

運 転 曲 線 計 算 装 置

Train Simulator

沼 倉 俊 郎*

Toshiro Numakura

島 田 公 明**

Kimiaki Shimada

北 野 進**

Susumu Kitano

矢 崎 英 之***

Hideyuki Yazaki

内 容 梗 概

運転曲線は列車の運行上不可欠なものであり、従来多くの熟練者の手で長時間をついやして作られていた。本計算装置はこのカーブの作製を自動的行わんとするものである。

ここでは日本国有鉄道技術研究所の御指導により日立製作所が製作した運転曲線計算機の原理、内容、計算例などの概要につき述べる。

1. 緒 言

交通量、輸送量の増大に伴い、列車の安全運転はますます重要な問題となってきた。このために列車の運行状態を現わす運転曲線を作製し、これを基礎資料として検討を重ねた上で列車ダイヤを正確に定めねばならない。この運転曲線の作製は、従来熟練者が長時間をついやして計算し机上で作っていたのであるが、本装置によればさほどの熟練を必要とせず比較的短時間でこれを行うことができる。

本装置は国鉄技術研究所自動制御研究室の御指導のもとに、33年3月完成されたものであり、その機能および内容の概略をここに紹介する。

2. 本計算装置の原理

2.1 基本演算式

列車を力学的質点とみなしたとき、その運動を表わす方程式は次のとおりとなる。

$$W \frac{dV}{dt} = T(V) - R(V) \pm G(S) - B(S) \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = V \quad (2)$$

ここに W : 列車重量

V : 列車速度

t : 時間

S : 走行距離

$T(V)$: 引張力

$R(V)$: 走行抵抗

$G(S)$: 線路勾配

$B(S)$: 制動力

列車を力学的質点とみなしたという点は、従来の経験から運転曲線はこのようにして求めたものでよいことが認められている事実に基いている。

また、電気車の場合には消費電力は次式により計算される。

$$P = \int_{t_1}^{t_2} EI(V) dt \quad (3)$$

ここに P : 消費電力量

$I(V)$: 電動機電流

E : 電車線電圧 (計算中は一定)

本装置はこれらの計算で t 以外の諸量を電圧値に対応させ、この電圧値の時間的变化により列車の速度 V 、進行距離 S 、消費電力量 P の関係を求める一種のアナログ計算機である。

これら諸量の意味および単位は本装置の場合次のようになっている。ただし実際には本機では(1)式の両辺を W で割った式、つまり下記の諸量を加速度の単位で与えるので、 T 、 R 、 G 、 B は加速度の単位となっている点に注意されたい。

(1) 引張力 T

機関車または電車固有の特性による引張力で、速度 V の函数である。単位は km/h/s

(2) 走行抵抗 R

列車抵抗の一種であり、機械抵抗に関する定数 a 、 b および空気抵抗に関する定数 c を含む次のような速度 V の二次式で表わされる。単位は km/h/s

$$R = a + bV + cV^2$$

(3) 勾 配 G

傾斜角が小さい場合、勾配抵抗を G 、勾配を千分率で表わした値を n (‰) とすれば

$$G = 3.53 \times 10^{-2} n \text{ (km/h/s)}$$

という関係が成り立つ。本装置は後述のように勾配 n はテープに穿孔されて計算機に与えられるが、演算中に上記の関係を満足する加速度 km/h/s の単位に変

* 日立製作所中央研究所

** 昭和電子株式会社

*** 日立製作所戸塚工場

換されたアナログ量となる。

(4) 制動量 B

制動量電圧は距離に応じて断続されて印加されるがこの単位も加速度 km/h/s に変換されている。

(5) 電流 I

T と同様に、列車の電動機特性による電流で速度 V の函数であり、単位はアンペアである。

2.2 基本演算式と本計算機との関係

本装置では Time Scale は使用範囲から考えて2倍にとっているため、実際の演算式は次のようになる。

$$\frac{dV}{dt} = 2 \left(\frac{T-R}{W} \pm G - B \right) \text{ or}$$

$$V = 2 \int \left(\frac{T-R}{W} \pm G - B \right) dt \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{dS}{dt} = 2V \text{ or } S = 2 \int V dt \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{dP}{dt} = 2I \text{ or } P = 2 \int I dt \dots\dots\dots (6)$$

また、各演算要素の最大出力電圧は100Vとなっているため、速度、距離、加速度に対応する電圧を次のように定めこのようなアナログ量に従って演算が行われる。

(1) 速度 $V_{\text{max}} = 150 \text{ km/h} = 100 \text{ Volt}$

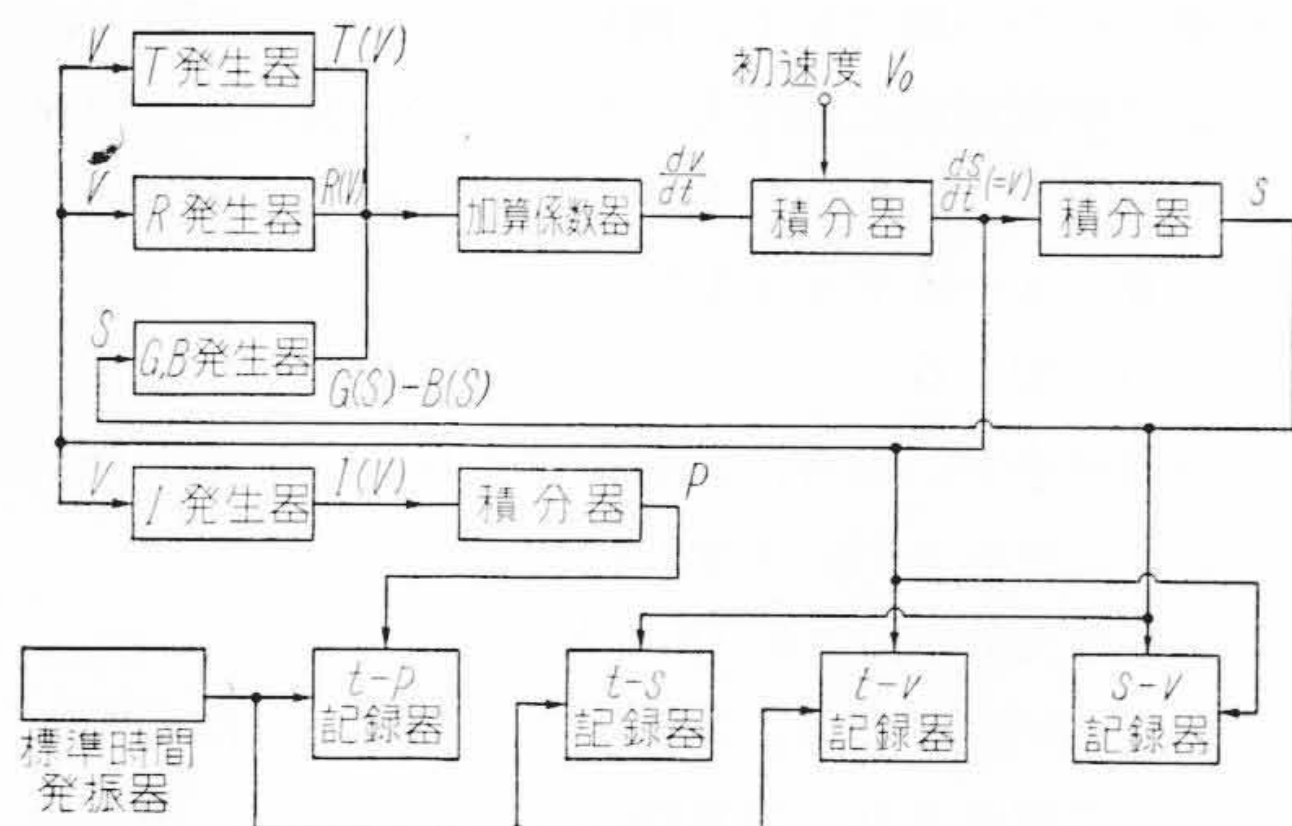
(2) 距離 $S_{\text{max}} = 10 \text{ km} = 100 \text{ Volt}$

