

試作電子管式アナログコンピュータの現状

野村民也・池田健・富田文治

鴨井章・長谷川毅

1. 緒言

当所の電子管式アナログ・コンピュータは、昭和27年度中間試作研究題目として、一応実用的規模のものが試作された。当初の装置の内容は、本誌第5巻第5号に報告した通りであるが、その後多少手を加えて、ある程度内容が改変されて現在に至っている。

中間試作研究として試作を初めるまでに、バラック・セットながらパイロット・モデルともいべき装置を作っていたので、回路的な面などには問題がなく、27年度中に一通りの動作は示したのであったが、その後連続して試用するうちに、幾つかの障害に際会した。特に夏期の電氣的に苛酷な周囲条件のもとで、多くの弱点が露呈された。そのため装置構成の変更を試み、漸く安定した動作を望みうるようになったのである。爾来、約一年半にわたって、精度向上のための試験に使用するかたわら、自動制御装置の解析、設計の問題をはじめとして、実際の問題も幾つか取り扱ってきている。

以下に述べるところは、この装置の概要と、解いた問題の例である。どんな問題が解きうるか、また、どんな問題を解くのに適しているかなどを解説して、御参考に資したいと思う。

2. 電子管式アナログコンピュータの特徴

周知のように、電子管式アナログ・コンピュータというものは、自動的に常微分方程式の解をグラフとして示すいわゆる微分解析機を、電子管回路の組合せによって構成したものである。計算の原理も、計算に必要な種々の要素も、それらが機械的に行われるか、電氣的に行われるかのちがいはあっても、渡辺技官等が担当して製作が進められている機械式微分解析機と、原理的には同じことである。構成を例にとってみると、機械式の場合のケルビン型積分機に対応して、電子管式では帰還増幅器を用いた積分回路があり、加算のためのギヤ装置に対応して、同じく帰還増幅器による加算回路があるといった具合になっている。

したがって、取扱いうる問題の種類とか範囲などの点も、原理的には同じであるが、実際には、それぞれの特徴によって、おのずから適、不適というものがある。

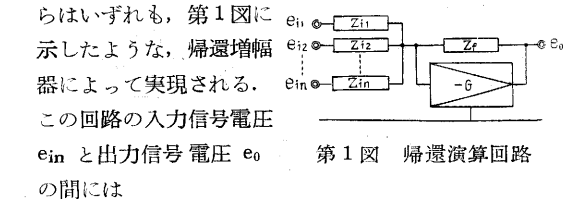
電子管式アナログ・コンピュータの特徴の一つは、計算速度が速いことである。現在の装置は繰返し型という方式になっていて、解はブラウン管オシロスコープの面上に静止図形として描出される。問題に従って計算要素の間に所定の結線を施せば、直ちに解の図形がブラウン管上にでるので、計算時間は事実上ないのと同じである。したがって機械式微分解析機では、非常に時間のかゝる問題、たとえば、解にでてくる振動の山の数が多いようなものや、多数のパラメータを変えて、その一連の結果から必要な事柄を導き出すような種類の問題であると、その特徴が生きてくる。後述の周波数特性の問題はこの種の例である。

電子管式アナログ・コンピュータの特徴の第2は、パラメータを変えることが容易で、しかも、繰返し型ではその解に及ぼす影響を、直ちに観察できる点である。後述の自動制御系の設計問題のように、過渡振動波形が、所望の特性を示すようなパラメータの値をきめたいというような問題は、至極具合よく処理することができる。その他、境界値問題など、cut & try である条件を充たす解を探すといった問題がこの種の例である。

電子管式アナログ・コンピュータの大きな欠点は、計算の確度が機械式微分解析機にくらべて低い点である。特に非線型や変定数などの問題は、そうした特性を導入する部分の確度が、機械式微分解析機の入力卓の確度にくらべて劣るので、解の確度がわるい。とりわけ、繰返し型は問題にもよるが、一般的にいつて誤差が大きくなる。大雑把にいうと、4~5%以上の確度を望むことは現在のところ無理であって、非常に高い確度が必要な場合、またそのような問題こそ、機械的の微分解析機が活躍すべき面であろうと思う。

