

逐次的工程調整法

Sequential Process Regulation Method

山川典宏*
Norihiro Yamakawa

内 容 梗 概

製造工程における製品の品質安定化のためには、いろいろの方法が考案せられ、また現場で取り入れられている。これらの方法には、品質管理図法、工場実験法、EVOP (Evolutionary Operation Program) などがある。ここには、これらの方法にみられるいろいろの欠点を補うと考えられる新しい方法を提案する。

1. 緒 言

品質管理図⁽¹⁾は、ある一定の標準のもとで製造された品質特性をチャートにプロットしていく、有意変動が現われたら、そのときその原因を探究するというルールで品質管理の業務に欠くことのできないものとされてきた。しかし、近年になってその静的な態度が反省されて、アメリカの G. E. P. Box 氏⁽²⁾がその標準自身を動かして、そのプロセスを最適化しようという方法をEVOP(Evolutionary Operation Program)と名付けて発表し、国内においてもその応用が奨励⁽³⁾されている。

一方、この標準を確立する方法として、工業の場に従来農業方面で活用されてきた実験計画法⁽⁴⁾が導入され、工場実験法⁽⁵⁾なる概念も生まれていて、日立製作所社内においてもその活用実効果は目ざましいものがある。この実験計画法に対しては、単に解析方法を簡単にするという目的と、一定のモデルに対する推測の効率を最大にするという目的だけで直交性を追求し、したがって制約が多いという点が反省され、直交性を等確率性でおきかえ、これらを緩和した確率対応法が、田口氏⁽⁶⁾、アメリカの Satterthwaite 氏⁽⁷⁾⁽⁸⁾らによって提唱された。また逐次近似という人間の本来の思考過程を無視している点も考えられて、Wald 氏⁽⁹⁾、近年では Chernaff 氏⁽¹⁰⁾らの一連の逐次実験計画法に対する研究もある。しかし、これらの研究では、一つの仮説の検定に対する逐次的検定法が主として議論されている点に対して、実際応用家の立場としてはまだ不満が残されている。

ここで十分に考えねばならない点は、

- (1) 品質管理図は、変動をおさえたい場合
- (2) EVOPは変動があまり大きくない場合、平均値をもっと望ましい値にしたい場合

にそれぞれ有用であるが、現実の場は、このいずれか一つの場合のみでなく、むしろ二つが共存しているような場が多いということである。このような場には、実験計画法が有用な方法としてあげられるが、これには、さきに述べた不利益点が存在する。

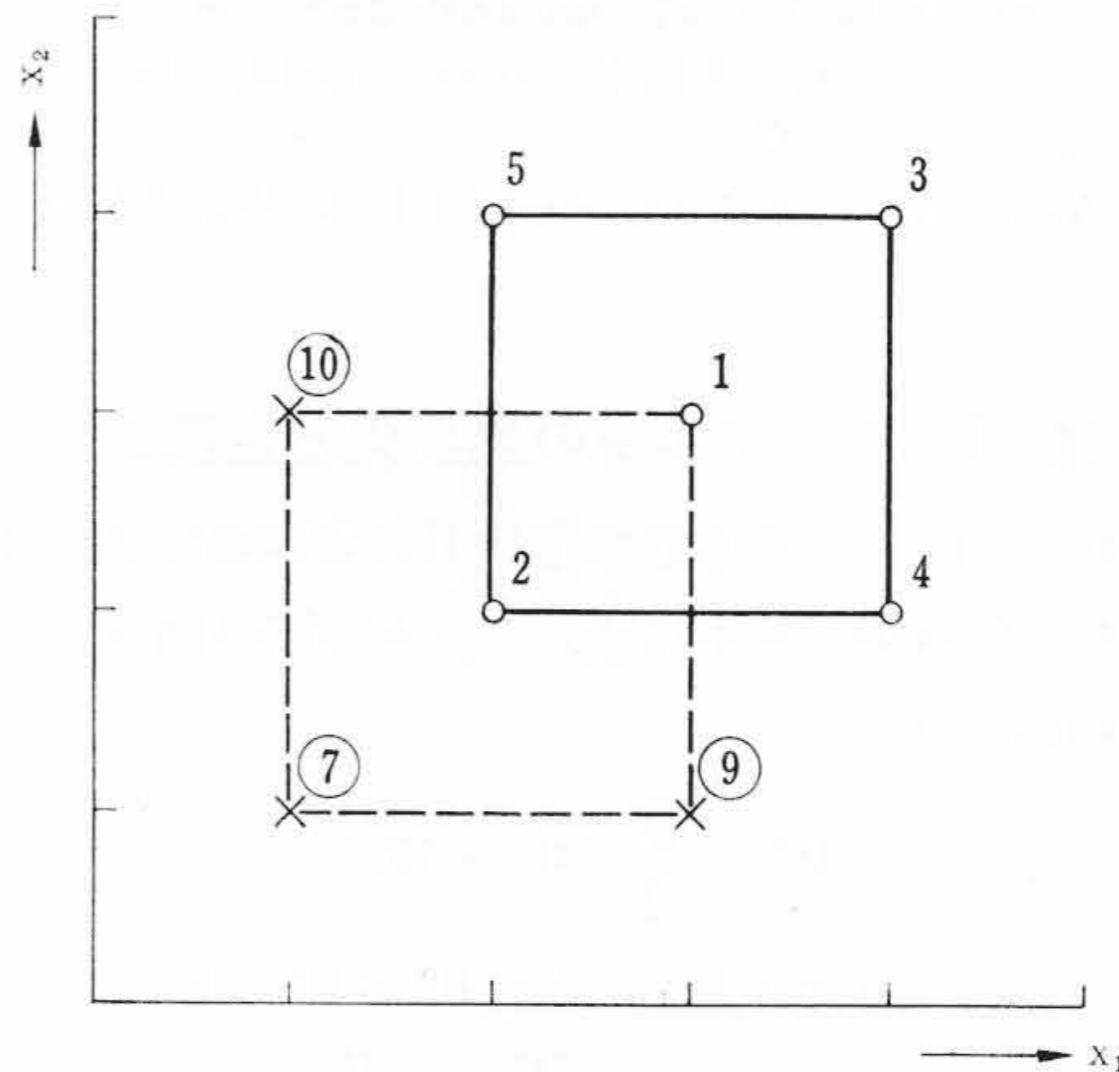
これらを基にして、筆者は確率対応法の多要因構成の方法を生かし、EVOPの逐次的最適化の思想を生かし、さらに、管理図の様式を生かした、現場的な逐次的工程の最適化法ともいべきものを提唱したい。

