

ALS-1000形高精度アナログ計算機

Type ALS-1000 High-Efficiency Analog Computer

三 浦 武 雄* 河 村 重 憲**
Takeo Miura Shigenori Kawamura

内 容 梗 概

従来、大形のアナログ計算機では顧客の要求によって構成、配置、外形などをそのつど定めていたが、今回これらに対して標準構成を設定することにより、要素の配置、外形の大きさが規格化できた。このため生産が容易となり、かつ要素の増設も簡単に行なわれるようになった。

このモデルチェンジを機に各演算要素の精度、安定度を一段と向上し、さらに自動演算、ポテンショメータの自動設定などの機能を標準としてとり入れて、従来よりもより複雑な問題の解析を可能にし、かつ操作をやりやすくした。

1. 緒 言

アナログ計算機は演算が並列方式であるため、演算の機能は各演算要素（積分器、乗算器など）の数がそれぞれいくつずつあるかによって決定される。これらの要素の構成は使用者の計算内容によって非常にまちまちである。一方製造する立場から考えると、このことは、設計に時間を費やし、ひいては納期、価格の面で顧客に迷惑をかけることになる。

これを解決するために、顧客の希望する最大公約数のようなものを過去8年間の製作経験をもとに検討して標準構成をきめ、かつ融通性をもたせるために

- (1) パッチ盤上の接続により機能の切り替えを容易にし
- (2) 不要な要素はあきパネルとしうるようビルディングブロック方式を用い
- (3) パッチ盤上に余分な端子を数多く準備しておき、かつ前もって何も予定しないあきパネルを用意しておく

などの考慮を払った。

このように不要な部分があきパネルとし、余分のあきパネルを前もって用意しておくことは全体の大きさを不必要に大きくして、少ない構成要素の場合でも床面積を大きくしがちであるが、回路方式、部品、構造を巧妙に設計することによって小形とすることができ、半実装の場合でも従来のものに比べてかえって小さくすることができた。同時に消費電力も従来のものに比べて2分の1から3分の1程度となった。

次にこれらの構成、構造、性能などについて説明する。

2. 標 準 構 成

全体の大まかな構成は

基本架 (3ベイ) 1架
非線形架 (1ベイ) 2架

よりなる。次にこれらの内容について述べる。

2.1 基本架

問題の設定、操作の中心となるもので、大きく分けて次のものよりなる。

パッチ盤 1 (恒温槽、演算インピーダンスを含む)
ポテンショメータ盤 6 (ポテンショメータ 96 個)
デジタル電圧計 1
操作、制御部 1式
基準電源 (±100V) 1式

* 日立製作所中央研究所 工博

** 日立電子株式会社

4. 直流増幅器カード 20枚

直流増幅器電源 1式

2.2 非線形架

1架中のおもなものは次のとおりである。

サーボ乗算器盤 2

電子式乗除算器盤 2 (1盤に乗除算器2台入り)

電子式関数発生器盤 2 (1盤に10折線の関数発生器2台入り)

制御盤および電源 1式

2.3 演算要素の構成の詳細

全演算要素の入出力はパッチ盤に接続されているので、パッチ盤上に配置されている各演算要素の数量を次に示す。

加算積分器 20

加算係数器 20

加算係数/積分器 20 (汎用加算演算器としても使用可能)

汎用加算演算器 20 (正負変換器としても使用可能)

ポテンショメータ 96

比較器用リレー素子 12

不感帯素子 6

飽和素子 6

ダイオード素子 12

サーボ乗算器 4

電子式乗除器 8 (ただし16個分印刷済)

電子式関数発生器 8

2.4 操作、制御の構成の詳細

基本架の方に全部実装されており、演算の制御、出力の読出しなどを行なう、次に示した部分に分かれている。

演算制御盤 1

出力選択盤 2

出力指示盤 1

電源制御盤 1

プログラム制御盤 1

ディケード分圧器 1

時間設定盤 1

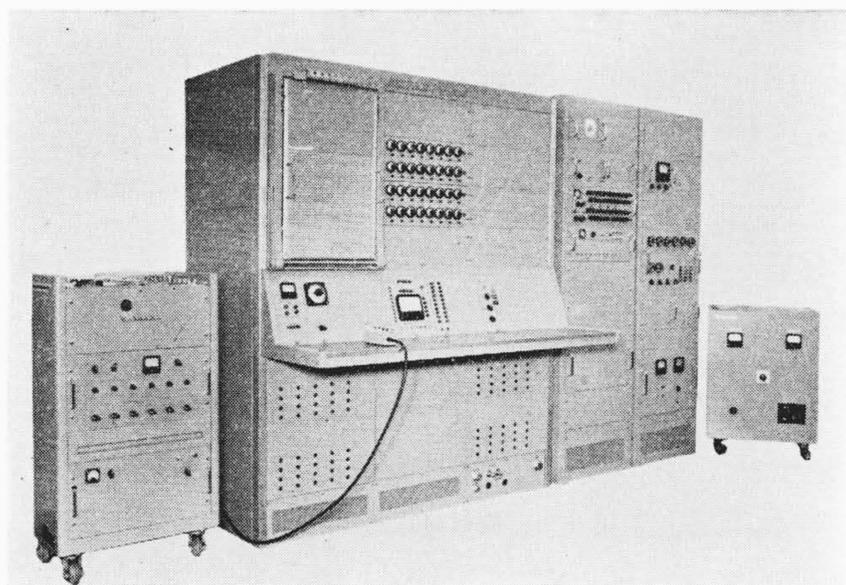
サーボポット選択盤 1

3. 構 造

第1図に全体の外観を示す。以下各部の構造の概要を述べる。

3.1 基本架

3ベイよりなる自立きよう体で、前面に机を有し、机より上にパッチ盤、ポテンショメータ盤、デジタル電圧計、机のすぐ上側に60度の傾斜をもったパネルタイプの操作、制御部が横に並べ