(3) 加速度 $2 \text{ km/h/s} = 1,000/37.5 \text{ Volt}$

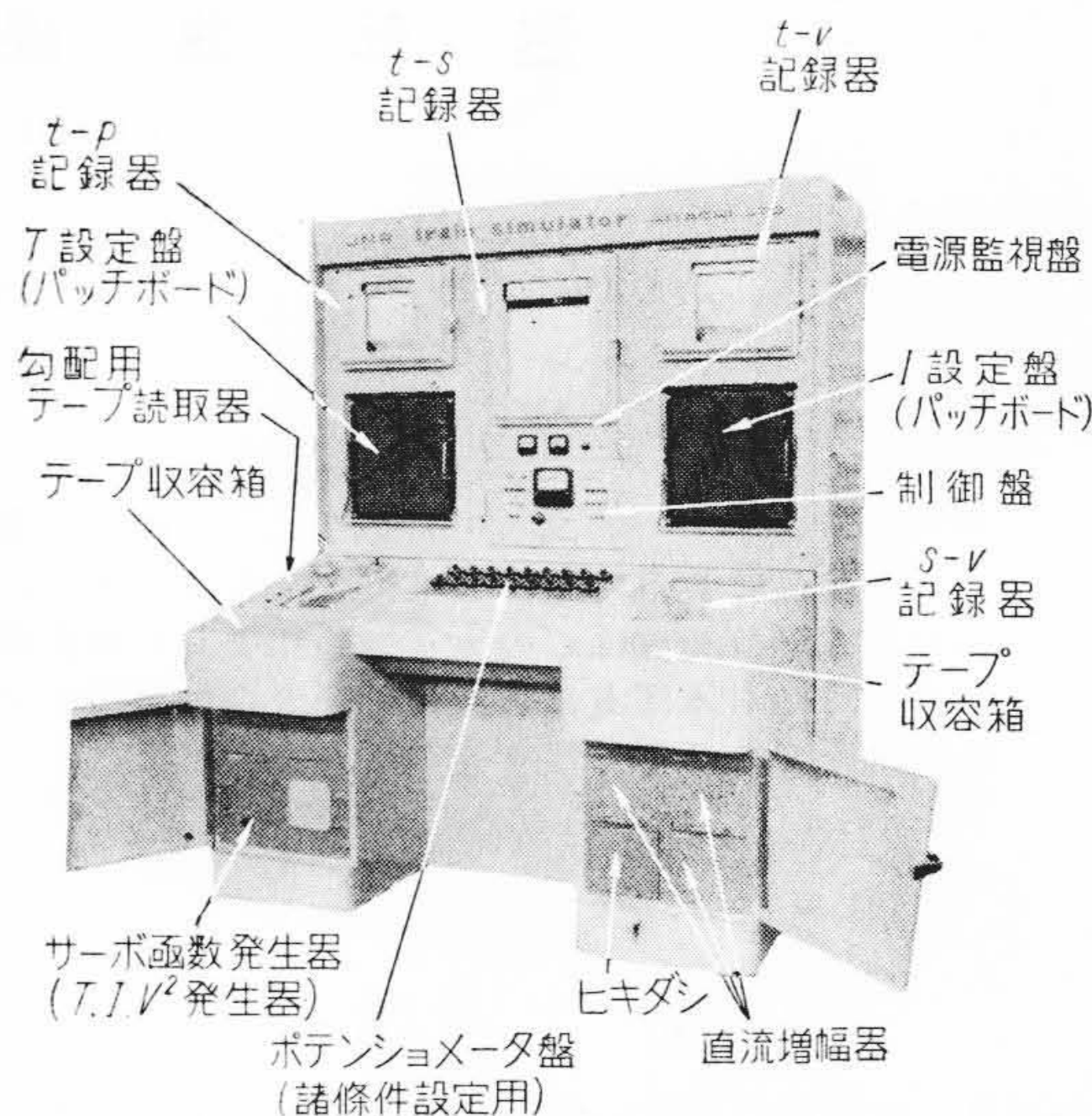
2.3 原理図および実装写真

以上に述べたような演算を行うために、本装置内部において第1図のブロック線図に示すような接続がなされている。また、各要素の実装場所を第2, 3図に示す。

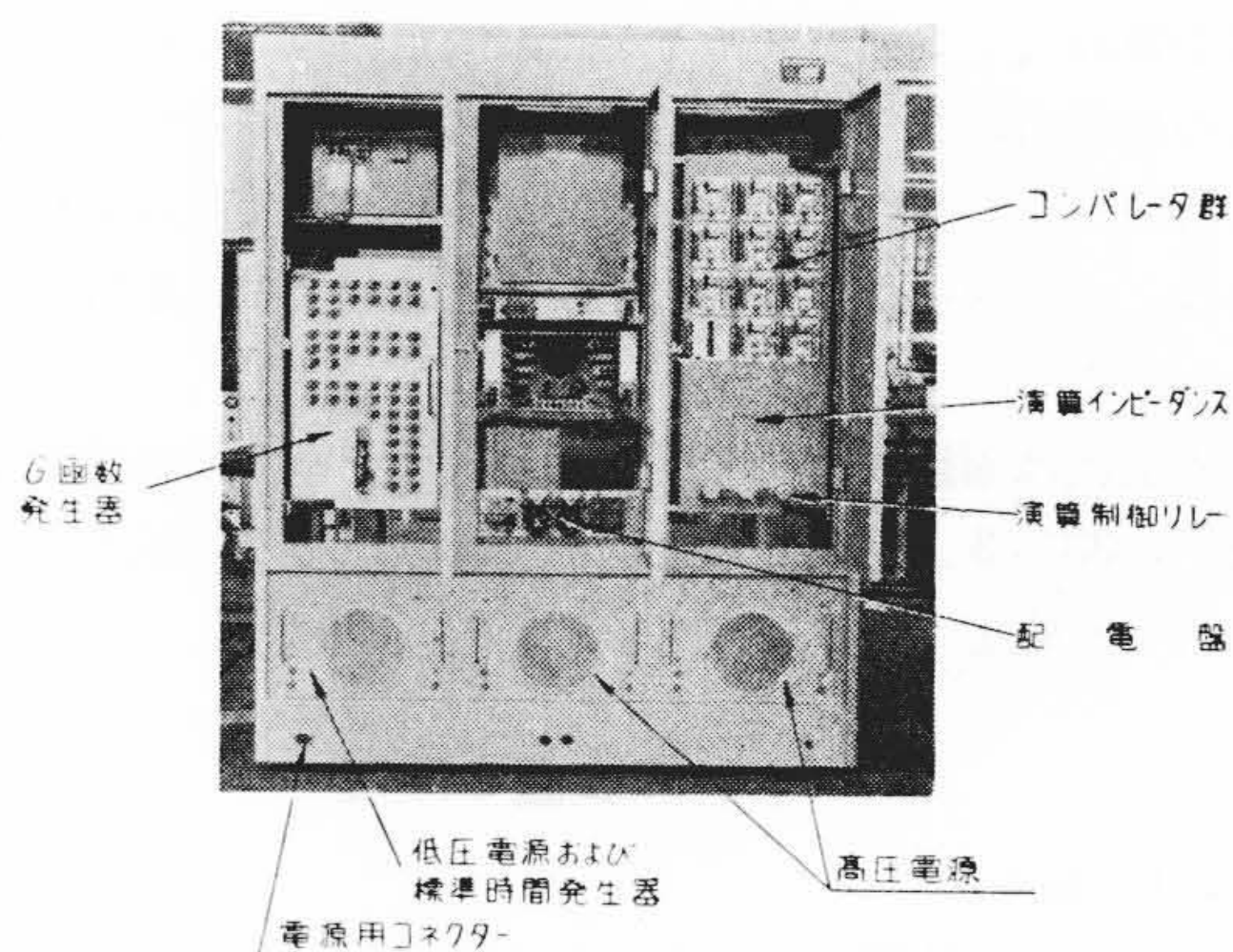
T および I の函数は各パッチボードにて所要の $T(V)$ および $I(V)$ カーブを設定することにより、本体机下の左扉内にあるサーボ函数発生器よりアナログ量として与ることができる。勾配函数 G はテープを本体机上の左側にあるテープ読取器にかけることにより、背面の G 函数発生器が動作してテープに穿孔されたデジタル量がアナログ量に変換される。制動量 B は、机上のポテンシ



