

# 電子管式アナログ・コンピュータ

野 村 民 也

## 1. 緒 言

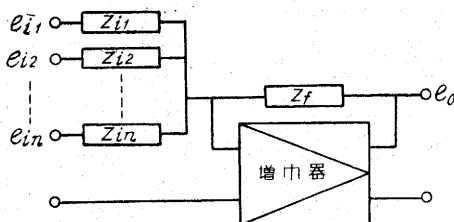
電子管式アナログ・コンピュータは、任意の常微分方程式の解を自動的に描出するもので、同種の他の装置、たとえば機械的微分解析機などに比べて、i) 建設に要する費用が少なくて済む、ii) 電気的な標準部品で組立てることができ、高度の工作技術を必要としない、iii) 取扱いが直観的、簡易で、特にパラメータの変換が容易にできる、などの利点があり、精度も設計次第で 1~5% 程度にできるので、特に高い精度を必要としない工学的分野の諸問題を対象とした場合に、有力な研究手段を提供しうるものである。

さきに、昭和27年4月号の本誌に、その基本原理について解説をしたが、さらに昭和27年度本研究所中間試験研究の一つとして、実用装置の試作を行ったので、その概略の報告をしたいと思う。

## 2. 動作原理

電子管式アナログ・コンピュータは、いわゆる、饋選演算回路によつて積分回路、加算回路などの直線的演算要素を実現し、これに種々の非直線性導入要素（任意函数発生回路、掛算回路など）を組合わせて、回路内の電位差の過渡特性を支配する微分方程式が、与えられた微分方程式と同形、相似的になるように調整し、電位差の過渡波形を記録することによつて、原方程式の解を自動的にグラフとして示そうとするものである。その詳細は前記の記事を参照していただくこととして、ここでは以下の説明に必要な程度に簡単な解説をしたい。

饋選演算回路というのは、第1図に示すような構成の回路である。出力端と入力端の間に  $Z_f$  というインピーダンスを接続し、これを通して負饋選がかかるようにな



第1図 饋選演算回路

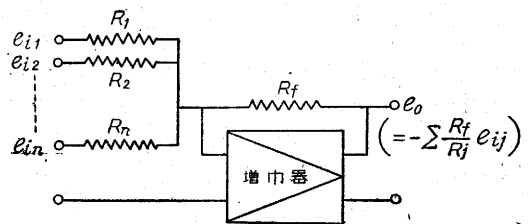
電子管式アナログ・コンピュータは、フレキシブルな微分解析装置として、自動制御系の解析、合成など、工学上の諸問題に広い応用分野がある。装置の構成や使用法などについて、昭和27年度中間試験研究を通じて行った結果について解説した。

つている。入力電圧を  $Z_i$  というインピーダンスを介して加えると、増幅器の増幅度が十分高いとき、増幅度の逆数程度の誤差で次式に示す関係が成立する。

$$e_0 = -Z_f \sum_{j=1}^n \frac{e_{ij}}{Z_{ij}} \dots\dots (1)$$

$Z_f, Z_i$  の与え方次第で、 $e_0, e_i$  の間にいろいろな演算関係をもたせることができる。第2図のようにすれば

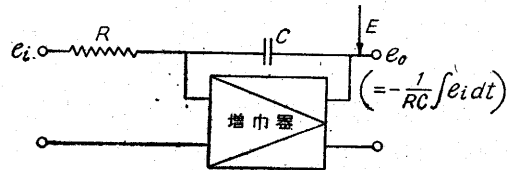
$$e_0 = -\sum_{j=1}^n \frac{R_f}{R_j} e_{ij} \dots\dots (2)$$



第2図 加算回路

となつて、加算回路ができるし、第3図であれば

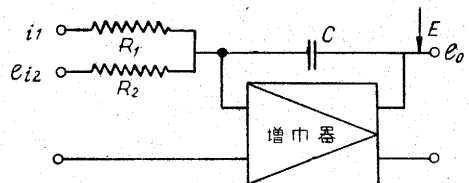
$$e_0 = -\frac{1}{RC} \int e_i dt \dots\dots (3)$$



第3図 積分回路

すなわち、積分回路ができる。出力端に一定電圧  $E$  を重畳して加えると、これが積分定数（微分方程式の解といえば初期条件）を与えることになる。第4図の回路にすれば、

$$e_0 = -\left[ \frac{1}{R_1 C} \int e_{i1} dt + \frac{1}{R_2 C} \int e_{i2} dt \right] \dots\dots (4)$$



