

アナログ計算機の 概要と計算法

資料 No. 6

1961年3月

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

まえがき

この資料は、アナログ計算機を初めて使用される方の説明書として、あるいはある程度使用経験のある人のハンドブック的な資料として、役だてる意味でまとめたものである。

説明は日本原子力研究所に設置されている PACE Analog Computer (Electronic Associates Inc. 製)を中心にしておこなったが、現在生産されているアナログ計算機はほとんどこれと同型式のものであるので、他の計算機を用いる場合にも十分役だつものと思われる。

特に実例、関数発生、結線例などは過去約2年間にわたる当研究室の経験をもとにしてまとめたものである。

1960年12月

日本原子力研究所
計測制御研究室

目 次

1. 緒 言	1
2. 構 成	2
3. 演 算 要 素	4
3.1 演算増幅器 (AMPL)	4
3.2 加 算 器 (SUM)	4
3.3 加算積分器 (INT)	5
3.4 ポテンシオメータ (POT)	5
3.5 サーボ掛算器 (S-MULTI)	8
3.6 電子管掛算器 (E-MULTI)	10
3.7 サーボレゾルバ (RSLVR)	11
3.8 任意関数発生器 (FG)	14
3.9 低周波雑音発生器 (NG)	14
3.10 非線形演算用2極管 (DIODE)	15
3.11 非線形演算用リレー (REL)	15
3.12 ファンクション・スイッチ (FS)	16
3.13 INTERCONSOLE JUNCTION (ICJ)	16
3.14 TRUNK	16
4. 演算要素以外のおもな要素	17
4.1 パッチパネル (P-PANEL)	17
4.2 ディジタル電圧計 (DVM)	17
4.3 真空管電圧計 (VTVM)	17
4.4 XY レコーダ (XYREC)	17
4.5 ペンレコーダ (6REC, 8REC)	18
4.6 プリンタ (PRINT)	20
4.7 過負荷警報と演算停止	20
5. 計算機の操作	21
5.1 計算機操作盤	21
5.2 ポテンシオメータ (POT) の設定	21
5.3 レコーダの接続および準備	22
5.4 計算機操作の手順	22
6. 機械にかけるまでの過程	27
6.1 スケーリング (スケール・ファクタをきめること)	27
6.2 機械にかけるまで	28
6.3 例 題	29
7. 実 例	35
7.1 Water Boiler 型原子炉の動特性	35
7.2 英国型動力炉の制御系の解析	36
7.3 高次代数方程式	40

付 錄

A 1 演算要素の結線図用記号表	47
A 2 基本的演算回路例	48
A 2.1 S-MULTI による掛算割算	48
A 2.2 $X^{n/m}$ の作り方	50
A 2.3 DIODE による非線形関数	50
A 2.4 REL による非線形関数	56
A 2.5 基本的伝達関数	60
A 2.6 時間関数の発生	60
A 2.7 Padé の近似式による時間おくれ伝達関数 e^{-Ts}	63
A 2.8 原子炉シミュレータ	65
A 3 AMPL の入出力回路	68
A 4 出力選択装置 SIGNAL SELECTOR	69
A 5 FG の設定法	71
A 6 演算要素の性能	72
A 6.1 AMPL	72
A 6.2 S-MULTI	73
A 6.3 E-MULTI	78
A 6.4 RSLVR	78
A 6.5 XYREC	79
A 7 計算機操作上の注意	80
A 8 RATE TEST の方法	81
A 9 AMPL による演算の原理	81
参 考 文 献	83

1. 緒 言

アナログ計算機は主として常微分方程式を解くのに用いられ、線形でも非線形でもほとんど同じように扱うことができる。偏微分方程式をそのまま解くには適していないが、解くとすれば一つの変数の微分を階差でおきかえ、常微分方程式になおす必要がある。

アナログ計算機では、方程式のなかの変数がすべて電圧または時間によって表現され、解はふつう記録計に曲線の形で表現される。各種の物理系の動特性の解析、制御系の解析などではほとんどの方程式が常微分方程式であるから、これらの解析をおこなうにもっとも適した計算機といえる。

解の精度は方程式の形によっても異なるが、だいたい平均して0.1%程度のもので、演算時間も數十秒あるいは数分の程度で、特に実時間演算（解こうとする物理系とまったく同じ時間で解ができる。）が可能である点が特色である。

アナログ計算機はしばしばデジタル計算機と比較されるが、物理系の動特性の解析に現われる常微分方程式を扱うかぎり、アナログ計算機を用いるほうがはるかに有利である。デジタル計算機は確かに万能であり、精度も高いが常微分方程式を解く場合は、アナログ計算機ほど有効ではない。

おもな比較をすると次のようになる。

- (1) 演算時間：アナログ計算機のほうが速い。デジタル計算機は微分方程式を解く場合には時間軸をステップに分けて解くため、相当の時間を要する。前に述べたようにアナログ計算機では実時間演算ができるため、物理系とつないで、演算することも可能である。
- (2) 精度：アナログ計算機は平均0.1%程度の精度をもつが、ふつうはこれで十分であって、扱う物理系の測定がこの程度であるため、これ以上精度をあげてもあまり意味がない。デジタル計算機では時間軸をステップに分けるため、ステップをどの程度細かくすればどのくらい誤差を生ずるかということが、扱う方程式によって判定がむずかしいし、ステップを非常に細かくとれば演算時間は桁違いにのびてしまう。
- (3) アナログ計算機は計算機のなかで変数が物理系の変数と対応しているため、直観的である。このことはパラメータをかえて解のようすを見る場合非常に重要である。

ここでは日本原子力研究所に設置されている低速度型アナログ計算機（PAC E Analog Computer, Electronic Associates Inc. 製）を中心として説明する。

ここで“低速度型”という意味を説明すると、アナログ計算機は演算時間の点で繰返型と低速度型の2種に分けられる。

低速度型は、同一演算は1回おこなうのみで繰返しがなく、解はふつうペン書きオシログラフで記録される。単一の演算要素の精度は1%程度から0.01%まであり、繰返型より精度が高い。

繰返型は高速度型ともよばれ、1回の演算時間が数十 msec で同じ演算が繰返しおこなわれ、解がブラウン管オシログラフに指示される型で精度はあまり高くない。演算を繰返しおこなう関係上、交流増幅器が使用される。

2. 構成

構成要素は演算要素および監視記録装置などで、これらを次の表に示す。この説明には、かんたんのため、要素の名称の代わりに、次の表の略称を用いることとする。

計算機本体

品 名	略 称	型 名	台 数
演算増幅器 Operational Amplifier	AMPL	16-6 H	96
{ 加 算 器 Summer	SUM	16-6 H	56
{ 加算積分器 Summing Integrator	INT	16-6 H	40
ポテンショメータ Potentiometer	POT	—	160
サーボ掛算器 Servo Multiplier	S-MULTI	16-7 M 16-7 N 16-7 S	9
電子管掛算器 Electronic Multiplier	E-MULTI	16-7 J	7
サーボレゾルバ Servo Resolver	RSLVR	16-8 B	1
任意関数発生器 Diode Function Generator	FG	16-16 B	9
非線型演算用 2極管 Diode	DIODE	16AL5	16
非線型演算用 リレー Relay	REL	SIGMA(DPDT)	4
低周波雑音発生器 Low Frequency Noise Generator	NG	210 A	2
ディジタル電圧計 Digital Voltmeter	DVM	16-26 D	2
真空管電圧計 Vacuum Tube Voltmeter	VTVM	—	2
出力選択装置 Signal Selector	—	—	2
基準電圧電源 Reference Supply	REF	16-6 J, K	2

その他の

パッチパネル、過負荷指示警報装置、演算自動停止装置、演算制御リレー、試験用演算増幅器など。

付属機器

品 名	略 称	型 名	台 数
XY レコーダ (2 現象)	XYREC	205 L	1
XY レコーダ (1 現象)	XYREC	1100 D	3
6 ペンレコーダ	6REC	1902 C	1
8 ペンレコーダ (熱ペン式)	8REC	99003	1
プリンタ	PRINT	CLARY	1

これらは第5.2図に示すように、ほぼ同じものが左右2組にわかれ配置されているが、これは小規模の計算のときには左右をそれぞれ独立に使用し、大規模の場合には左右を合わせてどちらかのコンソールで演算制御をおこなうようにするためである。

そのほか、下記の略称を用いることとする。

パッチパネル	P-PANEL
タイポイント	TIEPTS

INTERCONSOLE JUNCTION ICJ

ファンクションスイッチ FS

記号はまとめて付録 A 1 に示す。

3. 演算要素

3.1 演算増幅器 (AMPL)

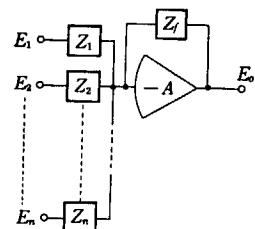
これは加算、符号変換、定数の掛算、積分などの演算をおこなうものでアナログ計算機の基本要素となるものである。AMPL は第 3.1 図に示すように演算インピーダンス（入力インピーダンス、 Z_1, Z_2, \dots, Z_n およびフィードバック・インピーダンス、 Z_f ）をもつ高利得 (6×10^6) の直流増幅器である（原理については A 9 参照）。PACE では AMPL

96台のうち上記のすべての演算をおこなえるのは 40 台で加算積分器 (INT) とよばれ、残りの 56 台は積分以外の演算しかできず、加算器 (SUM) とよばれる。

そして INT はプラグのさしかえにより SUM としても使用される。また、プラグを抜ければこれらはいずれも高利得の直流増幅器として使用できる。第 5.1 図に示すように AMPL は、コンソール (16-131 R) およびその隣りの演算増幅器架 (16-31 C) に設けられていて、16-131 R 1 架に INT が 20 台、16-31 C 1 架に SUM が 28 台組みこまれている。AMPL はいずれも 2 台ずつまとめてラックにプラグインされており、パネル前面にはバランス調整のツマミと過負荷指示ランプが設けられている。

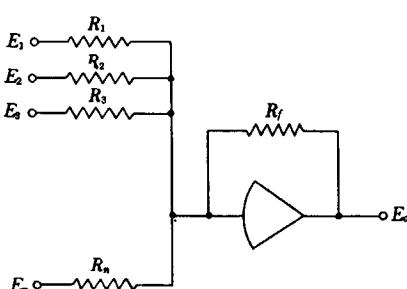
3.2 加算器 (SUM)

第 3.1 図の Z_1, Z_2, \dots, Z_n に抵抗 R_1, R_2, \dots, R_n をつなぎ、 Z_f に抵抗 R_f をつなぐと第 3.2 図に示す SUM の回路が得られる。各入力電圧にフィードバ



$$E_o = -Z_f \left(\frac{E_1}{Z_1} + \frac{E_2}{Z_2} + \dots + \frac{E_n}{Z_n} \right)$$

第 3.1 図 演算増幅器 (AMPL)



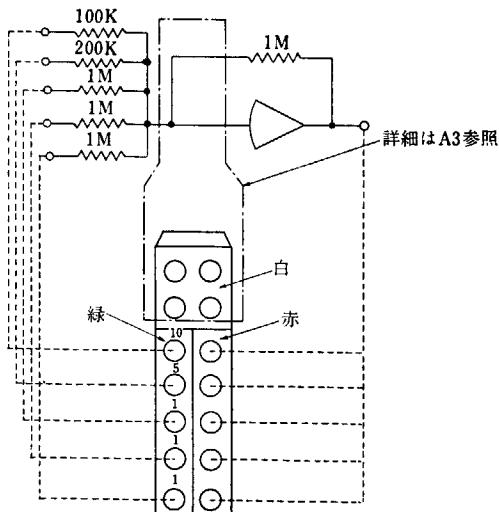
$$E_o = - \sum_{i=1}^n \frac{R_f}{R_i} E_i$$

第 3.2 図 加算器 (SUM) の原理

ック抵抗 R_f と入力抵抗 R_i との比を掛けて符号を変えて加えたものが出力に現われる。すなわち

$$E_0 = -\left[\frac{R_f}{R_1} E_1 + \frac{R_f}{R_2} E_2 + \dots + \frac{R_f}{R_n} E_n \right] \quad (3.1)$$

SUM と P-PANEL の関係は第 3.3 図のとおりで、5 個の入力端子に 10, 5, 1 の数字が書いてあるのは、その入力端子に加えた電圧の -10 倍、 -5 倍、 -1 倍の和が出力にあらわれることを意味している。



第 3.3 図 加算器 (SUM) の P-PANEL との関係

3.3 加算積分器 (INT)

第 3.1 図の Z_1, Z_2, \dots, Z_n に抵抗 R_1, R_2, \dots, R_n をつなぎ、 Z_f にコンデンサ C_f をつなぐと第 3.4 図に示す INT の回路が得られる。

P-PANEL 上部のプラグを INT が見える位置に挿入するとフィードバック回路にコンデンサ C_f がつながり積分動作をおこなう（第 A.3.3 図参照）。入力と出力の関係は次式で示される。

$$E_0 = -\left[\frac{1}{R_1 C_f} \int E_1 dt + \frac{1}{R_2 C_f} \int E_2 dt + \dots + E_{1c} \right] \quad (3.2)$$

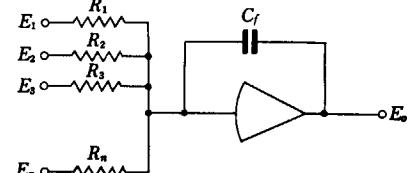
INT と P-PANEL との関係は第 3.5 図に示される。

P-PANEL の上部のプラグを SUM が見える位置にさしこむと、フィードバック回路に抵抗 R がつながって SUM となり、前節に述べた SUM と同じ機能をもつ（第 A.3.3 図参照）。

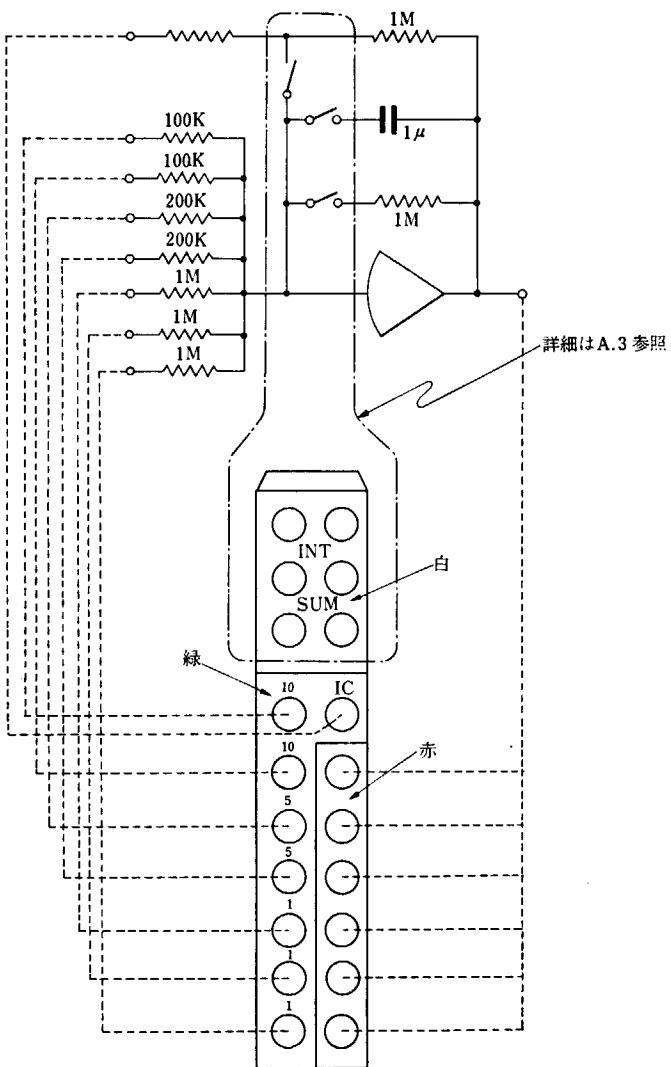
初期条件は IC 端子（第 3.5 図）から入れる。実際には POT (No. 1~20) を IC につないで初期条件の電圧を入れる。この場合注意すべきことは初期値と異符号の電圧を与えなければならない。たとえば初期値が +10 Volt なら IC につないだ POT の出力は -10 Volt にする。

3.4 ポテンシオメータ (POT)

POT には二つの用途がある。一つは一定の任意の直流電圧を得ること（たと



第 3.4 図 加算積分器 (INT) の原理図

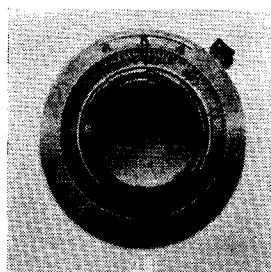


第 3.5 図 加算積分器 (INT) の P-PANEL との関係

えば初期条件など) 他の一つは、1 以下の任意の係数を設定することである。

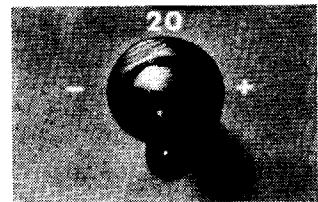
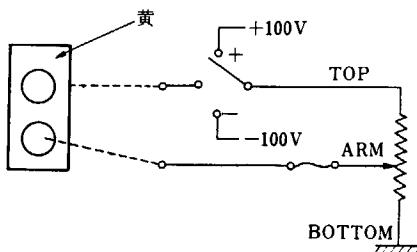
ふつうは二つの端子 (ARM とよぶ出力端子 TOP とよぶ入力端子) が P-PANEL のおののおのの POT 端子から取りだせるが、BOTTOM とよぶ下端は大部分アースされていて P-PANEL 上には出ていない。

第 3.6 図に示すように POT No. 1~20 ではスイッチにより基準電圧 (+100 V, または -100 V) を POT の TOP に与えることができる。これにより任意の直流電圧が得られる。またスイッチを中点におけるば係数用となる。第 3.7 図はふつう係数用としてのみ用いられる POT の P-PANEL との接続を示す。ときには下端をアースしない状態で使いたいこともある。そのための 8 個 (No. 29~32, 69~72) の POT は BOTTOM がアースされてなく第 3.8 図のような接続になっている。POT の目盛りは次のようになっている。

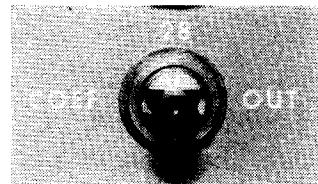
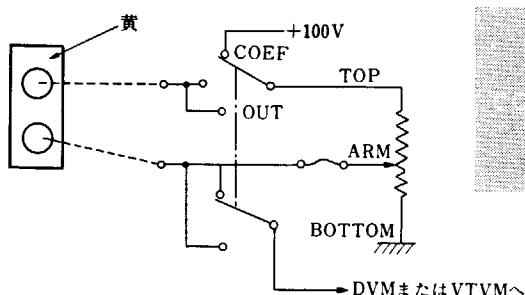


目盛数字の位置	係 数	設定される出力電圧
窓枠内の数字	0.1 位	10 V
つまみダイアル上の数字	0.01 "	1 "
つまみダイアル上の最小目盛	0.001 "	0.1 "

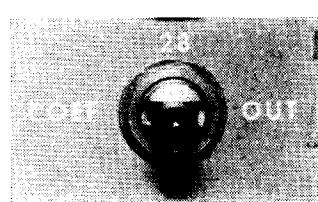
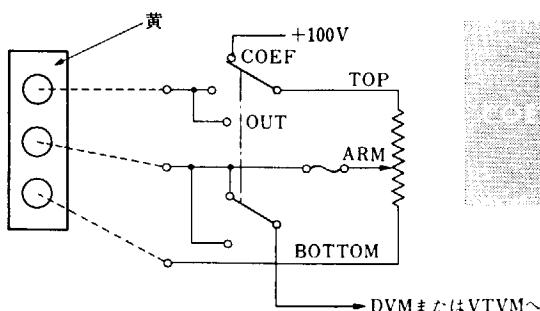
左図のダイアルの位置は、係数の場合 0.5200 または設定電圧の場合 52.00 Volt を示す。



第 3.6 図 ポテンショメータ (POT)
No. 1~20 (初期値設定用)



第 3.7 図 ポテンショメータ (POT)
No. 21~80 (係数設定用, ただし No. 29~32, No. 69~72 を除く)



第 3.8 図 ポテンショメータ (POT)
No. 29~32, 69~72 (係数設定用, BOTTOM はアースされていない。)

POT の負荷効果

いま POT によってある係数 k ($k < 1$) を掛けるということは、下図でいえば電圧比 $\frac{V_2}{V_1}$ を k になるようにする

ことである。

POT の ARM につながる負荷抵抗 r_L が無限に大きいとすると

$$\frac{V_2}{V_1} = k = \alpha$$

となり、電圧比は抵抗比 α に等しい。

しかし実際には r_L は有限であり、これにもある程度の電流が流れるので k は

$$k = \frac{\alpha}{1 + \alpha(1 - \alpha) \frac{r}{r_L}}$$

となり抵抗比 α とは等しくない。 k と α との差は r や r_L および k の値によっても異なるが、PACE のように $r = 30 \text{ k}\Omega$ で r_L が $100 \text{ k}\Omega \sim 1 \text{ M}\Omega$ という場合が多く、通常 $5 \sim 10\%$ の差を生じる。これを POT の負荷効果といいう。POT の軸についているダイアルの読みは抵抗比 α を示すものであるから、このダイアルの読みを掛けたい係数に合わせたのでは、上記のように $5 \sim 10\%$ の誤差を生じる場合がある。

たとえば 0.5 という係数を掛けたいときには、ダイアルの読み（すなわち α ）は 0.5 より少し大きい、たとえば 0.51 というような値に合わせなければならないわけである。ここで抵抗比 α をいくらにしたら電圧比 k が正確に 0.5 になるかは上の式で計算すればよいのであるが、個々の POT の非直線誤差などもあるから、この方法はあまり正確なものではない。

もっと便利で正確な方法は、ARM に負荷をつないだ状態で POT の TOP に 100 V を加えて ARM の電圧が所定の値になるように調整することである。

この場合、ARM の電圧を読むのに使う電圧計は精度が高く、電圧計による負荷効果を生じないように入力抵抗が充分高くなればならない。現在使用している DVM は DC 入力抵抗が $1,000 \text{ M}\Omega$ であり、これを使用することにより初期値または係数設定誤差を 0.01% 以下にすることができる。係数設定の場合には、POT の下のスイッチ（第 3.7 図）を左（“Coef”）に倒せばよく、そうすると、TOP に 100 V が加わり、ARM が VTVM または DVM に接続される。

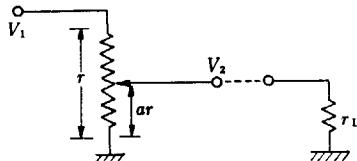
またスイッチを右（“OUT”）に押すと、使用状態のまま、ARM の電圧を読み取ることができる。

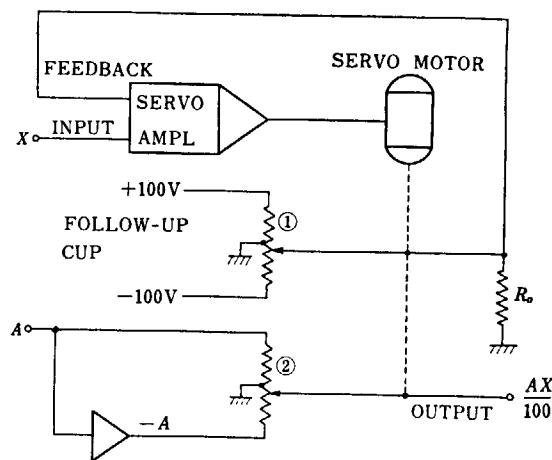
3.5 サーボ掛算器 (S-MULTI)

定数の掛算は、POT や SUM の 5 入力や 10 入力を使ってできる。ただし 3.4 でのべたように POT は単に 1 より小さい係数を掛けるだけである。

変数の掛算は、サーボモータで自動的に ARM の位置がきめられるような、ポテンショメータによっておこなわれる。これがサーボ掛算器である。

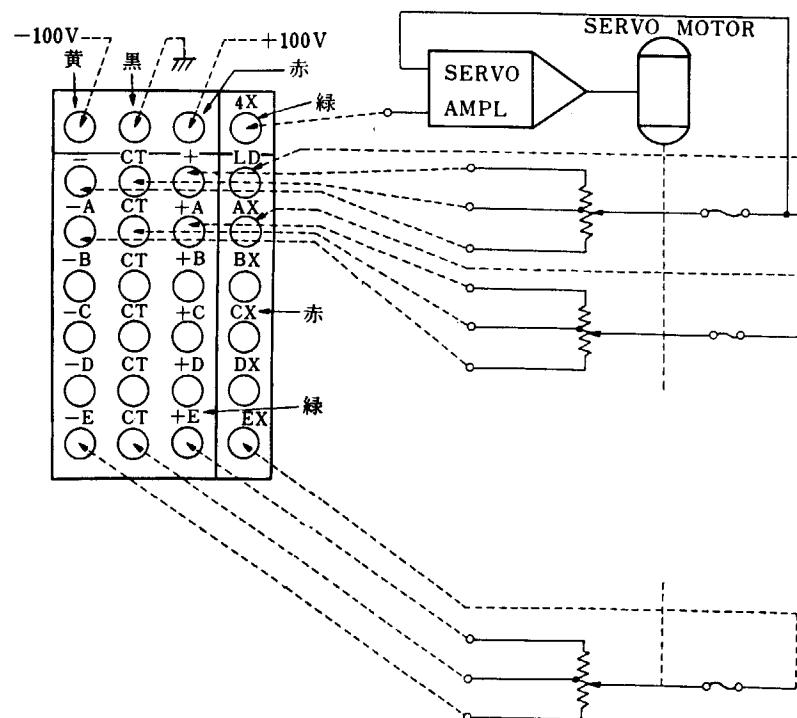
その原理は第 3.9 図に示すとおりで、ポテンショメータ①には、 $\pm 100 \text{ V}$





第 3.9 図 サーボ式掛算器 (S-MULTI) の原理図

の基準電圧が加えられていて、その ARM の電圧と、入力電圧 X とが等しくなるようにサーボ機構が働く。したがってポテンショメータの ARM は、いつもポテンショメータに加えられた電圧を $\frac{X}{100}$ に分圧するような位置に動く。ポテンショメータ②の ARM も①のそれと連動になっていて、やはり $\frac{X}{100}$ に分圧する位置にくる。ポテンショメータ②には、入力電圧 A が加えられていて



第 3.10 図 サーボ掛算器 (S-MULTI) の P-PANEL との関係

るから、分圧されて ARM から取り出される電圧は $\frac{AX}{100}$ になるわけである。

実際の S-MULTI では 6 連のポテンショメータがあるので、一つの変数 X に対する次の掛算

$$\frac{AX}{100}, \quad \frac{BX}{100}, \quad \frac{CX}{100}, \quad \frac{DX}{100}, \quad \frac{EX}{100}$$

ができる。

S-MULTI の P-PANEL との関係を第 3.10 図に示す。

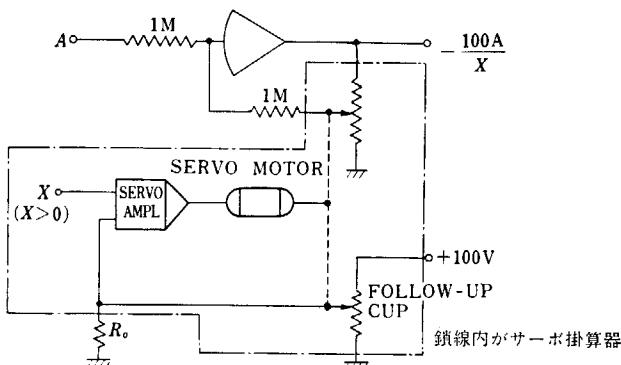
S-MULTI の負荷効果

係数設定に使用する POTと同じく、S-MULTIのポテンショメータもAMPLの入力や他の負荷が接続されると負荷効果が起こる。

この影響を減らすために、負荷抵抗を Follow-up Cup (第 3.9 図の①) の ARM にも接続する。すなわち第 3.10 図の P-PANEL 上 LD と記されている端子に負荷と同じ値の抵抗をつなぎ、その抵抗の他端をアースする。これは各出力端子と Follow-up Cup の出力端子の負荷をだいたい同じにするためである。

また、各出力端子の負荷値が異なっている場合には、それらの平均値をとる。

S-MULTI を用いて割算する方法は、いくつか考えられるが、第 3.11 図に示す原理によるものが精度がよい。この場合出力は $100\frac{A}{X}$, $100\frac{B}{X}$ などが得られるが、分母 X は正または負いいずれか一つの符号しかとれない。



第3.11図 サーボ掛算器(S-MULTI)による割算の原理図

3.6 電子管掛算器 (E-MULTI)

これは矩形波(10 kc)の高さと幅を二つの入力信号に比例して変化させ、その積である面積に比例した電圧をとり出す方式の掛算器である。従来、S-MULTI LTIに比較して、動特性はすぐれているが、静特性が劣ることが欠点であった。本器の場合は高精度の演算抵抗、電源、そして豊富な演算回路を用いることにより、動特性はもちろん、静特性にでも S-MULTI にまさる精度が得られている。

入出力電圧の最大値はいずれも $\pm 100\text{ V}$ で、入出力の関係は、

$$A. \ B \longrightarrow -\frac{AB}{100}$$

$$A \cdot C \longrightarrow -\frac{AC}{100}$$

となる P-PANEL の上の端子は、右下方に Multiplier と記された部分で、緑が入力端子、赤が出力端子である（第 3.12 図）。

割算器として使うには、前面パネル上の MUL TI-DIV のスイッチを “DIV” 側に倒す。その場合の出力は、C 入力になにも入れないとき、

$$-\frac{100}{B} A$$

が得られる。C 入力に電圧を入れると、

$$\frac{AC}{B}$$

が得られる。ただし、いずれの場合も B は正の電圧しか入れられない。また B の電圧が 0 の状態で計算機を演算させてはならない。

使用上の注意としては、B 入力が、AMPL の出力からきている場合には、COMPUTER CONTROL SWICH を RESET にするまでは AMPL の出力は 0 だからそのままで割算器を使ってはならない。

このための手順としてはまず RESET（5 参照）にして、それから MULTI DIV のスイッチを “DIV” にする。

3.7 サーボレギュラ バ (RSLVR)

RSLVR は三角関数演算や座標系の変換に用いられる。構造は S-MULTI に似ており、大型の Sine-Cosine ポテンショメータ（2 連）の Slide ARM が角度に比例した電圧で駆動され、それぞれの Slide ARM から $\sin \theta$, $\cos \theta$ に相当する電圧がとり出されるようになっている。

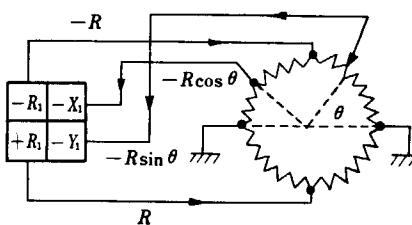
なお、S-MULTI としても使用できるように 3 連の Multiplier ポテンショメータも備えている。

RSLVR の P-PANEL と内部構造の関係を第 3.17 図に示す。

sine-cosine POT の回転角度 θ° とそれを表示する電圧 θ Volt との対応は

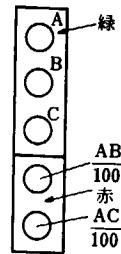
$$\theta \text{ Volt} = \frac{1}{2} \theta^\circ$$

である。回転角度は最大 $\pm 180^\circ$ であるから θ は最大 ± 90 Volt となる。



第 3.13 図 Sine-Cosine ポテンショメータと結線図記号の関係

RSLVR の結線図と sine-cosine ポテンショメータを第 3.13 図に示す。このほかサーボ増幅器と Follow-UP Cup ポテンショメータがあるがこれは S-MULTI と同様である。（A.1 参照）



第 3.12 図 電子管掛算器
(E-MULTI) の P-PANEL

(注意) sine-cosine ポテンショメータはその負荷が $1\text{ M}\Omega$ の状態で校正されているから、sine-cosine ポテンショメータの出力は必ずしも AMPL の 1 入力に接続するか、または $1\text{ M}\Omega$ 負荷をつけなければならない。