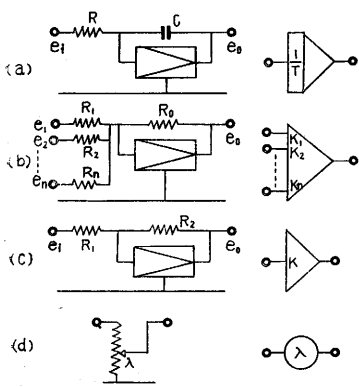
3. 現在の装置の概要

前述のとおり、電子管式アナログ・コンピュータも、積分や加算などの行える要素が基本となっている。これらはいずれも、第1図に



第1図 帰還演算回路

$$e_0 = - \sum_{n=1}^n \frac{Z_f}{Z_{in}} e_{in} \quad (1)$$



第 2 図 基本演算回路

の構成を示す。演算関係は

積分回路： $e_0 = -\frac{1}{pT} e_i, T = CR$ (2)

加算回路： $e_0 = -\sum_{n=1}^n K_n e_n, K_n = \frac{R_0}{R_n}$ (3)

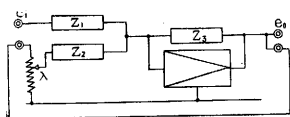
定係数回路： $e_0 = -K e_i, K = R_2/R_1$ (4)

これらの回路は基本としてよくでてくるので、記号を右に並べた図のようにきめておく。なお (d) はポテンシオメータで、 λ はその分圧比をあらわすものである。

帰還演算回路によって、上記以外にも種々の演算関係を実現できることは、前の報告に述べたとおりである。

こうした回路の主体となる増幅器は、いずれも同じ構成のもので、 Z_i, Z_f の内容次第で種々の演算関係が支障なく実現できるようにできている。このような増幅器を演算増幅器と呼んでおり、その数が多いほど、複雑な問題を扱う。

当初の設計では、演算増幅器が 20 台あり、そのうち 16 台はそれぞれ 2 台を 1 ユニットとして、一方は自由に演算関係を与えうるようにし、もう一方はそれに定数をかける定係数回路として使うようになっていた。この構成は主として温度上昇などの点で実用上思わしくない結果になったので、やむをえず各ユニットから定係数回路の部分を除去した。従って現在、演算増幅器は 8 台でその外に加算回路 4 台、符号変換回路 3 台、それと非線型要素が構成の主体となっている。演算増幅器の数が減ったために、問題を解く能力が低下し、時には確度のある程度犠牲にした無理な使い方をせざるをえない現状となっている。その後、帰還接続演算回路を考案し、それがこの種の装置に非常に有効であることがわかったので



第 3 図 帰還接続演算回路

の関係がある。したがって、 Z_{in}, Z_f を適当にえらぶことによって、入出力信号電圧の間に種々の演算関係を与えることができる。第 2 図は基本的なものとして (a) は積分回路、(b) は加算回路、(c) は定係数回路

現在の演算増幅器は、そのような接続に都合のよいように改められている。帰還接続演算回路というのは第 3 図

に示すような接続のもので、その大体の等価回路は第 4 図のようになる。第 4 図は一種の帰還演算回路であるから、その演算関係は式(1)より

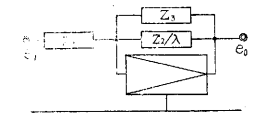
$$e_0 = -\frac{1}{Z_1} \left(\frac{Z_3 Z_2 / \lambda}{Z_3 + Z_2 / \lambda} \right) e_i \quad (5)$$

ただし λ : ポテンシオメータの分圧比

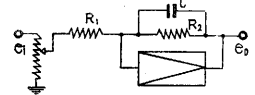
第 4 図からわかるように、帰還接続演算回路にすると、ポテンシオメータの調整によって、等価的に演算を規定するインピーダンスが可変になる。

後述の自動制御系の問題などでは、系を構成する各要素の伝達関数を表現する必要がある。たとえば代表的なものとして、時間遅れ特性 $K/(1+pT)$ の表現を考えると、もっとも簡単には第 5 図に示すように、帰還演算回路で実現できるが、この接続では T を細かにかえることが困難である。

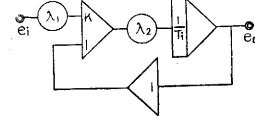
時定数をもポテンシオメータによって連続的に変化できるものとしては、第 6 図のように、積分回路や加算回路等を組み合わせる方法がある。この回路の伝達関数は