第4図 積分の和

第 1 表

	$Z_i$	$Z_f$	演 算 関 係	備 考
1			$e_o = -RC \frac{de_i}{dt}$	微 分
2			$e_o = -\frac{1}{CR} \int e_i dt$	積 分
3			$e_o + CR_1 \frac{de_o}{dt} = -CR_2 \frac{de_i}{dt}$	不完全微分
4			$e_o = -\left[ \frac{R_2}{R_1} e_i + \frac{1}{CR_1} \int e_i dt \right]$	
5			$e_o = -\left[ \frac{R_2}{R_1} e_i + CR_2 \frac{de_i}{dt} \right]$	
6			$CR_2 \frac{de_o}{dt} + e_o = -\frac{R_2}{R_1} e_i$	不完全積分 (時間遅れ)
7			$C_1 R_1 \frac{de_o}{dt} + e_o = -\left[ C_1 R_2 \frac{de_i}{dt} + \frac{C_1}{C_2} e_i \right]$	
8			$C_1 C_2 R_1 R_2 \frac{d^2 e_o}{dt^2} + (C_1 R_1 + C_2 R_2) \frac{de_o}{dt} + e_o = -C_1 R_2 \frac{de_i}{dt}$	非 振 動
9			$e_o = -\left[ \frac{1}{C_2 R_1} \int e_i dt + C_1 R_2 \frac{de_i}{dt} + \left( \frac{R_2}{R_1} + \frac{C_1}{C_2} \right) e_i \right]$	

となつて、2つの入力電圧の積分和を与えることができ、回路の節約になる。但し、この場合、両積分定数は双方共通になり、独立に与えることはできない。インピーダンスとしては、抵抗と容量の組合せによつて構成し、誘導の使用は避ける。積分や加算以外にもいろいろな演算関係を実現することができるが、そのうち簡単な場合を列挙すると、第1表のようになる。

基本的部分はそのままで、外部回路の変形だけで種々の演算形式を与えるのは、電子管式アナログ・コンピュータのみが行うことで、実用上大きな利点の一つになる。

このような直線の演算回路に、必要に応じ非直線導入要素を組合せて、原系に相似な系をコンピュータにつくる。解はその過渡現象を記録することによつて自動的にえられる。この場合、適当な周期で全回路を断続し、繰返し過渡現象をおこさせ、陰極線オシログラフの横軸をこれに同期して掃引すれば、解を静止図形として描出することができる。この図形は必要な変数領域にわたる解になっているから、機械的微分解析機のように解を描き終るまでに時間がかかるようなことがなく、たとえばパラメータを変えれば、直ちに図形変化として結果がでるので、実用上便利な点が多い。今回試作の装置は、この種繰返し型のコンピュータになっている。