第1図 本装置の原理的ブロック線図



第2図 正面実装図



第3図 背面実装図

メータ盤の運動条件ヘリポットの設定により、その設定条件に応じた距離に達した時にステップ電圧として印加される。

走行抵抗 R は前述のように

$$R = a + bV + cV^2$$

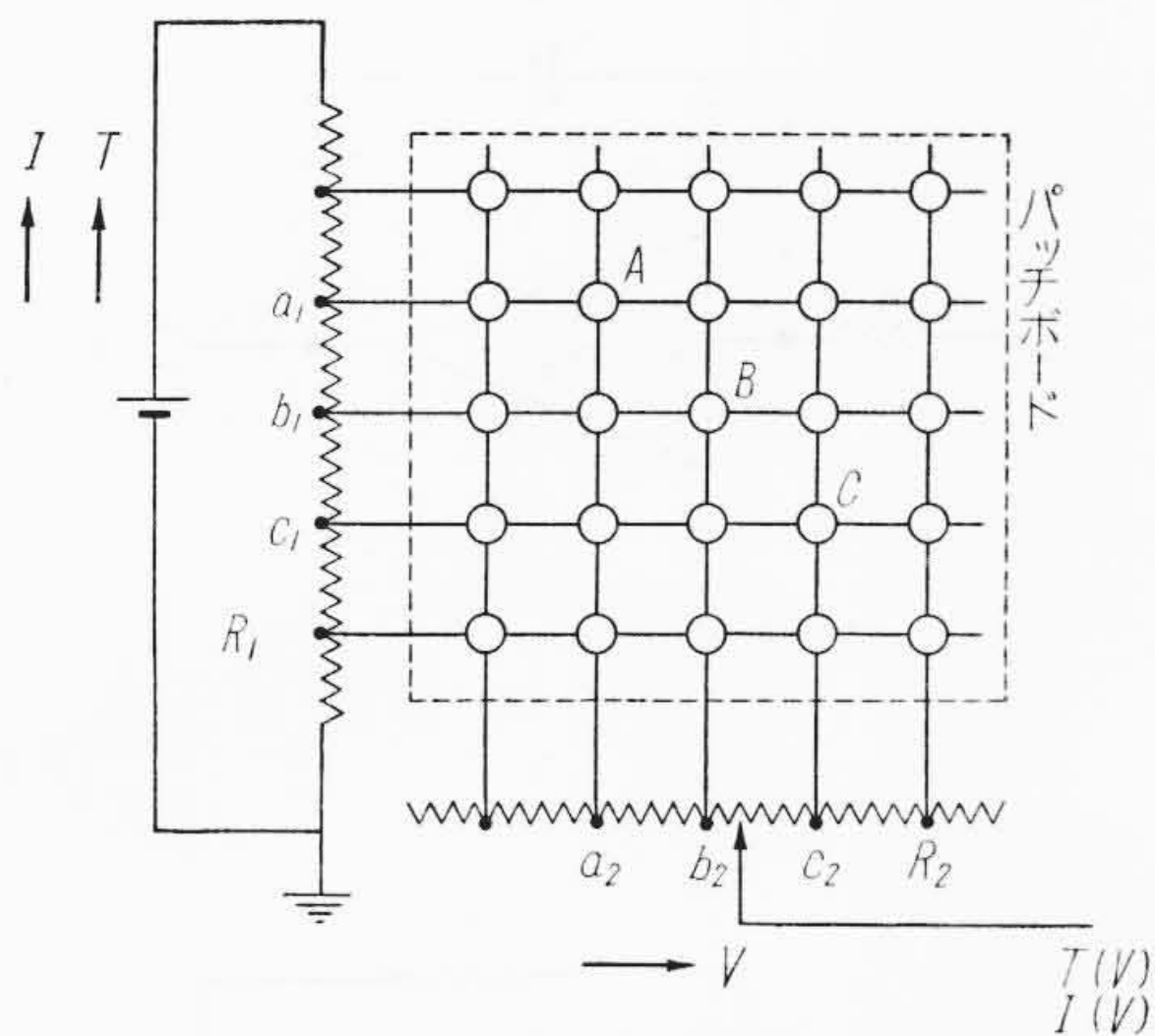
であるが、 a 、 b 、 c はポテンシオメータ盤列車条件ヘリポットで設定され、 V^2 は T 、 I 発生用のサーボ函数発生器で作出される。

そのほか11台のコンパレータと各種条件設定用ヘリポットを組合せて演算を制御している。

3. 各演算要素について

3.1 T 、 I 函数発生装置

この部分はサーボ機構と設定機構の二つの部分より成りたっている。函数発生装置としては各種あるが、本装



パッチボードの縦横の線は、孔にプラグを挿入したときのみ、その場所が接続される構造になっている。また、 R_2 は函数発生用のポテンシオメータで、第5図の P_2 または P_8 に相当する。

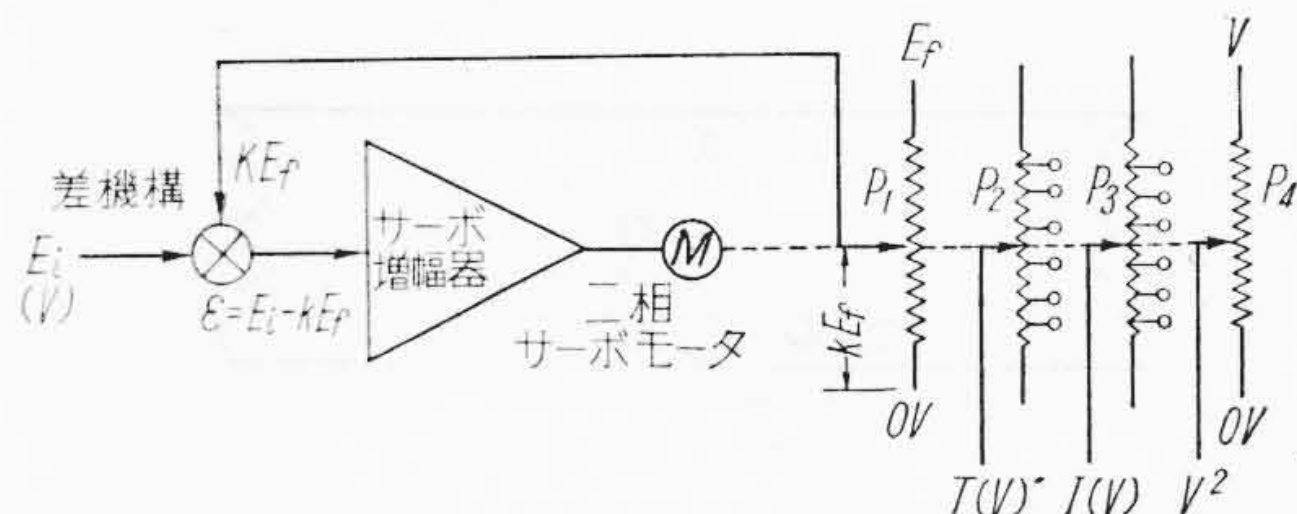
第4図 T , I 函数設定機構原理図

置では安定性と確度がすぐれているサーボ函数発生器を使用した。 T も I もまったく同一な機構であって、函数の発生は縦横に約 2,600 個の孔をもつパッチボードに T または I の函数カーブを設定することにより行われる。この函数発生の原理は次のようなものである。

第4図に示すように縦軸 T (または I) および横軸 V にはそれぞれ一様に巻かれた抵抗 R_1 , R_2 があり、これから等間隔にたくさんのタップが出されていてパッチボードに接続されている (この抵抗の関係は $R_1 \ll R_2$ であり、 R_1 には大きな電流が流れている)。パッチボードの上でこれらが交叉する孔にプラグを差込むと、縦横二つの抵抗器のこの孔に対応する二点が電氣的につながれる。つまり第4図において A 孔にプラグを入れると、 a_2 の電位はプラグを介して a_1 と等電位になる。

したがって網目状にこのように孔があけてあるパッチボードのたとえば A , B , C にプラグを差し込めば a_2 , b_2 , c_2 の電位はそれぞれ a_1 , b_1 , c_1 となる (ただし $R_1 \ll R_2$ で、 R_2 との接続による a_1 , b_1 , c_1 の電位変動は無視できる)。したがって横軸の抵抗 R_2 の上の電位分布は幾何学的に ABC をつないでできる曲線の形に対応させることができる。この抵抗 R_2 の上を摺動するブラッシュの位置を速度 V に比例して動かしてやれば、このブラッシュからはプラグの位置によってきまる函数電圧が得られることになる。このようにして作られた函数はプラグの位置の数で定まる折線で近似されることになり、階段で近似される場合よりはるかに高い近似度を有している。本装置では計算しようと思う機関車の引張り特性もしくは電流特性に応じてプラグの位置を定めるのである。

横軸の抵抗 R_2 の摺動片を速度 V に比例して動かすにはサーボ機構を使用している。



$P_1 \sim P_4$ は直線ポテンシオメータで、連動して二相サーボモータで駆動される。 P_1 はフオローアップポテンシオメータであり、 $P_2 \sim P_3$ は函数発生用ポテンシオメータである。

第5図 サーボ機構原理図

本装置のサーボ機構について概略を説明すると、第5図において $P_1 \sim P_4$ のポテンシオメータは連動で動き、サーボ二相モータで駆動される。このモータの回転は入力振幅ならびに位相により支配され、入力の符号を逆転すればモータは逆に回り、入力がなくなればその位置で停止する。入力 E_i が加わるとモータは回転しはじめ、ポテンシオメータを回すため P_1 の摺動片に電圧 kE_f が発生する。 k はポテンシオメータの分圧比であり kE_f は入力側に帰還され入力 E_i との差の ϵ がサーボ増幅器に加えられる。サーボ増幅器の利得が非常に大きければ E_f が次第に増大し、 $kE_f = E_i$ となったときサーボ増幅器の正味の入力 ϵ が零となるためこの点でサーボモータは停止する。つまり各ポテンシオメータの摺動片は入力 E_i に対応した運動をするため、 E_i を速度 V に対応する電圧にしておけば、各摺動片は速度 V に比例した運動をし、上記の理由で T または I 函数を発生することができる (実際には T および I は T_1 , T_2 および I_1 , I_2 の各2種類に分かれているため、ポテンシオメータは6連になっている)。