2. 根本的な考え方

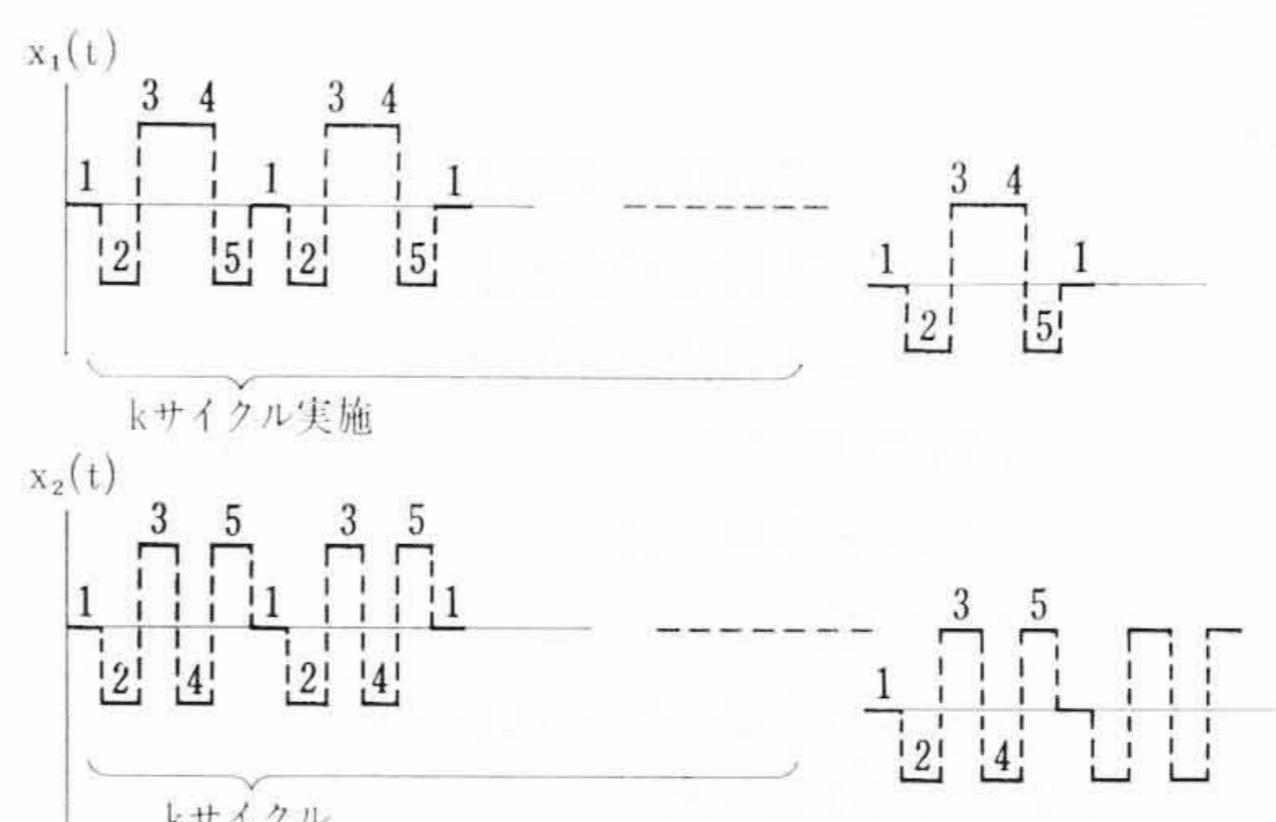
2.1 EVOPの問題点

G.E.P. Box 氏⁽²⁾⁽¹¹⁾によって提案されているEVOPには前述のように大きい問題点がある。この問題点を少し考えてみよう。

EVOPとは生物進化のモデルを工業製品の開発作戦に応用しよう



第1図 EVOPにおける作業工程の変化の図式



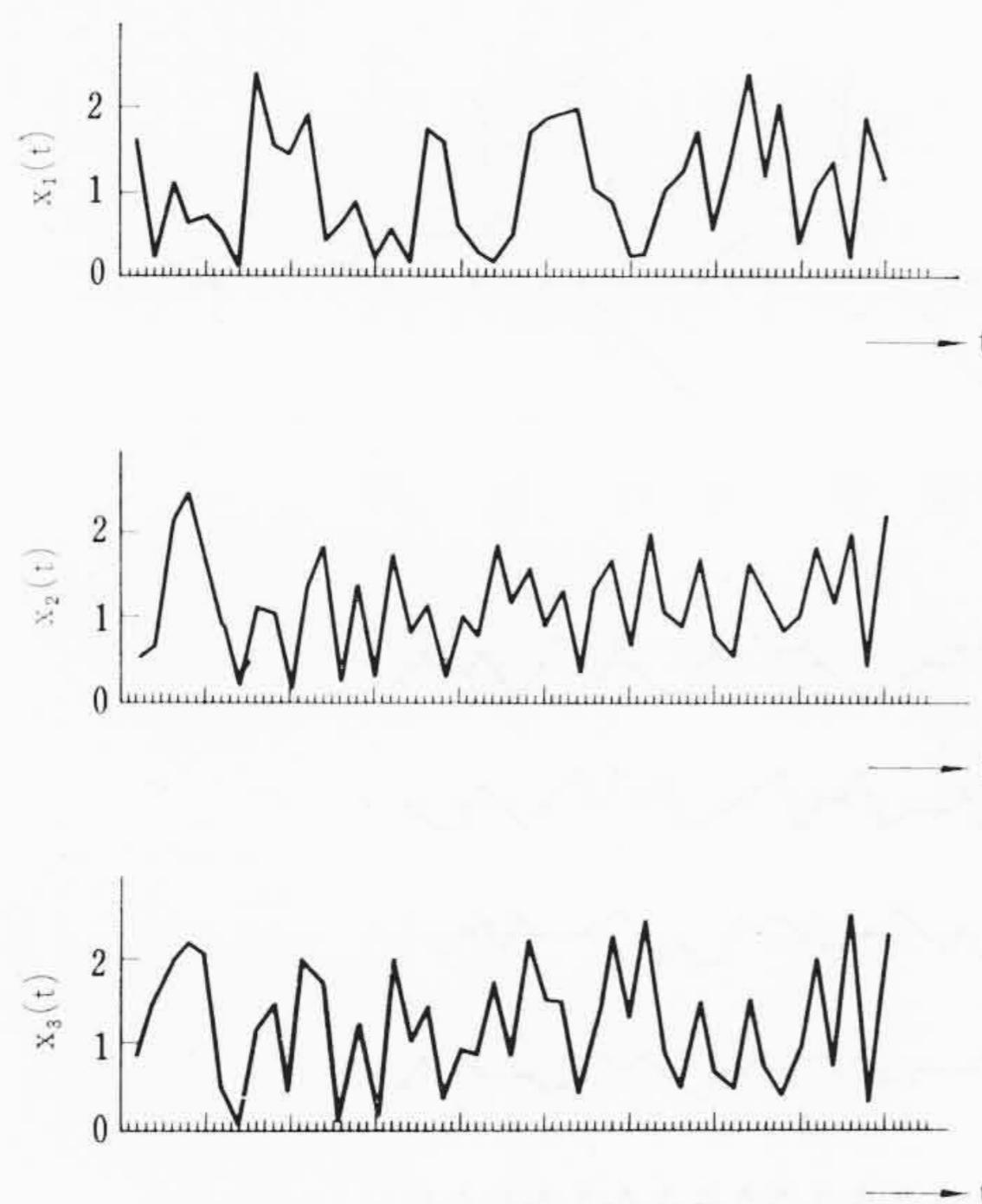
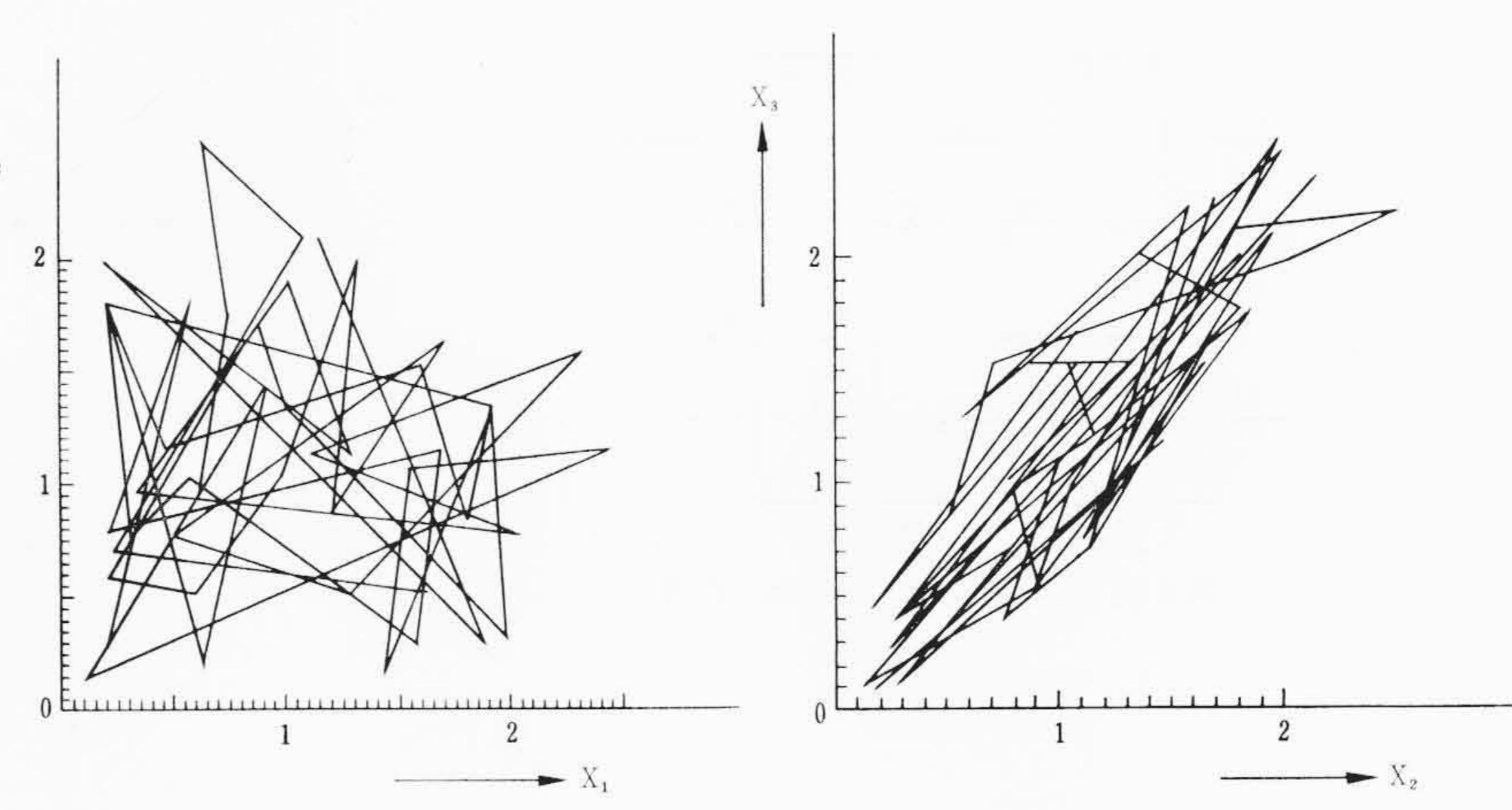
第2図 $x_1(t)$, $x_2(t)$ の時間経過にともなう変化の図(因子の制御過程)