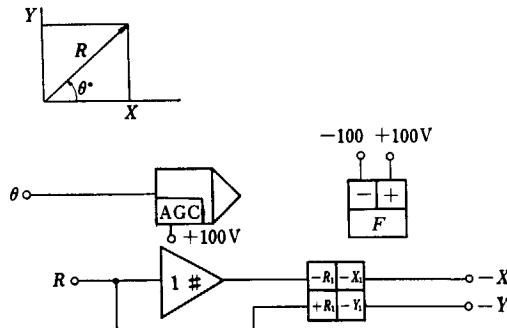
3.7.1 極座標より直角座標への変換

極座標 (R, θ) より直角座標 (X, Y) を求める。

$$X = R \cos \theta$$

$$Y = R \sin \theta$$

この結線図は第 3.14 図に示される。



第 3.14 図 $(R, \theta) \rightarrow (X, Y)$ の結線図

3.7.2 直角座標より極座標への変換

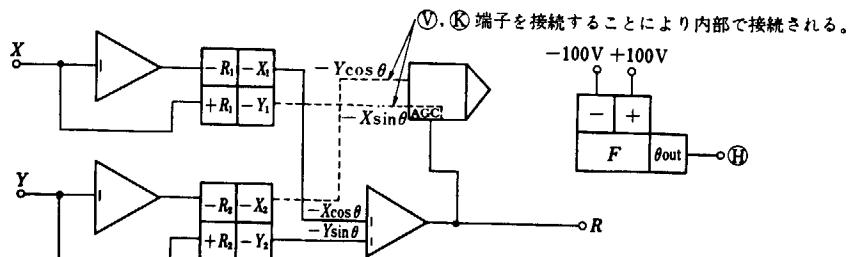
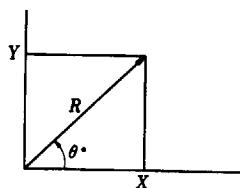
直角座標 (X, Y) より極座標 (R, θ) を求める。

次の関係を用いる。

$$X \cos \theta + Y \sin \theta = R$$

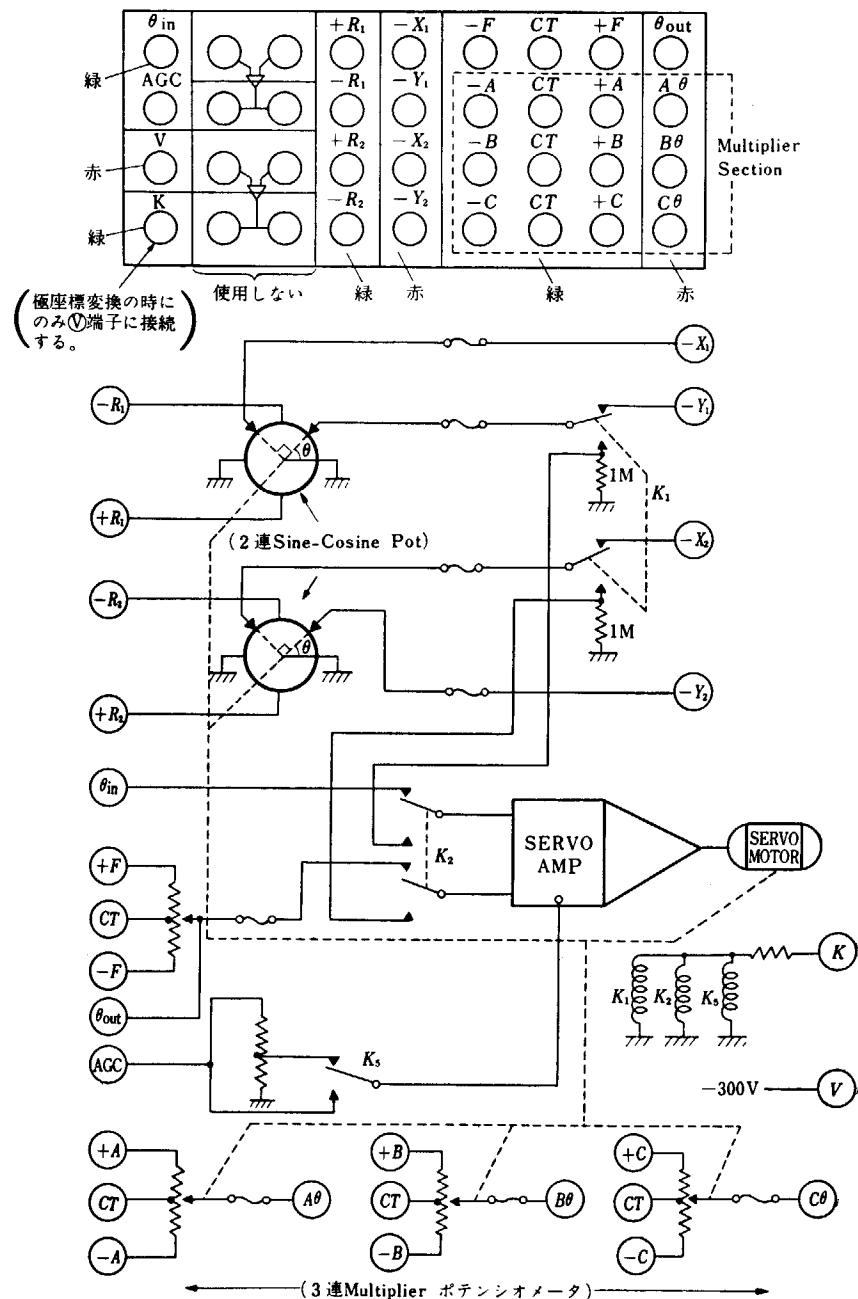
$$X \sin \theta = Y \cos \theta$$

この式を解いて R, θ を求める結線図が第 3.15 図である。この場合出力 R



第 3.15 図 $(X, Y) \rightarrow (R, \theta)$ の結線図

(この場合にかぎり P-PANEL の V と K の端子を接続する。)



第 3.16 図 サーボ・レゾルバ (RSLVR) の P-PANEL と内部構造の関係

を AGC 端子に接続するのは、 X, Y の大小に関係なくサーボ系の Loop Gain を一定に保つためである。

3.7.3 直角座標相

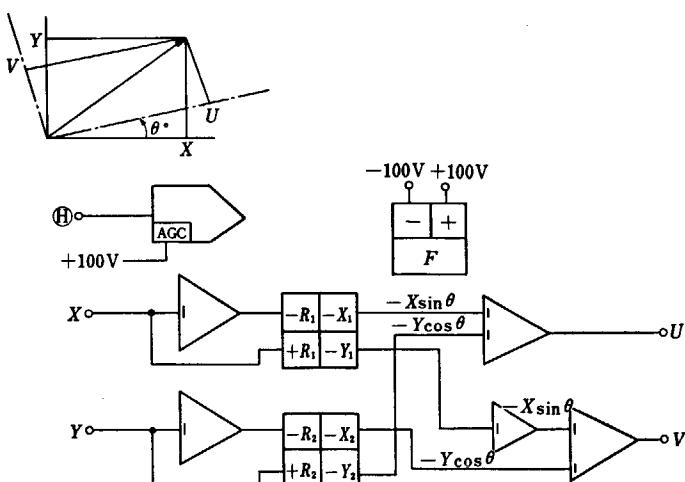
互の変換(XY
座標を θ° 回転
した UV 座標
に変換する)

次の関係を用いる。

$$U = X \cos \theta + Y \sin \theta$$

$$V = -X \sin \theta + Y \cos \theta$$

結線図を第 3.17 図に示す。



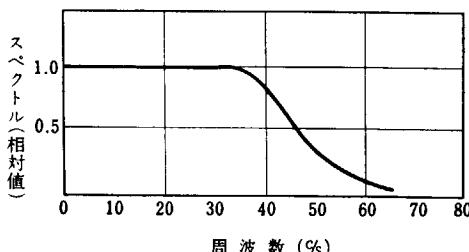
第 3.17 図 直角座標相互変換の結線図

3.8 任意関数発生器 (FG)

これまでの各演算要素の組合せでも得られないか、または得られても誤差が大きくなるような複雑な関数形を必要とするときに用いられる。方式は二極管をつなぎ合わせた折線近似方式で、20 区間の折線を用いているのでたいていの関数は近似できる。（FG の設定法については A 5 参照のこと。）入出力電圧の範囲は他と同様 ± 100 V である。また任意関数発生器としては、このほかに XYREC を利用したカーブフォロワーもある。

3.9 低周波雑音発生器 (NG)

本器は不規則な外乱などを扱うときに使用するもので、ガスサイラトロン(2 D21) から発生する 30 c/s~3 kc 程度の雑音電圧をもとにして 0~35 c/s にわたり一様なスペクトル密度の雑音にして、とり出している。



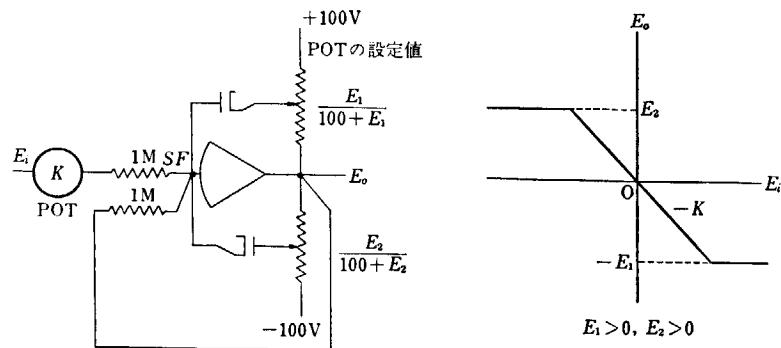
第 3.18 図 低周波雑音発生器 (NG) の出力スペクトル

その出力スペクトルを第 3.18 図に示す。

3.10 非線形演算 用二極管 (DIODE)

これは非線形問題などを扱うのに必要な特殊波形を発生するためのもので、Limiting, Dead Zone, Absolute Value, On-Off, Hysteresisなどの動作がAMPLと、この DIODE との組合せでおこなわれる。

一例として Limiting の回路接続を第 3.19 図に示す。ほかのものについては A.2 を参照されたい。

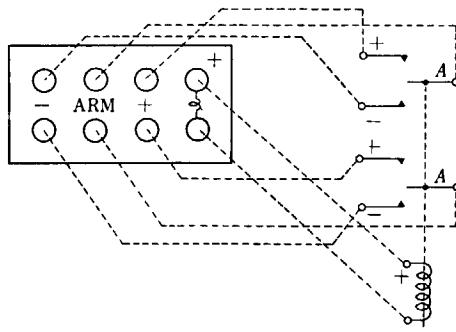


第 3.19 図 DIODE を用いたリミッタの構成

3.11 非線形演算 用リレー (REL)

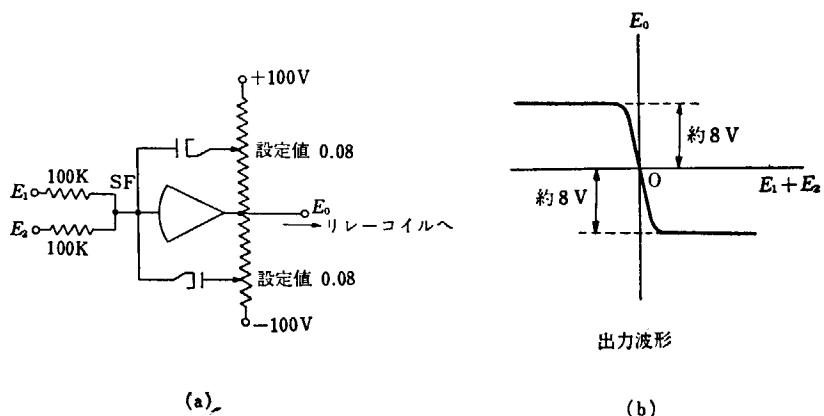
回路の切換、オンオフ動作の模擬などに用いるリレーで、全部で4組ある。RELは双極双投型でP-PANELとの関係は第3.20図のようになっている。

REL を確実に動作させるためには、10 mA 程度の電流をコイルに流す必要があり、そのために第 3.21 図のようなリレードライバを用いる（第 A 2.21 図参照）。この回路で入力電圧 E_1 , E_2 の和が正になると、REL の ARM は - 接点につき、負になると + 接点につく。また第 3.21 図に示すように、コイルにかかる電圧は ±100 V の電源をポテンショメータで分圧して作るが、これには下端をアースしないポテンショメータ（第 3.4, 3.8 図参照）を用い、ダイヤルの目盛を約 0.08 にする。この設定は、計算機のプレート電圧をスイッチインする前にしておくかねばならない。



(コイルの十端子が正になると、Aが十接点につく)

第 3.20 図 REL の P-PANEL との関係



第 3.21 図 リレードライバ

3.12 ファンクション・スイッチ (FS) 演算回路の切換を手動でおこないたい場合に用いるスイッチで、双極双投のもの 3 コがコンソールの計算機の操作盤についている（第 5.1 図参照）。

3.13 INTER-CONSOLE JUNCTION (ICJ)

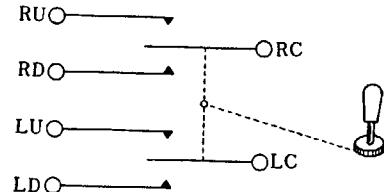
P-PANEL 上にある ICJ (第 4.1 図) は A, B 両コンソールを結合するのに用いる。

端子の数は #1～#40 の 40 個で、A, B 両コンソールの P-PANEL 上の同じ番号の ICJ が計算機内部で接続されている。

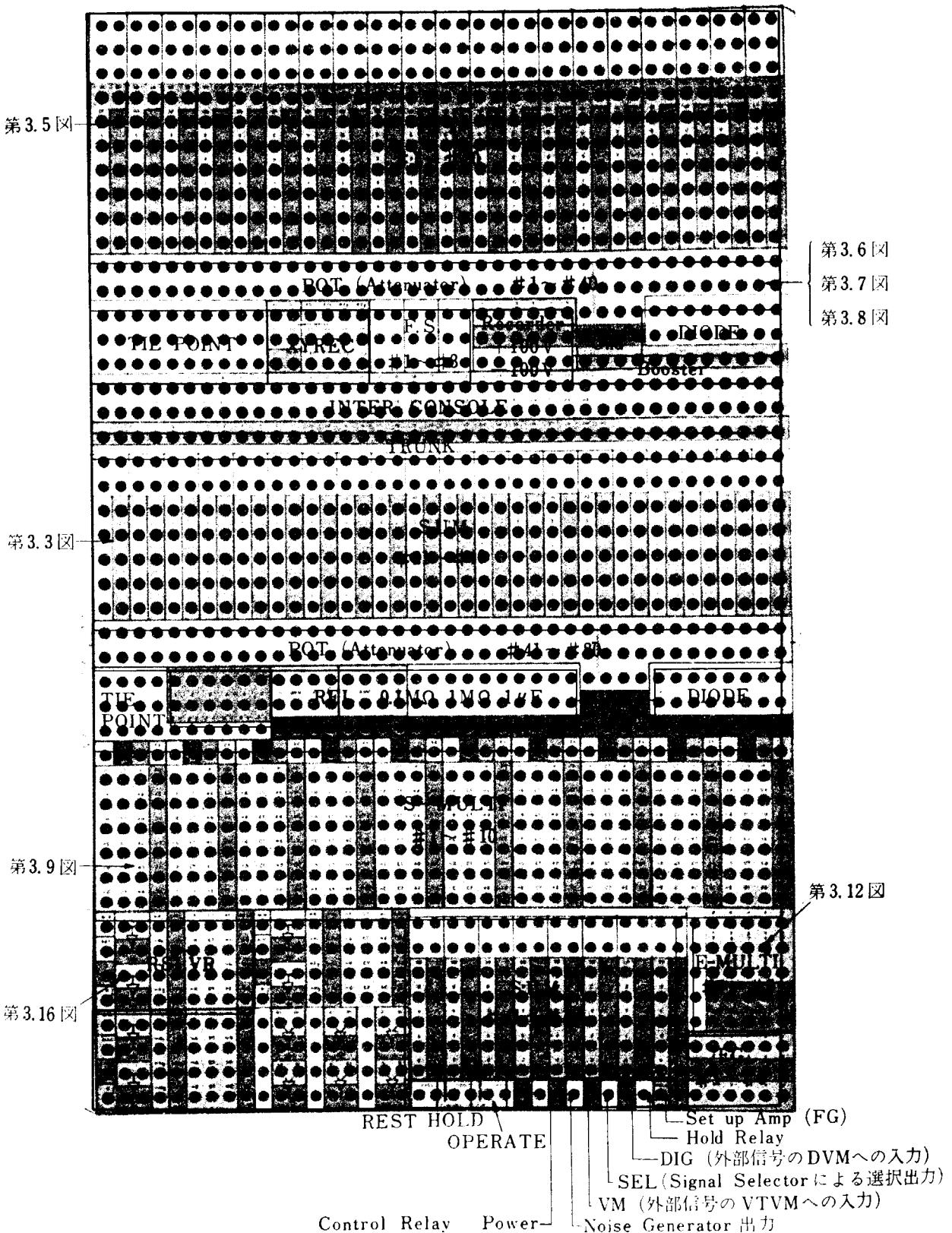
したがって、両コンソールを一体にして使用するには、2 枚の P-PANEL に問題を分割して組み、ICJ を通じて両者を結合する。そしてどちらか一方のコンソールの COMPUTER CONTROL SW を “SLAVE” にし、他方で演算を制御する。なお両コンソールの基準電圧を共通にするため RACK 2 または RACK 4 (第 5.2 図) のどちらかの制御盤の REFERENCE SW を “EXT” にする。

3.14 TRUNK

P-PANEL 上にある TRUNK の端子 (第 4.1 図) は外部の機器を計算機と接続するのに用いる。コンソールの裏側に 20 コのラグ端子があり、それらがそれぞれ P-PANEL 上の TRUNK 端子 (#1～#20) に接続されている。



第 3.22 図 ファンクションスイッチ (FS)



第4.1図 パッチパネル (P-PANEL)

4. 演算要素 以外のおも な要素

4.1 パッチパネル (P-PANEL)

P-PANEL はプラグボードともいい、与えられた計算を各演算要素の組合せとして設定する部分である。

これは 1800 ホの孔（以後端子とよぶ）が設けられた板であって、各演算要素の入出力端子、記録装置の入力端子、アース端子、基準電圧端子などがあるから、与えられた計算式に従ってパッチコード（接続用コード）でそれらの間を接続することにより、結線がすべてここに集約されておこなわれる。

第 4.1 図に端子の配置区分を示す。P-PANEL は多数用意されていて、演算はプレパッチ方式でおこなわれる。

4.2 デジタル電 圧計(DVM)

コンソールの中央部にあり、出力選択装置により任意の演算要素の直流電圧をこれで読み取ることができる。方式はステッピングスイッチを用いた平衡型で、表示は数字板照射である。

測定範囲	$\pm 0.01 \sim 99.99$ V
入力インピーダンス	約 $1000 M\Omega$
平衡時間	5 sec 以内
精度	$0.01\% \pm 0.5$ digit
小数点	固定

平衡時間がやや長いが、高い精度で、係数や初期値などを設定するのにきわめて便利である。

4.3 真空管電圧計 (VTVM)

計算機操作盤の中央にあり、DVM と同じく各部の電圧を出力選択装置によって指示するほか、直流電源電圧、基準電圧をもチェックできるようになっていいる。

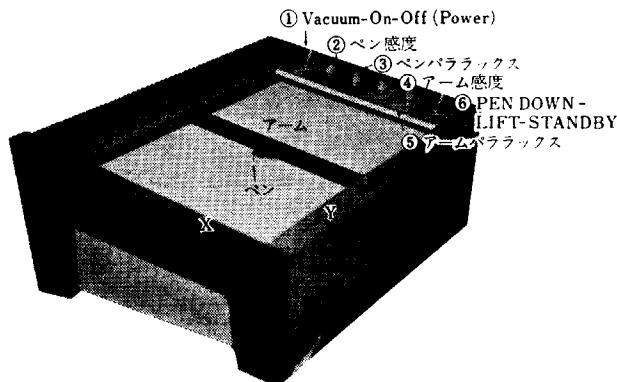
測定レンジ:	$\pm 1, 5, 10, 50, 100, 500$ V
目盛:	200 等分目盛
入力インピーダンス:	$10 M\Omega$

4.4 XY レコーダ (XYREC)

解波形を直接大きいグラフ上に画かせるときに使用する。大型(2現象)と小型(1現象)とがあるが、いずれも平型である。電子管自動平衡型であるた

型名		大型	小型
記録紙寸法		75×75 cm	38×25 cm
感度		$0.05 \sim 10$ V/cm	$0.05 \sim 10$ V/cm
ポテンショ精度(XY ともに)		0.02%	0.05%
周波数特性	X 軸	0.4 c/s	2 c/s
	Y 軸	0.2 c/s	1 c/s
精度(XY ともに)		0.08%	0.75%

め、4.5 のペンオシログラフとは異なり、解の変動の激しいものの記録はできず、小型のほうでもだいたい周波数は 1~2 c/s までであるが、たいていの解にはこの程度で充分である。特性は表のとおり。



第 4.2 図 小型 XYREC 1100D の CONTROL PANEL

4.5 ペンレコーダ

(6REC およ
び 8REC)

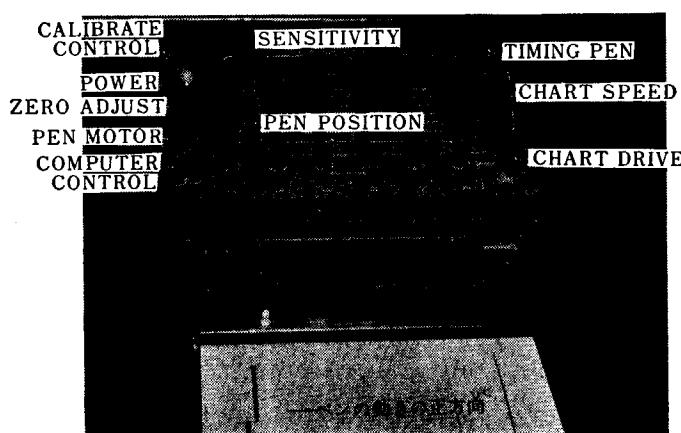
解の周波数が高くて XYREC を使えない場合、または多点を同時に記録したい場合に、ペンレコーダ（ペンオシログラフ）を用いる。当所には、6 チャンネル用と 8 チャンネル用の二つがあるが、記録方式が異なるだけで特性はほとんど同じである。いずれも、紙送り速度や感度切替がすべてボタン操作になっており、またこの制御パネルで計算機本体の演算制御ができる。

特性は、おのおの次のとおり。

	6 REC	8 REC
記録方式	インク書き、円弧	熱ペン、直線
ペン振幅	±20 mm	±20 mm
タイムマーカ	1 sec 間隔	1 sec 間隔
紙送り速度	1~250 mm/sec	0.4~100 mm/sec
使用周波数範囲	0~40 c/s	0~40 c/s

4.5.1 6 ペンレコ ーダ(6 REC) の操作

次に操作の方法をかんたんに説明する。



第 4.3 図 6 REC の CONTROL PANEL

○ 使用時の各 SW の位置

SW	位 置
POWER	“ON”
CALIBRATE CONTROL	“AUTO” (不要ならば “OFF”)
PEN MOTOR	“ON” または “REMOTE”
COMPUTER CONTROL	“OPERATE”
PEN POSITION	中 立
TIMING PEN	“ON” または “REMOTE” (不要ならば “OFF”)
CHART DRIVE	“ON” または “REMOTE”

(“REMOTE” にすると、コンソールの COMPUTER
(CONTROL SW によって制御される。)

○ Zero Adjust

PEN POSITION のスナップスイッチを全部 “中立” にし, ZERO ADJUST の押ボタンを押し, 記録紙を 2 mm/sec で送りながらレバ (それぞれの Pen Motor の横にある) でペンを Zero Line に合わせる。

○ Calibration

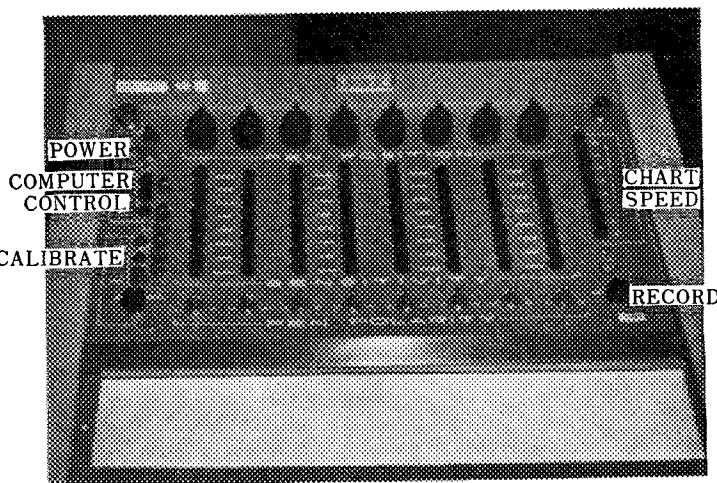
CALIBRATE CONTROL を “AUTO” にしておけば, 計算機が “OPERATE” から “HOLD” になるごとに, 26 ステップの校正電圧が自動的に各チャネルに記録される。

○ COMPUTER CONTROL SW

コンソールの COMPUTER CONTROL SW を “OPERATE” にしておけば 6 REC のこの Sw 計算機の演算制御ができる。

コンソールで演算制御をおこなうときは, 6 REC のこの SW を “OPERATE” にしておくこと。

4.5.2 8 ペンレコ ーダ (8 REC) の操作



第 4.4 図 8 REC の CONTROL PANEL

○ 使用時の各 SW およびボタンの位置 (次表)

○ Zero Adjust

PEN POSITION SW を全部 “OFF” にし, RECORD SW を “ZERO” にして, それぞれの Pen Motor の上にある調整ネジを回わし, ペンをそれぞれ Zero Line に合わせる. そのときの紙送り速度は 2 mm/sec がよい。

SW, BUTTON	位	置
POWER		“ON”
COMPUTER CONTROL		“OPERATE”
CALIBRATE SW		“LOCAL” または “REMOTE” (不要のときは “OFF”)
CALIBRATE BUTTON		“MAN” または “AUTO”
PEN POLARITY		“+R” または “+L”
PEN POSITION		“OFF”
RECORD		“ON” または “REMOTE”

○ Calibration

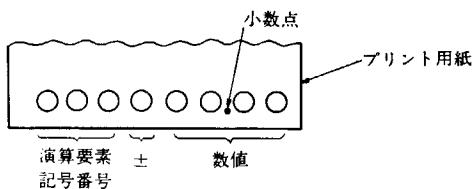
CALIBRATE SW を “LOCAL” にし AUTO ボタンを押せば, 20 ステップの校正電圧が各チャンネルに記録される。SW を “REMOTE” にしておけば計算機が “OPERATE” から “HOLD” になるとき, 自動的に校正電圧が記録される。

○ COMPUTER CONTROL ボタン

6 REC と同じ。

4.6 プリンタ (PRINT)

ディジタル電圧計の PRINT で, 選択器の記号をも含めて次のような 8 桁でプリントされる。PRINT の接続は計算機操作盤の横にあるソケットに, PRINT のプラグを挿し込むことによりかんたんにおこなわれる。動作は手動, 自動, いずれ也可能である。



第 4.5 図 プリンタ (PRINT) のプリントコード

4.7 過負荷の警報 と演算停止

演算中の要素のどれかが, なんらかの原因でその出力電圧が過負荷になると, それは正常な動作をしなくなる。

そのときはブザが鳴りかつ過負荷になった演算要素のランプが点灯するから, COMPUTER CONTROL SW を “POT SET” に戻し, 過負荷の原因を除いて再び演算を始める。

一般に, 瞬時の過負荷でも演算が自動的に停止 (HOLD) するようにしておくが, それがかえって不便な場合には, 過負荷時も停止しないようにしておくことができる。それには計算機操作盤 (第 5.1 図) の OVERLOAD SW を中点の位置におく。

5. 計算機の操作

5.1 COMPUTER CONTROL SW(第5.1図参照)

コンソールにある計算機操作盤の COMPUTER CONTROL SW (C3) の動作は次のとおりである。

“POTSET” 各 AMPL の入力が全部切り離され、この状態で AMPL の Balance Check や POT の設定をおこなう。また、INT には初期値が与えられる。

AMPL 以外の演算要素はこの COMPUTER CONTROL SW に無関係に動作する。SUM の出力は 0 である。また、計算機を使用していないときは、常に COMPUTER CONTROL SW をこの位置へおく。

“RESET” SUM の出力が出る。INT の初期値は “POTSET” のときと同じ。

“OPERATE” 全体の演算が開始される。

“HOLD” “OPERATE” から “HOLD” になると演算が停止され、そのときの INT の出力電圧は自動的に保持される。

“RATE TEST” すべての INT の入力に RATE TEST POT からの直流電圧が与えられ、P-PANEL の接続を変えることなしに INT の動作試験ができる (SUM はできない) (詳細は A 8)。

“SLAVE” ほかのコンソールによって演算が制御される。

たとえば、A コンソールを “SLAVE” にすると B コンソールの COMPUTER CONTROL SW で A コンソールも制御できる。そのとき P-PANEL の ICJ は両コンソールの間でそれぞれ接続されるから、問題を二つの P-PANEL に分割して組み、ICJ を通じて両コンソールを一つにして演算することができる (3.13 参照)。

“OPERATE” から一度 “HOLD” にしてのち、再び “OPERATE” にもどすと “HOLD” で停止していた状態からひきつづき演算が継続される。

“POTSET”, “RESET”, “HOLD” 状態における SUM, INT の出力状態は A 3 に整理してあるから参照のこと。

5.2 POT の設定

パッチコードにより結線を終った P-PANEL を主コンソールにはめこんだのち、スイッチは “POTSET” の位置のままで必要な POT の設定をおこなう。POT No. 1～No. 20 までは、出力選択装置 (SIGNAL SELECTOR) で、そのほかは POT ダイヤル下のキーを左に倒して (第 3.6, 3.7, 3.8 図参照) DVM または VTVM に接続し (接続の方法は 5.4 参照)、その電圧を読みながら所

定の値に設定する。

5.3 REC の接続

および準備

ケーブルにより REC を本体と接続し, XYREC の場合は(第4.2図参照), PEN PARALLAX ③, ARM PARALLAX ⑤のつまみによりペンを初期の位置におき, ⑥のスイッチで PEN-DOWN とする。6 REC, 8 REC の場合はペンの零調整をおこない, ペンを下して紙送りをかける。

XYREC の時間軸の決め方

XYREC の2変数のうち, 一方の変数の軸を時間軸に使用することが多い。この場合時間軸の入力として, INT に STEP 関数を入れて発生した RAMP 関数を用いる。演算時間の長さから INT の出力勾配 (V/sec) の上限を定める。次に XYREC の記録の長さから INT の出力勾配との関連のもとに時間軸に使用するアーム軸またはペン軸の感度を定める。

T : 演算時間の長さ (sec)

L : XYREC の記録の長さ (cm)

N_1 : INT の出力勾配 (V/sec)

N_2 : 時間軸に使用するアーム軸またはペン軸の感度 (V/cm)
とすると, これらの四つの量は次の関係を満足しなければならない。

$$N_1 < \frac{100}{T} \quad (\text{INT に初期値を入れない場合})$$

$$N_1 < \frac{200}{T} \quad (\text{INT に初期値 } -100 \text{ V を入れる場合})$$

$$\frac{L}{T} = \frac{N_1}{N_2}$$

小型 XYREC のアーム軸感度およびペン軸感度はともに, それぞれ, 第4.2図の④, ②のつまみによりえらぶ, 感度のレンジは,

$$0.05 \quad 0.1 \quad 0.25 \quad 0.5 \quad 1 \quad 2.5 \quad 5 \quad 10 \text{ V/cm}$$

である。感度はなるべく低くしたほうがよい(10 V/m がいちばん感度が高い)

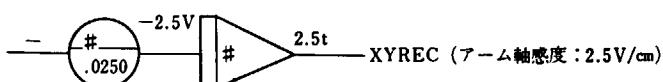
〔例〕 演算時間の長さを $T=30 \text{ sec}$, XYREC 記録の長さを $L=30 \text{ cm}$ にする場合, INT の出力勾配 N_1 と, XYREC のアーム軸感度 N_2 は次のような値にとるのがよい(初期値を使用しない場合)。

$$N_1 = 2.5 \text{ V/sec} \quad N_2 = 2.5 \text{ V/cm}$$

また, 使用上の便利さから, 次の値がしばしば用いられる。

$$N_1 = 1 \text{ V/sec} \quad N_2 = 1 \text{ V/cm}$$

次に RAMP 関数発生の結線図を示す。



5.4 計算機操作の手順

手順

計算機の操作は次の手順でおこなう。

- (1) 電源スイッチの操作 (REC を含む)
- (2) AMPL の Balance Check
- (3) POT の設定

(4) 演算の開始、停止

(1) 電源スイッチの操作(次頁の表参照)

- (1.1) 使用するコンソールの START-STOP SW(第 5.1 図 C₁)を“START”にする。使用する基準電圧電源の FILAMENT スイッチを“ON”にする
(第 5.2 図でコンソール A 使用の場合②, コンソール B の場合⑤)
(1.2) コンソールの計算機操作盤(第 5.1 図)について次のことをたしかめる。

COMPUTER CONTROL SW C₃ →“POTSET”

VTVM の SENSITIVITY SW C₄ →“OFF”

VTVM 選択ボタン “SIGSEL” C₅ が押してある。

なお REL を使用しているときには, Relay Driver (A 2.4 参照) 用の POT のみを, そのダイヤル読みで約 0.08 に設定しておく。

- (1.3) 1.1 を終って約 5 分後, 基準電圧電源の PLATE SW (第 5.2 図 ③ または⑥) を“ON”にする。
(1.4) コンソールの PLATE SW (第 5.1 図 C₂) を“REF OFF”(中立) にする。
(1.5) このほか RACK 1. 3. 5. 6. を使用するときにそれぞれ第 5.2 図に示した PLATE SW ①, ④, ⑦, ⑧を入れる(これらの SW は常時入れておけばコンソールの START-STOP SW で制御される)。
(1.6) 使用する記録計の電源を入れる(5.3 参照)。

(2) AMPL の Balance Check

電源スイッチが入ってから約 20 分後におこなう。

使用する各 AMPL のパネル前面にあるボタンを押し, ネオンランプが消えるようにツマミを調節する。

なお, 次の各要素中の AMPL もそれぞれ前面パネルで Balance Check ができるから, 必要に応じて同じ要領でおこなう。

E-MULTI, FG, REF

(3) POT の設定(第 5.1 図)

- (3.1) コンソールの PLATE SW C₂ を“REF ON”にする。
(3.2) VTVM のボタンの PATCH-PANEL C₆ を押し, メータ左側の DVM SW C₇ を“SIG SEL”に倒す。
(3.3) No. 1～No. 20 の POT (初期値設定用) はそれらのダイヤルの下にある SW を + または - に倒し, SIGNAL SELECTOR ボタンで選び出すと(A 4 参照), その POT の出力電圧が DVM に表示される。したがってダイヤルを回わしてその電圧が所定の値になるように設定する。

No. 21～No. 80 の POT (係数設定用) はダイヤルの下の SW を左 (“COEF”) に倒すと, SIGNAL SELECTOR ボタンに無関係に, その係数値が DVM に表示される。ただし, その係数値は 100 Volt に対する電圧の形で表わされる。たとえば

DVM の表示が+29.48 ならば係数値は

$+29.48/+100 = 0.2948$ となる。

(3.4) 以上の操作で POT の設定が終ったら VTVM のボタンの “SIG SEL” を押してください。

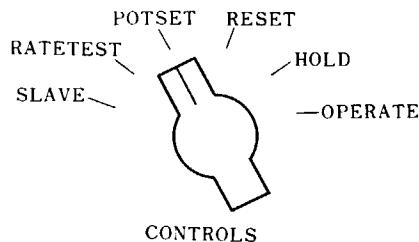
(4) 演算の開始停止 (5.1 および第 5.1 図参照)

(4.1) COMPUTER CONTROL SW C3 を “OPERATE” にすれば演算が始まる。

(ただし、INT を用いないときは “RESET” でよい。)

(4.2) 演算が終了したら “POTSET” に戻し、再び次の演算にうつる。

(4.3) 演算の途中で、過負荷のブザーが鳴ったときは、過負荷になった演算要素を見つけてから（前面のパネルにネオンランプがつく），ただちに “POTSET” に戻す。そして過負荷になる原因を除いてから改めて演算をおこなう。



COMPUTER CONTROL SW.