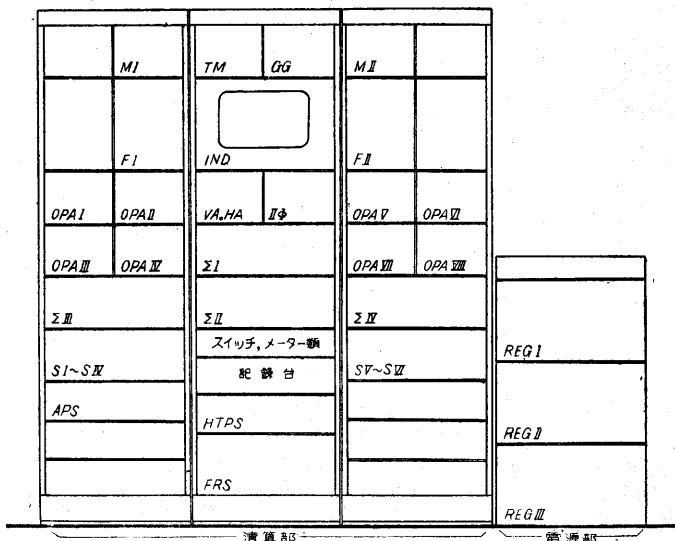
3. 試作装置の概要

試作装置は標準の自立架3基と、別に電源装置とからできていて、その外観は第5図に示すとおりである。電気的な系統は第6図に示す。以下外部の概略を逐次説明する。

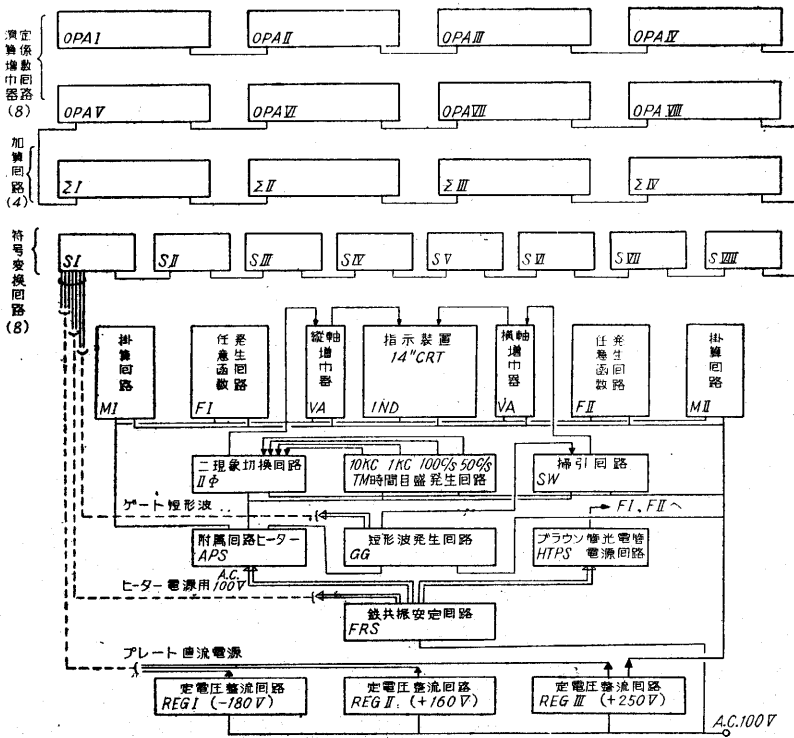
3.1. 演算増幅器および定係数回路

回路構成は第7図に示すとおり、前記饋還演算回路が2段で1つのユニットになっている。1段目は演算増幅器として、ターミナル間に抵抗や容量をつないで、所要の演算関係を実現する。ターミナルの数が多いのは、直、並列接続が便利にできるためである。2段目は加算回路で、一方の入力は1段目の出力をうけて、これに、 $k \cdot R_2/R_1$ なる定係数が

かかるようになっていて、 $k$ は精密ポテンショメータ(100目盛、読取精度 $\pm 0.1\%$ 較正目盛附)の分圧比で、係数を連続に変化できるようになっている。 $R_2/R_1$ は約20で、調整によつて、 $k=1$ のとき、ちょうど20.0の係数を与えるようにできている。加算回路のもう一方の入力には、 $\pm 50V$ の矩形波から分圧した任意の大きさの矩形波が加えられ、これで初期条件を設定するようになっている。この初期条件用入力は、スイッチSで切り離すことができる。各増幅器は抵抗-容量結合であるが、直流分保存回路がついており、零レベル調整のポテ



第5図 電子管式アナログ・コンピュータ正面配置図



第 6 図 電気的系統図

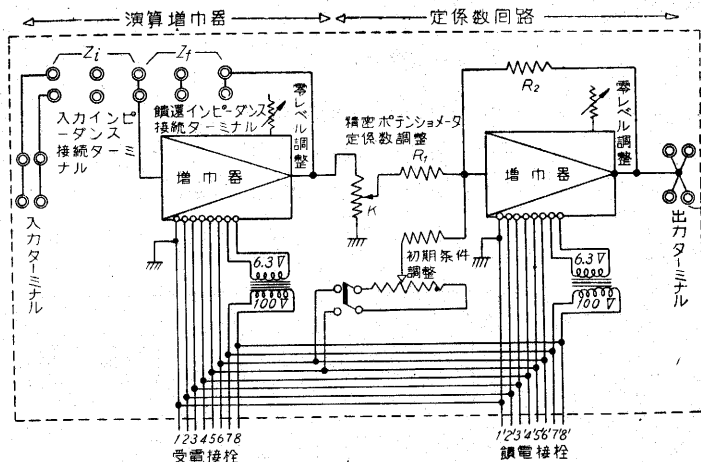
ンシヨメータは無入力の時出力が零になるよう調整するためのものである。電源は B 電源として +250V, +160V, -180V の三種が定電圧整流回路から供給され、ヒータのためには、ヒータ・トランスを自蔵している。こうするとヒータ用の供給電圧は A.C. 100V になるので、電流が小さくなり、図示の饋電接栓から次のユニットの受電接栓へと、次々と接続して行くことができる。ヒータを 6.3V 直接で供給すると、電流が大きいので接続線による電圧降下が効いて、このような逐次の接続は困難である。繰返し型とするため回路を断続する信号として、±50V の矩形波が加えられている。出力ターミナルが 4 個あるのは、各部に出力を分けることを考慮してのことであり、入力ターミナルが 2 個ずつに分かれているのは、前述の演算+加算の形に接続できるよう配置したものである。今回の試作装置には、このユニットが 8 組ある。