とする方法である。ここでは因子空間(ある目的の特性値に対する変動因子によって構成される空間)を2~3次元に限定し、さらに空間上の点を第1図のように制御させて直交性を保たしめて、目的の特性をよい方向へ変化せしめる因子空間の方向をさぐり、たとえば第1図の新しい点線の領域での操業へ進化してゆくというプロセスをもっている。すなわち第2図のような因子の制御過程をとるのである。一方、現実の場は第3, 4図のようであって、

- (1) x_1 , x_2 は一定に制御することはむずかしく(厳密な意味で一点に保つことは不可能と考えられる)、また x_1 , x_2 の同時的な変動をみることができる。
- (2) 変動因は x_1 , x_2 だけではなく一般に数えきれないくらいの、数があり、これらが互いに、関連し合ったり、またはほとんど無関係に変動している。

EVOPにおいて、このように誤差が大となると、制御の安定性という問題が起こる。この問題に対しては、次の領域に移動するルールと、誤差の大きさ、特性と因子変数との間の関数関係などの間につ

* 日立製作所笠戸工場

第3図 $x_1(t), x_2(t)$ の変動の実態第4図 x_1, x_2 の共変動の実態

いて数学的解析が行なわれ、若干の試論もある^{(12)~(14)}。一方、出発点として、統計的仮説検定の理論は、この場合の有力な根拠を与えることは異論のないところであるが、誤差の構造に対して、さらにダイナミックな（たとえば要因分析的な）理論的基礎づけも必要とされる。

2.2 確率対応法の数学構造^{(15)~(17)}

確率対応法は特性値を y 、第1要因群

x_1, x_2, \dots, x_p の未知パラメータ $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$

第2要因群

$\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_R$ の未知パラメータ $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R$

を観測値

$$y = \sum_{p=1}^P \alpha_p x_{pn} + \sum_{r=1}^R \beta_r \xi_{r\pi(n)} + \varepsilon_n \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

によって計画行列

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1N} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{p1} & \dots & x_{pn} \\ \xi_{1\pi(1)} & \dots & \xi_{1\pi(N)} \\ \dots & \dots & \dots \\ \xi_{R\pi(1)} & \dots & \xi_{R\pi(N)} \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

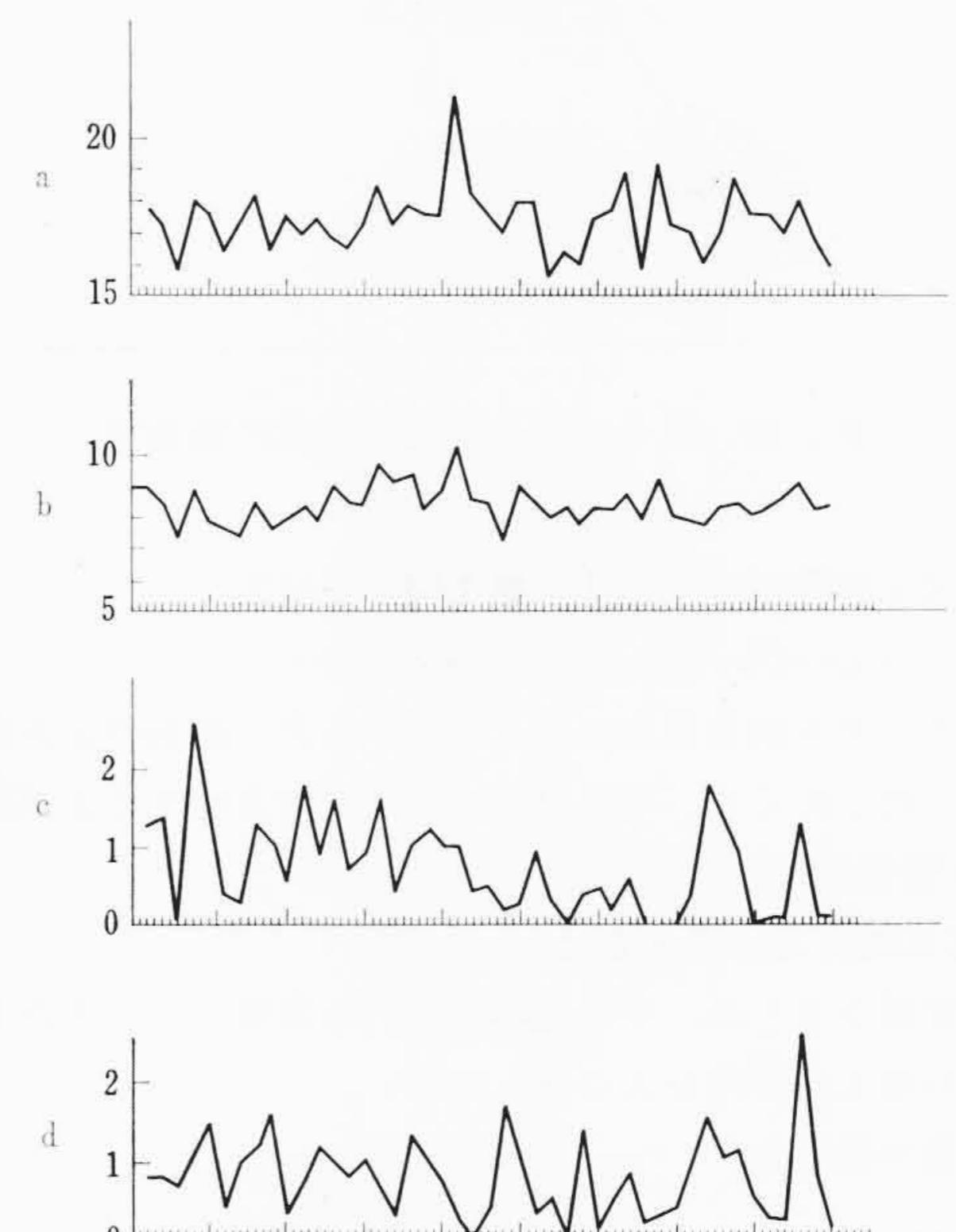
の実験で推測する方法である。ここで ε_n は観測値の誤差で、 $\{\pi(n)\}$ ($n=1, 2, \dots, N$) は N 個の数字 $1, 2, \dots, N$ のある一つの順列を示している。