(注意) 割算を含む場合には、COMPUTER CONTROL SW C3 を “RESET” にしてから E-MULTI の SW を “DIV” に倒す。これは割算の分母が零にならないようにするためにある（3.6 参照）。

6 REC, 8 REC の COMPUTER CONTROL SW を “OPERATE” にしておく。

Console	使 用 要 素	Switch No. (第 5.2 図)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	AMPL # 1~20 のみ			○							
	AMPL # 1~48		○		○						
	E-MULTI (Rack-1)	○	○								
	S-MULTI # 4		○							○	
	S-MULTI # 9		○			○				○	
	S-MULTI # 1, # 5		○			○					
	FG # A 1~A 5		○			○					
B	AMPL # 1~20 のみ					○					
	AMPL # 1~48					○		○			
	E-MULTI (Rack-6)					○			○		
	S-MULTI # 4					○					
	FG # B 1~B 4					○				○	

○印の No. のスイッチを入れる。

使用要素と電源スイッチの関係

(C7)

CONTROL PANEL, 26-20A



SW1

HEPTS

PRINT

SIG. SEL.

CS1

1

AB

SW



SW2

AC

PATCH

BAY

SW

2

SW

SW



SW3

F1

PATCH

BAY

SW

3

SW

SW



SW4

F2

PATCH

BAY

SW

4

SW

SW



SW5

A

100V/SEC

SW

5

SW

SW



SW6

B

100V/SEC

SW

6

SW

SW



SW7

C

100V

SW

7

SW

SW



SW8

D

100V

SW

8

SW

SW



SW9

E

100V

SW

9

SW

SW



SW10

REL.

SW

SW



SW11

BAL.

SW

SW



SW12

BAL.

SW

SW



SW13

EXT.

V.M.

SW

SW



SW14

GND

SW

SW



SW15

500V

SW

SW



SW16

100V

SW

SW



SW17

500V

SW

SW



SW18

100V

SW

SW



SW19

500V

SW

SW



SW20

100V

SW

SW



SW21

500V

SW

SW



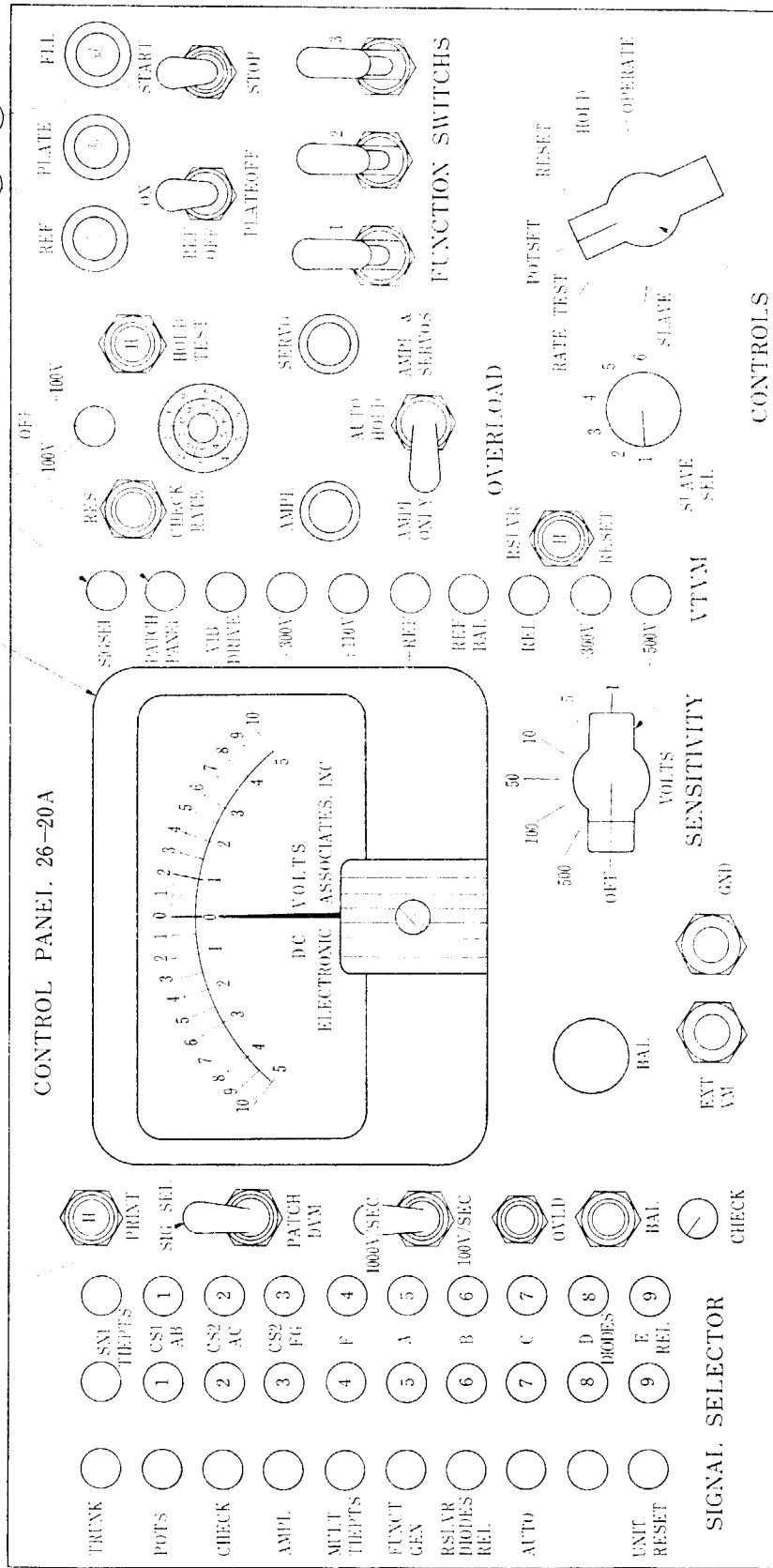
SW22

100V

SW

SW

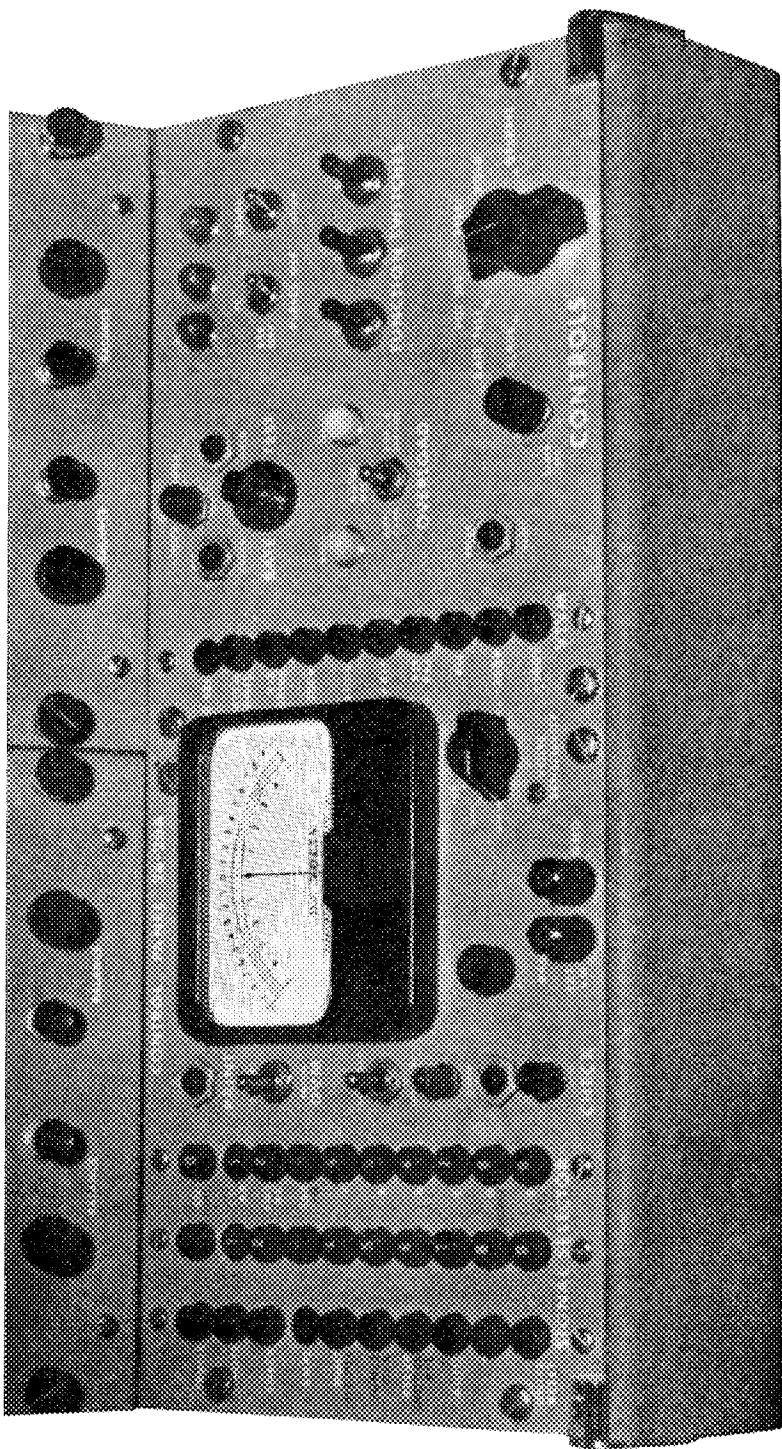
(C5) (C6) (C1) (C2) (C3)



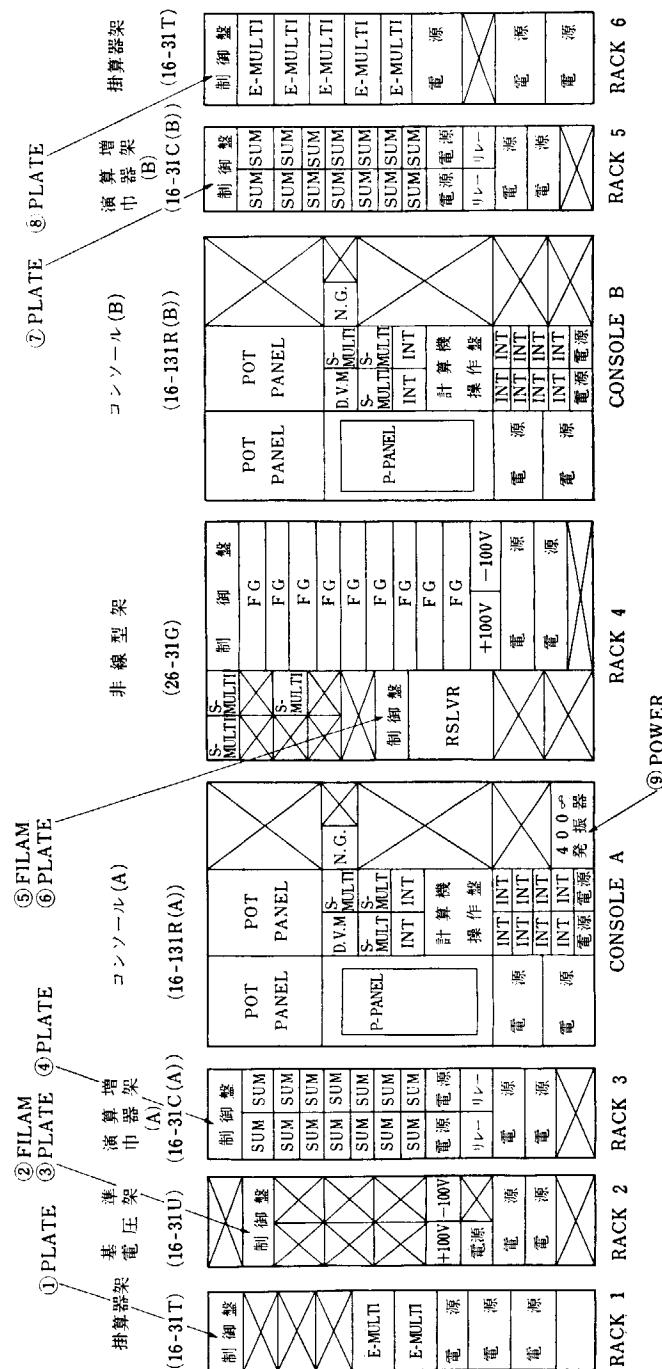
第 5.1 図 AUTO MODE CONTROL SW.

(C1)

(C3)



第 5.1 図 計 算 機 操 操 作 盤



第5.2図 PACE アナログ計算機の構成

6. 機械にかけるまでの過程

6.1 スケーリング

(Scale Factor

をきめるこ
と.)

アナログ計算機では、独立変数を時間で、従属変数を電圧であらわすので、これらの量と実際の解こうとする方程式の変数を区別し、それらの間の関係をきめておく必要がある。

解こうとするものの方程式を Physical Equation とよび、この中にあらわれる変数を Physical Variable とよぶ。Physical Variable は各種の次元をもち、通常 x, y, z などと小文字であらわす。

これらの Physical Variable に対応して、計算機のうえであらわされる変数は電圧の次元をもち（時間のみ別で後に説明する）、Machine Variable とよばれ、通常 X, Y, Z などと大文字で表わす。

Machine Variable とそれに対応する Physical Variable との比を Scale Factor とよび、通常 a で表わし、対応する変数記号を Subscript としてつけて多くの Scale Factor を区別する。 a の次元は対応する Physical Variable の次元によってそれぞれ異なる。

たとえば Physical Variable $x \text{ cm}$ に対応する Machine Variable を $X \text{ Volt}$ とすると、Scale Factor a_x は、

$$a_x = \frac{X}{x} \frac{\text{Volt}}{\text{cm}}$$

となる。

次に“時間の Scale Factor”についてのべる。アナログ計算機では独立変数は時間であり、Physical Equation でも独立変数は時間であることが多い。アナログ計算機の時間を機械時間とよび、 $\tau \text{ sec}$ であらわし、両者の比を“時間の Scale Factor”とよぶ。これは無次元であって α_τ とあらわす。

$$\alpha_\tau = \frac{\tau}{t} \quad (\text{無次元})$$

方程式の 1 秒は機械のうえで $\alpha_\tau \text{ sec}$ となるから、 $\alpha_\tau > 1$ は時間が引き伸ばされたことになり、 $\alpha_\tau < 1$ は短縮されたことになる。非常に変化の速い解をもとめるときは $\alpha_\tau > 1$ にとり、ゆるやかな解をもとめるときは $\alpha_\tau < 1$ にとる。

Machine Variable, $X, Y, Z, \tau \dots$ などで表わされた方程式を Machine Equation とよぶ。Scale Factor を用いて Physical Equation から Machine Equation を導びくことができる。

Physical Equation を

$$f\left(\frac{d^n x}{dt^n}, \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}}, \dots, x\right) = 0$$

とすると

$$\frac{d^n}{dt^n} x = \frac{\alpha_\tau^n}{a_x} \frac{d^n}{d\tau^n} X$$

となるから

$$f\left(\frac{\alpha_\tau^n}{a_x} \frac{d^n}{d\tau^n} X, \frac{\alpha_\tau^{n-1}}{a_x} \frac{d^{n-1}}{d\tau^{n-1}} X, \dots, \frac{1}{a_x} X\right) = 0$$

となり Machine Equation が得られる。

〔実例〕 Physical Equation を

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 100x^2 = 0$$

とする。 $X = \alpha_x x$, $\tau = \alpha_\tau t$ とすると,

$$\frac{\alpha_\tau^2}{\alpha_x} \frac{d^2X}{d\tau^2} + 100 \frac{1}{\alpha_x^2} X^2 = 0$$

$\alpha_x = 0.5$, $\alpha_\tau = 10$ とすれば

$$\frac{d^2X}{d\tau^2} + 2X^2 = 0$$

上式が Machine Equation である。

Machine Equation は実際に機械の結線図を作るうえに必要である。

Scale Factor を適当な値にえらぶことは、精度のよい解を要領よく得るうえに重要である。機械は Machine Variable が ± 100 V をこえてはならない。したがって Scale Factor を無制限に大きくすることはできない。

Physical Variable の最大値が予想できるならば,

$$\alpha_x \leq \frac{100}{(x \text{ の予想される最大値})}$$

の範囲内で α_x をできるだけ大きくとる。 α_x は小さすぎると機械の中で（信号/雑音）が小さくなり、解の精度が悪くなる。

予想される最大値が不明の場合は cut and try で求めて適当な Scale Factor を見いだす。

変数記号が複雑な場合は Machine Variable に * をつけ、Scale Factor を sf () と表わす。

たとえば $\Delta T_{el}^* = sf(\Delta T_{el}) \cdot \Delta T_{el}$ とする。

時間の関数が方程式中に現われる場合は、これは時間 t の従属変数であるから、Machine Variable は、たとえば T Volt であらわされなければならない。この場合

$$T = \alpha_T \cdot t$$

なる式で Scale Factor α_T が定義される。これは前の α_τ と混同してはならない。 α_τ は無次元であるが、 α_T は Volt/sec の次元をもつ。

したがって T , τ , t は厳密に区別されなければならない。A 2.6 で時間関数の発生を取り扱うが、ここでは原理を明らかにすることが主目的であるので、不要の複雑さをさけるためこれらの厳密な区別をおこなわないで書いた部分もある。具体的にスケーリングをする場合はこれを区別しなければならない。

6.2 機械にかけるまで

アナログ計算機を使用する具体的な順序をまとめると次のようになる。

- (1) Physical Equation に対してスケーリングにより Machine Equation を求める。
- (2) それにしたがって P-PANEL 接続のための結線図を作る（結線図には付録 A 1 のような記号を用いるとよい）。

(結線図を作る場合の注意)

演算要素の接続には若干の制限があり、それらをまとめると次のようになる。

演 算 要 素	接続してはならないもの
AMPL の出力	POT 7 個以上
POT "	POT 2 個以上
" "	XYREC
S-MULTI "	POT
RSLVR "	AMPL の 1 入力以外のもの

- (3) P-PANEL の接続
 (4) 以下 5.4 に述べた手順で計算機を操作する。

6.3 例 题

6.3.1 一次おくれ

$$5000 \frac{dx}{dt} + x = 15, \quad x_0 = 0, \quad t; \text{ sec} \quad (6.3.1)$$

上式の時定数は 5000 sec で計算機の演算時間は数分以内にするのがよいから、実時間の演算は不可能である。

そこで Machine Equation の時定数が 5 sec になるように時間の Scale Factor を定めることにする。

$$\alpha_\tau = \frac{\tau}{t} = \frac{5}{5000} = \frac{1}{1000}$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{1}{1000} \frac{d}{d\tau} \quad (6.3.2)$$

(6.3.2) 式を (6.3.1) 式に代入して

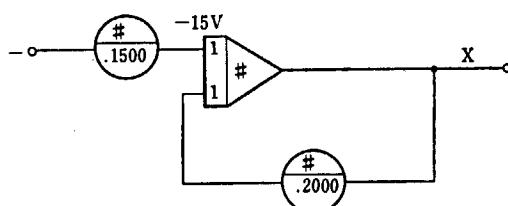
$$5 \frac{dx}{d\tau} + x = 15$$

すなわち

$$\frac{dx}{d\tau} + 0.2x = 3 \quad (6.3.3)$$

次に x の最終値は 15 であって $x=1$ を電圧 1 V に対応させると 15 V となり、100 V に対してはかなり小さい。精度を上げるために Scale Factor a_x を $100/15$ に近い数として

$$a_x = \frac{X}{x} = 5 \quad (6.3.4)$$



第 6.3.1 図 $-\frac{dX}{d\tau} = 0.2X - 15$ の結線図

とする。

(6.3.4) 式を (6.3.3) 式に代入すると, Machine Equation は

$$\frac{dX}{dt} + 0.2X = 15, \quad X_0 = 0 \quad (6.3.5)$$

となる. (6.3.5) 式の結線図を第 6.3.1 図に示す.

6.3.2 減衰振動の方程式

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\zeta\omega \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = 0 \quad (6.3.6)$$

ω , ζ および初期値の次の四つの組合せについてスケーリングを考察する.

	ω	ζ	x_0	$(\frac{dx}{dt})_0$
(a)	1	0.5	5	0
(b)	2	0	100	-10
(c)	20	0.2	5	0
(d)	0.05	0.2	5	1

(a) $\omega=1, \zeta=0.5$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} + x = 0, \quad x_0 = 5, \quad (\frac{dx}{dt})_0 = 0 \quad (6.3.7)$$

Damping のない場合の, この振動の固有周期は $\frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \text{ sec}$ で, 実時間の演算が可能である. すなわち $\alpha_r = 1$ とし,

正弦関数 $f(t) = \sin \omega t$ を順次微分すると

$$\frac{df}{dt} = \omega \cos \omega t$$

$$\frac{d^2f}{dt^2} = -\omega^2 \sin \omega t$$

$\omega > 1$ ならば $\frac{df}{dt}$ の最大値は, f の最大値より大きくなる可能性があり, $\frac{d^2f}{dt^2}$ の最大値は ω^2 倍となる. また $\omega < 1$ ならば, この関係は逆になり, 高次の微分項ほど最大値が小さくなる.

このことから解が本質的に正弦波であるとき高次の微分項の最大値がある程度推定することができる.

(6.3.7) 式の場合, $\omega = 1$ であるから $\frac{d^2x}{dt^2}, \frac{dx}{dt}$ の最大値は x の最大値をこえることはない. x の最大値は $x_0 = 5$ であるからこれを 100 V に対応させると,

$$\alpha_x = \frac{100}{5} = 20$$

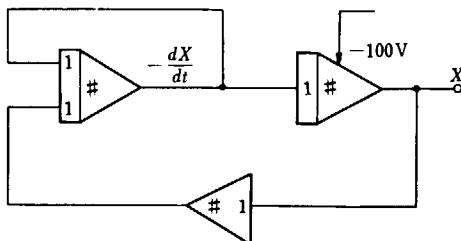
となる. 以上から Machine Equation は

$$\frac{1}{20} \frac{d^2X}{dt^2} + \frac{1}{20} \frac{dX}{dt} + \frac{1}{20} X = 0, \quad X_0 = 5 \times 20$$

すなわち

$$\frac{d^2X}{dt^2} + \frac{dX}{dt} + X = 0, \quad X_0 = 100 \quad (6.3.8)$$

この結線図は次のようにある。



第 6.3.2 図 $\frac{d^2X}{dt^2} = -\frac{dX}{dt} - X, \quad X_0 = 100$ の結線図

(b) $\omega=2, \zeta=0$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 4x = 0, \quad x_0 = 100, \quad \left(\frac{dx}{dt}\right)_0 = -10 \quad (6.3.9)$$

この振動の固有周期は π sec であるから、実時間の演算が可能である。
すなわち $\alpha_s = 1$ とする。

$\omega=2>1$ から、 x の最大値: 100

$$\frac{dx}{dt} \quad " : 200$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} \quad " : 400$$

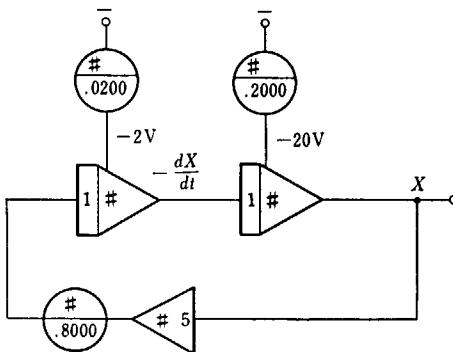
これから

$$\alpha_x = 0.5 \quad \left(\frac{100}{400} = 0.25 \text{ となるから} \right)$$

とする。したがって Machine Equation は

$$\frac{d^2X}{dt^2} + 4X = 0, \quad X_0 = 20, \quad \left(\frac{dX}{dt}\right)_0 = -2 \quad (6.3.10)$$

結線図は次のとおりである。



第 6.3.3 図 $\frac{d^2X}{dt^2} = -4X, \quad X_0 = 20, \quad \left(\frac{dX}{dt}\right)_0 = -2$ の結線図

(c) $\omega=20, \zeta=0.2$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 8\frac{dx}{dt} + 400x = 0, \quad x_0=5, \quad \left(\frac{dx}{dt}\right)_0 = 0 \quad (6.3.11)$$

Damping のない場合の周期は $\pi/10$ sec で, XYREC の周波数特性上これを 1 cps 以下にしなければならぬので演算時間を拡大する必要がある。

したがって $\alpha_\tau=10$ とする。独立変数 τ に対する ω は 2 となり, $\frac{d^2x}{d\tau^2}$ は知る必要がない場合, その最大値は 5 で, $\frac{dx}{d\tau}$ のは 10 と考える。このとき α_x は, x からは $\frac{100}{5}=20\frac{dx}{dt}$ からは $\frac{100}{10}=10$ となるから

$$\alpha_x=10$$

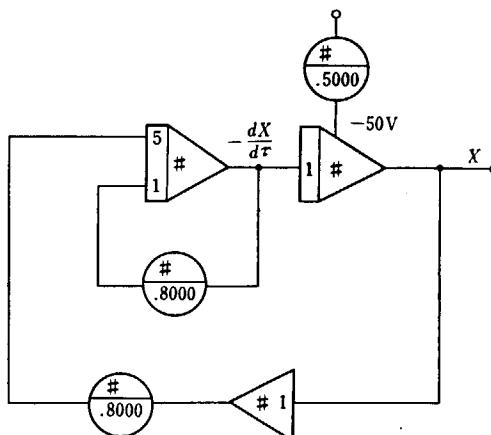
とする。

$$t=\frac{1}{10}\tau, \quad x=\frac{X}{10}$$

の関係から, Machine Equation は

$$\frac{d^2X}{d\tau^2} + 0.8\frac{dX}{d\tau} + 4Y = 0, \quad X_0=50, \quad \left(\frac{dX}{d\tau}\right)_0 = 0 \quad (6.3.12)$$

結線図を示す。



第 6.3.4 図 $\frac{d^2X}{d\tau^2} = -0.8\frac{dX}{d\tau} - 4X, X_0=50, \left(\frac{dX}{d\tau}\right)_0 = 0$ の結線図

(d) $\omega=0.05, \zeta=0.2$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 0.02\frac{dx}{dt} + 0.0025x = 0, \quad x_0=5, \quad \left(\frac{dx}{dt}\right)_0 = 1 \quad (6.3.13)$$

Damping のない場合の固有周期は 40π sec で, かなり長いから演算時間を $\frac{1}{10}$ に縮少する。

$$\alpha_\tau=0.1$$

これから

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 0.2\frac{dx}{dt} + 0.25x = 0, \quad x_0=5, \quad \left(\frac{dx}{dt}\right)_0 = 10$$

$\omega < 1$ であるから Scale Factor は x の最大値のみを考慮して定めればよい。推定によると、 x は次の値をこえない。

$$5 + \left(\frac{dx}{d\tau} \right)_0 \cdot \frac{1}{4} \frac{2\pi}{\omega} = 5 + 31 = 36$$

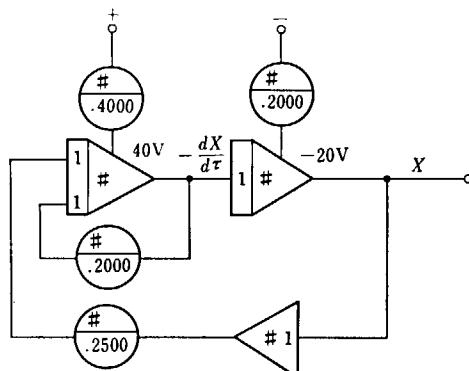
しかし、減衰の影響を入れて 25 と考える。

$$\alpha_x = \frac{100}{25} = 4$$

これから Machine Equation は

$$\frac{d^2X}{d\tau^2} + 0.2 \frac{dX}{d\tau} + 0.25X = 0, \quad X_0 = 2.0, \quad \left(\frac{dX}{d\tau} \right)_0 = 40$$

結線図を示す。



第 6.3.5 図 $\frac{d^2X}{d\tau^2} = -0.2 \frac{dX}{d\tau} - 0.25X, X_0 = 20, \left(\frac{dX}{d\tau} \right)_0 = 40$ の結線図

6.3.3 Van der Pol の方程式

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \mu(x^2 - 1) \frac{dx}{dt} + x = 0$$

$$\mu = 0.1, \quad x_0 = 0.2, \quad \left(\frac{dx}{dt} \right)_0 = 0 \quad (6.3.15)$$

この方程式は、ある種の非線形電気回路の発振の立上りを表わすもので、その小さい値については振幅が増大し、大きい値に対しては減少するので、 x はある範囲内にあることがわかる。 x は 2 をこえないことが知られているものとし、次のように Scale Factor を定める。

$$\alpha_r = 1 \quad \alpha_x = 50$$

したがって Machine Equation は

$$\frac{1}{50} \frac{d^2X}{dt^2} + 0.1 \left(\frac{X^2}{2500} - 1 \right) \frac{1}{50} \frac{dX}{dt} + \frac{1}{50} X = 0,$$

