

# 樹木パターンを用いた状態量ディスプレイ方式

黒須 顕二\*・稲坂富士夫\*・村山雄二郎\*\*

## A New Display Method of State Variables Using Tree Pattern

By

Kenji KUROSU\*・Yujiro MURAYAMA\*\*・Fujio INASAKA\*

### Abstract

Operators must watch a plant not to fall into abnormal state and operators are required to judge quickly and properly for appropriate actions in case of an abnormal state.

In this paper, a new display method of state variables using Tree Patterns is proposed as a condition monitoring tool to overcome the above difficulty, and its characteristics and experimental examples are described.

As an example, applying this method to the monitoring of spatial temperature distribution of once-through steam generator, the following main results are got;

- (1) Tree Patterns are easy to draw and are easily programmable by a mini-computer.
- (2) Tree Pattern can change its form widely by six parameters, especially by an angle of branching and the characteristics can be used as a new method of condition monitoring by corresponding state variables to these parameters.
- (3) A wood pattern made from plural tree patterns is adequate to display the state variable distribution of a distributed parameter system.
- (4) Manual control tests by monitoring Tree Patterns display are assured as well as those by conventional analog indicators.

### 1. 序 論

ディスプレイというのは、図形、またはパターンといった視覚に訴える手段で、人間に情報を伝達する方式をいう。

その目的は、人間の図形的なものの特徴抽出の能力を利用して、定性的な特質を素早く知ろうということである。そして、その特徴抽出のし易いように、前処理を行うことと、特徴抽出のし易いディスプレイ・パターンを選ぶのが、ディスプレイ技法のキー・ポイントとなる。

図形的なものの特徴抽出能力を、パターン認識と呼ぶ

でいるが、パターン認識の学問の分野では、人間のパターン認識の能力を機械化することに重点があるが、本論文の立場は、人間のパターン認識力を積極的に利用しようとする立場であって、前者と立場を異にする。

まず、本論文で扱うのは、プラントの状態表示としてのディスプレイ方式の開発であって、その目的は、多次元状態量の変化を、運転員が瞬間的に把握し易いようにディスプレイして、状態量の異常変化を早期に発見できるようにする他、手動制御の場合に、より効果的の制御結果を得るためのディスプレイ方式の実現にある。

$n$ 次元の状態量をディスプレイするには、例えば、多角形表示がある。標準状態で正多角形になるようにゲインを決めておけば、それからのゆがみによって、状態の特徴を推測することができる。

\* 原子力船部

\*\* 機関性能部

原稿受付 昭和53年2月23日

この方法は、正多角形に限らず、任意の図形でもよい。図形が、データ  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  から、写像関数  $f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  によって決定されればよい。1つの巧妙な例が、チャーノフの提案した人間の顔<sup>1)</sup>による状態のディスプレイ方式である。チャーノフは、この手法で、化石、鉱石の分類を行っており、その他、企業分析等、応用の範囲は広いという。そのメリットは、一口に言うと、多次元データを、複雑な手法を用いずに2次元に集約でき、さらに、その表現方法も、人間の視覚に訴える“顔”という形をとっていることで、小さな変化も識別できることにある。

したがって、プラントの状態ディスプレイに、この顔の手法を適用することも可能であるが、これを on-line に用いるには、顔を画くアルゴリズムが複雑であり、アセンブラ・ベースのミニ・コンピュータでは不向きである。

本論文では、1つの解決案として、樹木パターンを利用したディスプレイ方式を提案する。樹木パターンは、もともと、出原氏によって、コンピュータ・アートを目的として、その描き方が発表<sup>2)</sup>されていたものであるが、(1)アルゴリズムが極めて簡単であることと、(2)樹木パターンが、人間にとって馴染みの深いもので、顔の変化と同じように、樹木の枝ぶりの微妙な変化を比較的発見し易いこと、(3)後に述べるように、多数の樹木を並べて、森のパターンをつくるのが容易なことなどの、コンディション・モニタのディスプレイ・パターンとして優れた特長を有するので採用し、その効果をテストしたのが本論文である<sup>3)</sup>。

## 2. 樹木パターンによるディスプレイ

### 2.1 樹木パターの描き方

樹木パターの描き方は、文献 2) に示された方法を採用している。そのアルゴリズムは、Fig. 2.1 に示したように、まず、幹の長さ  $A$  を設定し、

- (1)枝分かれば、常に、直前の枝の先端から2本に分かれる。
- (2)枝の伸びる方向は、直前の枝の方向に対して、左右に一定の角度  $\theta$  である。
- (3)枝の伸びる長さは、直前の枝の長さに対して、一定比率  $\alpha$  倍伸びる。
- (4)さらに枝の伸びは、一定値だけ、水平方向に  $DX$ 、垂直方向に  $DY$  伸びる。
- (5)この枝分かれと伸びを  $n$  回くりかえす。

このように、樹木パターンは、 $A, \theta, \alpha, DX, DY,$

(234)

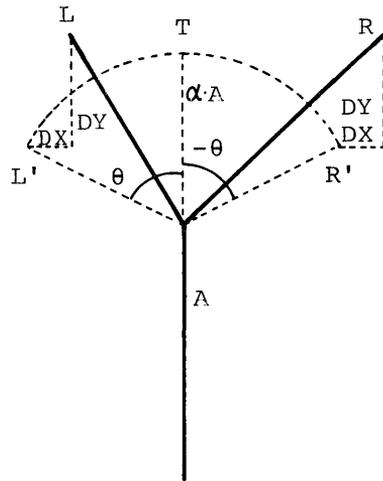


Fig. 2.1 Tree Pattern Model

$n$  の6つのパラメータによって決定される。樹木パターの描き方のフロー・チャートを、Fig. 2.2 に示した。

### 2.2 樹木パターの变化

まず、各パラメータの変化に対して、樹木パターンがどのように変化するか広範囲に調べた結果を述べ、具体的に状態量をパラメータに対応させて表示を行う場合の条件を考察する。

#### a) 枝の伸びる方向 $\theta$ の樹木パターンに与える影響

$A=10\text{cm}$ ,  $\alpha=0.7$ ,  $n=9$  回,  $DX=0$ ,  $DY=0$  とし、 $\theta$  を10度から180度まで変化させた時の樹木パターの变化を、Fig. 2.3 に示した。

図には示していないが、 $\theta=0$  度では、幹の長さが、 $A+\alpha A+\dots+\alpha^9 A$  の棒型となる。以下、 $\theta=10$  度では雑草型、 $\theta=20$  度では若木型、 $\theta=45$  度では樹木型、 $\theta=60$  度ではモザイク型、 $\theta=90$  度で迷路型、 $\theta$  が90度を越すと、樹木パターンは縮少して、樹木パターンとかけはなれたパターンに変化していく。 $\theta=180$  度の時は、また棒型になるが、幹の長さは、

$$A-\alpha A+\alpha^2 A-\dots-\alpha^9 A \text{ である。}$$

これらの結果をみると、パラメータ  $\theta$  の変化範囲に関して留意することは、

- (1)樹木パターンが樹木らしく見え、かつ、 $\theta$  の変化をパターンの変化としてわかり易く、増幅表示をするという特長を失なわないためには、 $\theta$  の変化範囲は、 $0 \leq \theta \leq 90$  度である。

