

回生ブレーキ付チョップ式電気車を採用した 直流電鉄のき電系統の計算

Calculation of Feeder System for DC Electric Railway Using
Chopper System Electric Cars with Regenerative Brake

立花 恭三*
Kyôzô Tachibana

坪井 孝*
Takashi Tsuboi

刈谷 志津郎**
Shizuo Kariya

要 旨

直流電気車のサイリスタチョップ制御方式は高能率の回生ブレーキが可能な方式としてその将来は特に有望視されている。しかし、回生ブレーキ方式を採用した効果は他の電車の走行状態、変電所の設備や間隔など、き電系統全体にわたる多くの条件により大幅な影響を受けるので、それらについて定量的な検討が必要である。この問題に対し、電子計算機を用い、電車の実際の運行状態を模擬して計算する方法を検討した。本稿は計算の方法とその結果について述べている。

1. 緒 言

回生ブレーキ付電気車を採用すると、消費電力量の節減や空気ブレーキの負担軽減に効果がある。また、発電ブレーキに比較して熱の発生量が少ないという利点もある。さらに、最近開発されたチョップ式電気車⁽¹⁾⁽²⁾は無接点制御ができ、制御性能が良く、制御損失も比較的少なく、かつ、停止寸前まで容易に回生ブレーキを行なわせるので、いっそう有利となる。

しかし、回生ブレーキを行なう際に発生する電力を吸収もしくは消費するものがなければ回生ブレーキは不可能である。たとえば、変電所に逆変換装置がない場合は、力行中の電気車がなければ回生ブレーキは行なわれない。また、力行車があったとしても、そこまでの距離が長い場合にはその間の電車線内部抵抗によって回生ブレーキ中の電気車のパンタ点電圧が上昇しすぎるために、回生ブレーキが十分に行なわれないという結果も生じてくる。もちろん、不足するブレーキ力は空気ブレーキで補うが、その結果、回生ブレーキ方式を採用した効果は減少する。

このように、力行車の影響を受けず常に所要の回生ブレーキを行なうには変電所に逆変換装置を設け、回生電力を電源側へ返還するようにすればよいが、それだけ余分の設備費を必要とする。そこで、回生ブレーキを採用すればどの程度の消費電力量の節減が期待できるか、また逆変換装置の有無でその節減量にどれだけの差があるか、あるいはパンタ点電圧がどの程度上昇するかなどを計算する必要がある。その計算は系統全体について行なわねばならないが、変電所や列車の数が多いうえに、列車の位置や電流は刻々変化し、さらに、チョップの制御性能がよいために列車電流の形が一定でないので、計算はかなり複雑である。そこで、今回、電子計算機を使用することにより、定められた運転ダイヤに従って多数の電気車を走行させた場合を模擬して計算する方法を検討した。ここでは、その計算方法について報告する。

2. 直流電鉄のき電系統と列車の運転

回生ブレーキ方式は運転密度の高いほど効果が大きいものと予想されるので、本計算では複線を対象とした。また、前述のように回生ブレーキ方式を採用したことの効果は変電所の回生電力吸収設備の有無により影響を受けるので、そのような設備がある場合とない場合の両方を対象にしうるよう考慮した。

