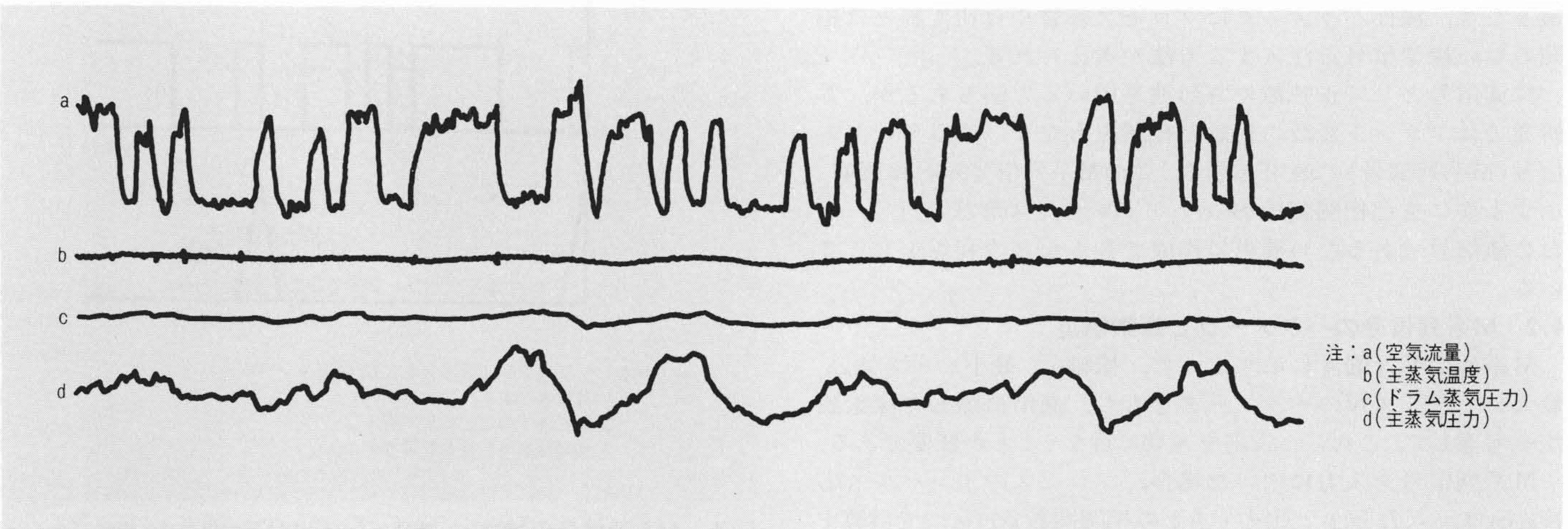


図6 空気流量のM系列信号状変化に対する応答 最小パルス幅 $\Delta=1$ 分、最大シーケンス $N=31$ のM系列信号を注入したときの応答を示す。

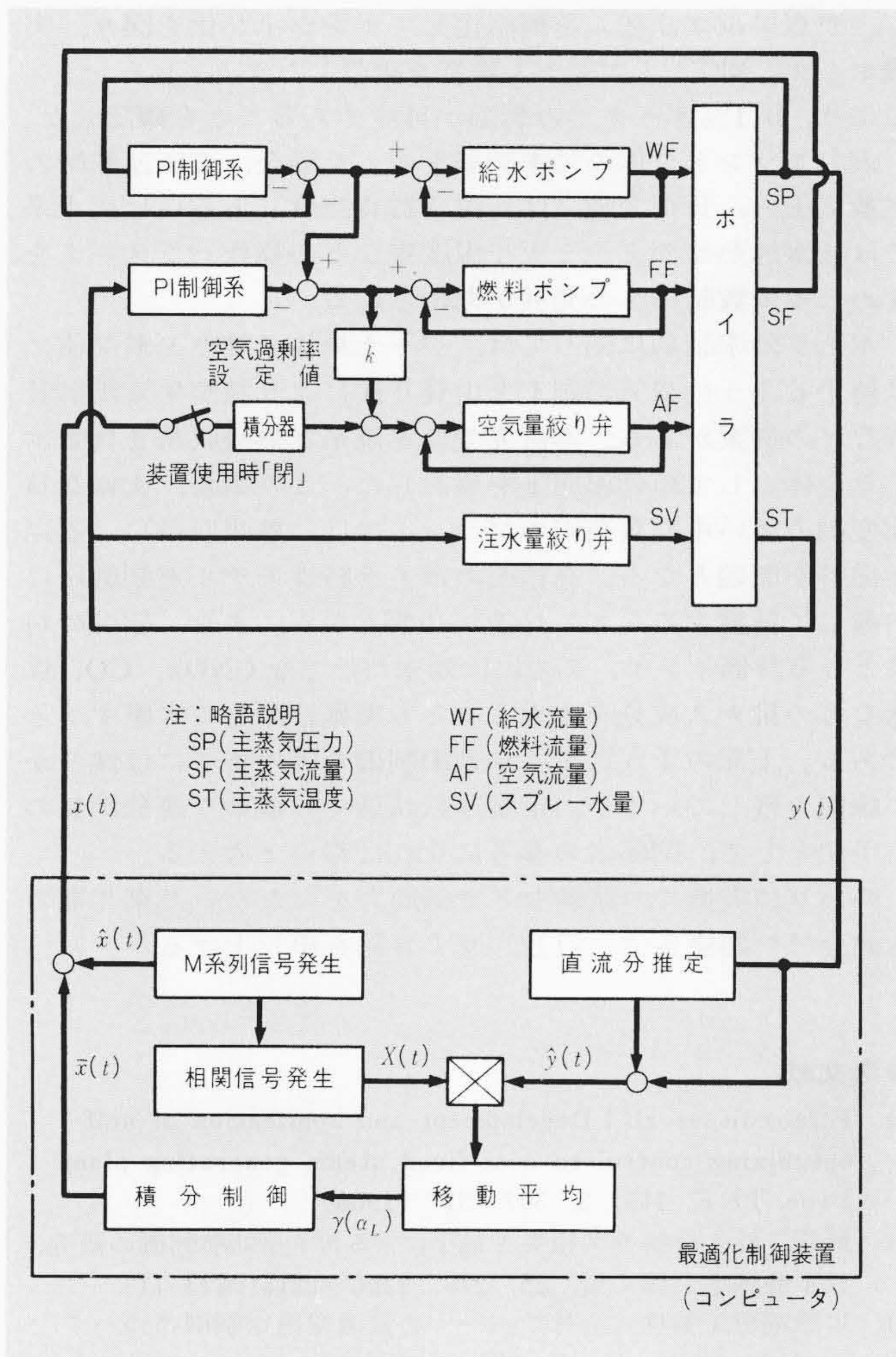


図8 最適化制御装置の機能ブロック図 空気流量の制御目標信号にM系列信号 $\hat{x}$ を注入し、主蒸気圧力信号と相関信号との相関関数から効率山の勾配 $\gamma(\alpha_L)$ を算出し、これを積分して、最適操作量 $\bar{x}$ を求める。

スタティックス部分を $\eta(x, u)$ とすると、関数 $\eta(x, u)$ と $G(0, \bar{x}, u)$ の間には次の関係が成立する。

$$\left. \frac{\partial \eta(x, u)}{\partial x} \right|_{x=\bar{x}} = G(0, \bar{x}, u) \quad (5)$$

更に、探索時間中は定常であると仮定すれば、 $G(0, \bar{x}, u)$ とM系列信号で探索したインディシャル応答 $\gamma(\alpha)$ とは次の関係が成り立つ。すなわちインディシャル応答の整定ゲインが効率山の傾きに比例することになる。

$$G(0, \bar{x}, u) \propto \gamma(\infty) \cong \gamma(\alpha_L) \quad (6)$$

次にこのようにして求めた効率山の傾きの値を用いて、効率最大点すなわち傾き零となるように操作パラメータ $\bar{x}$ を変える制御方式を考えた。

図8に、ボイラ効率最適化制御装置の機能ブロック図を示す。最適化制御装置は従来の給水流量、燃料流量、空気流量などの定値制御系と平行して設けた。この最適化制御方法の基本は、(6)式で示される効率山の傾き $\gamma(\alpha_L)$ を求めて、これを積分補償により操作パラメータを調節することにある。この効率山の傾き $\gamma(\alpha_L)$ を求める過程で、計算機の処理上の負荷を軽減するために以下の工夫を行なった。(1)式で与えられる $\gamma(\alpha_L)$ は、図9に示す相互相関関数 $\phi_{\hat{x}y}(\alpha)$ の $\alpha=0 \sim \alpha_L$ までの積分値(ドット陰影部)である。相互相関関数の計算での時間積分と上記の位相 α による積分を入れ替えると、(1)式は