第1図 ALS-1000 形 アナログ計算機の外観

である。これらの部分が全体を通じて一番多く手で操作したり目で見たりする必要のあるもので、椅子（いす）に腰をかけたままで操作、監視が容易にできるよう考えられている。また機の奥行は A4 の用紙をのせるに十分な大きさがとってある。

机より下の部分は 4 直流増幅器カードを 5 枚ずつ実装した増幅器電源盤が 4 面と基準電源を含む安定化の電源盤が 1 面収容されている。これらは前面よりドアでカバーされており、過負荷を示すネオンランプの部分のみ前より見ることができるようになっている。

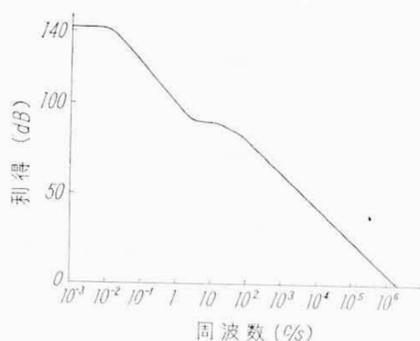
机の面を境としてきょう体の内部で上下に熱的に分けられており、増幅器、電源などの机より下の部分より発生した熱はこの遮へい板の下面に沿って後部より外部へぬけるようになっている。最下面に吸込扇が取り付けられてあり、これにより強制通風を行なっている。机の面より上の部分は発熱体がほとんどなく、しかも温度上昇を嫌う演算インピーダンス類が大半であるのでたいへん好都合である。また下部の吸込扇はそれほど強力なものを必要とせず、そのため音も静かである。

3.2 恒温槽

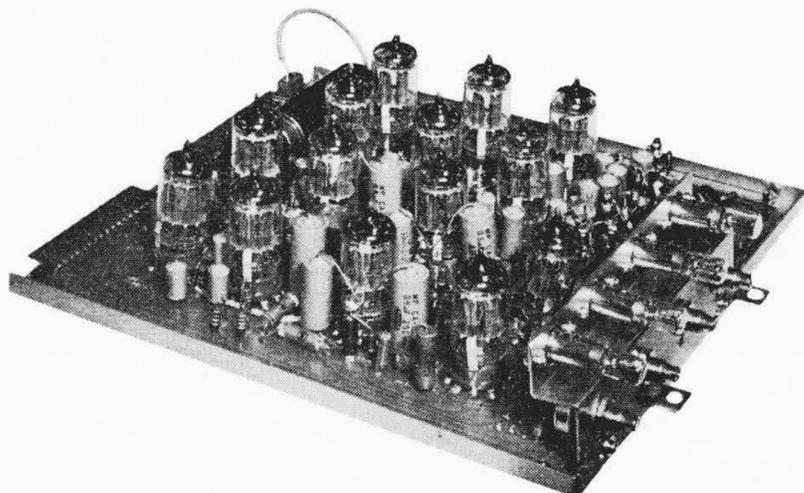
演算用のインピーダンス（精密抵抗、コンデンサ類）はパッチ盤の後部の恒温槽に全部収容されており、鋭敏なサーモスタットによって制御された一定温度に保たれている。このため周囲温度の変化による演算インピーダンスの値の変化はほとんどなく、常に正確な値を維持することができる。これらは 7 分割されたケースに分割して収容されており、実装される演算要素の数量によって不要なケースはあきパネルとしておくようになっている。これらのケースの前面には接触ピンが取り付けられてあり、各ピンの間は金属でシールドされており、お互いのリーク電流を完全に防いでいる。

3.3 直流増幅器カード

1 枚のプリント基板の中に出力段を除く直流増幅器が 4 台分は入っている。本カードの中の真空管はすべて 12A×7 であり保守の面で好都合である。熱量の発



第3図 増幅器の周波数特性



第2図 PA-1361 形 4 直流増幅器カードの外観

生の多い出力段の真空管はカードより熱的に隔てられた後部にまとめてあり、増幅器自身の温度上昇はほとんどなく、長時間の使用に対しても安定に動作するようになっている。カードの前面には過負荷指示用のネオンランプおよび直結部のバランスをとる半固定の可変抵抗が取り付けられている。

第2図は本増幅器カードの外観である。

3.4 非線形架

1 ベイの自立きょう体で、各盤は前面より容易にぬきさしができるようになっている。最下面に吸込扇が 1 個つけてあり、下より上に向けて強制通風を行なっている。

各盤は通風のよい構造となっており吸込扇 1 個だけにもかかわらず内部の温度上昇は 10°C 以下に保たれている。各非線形要素に用いられている直流増幅器には全部プリント基板が採用してあり保守に便利である。