ここで $\sum_r \beta_r \xi_{r\pi(n)}$ ($n=1, 2, \dots, N$) および ε_n ($n=1, 2, \dots, N$) を正規分布（平均値は 0、分散はそれぞれ σ_1^2, σ_2^2 ）からの独立な標本値と仮定すると $\{\alpha_p\}$ ($p=1, 2, \dots, P$) は通常の F 検定で容易に推測することが可能となる。この場合、一定の大きさの α_p に対する検定の精度（ふるいおとされるか、次の第2次計画に残されるかの確率で表現できる）は F 検定の大きさ α_0 と実験のサイズ N と誤差の大きさ σ_1^2 と σ_2^2 とによって非心 F 分布⁽⁴⁾によって正確に求められる。

2.3 実際的な場の考察

第5図はある製品の品質特性におよぼす変動要因の一部の実測記録である。これからわかるように、各要因は互いに何の関係もなく、しかも一定の値にも制御されておらず、ある範囲内を確率的に変動している。

このような状態は数学的には(1)式の第1項が、いま、われわれが問題にしている因子群であるとすると、これらに対してじゅまを



第5図 変動因の変動状況

する第2項の因子変数群 $\{\xi_r\}$ ($r=1, 2, \dots, R$) がある多次元正規母集団からのサンプルであるとして模型化することができる。すなわち、

$$v_{\pi(n)} = \sum_{r=1}^R \beta_r \xi_{r\pi(n)} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

は正規分布（平均値 0、分散 σ_1^2 ）をもつ母集団からのランダムサンプルであると仮定することができることを表わしている。

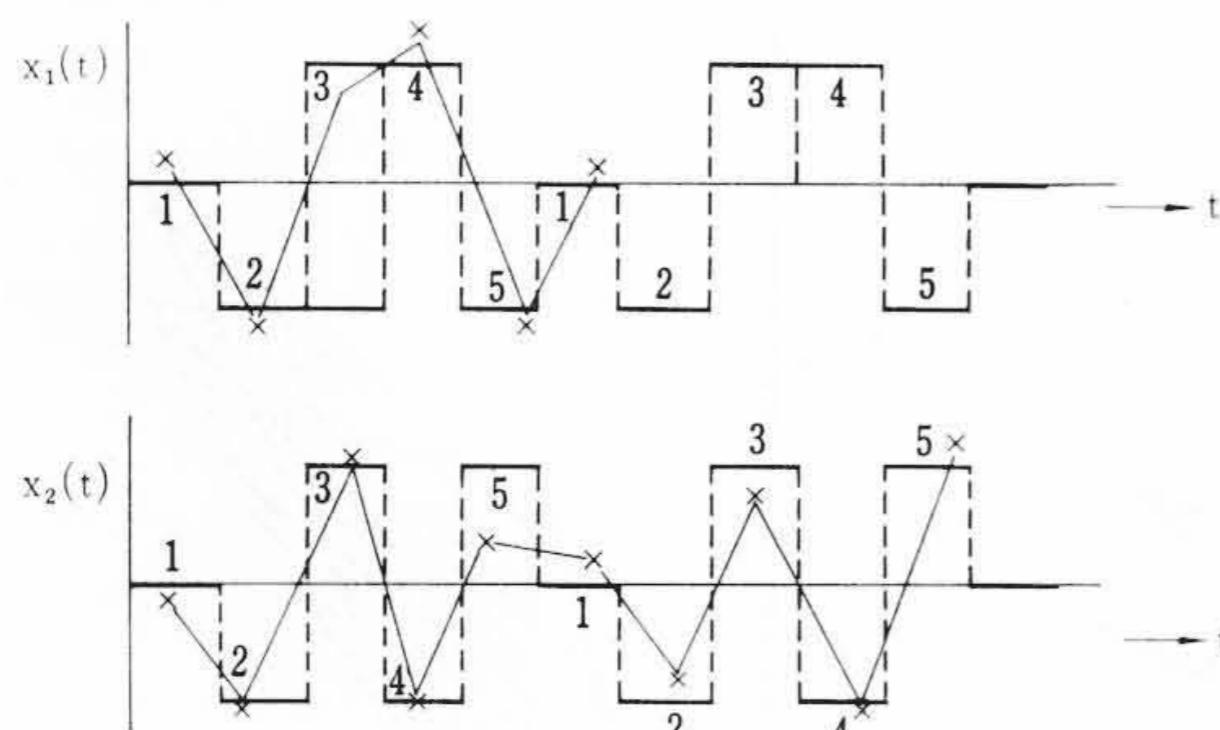
このような実際的な場に対して EVOP を用いた場合、

(1) 誤差の増加によって制御の安定性が減少する。

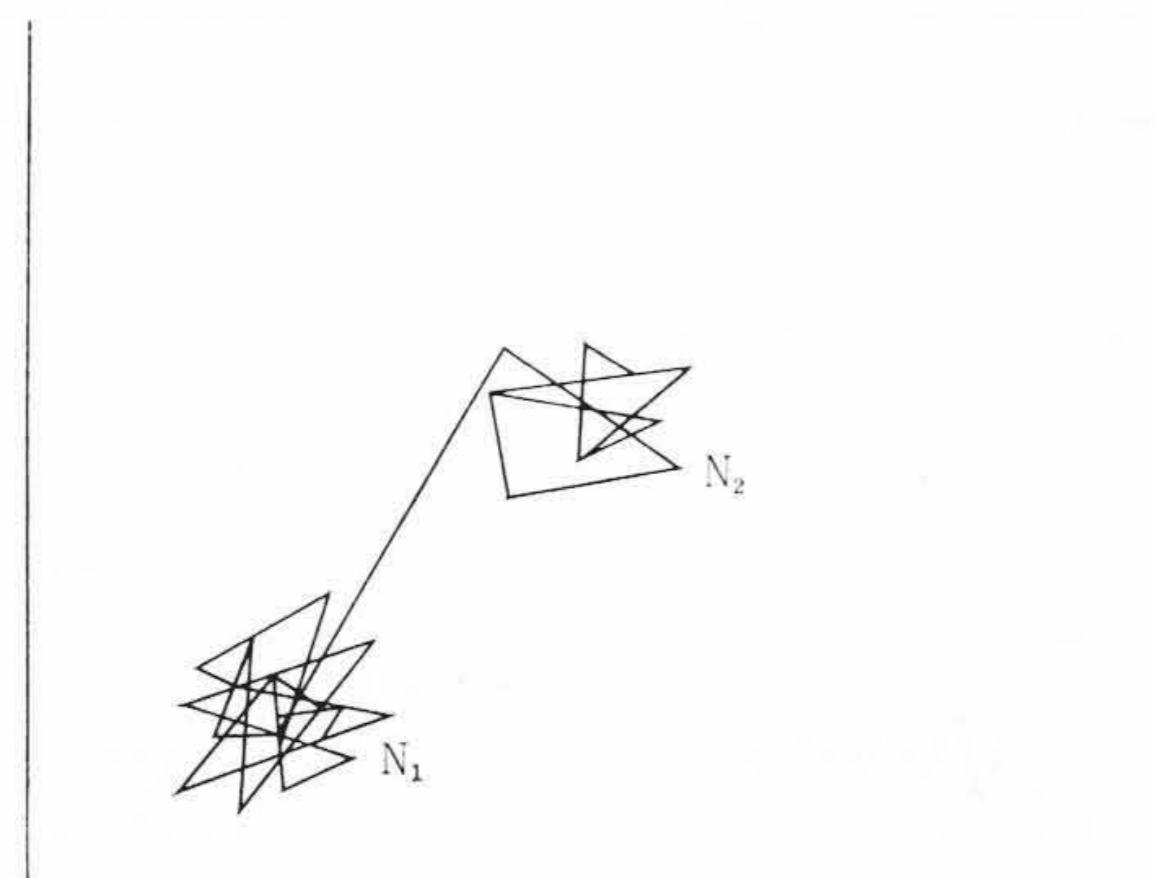
すなわち、第1のパターンから第2のパターンへ移動した場合、再び逆の方向へ移動したほうがよいというシグナルが出て、そのほうへ帰るというような事態が起こることを安定性が無いと定義する。