- (2) $\theta$  が0度、90度の樹木パターンは、一見して特徴が

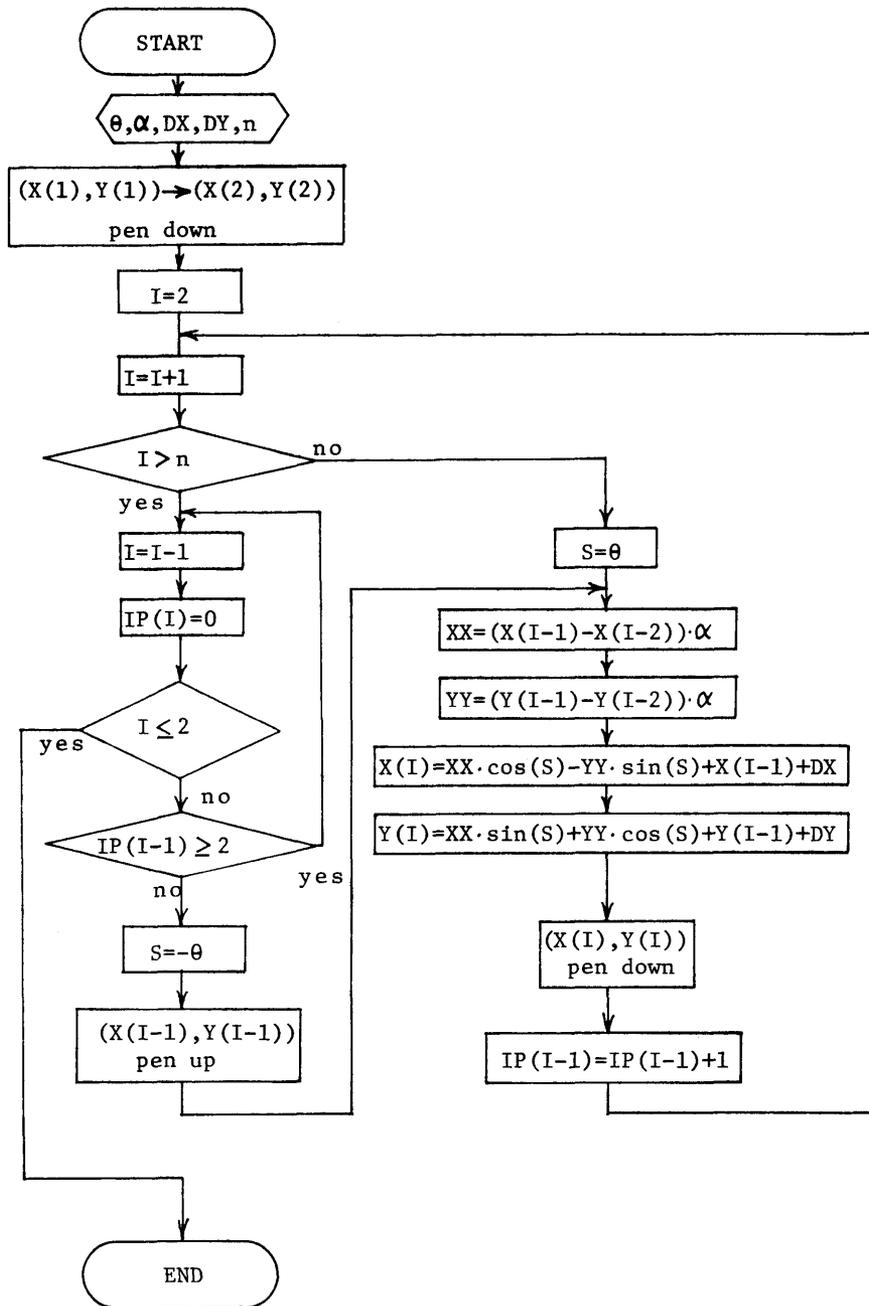


Fig. 2.2 Flow Chart of Drawing Tree Pattern

あるので、これをディスプレイしようとする状態  
量の特定の状態に対応すれば、パターンによる判別

が、一目瞭然となる。

(3)  $\theta$  の絶対値が等しく、符号が異なる場合には、樹

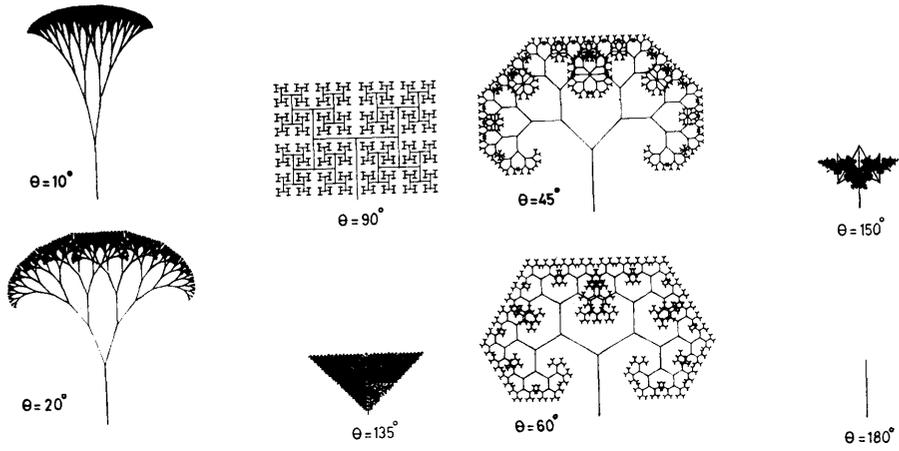


Fig. 2.3 Variation of Tree Pattern

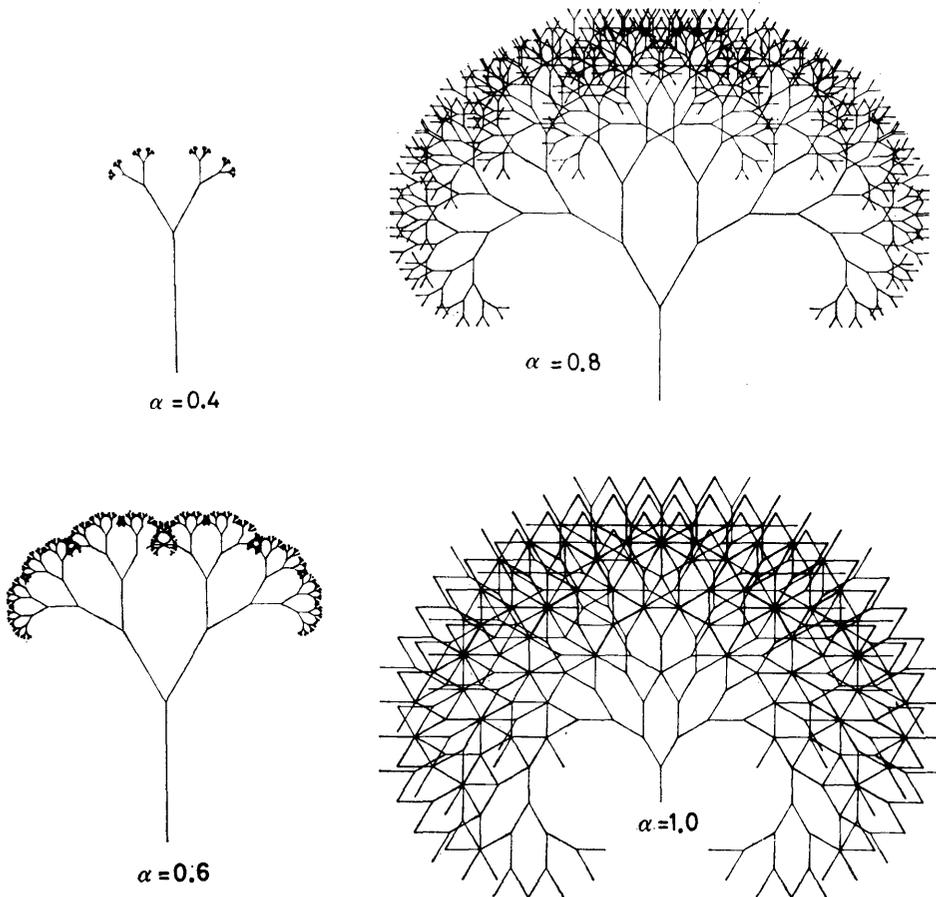


Fig. 2.4 Effect of  $\alpha$  on Tree Pattern

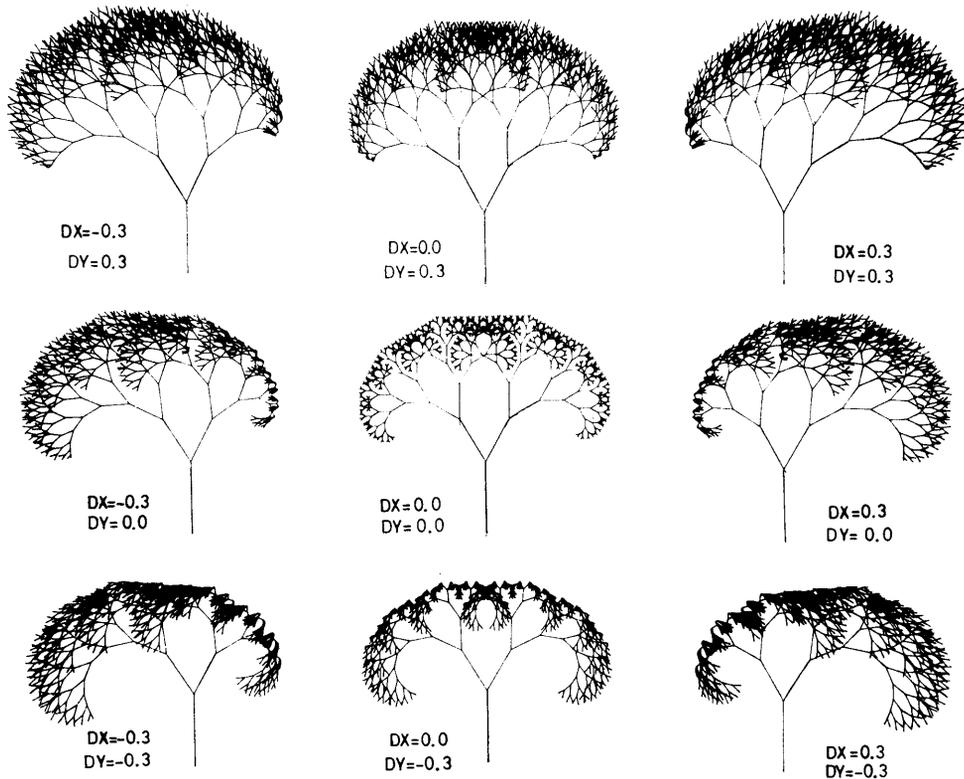


Fig. 2.5 Effect of  $DX$  and  $DY$  on Tree Pattern

木は同一パターンになるので、 $\theta$  に対応する変数は、変化中に符号が変わらないことが望ましい。

b) 枝の伸び率  $\alpha$  の樹木パターンに与える影響

Fig. 2.4 に、 $\theta=30$  度、 $n=9$  回、 $DX=DY=0$  とし、 $\alpha$  を変化させた時の樹木パターンを示す。この図から分かるように、 $\alpha$  が小さすぎると、数回の枝分かれで枝は消滅してしまい、また、 $\alpha$  が 1 より大きいと、枝の長さは発散する。パターンの図形的大きさを考慮すると、 $\alpha$  の値としては、0.4~0.8位が望ましい。

c) 水平方向の伸び  $DX$ 、垂直方向の伸び  $DY$  の樹木パターンに与える影響

Fig. 2.5 に、 $\theta=30$  度、 $\alpha=0.7$ 、 $n=9$  回と固定し、 $DX$ 、 $DY$  の値を、(0.3, 0, -0.3) の 3 種の数値からできる 9 種の組み合わせについて描いた樹木パターンを示す。この図のように、 $DX$ 、 $DY$  は、組み合わせられて 1 つのベクトル的な意味を持ち、樹木のなびく方向とその大きさを与える。

d) 枝分かれの回数  $n$  の樹木パターンに与える影響

$n$  回目の枝分かれの枝の長さ  $L_n$  は、幹の長さを  $A$ 、伸び率を  $\alpha$  とすると、

$$L_n = A \cdot \alpha^n \quad (1)$$

ディスプレイ画面の上で、識別できる最終の枝の長さを 1 mm ( $L_n \geq 1$  mm)、 $\alpha=0.6$  として、(1)式を用いて、与えられた  $A$  に対して、許される枝分かれの回数を求めると、

$$n \leq 1.96 \log A \quad (2)$$

となる。仮りに、 $A=100$  mm とすれば、 $n \leq 9$  となり、10回目では、 $L_n$  は 1 mm 以下になる。

以上、個々のパラメータのみを取り上げ、樹木パターンに与える影響を述べたが、樹木パターン全体からみた特徴をまとめると、

- (1)  $DX=0$  ならば、樹木パターンは左右対称となる。
- (2)  $DX$ 、 $DY$  の効果は、相互干渉してベクトル効果を持ち、それらの値の正負、大きさによって、樹木パターンの上では、枝のなびく方向と、その大き