一方、路線には列車の運転曲線が定められているので、それより

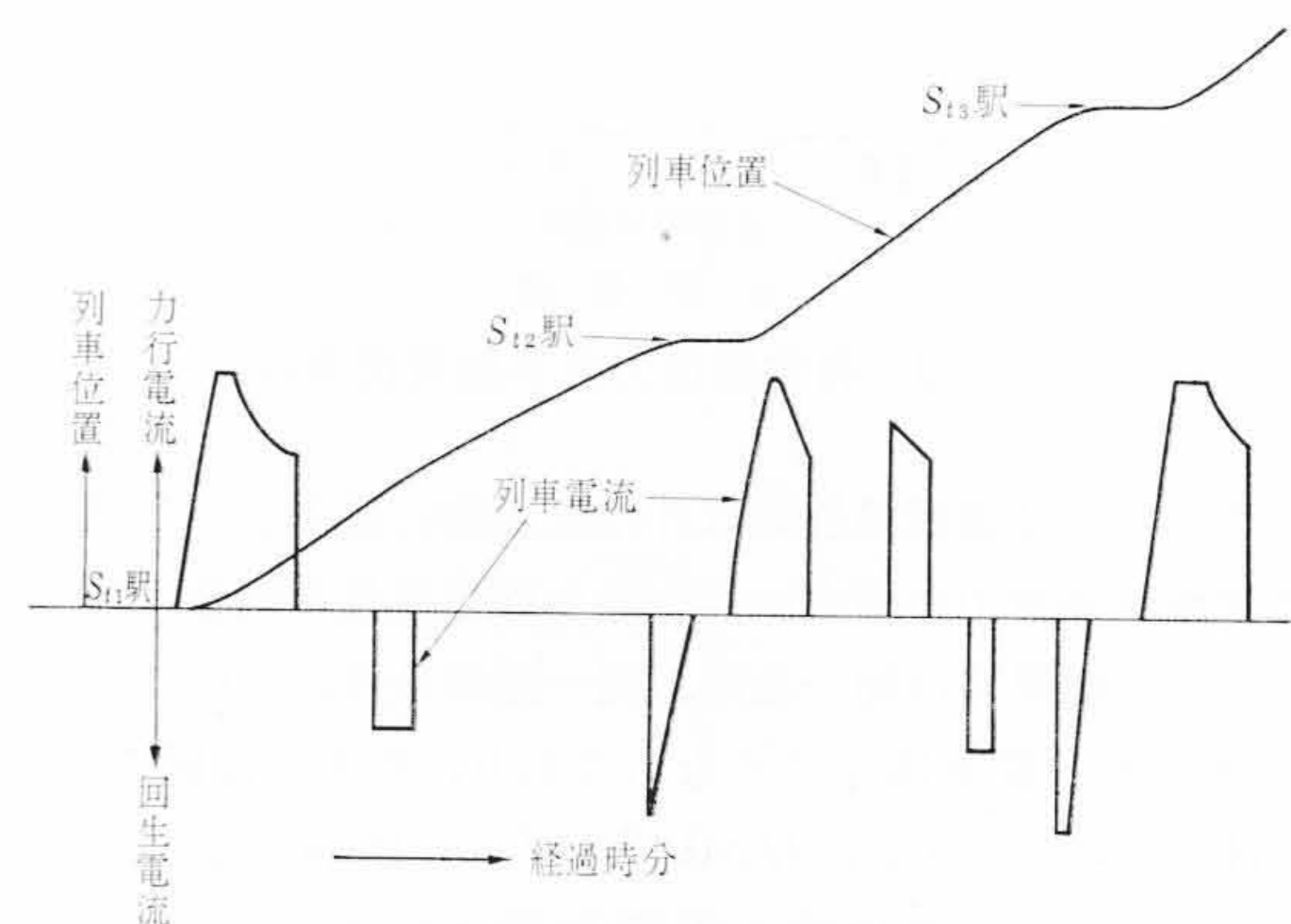


図1 上り線の経過時分に対する列車電流と位置

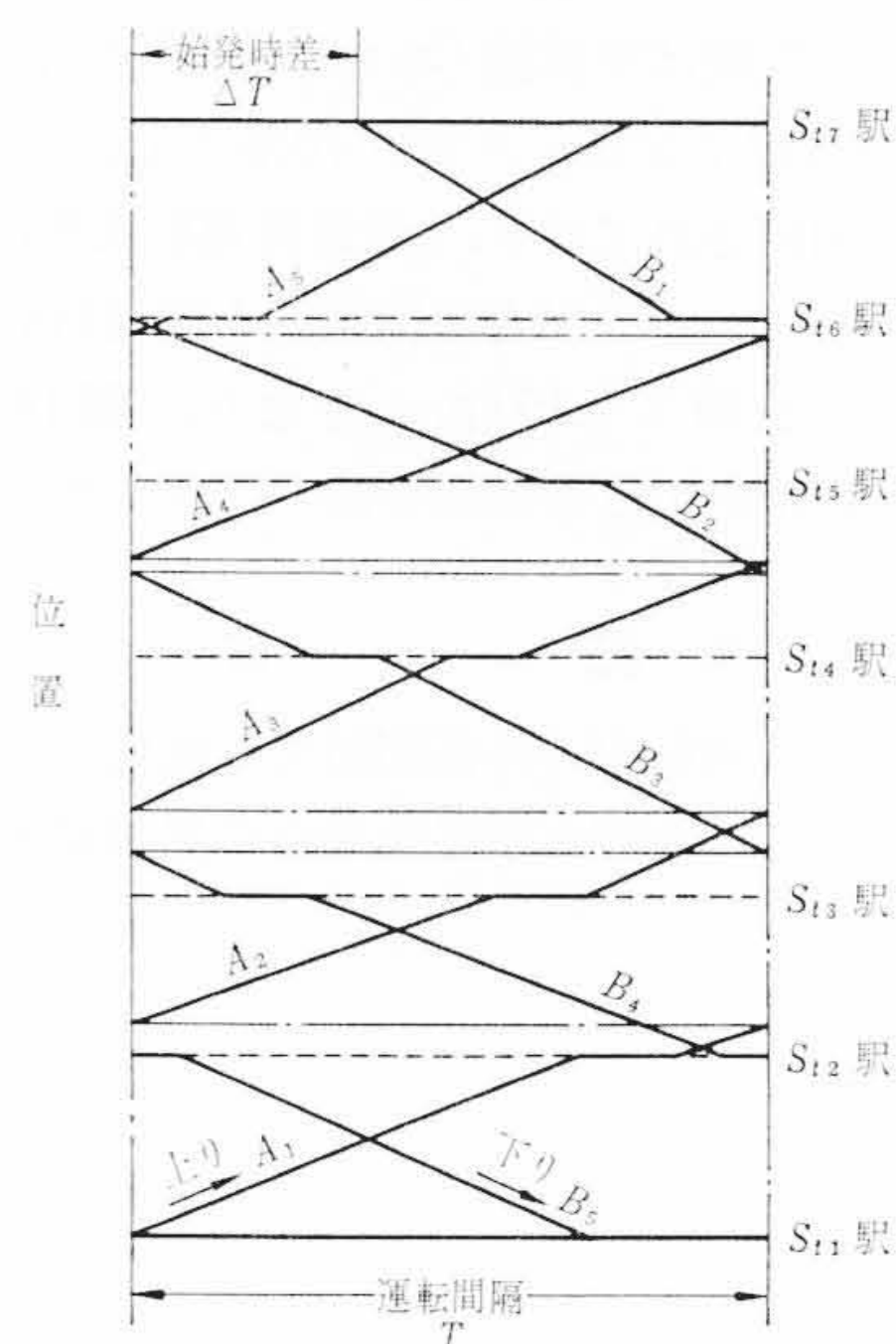


図2 運転ダイヤ

図1のような始発駅発車後の経過時分に対する列車の位置と電流を求め、入力データとして電子計算機に読み込ませる。他方、運転密度の高い路線では、列車はほぼ等間隔に行なわれる。この運転間隔と上り、下りの両方向の始発駅発車時刻の差（以下、始発時差という）を与えると、図2のような運転ダイヤが定まる。これは運転間隔だけ抜き出したものであるが、運転ダイヤはこれを1周期として同じものが順次くり返される。