第 4 図 等価回路



第 5 図 $K/(1+pT)$



第 6 図 $K/(1+pT)$ の表現

$$\frac{e_0}{e_i} = \frac{\lambda_1 K}{1 + RT_i / \lambda_2} \quad (6)$$

となり、目的は果しうが演算増幅器の数がかさむ。

これに対し帰還接続演算回路をつかって、第 7 図のような構成にすれば

$$\frac{e_0}{e_i} = -\frac{\lambda_1 R_2 / R_1}{1 + p \cdot \lambda_2 CR_2} \quad (7)$$

すなわち時定数、利得定数ともに連続可変にできることになる。この方式を採用入れることによって、演算増幅器の利用率が著しく高められるのであって、われわれのところの装置のように、規模のあまり大きくないものにとっては非常に都合がよい。

4. 計算の実例

4.1 自動電圧調整装置の設計

発電機の実出力電圧を基準電圧と比較し、その差を磁気増幅器及び回転増幅機で増幅して、励磁機の界磁電流を制御する。発電機の電圧が基準電圧より上昇すれば励磁機の界磁電流を減少させ、したがって発電機の界磁電流が減って出力電圧が下る。逆に出力電圧が基準電圧より下れば励磁機の界磁電流を増加して、発電機の電圧を上

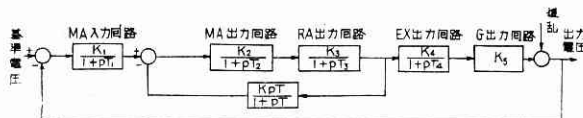
昇せしめる。このように電圧の偏差を常に修正し、一定出力電圧をえようとするもので、第8図のような構成に



第8図 自動電圧調整装置

なる。出力電圧が何かの擾乱で変動すると、訂正動作が始まるが、機器のインダクタンス等の影響で信号が遅れて伝わるために、訂正の行きすぎが起って、振動的に電圧が動揺する。設計が悪いと乱調状態に陥ることもある。このため第8図に示すような制動変成器を入れてあり、過渡変化の微分項を加えることによって動作の安定を図っている。問題は望ましい過渡特性を系が示すような制動変成器の定数を決めることである。

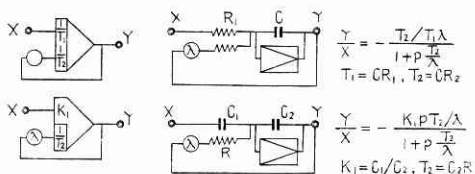
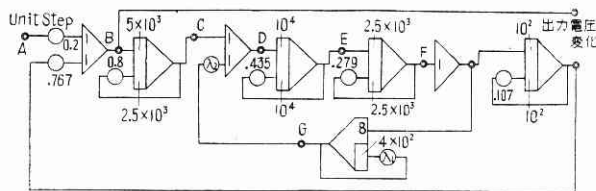
第9図は磁気増幅器が一段の場合のブロック線図。計



第9図 ブロック線図

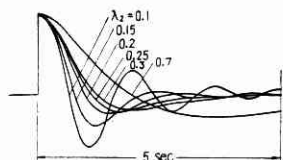
MA：磁器増幅器 RA：回転増幅器 EX：励磁機

算回路にすると第10図のようになる。各ブロックの伝



第10図 計算回路の一例

達函数は図示のような帰還接続演算回路によって表現してある。A点に単位函数状の擾乱を加えた時、B点に生ずる過渡変動(出力電圧の変動に相当)は、たとえば λ_2 をパラメータとすると、第11図のように変化する。