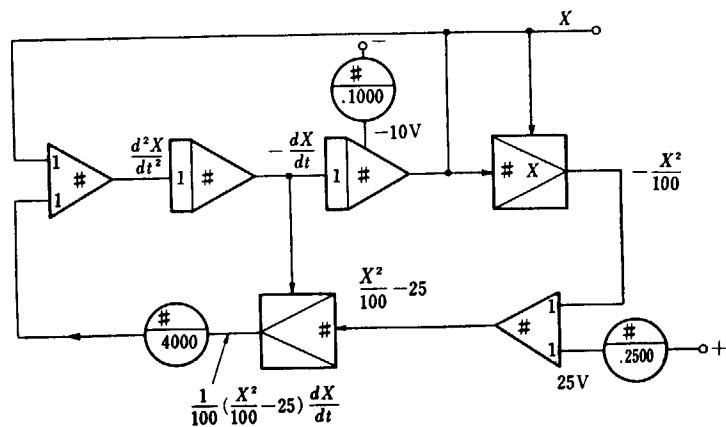
$$X_0 = 0.2 \times 50, \quad \left(\frac{dX}{dt} \right)_0 = 0$$

すなわち

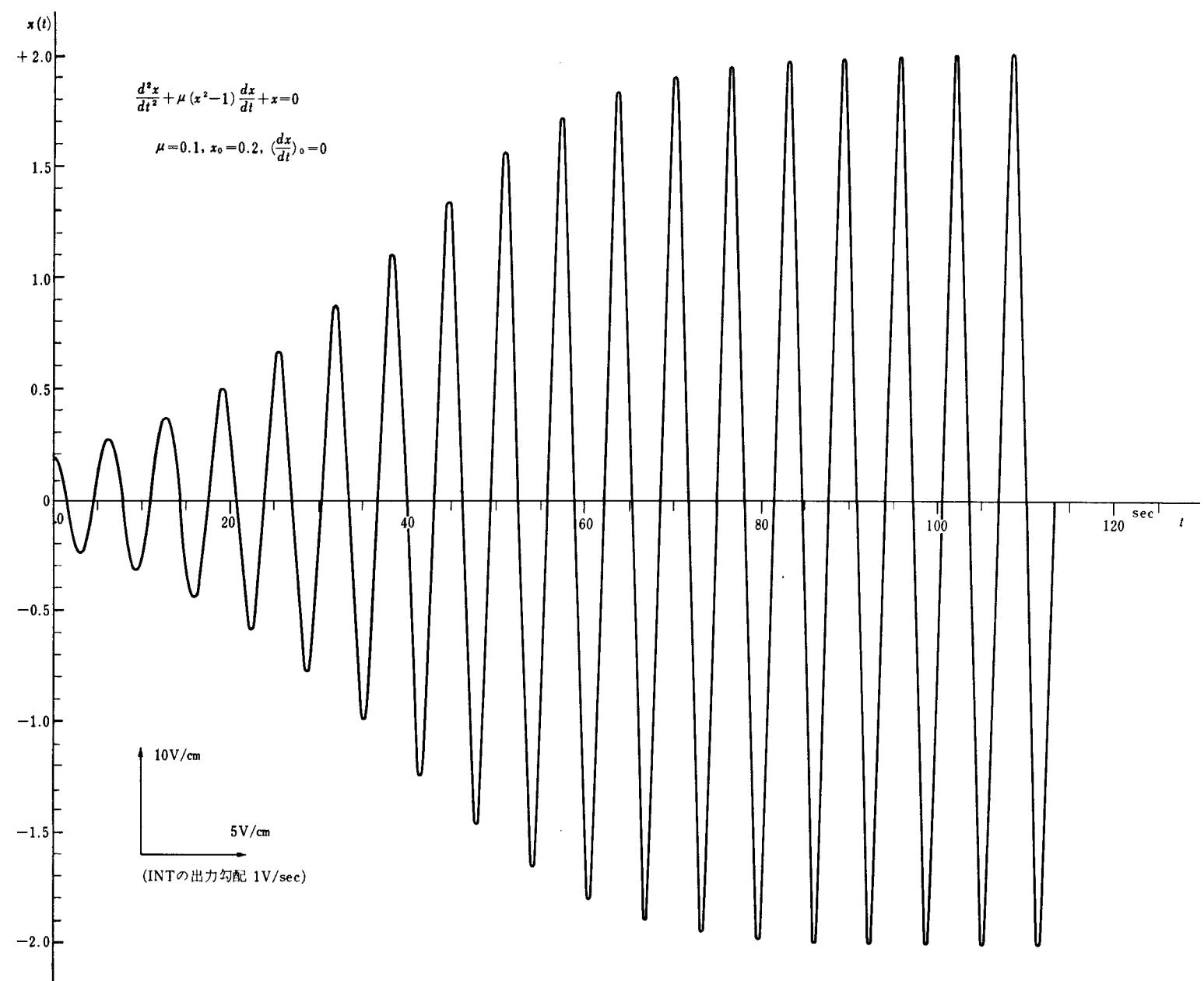
$$\frac{d^2X^2}{dt^2} + \left(\frac{X^2}{25000} - 0.1 \right) \frac{dX}{dt} + X = 0$$

$$X_0 = 10, \quad \left(\frac{dX}{dt}\right)_0 = 0$$

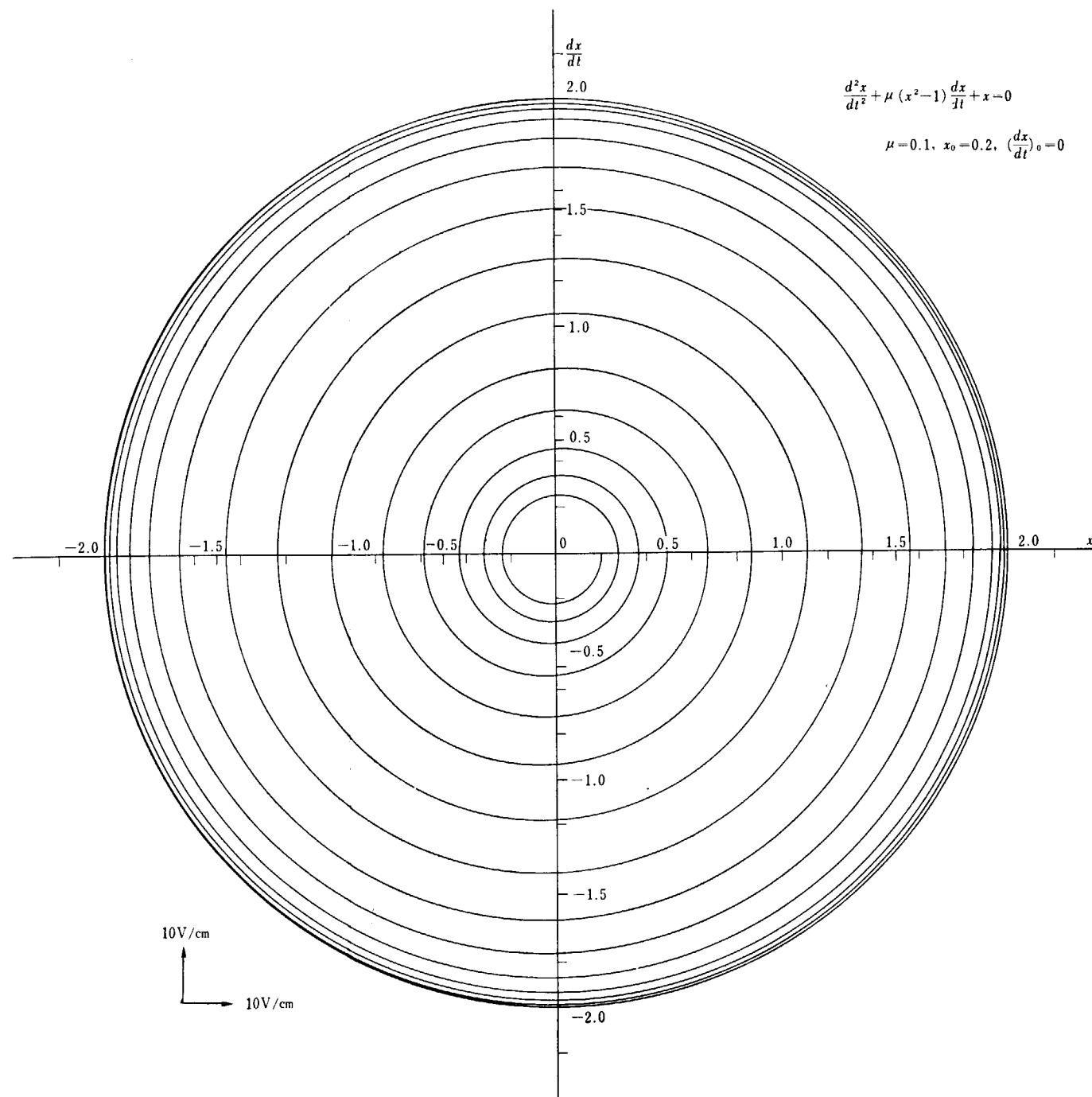
結線図を第 6.3.6 図に示す。解の曲線を第 6.3.4 図に、位相面トラジェクトリーを第 6.3.8 図に示す。



第 6.3.6 図 $\frac{d^2X}{dt^2} = -\left(\frac{X^2}{25000} - 0.1\right)\frac{dX}{dt} - X, \quad X_0 = 10, \quad \left(\frac{dX}{dt}\right)_0 = 0$ の結線図



第 6.3.7 図 VAN DER POL の方程式の解の一例



第 6.3.8 図 VAN DER POL の方程式の解の一例（位相面）

7. 実例

PACE すでに多数の問題が解かれたが、そのうち代表的なものを次に示す。

7.1 WATER

BOILER 型

原子炉の動特

性

WATER BOILER 型原子炉の動特性は次の方程式で表わされる [15].

$$\frac{d}{dt} \delta P + \frac{\beta}{\ell} \delta P = \frac{P_0}{\ell} \delta K + \lambda \delta C \quad (7.1.1)$$

$$\frac{d}{dt} \delta C + \lambda \delta C = \frac{\beta}{\ell} \delta P \quad (7.1.2)$$

$$\frac{d}{dt} \delta T + \gamma \delta T = \kappa \delta P \quad (7.1.3)$$

$$\frac{d}{dt} \delta V + \sigma \delta V = G \delta P \quad (7.1.4)$$

$$\delta K = \delta K_d + \alpha \delta T + \phi \delta V \quad (7.1.5)$$

ここに使用した記号および定数は次のとおりである.

$\beta = 0.0075$		遅発中性子の割合
$\lambda = 0.08$	/sec	遅発中性子の崩壊定数
$\ell = 1.2 \times 10^{-4}$	sec	中性子寿命
$\kappa = 0.01735$	°C/kW sec	温度上昇割合
$\gamma = 0.018$	/sec	温度上昇の時定数の逆数
$G = 4.16$	cm ³ /kW sec	ガス発生の割合
$\sigma = 0.5$	/sec	ガス発生の時定数の逆数
$\alpha = -2.4 \times 10^{-4}$	/°C	反応度の温度係数
$\phi = -7 \times 10^{-6}$	/°C	反応度のガス係数
$P_0 = 50$	kW	定格熱出力
$\delta P ;$	kW	原子炉出力(変化分)
$\delta C ;$		先行核温度(変化分)
$\delta T ;$	°C	炉心温度(変化分)
$\delta V ;$	cm ³	ガス量(変化分)
$\delta K ;$		反応度

(7.1.1) と (7.1.2) は平均的な遅発中性子を考慮した原子炉の核的動特性の方程式である. (7.1.3) は炉心内温度 T を, (7.1.4) は放射線により水が分解してできる気泡の量 V をそれぞれ求める方程式で, いずれも出力 P と一次遅れの関係にあると近似している. この T と V が反応度に影響をおよぼすので, 反応度を求める式として, (7.1.5) が得られる. 核的動特性, 温度効果, および気泡の効果の関係をブロック図で概念的に示したものが第 7.1 図である.

反応度外乱として $\delta K_d = 10^{-5}$ が加えられた場合の応答を求める.

Scale Factor を次のように選定する.

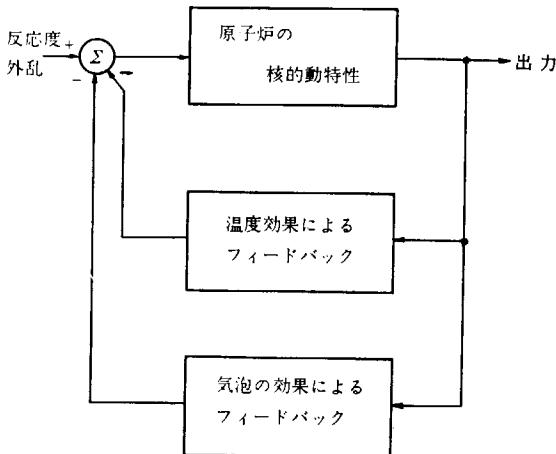
$$\alpha_r = 1 \quad sf(\delta P) = 10^2$$

$$sf(\delta k) = 10^6$$

$$sf(\delta C) = 1$$

$$sf(\delta V) = 10$$

$$sf(\delta T) = 10^3$$



第 7.1 図 ブ ロ ッ ク 図

Machine Equation : (*: Machine Variable に付す)

$$\frac{d}{dt} \delta P^* = 41.6 \delta K^* - 62.5 \delta P^* + 8 \delta C^*$$

$$\frac{d}{dt} \delta C^* = 0.625 \delta P^* - 0.08 \delta C^*$$

$$\frac{d}{dt} \delta T^* = 0.1735 \delta P^* - 0.018 \delta T^*$$

$$\frac{d}{dt} \delta V^* = 0.416 \delta P^* - 0.5 \delta V^*$$

$$\delta K^* = \delta K_a^* - 0.24 \delta T^* - 0.7 \delta V^*$$

解を第 7.2 図に示す。

7.2 英国型動力炉 の制御系の解 析 [16]

英国型動力炉では、冷却ガスの原子炉出口での温度が常に一定になるように制御棒を動かす制御系がついている。この系をブロック図に表わすと、第 7.3 図のようになる。

各ブロックの特性は次のようである。

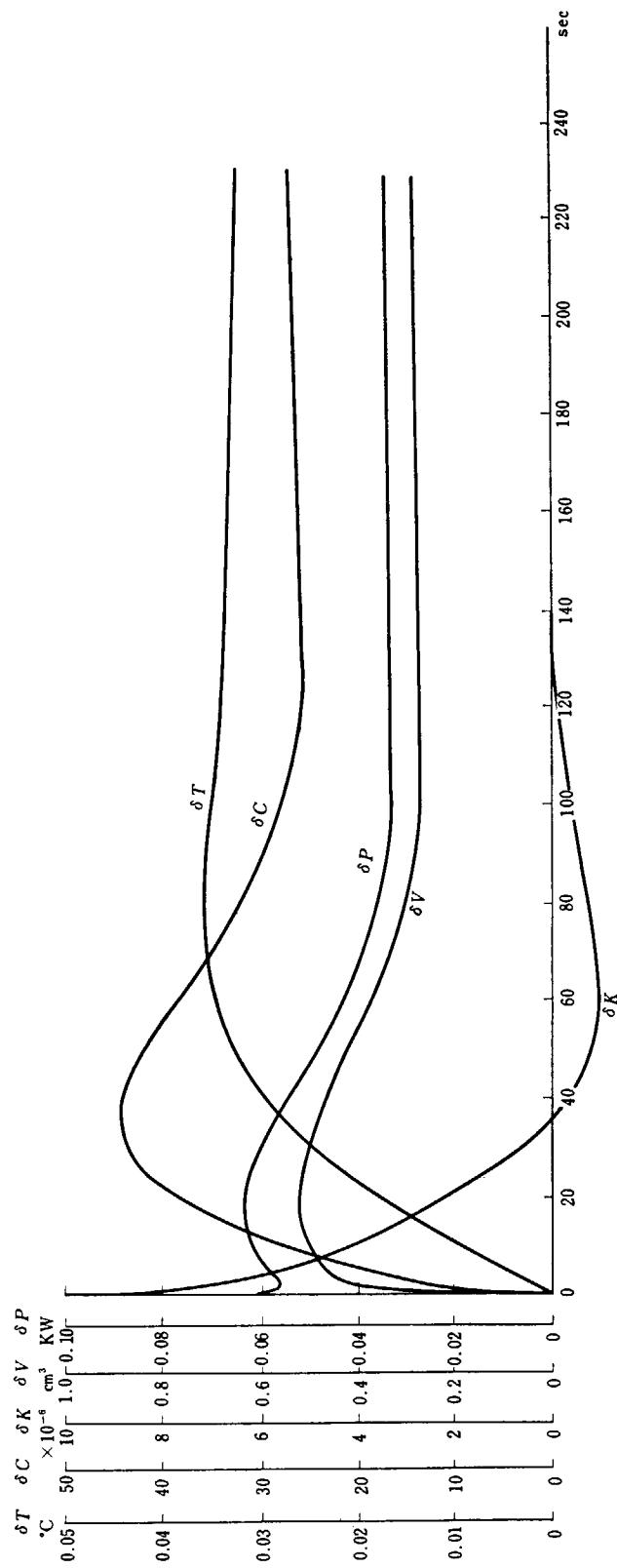
a) 核的動特性および温度効果

$$\frac{d\Delta q}{dt} = 714\rho(1+\Delta q) - 3.85\Delta q + 0.0768\Delta\gamma$$

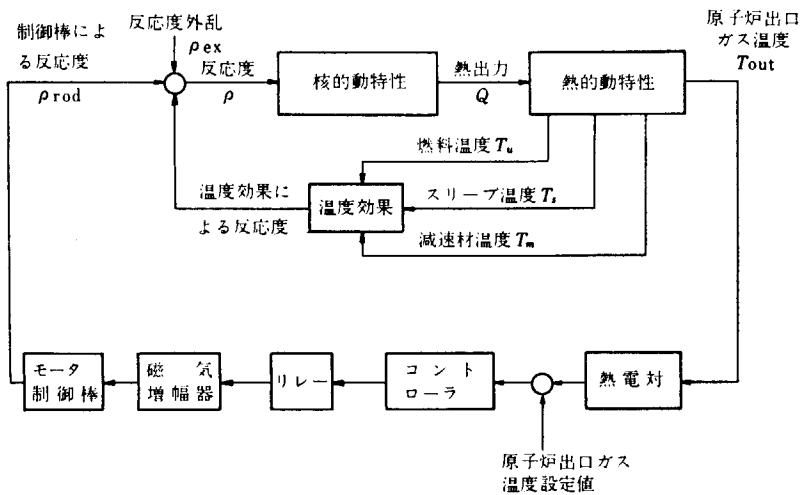
$$\frac{d\Delta\gamma}{dt} = 3.85\Delta q - 0.0768\Delta\gamma$$

$$\Delta q = \frac{\Delta Q}{Q_0}$$

$$\rho = -2.52 \times 10^{-5} \Delta T_u + 3.3 \times 10^{-5} \Delta T_s + 12.96 \times 10^{-5} \Delta T_m + \rho_{rod} + \rho_{ex}$$



第 7.2 図 WATER BOILER 型原子炉の動特性



第7.3図 制御系ブロック図

$$\rho_{ex} = 5 \times 10^{-5}$$

b) 热的動特性（定格出力の 20% における部分負荷運転時）

$$\frac{d\Delta T_u}{dt} = 4.89\Delta q - 0.353(\Delta T_u - \Delta T_f)$$

$$\frac{d\Delta T_f}{dt} = 0.484\Delta T_u - 0.616\Delta T_f + 0.1258\Delta T_{c_1} + 0.0054\Delta T_s$$

$$\frac{d\Delta T_{c_1}}{dt} = 3.345\Delta T_f - 6.431\Delta T_{c_1} + 1.186\Delta T_s$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta T_s}{dt} = & 0.01\Delta q + 0.0074\Delta T_{c_1} - 0.0105\Delta T_s + 0.001\Delta T_{c_2} \\ & + 0.0011\Delta T_f + 0.0015\Delta T_m \end{aligned}$$

$$\frac{d\Delta T_{c_2}}{dt} = 0.3705\Delta T_s - 0.9028\Delta T_{c_2} + 0.5123\Delta T_m$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta T_m}{dt} = & 0.0087\Delta q + 1.37 \times 10^{-4}\Delta T_{c_2} - 2.85 \times 10^{-4}\Delta T_m + 1.2 \\ & \times 10^{-4}\Delta T_s \end{aligned}$$

c) その他の

伝達関数の形で表わすと、次のとおりである。

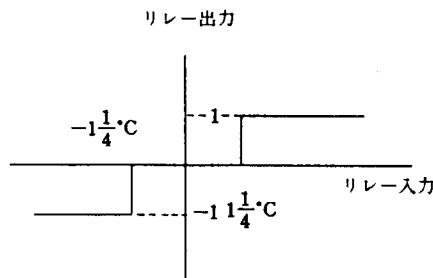
$$\text{熱電対 } G_{Te} = \frac{1}{1+8s}$$

$$\text{コントローラ } G_c = 1 + \frac{1}{T_2 s} + \frac{T_D s}{1+0.05s}$$

$$\text{磁気増幅器 } G_{MA} = \frac{1}{1+0.2s}$$

$$\text{モータ } G_{Mo} = \frac{K}{s(1+0.5s)} \quad K = 15^{-5}/\text{sec}$$

リレーの特性は第7.4図のような3位置動作で表わされる。



第 7.4 図 リレーの特性

記 号

Q : 熱出力

cal/sec·cm

$$\Delta q : \Delta Q/Q_0$$

ρ : 反応度

γ : 遅発中性子先行核密度に比例する量

T_u : 燃料棒温度

T_t : 燃料棒被覆温度 " "

T_{c_1}, T_{c_2} : 冷却ガス温度

T_s : スリーブ温度 "

T_m : 減速材溫度

T_{out} : 冷却ガスの原子炉出口における温度 " "

s: ラプラス演算子

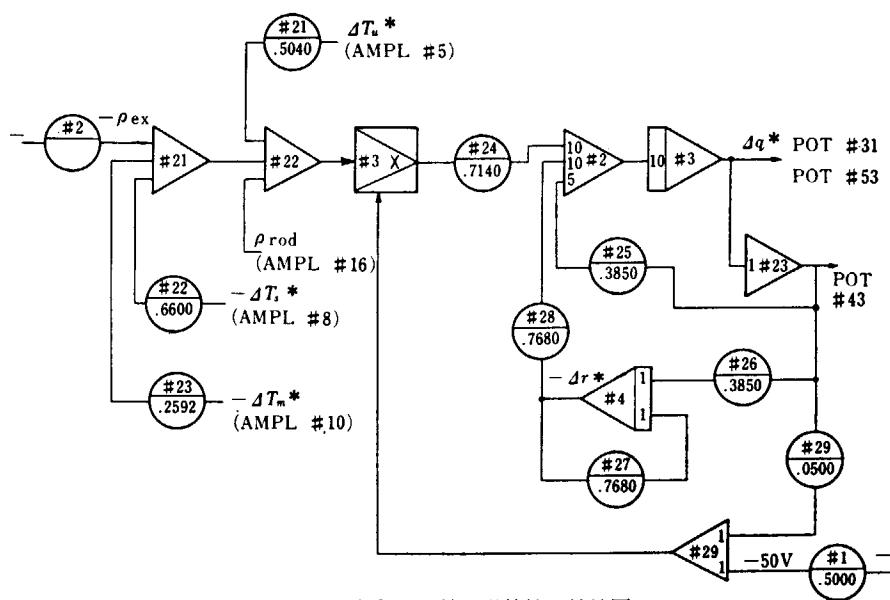
*A*をつけたものは定常状態からの偏差を示す。

0 は定常状態の値を示す

* をつはたものは Machine Variable を示す

卷之三

#21 $4T_2^*$



第 7.5 図 核的動特性の結線図

Scale Factor は次のとおりである。

$$\alpha_r = 10$$

$$sf(\rho) = 2 \times 10^5$$

$$sf(\Delta T_{c_1}) = 5$$

$$sf(\Delta q) = 1000$$

$$sf(\Delta T_s) = 10$$

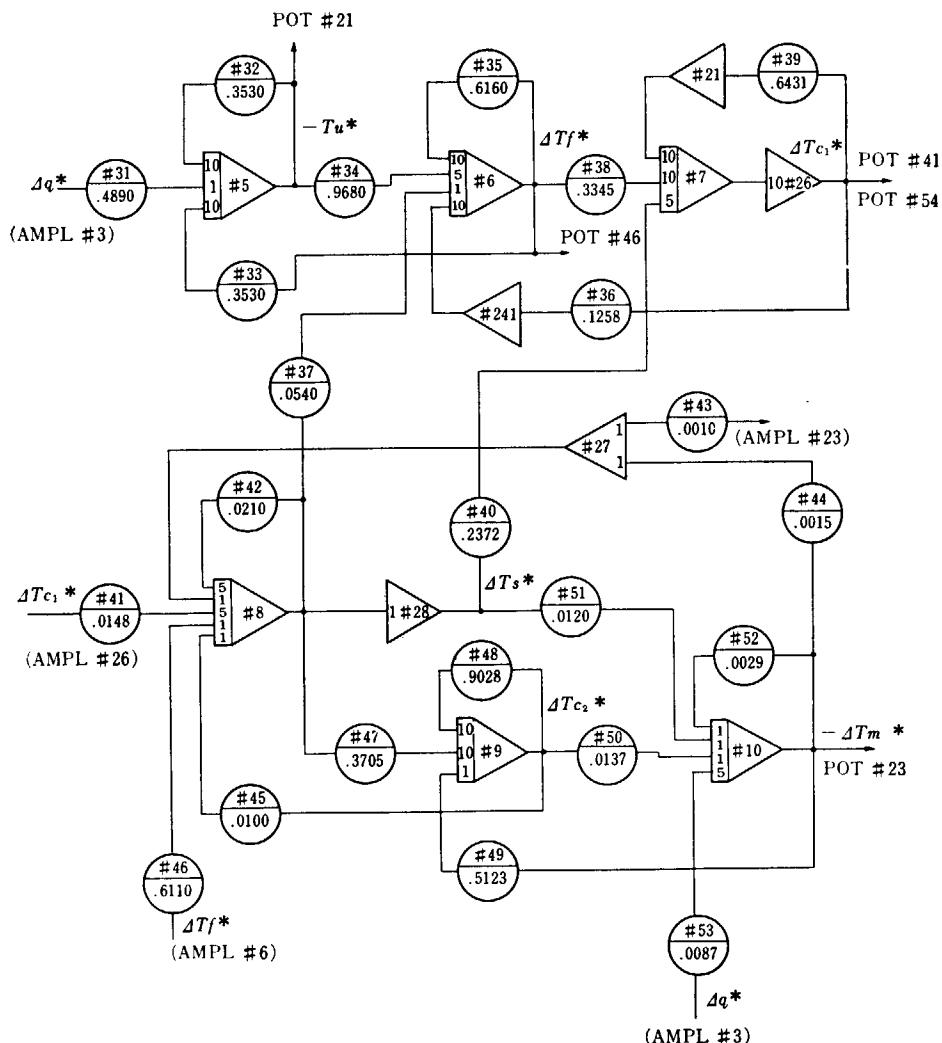
$$sf(\Delta r) = 10$$

$$sf(\Delta T_{c_2}) = 10$$

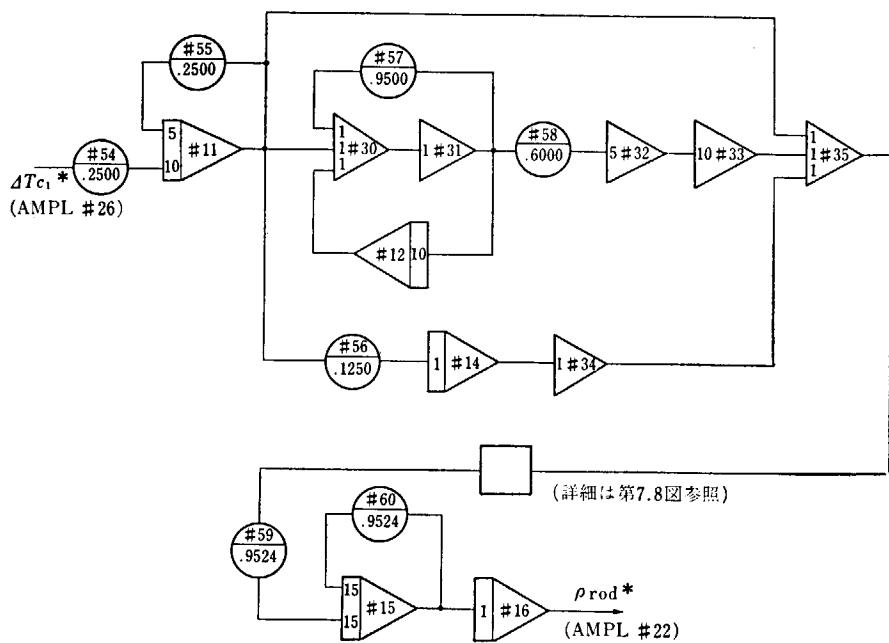
$$sf(\Delta T_u) = 10$$

$$sf(\Delta T_m) = 100$$

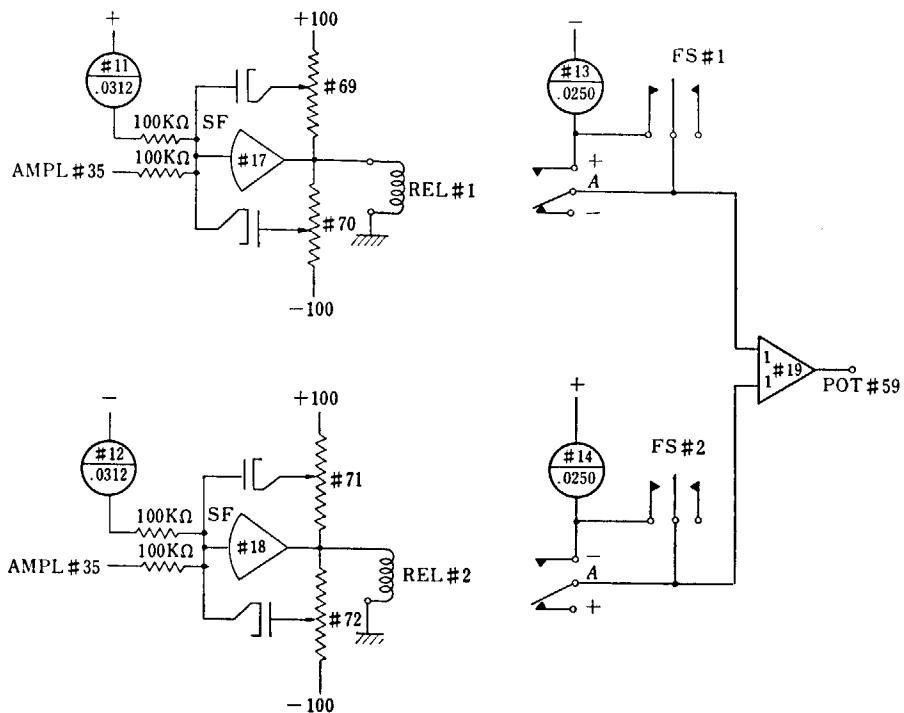
$$sf(\Delta T_f) = 10$$



第 7.6 図 热的動特性の結線図

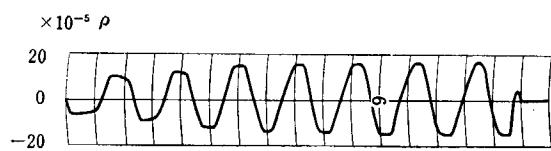
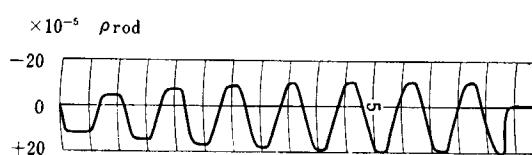
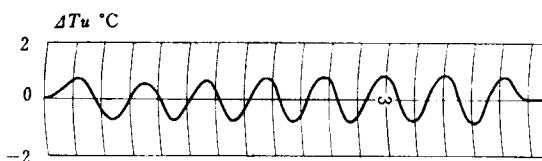
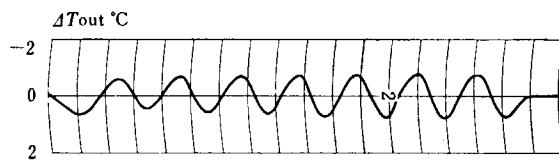
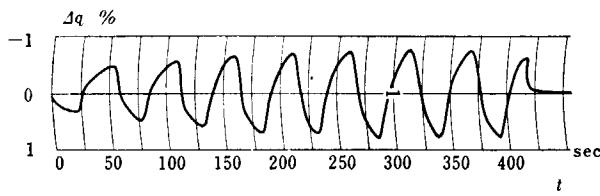


