

## 貫流ボイラの DDC (直接デジタル制御) の実験

黒須 顕二 和田 利政 小林 道幸

## Direct Digital Control Experiments in a Once-through Boiler

By

Kenji Kurosu, Toshimasa Wada and Michiyuki Kobayashi

In this paper, the D.D.C. experiments in a mono-tube boiler by a digital computer are reported. The test boiler used was a once-through mono-tube boiler with pressurized furnaces.

The digital process control computer is installed instead of conventional analog controllers, and the boiler is operated by this Direct Digital Control device. The algorithm used in these D.D.C. experiments was a PID control, ratio control and feed forward control.

From these experiments, the following results are obtained:

1. The performance obtained by the D.D.C. system is good.
2. An operator is able to change the control mode and adjust control constants easily, if it is necessary. So an operator can select the suitable control mode and constants during the boiler operation.
3. D.D.C. system is stable, practical and accurate enough for the boiler operation.

目	次
§1 ま え が き	9
§2 DDCの概説	1
§3 DDCの制御式と制御モード	3
§3.1 制御式	3
§3.2 本実験に用いたプログラム	4
§3.3 制御モード	5
§3.4 シミュレーション	6
§4 実験装置	8
§5 実験結果	9
§5.1 MODE-1 による実験結果	9
§5.2 MODE-2 による実験結果	10
§5.3 MODE-3 による実験結果	11
§5.4 MODE-4 による実験結果	13
§5.5 $e e ^m$ 形モードによる実験結果	13
§5.6 結 論	15
む す び	15

## §1 ま え が き

1963年4月、アメリカにおいて“DDCに関する Guide Line”が発表されてから、DDCに関する研究、試験等が数多く行なわれるようになった。わが国においても、これに少し遅れて、いくつかのDDC用制御用計算機の開発、およびモデルプラントを対象としたDDC試験が行なわれつつある。これらのほとんどは化学プラントを対象としたものであるけれど、集中管理方式

の発展とあいまって、今後DDCはあらゆる分野に進展する様相にある。このような現状から、本研究所の実験用貫流ボイラを制御対象として、DDCの蒸気プラントへの適用の可能性を検証する目的で、実験を行ない、一部終了したので報告する。

## §2 DDCの概説

DDCは、Direct Digital Controlの略で広義には、制御動作の中で、デジタル量を扱い、何らかの形でデ

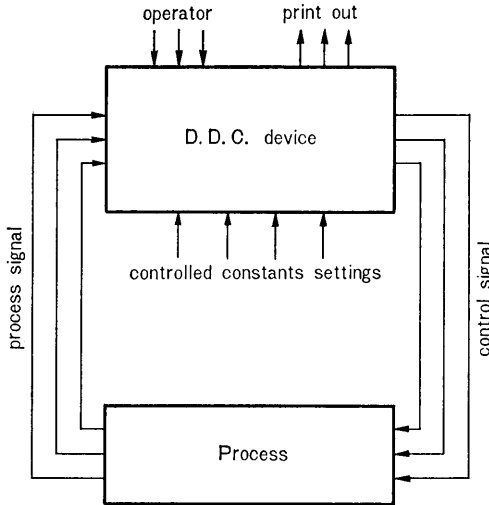


Fig. 2-1 D.D.C. system schematic diagram.

デジタル論理,あるいはデジタル計算を行ない,その結果によって制御を行なうものを,すべて含んでいる。

これに対して DDC とは,従来のアナログ型の調節計をデジタル方式に置き換えた場合の制御形式を意味すると,極めて狭義に用いられる場合がある。しかもこのような意味で用いられるのが,現在のところ普通である。ここで用いた DDC は内容的に,後者の狭義の意味で用いられている。

DDC をブロックで表わせば,広義には図 2-1 に示

すような構成のものである。

この DDC の構成は,さらに,図 2-2 のようないくつかの形態に分けることができる。

われわれの実験では,1つの計算機による多重ループの制御を目標として,図 2-2-iii の方式のものを使用している。

上にのべたように,DDC のシステムには種々の構成法がある。したがって,その個々の構成法により,それぞれの利点および問題点が出てくる。しかし,一般的には次のような利点を有しているといわれている。

性能上の利点

(1) 制御中の制御常数は物理的制約を受けないので,広範囲の値に任意に設定でき,しかも運転中にドリフトを生じない。また,設定値もデジタル数で設定されるため,任意の精度で設定出来る。

(2) 演算はすべてデジタル的に行なわれるので,精度が高い。

(3) 温度,流量等の測定量のスケール変換が容易に行なうことが出来,差圧から流量を算出する等の非線形演算も容易である。

(4) PID 制御方式以外のフィード・フォワード,カスケード,最適化制御をアナログ・システムよりはるかに簡単に,行なうことが出来る。

(5) 制御モードの変換が容易である。たとえば,プ

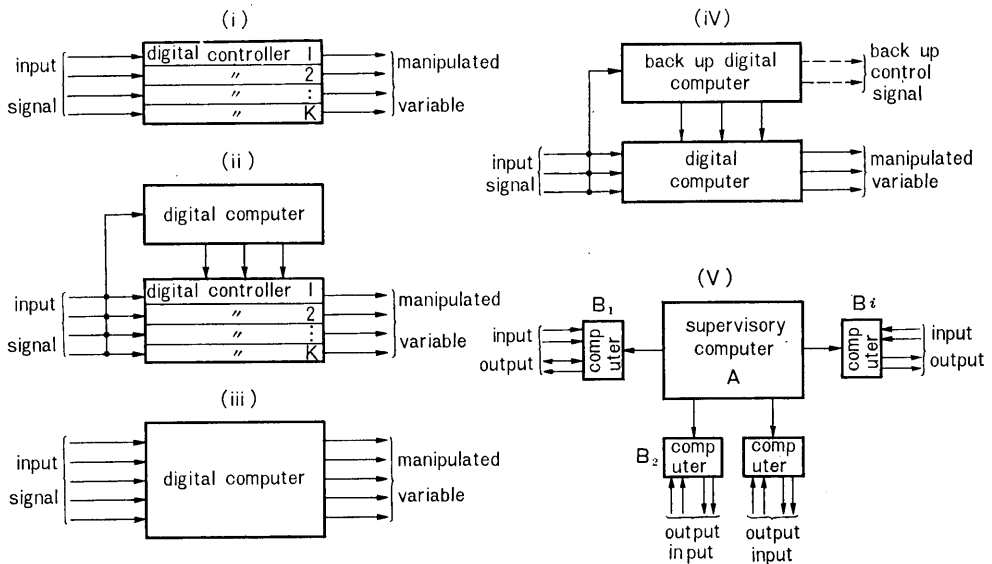


Fig. 2-2 D.D.C. system.

プラントの運転経験が増加するにしたがい、プラントの特性に関する情報が増加または変化してくる。それに応じて、プログラムを変えるだけで、運転中にプラントに適した制御モードに変換可能である。

(6) データ・ロギングが可能である。

経済上の利点

(1) 計算機1台で多ループを制御することによって、計装設備費を低減することが可能である。しかもプラントの規模が大きくなる程、その可能性が高い。

(2) 最適制御との組み合わせによって生産コストを下げる事が出来る。

(3) プラントの自動発停システムと結合することによって、システムの統一、簡単化が可能である。

以上の利点を考えると DDC は、大型プラント、最適制御によるメリットのあるプラント、高精度制御を要求されるプラント等に適しているということになる。

以上、DDC の利点のみ述べたが、計算機1台で多数ループが制御出来る多重化の可能性は、逆に欠点にもつながる。すなわち、計算機1台の故障は、全プラントの運転停止、あるいは、損傷という結果をもたらす。これは従来の局所的な制御系システムでは、なかったことである。また、デジタル化の採用によって1ビットの情報の誤伝送も、場合によって致命的結果をもたらす。このような理由で、DDC の実用化には、計算機の信頼性の増大が重要な課題となる。

このような観点から小形プラントを対象とした DDC のフィールド・テストが開始された。日本においては1966年6月に味ノ素社の準商用プラントに横河電気の YODIC-500 を用いた DDC システムが稼動している<sup>1)</sup>。

この試験ループは発酵槽を対象としたもので、測定点16個、制御点8個、6ヶ月間の運転中の稼動率は99.9%と好成績をあげている。この他、三菱石油、千代田化工、北辰電機の3社で製油所の DDC の実用化試験を行なっている<sup>2)</sup>。