さとなって表われる。

- (3) $\theta$  に関しては、絶対値のみが樹木パターンに影響を与える。
- (4) $\theta$ , および  $DX$  が共に 0 ならば、樹木パターンは棒状となり、 $\theta$  が 0 で、 $DX$  が 0 でないならば樹木パターンは、折れ曲がった棒状となる。
- (5)樹木パターン変化を認識する上では、 $\theta$  の変化、すなわち枝の開く角度が大きな比重を占め、次に  $\alpha$ ,  $DX$ ,  $DY$  の順となる。

### 2.3 樹木パターンのバリエーション

樹木パターンの成長アルゴリズムは、2.1 節に記した方法を基本とするが、ディスプレイしようとする状態量や、ディスプレイの活用法等により、種々のバリエーションが考えられる。そのバリエーションをあげるると、

- (1)樹木パターンを回転させ、その回転角を新たなパラメータとして加える。
- (2)1 回目からの枝分かれの長さを、幹の長さとは無関係に、一定値に対し一定比率  $\alpha$  倍とする。
- (3)1 本の樹木パターンでは、何回枝分かれをくり返しても、 $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $DX$ ,  $DY$  の値は一定としたが、枝分かれ毎に、 $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $DX$ ,  $DY$  を変数とする。
- (4)特異な樹木パターンとして、枝の折れ、幹の折れ等を入れて、状態量の異常状態等に対応させる。
- (5)状態量の空間的变化(分布定数系)のディスプレイとして、樹木パターンを平面上に林立させる。

## 3. プラント状態量の樹木パターンによるディスプレイ

前述したように、樹木パターンは、 $A$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $DX$ ,  $DY$ ,  $n$  のパラメータを指定すれば、形が決まる。そして  $\theta$  は形を決める上で重要なパラメータであり、 $DX$ ,  $DY$  は、相関連して、枝のなびき方といった形でベクトルの情報を伝えることがわかった。これに対し、 $\alpha$ ,  $n$  は、パターンの大きさを決定する上で、かなりの制約がある。これらの点を考えると、樹木パターンのパラメータは、 $\theta$ ,  $DX$ ,  $DY$  の 3 種であると考えるのが妥当である。

この 3 つのパラメータに、プラントの状態を示す変数(状態量変数)を割り当て、現在の状態を樹木パターンとして表示したいのであるが、2 つの問題がある。まず、第 1 の問題は、パラメータと変数との対応の選択であり、第 2 の問題は、対応させる場合の比例係数の決定である。第 1 の問題は、パラメータが 3 個であ

るという数量的制約と、パラメータの種類によって、パターンへの影響力が相異なることによる。数の制限は、“Face Method” に比べて、確かにマイナスである。しかし、プラントでは、1 つの変数については、偏差、変化速度、変化加速度の 3 つの情報で十分であり、監視する状態量としても、圧力、温度、流量の 3 つの情報で用が足りる場合が多い。また、プラントの場合、異なった場所の圧力、温度、流量の同時表示が要求されるが、これに対しては、複数個の樹木パターンを用いる。

比例係数を決定する際には、雑音に対して考慮せねばならないが、1 つのやり方は、プラントの状態を表わす変数が、プラントの制限値に達した時に、樹木パターンのパラメータが図形のリミットになるように比例係数を選べばよい。特に  $\theta$  のリミットを 90 度にとると、パターンは、その Limit 値で迷路型となり、運転員は、プラントの状態を表わす変数が、制限値に達したことをはっきりと認識することができる。

### 3.1 1 変数ディスプレイ

運転上、ディスプレイを要求される状態量変数としては、普通、状態量の絶対値、偏差値、1 次差分値、2 次差分値等があげられ、これらを、樹木パターンのパラメータである  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $DX$ ,  $DY$  にうまく対応づけねばならない。ここでは、 $\alpha$  を一定とし、 $\theta$ ,  $DX$ ,  $DY$  と状態量  $X$  の偏差  $X_d$ , 1 次差分  $\Delta X$ , 2 次差分  $\Delta^2 X$  との対応づけを検討する。

偏差値  $X_d$  は、状態量  $X$  と、目標値あるいは定常項  $X_0$  との偏差 ( $X_d = X - X_0$ ) であり、1 次差分  $\Delta X$  は、状態量の変化速度を表わすもので、離散系では、 $\Delta X_k = X_k - X_{k-1}$  で示される。添字  $k$  は、 $k$  時のサンプル値であることを示す。2 次差分  $\Delta^2 X$  は、状態量の変化加速度を表わすもので、離散系では、 $\Delta^2 X_k = \Delta X_k - \Delta X_{k-1} = X_k - 2X_{k-1} + X_{k-2}$  で示される。

3 つの状態量変数と、3 つの樹木パラメータとの対応づけは、6 通りの組み合わせが考えられるが、前述したように、パターン変化の識別上、 $\theta$  の比重が大きいくと、偏差  $X_d$  が、データのノイズの影響を一番受けにくいことから、枝の開く角度  $\theta$  と、状態量の偏差  $X_d$  を対応づけるのが、パターンが一連の流れを持つ上で最も妥当と思われる。

残る  $DX$ ,  $DY$  については、 $DY$  より  $DX$  の方がパターン認識の上で比重が大きいくと、 $\Delta^2 X$  より  $\Delta X$  の方が、よりノイズの影響を受けにくいことを考慮して、 $DX$  と  $\Delta X$ ,  $DY$  と  $\Delta^2 X$  を対応づけるのが妥

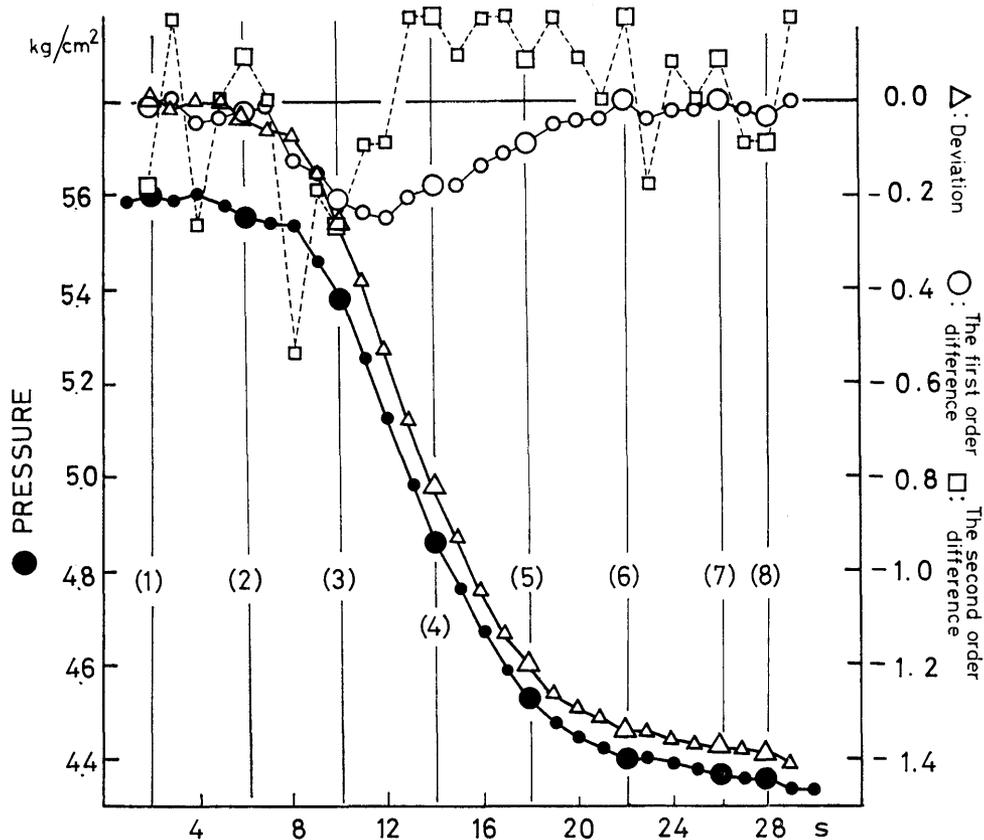


Fig. 3.1 Transient Response of Pressure Change

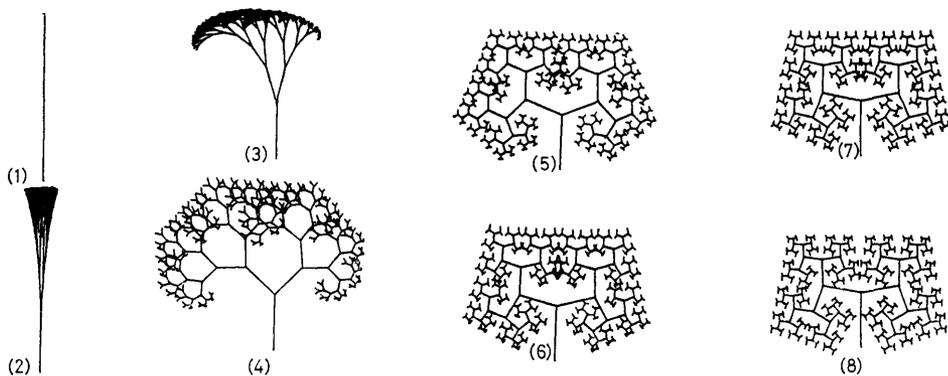


Fig. 3.2 Display Sequences of Pressure Change

当である。樹木パタンのパラメータと、状態量変数との対応づけを離散系で表わすと、次式ようになる。

$$\theta_k = K_\theta (X_k - X_0) \quad (3)$$

$$DX = K_x (X_k - X_{k-1}) \quad (4)$$

$$DY = K_y (X_k - 2 \cdot X_{k-1} + X_{k-2}) \quad (5)$$

ここで、 $K_\theta$ 、 $K_x$ 、 $K_y$  はそれぞれ重み係数、 $X_k$  は  $k$  サンプルング時の状態量、 $X_0$  は状態量の定常値を意味する。