4. 各演算要素の性能と特長

4.1 直流増幅器

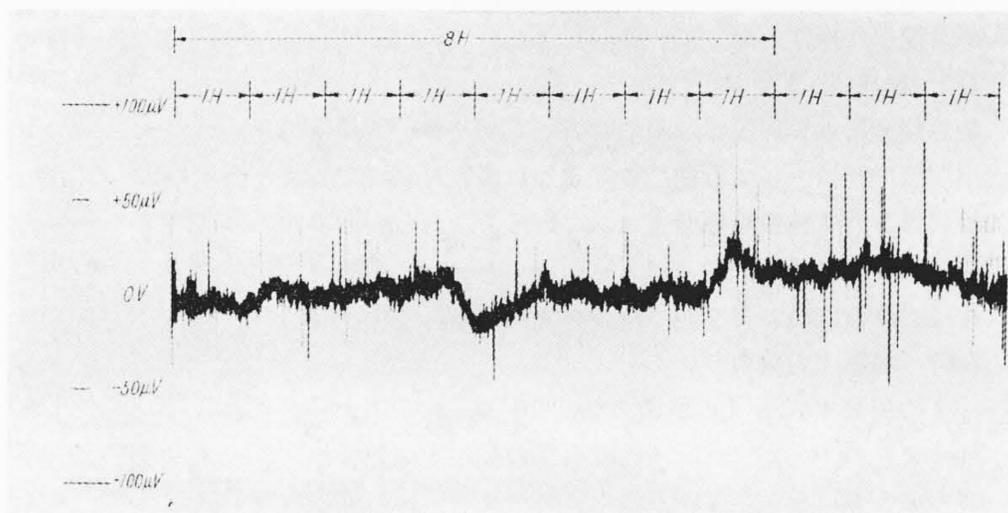
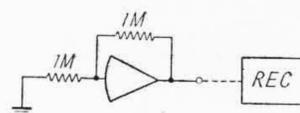
(a) 高利得、高安定度

直流の利得が約 140 dB、100 c/s の利得が約 80 dB の高利得の直流増幅器で、出力のドリフトも 1MΩ 対 1MΩ の正負変換器接続で 50 μV/8 時間（増幅器の入力換算では 25 μV 以下）と非常に小さくなっている。

第3図に本増幅器の周波数特性、第4図に出力ドリフトの実測例を示す。

(b) 高出力

出力電圧、出力電流の多くとれることも本増幅器の特長の一つ



第4図 出力ドリフトの実測例

で $100\text{ k}\Omega$ 程度の負荷で $\pm 130\text{ V}$ 以上、 $5\text{ k}\Omega$ 負荷 ($30\text{ k}\Omega$ のポテンシオメータ 6 個に相当する) に対して $\pm 100\text{ V}$ 以上とることができる。

(c) 過負荷表示方式

出力電圧が $\pm 100\text{ V}$ を越えたことによるような従来の過電圧表示の方式でなく、増幅器自身の過負荷を表示する方法を採用しており、どんな負荷抵抗値に対してもその負荷に対応する最大出力電圧までは使用可能となっている。

(d) 低雑音電流

入力端子の雑音電流 (初段の真空管のグリッド電流がこの大半をなすので従来はグリッド電流とも呼んでいた) の小さいことも本器の特長で、初段真空管と入力端子の間に雑音電流低減のための回路を設けてこれを実現している (特許出願中)。雑音電流の値は 5×10^{-11} 以下とすることができた。

(e) 周波数特性

増幅器の周波数特性をなだらかな傾斜とし、かつ利得が 0 dB となる周波数を高くとるために、周波数が高くなるに従って利得の落ちた増幅段を次々とパスして信号を送る新方式を採用しており、各段の位相おくれが重畳することを防いでいる。このため出力段のカソードフォロワによる低出力インピーダンスと相まって、装置の内部に実装した状態においても、利得の 0 dB を切る周波数を 1.5 Mc/s 以上に延ばすことができた。

この方式が一番高い周波数を受けもつ段以外は周波数帯域は少なくなくて済み、高増幅率の 3 極管を低レベルの電流で働かせればよく、回路が簡単になるほか消費電流も小さくできる利益を持っている。

(f) 使用真空管に特殊仕様が不要なこと

高利得の直流増幅器ではドリフトを防ぐためエージングを行なったもの、バランスのよいものなど真空管に注文をつけているものが多いが、真空管の価格が割高となり、また保守の場合でも市販の真空管がそのまま使用できないなどの欠点がある。

本増幅器では、回路的に十分なマージンを取り、一般規格の真空管を用いてもなんらさしつかえないようになっている。3.3 で述べたように使用真空管が非常に一般的である $12\text{ A} \times 7$ 一種類のみで構成されていることも回路設計の巧妙さを示している。

(g) 一挙動のバランスチェック

ドリフト補償増幅器 (チョツパ増幅器) が高利得 (直流で約 80 dB) であるため長時間の間でも出力電圧のオフセット電圧はほとんどないのでチェックの必要はなくなっている。チェックの場合でも (1 週間またはひと月に 1 度くらい) 増幅器の出力をいちいち選択呼び出ししてチェックする必要はなく、制御盤の「BC」(BALANCE CHECK) の押しボタンを押すだけでよく、そのときバランスの悪いもののみネオンランプがつき、半固定の可変抵抗をまわしてネオンランプが消えるように調整すればよいというきわめて簡単な操作となっている。