現在までのテストは化学プラントを対象としたものが殆んどであるけれども、蒸気原動所の運転、船舶航行についても、計算機による高度集中制御が考えられている現状をみると、船用蒸気プラントに対する DDC の適用の可能性を検証しておくことは非常に有意義と思われる。

こういう次第で、1966年より船研においても貫流ボイラの DDC 実験がはじめられた<sup>3)4)5)6)</sup>。

### §3 DDC の制御式と制御モード

#### §3.1 制御式

まず、普通に蒸気プラントで行なわれている制御方式を考えると、次のようなものがある。

(1) フィード・バック方式

- (a) 比例 : P
- (b) 積分 : I
- (c) (比例+積分) : PI
- (d) (比例+微分) : PD
- (e) (比例+積分+微分) : PID
- (f) オン・オフ

(2) フィード・フォワード方式

- (a) 比率制御
- (b) 外乱検出

(3) カスケード方式

前述の方式の中で最も汎用性のあるものは、PID 動作であり、操作量が次式で表わされるものである。偏差を  $e(t)$ 、操作量を  $u(t)$  で表わすと

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3-1)$$

ここで、 $K_p$  : 比例ゲイン  $T_I$  : 積分時間  $T_D$  : 微分時間である。

(3-1) 式で表わされるような PID 動作を DDC で実現するには現在の所2つの方法がある。1つは連続系の (3-1) 式を差分方程式で直接的に変換し、

$$u_n = K_p \left\{ e_n + \frac{\Delta T}{T_I} \sum e_n + \frac{T_D}{\Delta T} (e_n - e_{n-1}) \right\} \quad (3-2)$$

で近似するものである。

ここで、添字  $n$  は  $n$  回目のサンプルを表わし、 $\Delta T$  はサンプリング周期を表わす。

同じ形に属するが、出力として  $u$  の微分を採用する場合もある。すなわち出力  $V_n$  は

$$V_n = \frac{u_n - u_{n-1}}{\Delta T} = K_p \left[ e_n - e_{n-1} + \frac{\Delta T}{T_I} e_n + \frac{T_D}{\Delta T} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \right] \quad (3-3)$$

である。

この場合、出力  $V_n$  は積分性のある操作器に入れる必要がある。前者を位置形、後者を速度形と称している。

第2の方法は、実際の調節計の動作特性を忠実にデジタル的に模擬するやり方である。(3-1) 式は理想的な調節計の場合で、実際はこれと異なる。

実際の調節計の伝達関数は (3-1) 式から求まる伝達

関数

$$K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I S} + T_D S \right) \quad (3-4)$$

と異なって

$$K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I S} \right) \left( \frac{1 + T_D S}{1 + \frac{T_D S}{\gamma}} \right) \quad (3-5)$$

の形をしている。

(3-5) の形の伝達関数を状態空間法 (State-space method) とか、パルス伝達関数でサンプル値系に書き直す方法が第2の方法である<sup>7)</sup>。

第1の方法は、P, I, D 各動作の相互干渉がなく、簡単であるのが特長である。

第2の方法は、従来の調節計と、ほとんど同じ動作をする点、好ましいけれども、やや複雑である。

本実験では、1制御ループあたりのプログラムの所要ステップ数をなるべく短かくすることを目標としたので、第1の方法を採用した。さらに、既存の操作器を使用する関係で、位置形の制御式を用いた。種々の制御式を組み合わせを行なうためには、位置形の方が便利である。

§3.2 本実験に用いたプログラム・

フロー・チャート

本実験に使用したプログラムのフロー・チャートを図 3.1 および図 3.2 に示す。図 3.1 は DDC 全体のフロー・チャートで順序に従って説明すると、次の通りである。

ステップ1……制御常数, 目標値の設定を行なう。

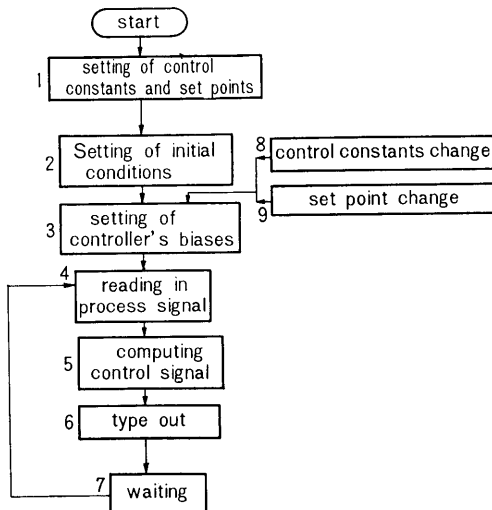
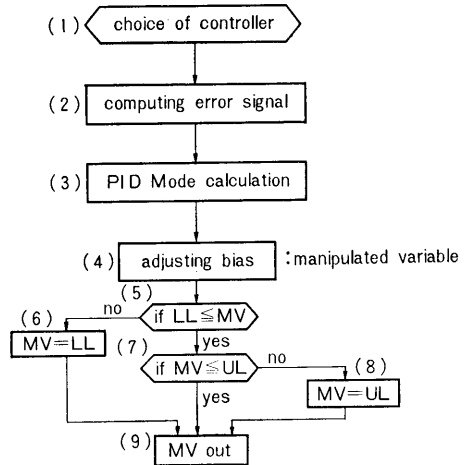


Fig. 3.1 Flow chart of overall D.D.C. program.



MV : manipulated variable.  
LL : lower limit.  
UL : upper limit.

Fig. 3.2 Flow chart of computing program for control logics.

ステップ2……カウンターのリセット, 調節計の初期値, バイアスの設定を行ない作動準備を行なう。

ステップ3……DDC の操作信号を, プラントの手動操作出力と手動で一致させ, オンライン運転に入る。

ステップ4……制御量の読み込みを行ない結果をストアする。

ステップ5……操作出力を計算して, 各操作端に出す (このステップの詳細は図 3.2 に示す)

ステップ6……モニター結果を印字する。

ステップ7……希望するサンプリング周期となるよう時間待ちを行なったのち, ステップ3に戻り, 以上の動作を繰り返す。

ステップ8, 9……運転中に, 目標値, 制御常数を変えたい時, このループにジャンプさせる。

図 3.2 はステップ5の制御演算部分のフロー・チャートである。詳細を次にのべる。

(1) まず, このブロックにステップが進むと調節計の選択とサンプリング周期の選択を行なう。

(2) 目標値から測定値を引算して偏差を求める。

(3) 偏差を入力として制御式によって, 操作量の計算を行なう。

(4) この結果にバイアスを加えて, これを操作量とする。

(5)~(8) このステップはプラント保護用の操作量リミッターで, 操作量があらかじめ与えられた制限範囲内であれば, そのまま(9)のステップへ行く。

Table 3-1 Programming sheet.

XA/TEMP;	A/PIDI;
B/TSET;	ST/PIDI;
ST/EIN;	XA/ERA;
MD/EIN;	B/ERB;
XJ/;	ST/DII;
MA/KP;	MD/DII;
FS/I7;	XJ/;
ST/DIO;	MA/TD;
ST/ERA;	D/DT;
MD/DIO;	QA/;
XJ/;	A/DIO;
MA/DT;	A/PIDI;
D/TI;	ST/EOUT;
QA/;	XA/ERA;
	ST/ERB;

もし、制限値より大きければ最大制限値、小さければ最小制限値をそれぞれ操作量として記憶し、ステップ(8)に行く。

(9) このようにして与えられた操作量は、D-A変換器、電空変換器を通して制御バルブに伝えられる。

表 3-1 に、上のべた差分型 PID 制御式のプログラムの一部〔ステップ 5-(2), 5-(3)〕を示す。

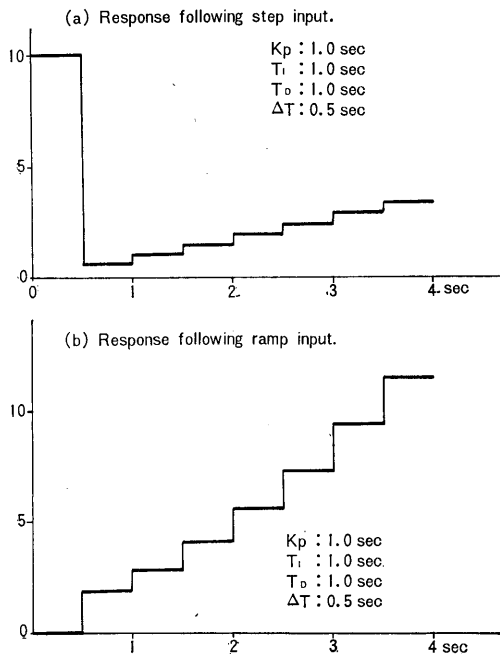


Fig. 3-3 Typical response of difference type PID controller.