第11図 利得定数の変化による過渡レスポンスの変化

この場合、一番問題になるのは出力電圧の変動である

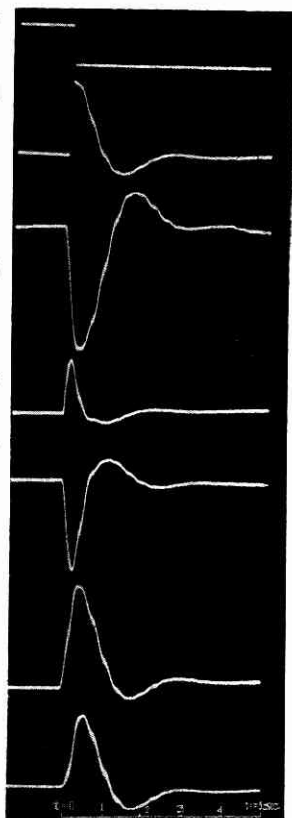
が、その他の機器の出力の過渡変化も調べておく

必要がある。第10図で指示ブラウン管をC~G点につなげば、これら必要なものを求めることができる。第12図は最適調整状態の各部の変化を示している。

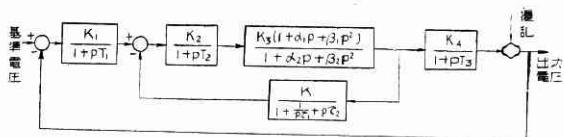
第13図は別の自動電圧調整装置のブロック線図である。これはやはり過渡変化が所望の形を示すような、 τ_1, τ_2 及び K を決定する問題で、前例よりパラメータが1個多いが、比較的容易に結果をえている。

この種自動電圧調整装置の設計例は、現在までに約30題解いている。

その結果から、類型的な問題については共通の性質が見付かって、設計の基準ができる状態と



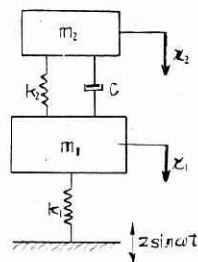
第12図 各部過渡レスポンス (上から A. B. C. D. E. F. G の各点)



第13図 自動電圧調整装置のブロック線図

4.2 二自由度振動系の解析例

ダイナミックダンパの設計のために、二自由度系の周波数特性に関して、広範囲にパラメータを変えた場合の計算資料を得る目的で、第14図に示すような振動系の正弦波状外力に対する定常解及び階段状外力に対する過渡解を求めた。この振動系の微分方程式は次式で表わされる。



第14図 2自由度振動系
 m_1, m_2 : 質量
 R_1, R_2 : ばね定数
 X_1, X_2 : 変位
 C : 減衰係数
 Z : 強制振動の振幅

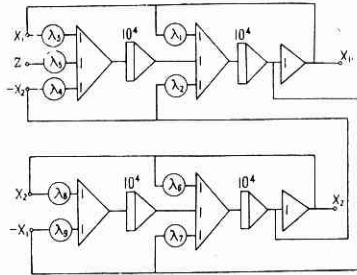
$$\left. \begin{aligned} p^2 x_1 + 2\mu\zeta\omega_1 p x_1 + (\omega_1^2 + \mu\omega_2^2) x_1 \\ - 2\mu\zeta\omega_1 p x_2 - \mu\omega_2^2 x_2 = \omega_1^2 Z (d) \\ p^2 x_2 + 2\zeta\omega_1 p x_2 + \omega_2^2 x_2 - 2\zeta\omega_1 p x_1 - \omega_2^2 x_1 = 0 \end{aligned} \right\} (8)$$

ただし

$$\mu = m_2/m_1, \quad \omega_1^2 = k_1/m_1, \quad \omega_2^2 = k_2/m_2$$

及び $\zeta = c/2m_2\omega_1$

(4)式を解くための計算器の結線を第 15 図に示す。

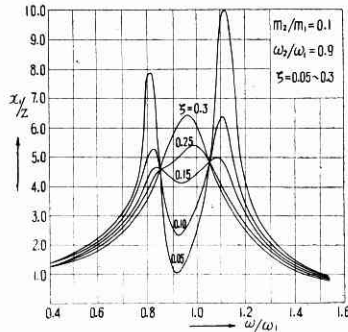


第 15 図

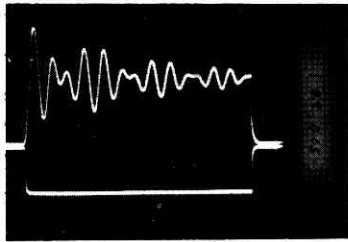
2 自由度振動系を解くための結線図

減衰量 ζ が小さくなると過渡状態が伸びるので計算器上での固有振動数なるべく大きくする必要はあるが、増幅器の周波数特性、位相遅れ等から当然制限

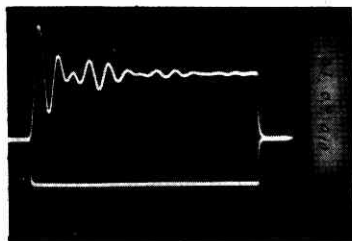
がある。現状では $\zeta=0.05$ 程度が限度である。正弦波は、別個の低周波発振器の出力を用いている。そのためブラウン管上の像は一般には非同期であるので、解の詳細を調べるためには不便であるが、定常状態の振幅、位相等を見るためには充分で、計算速度も非常に高められる。計算範囲は $m_2/m_1=0.05\sim 0.3$, $\omega_2/\omega_1=0.6\sim 10$,