この対応づけによる樹木パターン変化と状態量変化との関係をまとめると、

- (1)状態量が、 $X_0$  に整定すれば、 $\theta_k=DX=DY=0$  となり、樹木パターンは、直線の棒型となる。
- (2)状態量が、ある偏差をもって定常ならば、偏差に相当する枝の開く角度を持った左右対称の樹木パターンとなる。
- (3)状態量が振動しているならば、枝のなびく方向は、時計廻りに回転し、1振動周期が、枝の1回転に対応する。また、枝の開く角度は、振動の振幅変化にしたがって閉じたり開いたりする。
- (4)状態量が振動せずに、定常値の  $X_0$  に収れんするならば、樹木パターンは、だんだん棒型に近づき、枝のなびきも小さくなっていく。発散する場合は、この逆となる。

以上のように、この方式による1変数ディスプレイは、パタンの変化で、状態量の変動を表示させるものであるが、偏差  $Xd$  の正負の情報が失われるのが欠点であり、この対策は後に述べる。

#### 実験例(1) 圧力変化のディスプレイ

上記の方法を用いた状態量ディスプレイ例として、Fig. 3.1 に示す貫流蒸気発生器の出口蒸気圧力の過渡変化を、(1)~(8)の点でディスプレイした結果を、Fig. 3.2 に示した。この場合、状態量である圧力の変化は定常状態から、1次遅れの形で新しい定常状態へと移行している。また、(3)式中の定常値  $X_0$  は、初期状態の圧力の絶対値をとってある。

Fig. 3.2 で、パタンの変化を追ってみると、時刻(1)では、定常かつ偏差零であるため、棒状のパタンを示す。時刻(2)では、偏差がやや現われてくるので、樹

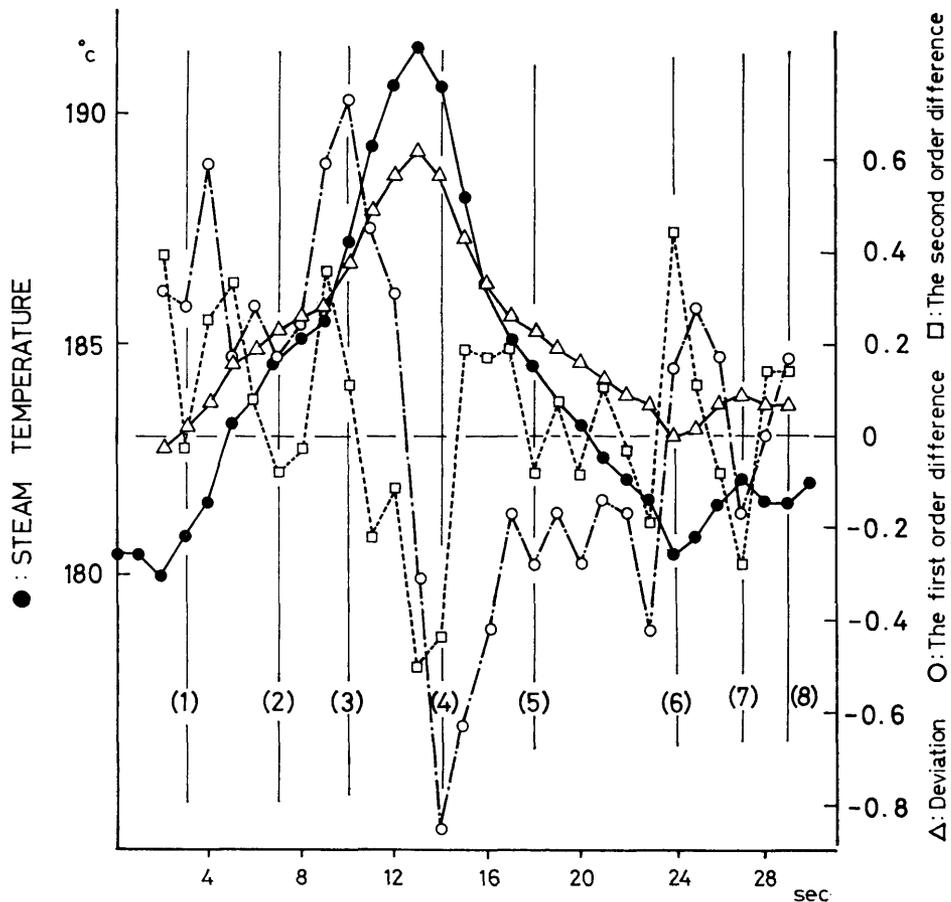


Fig. 3.3 Transient Response of Temperature Change

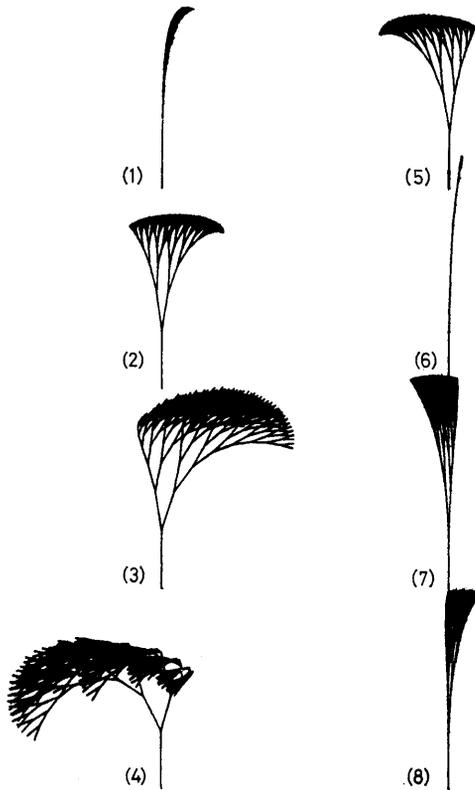


Fig. 3.4 Display Sequences of Temperature Change

が成長し始める。時刻(3)では、変化が減少方向へ急激であるので、左へなびいた樹木パターンとなっている。時刻(5)から時刻(8)の間では、偏差は際立つが変化速度は小さくなるため、樹木パターンは対称となり、成長しきったモザイク型に近いものとなっている。

#### 実験例(2) 温度変化のディスプレイ

ディスプレイされるべき温度変化を、Fig. 3.3 に示した。これに対応するディスプレイ結果は、Fig. 3.4 に示してある。この変化では、温度が過渡変化後、またもとの定常状態に復帰していることが、前の例と異なっている。したがって、樹木パターンは、棒状から出発して、棒状に終わっている。Fig. 3.4において、時刻(3)~時刻(5)の樹木パターンが、左右に激しく動いているのは、原応答波形が、急激に増加、減少しているのに対応している。

### 3.2 分布定数系の状態ディスプレイ

分布定数系の状態量の分布、および、その分布変化を監視するためには、系に設置した多くの同種の測定器を総合して見なければならない。一方、本方法を適用した場合には、各測定点に1箇の樹木パターンを対応させ、樹木パターンを林立させれば、状態量分布の時間的、空間的变化が、1つのいわば、“森のパタン”の変化として識別可能となる。

この場合、状態量の絶対値変化を判別可能にするため、Fig. 2.1 の樹木パタンの描き方を、Fig. 3.5 のように変えた。それは、幹の長さ  $L$  を新たな独立パラメータとして状態量の絶対値を表わすようにしたことである。1回目の枝分かれの長さは、幹の長さ  $L$  とは無関係に一定値  $A$  に対し、一定の比率  $\alpha$  倍で延びるとし、他のアルゴリズムは同じである。

例として、貫流型蒸気発生器の温度分布の状態監視に適用した結果について述べる。

ディスプレイすべき状態量変数として、動径  $RV$  を新たに導入した。この動径  $RV$  は、状態量を  $X$  とすると、 $\Delta X$ 、 $d^2X$  で張られる位相平面上のベクトル振幅を意味するもので、 $\sqrt{(\Delta X)^2 + (d^2X)^2} / C$  で表わされる。仮りに状態量が、正弦波状持続振動をするならば、動径  $RV$  は一定値となり、発散状態であれば、増大、収れん状態であれば減少していく。

1 測定点の状態量変数と、樹木パラメータとの対応づけは、幹の長さ  $L$  に温度偏差、水平方向の延び  $DX$  に温度の1次差分、枝の開く角度  $\theta$  に温度を表わす変数の動径  $RV$  とした。これは、次式のように

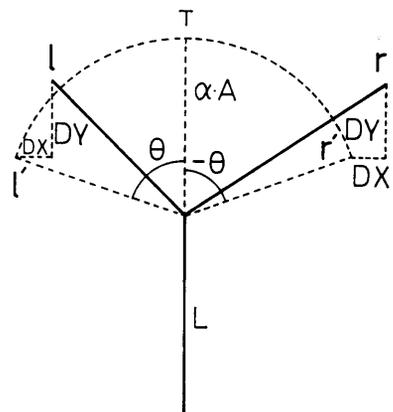


Fig. 3.5 Modified Tree Pattern

離散系で表わせる。

$$L = K_l(T_k - T_0) \tag{6}$$

$$DX = K_x(T_k - T_{k-1}) = K_x \cdot \Delta T_k \tag{7}$$

$$\theta = K_\theta \sqrt{(\Delta T_k)^2 + \frac{(\Delta T_k - \Delta T_{k-1})^2}{C}} + \theta_0$$

$$= K_\theta \cdot RV + \theta_0 \tag{8}$$

ここで、 $K_l$ ,  $K_x$ ,  $K_\theta$  はそれぞれ 比例係数,  $C$  は定数,  $T_k$  は  $k$  サンプリング時の状態量 (温度) の絶対値,  $T_0$  は状態量のバイアス項,  $\theta_0$  は動径  $RV$  が 0 であっても, 幹の長さが判別できるように加えた少量のバイアス角である。また, この場合は, 垂直方向の伸び  $DY$  は 0 とした。このように状態量変数を対応づけると, 1 本の樹木パターンは, 幹の長さが状態量の絶対値を示し, 枝ぶりが状態量の速度, 加速度変化を示す。