第 7.7 図 コントローラの結線図

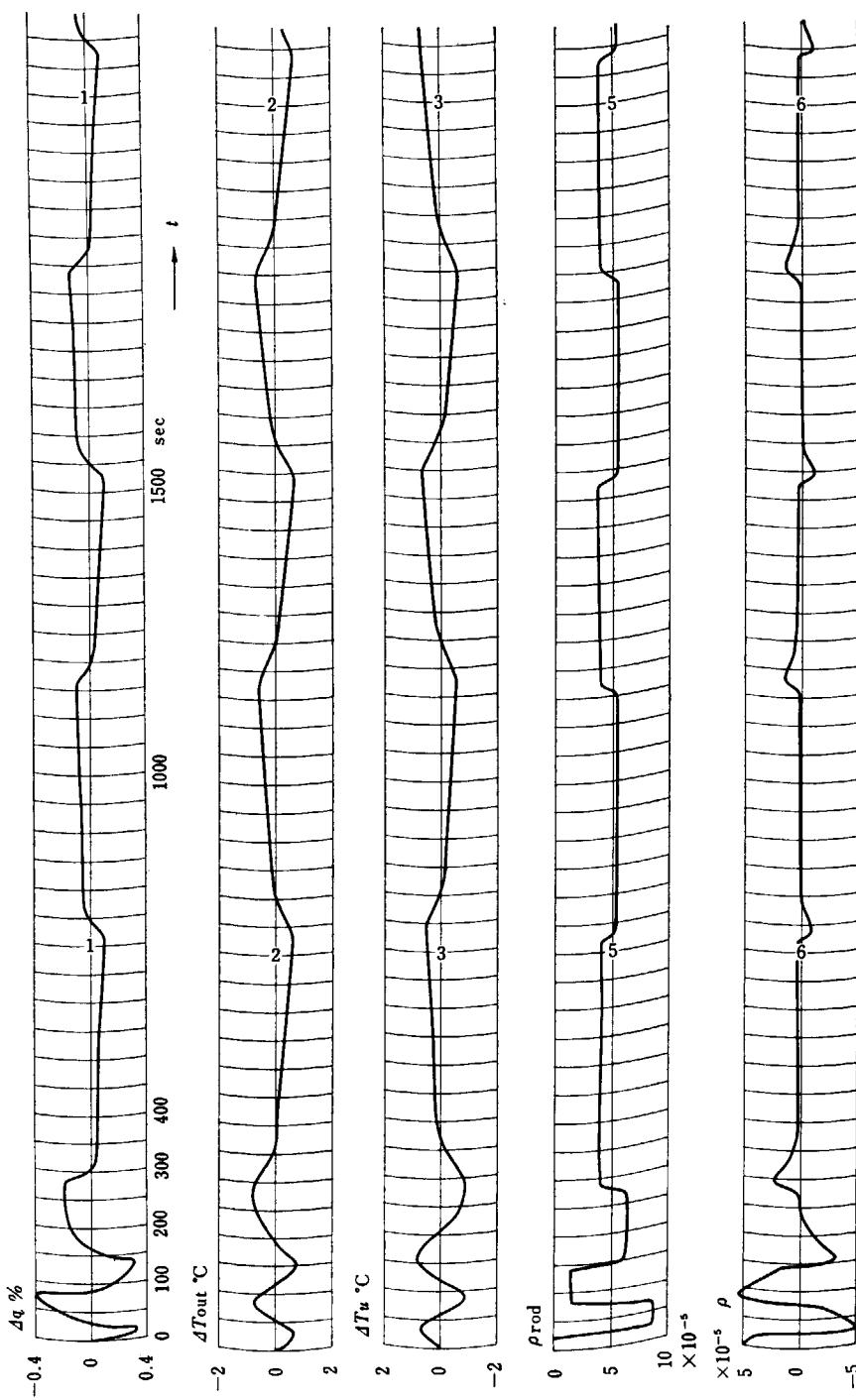


第 7.8 図 リレーの結線図

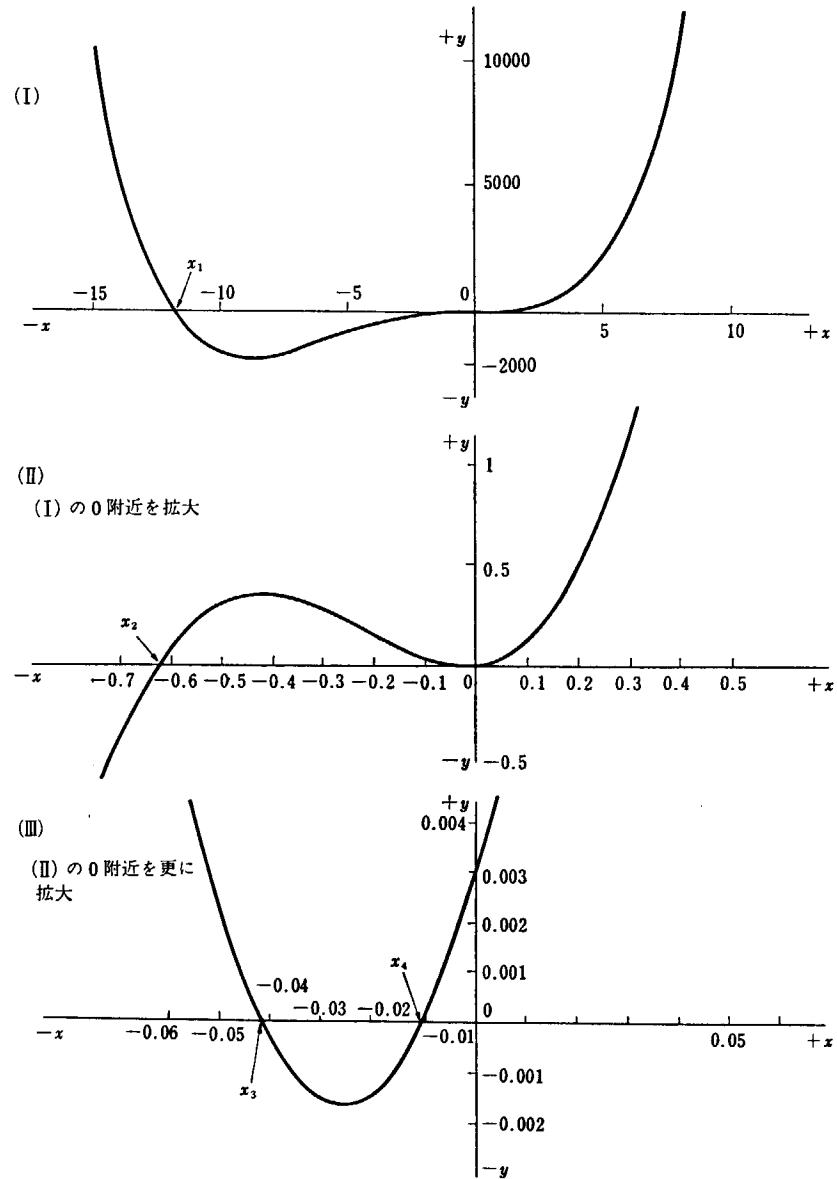
Machine Equation は結線図を見れば明らかなので、省略する。
解を第 7.9 図に示す。



第 7.9 図 (a) $T_I = 80$ sec, $T_D = 30$ sec, $K = 20 \times 10^{-5}$ /sec,
 $\rho_{ex} = 5 \times 10^{-5}$



第 7.9 図 (b) $T_I=80, T_D=30, K=1 \times 10^{-5}/\text{sec}, \rho_{ex}=5 \times 10^{-5}$



第 7.10 図 4 次代数方程式の解
アナログ計算機による 4 次代数方程式
 $x^4 + 12.47x^3 + 7.92x^2 + 0.3819x + 0.003118 = 0$
の解

7.3 高次代数方程 一般にアナログ計算機を用いて代数方程式を解くことはおこなわれないが、式高次の場合の実根のみを、1% ていどの誤差で求めるには、アナログ計算機を利用するのも便利である。

演算は、 $f(x)=0$ の $f(x)$ を x に対して XYREC に書き、軸との交点を求める方法でおこなう。

実例として次の方程式を解く。

$$y = x^4 + 12.47x^3 + 7.92x^2 + 0.3819x + 0.003118 = 0$$

まず $-20 < x < 20$ の範囲について

$$\begin{cases} X = 5x \\ Y = (1/200)y \end{cases}$$

とすれば、Machine Equation は次のようになる（結線図は省略）。

$$Y = 8 \cdot X^4 / 100^3 + 4.988X^3 / 100^2 + 0.1584X^2 / 100 + 0.0003819X + 0.00001559$$

この結果が第 7.10 図 (I) で、 $x_1 = -11.8$ が求められたが、0 付近の様子を詳しくみるため、スケーリングを改めて、 $x=0$ の近傍を拡大して演算をおこなう。

$-1 < x < 1$ の範囲について

$$\begin{cases} X = 100x \\ Y = 10y \end{cases}$$

とすれば Machine Equation は次のようになる。

$$Y = 0.01X^4 / 100^3 + 1.247X^3 / 100^2 + 0.792X^2 / 100 + 0.03819X + 0.03118$$

この解は第 7.10 図 (II) で、 $x_2 = -0.622$ が求められたが、さらに 0 の近傍をくわしくみるため $x=0$ の付近を拡大して $-0.1 < x < 0.1$ の範囲について解く

$$\begin{cases} X = 1000x \\ Y = 10000y \end{cases}$$

とすれば Machine Equation は次のようになる。

$$Y = 0.01X^4 / 100^3 + 1.247X^3 / 100^2 + 0.792X^2 / 100 + 3.819X + 31.18$$

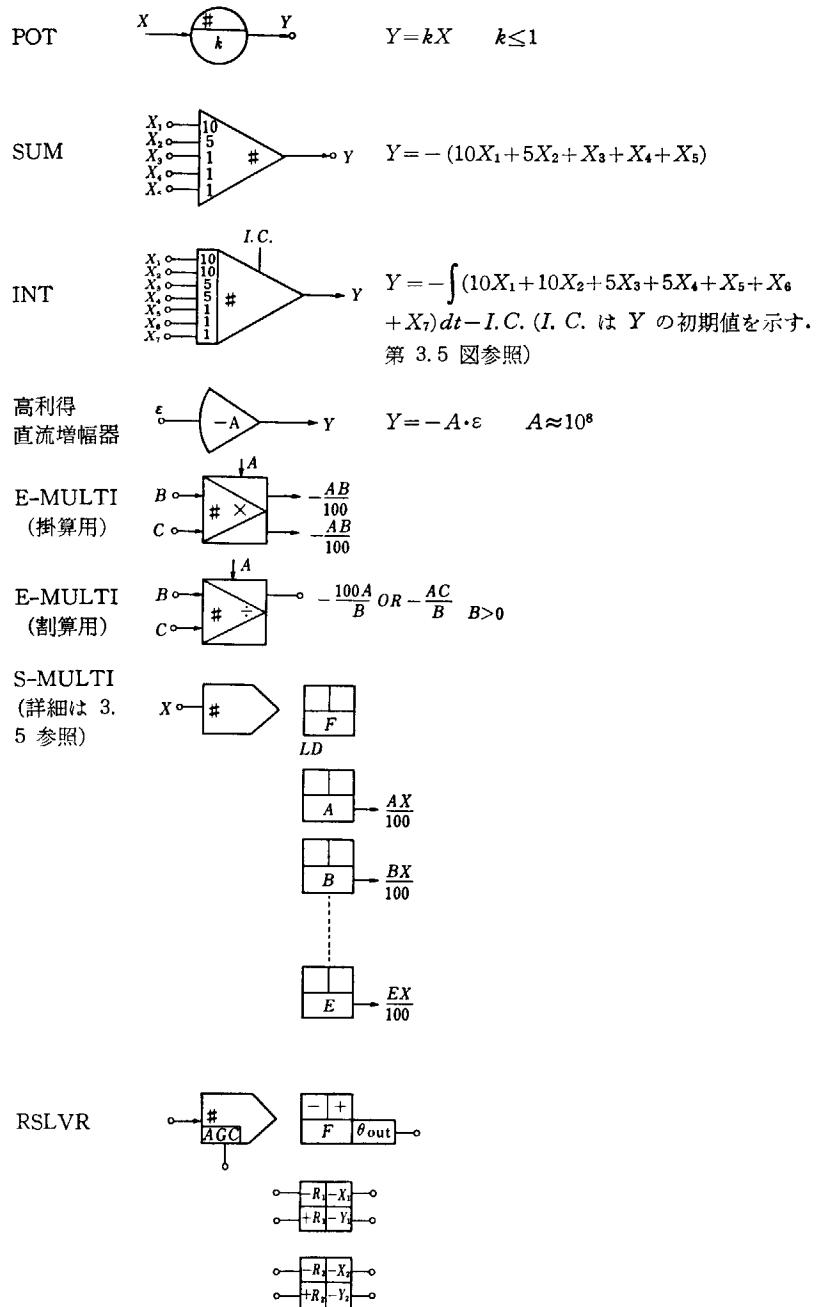
この解が第 7.10 図 (III) で、 $x_3 = -0.0416$, $x_4 = -0.0103$ が求められる。これらの値を数値解と対照すると次のようになる。

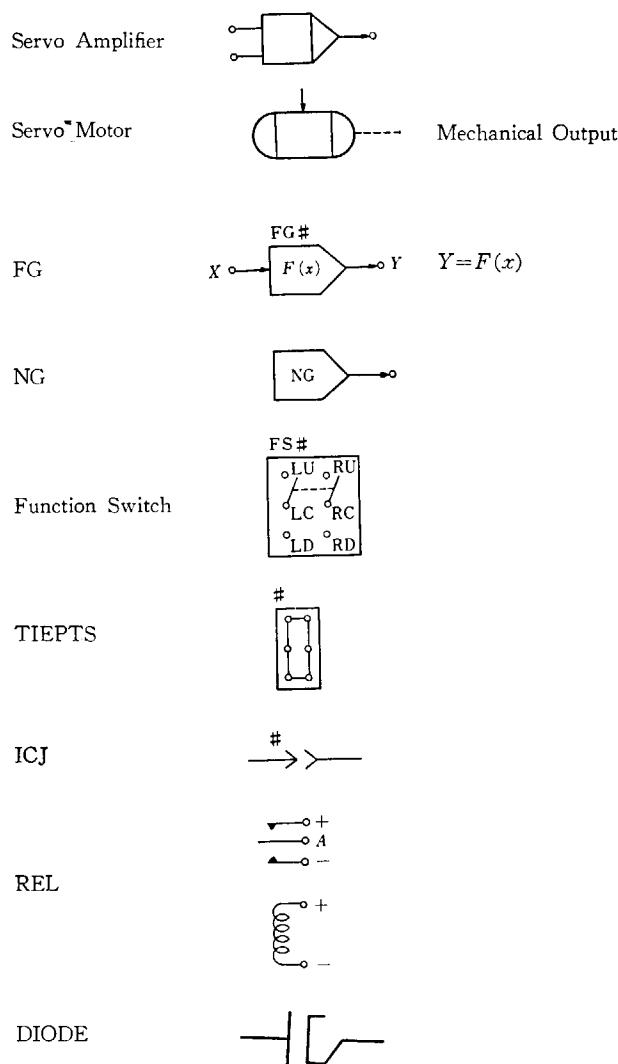
	x_1	x_2	x_3	x_4
数 値 解	-11.8	-0.617	-0.0414	-0.0104
アナログ計算機による解	-11.8	-0.622	-0.0416	-0.0103

付録

A.1. 演算要素 の結線図用

記号表





A.2. 基本的演算回路例

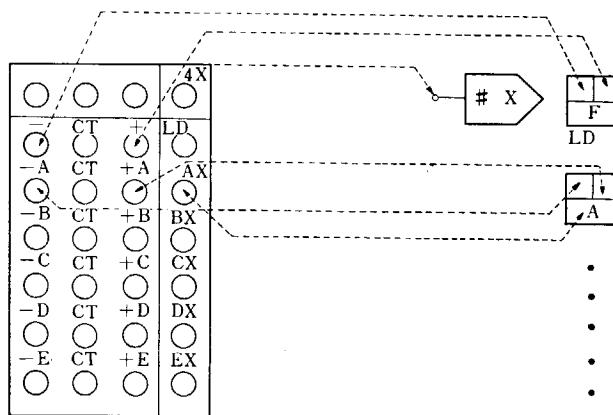
通常の演算にしばしば用いられる基本的な演算回路の実例を示す。すべて一応原理図を示したが、特に複雑なものについてはパッチング（P-PANEL 上でパッチコードによって接続すること）を示した。

A.2.1. S-MULTIによる掛算、割算

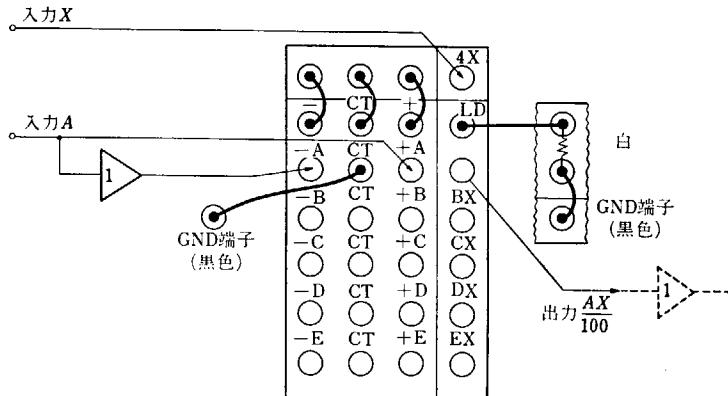
次に S-MULTI を記号（A.1. 参照）によってかくため、記号と P-PANEL との関係を第 A.2.1 図に示す（構造との関係は第 3.10 図参照）。

A.2.1.1. S-MULTIによる掛算

原理は 3.5 に説明したので、第 A.2.2 図に具体的なパッチングを示す。これは X および A は正負いざれでもよいが、 X の使用範囲が正か負の一方に限られる場合は第 A.2.3 図のようにポテンシオメータの - または + 端子を接地して用いたほうが精度が高くなる。また S-MULTI の出力は POT につないではならない。



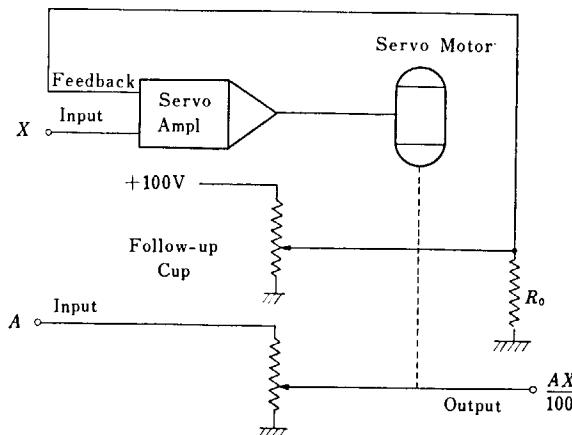
第 A.2.1 図 S-MULTI の記号と P-PANEL との関係



S-MULTI の出力を AMPL の 1 入力につないだ場合には、LD に 1 M Ω つなぐ。この図はそれを示している。

第 A.2.2 図 S-MULTI による掛算のパッチング

(第 3.9 図, 第 3.10 図参照)

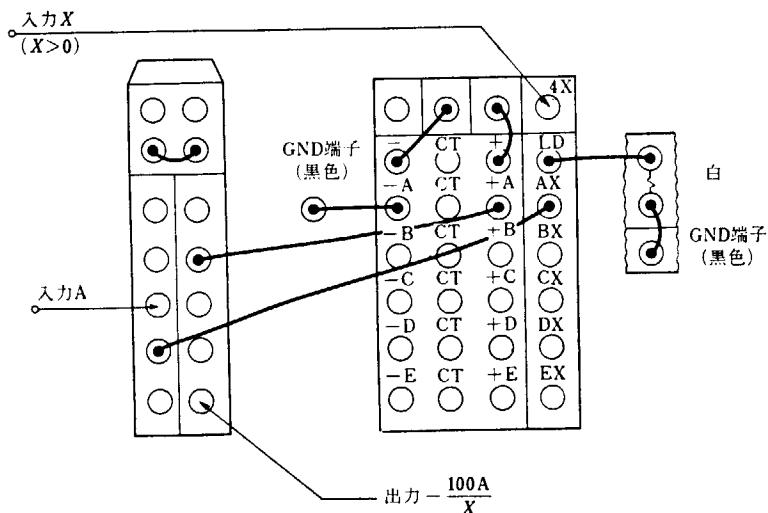


第 A.2.3 図 S-MULTI の原理図 ($X \geq 0$ の場合)

(第 3.9 図, 第 3.10 図参照)

A.2.1.2. S-MUL-TIによる割算

原理は第 3.11 図に説明したので、ここではそれに対応するパッティングを示す。ここで X は 0 または負にならないように注意し、また $X < A$ にならないように用いなければならない。



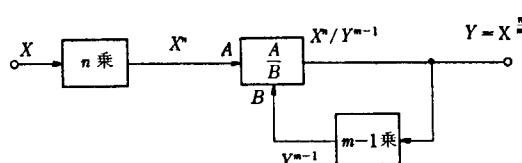
第 A.2.4 図 S-MULTI による割算のパッティング
(第 3.11 図参照)

A.2.2. $X^{n/m}$ の作り方(II)

A.2.2.1. 原理

m, n を整数とすると一般に $X^{n/m}$ を作ることができる。

$Y = X^{n/m}$ とすれば、 $Y = X^n / Y^{m-1}$ となる。この計算の原理図を第 A.2.5 図に示す。



第 A.2.5 図 $X^{n/m}$ を作る原理図

A.2.2.2. 実例 ($\sqrt{X}, X^{2/3}$)

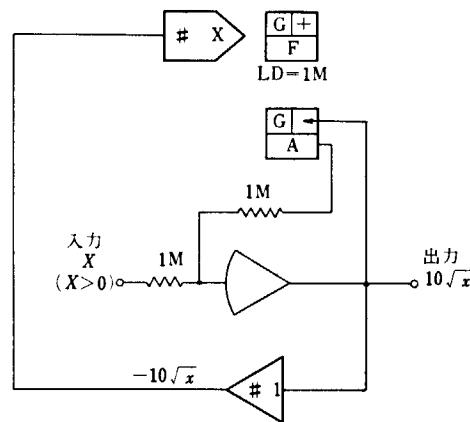
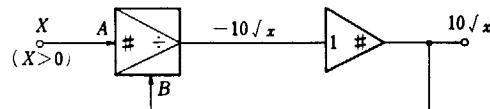
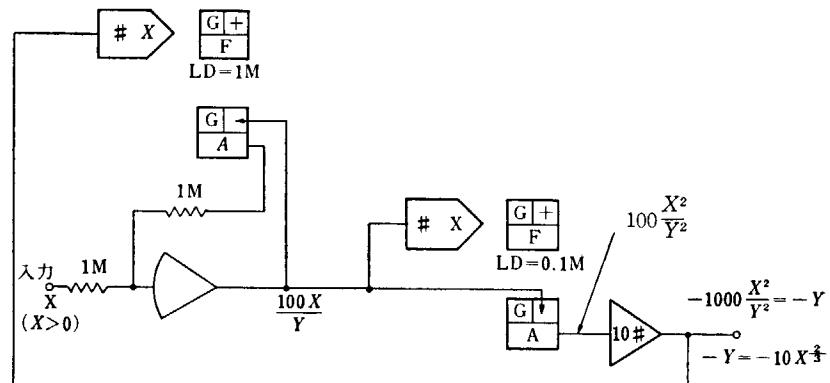
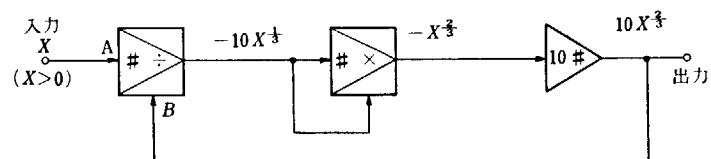
以上の原理により第 A.2.6, A.2.7 図に S-MULTI, E-MULTI により \sqrt{X} を作る結線図を示す。

第 A.2.8, A.2.9 図に S-MULTI, E-MULTI による $X^{2/3}$ の結線図を示す。

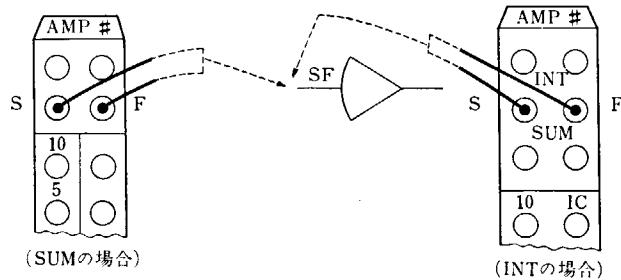
A.2.3. DIODE による非線形関数 [6]

DIODE と高利得直流増幅器（演算増幅器を SF 接続したもの）とを組み合わせて、各種の非線形関数を作ることができる。次節でのべる REL を用いる方法よりもかんたんで周波数特性もよいが、場合によっては DIODE の内部抵抗による誤差を無視できないことがある。以下の図において、高利得直流増幅器の入力端子に記してある SF なる記号は第 A.2.10 図のように演算増幅器のプラグを取りはずして S と F とを接続したことを意味する (A.3 参照)。

DIODE と組み合わせて使用する POT は BOTTOM の接地しない No. 29~32,

第 A.2.6 図 S-MULTI によって \sqrt{X} を作る結線図第 A.2.7 図 E-MULTI によって \sqrt{X} を作る結線図第 A.2.8 図 S-MULTI によって $\sqrt[X^2]{Y}$ を作る結線図第 A.2.9 図 E-MULTI によって $X^{2/3}$ を作る結線図

を用いなければならない。



第 A. 2.10 図 SF 接続パッチング

A. 2.3.1. DIODE による Simple Limiting

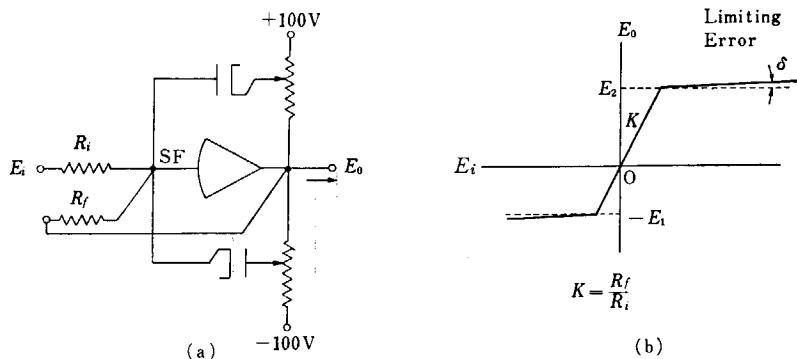
結線を第 A. 2.11 図に示す。 E_0 は $-E_1$ と E_2 (E_1 と E_2 は正とする) の間の値にあるとき E_i に比例する、これをこえると図に示すように一定電圧となる。実際には DIODE の順抵抗 ρ_d および回路構成のために完全に一定とならず、ある傾斜をもつ。この傾斜を δ とすると

$$\tan \delta = \left\{ \frac{E}{100+E} \cdot \frac{R}{R_f} + \rho_d \left(1 + \frac{E}{100} \right) \right\} K$$

なる関係がある。ここに E は E_1 または E_2 , R は POT の抵抗 (0.03 M), $K=R_f/R_i$ である。 $R_f=1$ M, $R=0.03$ M とすれば、上式は

$$\tan \delta = \left\{ \frac{0.03E}{100+E} + \rho_d \left(1 + \frac{E}{100} \right) \right\} K$$

となる。ここで ρ_d は $M\Omega$ 単位であらわす。



第 A. 2.11 図 DIODE による Simple Limiting

この場合の具体的なパッチングを第 A. 2.12 図に示す。この場合 $K=1$ としてある。

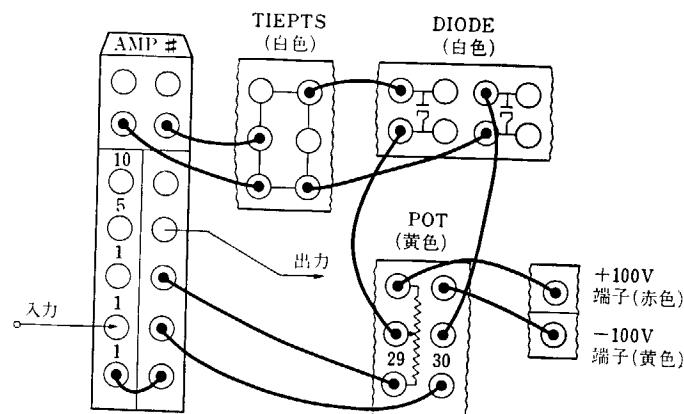
A. 2.3.2. DIODE による Soft Limiting

第 A. 2.13. 図に結線図を示す。 K_1 , K_2 の傾斜はそれぞれ、 R_1 , R_2 によってきめる。 R_1 , R_2 は次式によってえらべばよい。

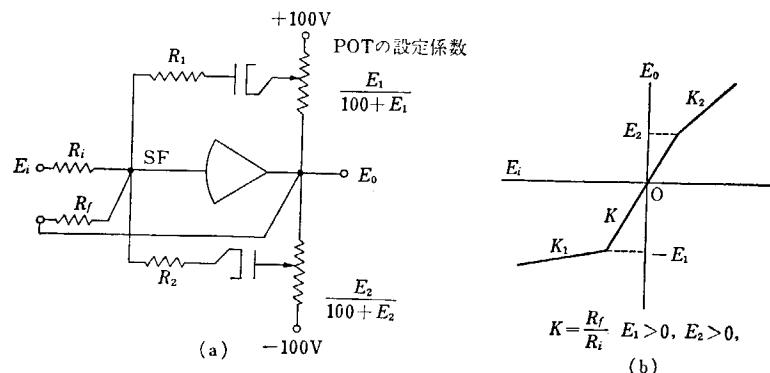
$$R_1 = \frac{K_1}{K - K_1} \cdot R_f$$

$$R_2 = \frac{K_2}{K - K_2} \cdot R_f$$

(E_1 , E_2 は 100 V に比して十分小さいとする。)