3.2. 加算回路

回路構成は第 8 図。4 入力に加算回路になっている。各入力は、それぞれ同様の精密ポテンシヨメータによつて、係数を 0~1 の間連続に変化させて加えられるようになっている。饋選抵抗、入力抵抗はすべてひとしくえらんであり、精度は 0.2% 程度である。増幅器は前記演算増幅器および定係数回路のそれと同じ構成で、電源の供給方法も同形となっている。今回の試作装置は、このユニットを 4 組もつている。

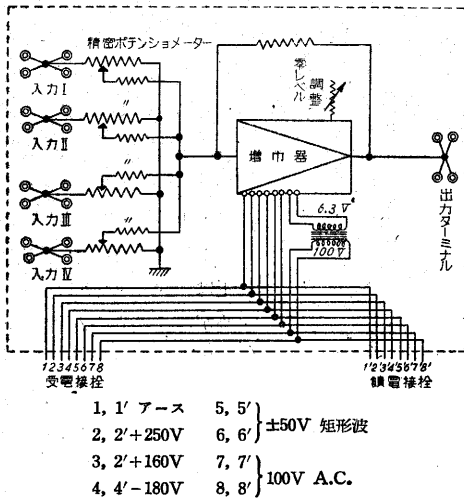
3.3. 符号変換回路

回路構成は第 9 図。量に -1 をかける回路で、加算回路の入力を 1 つだけにしたものである。増幅度は小さくてよいので、球数も少く、1 つのユニットに 4 組入っている。試作装置には、このユニットが 2 組ついている。

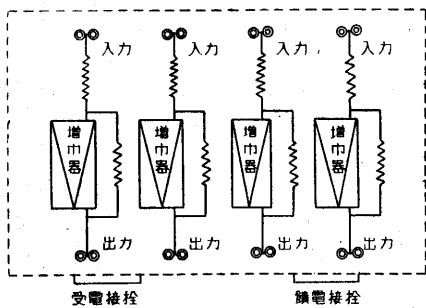


- |                 |       |
|-----------------|-------|
| 1, 1' アース       | 5, 5' |
| 2, 2'+250V D.C. | 6, 6' |
| 3, 3'+160V D.C. | 7, 7' |
| 4, 4'-180V D.C. | 8, 8' |
- ±50V 矩形波  
100V A.C.

第 7 図 演算増巾器及び定係数回路ユニット



第8図 加算回路(4入力) ユニット



第9図 符号変換回路ユニット

3.4. 非直線導入要素

さきに解説したブラウン管と光電管を組合わせた任意函数発生回路2組と、2乗特性の組合せによる掛算回路2組とからできている。任意函数発生回路用には、特に残光時間の短い螢光体として、 $ZnO-Zn$  を用いたブラウン管を用いている。実測による残光減衰時定数は、 $10^{-6}$ 秒の程度で、十分急峻な傾度をもつ図形にも忠実に追従しうる。掛算回路の2乗特性は、双三極管の特性曲線の彎曲部を用いているが、精度1%を目標とすると変数領域が狭くなり、また安定度も十分でないので、将来改良の余地を残している。

3.5. 指示回路および附属回路

指示用ブラウン管は、対角線長14吋、矩形テレビジョン受像管14CP4を用いている。時間目盛回路に自蔵の10KC発振器の出力をインパルスに変換し、これで高周波トランス回路を駆動して高圧を作り、加速電圧として用いている。縦軸増幅器は6L6 2本によるプッシュ・プルの電流増幅器に、2段の電圧増幅回路をつけたもの、横軸増幅器は6L6 プッシュ・プルの電流増幅器に、電圧増幅回路1段を組合わせている。このように大電流となるのは、偏向コイルを直接励磁するためで、将