### 所要時間

1 サイクルの所要時間は、ロギング 6 点 (3 桁が 4 点, 4 桁が 2 点) の場合約 13 秒, 内訳としては入力走査 (54 点読み込み) 約 2 秒, 演算時間約 2 秒, 印字時間約 9 秒である。

### ステップ応答

このプログラムによる PID 制御式のステップ応答を図 3-3 (a) に示す。また、直線入力に対する応答を図 3-3 (b) に示す。

### 保護回路

このプログラムでは、操作量にリミッターがあるだけで、プログラム内にその他の安全保護設備はない。しかし、出力部の D A 変換器がホールド回路を持っているため、計算機が故障して停止した場合でも、故障以前の操作量を保持出来ること、および出力零に対しては給油が止るとか、出口弁が開くとか、安全側にサーボバルブが動作するようループを構成しているの、プラントの保護は保証されている。

### §3-3 制御モード

本実験では、次のような考え方で実験すべき制御モードを選んである。

すなわち、既設、実験用小形貫流ボイラの制御系は、§3-1 にのべた代表的制御式を大体含んでいる。したがって、これらのアナログ形の制御系をすべて DDC におきかえて、その動作状況を比較すれば、DDC の実用性と問題点が検討出来る。もちろん DDC の利点は、非線形論理を含んだモードを容易に作れることにあるが、ここではこれを中心課題におかず、これについては、ただ  $e|e|e^m$  形モードの実験を行なった。

(1) MODE-1: このブロック線図を図 3-4 に示す。このモードは燃料流量  $F_0$  を操作量として、出口温度

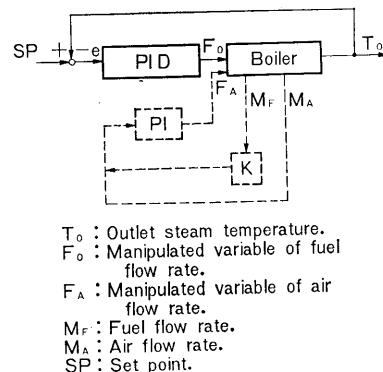


Fig. 3-4 Mode-1 (without dotted blocks). Mode-4 (overall).

$T_0$  を制御するものである。すなわち出口温度と目標値との偏差を PID 調節計に入れ、その出力で燃料流量を制御するものである。

(2) MODE-2: このブロック線図を図 3-5 に示す。MODE-1 のループのみでは、給水外乱に対する応答が遅くなる。したがって、これを補償するために MODE-1 のループに給水外乱  $F_w$  を検出して、その給水外乱の大きさに比例した大きさの燃料操作量を加えるものである。このループはフィードバック回路にフィード・フォワード回路を加えて、出口温度応答の応答を改善するループである。

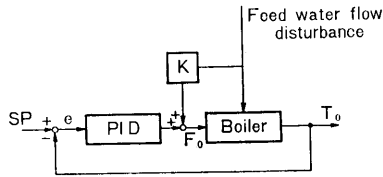
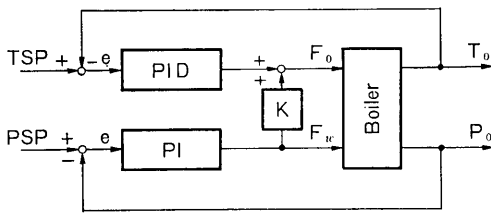


Fig. 3-5 Mode-2.

(3) MODE-3: このブロック線図を図 3-6 に示す。このループは MODE-1 のループにもう一つフィードバックループを加え、さらに給水流量  $F_w$  と燃料流量  $F_0$  の比をある一定の値に保つ比率制御を行ない、出口温度と、出口圧力  $P_0$  の制御を行なうものである。また、このループにおいて出口温度応答は出口圧力応答に比較して遅いため、両方のループを同じサンプリング周期で制御した場合と、異なるサンプリング周期で制御した場合の 2 種類を考える。



TSP: Temperature set point.  
PSP: Pressure set point.

Fig. 3-6 Mode-3.

(4) MODE-4: このモードは MODE-1 のループに空気流量制御を加えたもので、燃料流量と空気流量  $F_A$  との比率制御を行ない、過剰空気比を一定に保つことを目的とする。

図 3-4 で点線部が付加された場合がこれである。

### §3.4 シミュレーション

以上のようなモードを使用して DDC を行なう場合

(84)

第 1 に、サンプリング周期の決定、各制御常数の決定を行なわねばならない。

そのサンプリング周期は次のような制約を受ける。一台の計算機で、モニタ、印字、制御演算等を行なう場合、計算機は、それぞれの動作を時分割で行なう。このためサンプリング周期は、ループ数、演算量、作表量により長さの制約を受ける。また、逆にサンプリング周期の長い程、多くの演算処理が出来るか、計算速度のおそい計算機でも良いことになる。一方、制御されるプラント側からみると、出来るだけサンプリング周期の短い方が、安全でかつ良い制御が行なえる。したがって、両者のかね合いから、適当なサンプリング周期を定めねばならない。このため、本実験に使用したボイラーの過渡応答を簡単な系で近似して、デジタル計算機でシミュレーションを行ない、サンプリング周期、各制御常数の制御性に対する影響についての検討を行なった。

#### 3.4.1 ボイラ過渡応答について

図 3-7 に本ボイラー出口温度の過渡応答の一例を示す。この過渡応答は出口圧力を一定に制御しておいてそれぞれ給水外乱、燃料流量外乱をステップ状に入れた場合の出口温度の過渡応答である。この測定結果を次のような伝達関数で近似する。

(3-6) 式は燃料外乱について (一次遅れ+むだ時間) で近似し (3-7) 式は逆応答系で近似した場合である。

$$G_F(S) = \frac{0.5e^{-180S}}{220S+1} \quad (3-6)$$

$$G_{F'}(S) = \frac{0.5(1-180S)}{(150S+1)^2} \quad (3-7)$$

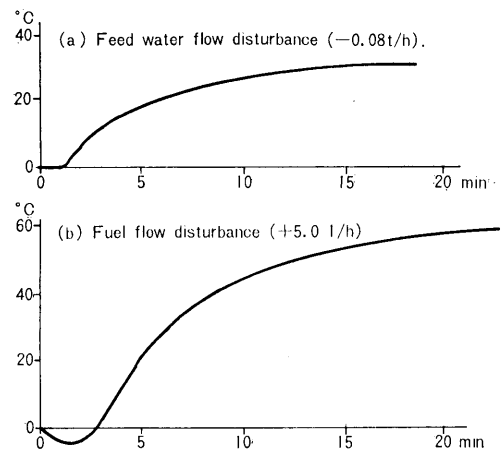


Fig. 3-7 Typical transient response of outlet temperature.  
(constant outlet pressure).

(3-8) 式は給水外乱について (一次遅れ+むだ時間) の系で近似したものである。

$$G_w(S) = \frac{1.3e^{-80S}}{170S+1} \quad (3-8)$$

§ 3.4.2 制御常数の決定

制御対象が (一次おくれ+むだ時間) で表わされる時, PID 動作の比例ゲイン, 微分時間, 積分時間を決定する方法は, アナログ形の場合, 色々ある。そして制御性を評価する基準を何を選ぶかによって, その最適値が変化する。その例を表 3.2, 表 3.3 に示す。

Table 3.2 Optimum settings for controllers.

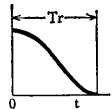
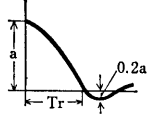
Without over shoot and minimum Tr 	PI	$K_p = 0.35 T / K T_L$ $T = 1.2 T$
	PID	$K_p = 0.6 T / K T_L$ $T_I = T$ $T_D = 0.5 T_L$
20% over shoot and minimum Tr 	PI	$K_p = 0.6 T / K T_L$ $T_I = 1.35 T_L$
	PID	$K_p = 0.95 T / K T_L$ $T = 1.35 T_L$ $T = 0.47 T_L$
$T$ : Process time constant. $T_L$ : Dead time. $K$ : Gain.		