(2) (1)の対策として、同一パターンで長期間十分に操業して、次へ移るというルールが考えられるが、こうすると x_1, x_2, \dots, x_{pt} 以外の有効な変動因の制御の時期をおくらせる確率をも増加させるということになる。

すなわち問題にしている $\{x_p\}$ ($p=1, 2, \dots, P$) までの因子よりも、誤差項の因子 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_R$ を考察の対象にすべきことが多く、その時期のオクレは大きい損失となる。



第 6 図 因子の制御の実態



第 7 図 因子空間上の進化過程の抽象図

(3) 因子変数の変更自体が第 1 図における

$$\textcircled{1} \rightarrow \textcircled{2} \rightarrow \textcircled{3} \rightarrow \textcircled{4} \rightarrow \textcircled{5} \rightarrow \textcircled{1} \rightarrow \textcircled{2} \rightarrow \textcircled{3} \rightarrow \dots$$

というサイクル的変更ルールとしたいとき、最初の①と次の①の位置が一致しにくく、バラツイでてくるということが起こりうる(第 6 図参照)。

2.4 基本的考え方のまとめ

以上の問題をまとめ、その他の実際的な考慮をして次のように新しい方法の基本的要件をとりまとめたい。

(1) 数学模型を

$$y_n = \sum \alpha_p x_{pn} + v_n + \varepsilon_n \quad (4)$$

(ここで $v_n = \sum \beta_r \xi_{rn}$)

とした場合 $\{x_p\} p=1, \dots, P$ を考察の対象とし、 P はあまり大きくはしない。ただし、 $\{x_p\}$ ($p=1, 2, \dots, P$) を制御することは困難である。

(2) v_n で表わされる誤差項のうちの要検討部分はかなり大きいが、この分散 σ_1^2 が $\{\alpha_p\}$ を検出する力をあまり阻害することのないよう N_1 を適当に求める。

(3) 一方において、誤差に含められている変動因はいつでも制御は困難ではあるが、観測はできると仮定することは可能である。

(4) EVOP と同様の意味で x_1, x_2, \dots, x_P について N_1 の時点で、先に進めるか、管理を打ち切るかの判断を下す。

(5) N_1 の後

$$N_1 + 1, \dots, N_1 + N_2$$

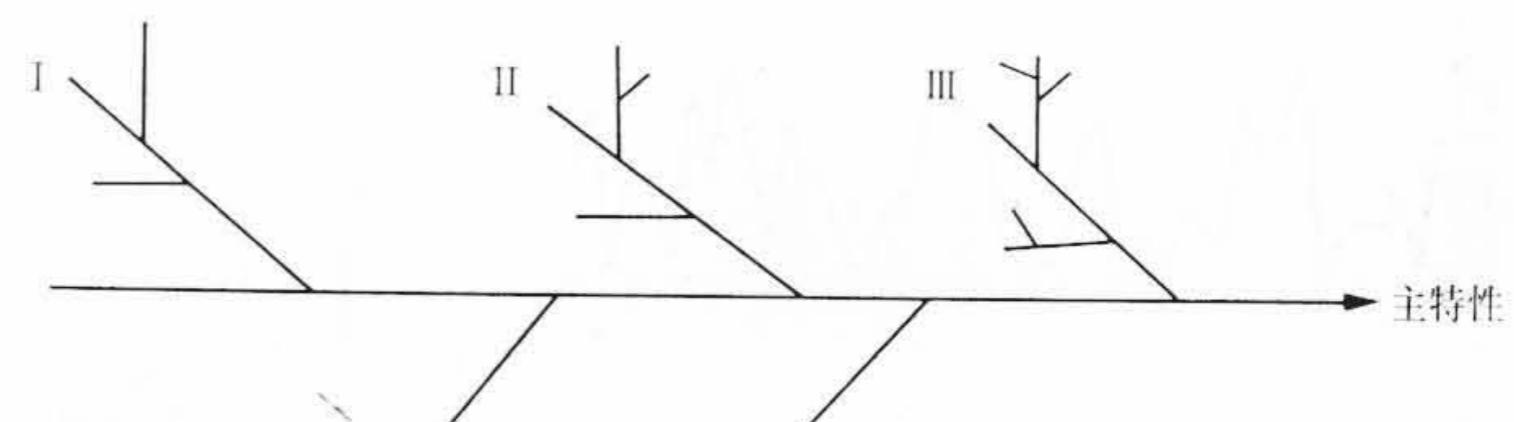
の操業を新しい因子空間の領域で行なって $N_1 + N_2$ の後、(4) 同様の判断を下すというルールを作る(第 7 図参照)。

(6) $N_1 + N_2$ の後

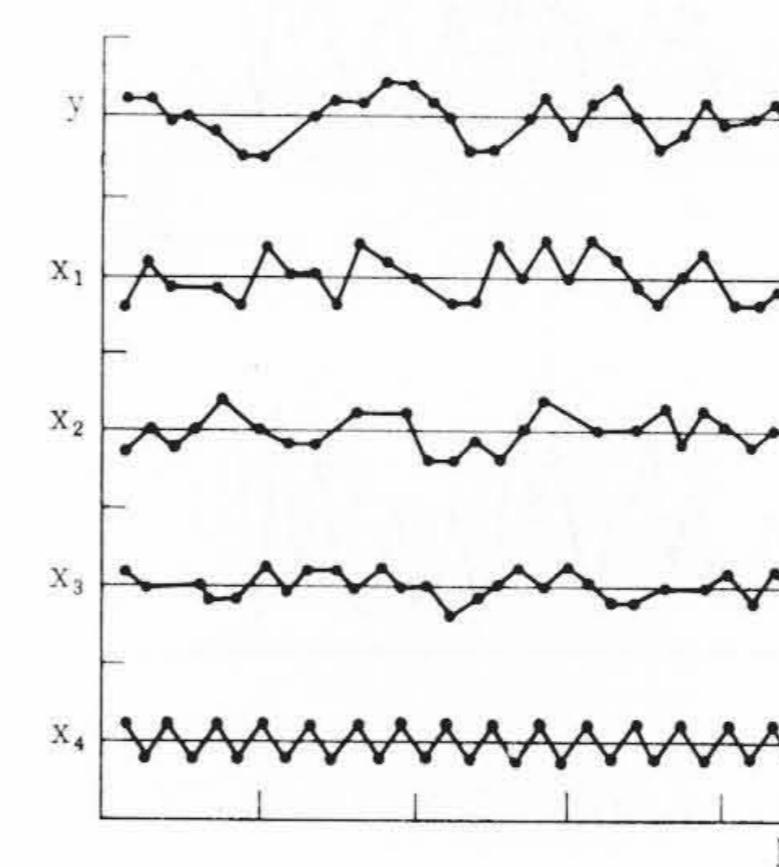
$$N_1 + N_2 + 1, \dots, N_1 + N_2 + N_3$$

の操業を新しい因子空間の領域で行ない最後的判断を行なう。

ここで重要なことは、いろいろの条件を固定しないでできるだけ自由に判断を行ない、思い切った改善などのアイデアを、おり込める余地を手続きの中に含めるというところにある。



第 8 図 要因一特性図



第 9 図 第 1 段オペレーションチャートの例

3. 具体的な実施の手続き

前章で示した基本的な考え方に基づいて、次のような実際的手続を考へよう。

- (1) 問題の主特性 y についての要因一特性図(第 8 図)を描く。
- (2) 最終作業ステップに近いほうから、5~10 個の要因について、2 水準への制御、または単に計測を計画する。ここで交互作用が大きいと思われるものは、これを消去するように計画したほうがよい。あまりに交互作用が大きいと考えられる場合は、複合因子として、一方を考察の対象からはずすことも可能である。
- (3) 主特性を y 、ここに取り上げた第 1 段の要因を x_1, x_2, \dots, x_{P_1} とする。 y と x_1, x_2, \dots, x_{P_1} について第 9 図のようなチャートを作る。
- (4) N_1 (ノイズの大きさによるが実際的見地より 30~40 点は必要であろう) 点の打点が続いた後、各要因について

$$\bar{x}_P = \frac{1}{N_1} \sum_{n=1}^{N_1} x_{Pn} \quad (5)$$

$(P=1, 2, \dots, P_1)$

を求める

$$\{x_{Pn_U}\} : x_{Pn} > \bar{x}_P \text{ とこれに対応する } \{y_{n_U}(P)\}$$

$$\{x_{Pn_L}\} : x_{Pn} \leq \bar{x}_P \text{ とこれに対応する } \{y_{n_L}(P)\}$$

の 2 群に層別する。

(5) $y_{n_U}(P)$ と $y_{n_L}(P)$ との間の差を統計量

$$F_0 = \frac{\frac{N_1}{4} (\bar{y}_{n_U} - \bar{y}_{n_L})^2}{\left\{ \frac{\sum_{n=1}^{N_1} (y_n - \hat{y}_n)^2}{N_1 - 2} \right\}} \quad (6)$$