来は十分特性のよい出力変成器を入れて、小型化を図るべきであると考えている。二現象切換回路は、たとえば変数とその微係数を同時に観測したいというような目的のために、二現象を交互に切換えて、二重の図形をだすためのもので、必要に応じて回路内に挿入できるようにしてある。掃引回路は、時間目盛回路からの同期信号を受けて、掃引用鋸歯状波を発生する。

時間目盛発生回路は、横軸に時間間隔の目盛パルスを入れるための信号をだすもので、10KCの発振器から周波数を通降し、1KC、100c/sのインパルスをつくる。10KC、1KCのインパルスは、常時、2現象切換回路の1方に加えられており、必要に応じ双方、または一方を消すこともできる。100c/sの信号を双安定マルチバイブレータに加えて50c/sの矩形波をつくり、これで回路断続用の±50Vの矩形波発生回路を駆動する。同時に50c/sのインパルスを、掃引回路および2現象切換回路に、それぞれ同期信号として送っている。また、10KCのインパルスは、指示回路の高圧発生回路に送られている。

3.6. 電源

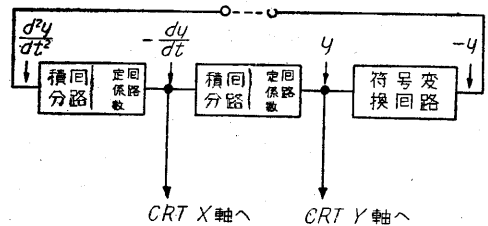
電源は、+250V、+160V、-180Vの3種の真空管安定式定電圧電源回路(最大電流各0.5A)を、電源装置用筐体に格納している。任意函数回路のブラウン管と光電管用高圧は、架の1つのパネルに取付けられ、また500VAの鉄共振安定回路でヒーター回路と、この高圧電源を安定化している。スイッチ類、メータ類は、架のパネルの1つに集中して取付けられ、操作上便利になるよう考慮している。全装置が動作した場合の、総所要電力は約1.3KWである。

4. 実用試験結果例

4.1. 精度試験一その1

一般に微分解析機の総合精度決定には、サークル・テストというのをす。第10図の接続は、

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \left(\frac{k}{CR}\right)^2 y = 0 \dots\dots (5)$$



第10図 サークル・テスト結線図

を解く接続で、周知のようにこれは正弦振動の方程式である。図示のようにyとyの出力を、それぞれブラウン管の両軸に加えると、誤差のない場合には完全な楕円

軌跡をたどる筈である。誤差があると、解の 1 サイクル毎に振幅が変化するので、渦巻形となる。その振幅の変化から誤差を求める訳である。

積分回路その他の演算関係は、近似式であるから、若干の誤差の混入は避けられない。理論的な解析によると、第10図の接続によるコンピュータの解は次式になる

$$y = A \epsilon \left( -\frac{1}{\mu_0 T_i} + \frac{w \theta_w}{\mu_0} \right) t \cos(\omega t + \phi) \dots (6)$$

ここに  $T_i = CR \dots$  積分回路時定数  
 $\mu_0$  : 増幅器中心増幅度  
 $\theta_w$  : 増幅器の  $w$  における位相推移  
 $w = \frac{k}{CR}$  : 角周波数

解を  $\tau$  という時間で描出するとすれば、誤差  $\epsilon$  は、およそ次式で与えられる。

$$\epsilon = \left[ -\frac{\tau}{\mu_0 T_i} + \frac{w \theta_w \tau}{\mu_0} \right] \times 100(\%) \dots (7)$$

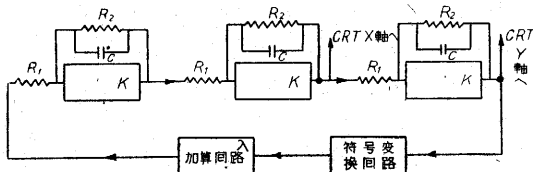
角周波数の小さいうちは、(7) 式第 1 項により減衰があらわれ、大きくなると第 2 項が効いて発散があらわれる。試験は  $T_i = 0.005$  (sec),  $k = 30$  でおこなつた。 $\tau = 0.01$  (sec) で約 10 サイクルの波形となるが、この場合の誤差の実測は約 +0.6%。また、 $T_i = 0.0025$  (sec),  $k = 30$  (約 20 サイクルの波形になる) の時、誤差は +2% となつた。増幅器の中心増幅度約  $3 \times 10^3$  倍、周波数上限 20 KC/s。この数値から (7) 式の値を計算した結果は、実測とよく一致している。