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所水戸工場

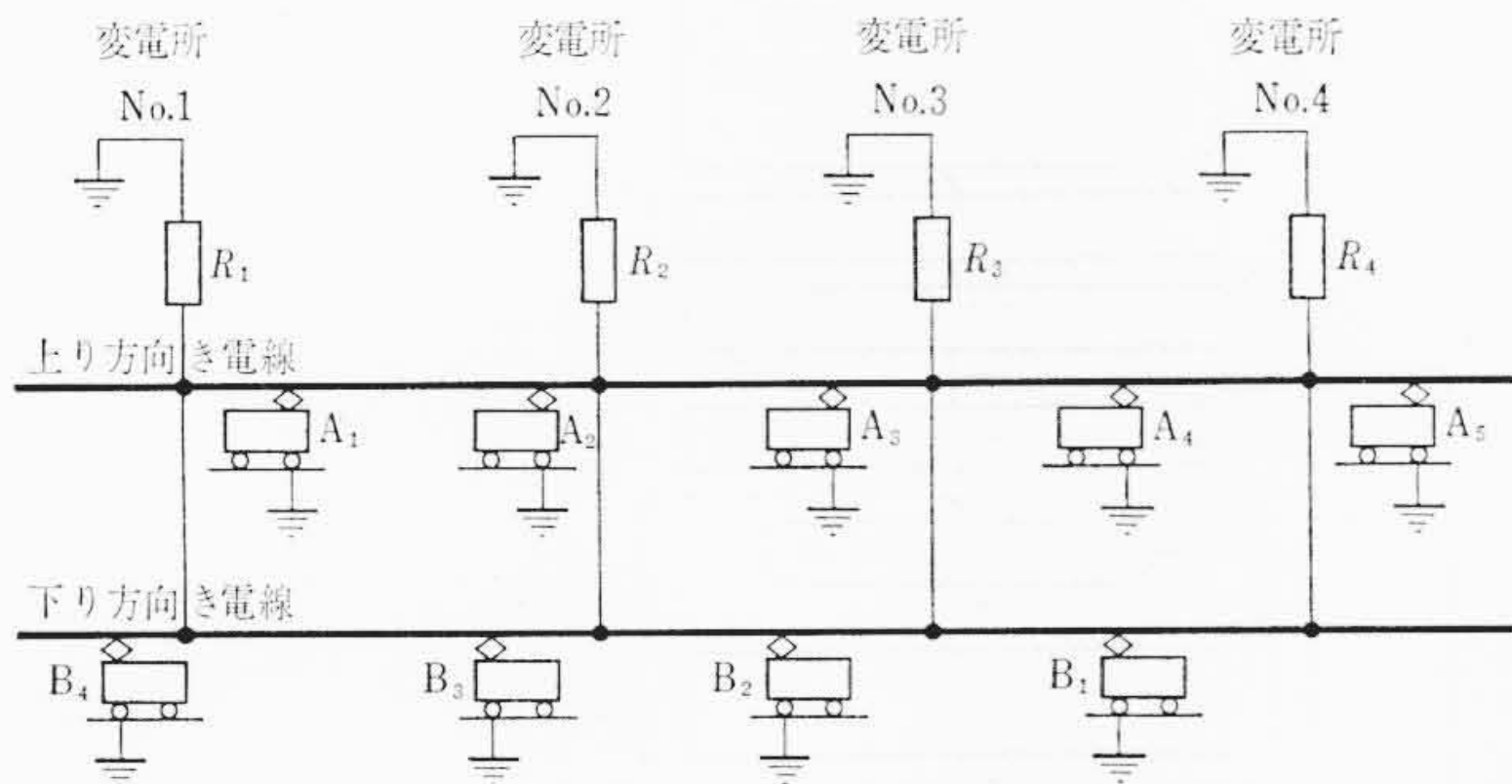


図3 き電系統の等価回路

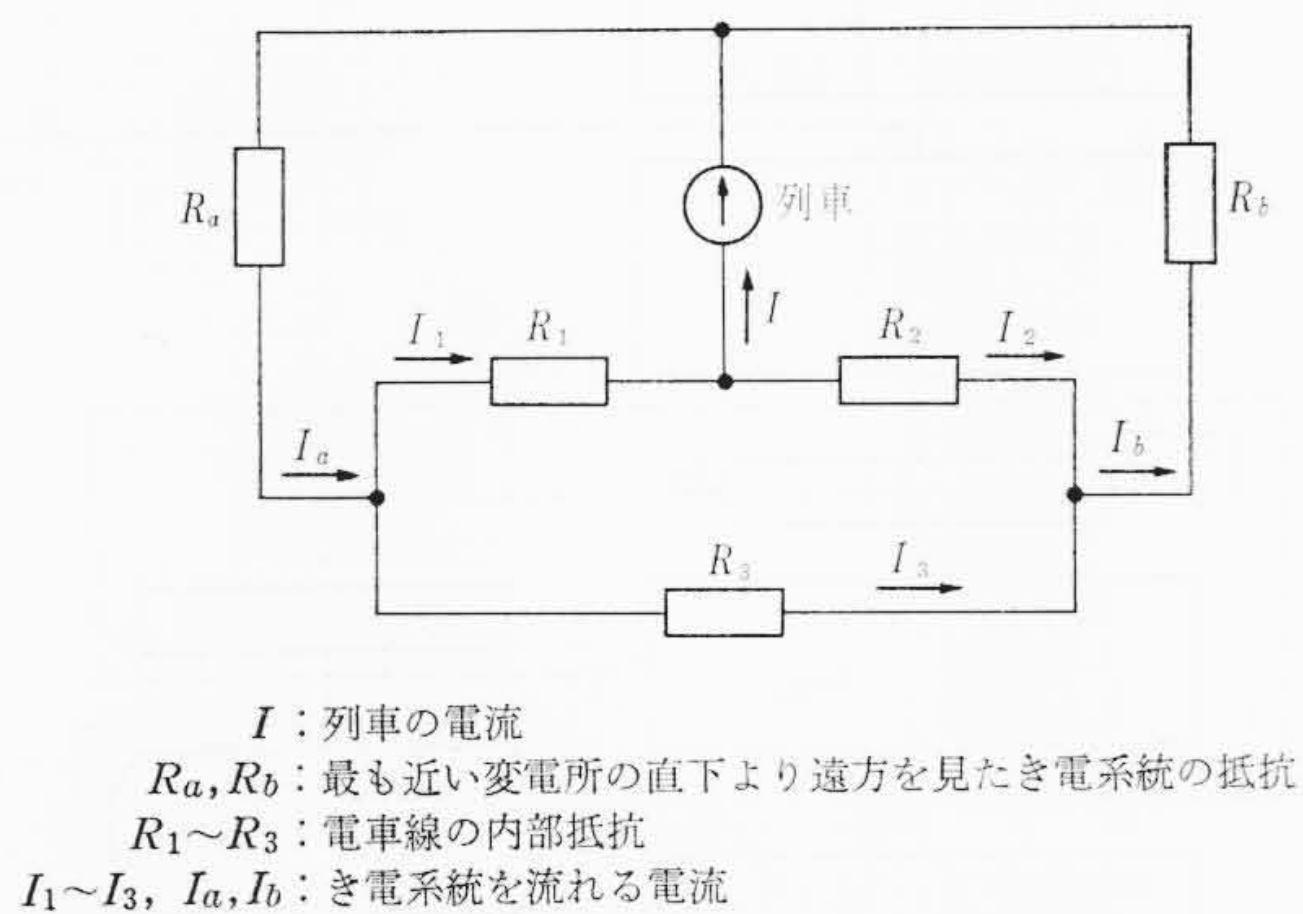


図4 列車の属する区間の等価回路

3. 計算の方法

3.1 列車分布と列車電流の算定

本計算はき電系統各部の電流を毎時刻求め、それより全列車のパンタ点電圧と系統の内部損失を計算し、さらに運転間隔の間でそれらの平均値を求めるものである。その場合、列車は刻々位置と負荷電流を変えている。したがって、き電系統内の電流を求める前に、毎時刻の列車の位置と電流を明らかにしなければならない。

図2を参照すると、上りの第1列車 A_1 が始発駅を発車する瞬間に、先行各列車 $A_2, A_3, \dots$ は図1の運転曲線において運転間隔のちょうど整数倍だけ時間の経過した地点にある。これから明らかなように、一般に同一方向の各列車の経過時分には互いに運転間隔 T の差があるので、上り第1列車 A_1 が始発駅を発車後の時刻 t における上り第 n 列車 A_n および下り第 n 列車 B_n の始発駅からの経過時分 t_n は次の式で表わされる。

上り線

$$t_n = t + (n-1)T \quad (1)$$

下り線

$$t_1 = \begin{cases} t + T - \Delta T & (t < \Delta T \text{ のとき}) \\ t + \Delta T & (t \geq \Delta T \text{ のとき}) \end{cases} \quad (2)$$

$$t_n = t + (n-1)T \quad (3)$$

$$t_n = t + (n-1)T \quad (4)$$

したがって、図1のような1列車の時間対位置電流曲線を上り、下りについて与えれば、毎時刻の全列車の位置と電流が定まる。

3.2 逆変換装置がある場合の電流分布の計算

各時刻におけるき電系統各部の電流を、まず変電所に逆変換装置があり、変電所に直流電流が流出も流入もできるとして求める。ただし変電所間の横流はないものとし、かつ、列車を電流源とみなす。そうすると、系統内の電流はすべてこの電流源によるものだけであるから、2.で述べたようなき電系統は図3のような等価回路に置き換えられる。ここで、電車線をその内部抵抗と軌条内抵抗を合わせた抵抗線と考え、また各変電所をその内部抵抗値に等しい抵抗器に