Table 3.3 Optimum settings of controllers by Ziegler, Nichols' method criterion.

	$K_p$	$T_I$	$T_D$
P control	0.5 Kc	—	—
PI control	0.45 Kc	0.83 Tc	—
PID control	0.6 Kc	0.5 Tc	0.125 Tc
Kc and Tc is gain and period at stable limits.			

いずれにしても, 表 3.2, 表 3.3 に与えられている最適値はアナログ形に対するものであり, DDC に, そのまま転用出来るとは限らない。しかし, サンプリング周期と量子化レベルを細かにすれば, アナログ形に漸近することを考えると, 第一近似として, この最適値のテーブルを DDC の場合も転用することが出来る。

ただ, この時, サンプリング周期が, 安定性および制御性にどう影響するかを調べる必要がある<sup>9)</sup>。

(i) サンプリング周期の安定性におよぼす影響

これは連続系による近似によって, その傾向を次のように求めることが出来る。サンプリング周期  $\Delta T$  が短い時, サンプラとゼロ次ホールド回路の結合は, サンプリング周期の半分の純粹むだ時間で近似できるから<sup>10)</sup>, プラント・モデルとして  $\frac{ke^{-LS}}{1+TS}$ , フィードバックとして単一フィードバックを考えた時の閉ループの特性方程式を求めると

$$1 + \frac{ke^{-LS} \cdot e^{-\frac{\Delta T}{2} S}}{1+TS} = 0 \quad (3-9)$$

となる。

上式で  $L + \frac{\Delta T}{2} = (1+\alpha)L$  とおき, さらに

$$e^{-xs} = \frac{1 + \frac{1}{2}xs + \frac{1}{6}(xs)^2}{1 + \frac{1}{2}xs + \frac{1}{6}(xs)^2}$$

の近似を用いて, 多項式に直し, Hurwitz の安定判別法によって, 安定限界を求めると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{および } \frac{2T+(1+\alpha)L}{(1+\alpha)L} > k \\ \frac{\sqrt{21T^2+6T(1+\alpha)L+(1+\alpha)^2L^2}-3T}{(1+\alpha)L} > k \end{aligned} \right\} \quad (3-10)$$

$\frac{(1+\alpha)L}{T} = \beta$  とおき, 安定限界を  $\beta$  についてグラフに画くと図 3.8 のようになる。

図から分かるように  $\beta$  の小さい所では, 安定限界  $k_c$  は  $k_c = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\beta}$  によって表わすことが出来る。これを用いると

$$\frac{\Delta k_c}{k_c} = -\frac{d\beta}{\beta} = -\frac{d\alpha}{1+\alpha} \quad (3-11)$$

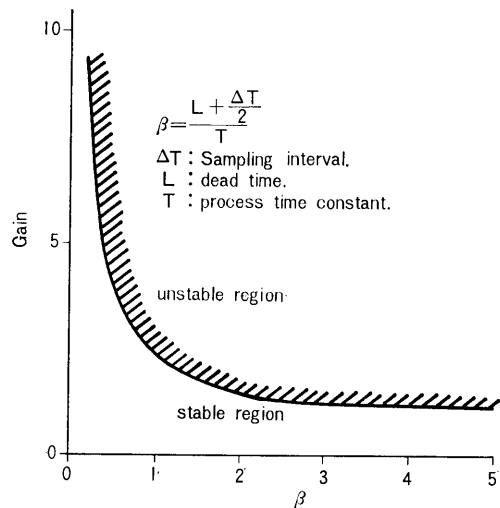


Fig. 3.8 Effect of sampling interval on stability.

が得られる。これから、安定限界はサンプリング周期にほぼ反比例して減少することが分かる。

(ii) サンプリング周期の制御性におよぼす影響

前述のように、安定限界はサンプリング周期に反比例して減少する。このことから、限界感度法によって最適調節ゲインを決定したとすると、その最適ゲイン  $k^*$  は  $k^*=0.5kc$  で与えられるので、 $k^*$  もサンプリング周期に反比例して減少させる必要がある。

また、振動周期  $P_0$  は、サンプリング周期に比例して増加するので、最適積分、微分時間もそれに伴って変化する。

以上の推論をシミュレーションによって確かめた計算例を図 3・9 に示す。この計算で制御性の評価には次式で表わされる基準を用いた。

$$SE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (3-12)$$

この式は制御偏差の二乗を積分したもので、小さい程制御性が良いと評価する。

この計算例から、サンプリング周期を長くすると、制御性が悪くなることが明瞭である。

しかし、比例常数  $k_p$  の低い時には、この傾向が余り顕著でない。

これらのことをさらに実験的に確かめるため、サンプリング周期を変えて、過渡時の  $SE$  を求めた結果を図 3・10 に示した。この結果はシミュレーションの結果と一致している。

以上差分方程式型 PID 制御式を使用したループのシミュレーションの結果をまとめると次のようになる。

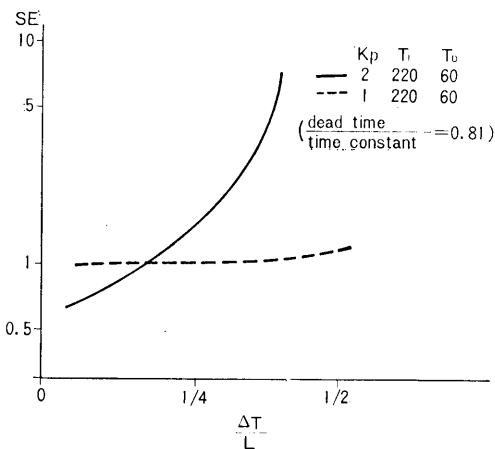


Fig. 3・9 Effect of sampling interval on control performance. (by simulation).

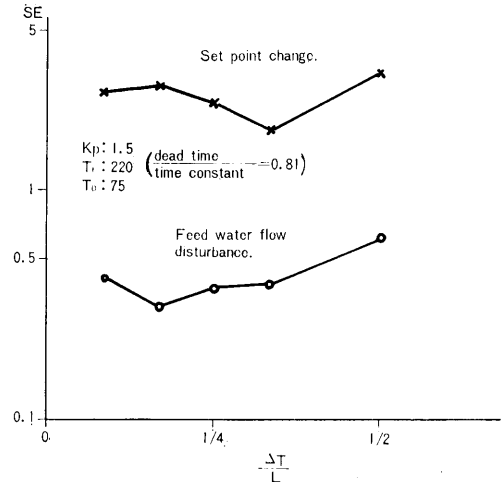


Fig. 3・10 Effect of sampling interval on control performance. (by experiments).

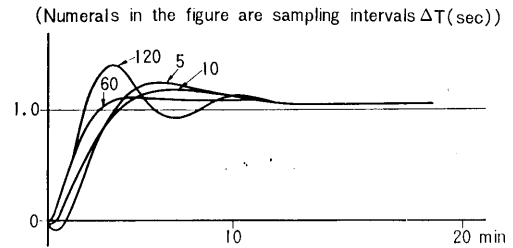


Fig. 3・11 Simulation study of the system with a reverse response.

1. 各制御動作は充分有効に働く。
2. 制御常数の決定はアナログ型の調整値を第一近似として使用しても良い。
3. サンプリング周期の安定性への影響は、図 3・8 で与えられる。したがって、サンプリング周期を変える場合は比例ゲインを、それに逆比例して変える必要がある。

なお、逆応答を有する系の場合は最適なサンプリング周期がある。この計算例を図 3・11 に示す。この系においては、かなりサンプリング周期の長い所(60秒)に最適サンプリング周期が存在する。

#### §4 実験装置

本実験に使用したデジタル装置とボイラの全体のブロック線図を図 4・1 に示す。本実験装置の詳細は、すでに、船研報告“ボイラの効率制御の研究”<sup>11)</sup>に記載してあるので、要目表を、表 4・1、表 4・2、および表 4・3 に示すとどめる。



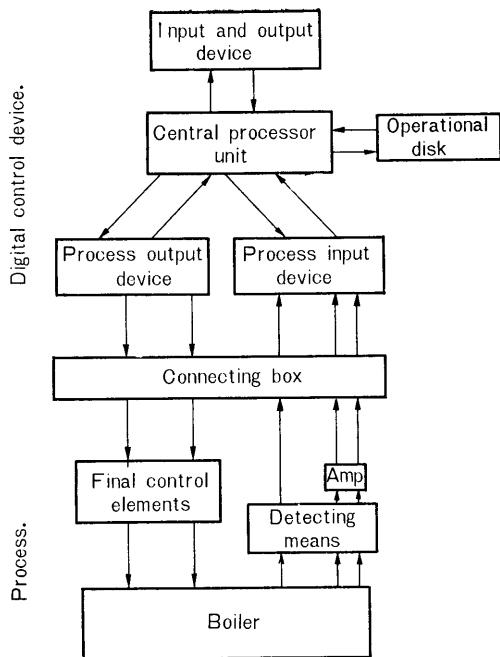


Fig. 4-1 D.D.C. system block diagram.