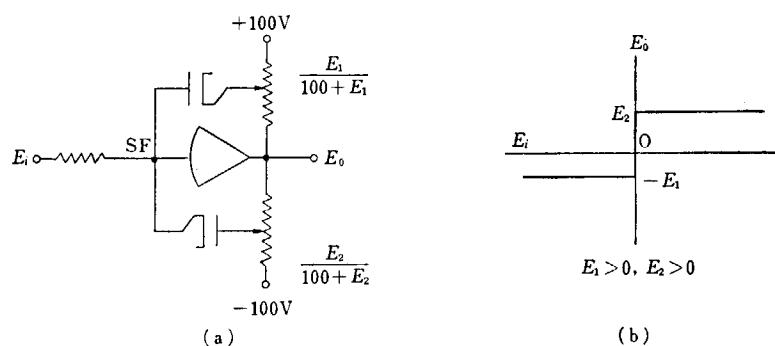


第 A.2.12 図 DIODE による Simple Limiting のパッチング



第 A.2.13 図 DIODE による Soft Limiting

A.2.3.3. On-Off



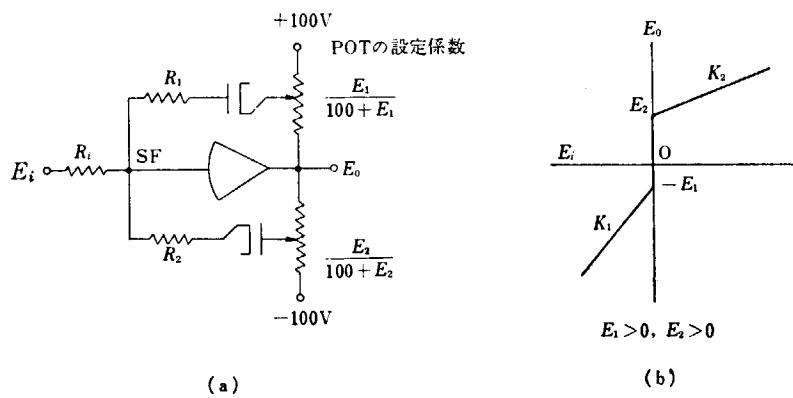
第 A.2.14 図 DIODE による On-Off

A.2.3.4. DIODE

による Zero Jump

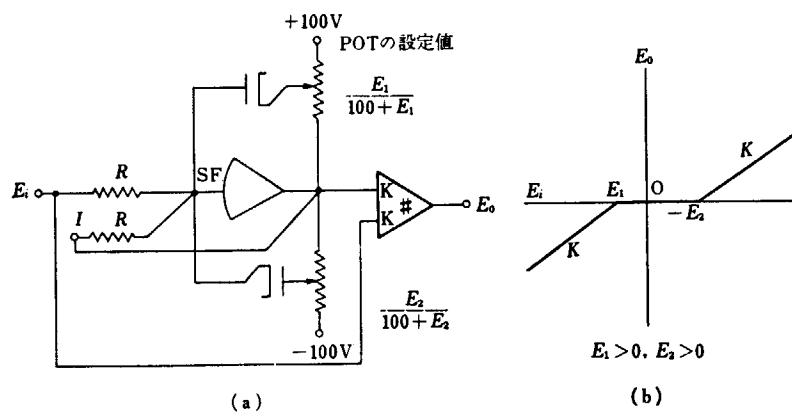
$$R_1 = K_1 R_i$$

$$R_2 = K_2 R_i \quad (E_1, E_2 \text{ は } 100 \text{ Volt に比して十分小さいとする。})$$



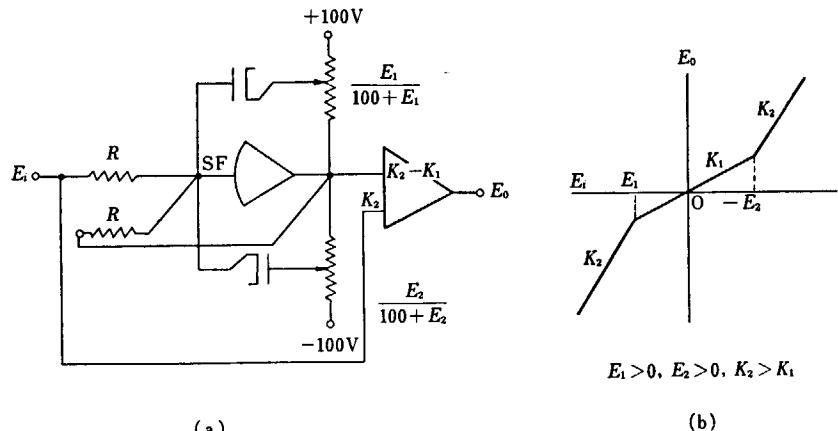
第 A.2.15 図 DIODE による Zero Jump

A.2.3.5 DIODE

による Dead
Zone

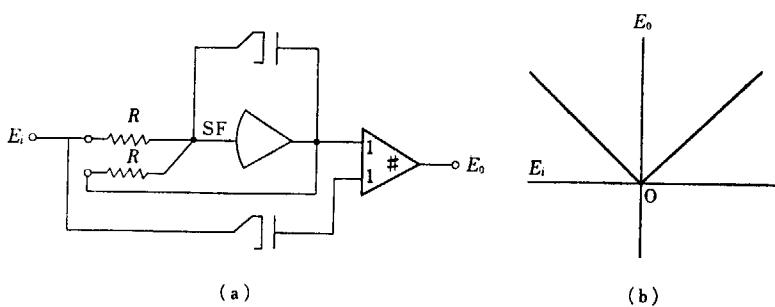
第 A.2.16 図 DIODE による Dead Zone

A.2.3.6 DIODE

による Zero
Gain Suppres-
sion

第 A.2.17 図 DIODE による Zero Gain Suppression

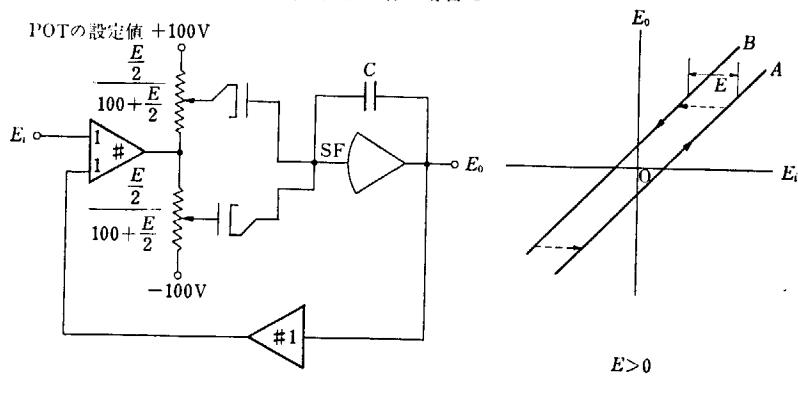
A. 2.3.7 DIODE
による Absolute
Value



第 A. 2.18 図 DIODE による Absolute Value

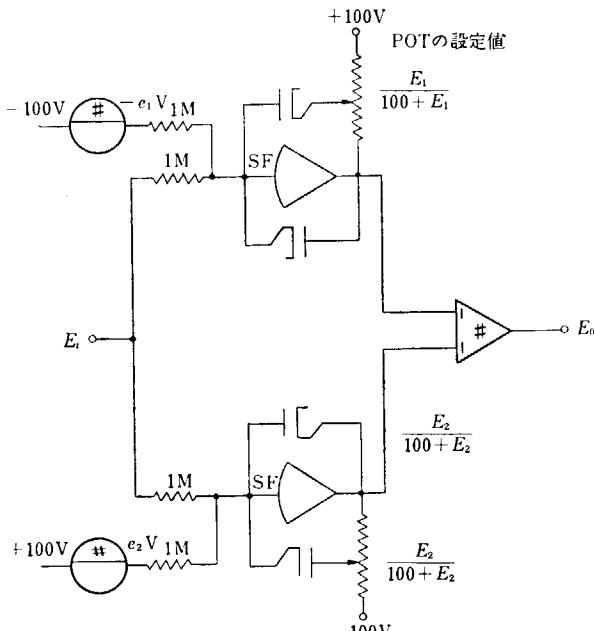
A. 2.3.8 DIODE
による Backlash

第 A. 2.19 図 (b) に示すように、 E_i の増加しているときは直線 A に沿い、減少しているときは直線 B に沿って動き、増加から減少、減少から増加にうつるとき、それぞれ A から B へ、B から A へ、水平に動く場合を Backlash という。

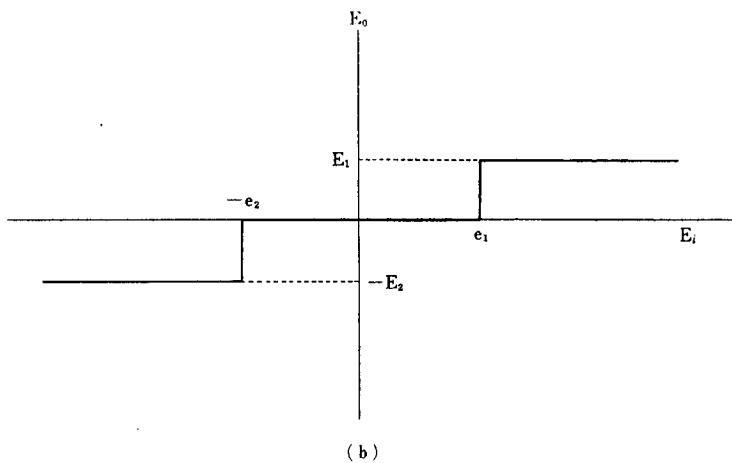


第 A. 2.19 図 DIODE による Backlash

A. 2.3.9 DIODE
による Three-
Position Action



(a) (E_1, E_2, e_1, e_2 はすべて正)

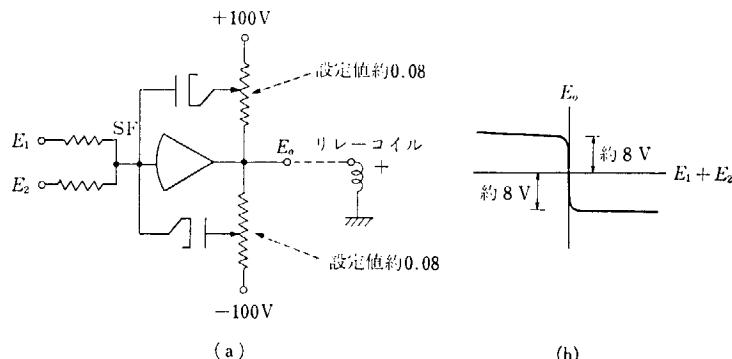


第 A.2.20 図 DIODE による Three-Position Action

A.2.4 REL による非線形関数 (10)

DIODE による非線形関数の回路は前節にのべたように DIODE の内部抵抗のために Limiting の際精度のうえにやや難点があるが、これらの点は REL を用いることにより解決される。次に前節と同じ非線形関数を REL によって作る結線図を示す。

REL をドライブするために 3.11 にのべたようにリレードライバを必要とする。リレードライバの構成および特性を第 A.2.21 図に示す。

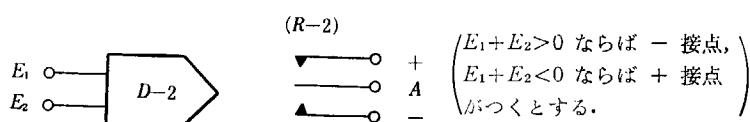


第 A.2.21 図 リレー・ドライバの構成 (a) とその出力波形 (b)

A.2.3 の DIODE によるものと対応をつけるため同じ順序にならべた。

リレー・ドライバを第 A.2.21 図のように詳細な記号で書くのはわずらわしいから、リレー・ドライバとの REL 接点と組み合せたものを第 A.3.22 図のような記号で示すこととする。

二つ以上のリレー・ドライバと REL を用いる場合は同じ番号によりその対応を示す。

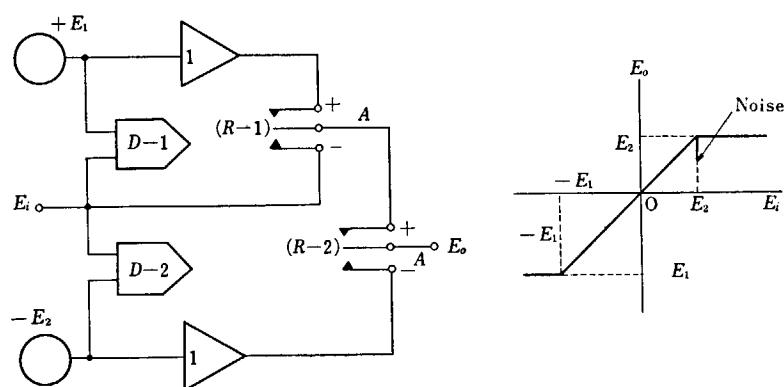


第 A.2.22 図 リレー・ドライバと REL の接点の記号

第 A.2.23 図 (b) に示すように、接点切替の短い時間出力が 0 にもどるため、鋭い波形が出る。これは REL を用いる回路では避けられない。

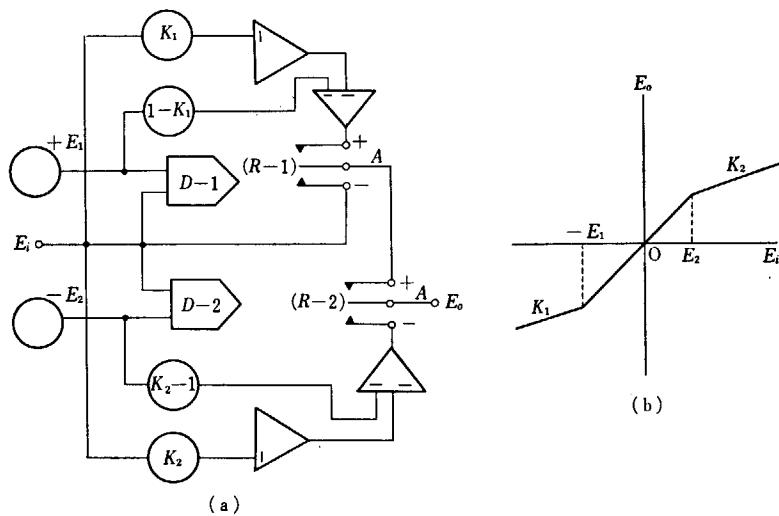
リレー・ドラバの入力はなるべく AMPL からとて POT からとらないほうがよい。入力を POT からとるとときは、REL が ON の場合と OFF の場合とで負荷効果が異なるから、REL が ON の状態のときに POT を設定するのがよい。

A. 2.4.1 Simple Limiting



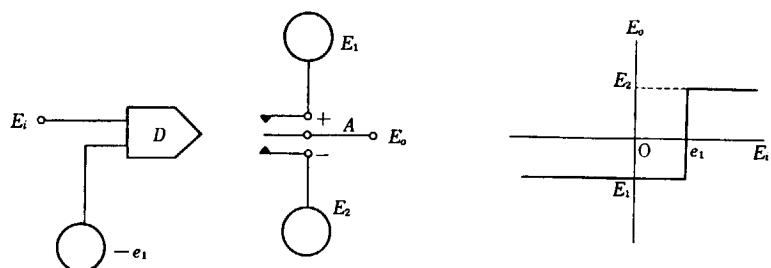
第 A.2.23 図 REL による Simple Limiting

A. 2.4.2 Soft Limiting



第 A.2.24 図 REL による Soft Limiting

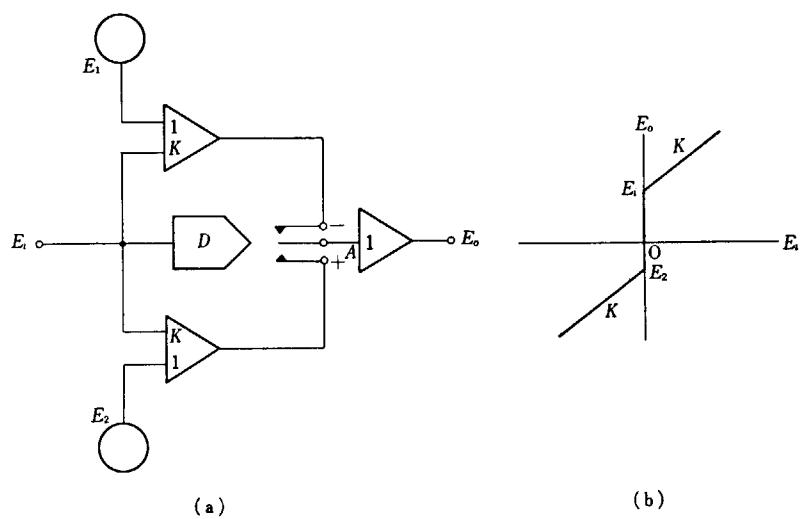
A. 2.4.3 ON-OFF



(a) 第 A.2.25 図 REL による ON-OFF (b)

A. 2. 4. 4 Zero

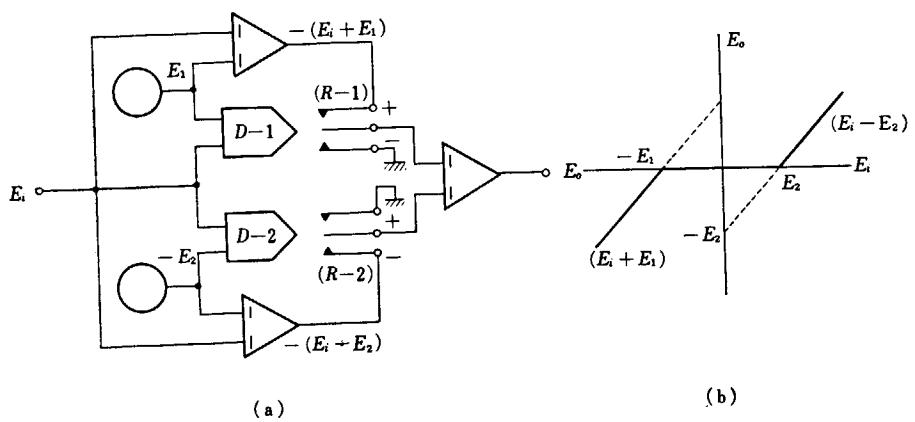
Jump



第 A. 2. 26 図 REL による Zero Jump

A. 2. 4. 5 Dead

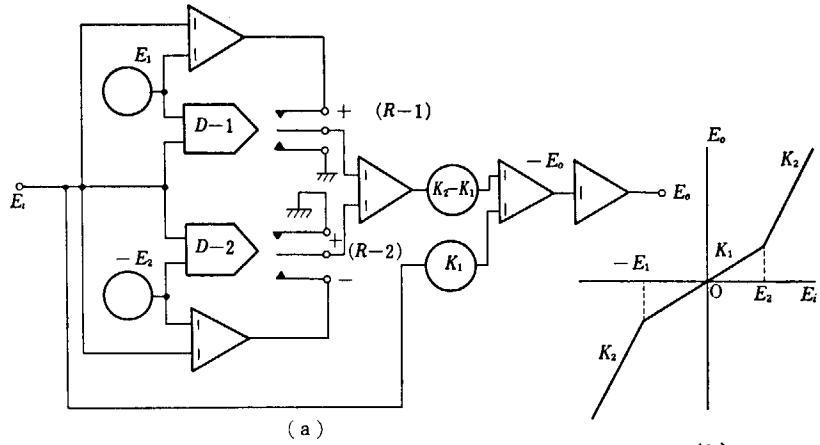
Zone



第 A. 2. 27 図 REL による Dead Zone

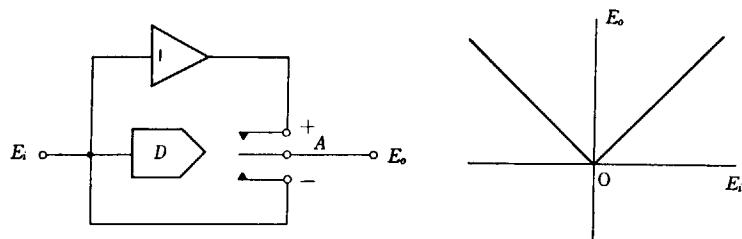
A. 2. 4. 6 Zero

Gain Suppres-sion

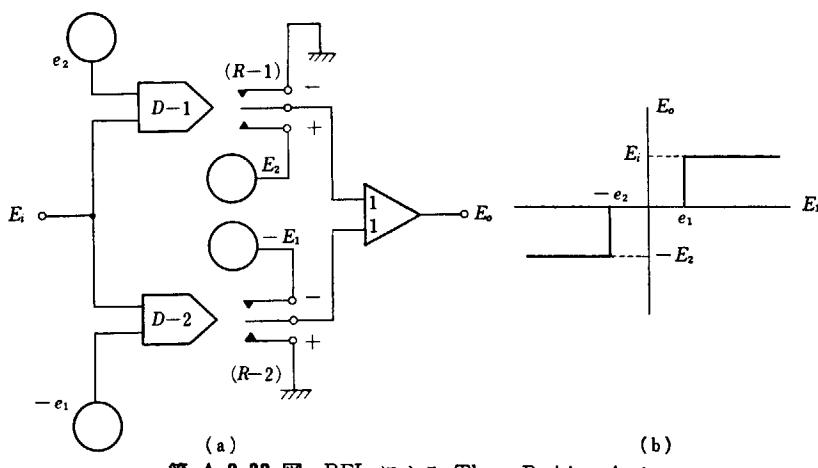


第 A. 2. 28 図 REL による Zero Gain Suppression

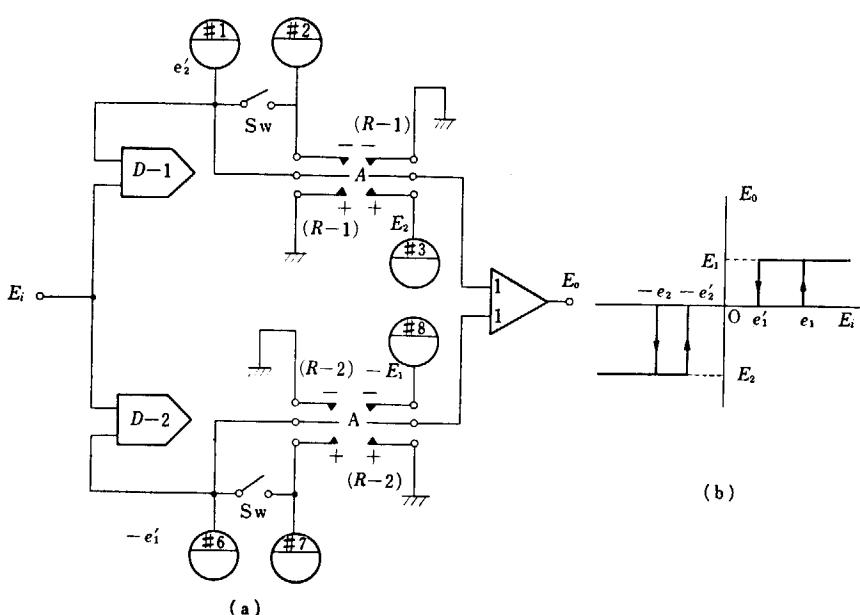
A. 2.4.7 Absolute Value

(a)
第 A. 2.29 図 REL による Absolute Value

A. 2.4.8 Three-Position Action

(a)
第 A. 2.30 図 REL による Three-Position Action

A. 2.4.9 Three-Position Action with Hysteresis



S_w は POT # 2, POT # 7 の設定用である。最初 S_w を OFF にして POT # 1, POT # 6 をそれぞれ e_2' , $-e_1'$ に設定し、次に S_w を ON にして POT # 2, POT # 7 の電圧がそれぞれ e_2 , $-e_1$ になるように設定する。使用状態では S_w は OFF とする。

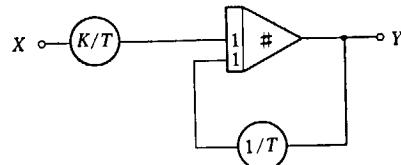
第 A. 2.31 図 REL による Three-Position Action with Hysteresis

A.2.5 基本的伝達**関数**

自動制御原子炉動特性解析などでよく現われる一次おくれおよび不完全微分の伝達関数の結線図を示す。

A.2.5.1 一次おくれ伝達関数

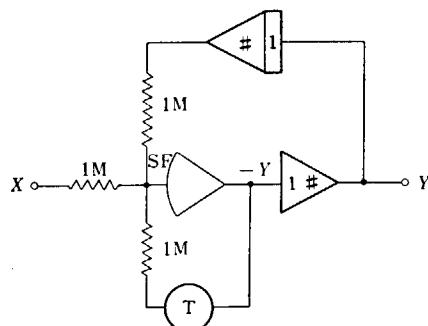
$$-\frac{K}{1+Ts}$$



第 A.2.32 図 $\frac{Y}{X} = -\frac{K}{1+Ts}$
(a)

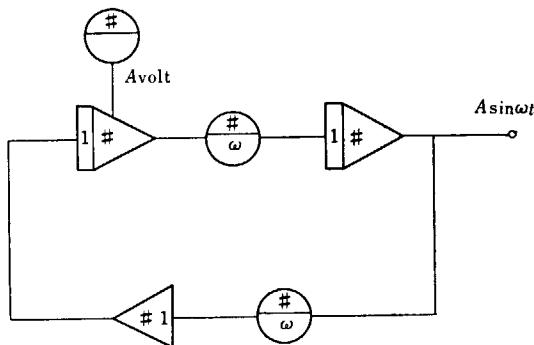
A.2.5.2 不完全微分伝達関数

$$\frac{s}{1+Ts}$$

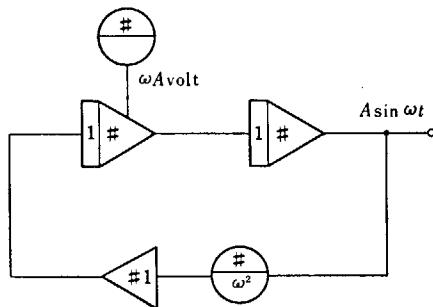


第 A.2.33 図 $\frac{Y}{X} = \frac{s}{1+Ts}$

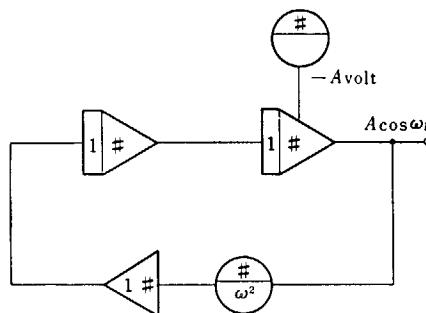
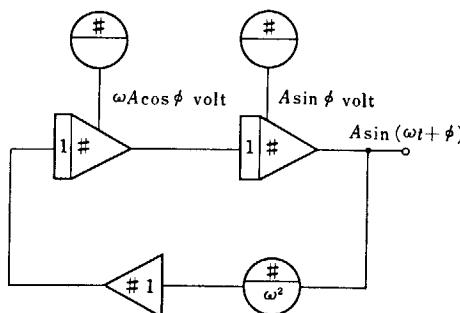
第 A.2.33 図に使用する AMPL は特に雑音レベルの低いものを使用する必要がある。

A.2.6 時間関数の発生 [II]**A.2.6.1 $A \sin \omega t$, $A \cos \omega t$, $A \sin(\omega t + \phi)$ の発生**

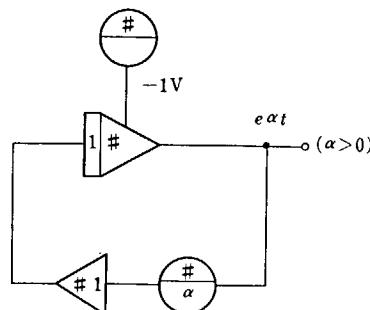
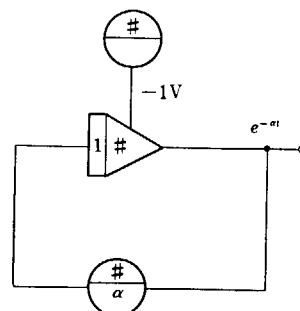
第 A.2.34 図 $A \sin \omega t$ の発生 (1)



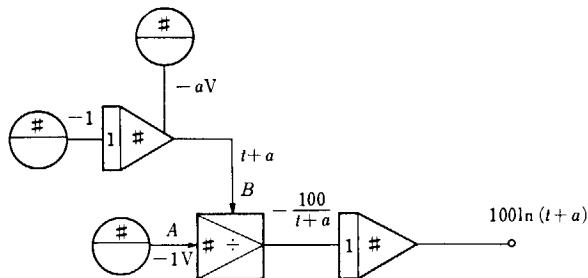
第 A.2.35 図 $A \sin \omega t$ の発生 (2)

第 A.2.36 図 $A \cos \omega t$ の発生第 A.2.37 図 $A \sin(\omega t + \phi)$ の発生

A.2.6.2 $e^{\pm \alpha t}$ の発生

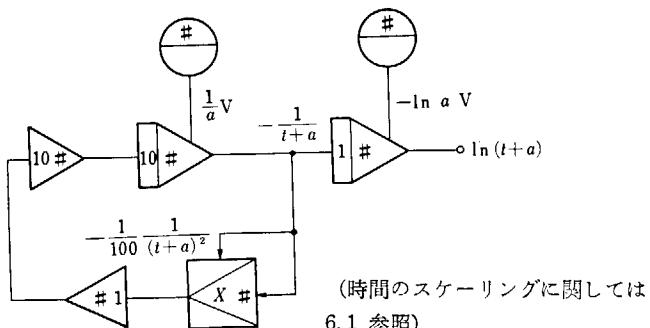
第 A.2.38 図 $e^{\alpha t}$ ($\alpha > 0$)第 A.2.39 図 $e^{-\alpha t}$ ($\alpha > 0$)

A. 2.6.3 $\ln(t+a)$
の発生



(時間のスケーリングに関して 6.1 参照)

第 A. 2.40 図 $\ln(t+a)$ の発生 ($a > 1$)



(時間のスケーリングに関しては
6.1 参照)

第 A. 2.41 図 $\ln(t+a)$ の発生 ($a < 1$ のとき)

A. 2.6.4 $(t+a)^{n/m}$

の発生

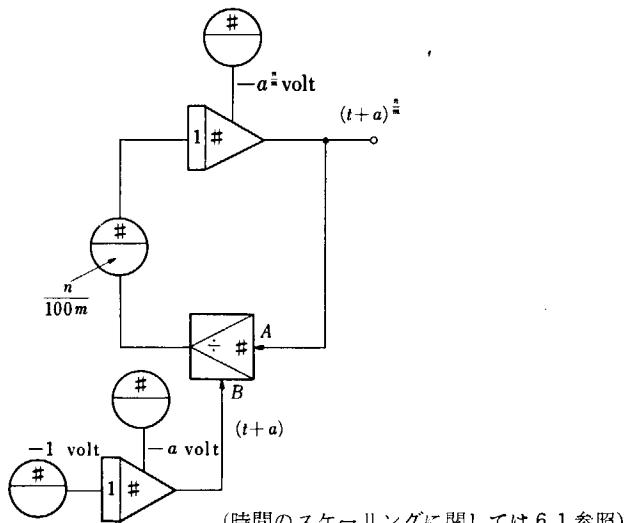
(1) A. 2.2 の原理による方法

A. 2.2 に示したとまったく同じ方法で作れる。 X を t とすればよい。

ただし、 m, n は正数の場合のみ使用できる。

(2) INT を用いる方法

時間関数であるから INT を用いて第 A. 2.42 図に示すようにできる。

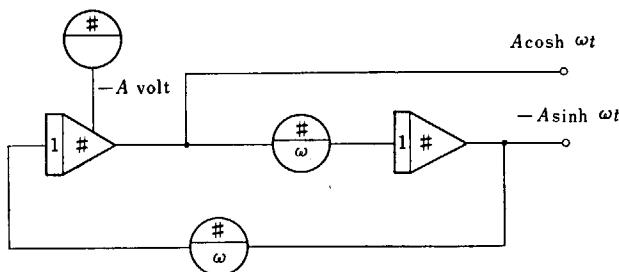


(時間のスケーリングに関しては 6.1 参照)

第 A. 2.42 図 $(t+a)^{n/m}$ の発生

A. 2.6.5 $A \sinh \omega t$,

$A \cosh \omega t$ の発生



(時間のスケーリングに関しては 6.1 参照)

第 A. 2.43 図 $A \sinh \omega t$, $A \cosh \omega t$ の発生

A. 2.6.6 関数発生

に関する一般的

注意

この章では時間関数についてのみ扱うが、一般に時間関数 $f(t)$ を作ることが可能なれば、時間以外の変数 x の同じ形の関数 $f(x)$ を作ることも可能である。

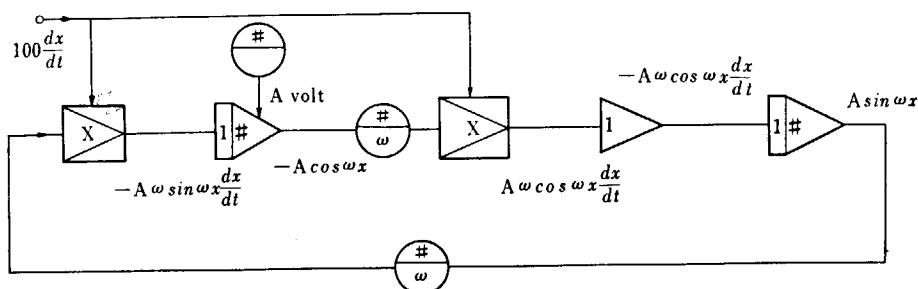
A. 2.6 でのべた時間関数 $f(t)$ の発生は、 $f(t)$ を満足する常微分方程式を積分して、求められた。たとえば $f(t) = \sin \omega t$ は次の方程式、

$$\frac{d^2 f(t)}{dt^2} + \omega^2 f(t) = 0$$

を第 A. 2.34 図の結線で、積分器 2 台を用いて積分して求めた。この場合積分を t についておこなわず、変数 x について積分できれば x に関する変数 $f(x)$ が得られる。アナログ計算機の INT は t についての積分しかできないが、次のような原理で一般に変数 x についての積分もおこなうことができる。

$$\int g dx = \int g \cdot \frac{dx}{dt} \cdot dt$$

第 A. 2.43 図の場合について、 $A \sin \omega t$ のかわりに $A \sin \omega x$ を得ようとすれば、次の第 A. 2.43' 図のようにすればよい。



第 A. 2.43' 図 $A \sin \omega x$ の発生

A. 2.7 Pade' の近似式による時間

おくれ伝達関数

e^{-Ts} [2], [4]