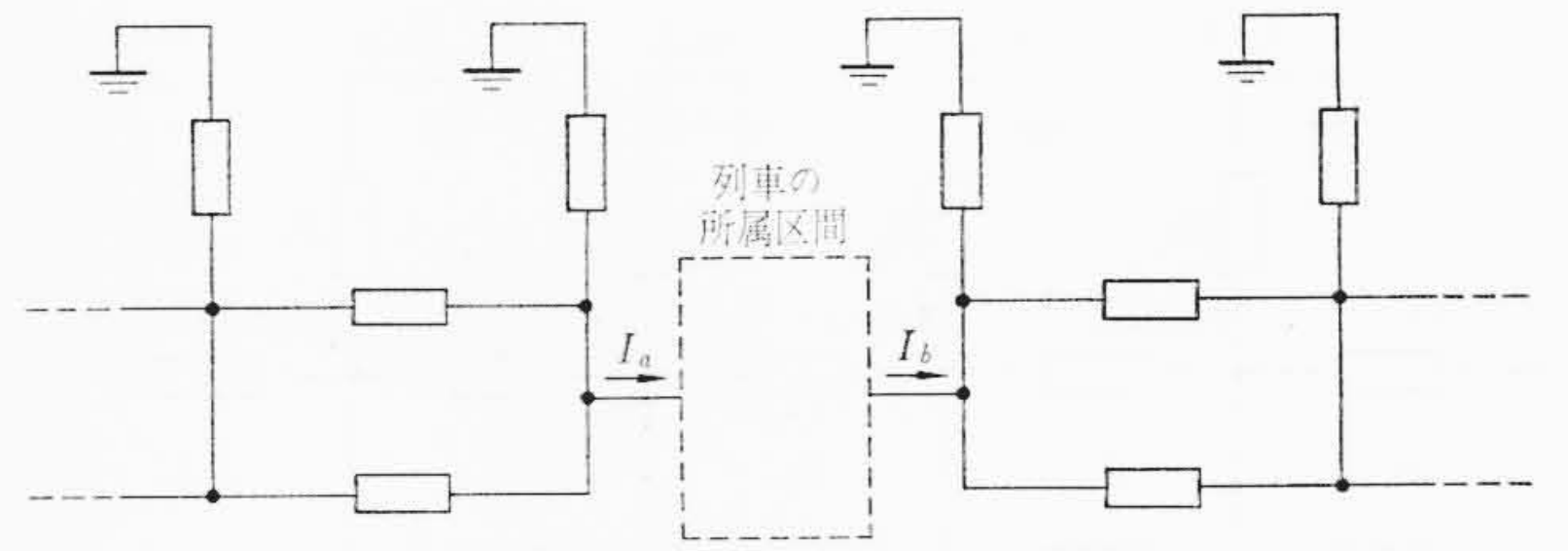


図5 列車の所属区間外の電流

置き換える。

その結果、たとえばこの図のように列車が分布している場合、き電系統各部の電流は各列車単独の電流分布を求めたうえで、全列車について重畳することにより求められる。

各列車単独の電流分布に対しては、系統を変電所の点で区間に分け、その列車の属する区間とそれ以外の区間とを分けて考える。すなわち、その列車の属する区間は図4の回路に置き換えられ、その各部を流れる電流は次の連立代数方程式を解いて求められる。

$$I = I_1 - I_2 \quad (5)$$

$$I = I_a - I_b \quad (6)$$

$$I_a = I_1 + I_3 \quad (7)$$

$$I_3 R_3 = I_1 R_1 + I_2 R_2 \quad (8)$$

$$-I_3 R_3 = I_a R_a + I_b R_b \quad (9)$$

一方、列車の所属区間外の電流は上式より求められる I_a と I_b から、図5の回路を対象として計算できる。

このような電流の計算には、各変電所の地点で上下両方向を見た抵抗と分流比を明らかにしておかなければならない。しかし、これは列車の位置には無関係であるので、最初に一度求めておけばよい。

3.3 逆変換装置がない場合の修正計算

以上は変電所に逆変換装置がある場合を対象に考えたもので、その場合は系統を図3のような等価回路に置換できた。しかし、変電所に逆変換装置がない場合は変電所に逆電流が流入できないので、逆電流が流れようとする変電所は開路されるものとみなさねばならないが、どの変電所に逆電流が流れようとするかは計算した結果で判別する以外に方法がない。そこで、逆変換装置を置かない場合を計算するときでも、まず逆変換装置を置くという条件で計算し、その結果を判別して修正するという方法をとった。

たとえば、逆変換装置があるとして計算した結果、図6(1)のようにNo.1とNo.2の変電所に逆電流が流れることになったとすれば、その変電所の電流が差し引きちょうどゼロになるよう、絶対値は等しく方向が反対の電流を流す電流源を同図(2)のように新たに仮定し、それに対する電流分布を計算する。そして新たに求めた各変電所の電流をそれまでに求めたものに加算する。そうすると、No.3の変電所のように新しく逆電流に転換する変電所が現われることもあるので、ここで再び判別し、そのような変電所が現われたならば、同様な修正計算を行なう。このように、逆電流の変電所がなくなるまで判別と修正をくり返し、逆変換装置のない場合を対象にした結果を得る。

ところで、このように修正計算をくり返す間に、全変電所の電流が逆電流に転じてしまうこともあり得る。このような場合は、元来全列車を合わせた総電流が負、すなわち全体として電力を回生しているときである。しかし、逆変換装置がない場合はどの変電所にも逆電流が流れ得ないので、回生ブレーキ中の列車の回生電流が制限されることになる。そこで、これを模擬するため、電流分布を計算する前に全列車の総電流を計算し、それが負である場合には回生車の回生電流に次の係数 ϵ を一律に乘じ、全列車の総電流がゼロになるようにあらかじめ修正計算を行なっておく。