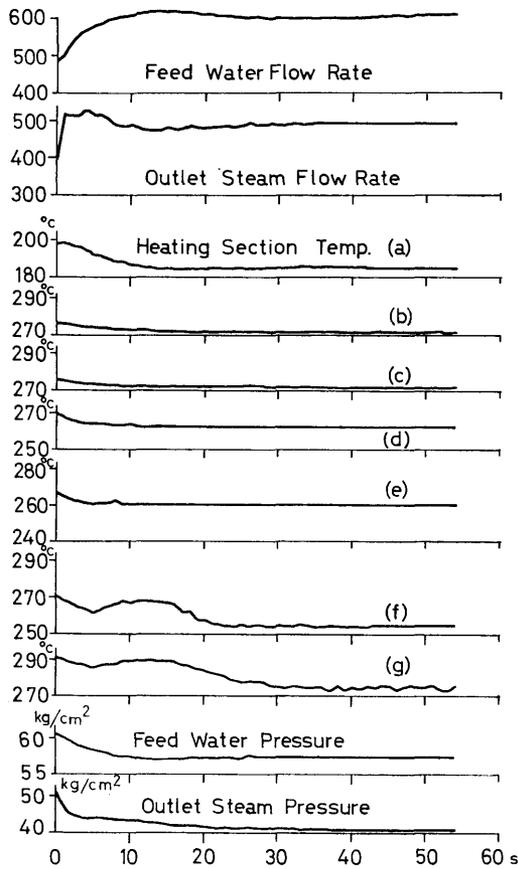


Fig. 3.6 Transient Response for Outlet Valve Opening

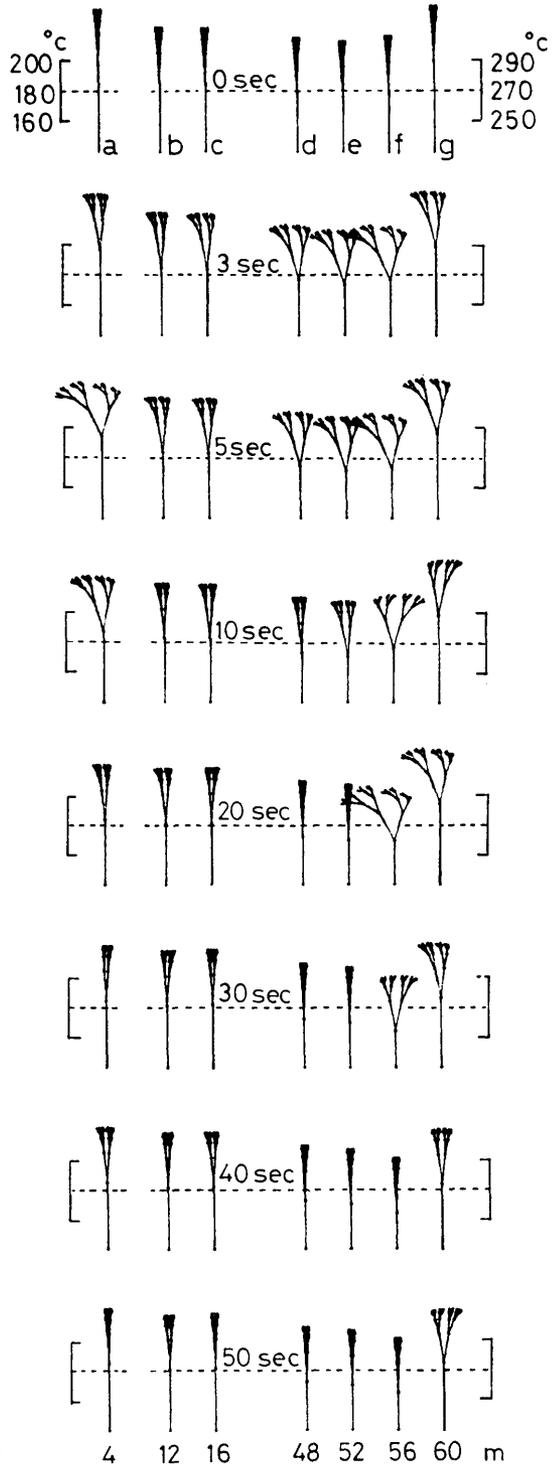


Fig. 3.7 Display Sequences of Temperature Distribution Change

まず、実験データとして、Fig. 3.6 に、貫流型蒸気発生器のステップ状出口弁開度外乱による各状態量の過渡応答を示す。図中の加熱部温度(a)~(g)の7つが、分布定数系としてディスプレイしようとする各測点の状態量である。この加熱部の長さは、約64mで、測定点(a)~(g)は、加熱部入口からそれぞれ、4, 12, 16, 48, 52, 60mにほぼ位置している。この温度計測点7つを、Fig. 3.7 のように、管入口に近いものを左から順に、その間隔に対応した a~g の樹木パターンと対応させ、加熱部温度分布のディスプレイとした。

この分布定数系ディスプレイ方式の、パタン、ならびにパタン変化の特徴は、

- (1)状態量が、定常状態にあるならば、1本の樹木パターンは、枝の開く角度がバイアス  $\theta_0$  を持った、左右対称のほぼ棒型となる。
- (2)状態量の動径が、枝の開く角度に対応づけてあるので、各々の枝の開き具合で、状態量の変動状況が判別でき、かつ、状態量の増減方向は、枝のなびく方向が左ならば減少方向に、右ならば増加方向となるので、隣接する状態量の相対的関係の変化、全体の温度分布変化が、予測を含めて判別、推定可能である。

上記の方式を用い、Fig. 3.6 に示した(a)~(g)の温度分布変化をディスプレイした結果を、Fig. 3.7 に示した。Fig. 3.6 中の秒数は、外乱が加わる直前の時刻を0秒とし、Fig. 3.7 の秒数と対応している。また、Fig. 3.8 には Fig. 3.6 の過渡応答の0秒時の初期状態温度分布と、新たな整定状態における温度分布が示してある。

Fig. 3.7 のディスプレイ結果より、

- (1)Fig. 3.6 の加熱部温度分布変化のアナログ表示と

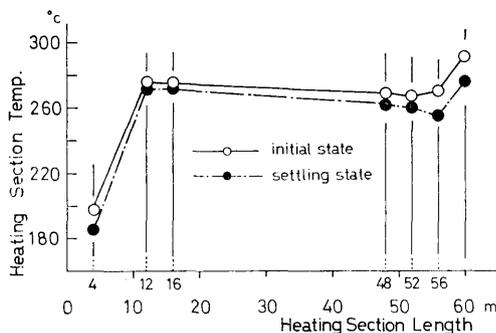


Fig. 3.8 Static Temperature Distributions

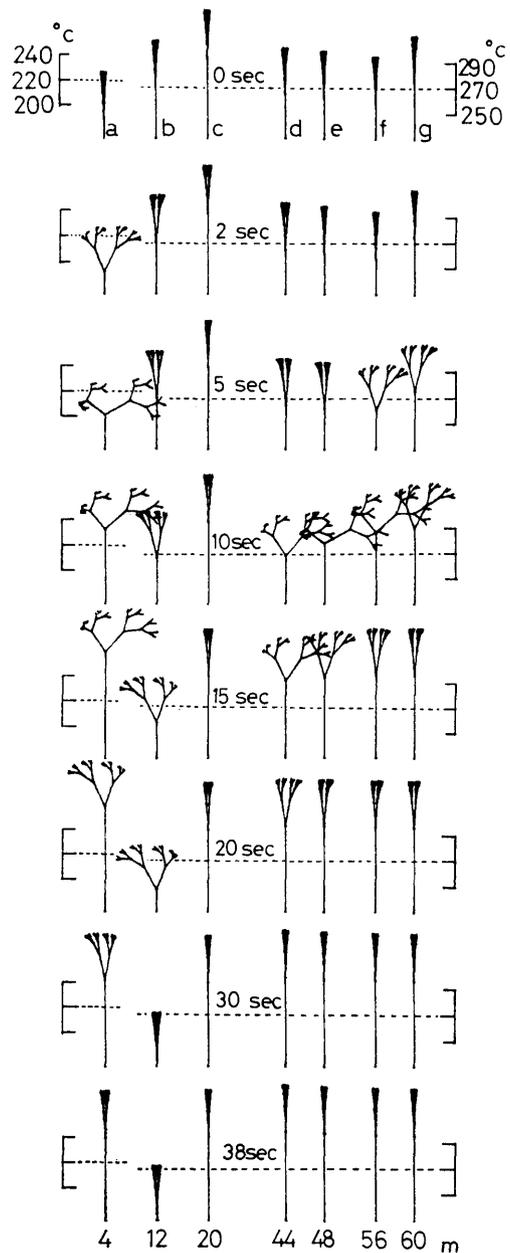


Fig. 3.9 Display Sequences of Temperature Distribution Change

比べて、幹の長さで、温度分布変化が、枝の開きや、なびく度合の変化によって温度変化の速度、加速度、隣接する温度の相対的関係が、パタン変化で容易に識別できる。

(2)初期状態である0秒時のパタンの幹の長さから、eとfの間に過熱開始点があるのがわかるが、外乱が加わった後、全体的に温度は下がるが、20秒後になると、e、fの温度はほぼ同じに、かつ、fの枝の開く度合はeに比べて大きくて左になびいているので、fの温度がeよりさらに下がり、過熱開始点が、fとgの間に移行していくことが予想される。30秒以降のパタンでは実際に、過熱開始点がfとgの間に移行したことが判別できる。このように、パタン表示をすることにより、加熱管内の流体の状態変化がつかみ易くなる。

(3)種々の外乱、あるいは、その外乱幅を変えたデータをディスプレイしてみるとはっきりするが、外乱が加わった後の5秒ぐらいまでの初期パタン変化を監視することにより、プラントに加わった外乱の種類を判別することができる。判別の一例として、入口弁開度外乱によるディスプレイ結果をFig. 3.9に示すが、その違いは、予熱部a、bにおける急激なパタン変動として表われている。

### 3.3 亜硫酸ガス濃度分布のディスプレイ

分布定数系の他のディスプレイ例として、亜硫酸ガス濃度分布のディスプレイを試みた。

表示例としては、亜硫酸ガス等の濃度表示器が各地にとりつけられているが、その表示はppm単位の数値であって、一般の人には認識しがたいものである。また、変化速度や過去の累積値等は、ほとんど情報として認識できないのが現状である。このような表示に対するわかり易いディスプレイとして、前述した顔パタンによる表示が提案されているが<sup>9)</sup>、本節では、同種の目的で、樹木パタンを用いるとどうなるかを示す。