によって検定する。ここで、

$$\hat{y}_n = \bar{y} + \hat{\alpha}_P x_{Pn} \quad (7)$$

で $\hat{\alpha}_P$ は要因の特性に対する真の一次係数 α_P の推定値である。

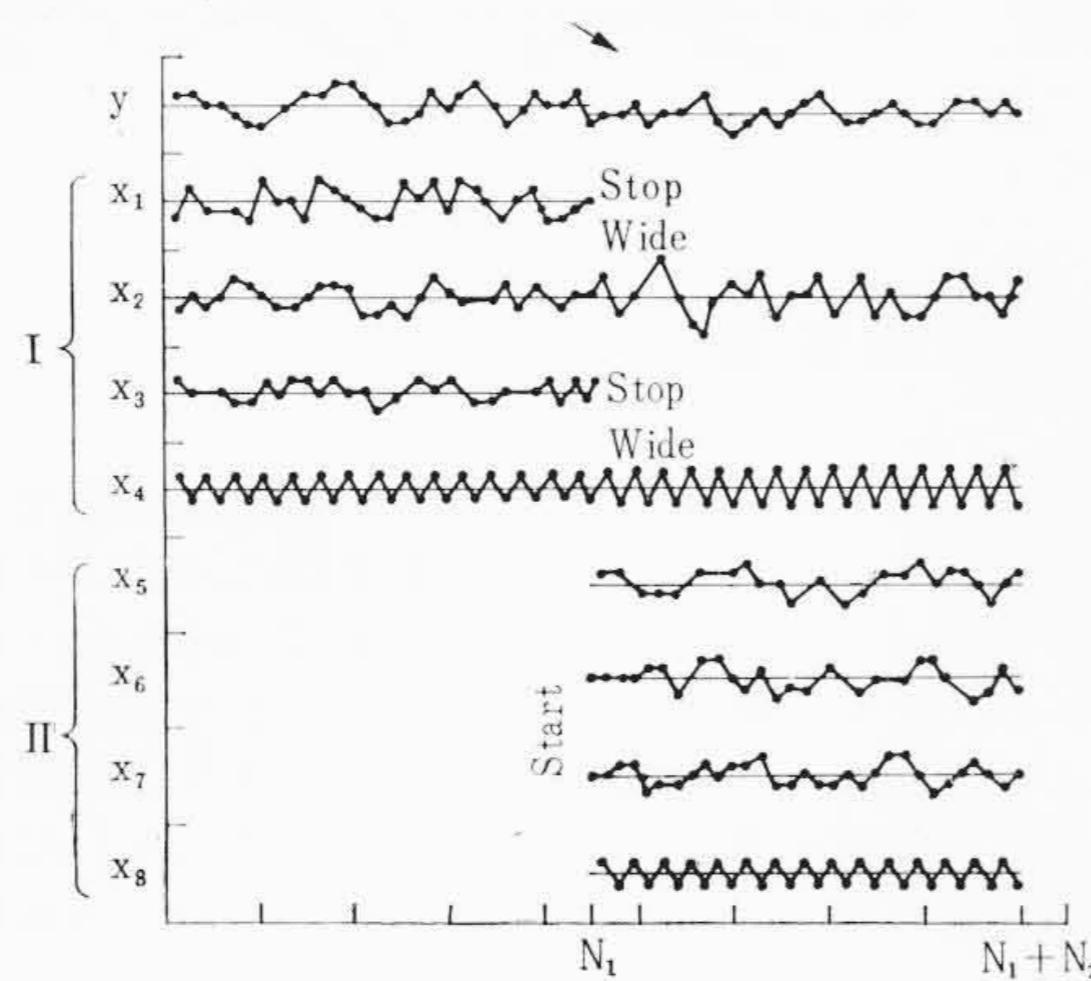
検定のルールは通常の F -検定と同じで、

$$F_0 \geq F_{1, N-2}^1(\alpha_0) \quad (8)$$

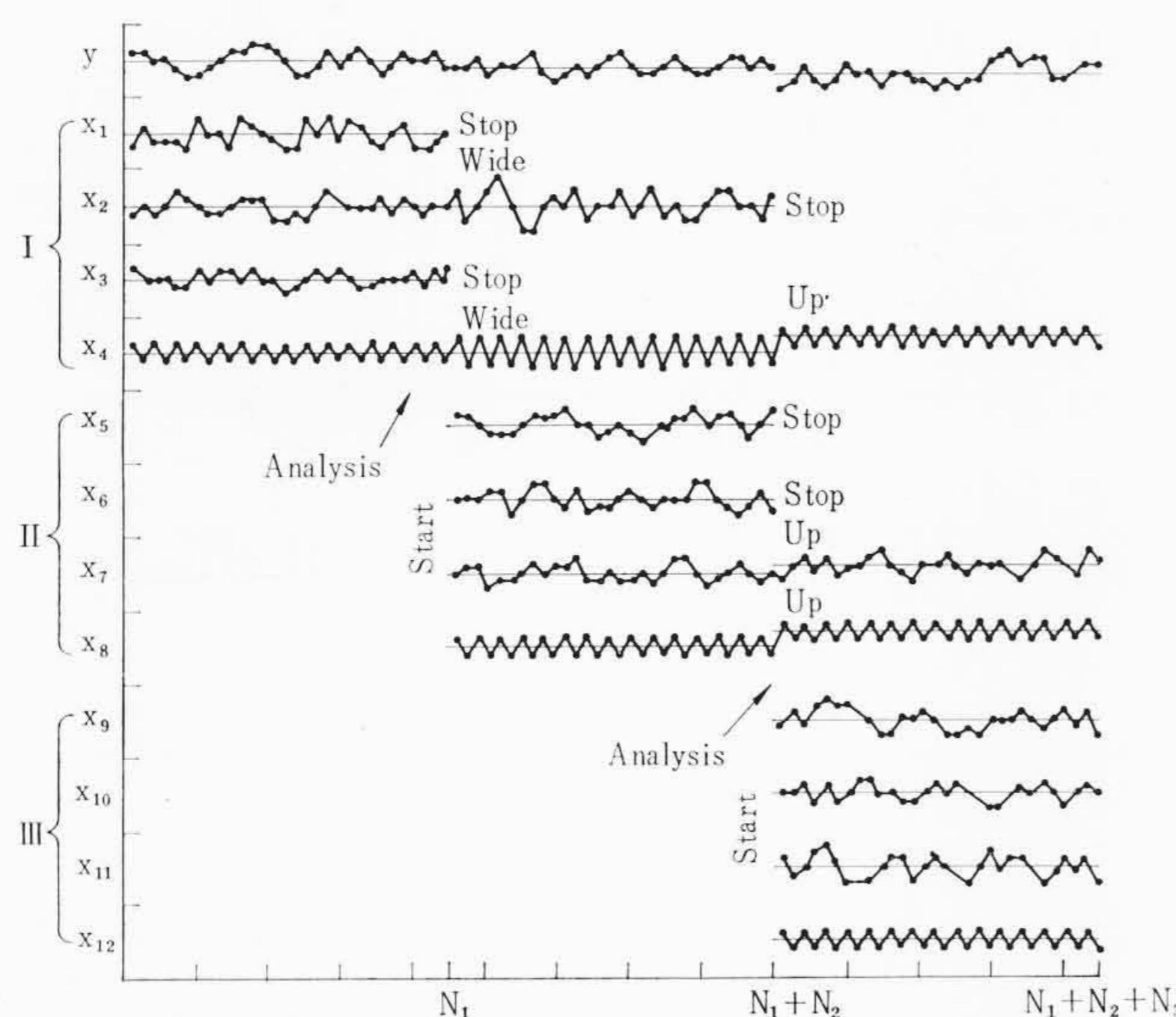
の場合、その要因の一次係数についての仮説

$$H_0: \alpha_P = 0 \quad (9)$$

を棄却する。ここで $F_{f_1, f_2}^1(\alpha_0)$ は自由度対 (f_1, f_2) の F 分布の α_0 点を示す。この α_0 は境界線検定^{(18)~(20)} に近い大きさの値を選ぶべ