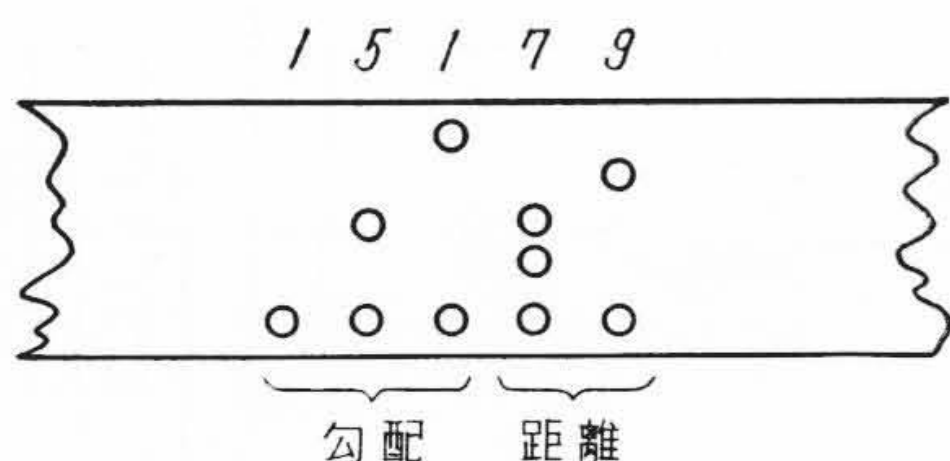
3.2 R 函数発生装置

走行抵抗 R は前述のように $R = a + bv + cv^2$ で近似されるが、第一項は一定電圧を、第二項は v を、第三項は v^2 をそれぞれポテンシオメータで分圧してから加算すればよい。このうち第一項および第二項は問題ないが、第三項は V から V^2 を作り出さねばならない。これには T , I 函数発生器のサーボ機構を利用する。すなわち第5図において P_4 に V を加えれば、 P_4 の摺動片は V に比例した運動をするから、その摺動片からは V^2 に比例した電圧を取り出しうる。

3.3 G 函数発生装置

勾配函数 G は距離 S の函数であるが、計算中距離 S は連続的に増加する一方であり、 G は S の狭い区間でひんぱんにしかも不連続に正または負の方向に変化するという特殊な要求をみたさねばならない。

本装置では紙テープに距離と、それに対応する勾配量を 8, 4, 2, 1 コードで穿孔してテープ読取機にかけ



例として距離9.7 km において勾配 -15.1% の場合を示す。

第6図 線路勾配穿孔テープの一例

リレー式 $D-A$ 変換器により距離および勾配をアナログ電圧として取り出す方式を採っている。穿孔は第6図に例示したようにはじめの2桁で距離を、次の3桁で勾配量を表わしているが、本装置では距離は10 km ごとに計算を行うためこの程度の確度で十分である。このテープを読取機にかけると、計算機の距離電圧が次の勾配が始る距離電圧に達したとき自動的にこの孔の位置が読取られてあらかじめ対応づけられたリレー群が設定され、コードに従って読み込んだ勾配値に対応する電圧値を発生する。計算機の距離電圧が特定の勾配量をもつ特定の距離に達したとき、これをコンパレータによって検出し、テープからその距離における勾配量を読取ってリレー群が設定されるまでには約1秒の時間を要する。このため計算進行中にその次の区間の勾配量を別に設定しておき、設定距離に達したらただちにその設定勾配電圧が発生するようになっている。つまり勾配設定用として二組のリレー群が用意されていて、自動的に交互に切り換えて使用するのである。なお、穿孔テープは保存できるので、鉄道全線の線路テープを用意しておけば、いつでも目的の区間の計算がただちに実施できる。

3.4 B 函数発生装置

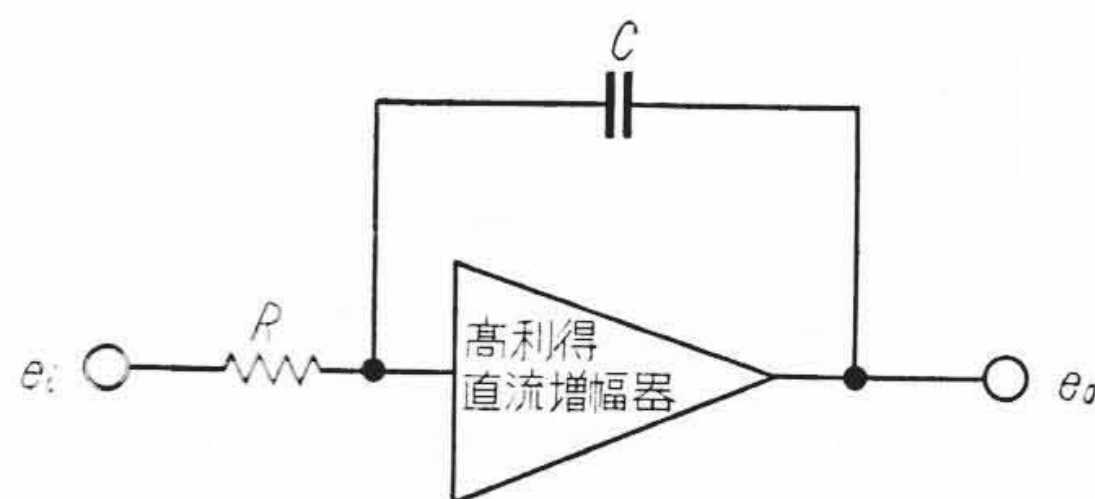
現圧の所制動量 B は速度に無関係に一定値として考えられているので、一定電圧をポテンショメータで分圧し、所要電圧に設定して考えるようになっている。この設定電圧はコンパレータと組合せ、計算が進行して制動をかけるべき距離電圧に達した時自動的に回路に印加される。

3.5 ポテンショメータ盤

18個のポテンショメータを有しており、9個は運転条件に属し、残りは列車条件に属している。運転条件とは列車の運転台に相当し、運転中の制御に関する条件を設定するものであり、列車条件とは列車の性能に関する条件を設定するものである。また、現在力行状態にあるか制動状態にあるかをランプで示す運転状態表示部も設けられ計算中に必要に応じて手動で力行もしくは制動の電圧を印加することができる機構も含まれている。