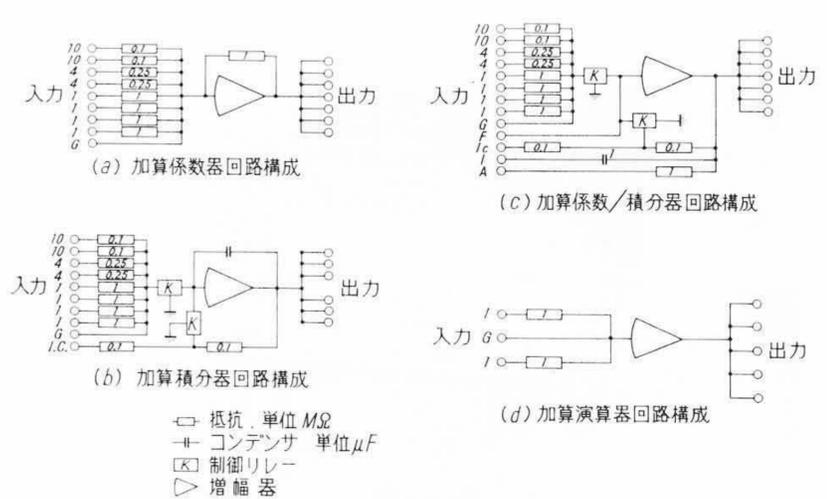
4.2 線形演算要素

加算積分器加算係数器、その両者にも切り替えて使用でき、かつ汎用演算増幅器としても使用しうる加算係数/積分器、および汎用の加算演算器の 4 種類が標準となっている。これらのおおのこの回路構成を第 5 図に示す。

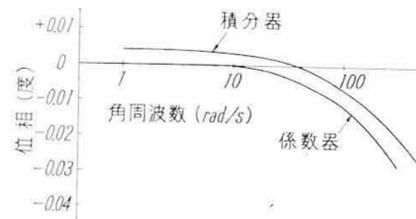
次にこれらについて性能、特長を説明する。

(a) 加算入力数の多いこと

1 の係数 4 個、4 の係数 2 個、10 の係数 2 個合計 8 入力と、外部よりのインピーダンス接続可能な G 端子 (加算インピーダンスの接合点) をもっているのでプログラミングの際自由度が高く問題の設定が楽である。



第 5 図 線形演算器の回路構成



第 6 図 積分器と係数器の位相特性の一例 (積分器は理論的な 90 度の位相よりのずれで表してある)

(b) 入力の係数が正確であること

各要素は専用のインピーダンスをもっており入力側のインピーダンスと帰還側のインピーダンスが念入りに調整されており、係数の誤差は入力端より出力端までを含めて 0.05% 以内となっている。これらのインピーダンスは恒温槽内に入れられているので外囲温度による影響を受けない。

(c) 位相誤差の小さいこと

ストレイ容量の小さい金属薄膜抵抗と吸収の少ないポリエチレンコンデンサの使用、合理的なインピーダンスの配置によるインピーダンス間のストレイ容量の小さいことが、直流増幅器の高利得、広周波数帯域と相まって広い周波数域で位相誤差が非常に小である。第 6 図は積分器と係数器の位相特性の一例を示す。

(d) 出力端子数の多いこと

各演算器は 5 ~ 7 個の出力端子をもっているため、パッチ板上での接続が容易である。

4.3 ポテンシオメータ

1 以下の係数、初期値などを与えるもので、自動セットのもの、手動セットのもの 2 種類がある。

(a) 自動セットポテンシオメータ

サーボ機構を用いた自動セット方式で、希望設定値は 4 けたの押しボタン式のディケード分圧器またはさん孔テープより与えることができる。1 個あたりの設定時間は 1 ~ 2 秒、設定誤差はフルスケールに対して 0.1% 以下である。第 7 図に実測データを示す。

(b) 手動セットポテンシオメータ

10 回転のヘリカルポテンシオメータで、デジタル電圧計の指示をみながらまたはディケード分圧器と比較することにより簡単に設定することができる。設定誤差はフルスケールに対して 0.05% 以下である。

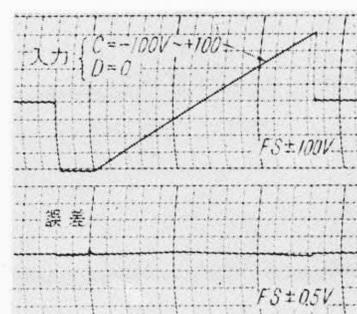
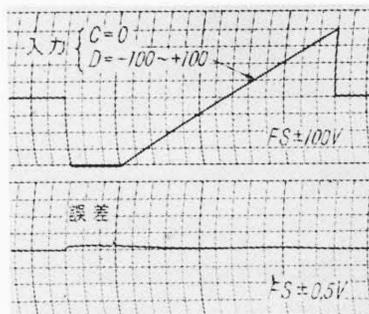
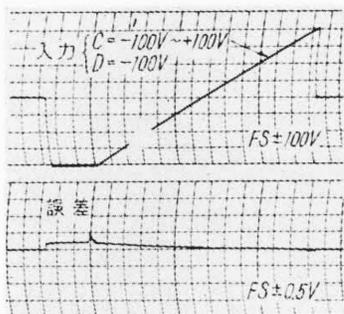
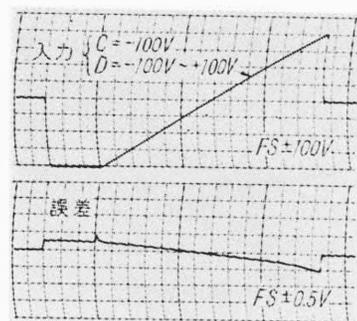
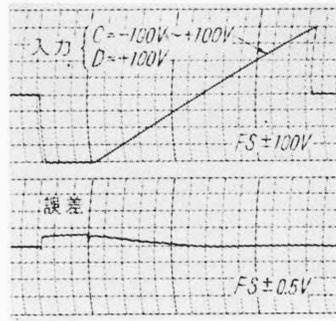
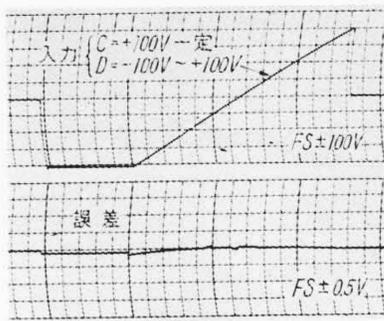
いずれのポテンシオメータも抵抗値は $30\text{ k}\Omega$ 、分解能 0.01% でミスパッチによる焼損を防ぐヒューズが取り付けられている。また設定に際してポテンシオメータに接続される負の影響は自動的に補正されるようになっている。