第10図 第2段までのオペレーションチャートの例



第11図 第3段までのオペレーションチャートの例

きであろうことが考えられる。

(6) 有意でない因子については、制御、または測定をやめるか、さらに広い水準変動を意識的にもたせる。

有意な因子については、主特性の望ましい方向の新しい一つの、または二つ以上の水準に制御するか、またはそのまわりに操業目標を移して測定をつづける。

(7) 第1段オペレーションで、さらに検討をつづけることにした因子にまったく新しい群の要因を加えて第2段オペレーションを実施する。第10図はその様子を説明するものである。

(8) (7)の第2段オペレーションの結果も(4), (5)同様の手続きで推測を行なったのち、(6)同様の検討、アクションを行なう。

(9) 第2段オペレーションで、さらに検討をつづけることにした因子に、まったく新しい要因群を加えて、第3段オペレーションを計画実施する。第11図はその様子を説明するものである。

(10) 以上の手続きは所定の目的(主特性がある目標値に達する)を達するまでくり返す。全オペレーションが完了したとき、これらを取りまとめて、

$$y = y(x_1, \dots, x_{P_1}, x_{P_1+1}, \dots, x_{P_2}, x_{P_2+1}, \dots, x_Q) + \varepsilon \quad (10)$$

の特性関数の推定量を求めておく。

なお、全体としてのオペレーションがあまり長びくのは実際上の

観点から好ましくないので、1~2カ月で一つの問題がかたづくように心掛けるべきである。場合によっては適当なときに打ち切り、そこで、いろいろな統計解析、技術的検討を加えて総反省を行なってみる。

いま一つの注意すべき事項として、主特性 y がえられるまで時間的ズレが存在する(フィード・バックのオクレ)場合が考えられる。このような場合には、第1段オペレーション終了時、または第2段オペレーション終了時に、少し時間をかけた詳細な解析を行なうことは、実行可能であり、また有効でもあろう。しかし、一般には詳細な、複雑な統計解析はアクションの時期の遅れの原因を作るだけで益の少ない場合が多い。

4. 結 言

製造工程における品質特性の変動を制御するための、要因系の変動を逆に利用しようとした新しい工程の逐次的調整法を提案した。ここで、これらの方法を応用するにあたって、筆者の確率対応法に関する研究結果は、一つの重要な基礎を与えるものであることを指摘したい。

また本方法について数学的な研究を実施すべき課題として

- (1) 第1段、第2段、……、第 j 段の各段の実験の大きさをいかにすべきか
- (2) 各段終了時、次のステップでの計画をいかにたてるか
- (3) 全体としての停止の規則

があげられる。

なお、本方法について有力な支持をいただき、ご激励を賜わった九州大学北川敏男教授に深甚の謝意を表する。また、いちはやく、本方法の適用を図られた日立製作所各工場の関係各位に心からお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) たとえば JIS Z-8101 (1956)
- (2) G. E. P. Box: Applied Statistics VI, 3 (Feb. 1957)
- (3) 島田正三: オペレーションズ・リサーチ 5, 146 (昭 35-3)
- (4) 北川敏男: 実験計画法議義 I, II (昭 30, 培風館)
- (5) 増山元三郎: 工場技術者のための実験計画法 (昭 30, 日本規格協会)
- (6) 田口玄一: 実験計画法 上 (昭 34, 丸善)
- (7) F. E. Satterthwaite: Technometrics, 1, 37 (May, 1959)
- (8) F. J. Anscombe: Technometrics, 1, 195 (May, 1959)
- (9) A. Wald: Sequential Analysis 1949, (John Wiley & Sons Co.)
- (10) H. Chernoff: Ann. Math. Statist., 30, 755 (1959)
- (11) G. E. P. Box and J. S. Hunter: Technometrics, 1, 77 (Feb. 1959)
- (12) G. E. P. Box: Joun. Basic Eng., Trans. of the ASME, Ser. D, 82, 113-119 (1960)
- (13) T. Kitagawa: Univ. of California Pub. in Statistics, 3, 4, 147-186 (1963)
- (14) 北川敏男: “最適化制御論” 数理科学研究第5班報告, 第8集 (昭 36-1)
- (15) 山川典宏: 日立評論 43, 980 (昭 36-8)
- (16) 山川典宏: 日立評論 44, 1056 (昭 37-7)
- (17) K. Takeuchi: Rep. Statist. Appl. Res. J. U. S. E., 7, 167-198 (1960)
- (18) 北川敏男: 推測過程論 3, 岩波現代応用数学講座 (昭 33, 岩波書店)
- (19) A. E. Paull: Ann. Math. Statist., 21, 539-556 (1950)
- (20) H. Bozivich, T. A. Bancroft and H. O. Hartley: Ann. Math. Statist., 27, 1017-1043 (1956)



特許の紹介

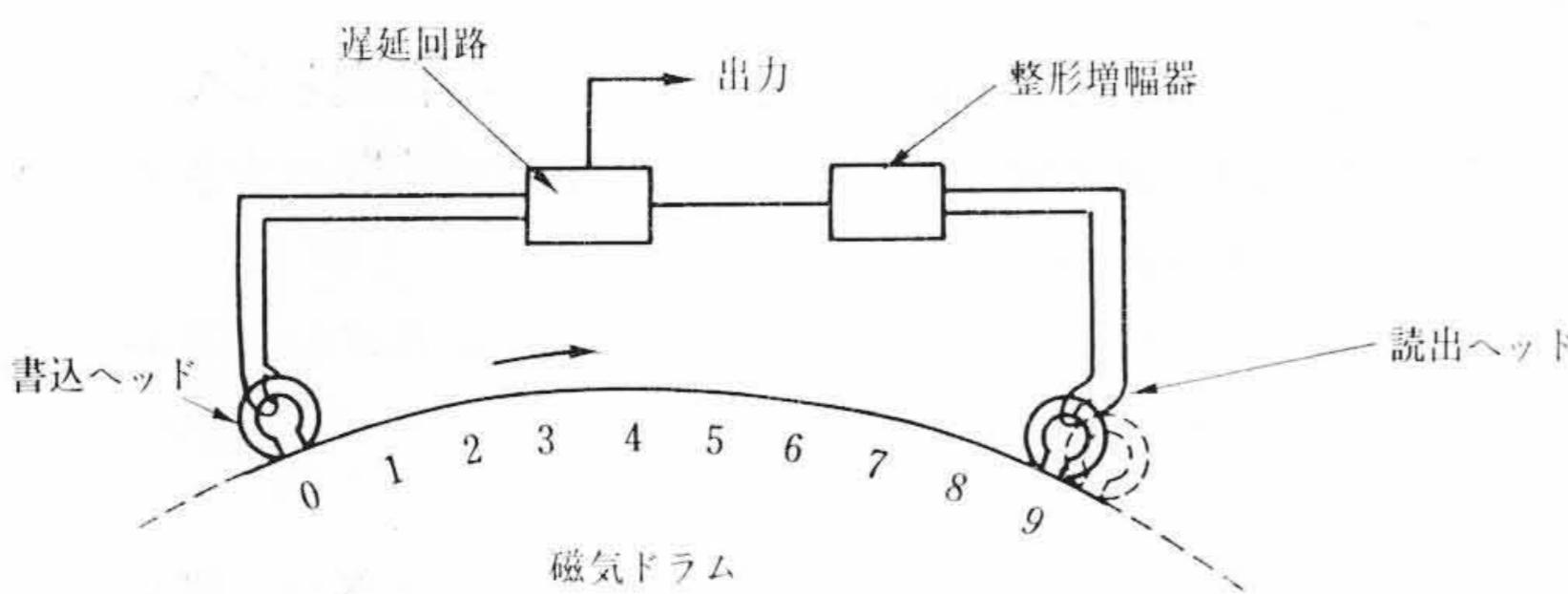


特許 第311610号(特公昭38-1058)