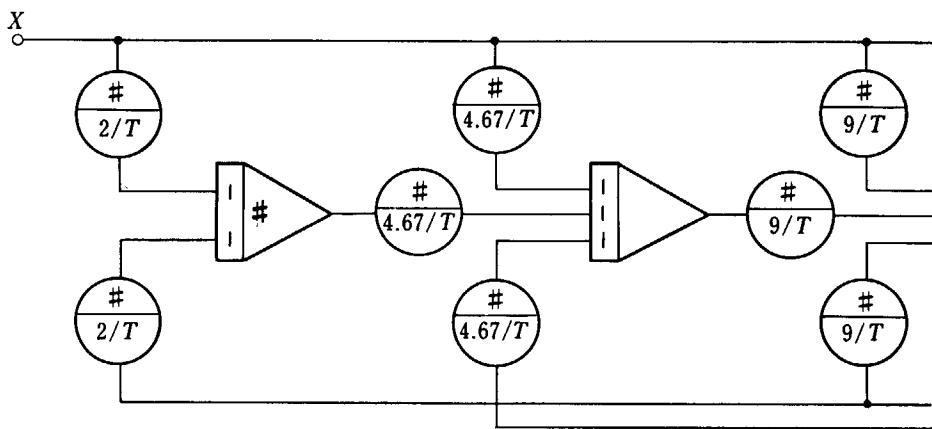
純粹の時間おくれ伝達関数は e^{-Ts} であらわされる。これを完全にアナログ計算機で作ることは不可能であるが、ある種の近似式を用いればかなりの精度で実現できる。

よく用いられる近似式は Pade' の近似式とよばれるものである。

一例として 4 次までとった Pade' の近似式を次に示す。

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = e^{-Ts} \approx \frac{T^4 s^4 - 20T^3 s^3 + 180T^2 s^2 - 840Ts + 1680}{T^4 s^4 + 20T^3 s^3 + 180T^2 s^2 + 840Ts + 1680}$$

これを Machine Equation の形でかくと



$$\frac{Y}{X} = \frac{T^4 s^4 - 20T^3 s^3 + 180T^2 s^2 - 840Ts + 1680}{T^4 s^4 + 20T^3 s^3 + 180T^2 s^2 + 840Ts + 1680} = e^{-Ts}$$

第 A. 2.44 図 Pade' の近似式 (4 次)

$$Y(s) = X(s) - \frac{20}{TS} [X(s) + Y(s) - \frac{9}{TS} [X(s) - Y(s) - \frac{4.67}{Ts} [X(s) + Y(s) \\ - \frac{2}{TS} (X(s) - Y(s))]]]$$

これを結線図にすると第 A. 2.44 図のようになる。

この方法は高い周波数になるほど近似が悪くなるが、近似度はさらにおくれ時間 T によっても左右される。

実験の結果によると $\omega T \leq 7 \text{ rad}$ の範囲ならば実用上問題はない。ここに ω は使用周波数である。

参考のため e^x に関する Pade' の近似の一般式を次に示す。

$$e^x = \lim_{u+v \rightarrow \infty} \frac{F_{u,v}(x)}{G_{u,v}(x)}$$

ただし

$$F_{u,v}(x) = 1 + \frac{v}{(u+v)1!} x + \frac{v(v-1)}{(u+v)(u+v-1)2!} x^2 \\ + \dots + \frac{1}{(u+v)(u+v-1)\dots(u+1)} x^v$$

$$G_{u,v}(x) = 1 - \frac{u}{(v+u)1!} x + \frac{u(u-1)}{(v+u)(v+u-1)2!} x^2 \\ + \dots + \frac{1}{(v+u)(v+u-1)\dots(v+1)} x^u$$

この節に示した実例は $u=v=4$ までとったものである。

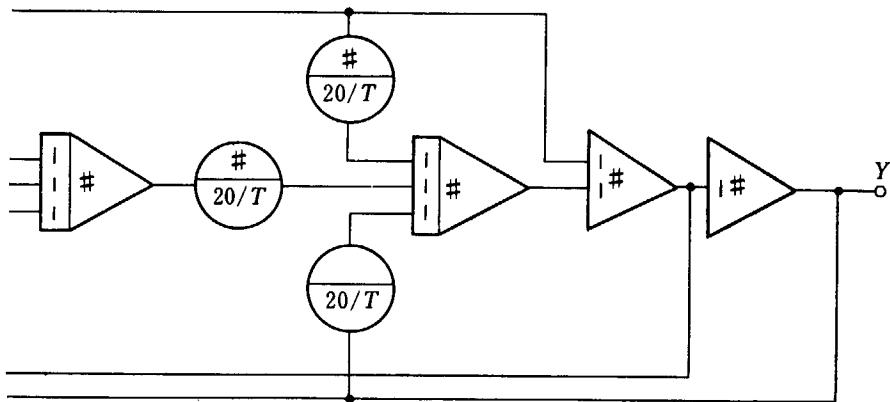
A. 2.8 原子炉シミュレータ [3]

原子炉の核的動特性をしらべたり、原子力動力プラントの中の核的な部分のシミュレーションに用いられる回路は原子炉シミュレータといわれる。

反応度 δk と出力 n との関係を示す原子炉の動特性方程式は次式であたえられる。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta k - \beta}{\ell} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (2.8.1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\lambda_i}{\ell} n - \lambda_i C_i, \quad i=1, 2, \dots, 6 \quad (2.8.2)$$



$$\beta = \sum_1^6 \beta_i, \quad \beta_i, \lambda_i \text{ は定数}$$

A. 2.8.1 遅発中性子 1 組の場合 (2.8.2) 式はかなり複雑なため 6 コの C_i を 1 コで代表させる近似がしばしば用いられる。

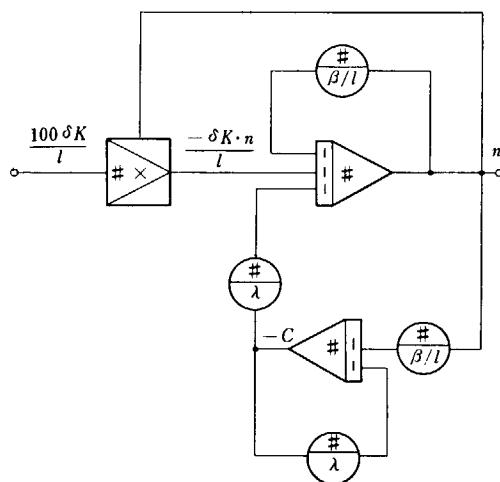
すなわち,

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta k - \beta}{\ell} n + \lambda C \quad (2.8.3)$$

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\beta}{\ell} n - \lambda C \quad (2.8.4)$$

ここで $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$, $\lambda_i = \beta_i / \sum_{i=1}^6 \lambda_i$

この場合の結線図を第 A. 2.45 図に示す。



第 A. 2.45 図 原子炉シミュレータ（遅発中性子 1 組）

A.2.8.2 遅発中性子 6 組の場合

(2.8.2) 式の 6 コの C_i を全部考慮した結線図の一例を第 A.2.45 図に示す。ここでは、遅発中性子の次の値を用い中性子寿命 ℓ は $\ell=10^{-3} \text{ sec}$ としてある。次に結線図に

i	λ_i	β_i	
1	14.0 sec^{-1}	2.5×10^{-4}	
2	1.61	8.4 "	
3	0.456	24 "	$\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i = 0.00755$
4	0.151	21 "	
5	0.0315	17 "	
6	0.0124	2.6 "	

について説明する。

(2.8.1) 式、(2.8.2) 式において各変数の定常値からの偏差についての方程式を作る。 n_0 , C_{i0} をそれぞれ n , C_i の定常値として,

$$\begin{aligned} n &= n_0 + \delta n \\ C_i &= C_{i0} + \delta C_i \end{aligned}$$

とおくと,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta n}{n_0} \right) = 10^3 \delta k \left(1 + \frac{\delta n}{n_0} \right) - 7.55 \frac{\delta n}{n_0} + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot \frac{\delta C_i}{n_0} \quad (2.8.5)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta C_i}{n_0} \right) = 10^3 \beta_i \cdot \frac{\delta n}{n_0} - \lambda_i \frac{\delta C_i}{n_0} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (2.8.6)$$

次に $i=1$ のみ時定数が小さくなるので、この微分項を省略すると、

$$\lambda_1 \frac{\delta C_1}{n_0} = 0.25 \frac{\delta n}{n_0}$$

この式を (2.8.5) 式に入れて、 $\tau=0.1 t$ とすると、

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta n}{n_0} \right) = 10^4 \delta k \left(1 + \frac{\delta n}{n_0} \right) - 73 \frac{\delta n}{n_0} + \sum_{i=2}^6 10 \lambda_i \frac{\delta C_i}{n_0} \quad (2.8.7)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta C_i}{n_0} \right) = 10^4 \beta_i \frac{\delta n}{n_0} - 10 \lambda_i \frac{\delta C_i}{n_0} \quad (i=2, 3, \dots, 6) \quad (2.8.8)$$

ここで Scale Factor を次のようにえらび、Machine Variable を次のようにあらわす。

$$Y = 1 \times \frac{\delta n}{n_0}, \quad \Delta K = 400 \delta k$$

$$X_2 = 1 \times \frac{\delta C_2}{n_0}, \quad X_3 = 0.5 \frac{\delta C_3}{n_0}, \quad X_4 = 0.05 \frac{\delta C_4}{n_0}$$

$$X_5 = 0.05 \frac{\delta C_5}{n_0}, \quad X_6 = 0.2 \frac{\delta C_6}{n_0}$$

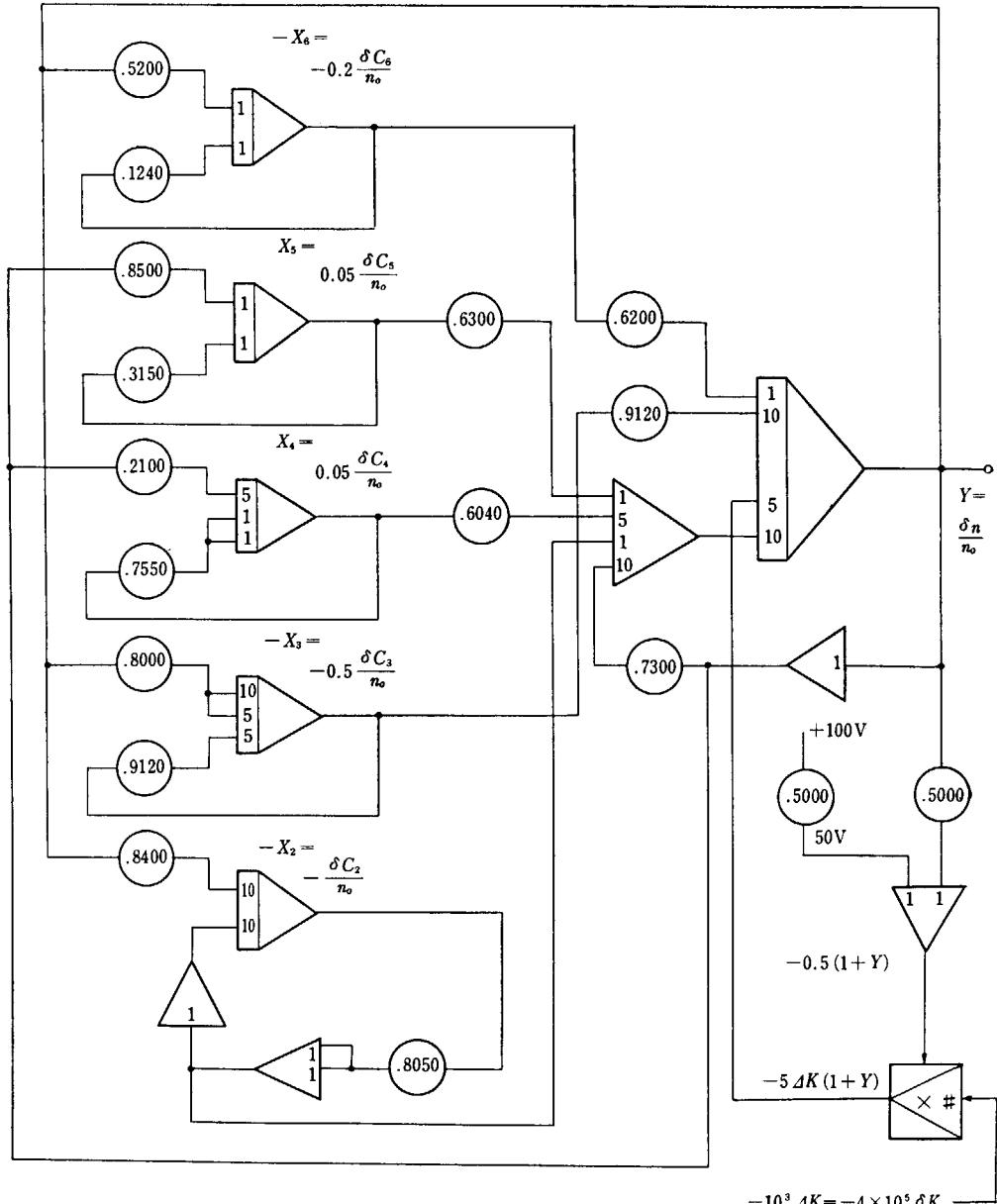
(2.8.7), (2.8.8) 式は

$$\frac{dY}{d\tau} = 25 \Delta K (1+Y) - 73 Y + 16.1 X_2 + 9.12 X_3 + 30.2 X_4 + 6.3 X_5 + 0.62 X_6 \quad (2.8.9)$$

$$\frac{dX_2}{d\tau} = 8.4 Y - 16.1 X_2$$

$$\frac{dX_3}{d\tau} = 12 Y - 4.56 X_3$$

$$\begin{aligned}\frac{dX_4}{d\tau} &= 1.05Y - 1.51X_4 \\ \frac{dX_5}{d\tau} &= 0.85Y - 0.315X_5 \\ \frac{dX_6}{d\tau} &= 0.52Y - 0.124X_6\end{aligned}\quad \left.\right\} (2, 8, 10)$$



第 A.2.46 図 原子炉シミュレータ（運発中性子 6 組）

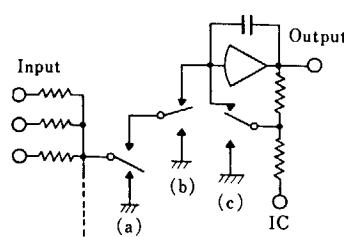
6コの C_i を考慮したシミュレータをこのような結線で作るとき、全部の C_i の効果を含めることはむずかしい。時定数が短いもの($i=1$ の0.07sec)から長いもの($i=6$ の81sec)まで非常に広い範囲にわたっているからである。比較的長い時間の現象を解析しようとなれば、上記のように時間軸をつめて時定数の短いものを省略する。逆に短時間の過渡現象をしらべる際には時間軸を伸ばして時定数の長い $i=5, 6$ あたりの効果を無視するのがよい。

A. 3. AMPL の入出力回路

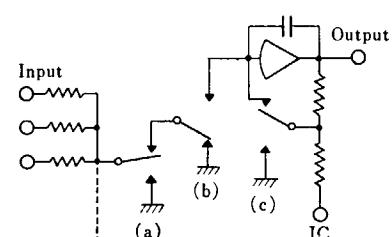
第3.3図、3.5図ではSUMおよびINTと入出力回路、リレーなどの関係を示さなかったが、ここではそれらの回路の詳細を示す。

第A.3.1図にPOTSET, RESET, HOLD, OPERATEの各状態でリレーの動作により回路接続の状態を示す。これらのリレーは計算機の内部に組まれて、COMPUTER

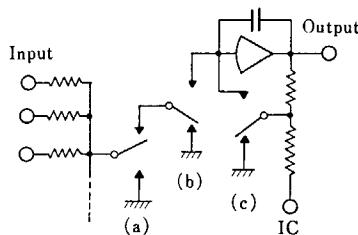
(1) POTSET



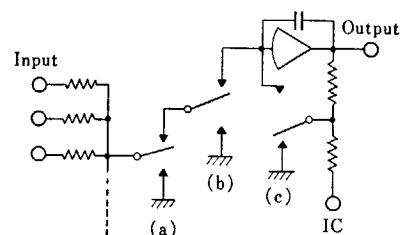
(2) RESET



(3) HOLD

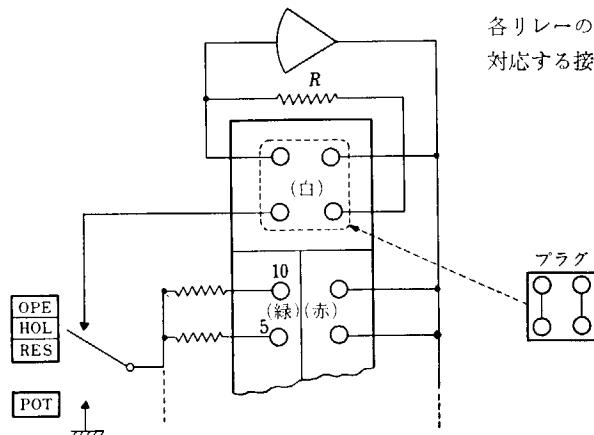


(4) OPERATE



リレー(a), (b), (c)は、第A.3.3図のPOTSET RELAY, HOLD RELAY, RESET RELAYにそれぞれ対応する。

第A.3.1図 INT の OPERATION MODE とリレーとの関係



各リレーの文字はOperation Modeに対応する接点の位置を示す。

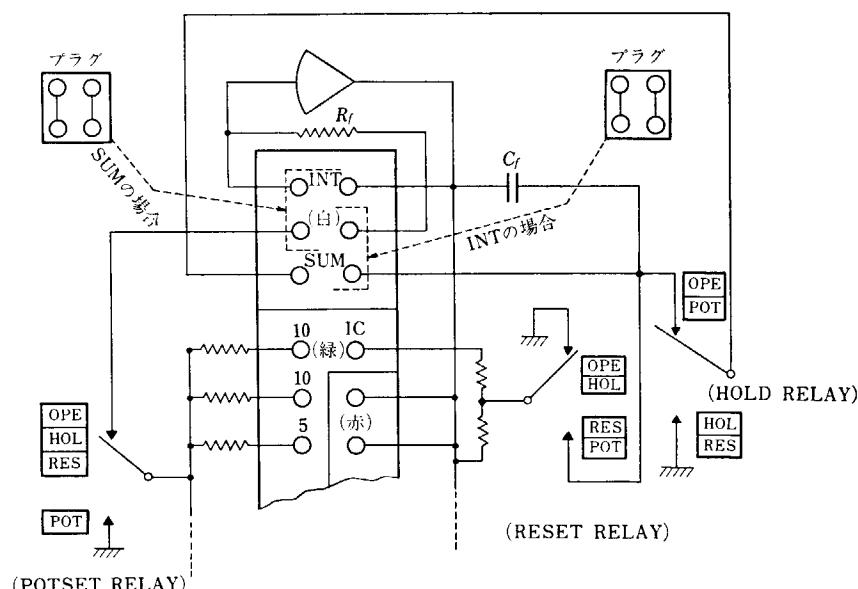
OPE	OPERATE
HOL	HOLD
RES	RESET
POT	POTSET

第A.3.2図 SUM の入出力回路

CONTROL SW により各 MODE に応じて自動的に開閉する。

SUM のこれに対応する図はかんたんであるから示さない。

第 A.3.2 図, A.3.3 図に SUM, INT の回路およびリレーの詳細を示す。



第 A.3.3 図 INT の入出力回路

参考のため各 MODE における SUM と INT の出力の状態を示す。

UNIT MODE	SUM	INT
POTSET	出力 0	IC 端子に接続しないと出力 0 IC に POT をつなぐと、POT の出力電圧が AMP の出力に出る (符号は逆)
RESET	入力電圧の和が出力に出る (符号は逆)	同 上
HOLD	同 上	RESET から HOLD になると初期値、OPERATE から HOLD になると演算最終値が出力に出る。

第 A.3.2 図, A.3.3 図のリレーの各文字は次に示すような OPERATION MODE に対応する接点の位置を示す。

POT.....POTSET

RES.....RESET

HOL.....HOLD

OPE.....OPERATE

A.4. 出力選択

装置 (SIGNAL SELECTOR)

この装置は計算機内の任意の点の電圧を読むため、DVM または VTVM を所定の位置に接続する装置である。

第 5.1 図のメータの左右にある “DVM” スイッチ “VTVM” ボタンおよび同図の左

側に 3 列にならんだ “SIGNAL SELECTOR” ボタンによっておこなう。

測定点として SIGNAL SELECTOR で呼出した電圧を読む場合、外部信号電圧を P-PANEL を通して読む場合、POT # 21～# 80 電圧を読む場合、およびそのおののの場合に対して DVM と VTVM のいずれで読むかの二通りがあり、合計六つの場合がある。

DVM と VTVM の使い分けは、DVM スイッチと VTVM ボタンの操作によっておこなう。その操作法を次表に示す。

測 定 点	測 定 装 置	
	VTVM	DVM
出力選択装置で選んだ電圧を読むとき	VTVM ボタンの “SIGSEL” C5 を押す	(1) VTVM ボタンの C6 “PATCH-PANEL”を押す (2) DVM スイッチ C7 を “SIGSEL” に倒す
POT # 21～# 80 を読むとき（ボテンショメータスイッチを左または右に倒す）	同 上	同 上
外部信号電圧をパッチパネルを通して読むとき	VTVM ボタンの “PATCH PANEL” C6 を押す	DVM スイッチ C7 を “PATCH” に倒す

SIGNAL SELECTOR の呼出コードを次に示す。第 5.1 図の左の 3 列の押ボタンのコードである。

出力選択装置 (SIGNAL SELECTOR) の呼出コード

演 算 要 素 名	選択し うる台 数	ボ タ ン 記 号			備 考
		1 列 目	2 列 目	3 列 目	
POT	20	POTS	0～2	0～9	# 20 は [POTS-O-O]
AMPL	60	AMPL	0～5	0～9	# 60 は [AMPL-O-O]
S-MULTI	10	MULT	0～9	F, A, B, C, D, E	# 10 は [MULTI-O-O]
E-MULTI	5	MULT	1～5	AB, AC	
RSLVR	4	RSLVR	1～4	SN1, CS1, SN2, CS2, F, A, B, C	
FG	6	FUNCT GEN	1～6	FG	
DIODE	8	DIODES	1～8	DIODES	
TIEPTS	10	TIE PTS	0～9	TIEPTS	# 10 は [-O-]
REL	4	REL	1～4	REL	

(注意) POT # 21～# 80 は SIGNAL SELECTOR では呼び出せない。POT のダイヤルの下にある Sw を右または左に倒すと他の呼出し優先して、DVM または VTVM に指示される (3.4 参照)。

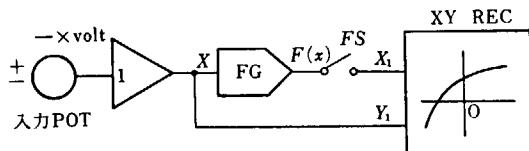
[例]

(1) AMPL # 18 の出力を読むとき : AMPL 1 8

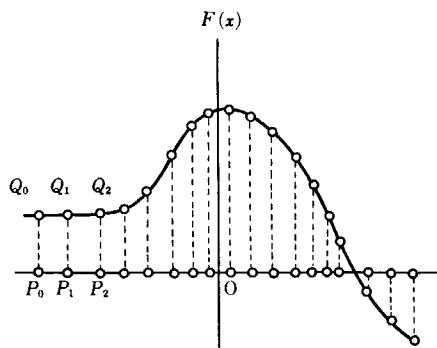
(2) S-MULTI # 4 の BX の出力を読むとき : MULT 4 B

A. 5. FG の設定法

FG の設定には第 A. 5.1 図に示す回路を作り、次に述べる順序で設定する（他に FG の CONTROL PANEL を利用する方法、DVM を用いる方法などがあるが、ここに述べる方法がもっとも簡単である）。

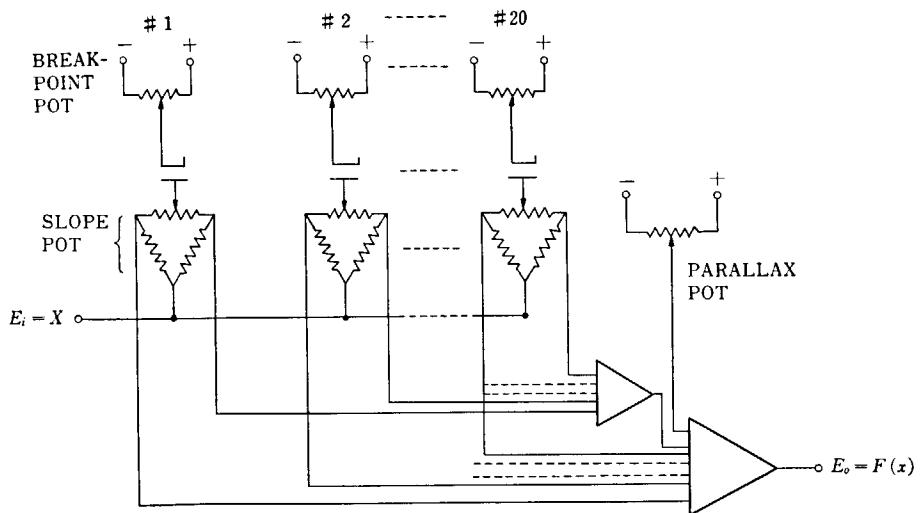


第 A. 5.1 図 FG 設定のための結線図



第 A. 5.2 図 設定すべき関数波形

- (1) 設定すべき関数を XYREC の記録紙に書き、おののの設定点 ($Q_0, Q_1, Q_2 \dots$ ただし 20 区間以内) をきめる。曲率の大きいところはこまかく、小さいところはあらく区分する（例えば第 A. 5.2 図）。
- (2) FG の BREAKPOT および SLOPEPOT はすべて左まわし一杯にしておく。
- (3) XYREC の入力をそれぞれ 0 Volt にして（コンソールの COMPUTER CONTROL Sw を “POTSET” にし、FS を切る）ペンを原点に合わせる。
- (4) COMPUTER CONTROL Sw を “RESET” にし、入力 POT を回してペンが $P_0 Q_0$ またはその延長上にくるようにする。
- (5) FG の PARALLAX POT によりペンを Q_0 点まで移動する。
- (6) FG の BREAK POT #1 を、ペンが動きだすまで右にまわす。
(ペンを一度動かしてから、ほとんど元の位置に戻すくらいにしたほうがよい)。
- (7) 入力 POT により、ペンを $P_1 Q_1$ またはその延長上まで移動させる。
- (8) SLOPEPOT #1 によりペンを Q_1 点にさせる。
- (9) 以下(6), (7), (8)の操作を POT 番号を次にずらせて繰り返し、順次設定する。
(注意)
 - ① BREAKPOT の操作を慎重にする。
 - ② STEP のような急激な変化は設定できない。
 - ③ 入力の \oplus 側から \ominus 側へ向って設定することはできない。
 - ④ FG の GAIN Sw は曲線の勾配に応じて操作するが、ふつう “4” にしておくのがよい。



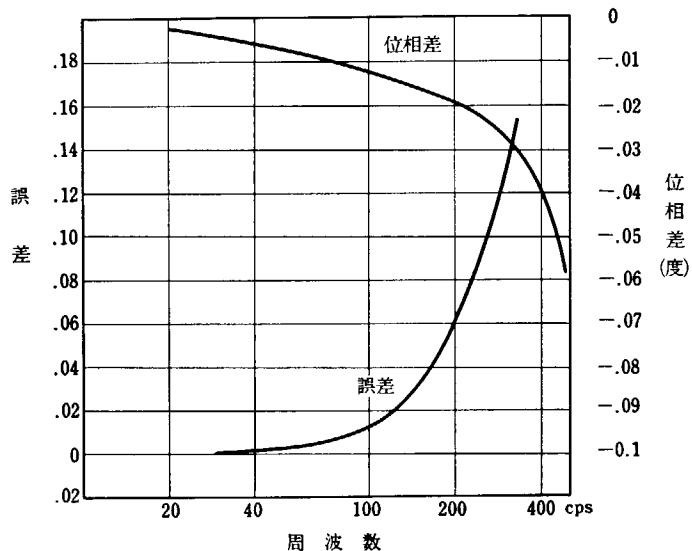
第 A.5.3 図 FG の原理図

A.6. 演算要素 の性能

A.6.1 AMPL (16-6H)

AMPL の誤差は増幅器の利得位相遅れ、演算インピーダンスの精度、コンデンサ吸収ドリフトなどで定まるが、本器では通常の演算の場合、周波数 50 c/s 以下で 0.01~0.02% である（ここで相対誤差は 100 V に対する値である）。一般にアナログ計算機を使用する問題の周波数は、ほとんど数 10 サイクルまでなので、AMPL の周波数範囲は上記の程度で充分である。

(1) 増幅度	非安定化部	200,000 以上
	スタビライザ	3,000 以上



$$\text{誤差} = \frac{\text{実際の出力} - \text{理論出力}}{\text{理論出力}} \times 100$$

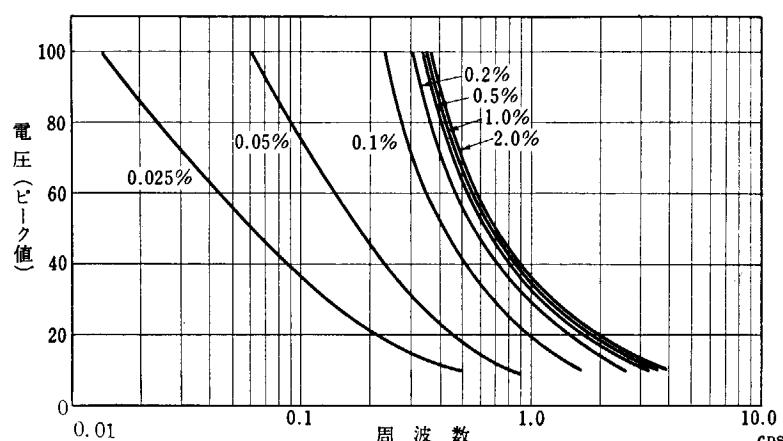
第 A.6.1 図 AMPL(16-6H) の周波数特性

	綜合	6×10^8
(2) 出力電圧および電流	$\pm 200 \text{ V}$	2 mA
	$\pm 100 \text{ V}$	13 mA
(3) グリッド電流		$60 \mu\mu\text{A}$
(4) 雑音		5 mVP-P
(5) オフセット (長時間)		$75 \mu\text{V}/24 \text{ hr}$
(6) 積分器ドリフト ($R=1 \text{ M}\Omega, C=1 \mu\text{F}$)		$100 \mu\text{V/sec}$
(7) 誤差 (第 A. 6.1 図)		
(8) 所要の消費	+100 V	0.9 mA
	-300 V	33 mA
	-500 V	0.5 mA
	6.3 V 50 cps (0 Vd-c)	4 amp
	(-300 Vd-c)	0.9 amp

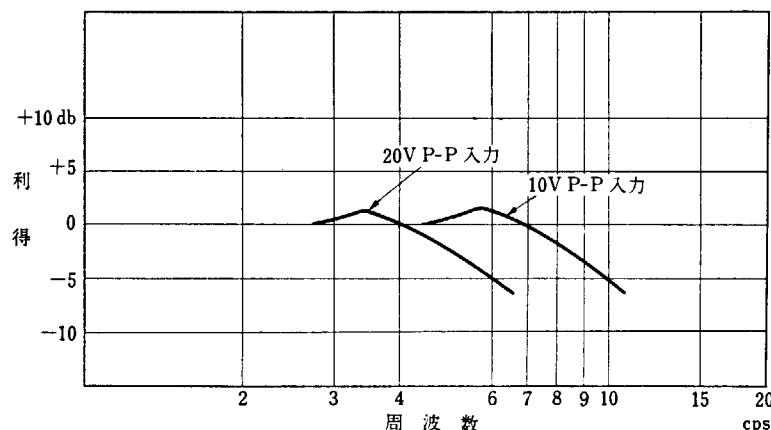
A. 6.2 S-MULTI**A. 6.2.1 S-MUL-**

TI (16-7M) (1) 特性

最大速度 210 V/sec



第 A. 6.2 図 S-MULTI(16-7M) の誤差特性



第 A. 6.3 図 S-MULTI(16-7M) の動的特性

最大加速度 $10,000 \text{ V/sec}^2$

静的誤差 0.001% (励振電圧の)

動的誤差 0.015% (ゆるやかなランプ関数に対し, 励振電圧の)