樹木パタンを適用すると、ある基準値に対応する標準の樹木パタンを決めておけば、パタンの変化から濃度分布変化の情報を興味深く知ることが可能である。濃度変化の情報としては、測定された濃度の絶対値 $X$ と、そのExponential Smoothingフィルタ出力 $\hat{X}$ 、過去4時間の平均値 $\bar{X}$ 、ならびに風向きを考慮する。

フィルタ出力 $\hat{X}$ は、 $W$ を重みとすると、次式のように離散系で表わせる。

$$\hat{X}_k = W \cdot X_k + (1 - W) \hat{X}_{k-1} \quad (9)$$

樹木パラメータとしては、最初の幹の長さ $A$ 、枝の開く角度 $\theta$ 、水平方向の伸び $DX$ 、垂直方向の伸び $DY$ 、枝の伸び率 $\alpha$ 、枝分かれの回数 $n$ の6個を適

用するが、回数 $n$ は、過去4時間の平均値が、環境基準値0.05ppm以上かどうかでステップ状に変えるとし、次のように対応づける。

$$\theta = K_\theta \cdot X_k \quad (10)$$

$$A = K_a \cdot \hat{X}_k + C_a \quad (11)$$

$$\alpha = K_\alpha \sum_{i=0}^3 \frac{\hat{X}_{k-i}}{4} + C_\alpha \\ = K_\alpha \cdot \bar{X}_k + C_\alpha \quad (12)$$

$$n \begin{cases} = 7 : \bar{X}_k \geq 0.05 \text{ppm} \\ = 4 : \bar{X}_k < 0.05 \text{ppm} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} DX = K_x \cdot F \cdot \cos \beta \\ DY = K_y \cdot F \cdot \sin \beta \end{cases} \quad (14)$$

ここで、添字 $k$ は、それぞれの $k$ サンプリング時の値を示し、 $K_\theta$ 、 $K_a$ 、 $K_\alpha$ 、 $K_x$ 、 $K_y$ は比例係数、 $C_a$ 、 $C_\alpha$ は定数、 $F$ は風力、 $\beta$ は西風を0とし、反時計廻り方向を正にとった風向き角度である。

この樹木パタンと、濃度変化との対応における特徴をあげると、

- (1)濃度の絶対値が低く、過去4時間の濃度平均値が環境基準値よりも低いならば、樹木パタンは、枝先が風下になびき、かつ小じんまりとした棒状パタンとなり、環境的にみて問題のない状態であることを示す。
- (2)濃度の絶対値が高くなる程、枝の開く角度は大きくなって、雑草型から樹木型パタンへと変わっていくが、0.6ppmを制限値（環境的な意味はなく、仮りに設定した）とし、この時に、枝の開く角度が90度となるように比例係数 $K_\alpha$ を設定したので、枝の開きが90度となる迷路型の樹木パタンになれば、異常状態とみなせる。
- (3)過去4時間の平均値 $\bar{X}$ が環境基準値0.05ppm以上になると、枝分かれの回数が4回から7回へとステップ上に増えるので、樹木パタンはおい茂ったものとなる。
- (4) $\bar{X}$ は、さらに、伸び率 $\alpha$ に対応しているので、過去4時間の濃度平均値が高くなる程、樹木パタンは膨張し、全体として大きくなる。
- (5) $\hat{X}$ が、幹の長さに対応しているので、 $\hat{X}$ が高くなる程、樹木パタンの大きさに相乗効果を及ぼし、 $\hat{X}$ と $\bar{X}$ が高くなる程、樹木パタンは大きく、かつ枝のおい茂ったものとなる。これは、自然の樹木とガス濃度との逆関係なので、樹木パタンと考

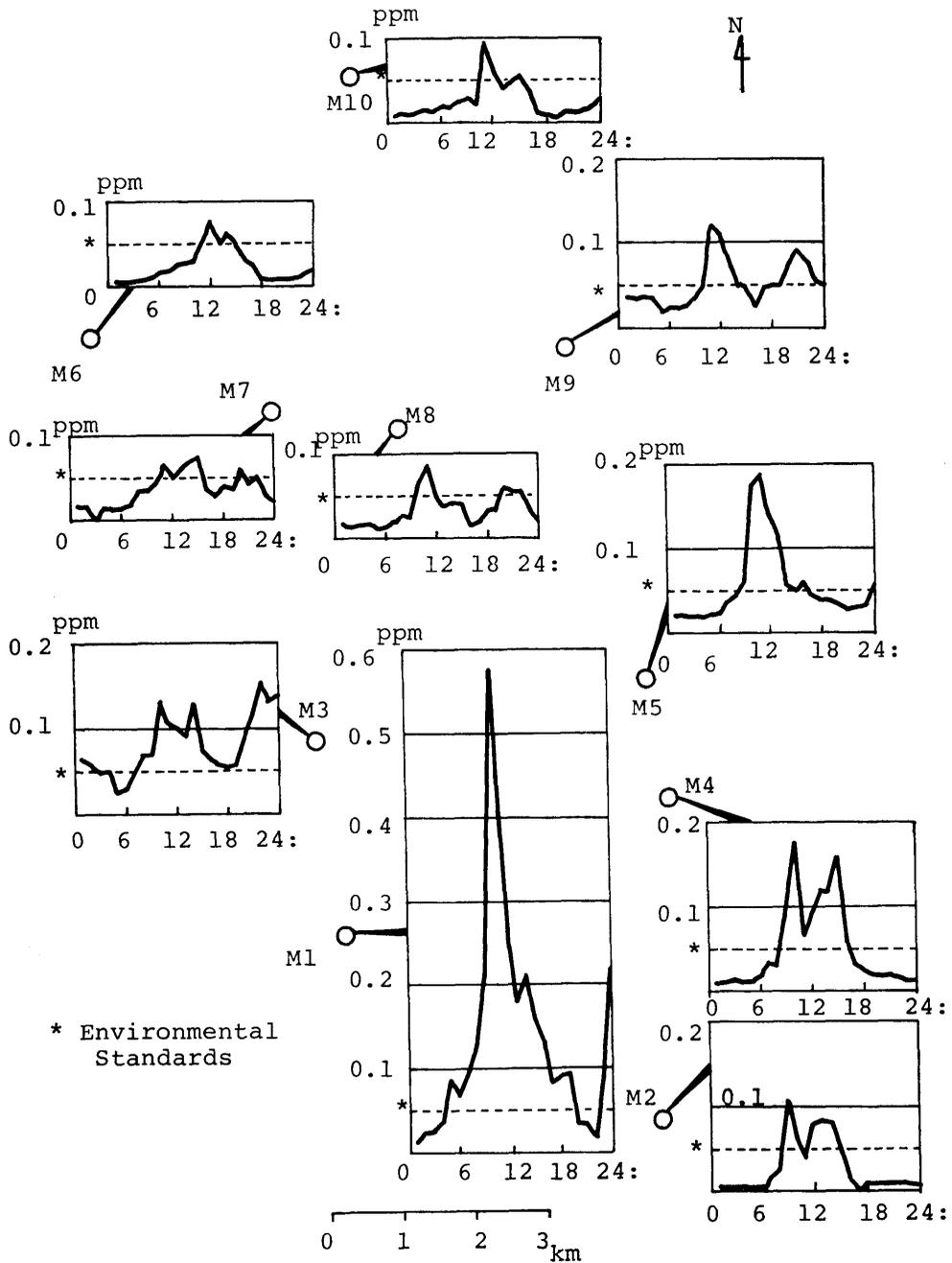


Fig. 3.10 A Example of the Measured Data of SO<sub>2</sub> Concentration Change (quarried from reference 4))

えるより、煙突からの煙パタンと考えた方が良い  
かもしれない。  
亜硫酸ガス濃度の測定データは、文献5)から引用し

このデータを Fig. 3.10 に示す。測定箇所は、M1～  
M10の10地点で、1測定点に樹木パタン1つを対応さ  
せ、計10本による濃度分布変化ディスプレイとした。