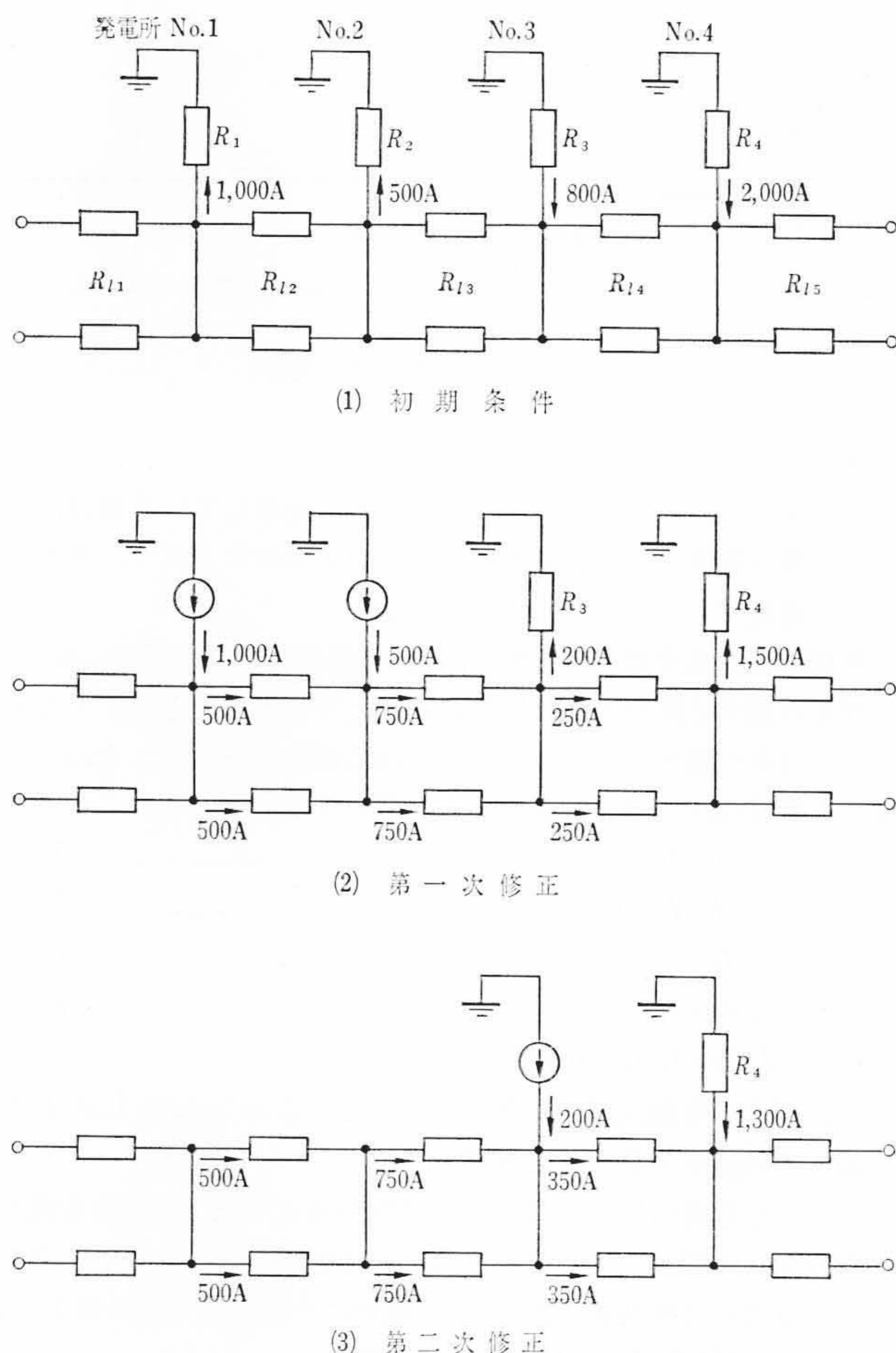


図 6 逆変換装置なしの場合を対象とする修正計算

$$\varepsilon = \frac{| \text{全列車の総電流} | - | \text{全回生車の総回生ブレーキ電流} |}{| \text{全回生車の総回生ブレーキ電流} |} \quad (10)$$

この結果、逆変換装置がない場合の回生電流の修正計算を行なっても、全変電所の電流がゼロになるが負になることはない。

3.4 パンタ点電圧を制限する場合の回生電流の修正

さきに述べたように、回生ブレーキを行なうと回生車のパンタ点電圧が上昇するため、実際にはパンタ点電圧を検出して回生電流を制限する対策が必要と思われる。本計算方法によって実際的な条件で計算した結果でも、変電所無負荷出力電圧より 1,000 V 程度も上昇する機会が発生することが知られた。ところで、パンタ点電圧を制限しようとするれば回生率の低下を招くので、計算上でもパンタ点電圧を制限する場合を模擬する必要がある。

その模擬の方法にはいくつかあると考えられるが、今回はどのような方法をとった。すなわち、パンタ点電圧が許容最大値を越すか否かは計算の結果によらねば判別できないので、まずパンタ点電圧を制限しないとして計算を行ない、その結果によりパンタ点電圧が許容最大値を越すような回生車があるか否かを判別し、もしあればその列車の回生電流を少し減少させ、再び電流分布を計算する。この減少幅を入力データで与えれば任意の値が選択できる。ところで、1 回の修正計算ではパンタ点電圧が必ずしも制限値以下になるとは限らないので、全列車のパンタ点電圧が制限以内に納まるまで判別と修正再計算をくり返す。