第 16 図 計算結果の一例



(a)



(b)

$\zeta=0.05\sim 0.5$ で、結果の一例を第 16 図に示す。一般に共振周波数の誤差は極めて少ないが、 ζ が小さくなると共振点における振幅誤差が大きくなることは避けられない。しかし $\zeta > 0.1$ に対しては 3~5% 程度 ($\zeta=0.05$ のときは 10% 程度) の精度は期待し得る。

第 18 図は階段状外力に対する特性を示す写真である。下側の直線は外力 Z の大きさを示すラベルの数字は左側からそれぞれ m_2/m_1 , ω_2/ω_1 及び ζ の値

である。

4.3 2 次および 3 次自動制御系の特性

自動制御系の設計基準に M_p (閉ループ周波数特性の最大増幅度) を指定し、それに合うよう定数をきめる方法がある。しかしこれだけの規準では、過渡応答が果して望みの形になっているかどうかわからないし、また、他の設計規準 (たとえば 25% 減衰規準) などの関係も明らかでない。この辺は従来欠けていた面であって、その補充は資料として有用なことである。以下の問題は簡単なものではあるが、コンピュータの方向の一つの示唆になる例として挙げる。

第 18 図 (2 次系) の系では

$$M_p = K_1/\sqrt{K_1 - 0.25} \tag{20}$$

第 19 図 (3 次系) の系では

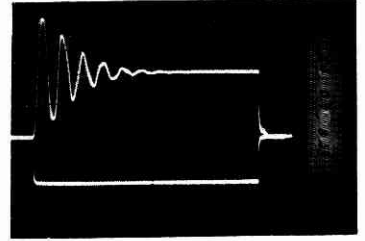
$$M_p = 4\zeta K_2(1 - \lambda^2)^{-1} [12\zeta K_2 + 2\{(3 - 4\zeta^2)\lambda^2 - 1\}]^{-1/2} + 4\zeta K_2 = 3\lambda^4 - 4(1 - 2\zeta^2)\lambda^2 + 1$$

計算は 2 次系について M_p をパラメータとして 1~2 の間変化した時の特性、3 次系については、 ζ 一定で M_p がパラメータの場合 M_p が一定で ζ をパラメータにした場合の一連の特性を求めている。

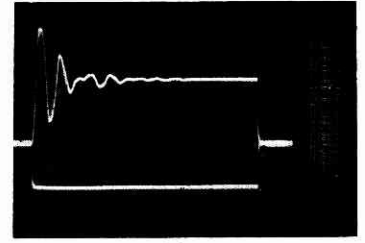
計算回路は第 20 図、

第 21 図、結果の一部を

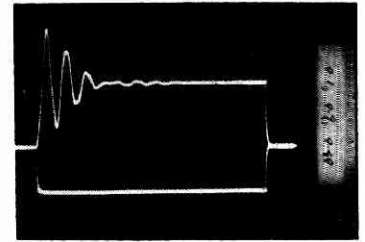
第 22 図に示す。これらの結果から他の規準との関連が



(c)

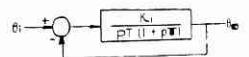


(d)

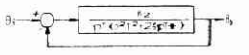


(e)