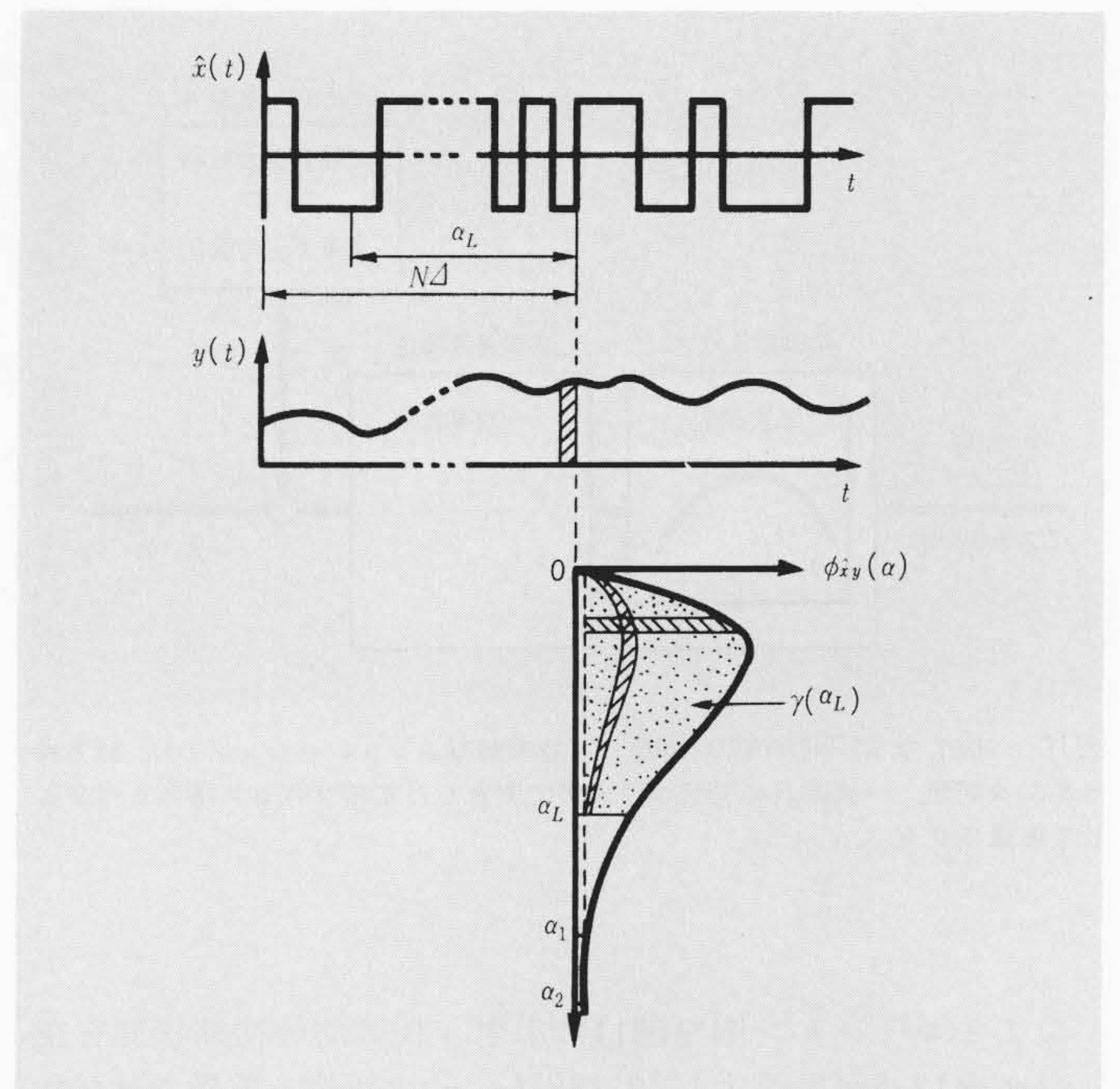


図9 インディシャル応答の逐次形計算法 位相 α による積分と時間 t による積分とを入れ替えて計算する。本文(7)式を参照されたい。

次の(7)式に変形される。

$$\gamma(\alpha_L) = K_1 \int_0^{\alpha_L} X(t) \cdot y(t) dt \quad (7)$$

$$X(t) = \int_{-\alpha}^{\alpha_L} x_1(t-\alpha) d\alpha - K_2 \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \hat{x}_1(t-\alpha) d\alpha \quad (8)$$

$$K_1 = \frac{2}{(N+1) \cdot \Delta \cdot a} \quad (9)$$

$$K_2 = \frac{\alpha_L + \Delta}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad (10)$$