4.2. 精度試験—その 2

第 11 図では第 1 表 6 の回路を 3 段接続して閉回路としている。この場合

$$\lambda \left( k \frac{R_3}{R_1} \right)^3 = 8 \dots (8)$$

但し、 $\lambda$  : 加算回路ポテンシオメータ分圧比



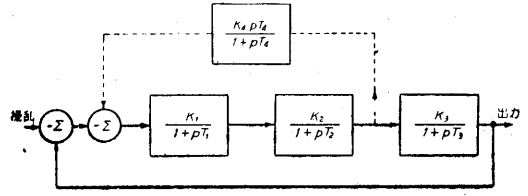
第11図 3 段時間遅れ系

の時、定振幅正弦振動の解となり、8 以上なら発散、以下なら減衰を伴つた解になる。サークル・テストと同様、図示の 2 点の出力をブラウン管の両軸に加え、 $\lambda$  を変化して軌跡が一定の楕円になる点を求める。この点は (8) 式の成立する点である。 $(k \cdot R_3/R_1)^3 = 38.36$  の場合、 $\lambda = 0.210$  が実測された。理論値は  $\lambda = 0.209$  で、誤差は 0.5% である。

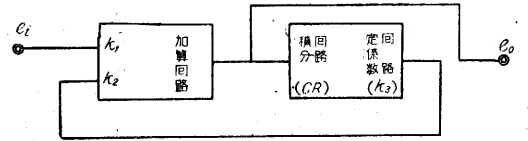
4.3. 自動制御系の解析、合成

対象となつたのは第12図に示すような、3段の時間遅れ要素を含む閉ループ自動制御系で、その儘では乱調状態に陥るので、点線に示すような乱調防止回路を入れて安定

化を図っている。乱調周波数を求めること、乱調防止回路の定数  $K_4$  および  $T_4$  を与えることなどが目的である。



第12図 3 段時間遅れ系

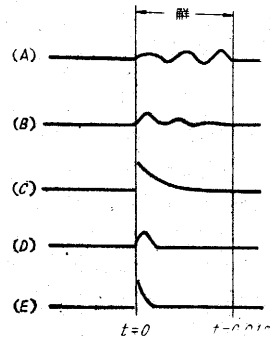


第13図 乱調防止回路の構成

乱調防止回路は不完全微分回路で、第 1 表 3 の構成で実現できるが、ここではパラメータを自由に変換しうするために、第 13 図の接続によつた。この場合、

$$e_0 = - \frac{k_1 \cdot p \frac{CR}{k_2 k_3}}{1 + p \frac{CR}{k_2 k_3}} e_i \dots (9)$$

となり、 $K_4, T_4$  をポテンシオメータで連続に自由に変えることができる。第14図は記録の一部で、(A) は乱調防止回路のない場合で、明かに発散が見られる。(B) は乱調防止回路が入っているが、未だ十分調整がとれていない状態で、安定(収斂する状態)ではあるが振動が残り、制御応答としては不十分である。その時の乱調防止回路の特性(単位関数入力に対するもの)を(C)に示す。(D) は最適調整状態での制御応答で、十分満足の行く結果になつている。(E) はその時の乱調防止回路の特性である。これらの



第14図 制御応答の記録

記録から決めた値と、第12図を実際に製作した時の諸定数とは、かなりの一致を示し、実用的に設計の目安を十分与えることが認められた。

5. 結 言

以上、中間試験研究として実施した内容を要約して述べた。定係数直線型の系については、当初企図した程度の総合精度がえられているが、非線型、または変数係数型についての検定は、将来に結果をまつ状態である。実用性にも幾つか問題点を残していることも明らかになつたが、いずれも将来改良を続けたい予定でいる。終りに終始御鞭達頂いた星合教授、装置の組立を担当した大野保君、部品の手配に援助された倉茂周芳氏、西尾秀彦氏に厚く感謝の意を表する次第である。(1953. 3. 30)