4.4 電子式乗除算器

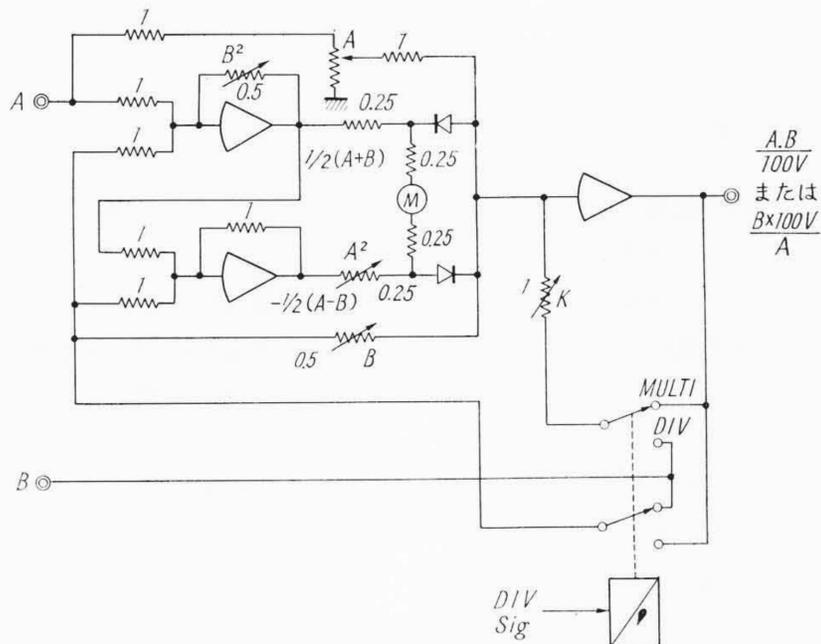
三角波を用いた $1/42$ 乗差方式で、その精度をきめる基準三角波電

Pot No.	設定誤差 (V)		
	20.00V 設定	50.00V 設定	80.00V 設定
20	-0.07	0.00	-0.10
21	-0.05	-0.01	0.00
22	-0.03	0.00	-0.06
23	-0.02	+0.03	+0.01
24	-0.04	-0.02	+0.01
25	-0.01	-0.01	0.00
26	-0.01	+0.01	-0.01
27	-0.01	-0.03	-0.01
30	+0.03	+0.06	-0.03
31	+0.01	+0.01	-0.02
32	+0.03	-0.01	+0.04
33	-0.01	+0.03	-0.05
34	0.00	+0.01	-0.04
35	+0.05	-0.01	0.00
36	+0.01	+0.04	-0.06
37	+0.06	-0.06	0.00

第7図 サーボポテンシオメータの設定誤差の実測例
14個のポテンシオメータに20.00, 50.00, 80.00(V) 各電圧を自動設定したときの各ポテンシオメータの設定誤差を示す



第9図 乗除算器の乗算特性



第8図 電子式乗除算器の回路構成

圧は高利得の直流増幅器を用いた積分器によって作られており直線性は0.05%程度におさえてある。またその振幅を安定にするためにチョップを用いた直流増幅器によるコーパレータを使用している。