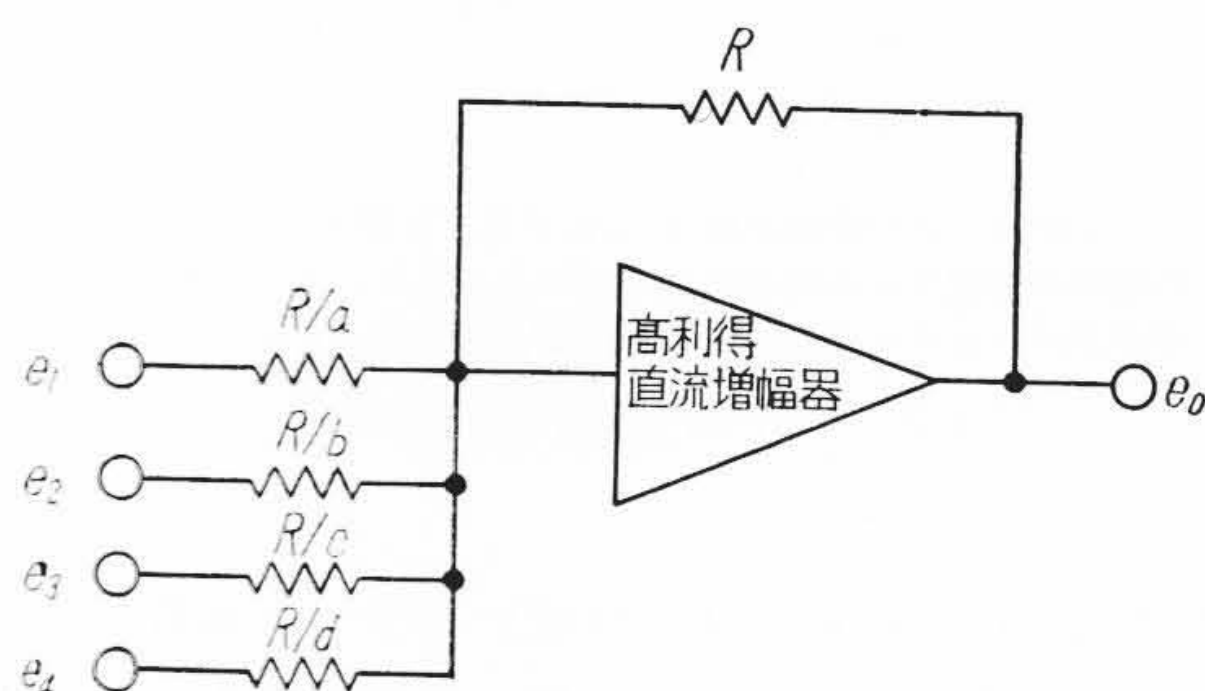
3.6 積分器、加算係数器、符号変換器

第1図のブロック線図に示すように、本装置は3台の



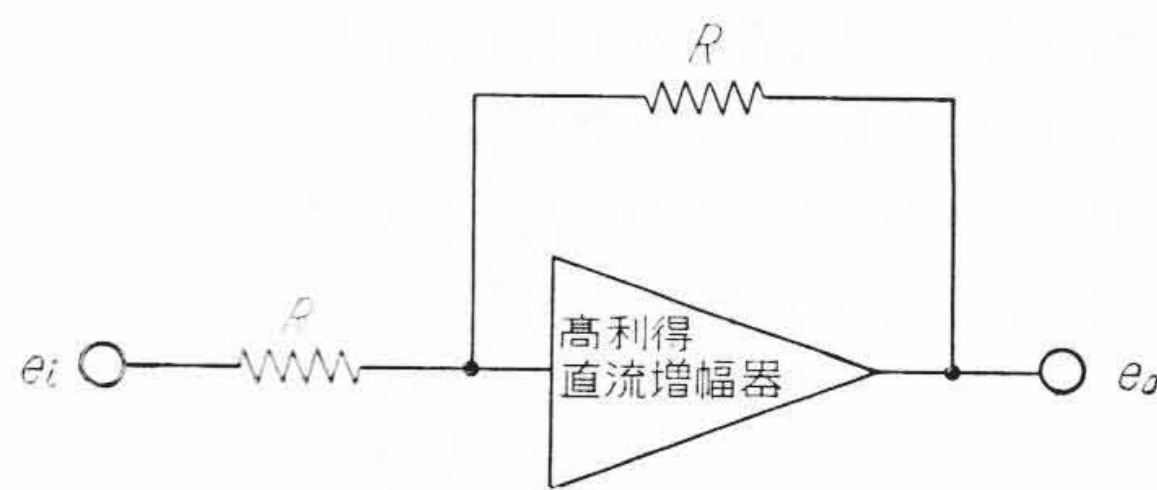
$$e_o = -1/PCR e_i$$

第7-1図 積分器原理図



$$e_o = -(ae_1 + be_2 + ce_3 + de_4)$$

第7-2図 加算係数器原理図



$$e_o = -e_i$$

第7-3図 符号変換器原理図

積分器と1台の加算係数器のほかに、第1図中には省略されているが、サーボ函数発生器の V および V^2 の符号変換用として2台の符号変換器を有している。これらはすべて高利得の直流増幅器と演算インピーダンスの組合せにより作られている。直流増幅器については次項で述べる。

(1) 積分器

第7-1図のような接続になっており増幅器の利得が非常に大きい時には、入力 e_i 対出力 e_o の関係は帰還側インピーダンスと入力側インピーダンスとの比で与えられる。

$$\frac{e_o}{e_i} = -\frac{1/j\omega C}{R} = \frac{-1}{j\omega CR} = \frac{-1}{PT} \quad T = CR$$

$$\therefore e_o = \frac{-1}{PT} \times e_i \quad P = j\omega$$

この式で明らかなように入力 e_i は積分されて出力側に現われる。ただし符号は反転する。なお、初期条件(初速度 V_0 など)は演算前にあらかじめ C をその条件に相当する電圧で充電しておくことにより与えられる。

(2) 加算係数器

第7-2図のように接続になっており、積分器のときと同じ理由により $e_1 \sim e_4$ と出力 e_0 との関係は次のようになる。

$$e_0 = -(ae_1 + be_2 + ce_3 + de_4)$$

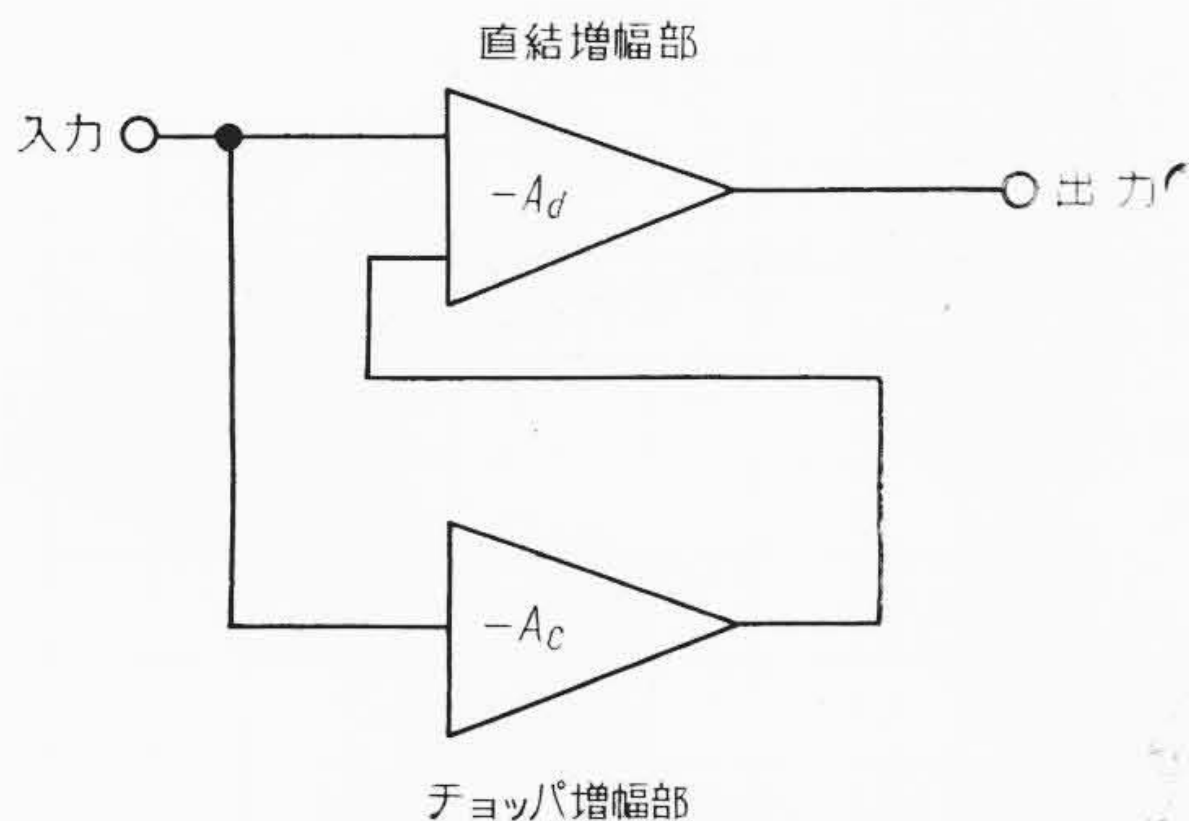
すなわち各入力に所要の係数 $a \sim c$ が掛かった上で加えられて符号が反転して出力側に現われる。