Table 4-1 Control computer (HOC-300).

Program	stored memory.
Word	Fixed point. 34 bits.
Instruction	26 (standard). 1 + 1 + 1/2 address.
Index	2.
Memory	Magnetic drum. 8192 words.
Clock frequency	230 kc/s.
Computing velocity	Add and subtract 0.3 msec. Multiply and divide 11.2 msec.
Error check	Over flow check. Parity check. Program check. Zero error. ADC error. Scanner error.

Table 4-2 Process input and output device (HOC-300).

Input	Analog 100. Binary 16.
Output	Analog 5. Binary 100.
AD converter	2-10 mA. 11 bits.
DA converter	10 bits. 2-10 mA.

Table 4-3 Once through boiler (characteristics and experiment conditions).

Type	Super charged mono-tube boiler.
Test condition	Steam pressure 50 kg/cm <sup>2</sup> . Steam temperature 400°C.
	Evaporating rate 600 kg/h.
Fuel	Heavy oil A.

## §5 実験結果

### §5-1 MODE-1 による実験結果 制御常数とサンプリング周期の影響

サンプリング周期と比例常数  $K_p$  とは非常に密接な関係があることは、前述した。その影響を実験的に調べるため、MODE-1 のループを使用し、サンプリング周期と比例ゲインを変え、目標値変更の実験を行なった。

#### (1) 目標値変更による実験

結果を図 5-1 に示す。この実験は出口温度の目標値を 400°C ⇄ 380°C の二通りに変化させた時の過渡応答である。まずゲイン一定で、サンプリング周期  $\Delta T$  を変えた時の結果を図 5-1 の(a)(b)(c)に示す。この例では  $K_p=5$  と一定に保ち、 $\Delta T$  を 5 秒、10 秒、30 秒と変えてある。 $\Delta T=5$  秒と 10 秒の場合では、その速応性は変わっていない。 $\Delta T=30$  秒では、その過渡応答は振動的になっている。

つぎに、サンプリング周期を一定値 30 秒として、比例ゲイン  $K_p$  を 5, 3.75, 2.5 と変えた場合の実験結果を図 5-1 の(c)(d)(e)に示す。

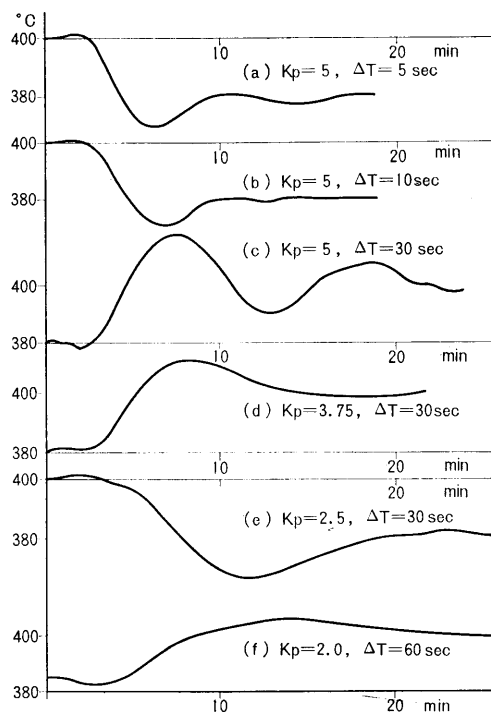


Fig. 5-1 Set point change experiment results by Mode-1.

この時の最適ゲインは  $K_p^*=2.39$  であり、 $K_p=2.5$  でオーバーシュートは少し大きいですが、かなり、良い応答となっている。

ゲインを、さらに小さくした場合には、図 5・2 に示したように、きわめてゆっくりした応答となる。図 5・1 (f) には、 $K_p=2.0$ 、 $\Delta T=60$  秒の例が示してあるが、比較的良い応答である。これは、サンプリング周期を長くした時、最適ゲインは低くなることを示す一例である。

(2) 給水外乱に対する応答

制御動作によって、温度一定の定常状態にある時、給水量を一定量手動で変化させ、外乱を加えた時の応答を実験的に調べた。

図 5・2、図 5・3、図 5・7 に実験例を示す。

図 5・2、図 5・3 には、その制御常数における目標値変更実験結果も同時に示してある。図 5・2 は  $\Delta T=10$  秒、 $K_p=20$  の場合で、比較的安定に平衡状態に復帰している。図 5・3 は、比例ゲインを大きくした場合でこの場合は完全に持続振動を起している。

これから、 $\Delta T=10$  秒の時、外乱に対する最適ゲインは 2.5~3.0 の間に存在することを推定出来る。

図 5・4 は、 $K_p=2.5$  で、 $\Delta T$  を前例の時の 2 倍の 30 秒にした場合の実験例である。給水外乱に対しては早く整定しているが、目標値変更の場合はやや振動的である。前述の図 5・1 の実験では  $\Delta T=30$  秒の場合、 $K_p=2.5$  が最適値であったのが、この例では振動的に

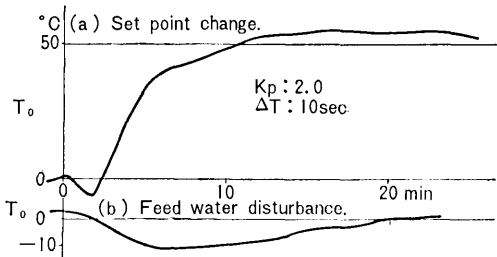


Fig. 5.2 Experiment results by Mode-1.

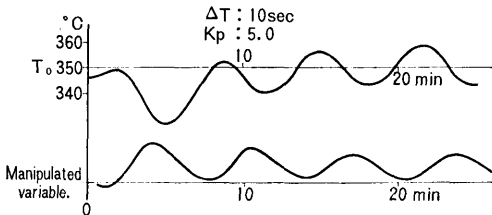


Fig. 5.3 Feed water flow disturbance experiment results by Mode-1.

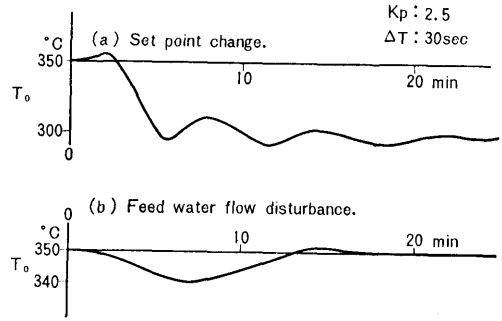


Fig. 5.4 Experiment results by Mode-1.