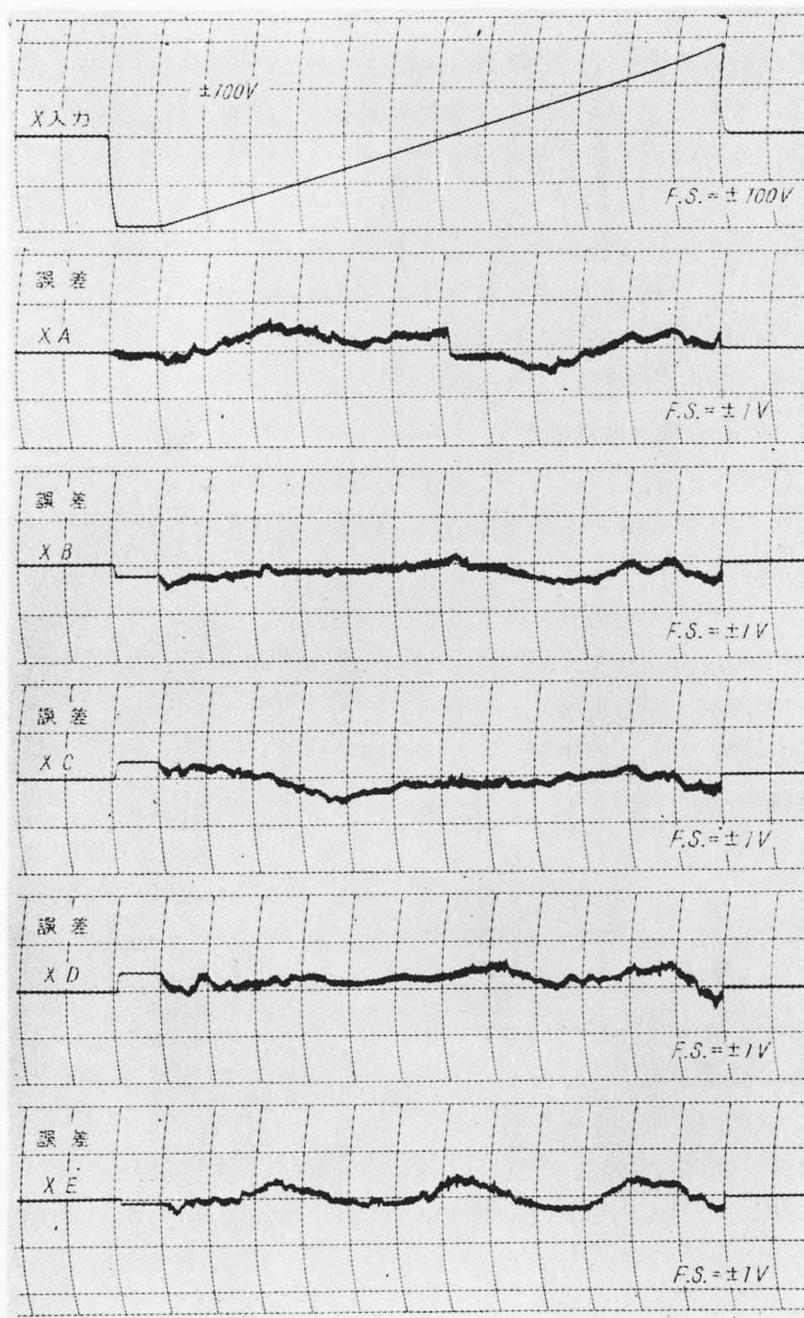
第8図に本乗除算器の回路構成を示す。

本方式の特長の一つは、基準三角波電圧は何台の乗除算器に対しても1台で供給できることである。このため乗除算器の回路構成は簡単でよく、台数の多いときにはその経済性はますます増大する。

次の特長は出力が小さいときは誤差も小さいことである。このことは演算誤差の性質が線形の演算要素のものに近いことであり、取り扱う電圧を必ずしも最大電圧に近く選ばなくても誤差が増大しないことである。このことはプログラミングに対してたいへん有利なことである。

もう一つの特長は周波数帯域が広くとれることである。これは時分割方式などに比べて同じキャリア周波数で比較したとき、三角波自身は方形波に比較して高調波成分が少なく、そのためにストレイ容量が直線性の誤差に与える影響が少なくなり、結果的にキャリアの周波数を高く選べることである。本乗除算器の乗算特性を第9図に示す。

なお乗除算器はパッチ板上でプラグをさしこむことで簡単に除算器に切り替えることが可能になっており、除算の際に別の演算増幅器を接続する必要がなく、プログラミングを簡単にすることができる。

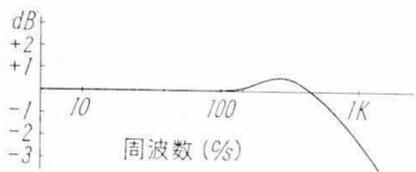


第10図 サーボ乗算器の乗算誤差特性

4.5 サーボ乗算器

50 c/s の高性能サーボモータを用いた高速応答のサーボループによって多連の精密ポテンシオメータを動かす方式である。直流より50 c/s に変換するチョップは半導体 (シリコンダイオード) が使用されておりその寿命は半永久的である。

高速に加えるに本乗算器の特長はゆるやかな信号の変化に対しても追従特性のよいことである。これは速度帰還用のタコジェネレー



第 11 図 電子式関数発生器の周波数特性

タの使用と機械系のがたと摩擦のばらつきを小にすることで実現している。

ポテンショメータは 6 連でありその直線性は 0.07% 以下となっている。

第 10 図は乗算誤差特性を示す。

4.6 電子式関数発生器

シリコンダイオードを用いた非直線素子の組み合わせによる折線近似の任意関数発生器である。1 台の折線の本数は 10 本であるが一つの盤に 2 台ずつはいってあり、この 2 台は切り替えて 1 台としても用いることができ、このときは 20 本の折線で可能となる。

折線の設定は座標で行なうようになっており、折れ曲り点 x_n とその時の関数の値 $f(x_n)$ を一側より順に設定していけばよいようになっている。相となれる折線のこう配の差が ± 5 以内であるという条件を満足すれば、関数形は座標中の最大入出力の範囲内でどんな値にでも設定可能である。また折線のこう配の差が ± 5 を越える場合でも折線を 2 個以上重ねることによって実現することができる。

本方式の大きな特長の一つは周波数帯域が広く位相誤差の小さいことである。第 11 図に周波数特性を示す。

また回路方式が非常に簡単であり、そのため安定度がよく出力に含まれるノイズ電圧が小さい。

4.7 その他の演算素子

以上の演算要素のほか、不感帯素子、飽和素子、ダイオード素子がシリコンダイオードを主体として数多く用意されており、これらの特殊非線形のインピーダンス素子として各種の関数形を簡単に作ることができる。これらの素子を含む演算インピーダンスは全部恒温槽内に收容されており、温度による影響は皆無となっている。

このほか比較器用のリレー素子があり、演算中の値によって回路を切り替えることができ、不連続動作の模擬、論理要素として、また自動演算の判断および指令の要素としてその利用範囲は広い。