井立田 義春

遅延記憶装置に対する情報の書込読出装置

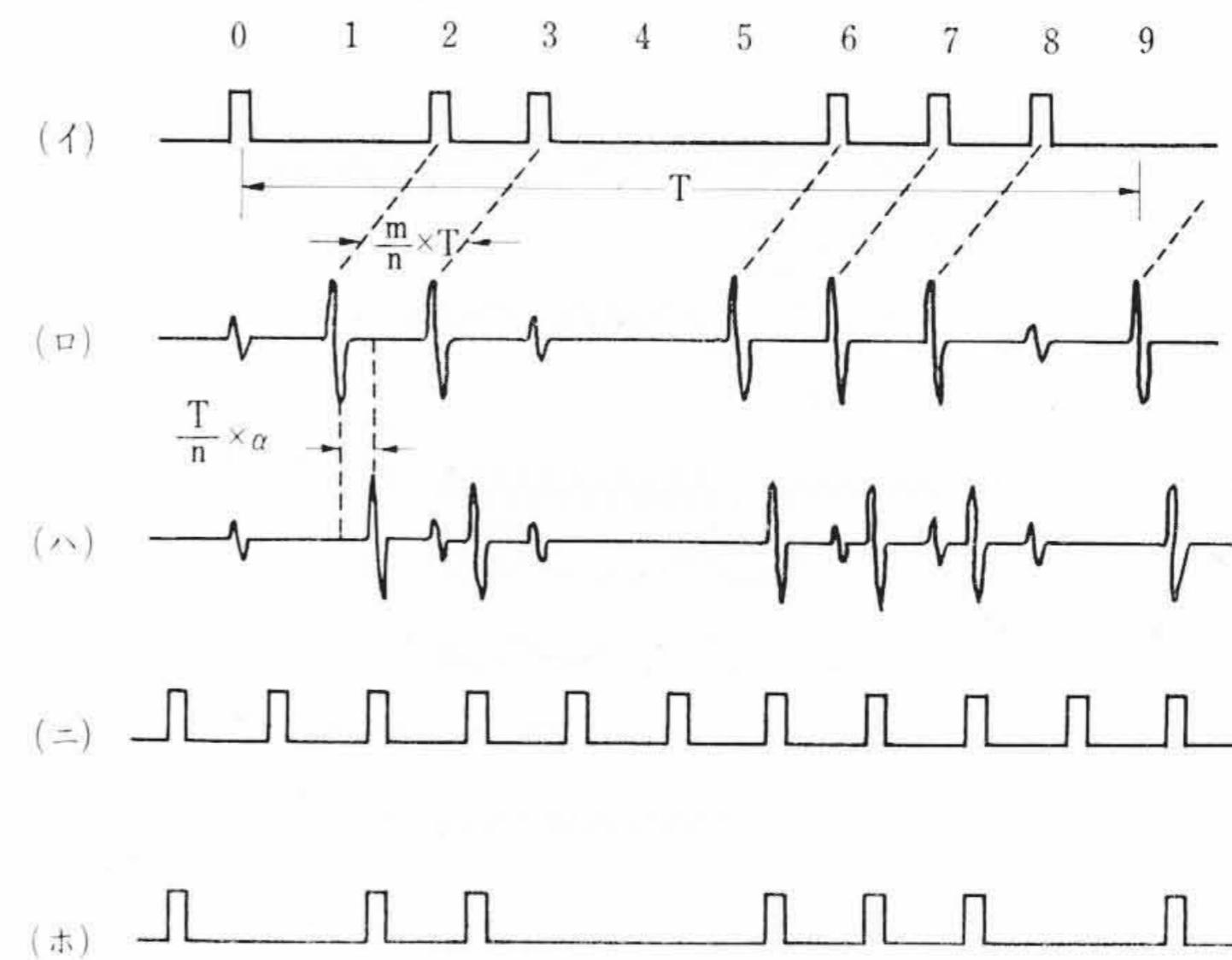
磁気ドラムなどに遅延を利用した記憶装置では書込と読出を同時に行なうが、そのため書込信号に対する読出信号の比が大きくなるので、読出回路では書込信号の影響を受けやすくなり誤動作が多いという欠点がある。これを図により説明してみる。第1図は磁気ドラムを利用した遅延記憶装置を示し、書込ヘッドより周期T、一周期内の情報数nなる信号は磁気ドラムに与えられ $m/n \times T$ 時間後読出ヘッドより取り出される(m はヘッドおよび増幅器などの遅延を考慮した値で、 $0 < m < n$)。たとえば書込信号が第2図(イ)に示す信号であって、0~9まで10ビット($n=10$)から成る周期Tの信号を繰返して書込または読出を行なっている場合の読出波形は(ロ)のように9ビット目($m=9$)から、すなわち $m/n \times T = 0.9T$ あとから読出される。(ロ)に示す大振幅パルスは読出信号パルスである。しかしこのような方式では、書込信号と同一時期に(ロ)の小振幅パルスによって示すように、書込信号が各配線間に生じた磁気的および浮遊容量による結合を介して障害パルスを生ぜしめるがゆえ



第1図

に、所望の読出信号のみを取り出すことは実際上困難であった。そのためこの発明においては、たとえば第1図に示すように書込みヘッドを点線の位置までずらし、書込信号を $T/n(m+\alpha)$ 時間だけ遅延させ($0 < \alpha < 1/n$)て、第2図(ハ)に示すような読出信号を読出するようにした。このようにした場合には障害パルスは第2図(イ)に示す信号よりも、 $T/n \times \alpha$ 進ませたストローブパルス(ニ)によりゲート回路を制御すれば障害パルスが除去され(ホ)のように所望の読出信号が得られる。

(高崎)



第2図

特許 第400048号(特公昭36-10381号)

木村 浩

電子流またはイオン電流の照射装置

高エネルギーの荷電粒子ビームを物体に照明して、核変換、重合その他の化学反応、加熱、加工などを行なわせることが広く知られている。この場合、一様な照射効果を得るために、被照射物体の各部に対して均一な照射効果を得るために、被照射物体の各部に対して均一な照射線量を与えることが重要である。このために、従来は一定の電流値のビームを走査して、ある拡張せられた面積にわたって一様な照射を行なうようにしているが、均一走査を行なうために走査電源として鋸歯状波または三角波電源などのきわめて複雑かつ高価な回路構成を必要とする欠点がある。

この発明は上述の欠点を除去し、走査電源として正弦波電源などの簡単かつ安価な回路構成のものを用いて完全に均一な走査を行なうようにしたもので、荷電粒子ビームを周期的に走査せしめるとともに、これに対応してその走査波形の時間微分に相当する波形にビーム電流密度を時間的に変調せしめるようにしたものである。

すなわち、図に示すように、荷電粒子源から放射される変調ビームをたとえば図(イ)に示すような正弦波(角周波数 ω)の電源で付勢される走査装置により、被照射物体上の $-a$ 点より $+a$ 点まで走査すれば、ビームの各時点における位置 S は、 $S = a \sin \omega t$ と表わされるから、ビームの移動速度の絶対値は $|ds/dt| = a\omega |\cos \omega t|$ となる。したがって、図(ロ)に示すように荷電粒子源から放射するビーム

電流密度 dQ/dt を図(イ)の走査波形と $\pi/2$ の位相差を有する正弦波の全波整流波状に密度変調しておけば、 $dQ/dt = I_0 |\cos \omega t|$ であるから、上式より、 $dQ/dS = I_0/a\omega = \text{一定}$ となり、図(ハ)のように照射線量の分布は完全に均一となるのである。

(松島)