なっている。この理由として、サーボ系のゲイン変化、運転状態の変化によって、プロセスのオープン・ループのゲインが変化したと考えられる。

§ 5.2 MODE-2 による実験結果

このモードは、MODE-1 の回路に給水外乱を検出し、外乱の大きさに比例して燃料流量を変化させ、給水外乱による出口温度変化を打消すためのフィード・フォワード回路を付加したものである。この比率補償を行なっても、給水、燃料変化の出口温度に対する時定数がやや異なるから、図 5・5(c) に示すように、完全に打消すことは出来ない。しかし、計算例でも分るように、比率  $c$  を  $c=給水量ゲイン/燃料流量ゲイン$  で求めると、かなり整定時間を短縮することが出来る。

実験例を図 5・5(a), (b) に示す。

(a) は  $c=2.8$  の場合で、計算例と極めて良く一致している。この時の外乱の大きさは 0.3 t/hr である。し

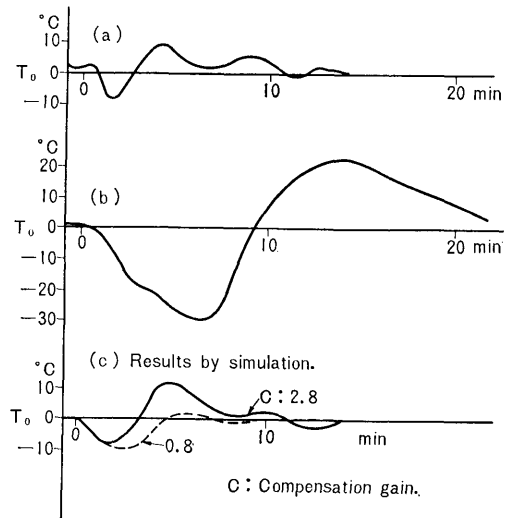


Fig. 5.5 Feed water flow disturbance experiment results by Mode-1.

かし外乱の大きさを, 0.7t/hr と大きくすると, (b)に示すように, 応答がおそくなる。これは, プロセス自体の線形領域を越えていることと, 操作量が操作器のリミッタによって, 最大値がおさえられており, 補償が頭打ちになっているからである。

### § 5-3 MODE-3 による実験結果

この MODE-3 はボイラー出口蒸気の圧力と温度とを給水流量, 燃料流量により制御するものである。そのブロック線図は図 3-6 に示してある。このモードはボイラーの ACC 方式 (自動燃焼方式) では標準型の制御方式である。このモードにおいて, 出口温度のフ

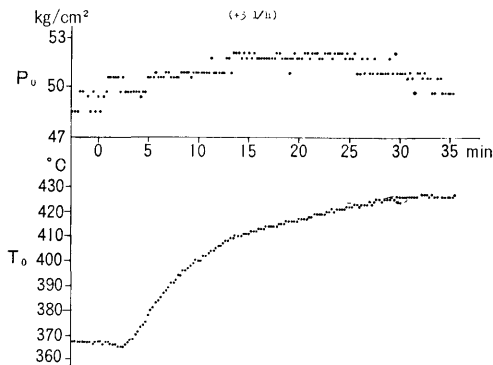


Fig. 5-6 (a) Typical transient response to fuel flow disturbance.

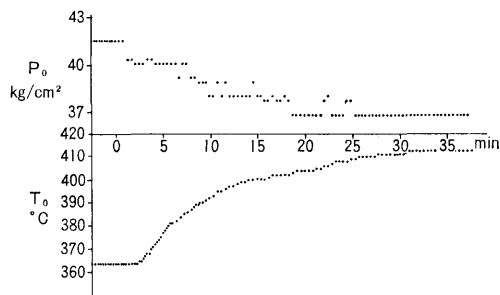


Fig. 5-6 (b) Typical transient response to feed water flow disturbance.

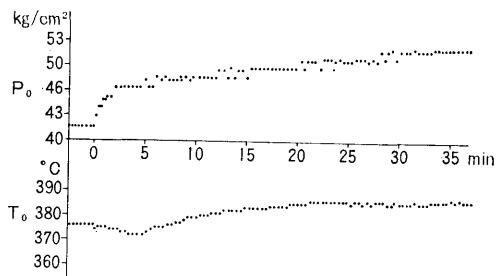


Fig. 5-6 (c) Typical transient response to throttle valve opening change.

ィードバックループには PID 動作の調節計を, 出口圧力のフィードバックループには PI 動作の調節計の 2 台の調節計を使用する。ボイラーの動特性試験の結果を図 5-6 に示す。この動特性試験は負荷弁開度一定の条件で図 5-6(a) は燃料外乱を与えたもの, (b) は給水外乱を与えたものであり, (c) は負荷弁外乱を与えた場合の, それぞれの出口圧力, 出口温度のステップ入力に対する過渡応答である。この試験のうち, 負荷弁外乱に対して出口圧力応答と出口温度応答とはその応答の速さが異なっていることがわかる。すなわち, 外乱が入ってから, 圧力はすぐに立ち上がり約 3 分後にほぼ変化の最大値を示す。一方出口温度は 2~3 分間はむだ時間となって影響が表われていない。したがって圧力の制御には比較的速いサンプリング周期を, 温度制御にはややおそいサンプリング周期を組み合わせ用いることが, 実用上, 有利と考えられる。以上のことを考慮して, ここでは, つぎの項目について, 実験を行なった。

サンプリング周期同一

- (i) 目標値変更 圧力目標値
- (ii) 負荷弁外乱 温度 "

サンプリング周期が温度, 圧力ループによって異なる。

- (i) 目標値変更
- (ii) 負荷弁外乱

本モードに使用した最短サンプリング周期は 15 秒である。このサンプリング時間の内訳は前述した通りで, モニターも含めて約 13 秒である。常数は温度フィードバックループにおいては前述の 20% 行き過ぎ  $T_R$  最小の方法で決定, 圧力フィードバックループの PI 制御常数は温度ループと同じ制御常数を使用し実験により  $K_p$  の, 適当な値を決めた。本文または図中の  $AK_p$ ,  $AT$  とあるのは温度フィードバックのゲイン常数とサンプリング周期,  $BK_p$ ,  $BT$  は圧力フィードバックのものである。

$K$  は比率制御の常数である。

(1) 同一サンプリング周期の実験

目標値変更

図 5-7 は出口圧力の目標値を変えたものである。 $AK_p: 4.0$ ,  $BK_p: 2.0$ ,  $AT: 15$  秒で, 実験前半は圧力を  $48 \text{ kg/cm}^2$  から  $50 \text{ kg/cm}^2$  に変更した場合で, 圧力は約 5 分, 温度は 15 分で整定している。後半の実験は, さらに圧力目標値を  $50 \text{ kg/cm}^2$  から  $55 \text{ kg/cm}^2$  に大きく変更したもので, 図のように目標値が大き

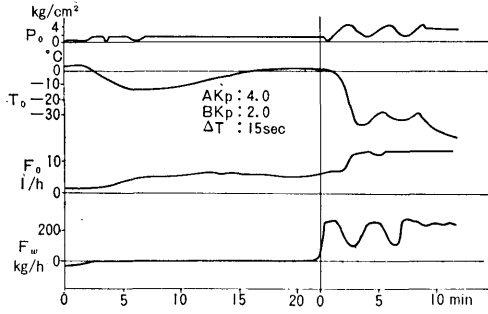


Fig. 5.7 Pressure set point change experiment result by Mode-3.

ぎて燃料操作量がプラント保護用のリミッターの制限を受け制御出来なかったため、12分程で自動から手動に切り換えてしまった実験例である。

負荷弁変化外乱実験

図 5.8 は  $AK_p: 3$ ,  $BK_p: 2$ ,  $\Delta T: 15$  秒で負荷弁を閉じた場合の実験例である。図 5.9 は、 $AK_p: 4$ ,  $BK_p: 2$ ,  $\Delta T: 15$  秒で負荷弁を開けた場合の実験例である。図 5.8 の実験例において温度応答が遅くなっている。したがって図 5.9 の実験では温度ループの  $AK_p$  を 4 に上げたものでかなり改善されている。

図 5.10 の実験例は、短時間給水流量が急に減少した時のものである。給水流量が短時間の間減少したため圧力が動き、外乱となったものであるが、このような場合でも安定に各設定点に整定している。

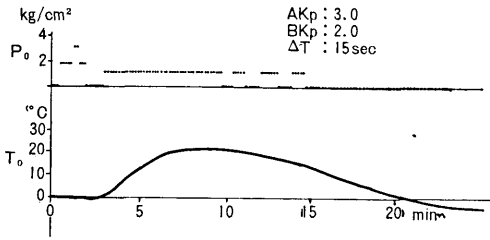


Fig. 5.8 Throttle valve opening change experiment result by Mode-3. (throttle valve close).

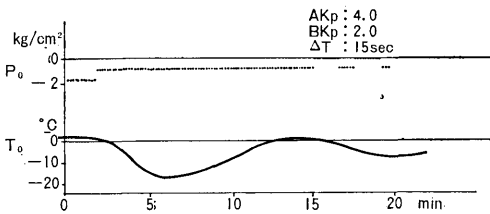


Fig. 5.9 Throttle valve opening change experiment result by Mode-3. (throttle valve open).