(8)式で与えられる $X(t)$ は、探索信号 $\hat{x}_1$ の関数でこれを相関信号と呼ぶことにする。相関信号 $X(t)$ はあらかじめ初期値 $X(0)$ を求めておき、各時点では変化分を計算すればデータとして記憶しておく必要がない。サンプリング周期を T_s とすると次式で与えられる。

$$X(0) = \sum_{i=0}^p X_1(\Delta - iT_s) \cdot Ts - K_2 \sum_{i=0}^p \hat{x}_1(-\alpha_1 - iT_s) \cdot Ts \quad (11)$$

$$X(t) - X(t - Ts) = Ts [\hat{x}_1(t + \Delta) - \hat{x}_1(t + \Delta - (p+1)Ts) - K_2 \{\hat{x}_1(t - \alpha_1) - \hat{x}_1(t - \alpha_1 - (q+1)Ts)\}] \quad (12)$$

$$\text{ここで、} p = \frac{\alpha_L + \Delta}{Ts}, \quad q = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{Ts} \quad (13)$$

(7)式の時間積分は移動平均により近似すれば、積分演算に要するデータ記憶容量は極めて少量で済む。

6 シミュレーションによる制御方式の検証

制御方式の妥当性を確認するために、アナログ計算機と制御用デジタル計算機を用いてシミュレーションを行なった。5章でM系列信号を効率探索信号に用いた相関法による制御方法について述べたように、効率制御では雑音対策が重要な課題となるため、シミュレーションでは雑音特性に留意した。図10でシミュレーションに用いる効率特性を示す。雑音には実プラントでデータレコーダに収録した平常運転時の状態量変化を用いた。また、効率山モデルは汽水分離器付き小形貫流ボイラ²⁾での実験値を二次曲線で近似した。