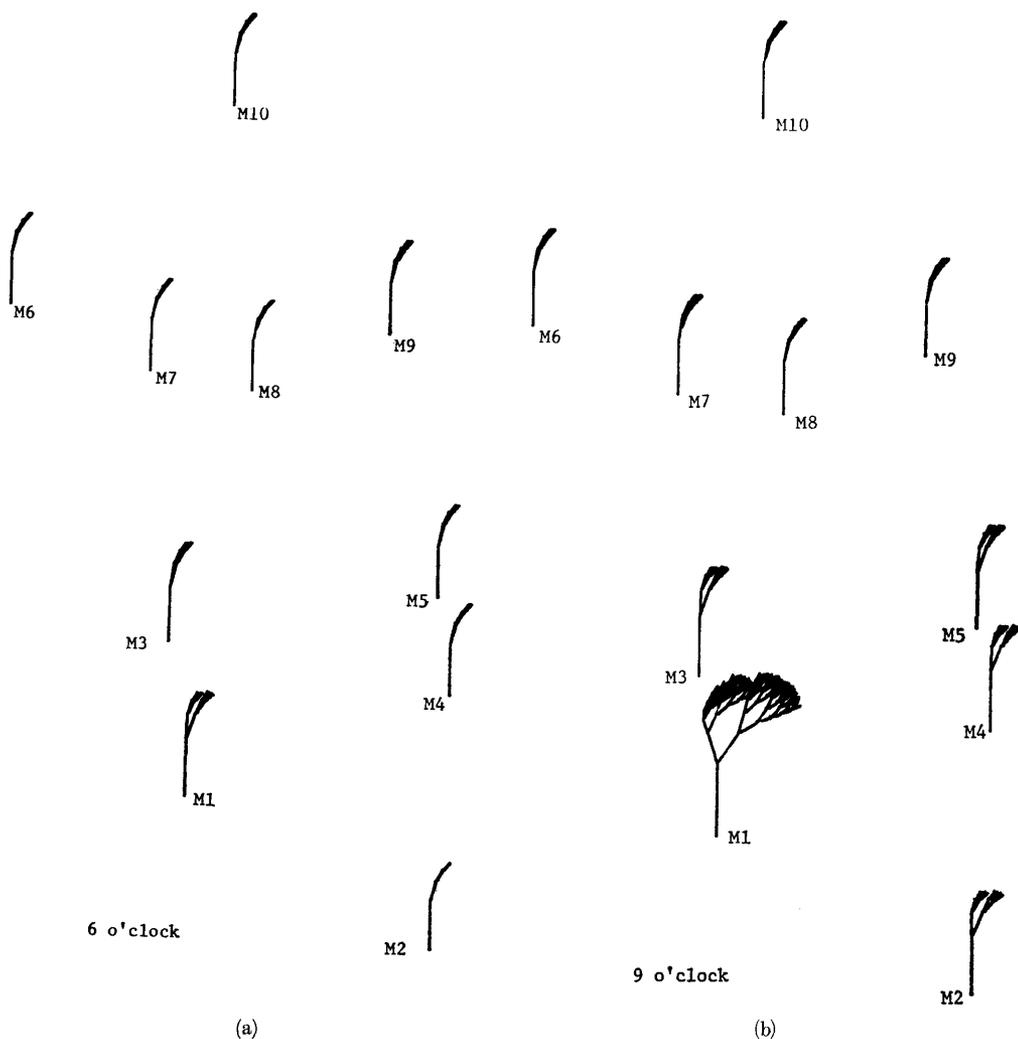


Fig. 3.11 (a)~(b) Display Sequences of  $\text{SO}_2$  Concentration Distribution

このデータのうち、6、9、10、12時におけるディスプレイ結果を、Fig. 3.11-(a)~Fig. 3.11-(d)に示した。ただし、(9)~(14)式において、 $W=0.5$ 、 $K_\theta=150$ 、 $K_a=1/3$ 、 $K_b=0.01$ 、 $C_a=10(\text{mm})$ 、 $C_b=3$ とし、風速に関するデータは、全般的に南西としか与えられていないので、 $DX=DY=1(\text{mm})$ として行った。なお、M1地点のすぐ西に製鉄所が、北西約2kmの地点に火力発電所があることをつけ加えておく。

このディスプレイ結果から、

(1)亜硫酸ガス濃度の絶対値が、環境基準値0.05ppmになると、枝の開く角度は、 $\theta=15/2$ 度となるように重みづけてある。したがって、Fig. 3.11-(a)

の午前6時におけるM1地点での亜硫酸ガス濃度のように、0.07ppm( $\theta=21/2$ 度)では樹木パタンはわずかに開き、逆に、わずかでも枝が開くと環境基準値に達しているときみなせる。

(2)午前6時のディスプレイ結果にみられるように、M1地点を除くすべてのパタンは、小じんまりとした棒状であり、過去の累積値、現在の濃度とも環境的に問題はなく、10箇の測定地点全体を1つの系とするなら、M1での濃度は、環境基準を越えていると思われるが、樹木パタンは茂っておらず、かつパタンも全体として小さいので、過去4時間の平均濃度は低く、系は、ほぼ安全かつ定常

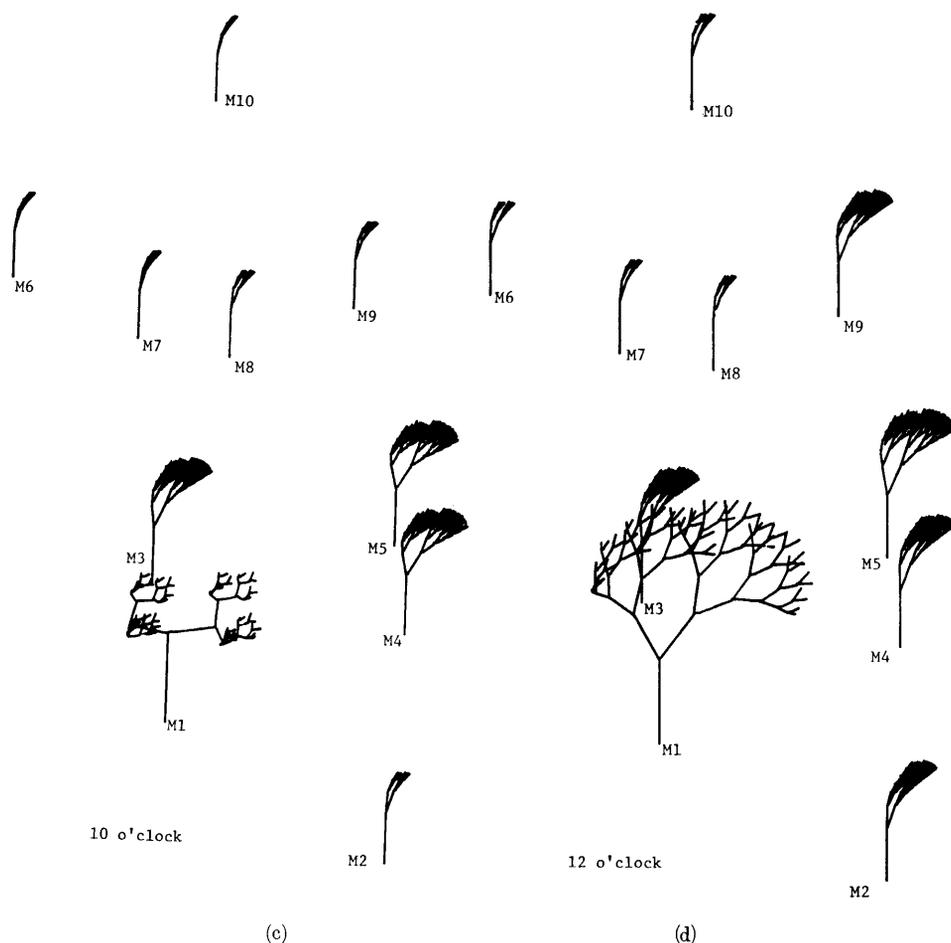


Fig. 3.11 (c)~(d) Display Sequences of  $\text{SO}_2$  Concentration Distribution

の状態にあるといえる。

(3)午前9時のディスプレイ (Fig. 3.11-(b)) では、M1で枝の角度も広く、樹木パターンも大きくなって茂っているので、かなり濃度も高く、過去4時間の平均濃度も高いことを示しており、風向きは南西であることから、系全体としては過渡状態にあり、M4、M5、M9の地点に影響を及ぼすことが予想される。

(4)午前10時 (Fig. 3.11-(c)) になると、M1地点での樹木パターンは、迷路型に近づき、枝分かれも多く、かつパターンも全体が大きくなっているため、異常状態とみなしてよく、風下の地点に大きく影響を及ぼすものと考えられる。また、M3、M4、M5地点では、M1方向からの影響を受けて濃度

が高く、過去の平均値も環境基準を越えていることがわかる。

(5)12時 (Fig. 3.11-(d)) になると、M1での濃度の絶対値は、いくら下がってはいるが、樹木パターンは、全体としてさらに大きくなっている。これは前述したように、環境的な判断を、濃度の絶対値の高低のみでなく、過去4時間の平均濃度にも大きな重みをおいて表示しているためであって、過去4時間の平均濃度が非常に高くなるという連続的な異常状態を意味するものである。

#### 4. 手動制御への樹木パターン・ディスプレイの応用

樹木パターン・ディスプレイ方式の応用として、手動

制御における制御量のディスプレイを試みた。これは、制御量の樹木パタン・ディスプレイを監視することにより、手動制御を行い、樹木パタンによる情報伝達性をテストしようというものである。

シミュレーションに用いたプラントの数学モデルは、

$$Y(s) = \frac{K}{1+TS} \cdot e^{-LS} \cdot u(s) \quad (15)$$

で示される(1次遅れ)+(むだ時間:  $L$ )モデルであり、これを計算機に組み込み、任意の入力に対して、出力応答を樹木パタンとして、 $X$ - $Y$ プロットを用いて描かせた。テストは、目標値変更を運転員がディスプレイ結果を見ながら手動で追従する形をとる。

(15)式で、 $Y(s)$ はプラント出力(制御量)、 $u(s)$ はプラント入力(操作量)である。(15)式を離散系にすると、次式のようになる。

$$Y_{k+1} = a \cdot Y_k + b \cdot u_{k-n} \quad (16)$$

ここで、 $a = e^{-\tau/T}$ 、 $b = K(1 - e^{-\tau/T})$ 。また、サンプリング時間を  $\tau$  とすると、 $n\tau = L$  であり、添字  $k$  は、 $k$  サンプル時を意味する。

樹木パタンの描き方は、制御量  $Y$  と目標値  $R$  との偏差  $YD$  を新たに表示するため、Fig. 2.1 の樹木パタンを、幹の根元を中心に回転させ、その回転角  $\beta$  を偏差  $YD$  に対応づけた。また、制御量の変数として、制御量の1次差分を  $DX$  に、制御量の動径  $RV$  を  $\theta$  に対応づけ、次式のようにした。

$$\beta = K_\beta (Y_k - R) = K_\beta \cdot YD \quad (17)$$

$$\theta = K_\theta \cdot RV + \theta_0 \quad (18)$$

$$DX = K_x (Y_k - Y_{k-1}) \quad (19)$$

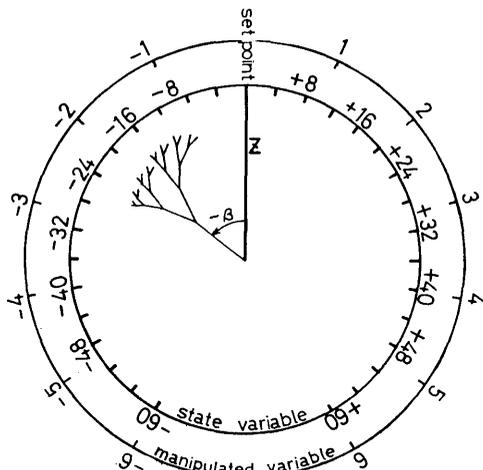


Fig. 4.1 Rotation of Tree Pattern

(248)