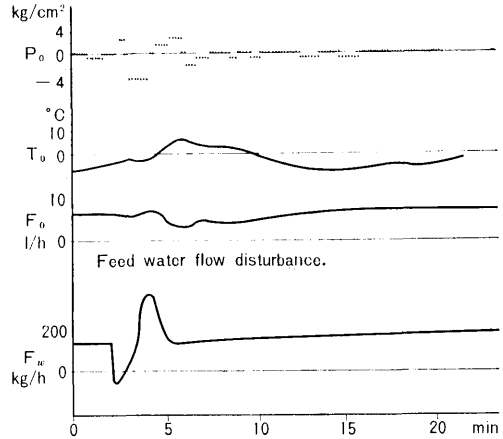


Fig. 5.10 Feed water flow disturbance experiment result by Mode-3.

以上  $\Delta T: 15$  秒の同一サンプリング周期で DDC 実験を行なった場合、いずれも温度、圧力ともに安定かつ精度よく制御動作を行なうことがわかった。

(2) 異なるサンプリング周期による実験

圧力フィードバックループのサンプリング周期  $B\Delta T: 15$  秒、温度フィードバックループのサンプリング周期  $A\Delta T: 45$  秒として、2つの調節計を異周期で働かせた実験である。制御常数は前実験と同じものを使用した。

目標値変更実験 (図 5.11)

$AK_p: 4$ ,  $A\Delta T: 45$  秒,  $BK_p: 2$ ,  $B\Delta T: 15$  秒で圧

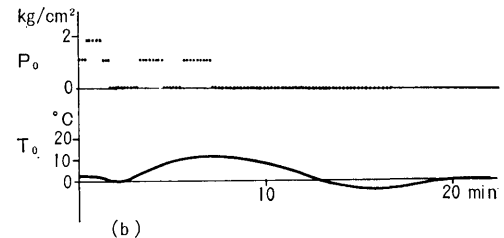
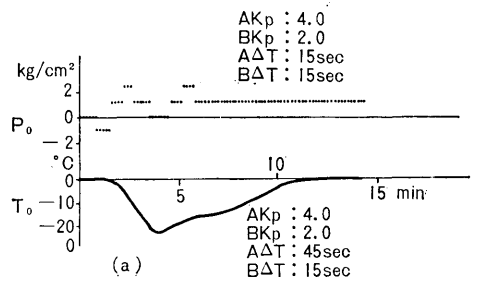


Fig. 5.11 Pressure set point change experiment result by Mode-3.

力目標値の変換を行なった実験である。 $\Delta T$ : 15 秒の同サンプリング周期で行なった場合より温度応答は遅くなっているが、圧力応答の整定速度はほぼ同じである。

負荷弁変化外乱実験 (図 5・12, 図 5・13)

図 5・12 は  $AK_p: 4$ ,  $A\Delta T: 45$  秒,  $BK_p: 2$ ,  $B\Delta T: 15$  秒の制御常数で負荷弁を閉じた場合の実験である。また図 5・13 は同じ制御常数で負荷弁を開けた場合のものである。いずれの場合でも 15 分程度で圧力、温度の両目標値に整定している。

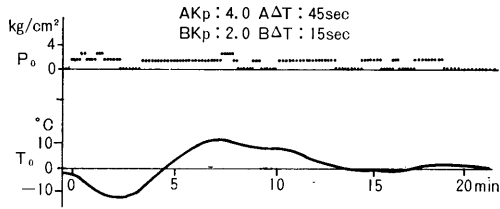


Fig. 5.12 Throttle valve opening change experiment result by Mode-3. (throttle valve close).

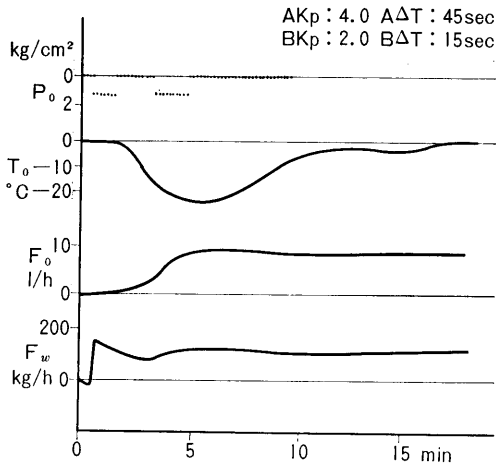


Fig. 5.13 Throttle valve opening change experiment result by Mode-3. (throttle valve open).

§ 5.4 MODE-4 による実験結果

このモードの実験結果を図 5・14 に示す。過剰空気比は 1.2, サンプリング周期は 15 秒である。このモードで、燃料流量の測定ばらつきが大きく、整定がおくれるので、デジタル・フィルタを入れて改良した結果を図 5・15 に示す。デジタル・フィルタは過去 3 回の測定値の平均を求めるものである。

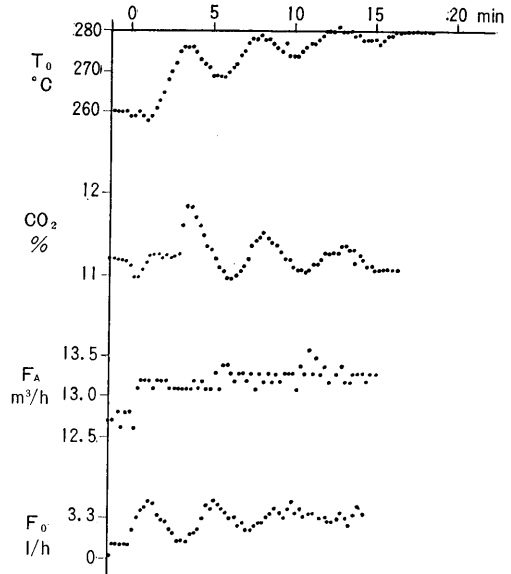


Fig. 5.14 Experiment result by Mode-4.

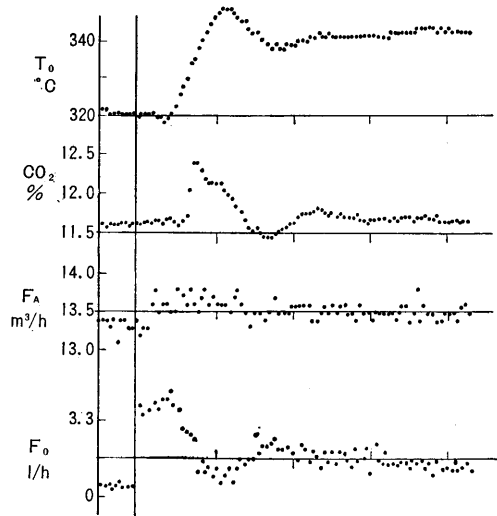


Fig. 5.15 Experiment result by Mode-4. (with a digital filter).

§ 5.5  $e|e|^m$  形モードによる実験結果

DDC においては制御モード構成の自由度は大きい。その 1 例として操作量が  $e|e|^m$  に比例するモードの実験結果を図 5・16 に示す。ここで  $e$  は制御偏差を表わし、 $m \geq 1$  とする。

図 5・16 をみると、大きい目標値変更に対しても、安定で早い応答を示している。

この  $u = k_p e|e|^m$  形の制御ロジックは次のような意味を持つ。 $m=1$  の時を考えると、 $e > 0$  の時、

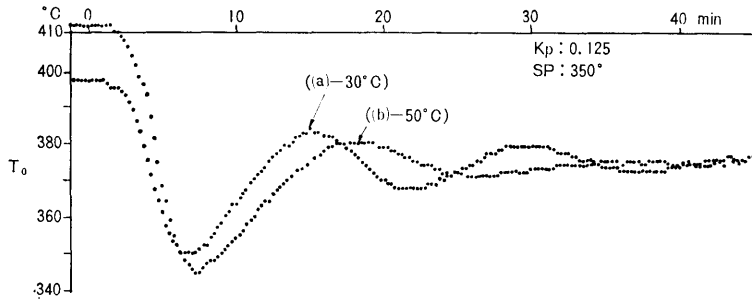


Fig. 5.16 Experiment result by  $e|e|^m$  control mode.