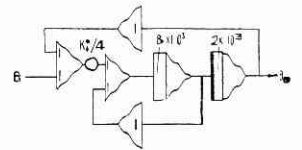
第 17 図 過渡解



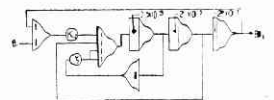
第 18 図 2 次系



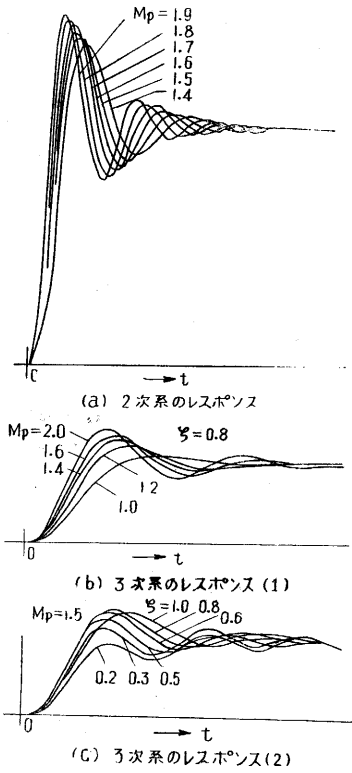
第 19 図 3 次系



第 20 図 2 次系の計算回路

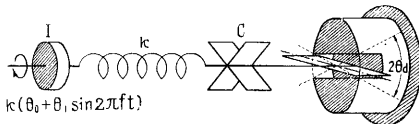


第 21 図 3 次系の計算回路

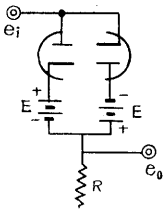


第22図 計算結果の一部

$$\begin{cases} \ddot{\theta} + C\dot{\theta} + k f(\theta) = k\{\theta_0 + \theta_1 \sin(2\pi f t + \phi)\} \\ | \theta | < \theta_d \quad f(\theta) = 0 \\ | \theta | \geq \theta_d \quad f(\theta) = \theta - \theta_d \end{cases} \quad (14)$$



第23図 ガタのある振動系



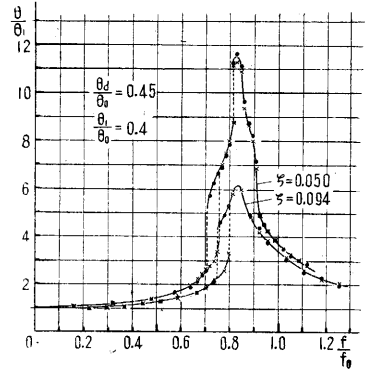
第24図 ガタ特性

求められ、また M_p 規準ではいろいろ不十分な点が多いことが明らかになりつつある。

4.4 ガタのある振動系の周波数特性

第23図のようにガタのある振動系に、正弦波外力が加わった場合の変位の周波数特性を求める問題である。振動方程式は次式で与えられる。

ガタ特性は第24図の回路で与える。これを F とすると、計算回路は第25図のようになる。正弦信号は、コンピュータの一部の要素を使



第26図 変位の周波数特性

$$\left(f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{I}} \right)$$

・は sin を加えた場合、×は cos を加えた場合で、安定解が一つしかない部分での両者の一致の程度は信頼度の目安になっている。

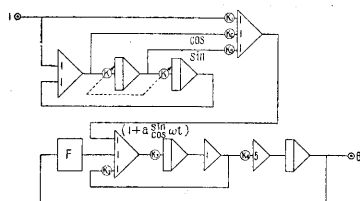
5. 結 言

以上、中間試作以降の電子管式アナログ・コンピュータの現状と、応用例について解説を試みた。応用は装置の開発と併行して進められたもので、まだまだむずかしい問題はないが、現在、梁の固有振動数の計算(変断面を含む)や、内燃機関の弁の開閉動作とカムの形状の関係など、いろいろ興味ある問題を扱う予定であり、結果をみた上で、また改めて報告したいと思っている。

電子管式アナログ・コンピュータは、最近各方面の関心をおつめているようである。その利用の分野をできるだけ広く採り、この方面の参考に資したいと考えている。そのためには問題がいろいろ与えられることが必要で、幸い現在の装置は、ある程度まで実用に耐えるようになってきているので、多少とも関連あると思われるものは是非照会して見ていただきたい。あるいは手に余ることもあろうし、場合によっては装置の拡充を要することもあろうが、そうした事を通じて更に装置が改良され、また、その結果が何らかの役に立ちうるならば、開発研究に当たっているものとして、喜びこれにすぐるものはない。(1955. 3. 10)

って、 $y + \omega^2 y = 0$ を解いて作っている。

結果は減衰項 θ_d/θ_0 , θ_1/θ_0 などいろいろ変化化する。一例を第26図に示す



第25図 計算回路 (F: ガタ特性)

微分解析機の積分装置 (表紙写真)

中心に見える透明なガラス円板が回転しながら、2本の平行に並ぶガイドレールの上を移動する。この円板の上に見える小さいローラーがガラス円板との摩擦によって回転する。ローの回転角として積分がとり出される。円板を移動する送りねじは高い精度を必要とする、手前に見える数字は円板の移動距離を示す。初期条件を入れるときに見る指示装置である。