(3) 符号変換器

第7-3図のように、加算係数器の入力を1個とし、かつ係数を1としたときに相当する。したがって $e_0 = -e_i$ となり符号変換器としての目的を達する。

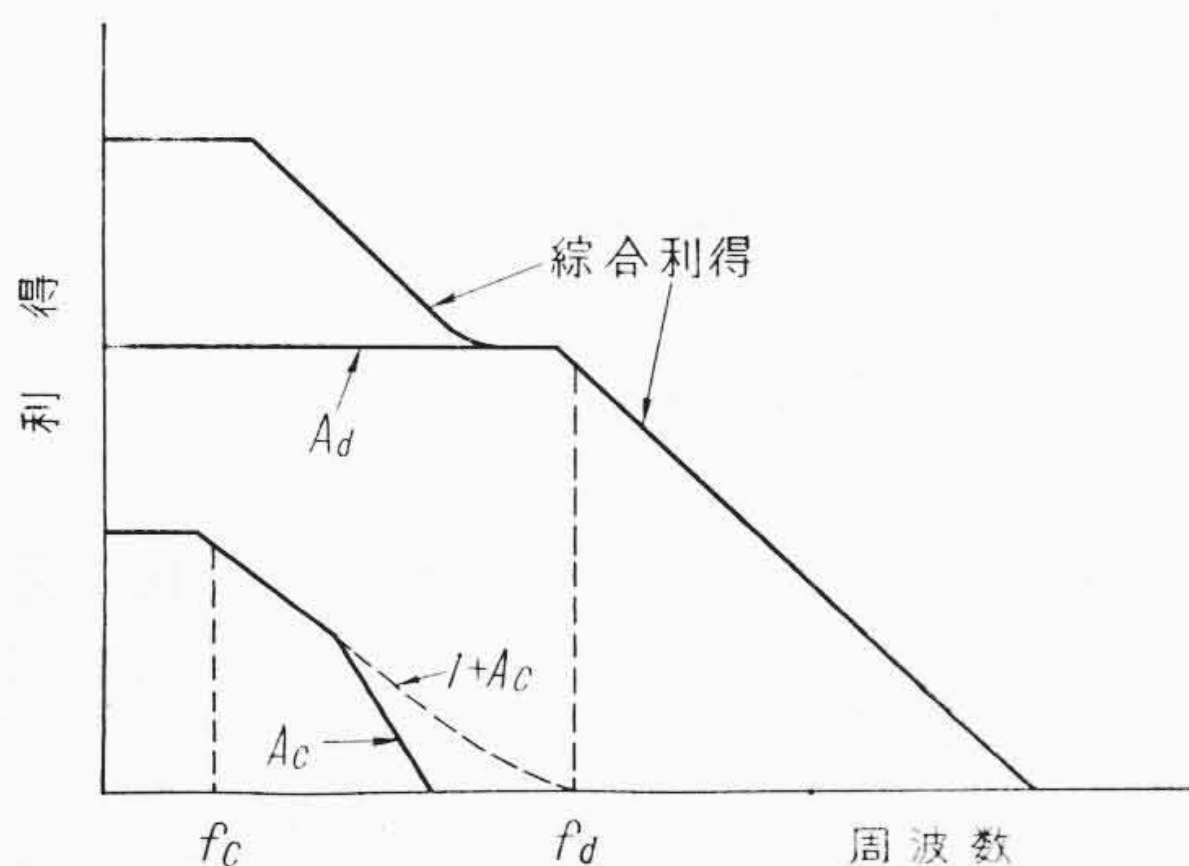
3.7 直流増幅器

本装置の直流増幅器は約 90 db の直流利得をもつ直結差動増幅部と、約 50 db の利得をもつチョップ増幅部より成りたっている。その接続は単なるカスケードでなく第8図のような組合せ増幅器となっており、入力信号はそのまま直結部に入るものと、チョップ部で増幅されたものとが加わって直結部で増幅されて出力に現われる。したがって全体としての利得 A は直結部およびチョップ



チョップ増幅器を有する組合せ増幅器である。

第8図 直流増幅器の構成



第9図 直流増幅器周波数特性

部の利得をそれぞれ $-A_d$ および $-A_c$ とすると次式のようにになる。

$$A = -A_d(1 + A_c)$$

ゆえに A_d および A_c の周波数特性が 3 db 低下する周波数をそれぞれ f_d および f_c とすると、総合周波特性は第9図のような形状を呈する。つまり直流を含む低い周波数はチョップ部と直結部の両方で増幅作用が行われ、高い周波数では直結部で増幅される。

次にドリフトについて考えてみる。チョップ部のドリフトを無視し、直結部の初段に生じたドリフト電圧を e_d とすると、これによる出力電圧は $e_d \times A_d$ となる。信号電圧の利得は前記のように $-A_d \times (1 + A_c)$ であるから入力換算のドリフト電圧は

$$\frac{-e_d \times A_d}{-A_d(1 + A_c)} = \frac{e_d}{A_c} \quad \text{ただし } A_c \gg 1$$

となり、チョップ部の直流利得だけドリフトが改善されたことになる。このようにして改善された本器の入力換算ドリフト電圧は約 $100 \mu\text{V}/8\text{h}$ である。

3.8 記録計

本装置には下記のように4台の記録計があり、3台は電子管式平衡記録計、1台はXY記録計である。

(1) 速度記録計

スケール幅 150 mm の電子管式平衡記録計で、フルスケール 150 km/h (100 V に対応する) に目盛りされている。チャート紙の送り時間は後述の標準時間発振器により動作する同期電動機で正確に駆動され、送り速度はギヤの交換により毎分 20, 10, 4 mm の3段階に切換可能である。

(2) 電力量記録計

(1)とまったく同様である。ただしフルスケールは 150 kWh である。

(3) 距離記録計

スケール幅 250 mm の電子管式平衡記録計で、フルスケール 10 km (100 V に対応する) である。チャート紙の送り関係は(1)とまったく同様である。

(4) 距離—速度記録計

平面形のXY記録計で、記録幅はX, Yともに200mmフルスケールはX軸 10 km Y軸 200 km/h である。

3.9 標準時間発振器

記録計のチャート紙送り用同期電動機を駆動するための発振器で、発振周波数は約 50 c/s (チャート紙の送り時間に合わせて調整後固定) 出力電圧 100 V, 出力電力 25 W, 周波数変動は $\pm 0.1\%$ 以内である。

3.10 コンパレータ

本装置には全部で11台の直流コンパレータがある。

回路は差動増幅器とバイステابلマルチを組合せたものであり、電圧感度は 0.5 V 以上である。

3.11 制御盤

低圧および高圧制御用の押ボタンスイッチおよび、演算制御用押ボタンスイッチ、記録計モータの動止スイッチのほかに各演算要素の出力電圧をロータリスイッチで選択し、メータで読むことができる機構および各直流増幅器の過負荷指示用ネオンランプを有している。

特に演算制御回路は、零調 (Balance Check)、設定 (Reset)、演算 (Compute)、保持 (Hold) の4状態内の一つの状態から任意のほかの状態に移行させても演算誤差を生ずることがないように設計された特殊リレー回路である。

3.12 電源監視盤

電源の入力交流電圧 (100 V) 標準時間発振器の出力電圧および各直流高圧低圧電源の出力電圧を電圧計で監視できる機構を有している。また、直流増幅器の過負荷警報および制動と力行が同時に印加されたときの警報ブザー信号発生用の増幅器も内蔵している。

3.13 直流高圧電源盤

各要素に安定した直流を供給するために、電子管式の直流安定化電源となっている。高圧電源としては4種類あり、また演算信号として使用する標準電圧 ± 100 V も内蔵されている。

4. 計算結果 (2例)