$$u = k_p e^2 = (k_p e)e = k_p(e)e,$$

また、 $e < 0$  の時、

$$u = -k_p e^2 = (-k_p e)e$$

であるから、フィードバックゲインを  $e$  に比例して変化させているのと等価である。ブロック線図で示すと図 5.17(a) と (b) は等価の関係にある。さらに、ブロック線図 (b) は (c) に示したモデル  $H$  を用いる適応制御系において  $H=1$  とおいた場合で、目標値の変化を忠実に再生しようという意味を持つ。

しかしこのモードは非線形であるので、初期値によって安定限界が変化する。以下に記述関数法を用いて  $u = k_p e|e|^m$  形の制御ロジックをプロセス

$$\left( G(s) = \frac{ke^{-Ls}}{1+TS} \right)$$

に適用した場合の安定限界の計算例を示す。

$u$  の記述関数  $N(X)$  は次式で、位相おくれはない。

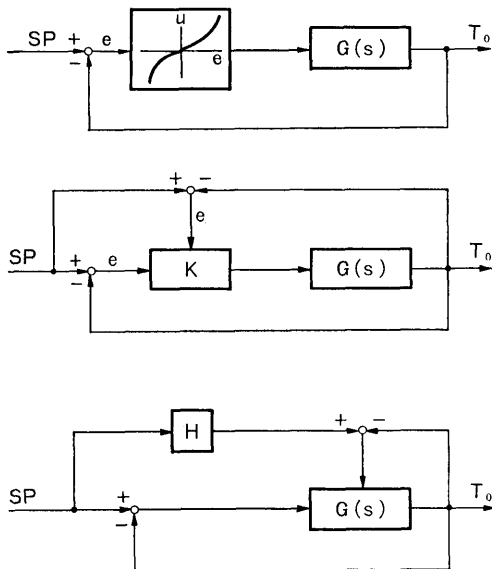


Fig. 5.17  $e|e|^m$  control mode block diagram.

ここで  $X$  は入力振幅である。

$$N(X) = \begin{cases} \frac{X^m}{\pi} \cdot \frac{m+1}{m+2} \cdot \frac{m-1}{m} \cdots \frac{2.4}{3} & m: \text{奇数} \\ \frac{X^m}{\pi} \cdot \frac{m+1}{m+2} \cdot \frac{m-1}{m} \cdots \frac{\pi.4}{2} & m: \text{偶数} \end{cases}$$

安定限界は  $G(s)$  の逆ナイキスト線図と  $N(X)$  との交点 (原点に近い交点) から与えられる。

$m=1$  の場合の結果を図 5.18 に示す。

図 5.19 には  $u$  に飽和特性を持たせ図 5.20 のようなロジックを用いた時のゲイン低下率を示してある。飽和があるとゲインが見掛上、低下し安定領域は広がる。

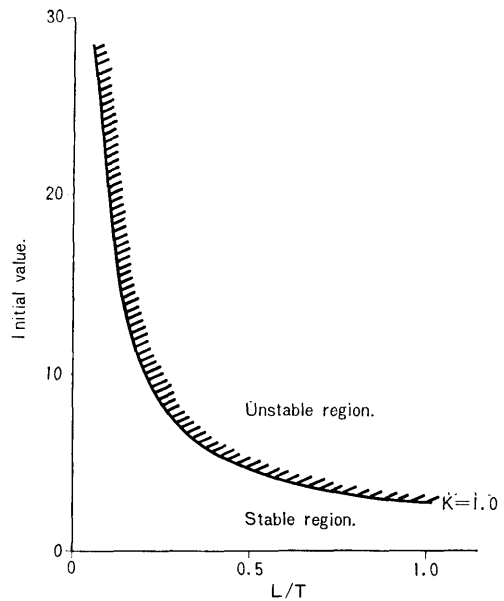


Fig. 5.18 Stability region limit.

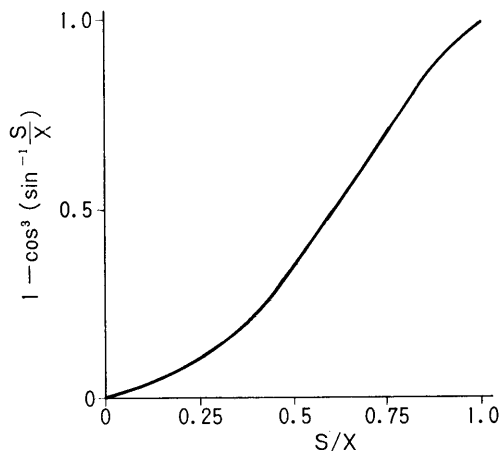


Fig. 5-19 Gain attenuation coefficient.

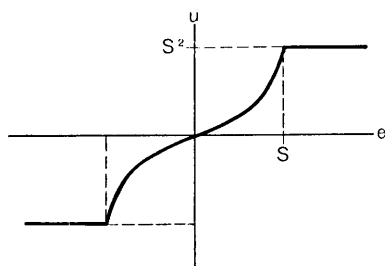


Fig. 5-20 Control logic with saturation.

### §5-6 結 論

以上の DDC の実験から次のような結論が得られた。

- (1) 制御常数を適当に選べば、アナログ形と変らぬ制御性が得られる。なお、制御常数は、アナログ調節系に対するものを第一次近似として用い、サンプリング周期  $\Delta T$  の時は、ゲインに対して  $\frac{L}{L + \frac{\Delta T}{2}}$  の補正係数を用いるのがよい。L はプロセスのむだ時間である。
- (2) 制御常数と目標値等の常数設定が確実である。
- (3) サンプリング周期は、多くの因子を考慮して決定する必要があるが、制御性に対する影響は、 $\frac{\Delta T}{L}$  が  $\frac{1}{6}$  以下では小さく、 $\frac{1}{4}$  以上になると急激に悪くなる。
- (4) 簡単な積分演算で機能的に十分であり 1 ループあたりの演算所要プログラム語数は約 30 語である。ただし、読みこみ等の共通プログラムはこれに入っていない。

- (5) 計算機の専有時間の 90% はデータ・ロギング用のタイプアウトに要する時間であり、計算機を有効に使用するためには高速プリンタか、高速ディスプレイ装置の設置が必要である。
- (6) 制御モードの変更はアナログ形に比較して、きわめて簡単であり、DDC の一大特長といえる。

### む す び

以上、貫流ボイラを対象とした、簡単な場合の DDC の実験についてのべたが、実用化するには、システムの信頼性を十分に検討し、事故の防止を考えねばならない。このためには、操作端の自己保持機能の確立等のハード・ウェアの改良を待つと同時に、システムのデザインを信頼性の立場から行なうことが必要と思われる。

終りに、終始、御指導戴いた東工大寺野寿郎教授、激励下さった佐藤健一郎原子力船部長、および高田良夫機関開発部第 2 部長に深く感謝致します。また有意義な御討論を戴いた奥村幸輝、村山雄二郎両主任研究官に厚く感謝します。

### 参 考 文 献

- 1) 保志 尚, 森田康嗣, 高藤 剛: DDC 実用化試験, 計測と制御, 1967年 9 月
- 2) 平林啓義, 宮崎誠一, 風見正宏: DDC のフィールドテスト, 計測と制御, 1867年 9 月
- 3) 黒須顕二, 和田利政, 小林道幸: 貫流ボイラの DDC 実験, 第 5 回計測自動制御学会, 昭和 41 年 9 月
- 4) 同上 動力に関する講演会, 昭和 42 年 3 月
- 5) 同上 第 6 回計測自動制御学会, 昭和 42 年 10 月
- 6) 同上 第 6 回船用機関学会, 昭和 43 年 10 月
- 7) 桑田龍一: Direct Digital Control (1), 自動制御 Vol. 4-2
- 8) 一色, 寺野他: 試作過給超臨界ボイラ, 日本機械学会誌, 第 65 巻, 第 519 号, 昭和 37 年 4 月
- 9) 桑田龍一: DDC (4) 目標値変更時における最適 PID 調整
- 10) Mishkin and Braun: Adaptive Control System, McGraw-Hill, 1961
- 11) 寺野, 黒須, 村山, 奥村, 和田, 小林: ボイラの効率制御の研究, 船研報告, 第 5 巻 1 号
- 12) J. E. Gibson: Nonlinear Automatic Control, McGraw-Hill, 1963
- 13) 寺野他: 超臨界ボイラの動特性と制御, 第 1 回学術講演会論文集 (計測自動制御学会)