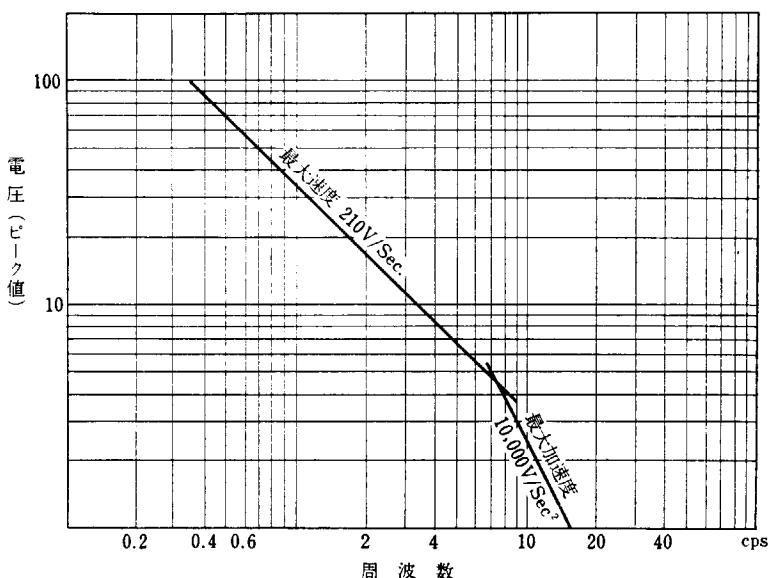
(2) 多回転 Linear Multiplying Cup および Feedback Cup

全抵抗 $30,000 \Omega \pm 5\%$

直線性 $\pm 0.025\%$

タップ数 3

分解度 15,000 turns



第 A.6.4 図 S-MULTI(16-7M) の速度および加速度の限界

A.6.2.2 S-MUL-

TI (16-7N) (1) 特性

最大速度 $14,00 \text{ V/sec}$

最大加速度 $56,000 \text{ V/sec}^2$

静的誤差 0.02% (全励振電圧の)

(2) Single-turn Potentiometer Assembly

型 卷線型

始動トルク 4 ounce inches 以下

トランクリング誤差 $\pm 0.24\%$ (Feedback Cup に対し)

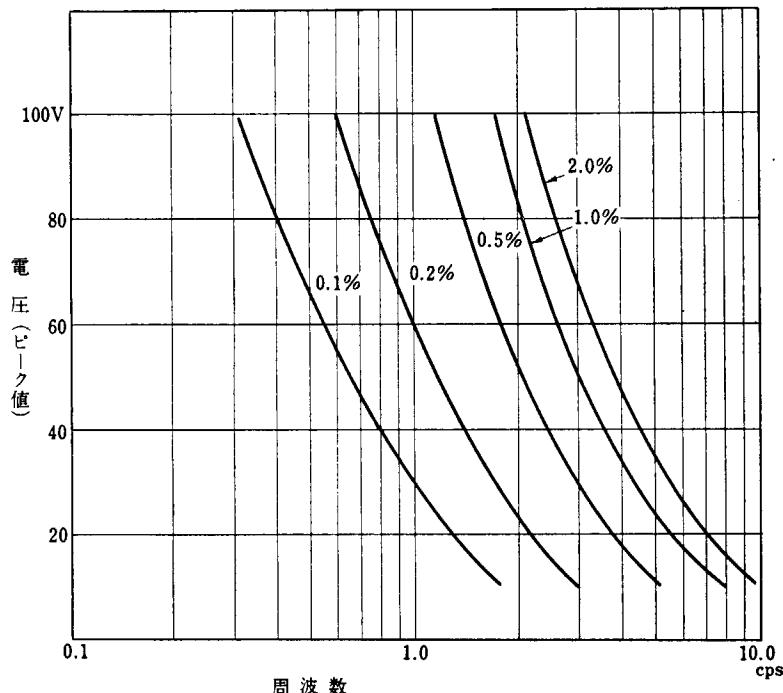
(3) Linear Multiplying Cup および Feedback Cup

全抵抗 $30,000 \Omega \pm 5\%$

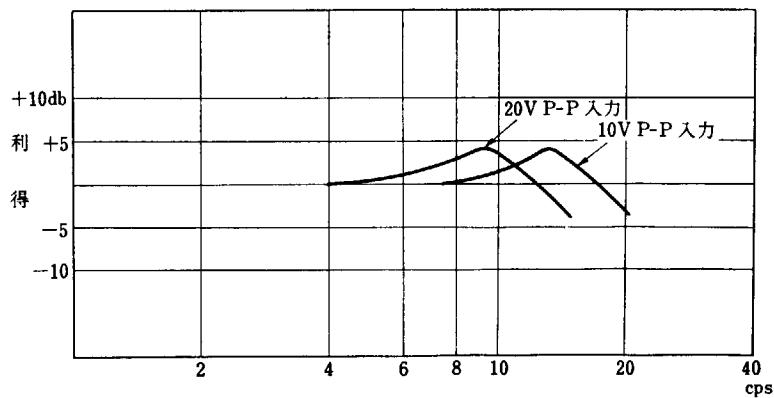
電気的回転角 304°

直線性 $\pm 0.12\%$

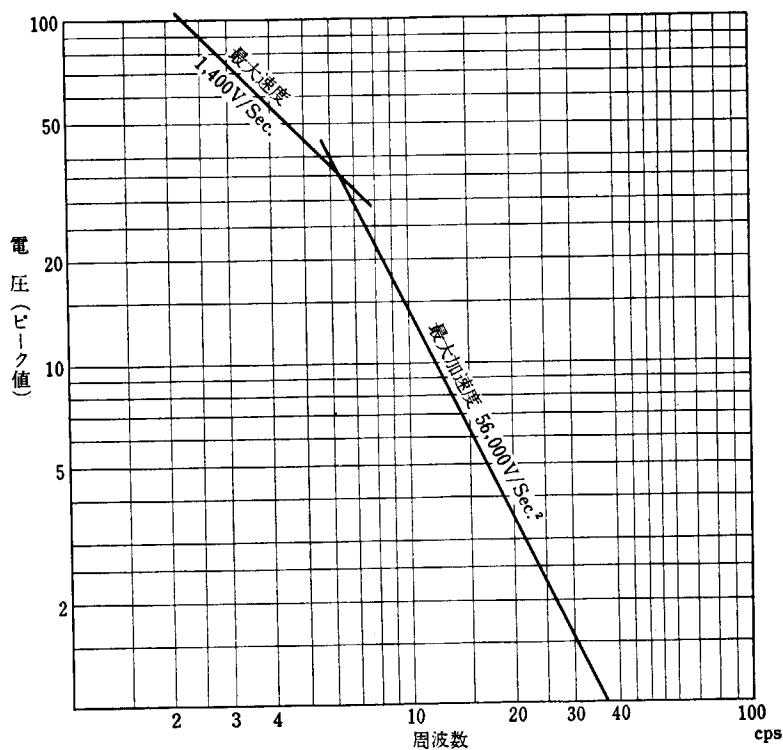
タップ数 3



第 A.6.5 図 S-MULTI(16-7N)の誤差特性



第 A.6.6 図 S-MULTI(16-7N)の動的特性



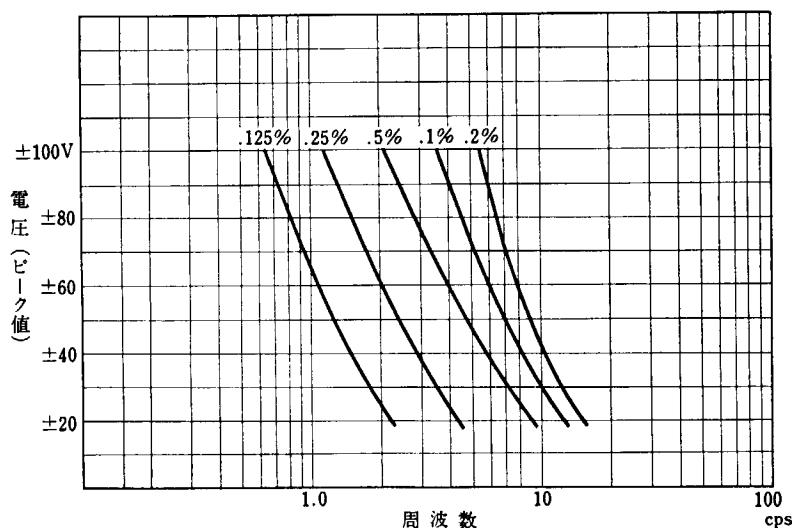
第 A.6.7 図 S-MULTI(16-7N) の速度および加速度の限界

A.6.2.3 S-MUL-

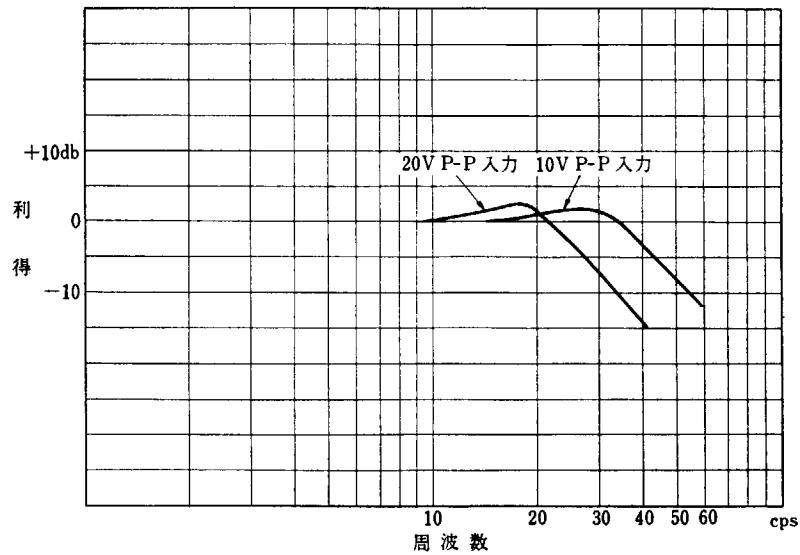
TI (16-7S)

(1) 特 性

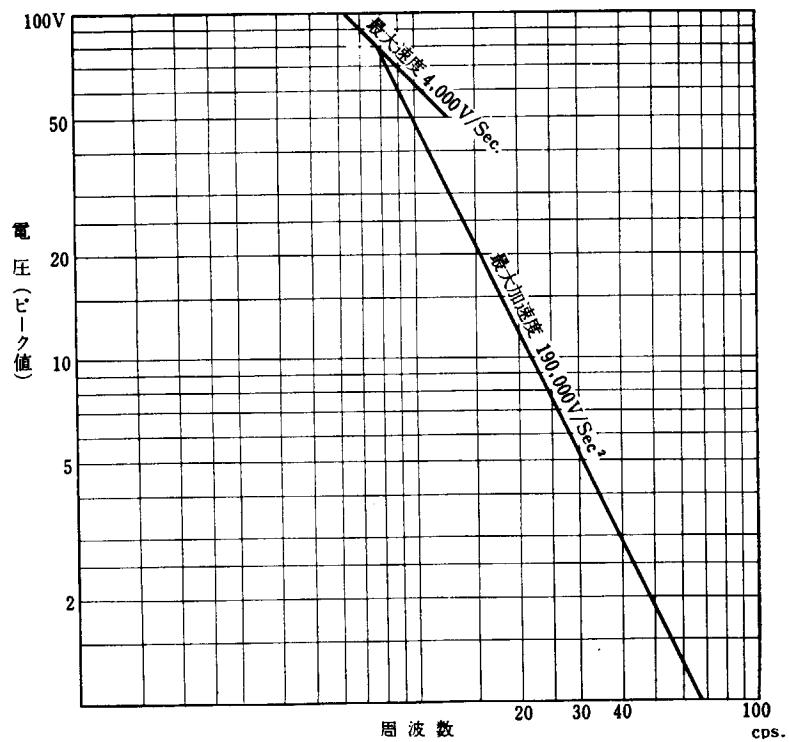
最大速度 4,000 V/sec

最大加速度 150,000 V/sec²

第 A.6.8 図 S-MULTI(16-7S) の誤差特性



第 A.6.9 図 S-MULTI(16-7S)の動的特性



第 A.6.10 図 S-MULTI(16-7S)の速度および加速度の限界

(2) Single-turn Potentiometer Assembly

型	非誘導性炭素膜
始動トルク	約 0.6 ounce-inches
ト ラッキ ン グ誤 差	±0.2% (Feedback Cup に対し)

(3) Linear Multiplying Cup

全 抵 抗	30,000 Ω ±5%
電 気 的 回 転 角	350°
直 線 性	±0.1%
タ ッ プ 数	3

**A. 6.3 E-MULTI (1) 入出力電圧範囲
(16-7J)**

掛 算	各 チャンネル とも	±100 V
割 算	A チャンネル	±100 V
	B チャンネル	+100 V

(2) 乘 算 器

静 的 誤 差	
A × B	最大 ±0.02%
A × C	最大 ±0.04%

動 的 特 性

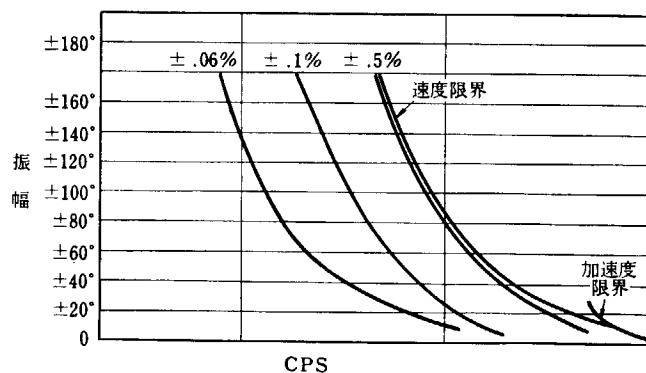
(i) 標 準 フィルタ	
100 cps 位相差	0.5°
100 cps 誤 差	2.0%
振幅レスポンス (ピーク)	6 db
雜 音 各 チャンネルあたり (10 kc リップル)	250 mV 以下
	低周波雑音 40 mV 以下

(3) 割 算 器

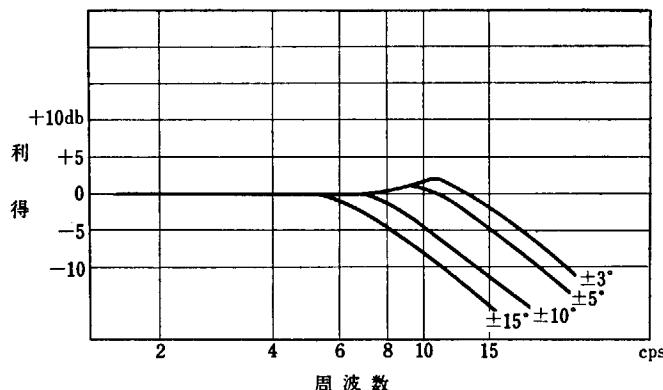
静 的 誤 差	
$Y = A/B$ ($A=0$, B =可変)	±1/B V 以下
$Y = A/B$ (A =可変, $B=100$ V)	±A/800 V 以下
動 的 特 性	
$Y = A/B$ (A =可変, $B=100$ V) 正弦波入力に対し	
100 cps 位相差	6°
100 cps 誤 差	5%
オーバーシュート	10% 以下

**A. 6.4 RSLVR
(16-8B)**

FOLLOW-UP POT の直線性	0.025%
全 体 の 零 点 精 度	0.015%
Resolving Pot の精 度	精 度
回 転 角 度	sine cosine
0°～22. ½°	0.07% 0.05%
22. ½°～45°	0.06% 0.05%
45°～67. ½°	0.05% 0.06%
67. ½°～90°	0.05% 0.07%



第 A.6.11 図 RSLV8(16-8B) の動的誤差



第 A.6.12 図 RSLV8(16-8B) の周波数特性

A.6.5 XYREC	(1) 精 度 Pen および Arm	
(1100-D)	静的精度	0.075%
	動的精度	
	記録速度 10"/sec まで	0.1%
	" 15"/sec まで	0.2%
	1 cps ±4"あたりの位相差	5° 以下
	5 cps ±0.5" "	5° 以下
(2) 感 度		
	10, 5, 2.5, 1, 0.5, 0.25, 0.1, 0.05 V/cm	
(3) 最大速度	Pen, Arm とも	約 20"/sec
(4) 最大加速度	Pen	約 750"/sec
	Arm	約 250"/sec ²
(5) 消費電力	115 V 50 cps	150 W

A. 7. 計算機操

作上の注意

(第 5.1 図, 第
5.2 図参照)

- A. 7.1** 計算機の PLATE Sw は, FILAMENT Sw を投入して約 5 分間 warm-up してから
のちに投入する。
- A. 7.2** 計算機の PLATE Sw を “ON”, “OFF” する前に, かならず次のことを確認する。
 (1) CONTROL Sw C3 →“POTSET”
 (2) XYREC→“STAND-BY”
 (3) 6REC の “PENMOTORS”→“OFF”
 8REC の “RECORD”→“OFF”
 (4) “VTVM” ボタン→“SIGSEL” C5
 (5) VTVM の SENSITIVITY Sw. C4→“OFF”
 これらは, 過負荷などの理由で演算途中で PLATE Sw を “OFF” にするようなとき
に忘れやすいから注意すること。
 なお, 上記(1)～(5)のほか, REL を使用している場合は, PLATE Sw を “ON” にす
る前に Driver の POT だけを設定しておくこと (3.11 参照).
- A. 7.3** 原則として DVM を使用しているとき以外は, DVM 入力を切っておく. VTVM 選
択ボタンの “SIGSEL” C5 を押しておけばよい。
- A. 7.4** P-PANEL をかけたままで, パッチコードを挿しかえるときは, P-PANEL のおさえ
わくのアームを上げ, P-PANEL を手で押えながらおこなう。
- A. 7.5** 数分間以上 P-PANEL を計算機からとりはずしておくときは, かわりの P-PANEL
をかけておく (塵埃防止のため).
- A. 7.6** 演算を 1 時間以上停止するときには電源 Sw を全部切っておく.
- A. 7.7** 初期値用 POT (No. 1～No. 20) と係数用 POT (No. 21～No. 80) とはなるべく混用
しないこと. もし, 初期値用 POT を係数用として使うときには, POT の下のスイッ
チを 土 側に倒さないで中立の位置しておくこと.
- A. 7.8** E-MULTI を割算に使用するときには, COMPUTER CONTROL Sw を “RESET”
にしてから E-MULTI の Sw を “DIV” に倒すこと.
- A. 7.9** 計算終了後はパッチングしていない P-PANEL と入れ替えておくこと (Spring 保護の
ため).
- A. 7.10** POT (No. 29～32, 69～72) を DVM で設定するときは P-PANEL 上の POT の
BOTTOM 端子をアース端子 (黒色) に接続してからおこなう.
- A. 7.11** P-PANEL の結線を変更した場合には変更箇所の POT の値を設定し直さねばならな
いこともある (POT の負荷抵抗の変わった場合など).
- A. 7.12** POT の出力が REL に接続する場合, その POT の設定は REL の接点を閉じた状
態でおこなわねばならない.
- A. 7.13** S-MULTI の出力は直接 POT に接続しないこと (負荷効果が大きくなるから). •
- A. 7.14** S-MULTI(16-7S)を用いるときには 400 c/s 電源スイッチ (コンソール A の下部,
第 5.2 図⑨, ⑩) を入れる.
- A. 7.15** E-MULTI を割算に使用するときには, 負の分母を用いてはならない.
- A. 7.16** XYREC を使用するとき, その原点を定めるには X, Y それぞれの入力を切ったほう
がよい (“POTSET” でも初期値電圧などが出ているから).

- A. 7.17** XYREC を “ON” にするときは、コンソールの COMPUTER CONTROL Sw を “POTSET” に戻しておいて、“ON” にするほうがよい。
- A. 7.18** XYREC を使用しているとき、COMPUTER CONTROL Sw を “OPERATE” から “RESET” に戻すには PEN を上げてからおこなう（あるいは XYREC を “REMOTE” にしておいてもよい）。
- A. 7.19** 6REC, 8REC にもそれぞれ COMPUTER CONTROL Sw が付いているからそれらを使うときは注意する。
例えば、REC の COMPUTER CONTROL Sw が “RESET” になつていれば、コンソールの COMPUTER CONTROL Sw を “OPERATE” にしても積分動作はおこなわれない。
- A. 7.20** ICJ を用いて両コンソールを合わせて演算するときには、第 5.2 図の Rack2 または Rack3 の制御盤の REFERENCE Sw をどちらか “EXT” にしたほうがよい。
(以上 A. 7.1~7.9 は故障防止のため、A. 7.10~7.20 は誤った演算を防止するためである。)

A. 8. RATE TEST の方法

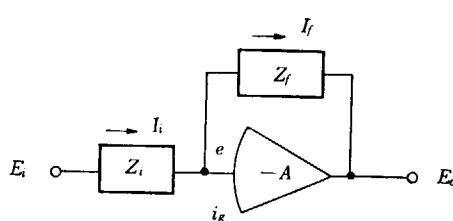
RATE TEST を使うことによって、演算の途中でも、P-PANEL の結線を変えることなく INT の動作テストをおこなうことができる。

第 5.1 図で

- (1) COMPUTER CONTROL Sw → “RATE TEST”
- (2) “RATE TEST POT” (C2 の左側にある) → 0.01~0.05
- (3) SIGNAL SELECTOR でテストした INT を選択する (VTVM ボタンの “SIGSEL” C5 を押しておく)。C4 を “100” おく
- (4) “RATE TEST” ツマミ (RATE TEST POT の上にある) を “-100 Volt” にし、VTVM の指針が +100 V 近くなったら RATE TEST Sw を “+100 Volt” にする。そして指針が -100 V 近くなったら “OFF” にする。
- (5) そのままで他の INT を選択しそれらの電圧が等しければその INT の動作は良好である。

A. 9. AMPL による演算の原理

第 9.1 図に示すように、 $-A$ の部分は安定な高利得（通常 $A=10^8$ 程度）の直流増幅器である。この増幅器に図に示すように入力インピーダンス Z_i 、フィードバックインピーダンス Z_f をつなぐ。



第 A. 9.1 図 AMPL の原理図

直流増幅器の入力に流れる電流 i_g が I_i および I_f に比して十分小さいとすると、 $I_i = I_f$ となる。したがって、

$$\frac{E_i - e}{Z_f} = \frac{e - E_o}{Z_f} \quad (9.1)$$

増幅器の利得が $-A$ であるから、

$$\frac{E_0}{e} = -A \quad (9.2)$$

(9.1) 式および (9.2) 式より, e を消去して,

$$E_0 = -\frac{1}{1 + \frac{1}{A} \left(\frac{Z_i + Z_f}{Z_i} \right)} \cdot \frac{Z_f \cdot E_i}{Z_i} \quad (9.3)$$

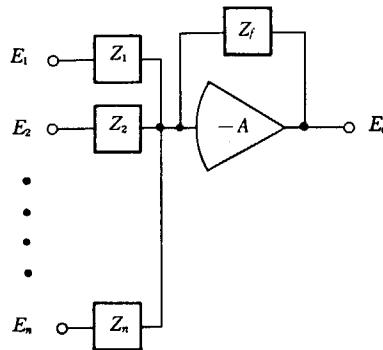
(9.3) 式で A が十分大きくて,

$$\frac{1}{A} \frac{Z_i + Z_f}{Z_i} \ll 1$$

ならば

$$E_0 = -\frac{Z_f E_i}{Z_i} \quad (9.4)$$

となる。一般に Z_i の代わりに並列に入力インピーダンス Z_1, Z_2, \dots, Z_n が第 9.2 図のように接続されていると、(9.4) 式の代わりに一般に



第 A.9.2 図 AMPL の原理図

$$E_0 = -Z_f \left(\frac{E_1}{Z_1} + \frac{E_2}{Z_2} + \dots + \frac{E_n}{Z_n} \right) \quad (9.5)$$

なる関係が成立する。(9.5) 式が INT SUM の原理で、このようにして用いられた増幅器を演算増幅器 (AMPL) とよぶ。 Z_1, Z_2, \dots, Z_n に抵抗をつなぎ、 Z_f にコンデンサ C_f をつないだ場合が INT である。この場合は $Z_f = \frac{1}{C_f s}$ となり、 Z_1, Z_2, \dots, Z_f をそれぞれ R_1, R_2, \dots, R_n とすると、(9.5) 式は

$$\begin{aligned} E_0 &= -\frac{1}{C_f s} \left(\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + \dots + \frac{E_n}{R_n} \right) \\ &= -\frac{1}{C_f R_1} \int E_1 dt - \frac{1}{C_f R_2} \int E_2 dt - \dots - \frac{1}{C_f R_n} \int E_n dt \end{aligned} \quad (9.6)$$

となって積分をおこなう。

Z_f に抵抗 R_f をつないだ場合が SUM となる。この場合 (9.5) 式は

$$E_0 = -\frac{R_f}{R_1} E_1 - \frac{R_f}{R_2} E_2 - \dots - \frac{R_f}{R_n} E_n \quad (9.7)$$

となって加算がおこなわれる。 R_f/R_i が係数となり、 R_i を適当にえらぶことにより任意の係数が得られる。

参考文献

- [1] KORN & KORN: Electronic Analog Computers. (1956) Mc-Graw Hill.
- [2] JOHNSON; Analog Computer Techniques. (1956) Mc-Graw Hill.
- [3] JAERI-4011 (1960)
- [4] 演算増幅器によるむだ時間要素. 計測制御研究室資料 No. 1.
- [5] Log Simulator. 計測制御研究室, 資料 No. 4.
- [6] Diode による非線形演算要素の設定. 計測制御研究室資料 No. 5.
- [7] PACE アナログ計算機. 計測制御研究室資料 No. E-15.
- [8] Precision Analog Computer. 計測制御研究室資料 No. 16.
- [9] 演算増幅器によるおくれ時間発生器. 計測制御研究室資料 No. 18.
- [10] Relay を用いた非線型演算回路. 計測制御研究室, 資料 No. 26.
- [11] Analog Computer による各種時間関数の発生. 計測制御研究室資料 No. 31.
- [12] PACE NOISE GENERATOR の特性解析. 計測制御研究室資料 No. 35.
- [13] Analog Computer による真空管の特性の自動記録. 計測制御研究室資料 No. 42.
- [14] ANL-6075 (1960).
- [15] M. E. REMELEY *et al.*: Program Review of The Water Boiler Reactor Kinetic Experiments. NAASR-1925 (1956).
- [16] 三井田, 他: 英国形動力炉制御系の一解析. 自動制御, 7 卷, 3 号, 131~141 (1960).
- [17] A. C. JACKSON: Analog Computation, (1960) Mc-Graw Hill.
- [18] PACE ANALOG.

—以 上—

おもな編集, 執筆者は下記のとおりです。

三井田 純一	須田 信英
原 昌雄	臼井 甫積
奥 泉 隆之	藤井 義雄

日本原子力研究所は、研究成果・調査結果の報告のため、つぎの3種の刊行物を、それぞれの通しナンバーを付して、不定期に発行しております。

- | | | |
|---------|----------------------------------|-----------------|
| 1. 研究報告 | まとまった研究の成果あるいはその一部における重要な結果の報告 | JAERI 1001-3999 |
| 2. 調査報告 | 総説、展望、紹介などを含め、研究の成果、調査の結果をまとめたもの | JAERI 4001-5999 |
| 3. 資料 | 研究成果の普及、開発状況の紹介、施設共同利用の手引など | JAERI 6001-6999 |

これらの刊行物に関する版権、複写のお問合せは、日本原子力研究所図書館あてお申し越しください。

なお、上記3種の報告は、日本原子力研究所生活協同組合（茨城県那珂郡東海村）で実費頒布をいたしております。

Japan Atomic Energy Research Institute publishes non-periodical reports, etc. with the following classification numbers.

1. JAERI 1001-3999 Research Reports.
2. JAERI 4001-5999 Survey Reports and Reviews.
3. JAERI 6001-6999 Information and Guiding Booklets.

Any inquiries concerning copyright and reprint of the above Publications should be addressed to the LIBRARY of the Institute. (Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-Mura, Naka-Gun, Ibaraki-Ken, Japan)

日本原子力研究所

資料 No. 6

昭和36年3月31日発行

編集兼発行

印 刷

日本原子力研究所図書館

茨城県那珂郡東海村（電）東海2211

三美印刷株式会社

東京都千代田区神田多町2-7

既刊レポート一覧 (Publication List)

分類記号 classification number	標題 Title
JAERI 1001	JRR-3(国産1号炉)設計計算 第1部 原心部核計算
JAERI 1002	JRR-3(国産1号炉)設計計算 第2部 制御棒および遮蔽計算
JAERI 1003-B	JRR-1 の臨界前試験
JAERI 1003-C	JRR-1 の核燃料溶解
JAERI 1003-D	JRR-1 の臨界実験
JAERI 1003-E	JRR-1 の特性試験
JAERI 1003-F	JRR-1 の制御系について
JAERI 1003-G	JRR-1 臨界実験および出力 試験中における放射線モニターニング
JAERI 1004	JRR-1 における中性子束の 絶対測定
JAERI 1005	Co-60 10kc ケーブルの窓のシヤヘイ用ガラスの性質について
JAERI 1006-A	カールダーモデル原子炉の反応度 の温度係数
JAERI 1006-B	英國型ガス冷却原子炉の動特性
JAERI 1006-C	Xe による中性子束の空間振動
JAERI 1007	JRR-3 モックアップ試験装置による開発試験
JAERI 1008	光学ボンシャルによる複合 核をつくる断面積の計算
JAERI 1009	パイプ・オシレーターによる 熱中性子吸収断面積の測定
JAERI 1010	放射線シヤヘイ窓ガラスの放 射線に対する安定性につい て
JAERI 1011	10 kc 用ホットケーブルの放射 線漏エイ試験
JAERI 1012	Membrane Dialyzer JAERI 300 B-II の放射性廃液処理への 応用
JAERI 1013	リン-32 の製造研究
JAERI 1014	LiF 結晶の照射損傷
JAERI 1015	シンチレーションカウンターにお ける中性子とガンマ線の識別
JAERI 1016	アナコンによる東海発電所原子炉 ダクト破損事故の解析
JAERI 4001	金属ウランの諸性質
JAERI 4002	海洋調査報告
JAERI 4003	東海村微気象調査報告

JAERI 4004	軽水减速型原子炉の核的设计	Nuclear Calculation for Light Water Moderated Reactor
JAERI 4005	熱中性子炉の動特性に関する 数表および図表	Numerical Tables and Charts Useful for the Study of the Dynamic Behav- ior of Thermal Reactors
JAERI 4006	熱中性子炉の過渡応答を求める ための図表	Useful Charts to Find Indicial Response of Thermal Reactors
JAERI 4007	第2回ジュネーブ会議総合報 告・金属編	Reviews of the Second United Nations International Conference on the Pea- ceful Uses of Atomic Energy Part 1 Metallurgy
JAERI 4008	第2回ジュネーブ会議総合報 告・物理編	Reviews of the Second United Nations International Conference on the Pea- ceful Uses of Atomic Energy Part 2 Physics
JAERI 4009	第2回ジュネーブ会議総合報 告・化学編	Reviews of the Second United Nations International Conference on the Pea- ceful Uses of Atomic Energy Part 3 Chemistry
JAERI 4010	第2回ジュネーブ会議総合報 告・原子炉編	Reviews of the Second United Nations International Conference on the Pea- ceful Uses of Atomic Energy Part 4 Reactor Physics
JAERI 4011	第2回ジュネーブ会議総合報 告・原子力工学編	Reviews of the Second United Nations International Conference on the Pea- ceful Uses of Atomic Energy Part 5 Nuclear Engineering
JAERI 4012	第2回ジュネーブ会議総合報 告・保健物理編	Reviews of the Second United Nations International Conference on the Pea- ceful Uses of Atomic Energy Part 6 Health Physics
JAERI 4013	ウランおよびトリウム中の各 種元素の分析法文献抄録	Analysis of Uranium and Thorium A Bibliography
JAERI 4014	半均質臨界集合体とその安全 解析	Description and Hazard Analysis of semi Homogeneous Experiment
JAERI 4015	核融合委員会研究報告書	Reports from the Symposium of Low Energy Nuclear Physics
JAERI 4016	低エネルギー原子核研究会報告	Analysis of Uranium and Thorium A Bibliography (II)
JAERI 4017	ウランおよびトリウム中の各種元 素の分析法文献抄録 (II)	Description and Hazard Analysis of Japan Research Reactor-1
JAERI 6001	JRR-1 の概要と安全対策	Design and Construction of Cobalt-60 Gamma Irradiation Facility
JAERI 6002	Co-60 放射線照射室の概要	Description and Hazard Analysis of Japan Power Demonstration Reactor
JAERI 6005	動力試験炉 (JPDR) の概要 と安全対策	