5. 自動演算

本計算機では演算のシーケンスをあらかじめ与えておいて、自動的にその順序に従って演算を続けていく自動演算の機能をもっていることも大きな特長の一つである。

この機能を大きく分けると計画的な常数変更と取れん演算になる。次に両者について説明する。

5.1 計画的な常数変更 (開回路自動演算)

方程式の中のある常数 (初期値でもよい) をいくとおりもの値に変えていったとき、解がどのように変わっていくかを求める方法である。これに対して次のような方法がある。

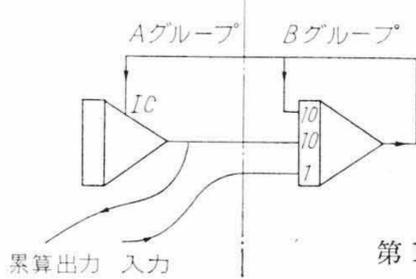
(a) リセット、コンピュータの繰返し演算を行ないながらステップスイッチを 1 回の演算ごとに進ませる方法

この場合はあらかじめ与えておけばどんな常数でもよいが、そのステップの数だけポテンショメータが必要となる。ステップスイッチは 4 回路で 10 ステップまで可能となっている。

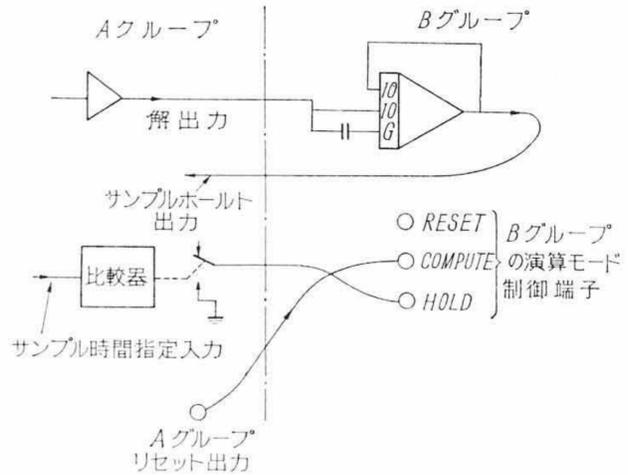
(b) 累算器の回路を作ってサーボ乗算器またはサーボポテンショメータの出力を動かす方法

これはポテンショメータは 1 個でよいが、1 回ごとに変化させる値は等しくなければならない。ただし全ステップ数には制限が

Aグループ	RESET	COMPUTE	HOLD	RESET
Bグループ	HOLD	HOLD	COMPUTE	HOLD



第 12 図 累算器の接続方法



第 13 図 サンプルホールド装置としての接続方法

ないので数多くのケースについてできる利点がある。第 12 図はこの場合の累算器の接続を示している。

(c) ノイズ発生器を用いてランダムな常数で行なう方法

常数の変化の確率分布がわかっているときそれに対応する解の分布がどのような形になるかというような統計的問題に対して用いられる。

(d) a b 自動切り替えスイッチを用いた半自動常数変更

演算に同期して 1 回ごとに切り替わる接点を有しており、その接点を通じて 2 個のポテンショメータを接続しておくことにより 2 個のポテンショメータを交互に使用して演算を行なうことができる。一つの演算中に次の常数を設定することができ、解の変化の傾向をみながら次の演算の常数をきめた方がよい場合などに便利である。

5.2 閉回路自動演算 (CLOAP システム)*

境界値問題、極値問題などの取れん問題は従来は人間の判断で手でポテンショメータを動かして目標解に近づけていくことで行なっていたものを、本計算機では前もってそのルールさえ与えておけばそれによって計算機自身で目標解に近づける動作をすることができる。これを行なうための要素として次のものがある。

(1) サンプル・ホールド装置 (アナログ記憶要素)

演算中のある時間における値を読み出して次の演算中ホールドしておくものである。必要に応じて 2 回、3 回の演算までそのままホールドさせることもできる。

(2) 累算器

演算ごとに解の値を次々と積算しておくものである。

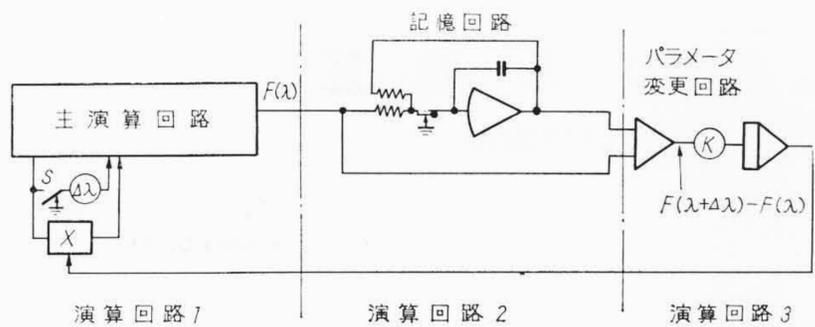
(3) 比較器 (コンパレータ)

二つの値の大・小によってリレーの接点が切り替わるものである。

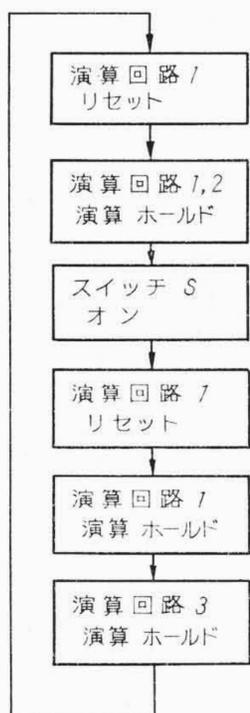
(4) リレー記憶要素 (オンオフ記憶要素)