ただし、乗直方向の伸び  $DY$  は0とした。

この方式による樹木パタン・モデルを Fig. 4.1 に示す。Fig. 4.1 を説明すると、

- (1)回転角  $\beta$  は、幹が上向きに垂直である時に0とし、時計廻りを正としたので、制御量と目標値が一致している偏差0の場合は、幹は乗直上向きとなる。制御量が目標値より下がると反時計廻りに、目標値より上がると時計廻りに回転する。目標値との偏差は、あらかじめ比例係数  $K_\beta$  から逆算し、Fig. 4.1 のように記入しておけば、判別は容易である。
- (2)制御量の1次差分を  $DX$  に対応づけてあるので、枝のなびき方が、偏差0の垂直線  $Z$  方向に向いているなら、制御量は、目標値に近づいていることを示す。
- (3)現在の状態から制御量を調整するための操作量の正負は、制御量が増加するとパタンは時計廻りするのと同様、時計廻りを正と考え、樹木パタンを時計廻りに回転(制御量を増加)させなければ正の操作量を、反時計方向に回転させなければ負の操作量を出せば良い。

目標値変更に対する手動追従制御シミュレーション・テストの一例を、Fig. 4.2 に示す。プラント・モデルの時定数は90秒、むだ時間は30秒、ゲイン  $K$  は(-1)、サンプリング時間は10秒とし、目標値を300から340に変更した場合である。

Fig. 4.2 について説明すると、サンプル時刻0でパタンが急に寝ているのは、目標値の急変を意味し、ここから手動追従制御が始まり、これを垂直に立ち上げるように操作端を動かす。操作に対する制御量の応答は、むだ時間分だけ遅れ、サンプル時刻(3)から制御の効果が現われ、(4)に到って立ち上がり始めている。枝の伸び具合は、垂直方向に向かっているので、追従動作は正しいことが運転員に理解できる。さらに、時刻(10)ではほぼ垂直に近づいたので、操作量の増加を止めるべきであり、時刻(17)では、ほぼ垂直となり、ここで棒状になるのが望ましいが、やや枝が出ているので少し行き過ぎることが予測できる。時刻(24)以降、垂直な棒状パタンになったことは、目標値に整定したことを意味し、制御が成功であったことがわかる。この時の制御量、操作量の変化を、Fig. 4.3 に示した。

この手動追従制御シミュレーション・テストから、

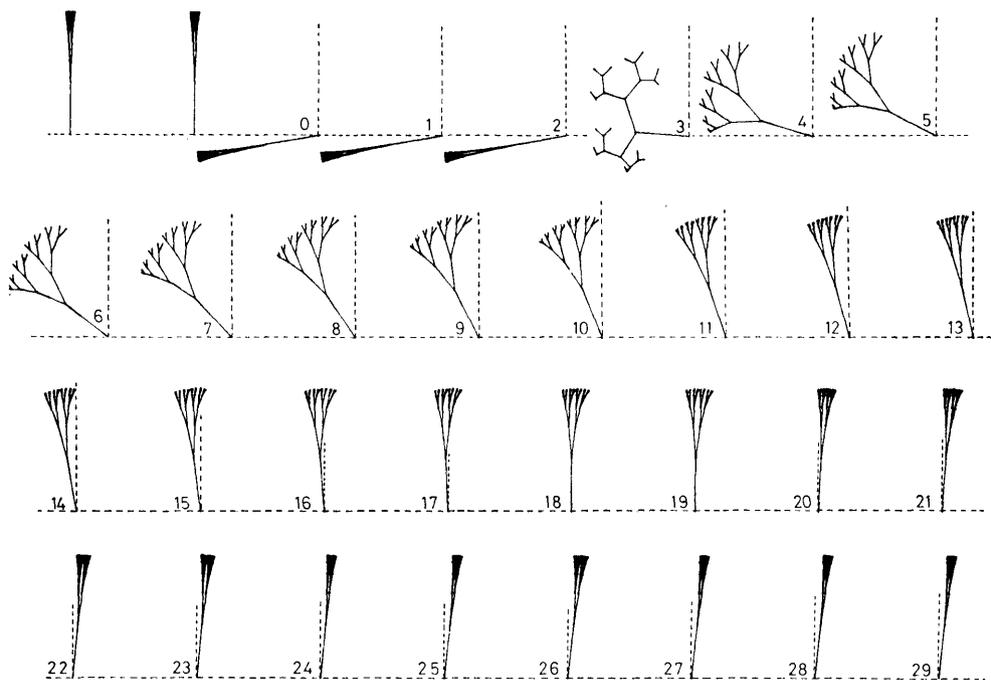


Fig. 4.2 Display Sequences of Controlled Variable

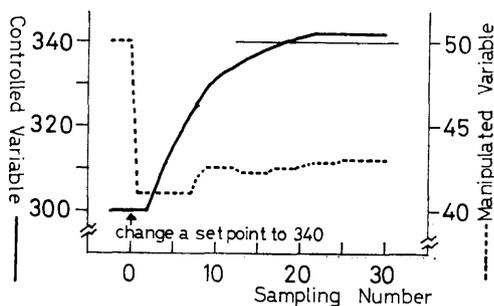


Fig. 4.3 Transient Performance of Manual Control

- (1)制御量のアナログ変化を監視しながら手動制御を行う従来の方法と比較しても、制御性には差がなく、樹木パターン・ディスプレイの情報伝達性は確かである。
  - (2)制御量の目標値からのずれや変化速度が、パターン表示として印象深くつかみ易い。
- ことが、明らかにされた。

## 5. 考 察

前節までに述べたように、ディスプレイの目的は、

状態量の変化を印象深い形に表わすことであるが、その目的によって、適切なディスプレイの形も変わってくる筈である。例えば、蛙の目は、動く小さな物体に鋭敏に反応するという。これは、小昆虫を捕えるのに、極めて適した性質である。この場合、蛙の目に入る外界の映像のうち、捕獲に不必要なデータは捨てられ、必要な情報のみが、拡大されて視野内にディスプレイされているとみることができる。このことは、ディスプレイの在り方の基本を示している。

プラントの状態監視の場合に要求されることは、異常の早期検知であるが、この点について、樹木パターンが役立つかどうか試みなければならない。これには、次のような方法が考えられる<sup>9)</sup>。

未知の時間  $t_f$  に異常が起るとする。異常は、プラントの出力信号に、ある確定的時間関数  $m(t)$  を加えてつくる。したがって、観測されるデータ  $y_f(t)$  は、異常状態では、

$$y_f(t) = z(t) + m(t) + v(t) \quad (20)$$

となる。ここで、

$$z(t) = H \cdot x(t)$$

$x(t)$  : 状態ベクトル

$H$  : 観測マトリクス

$v(t)$ : 平均0の白色ガウス・ノイズ

正常の状態では、 $m(t)=0$  だから、出力は、

$$y_n(t)=z(t)+v(t) \quad (21)$$

である。

したがって、観測値  $y(t)$  は、異常発生時刻  $t_f$  の前後において、 $y_n(t)$  から  $y_f(t)$  に変わる。

問題は、 $y(t)$  をディスプレイさせることにより、この  $y_n(t)$  から  $y_f(t)$  の変化を発見できるかをテストすればよい。これを行うには、リアル・タイムでディスプレイを行う装置が必要である。現在、CRT、TV を利用した多くのディスプレイ装置が開発されているが、メモリ・チューブ型 CRT は、画像はきめ細かいが、TV 型に比してやや遅い。そこで、マイクロ・コンピュータと TV を組み合わせた  $64 \times 64$  ドット簡易ディスプレイ装置を用いて、目下、樹木パターンを画くプログラムを開発中であるが、1秒周期程度でディスプレイが可能であることを確かめている。

状態変数と樹木パラメータの対応の仕方については、まだ、確定した提案がなされていない。特に、異常の早期発見を目的とした場合、圧力、流量、温度等を1つの樹木パターンに表現するのも1つの方法と考えられる。この方法は、“顔パターン”を利用した故障の早期発見に試みられている。

いずれにしても、この種の方法は、ディスプレイに習熟することや、運転員の心理的なものにも影響を受けるので、今後、評価テストを充分行って、使用の限界などを明確にしたいと考えている。

## 6. む す び

より安全なプラント運転のための新しいマン・マシン・システムが、いろいろ試みられているが、本研究では、プラントの状態のディスプレイの手段として、“樹木パターン”を提案し、熱交換器等の分布定数系の状態監視に効果のあることを確かめた。

さらに、手動制御のディスプレイ方式としても、ア

ナログ表示と比べて遜色のないことがわかった。

また、環境変化などの表示にも使用できるなど、適用範囲は広いと考えられる。

謝辞 問題の提起、研究の実施にあたり、有益な御助言を戴いた東工大・寺野寿郎教授、樹木パタンの描き方に関して御指導戴いた出原栄一氏、独自の樹木パターンによる統計データの表示についての資料<sup>8)</sup>を戴いた岡山大・脇本和昌教授に、深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) Herman Chernoff: "The Use of Faces to represent points in N-Dimensional Space Graphically", Dec. 27, 1971, Stanford University.
- 2) 出原栄一: "コンピュータによる樹木の成長シミュレーション", 数理科学 No. 132, June 1974 p. 34/38.
- 3) K. Kurosu, Y. Murayama, M. Kobayashi & F. Inasaka: "Display Method using Tree Pattern", Preprints of 77 Paris Conference, ICME, May '77, p. 327/336.
- 4) N. Honda, S. Aida: "Environmental Index by Faces Method", SUMMARY OF PAPERS ON GENERAL FUZZY PROBLEMS, Report No. 1, Nov. 1975, p. 19/22.
- 5) 稲葉: 「千葉市における大気汚染」, 公害研究, Vol. 2, No. 1/Summer, 1972, 岩波書店
- 6) Eliezer G. Gai & Renwick E. Curry: "A Model of the Human Observer in Failure Detection Tasks", IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, Vol, SMC-6, No. 2, Feb. '76.
- 7) 原, 山下: "顔の表情による離線診断", 鉄道電化協会, 「架線保全機械化の研究」, 50. 3
- 8) K. Wakimoto: "Tree Graph Method for Visual Representation of Multi-dimensional Data", Journ., Japan Statist. Soc., 7, 1, 1977, 27~34.