本装置を用いて計算した結果を次に掲げておく。

4.1 例題1

(1) 問題：各条件を下記のように定めたときの $t-V$ 、 $t-S$ 、 $S-V$ の各曲線をかけ。

速度上限 = 120 km/h

速度下限 = 110 km/h

惰行始距離 = 6 km

第一制動始距離 = 7 km

制動緩距離 = 7.5 km

第二制動始距離 = 8 km

制動量 = 2 km/h/s

重量比 = 1

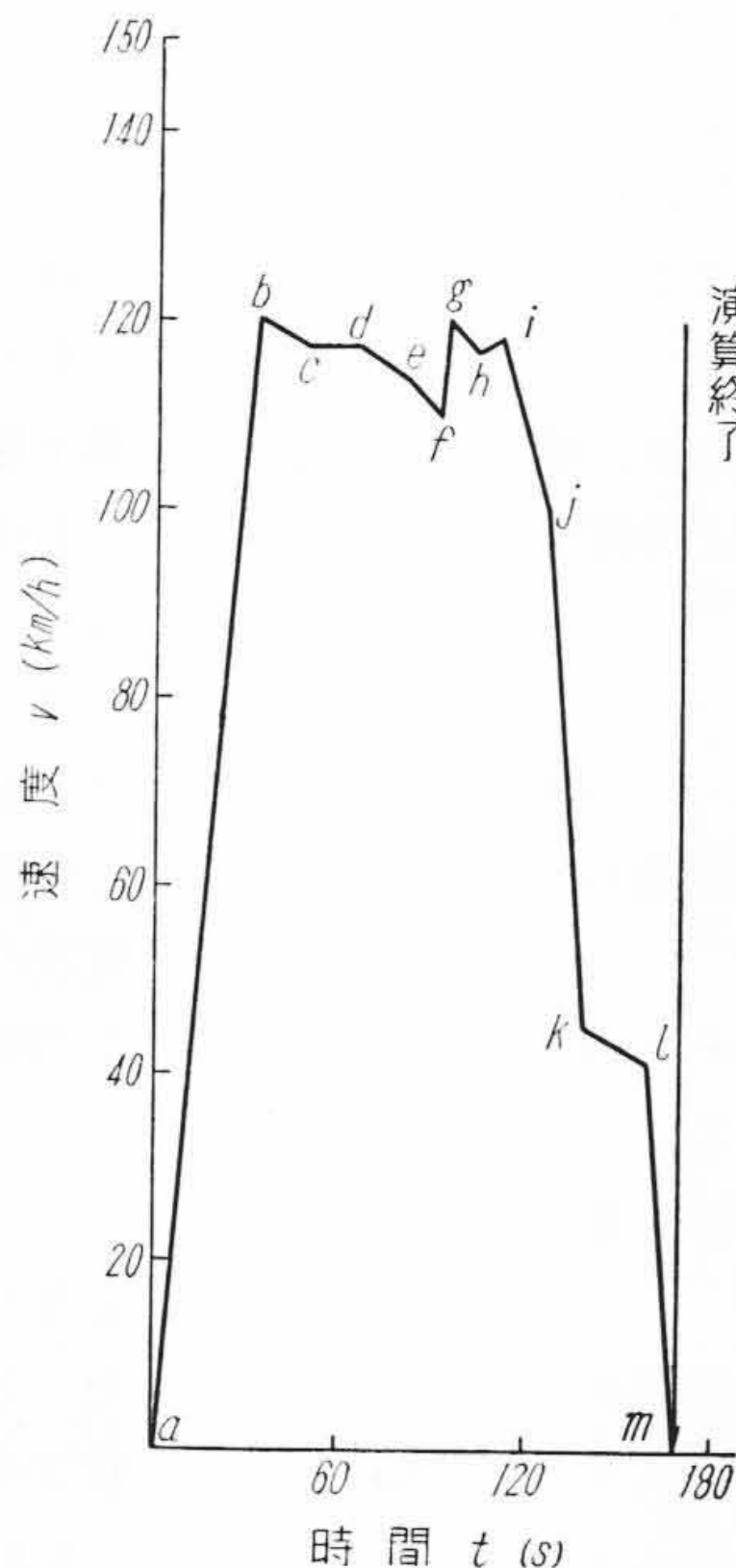
初速度 = 0 km/h

走行抵抗 = 0.1 km/h/s 一定

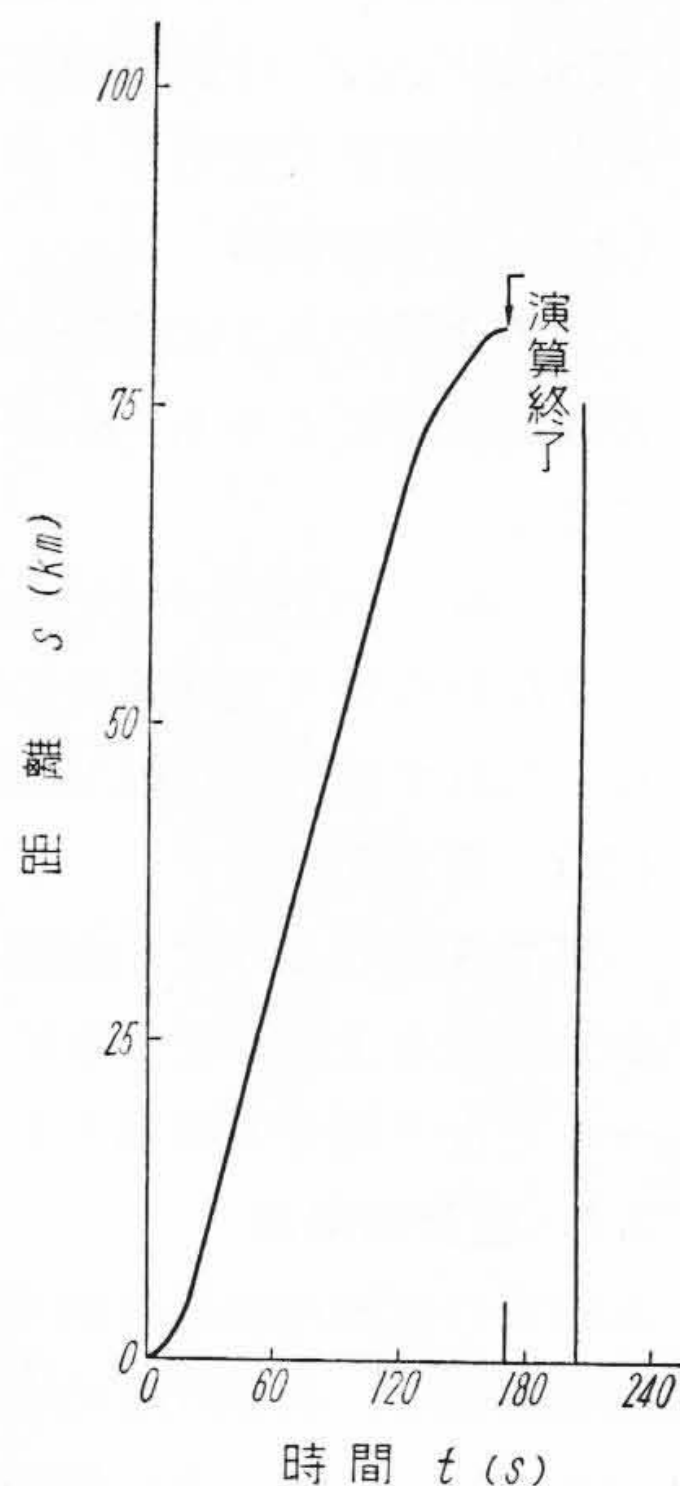
第1表 例題1における距離—勾配の関係表

距離 (km)	0.0	2.0	3.0	4.0	5.5	6.0	7.0
勾配 (%)	0.0	-2.8	0.0	+2.8	-5.7	+14.4	0.0

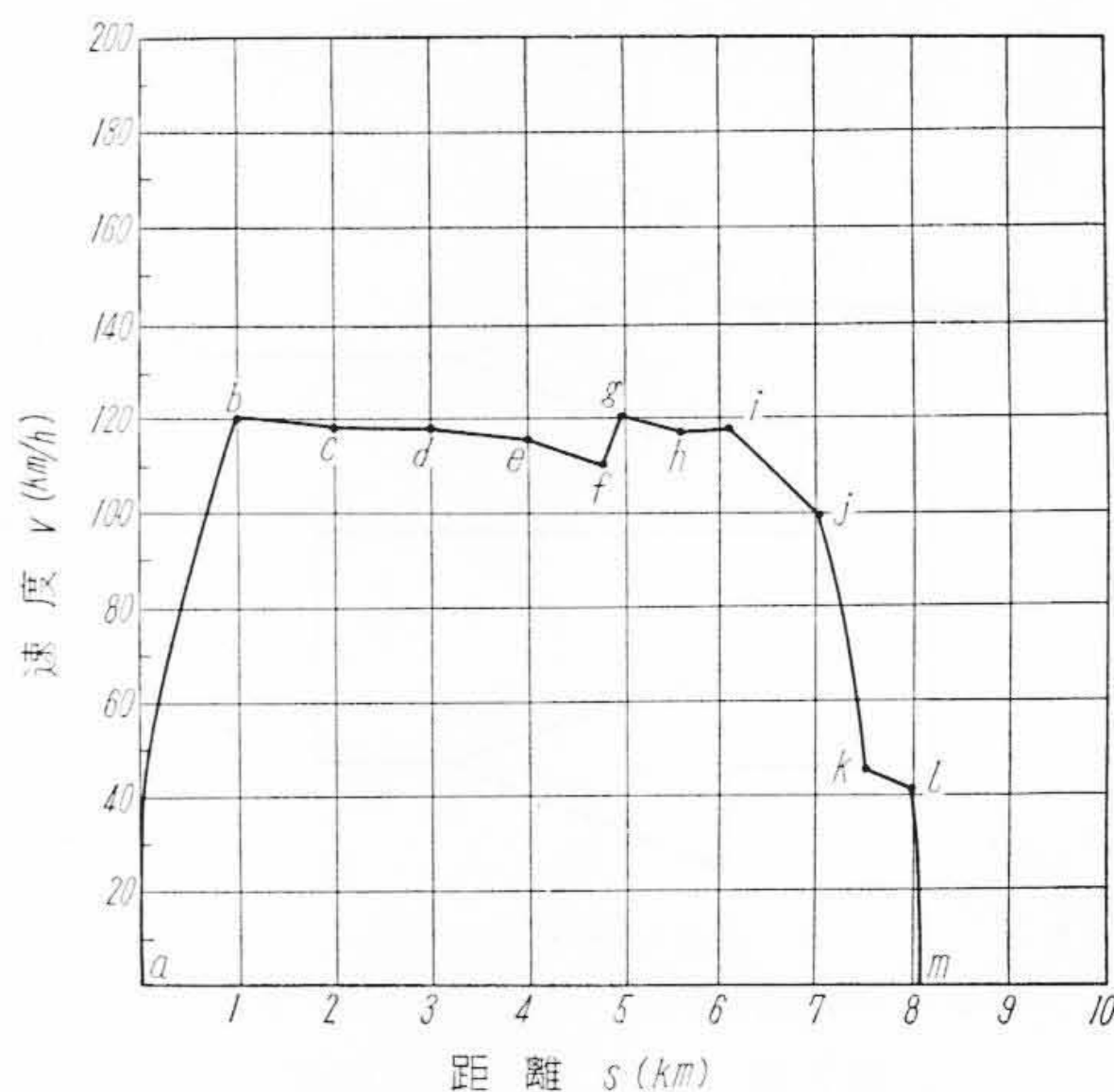
勾配の正号は上り勾配、負号は下り勾配を表わす



第10-1図 時間対速度曲線 (例題1)