セット端子とリセット端子をもった保持リレーで、セットまたはリセットの信号を取り除いた後もそのままの状態を保持するようになっている。

* CLOAP は Closed-loop Automatic Programming の略号である。



第14図 極値問題自動演算回路ブロック図



第15図 極値問題のフローチャート

(1), (2)は演算モードが主演算モードより切り離すことのできる積分器を用いることで実現できるようになっている。第13図はサンプル・ホールド装置の接続を示したものである。

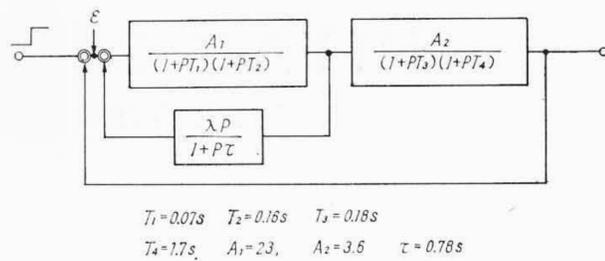
5.3 自動演算の解析例

自動収れんは境界値問題や固有値問題を解くのに有効であるが、ここには極値問題の実例を示す。パラメータλを変えてF(λ)の極値を求める場合、最も簡単なのはλをΔλだけ変えて

$$\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \lambda} \approx \frac{F(\lambda + \Delta\lambda) - F(\lambda)}{\Delta\lambda}$$

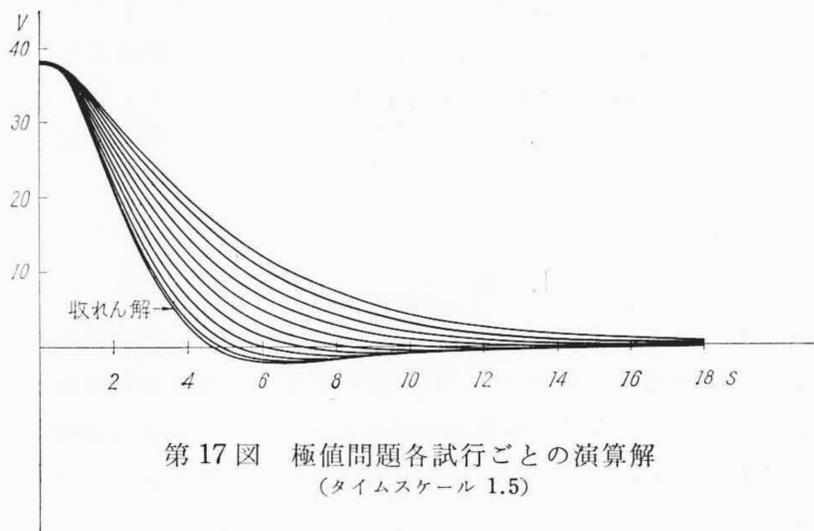
より∂F(λ)/∂λを計算し、これが零となる場所を極値とすることである。∂F(λ)/∂λが零になるようなλを見つけるためには、ある試行の結果∂F(λ)/∂λが得られたなら、この値に比例してλを変えれば、パラメータが正しい値から離れているときは大きく、正しい値に近づくとこまかく修正されて∂F(λ)/∂λ=0を満足するλに収れんする。CLOAPを用いてこの操作を自動的に行なうことができる。第14図はこの場合のブロック図を、第15図は操作のフローチャートを示している。

この方法を第16図に示す自動制御系の補償回路の最適利得λを定める問題に適用した。このような問題の場合、従来はその応答波形をみて操作者が直感的に適当な利得を定めていたが、もし最適の



T₁=0.07s T₂=0.16s T₃=0.18s
T₄=1.7s A₁=23, A₂=3.6 τ=0.78s

第16図 自動制御問題の1例



第17図 極値問題各試行ごとの演算解 (タイムスケール 1.5)

Criterion が与えられるなら上記の手法を用いこれを満足するパラメータを求めることは容易である。第17図はCriterionとしてステップ入力に対する誤差面積 $\int_0^t |\epsilon| dt$ を最小にするよう利得λを定める場合の各試行ごとの波形を示す。

極値を求めるには種々の方法(一定間隔でパラメータを変える方法や Steepest descent 法など)があり、収れん速度や安定性、あるいは簡単さの点で一長一短がある。ここに述べた方法は簡単で収れん速度は早いですが、比例定数の設定が適当でないと発散することがある。問題の性質がわからないときはパラメータをあまり間隔で変えつつ全範囲を試行し、パラメータと目的関数の関係をXYレコーダにプロットしておよその様子をつかみ、その極値付近をさらにこまかく試行する方法をとればよい。

6. 結 言

本 ALS 1000 形アナログ計算機はすでに各大学、研究所などに数多く納入されており、その高い精度と豊富な機能を発揮して各種のアナログ演算に使用されている。また一部の機能を付加して洪水シミュレータ、原子炉シミュレータなどとしても使用されている。

今後ますますふえる科学計算、自動制御系の解析、医学における人体の循環器、神経系統の解析への利用が期待される。またデジタル計算機と組み合わせて、より複雑な問題を短時間で処理するハイブリッド計算機としての使い方も大いに期待される。

終わりに本装置の構想をまとめるにあたって調査、討論に協力していただいた日立製作所本社および中央研究所のアナログ計算機の関係者と実際の設計製作にたずさわった日立電子株式会社小金井工場の関係各位に厚くお礼申し上げる次第である。