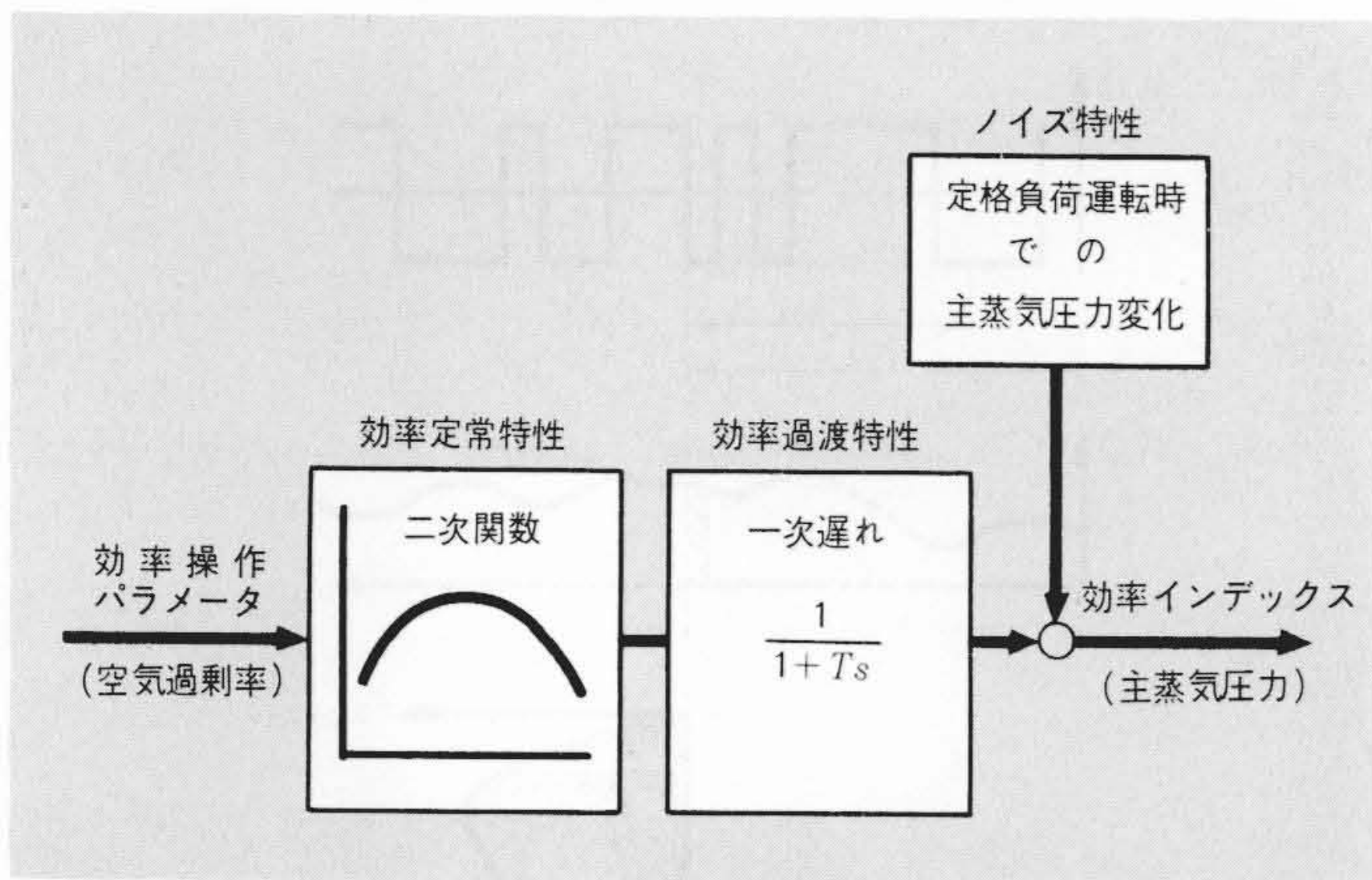


図10 ボイラ効率特性の模擬 効率制御シミュレーションでは、効率特性を二次関数、一次遅れのモデルに実機で測定した定常プロセス信号を雑音として重畳させる。

シミュレーション例を図11に示す。制御前の初期状態を空気過剰率13.5%に設定し、0.18%(p-p)の雑音を重畳させた状態での制御特性を示す。空気過剰率に $\pm 2.5\%$ の振幅で探索信号を加えた場合、約80分で最適値に達し、定常偏差0.03%という制御特性を示した。なお、このときサンプリング周期は1.0秒、制御周期は5.0秒で行ない、計算機の占有メモリ容量は約1.2k語、処理時間は約120msとなった。

7 結 言

わずかな効率偏差を検出し効率を制御するために、燃料の性状や伝熱面の状態で変動するボイラの空気過剰率の最適値を探索する場合を例に方法を検討した。探索精度を向上させるための一つの手法としてM系列信号を用いた相関法を適用

し、演算アルゴリズムを簡略化してオンライン化を図り、実機ボイラで測定したプロセス雑音を重畳したシミュレーションにより、0.1%オーダでの制御が可能であることを確認した。

火力プラント全体の効率制御を考えた場合、変圧運転時の主蒸気圧力、負荷変動に伴う復水器真空度、あるいは給水系では給水加熱器のターミナル温度差などの操作パラメータを含めた多変数制御への発展が期待される。

ボイラ効率制御に関しては、バーナ単体の輝度を最高値に維持するように空気過剰率を山登り法により調整する制御装置などの提案がある³⁾。本研究では燃焼系と熱吸収系を含むボイラ全体としての効率向上を検討した。この場合、大幅な負荷変動の多い中間負荷用のプラントでは、熱吸収系による過渡応答が問題となる。高精度のボイラ特性モデルを制御系に内蔵して補償するなどの対策が必要となる。また、制御の対象となる評価インデックスには効率だけでなくNO_x、CO、煤塵などの排ガス成分を含めることも実施に際して考慮すべきである。上記のようにボイラ効率制御の実用までには幾つかの課題を残しているが、定常運転状態での微妙な運転調整の一手法として、関係者の参考になれば幸いと考える。