第10-2図 時間対距離曲線 (例題1)



第10-3図 距離対速度曲線 (例題1)

界磁切換速度 = 150 km/h

$T_1 = T_2 = 2$ km/h/s 一定

勾配量 = 第1表のとおり

(2) 結果

第10-1～10-3図に計算結果を示す。まず10-1図の $S-V$ の曲線について説明すると、出発点 a より、2 km/h/s 一定の引張力で発車した列車は約 1 km 走って速度上限 120 km/h に到達し、 b 点で惰行に入り、0.1 km/h/s 一定の走行抵抗を受けて少しずつ減速されて距離 2 km の c 点

に達する。 $c \sim d$ 間は -2.8% の下り勾配であるから、走行抵抗と打消し合ってほとんど速度一定で進行する。 $d \sim e$ 間は勾配が零であるから、 $b \sim c$ 間と同じく走行抵抗のみの減速を受ける。 e 点つまり距離4 kmからは $+2.8\%$ の上り勾配に入るため走行抵抗と加わって減速ははなはだしくなり、ついに f 点で速度下限である110 kmに達しふたたび力行に入るが、すぐに g 点で速度上限に達してまた惰行状態になり $e \sim f$ 間と同じ条件で減速される。 h 点からは -5.7% の下り勾配のため、走行抵抗に対抗して若干加速されつつ i 点に達すると $+14.4\%$ という大きな上り勾配に差しかかるために大幅な減速を受けて j 点(7 km)へ向う。 j 点からは勾配は零となるが、この点は第一制動始距離に相当するため急激に速度を失いつつ進行し、制動緩距離の k 点(7.5 km)で再度惰行状態になり、 e 点(8 km)の第二制動始距離でふたたび制動がかかって停車点 m 点に向う。第10-2, 10-3図はこの速度、距離の時間に対する関係を表わすものである。

4.2 例 題 2

(1) 問題 1: 各条件を下記のごとく定めたときの t - P 曲線をかけ。

重 量 比 = 0.5
 走 行 抵 抗 = 0 km/h/s
 界 磁 切 換 速 度 = 60 km/h
 直列直並列切換速度 = 20 km
 直並列並列切換速度 = 40 km/h
 消 費 電 力 量 比 = 0.05
 引 張 力 $T_1 = 1$ km/h/s
 $T_2 = 2$ km/h/s
 $I_1 = 5,000$ A
 $I_2 = 2,500$ A

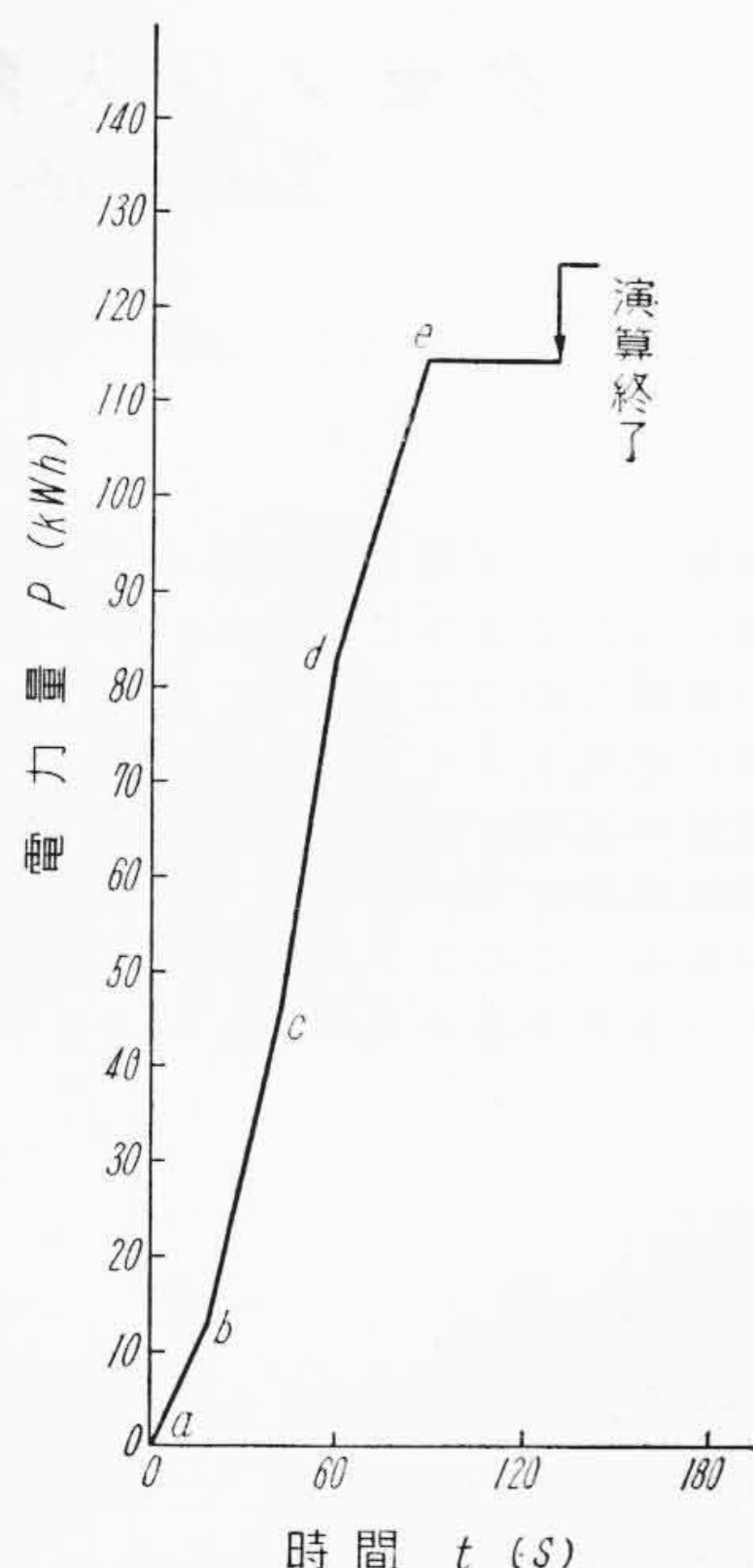
線路は平坦で、機関車はEF形である。これ以外の条件は例題1と同じである。

(2) 結 果

第11図に示す。図のごとく出発点 a においては3組(6個)の電動機を直列にして発車し、 b 点($V=20$ km/hに相当)で直並列になって電力量の増大が大きくなる。 c 点($V=40$ km/h/sに相当)では並列になるため、電力量曲線の傾斜はさらに増大する。次に d 点($V=60$ km/h/sに相当)において界磁が弱界磁に切換るため電力量曲線の傾斜はややゆるやかになり、 e 点で速度上限の120 km/hに達するため惰行になるので電力は零となり電力量は一定値に保持される。

5. 結 言

現在この計算機は国鉄本社において現業に使用され、列車ダイヤ編成に活躍していることを付記して、簡単な



本装置は電力量比0.1のとき記録計はフルスケール150 kWhとなる。この例題は電力量比0.05であるため、縦軸の目盛は2倍して読まねばならない。

第11図 時間対電力量曲線(例題2)

から本装置に関する説明を終ることとする。

終りに臨み種々御指導を賜った国鉄技術研究所の主任研究員安達彦一氏ならびに研究員稲田伸一氏に感謝するとともに、日立製作所中央研究所只野文哉部長ならびに関係各位の御協力に対し、謝意を表する次第である。

日 立 造 船 技 報

Vol. 19

No. 4

目 次

- ◎厚板調質高張力鋼に関する研究
- ◎ポストの振動についての一考察
- ◎機関車形ボイラの外火室半円筒部の内部による変形が横ステーの強度に及ぼす影響
- ◎銅板の溶接について
- ◎NK, LR規格ヒューズの研究
- ◎大形部品のフレームハーディングについて
- ◎かじ性能に及ぼすかじ取速度の影響について (1)

本誌につきましの御照会は下記発行所へ御願いたします。

日立造船株式会社技術研究所
 大阪市此花区桜島北之町60