終わりに実機での試験などで御助力をいただいた東北電力株式会社の関係各位に対し、厚くお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) F.Moran et al.: Development and application of self-optimizing control to coal-fired steam generating plant Proc. IEE, 115, 2, 307~317 (1968)
- 2) 藤井, 外: 全排ガス損失を最小にするボイラ効率制御の研究, 日本機械学会論文集, 35, 279, 2206~2215(昭44-11)
- 3) 川惣電機工業株式会社: バーナの最適空燃比制御について (ランドパイロットメータ社), アプリケーションデータシート No. 101

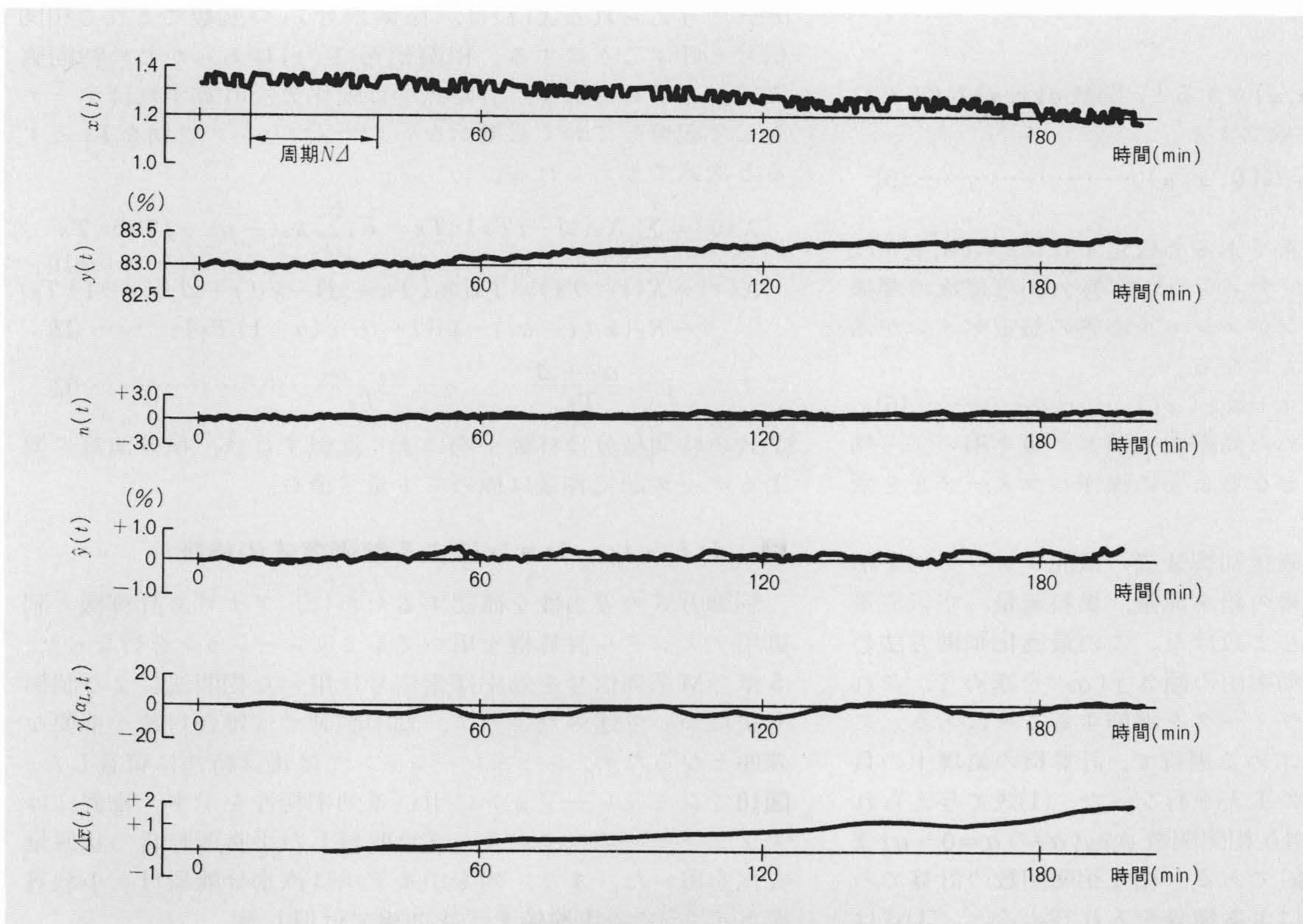


図11 効率制御シミュレーション例 図8の制御方式を、図10のボイラ効率特性に適用した結果を示す。