3.5 計算のフローチャート

以上に述べた本計算をフローチャートに表わすと図 7 のようになる。

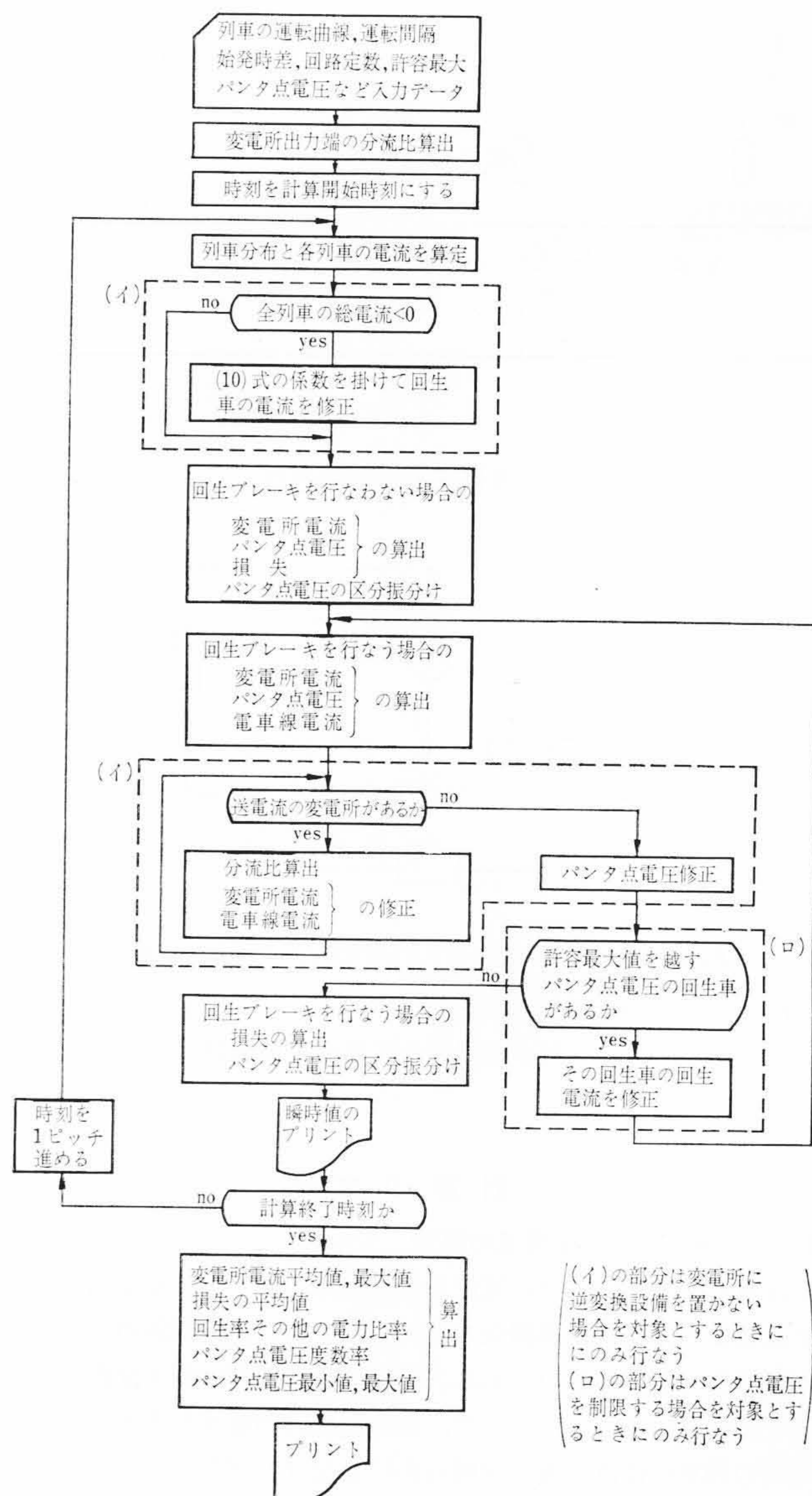


図 7 計算フローチャート

4. 計算結果

本計算方法によって得られる主要な結果は次のとおりである。

(1) 変電所電流

各変電所ごとに電流の瞬時値、平均値および最大値が求められるほか、全変電所の合計値もでる。また、回生ブレーキを採用したことによって減少する変電所電流の値や、逆変換装置の不採用とパンタ点電圧制限によって回生ブレーキが不可能となって縮小される回生電流の平均値も求められる。

(2) 回生率

これは回生ブレーキ方式を採用することによって節約される電力量の割合で、回生ブレーキが制限を受けずいつでも期待どおり行なえるという理想的なものと、逆変換装置の不採用やパンタ点電圧の制限によって回生ブレーキが制限を受ける実際的なものとがあり、そのいずれをも求めることができる。

(3) 系統の内部損失

変電所と電車線のそれぞれについて算出できる。

(4) パンタ点電圧

全列車のパンタ点電圧をある値に区分して度数分布を算出するほか、各列車のパンタ点電圧を毎時刻ごとに見ることもできる。本計算方法によって実際的な条件で計算した結果の例を図 8 およ

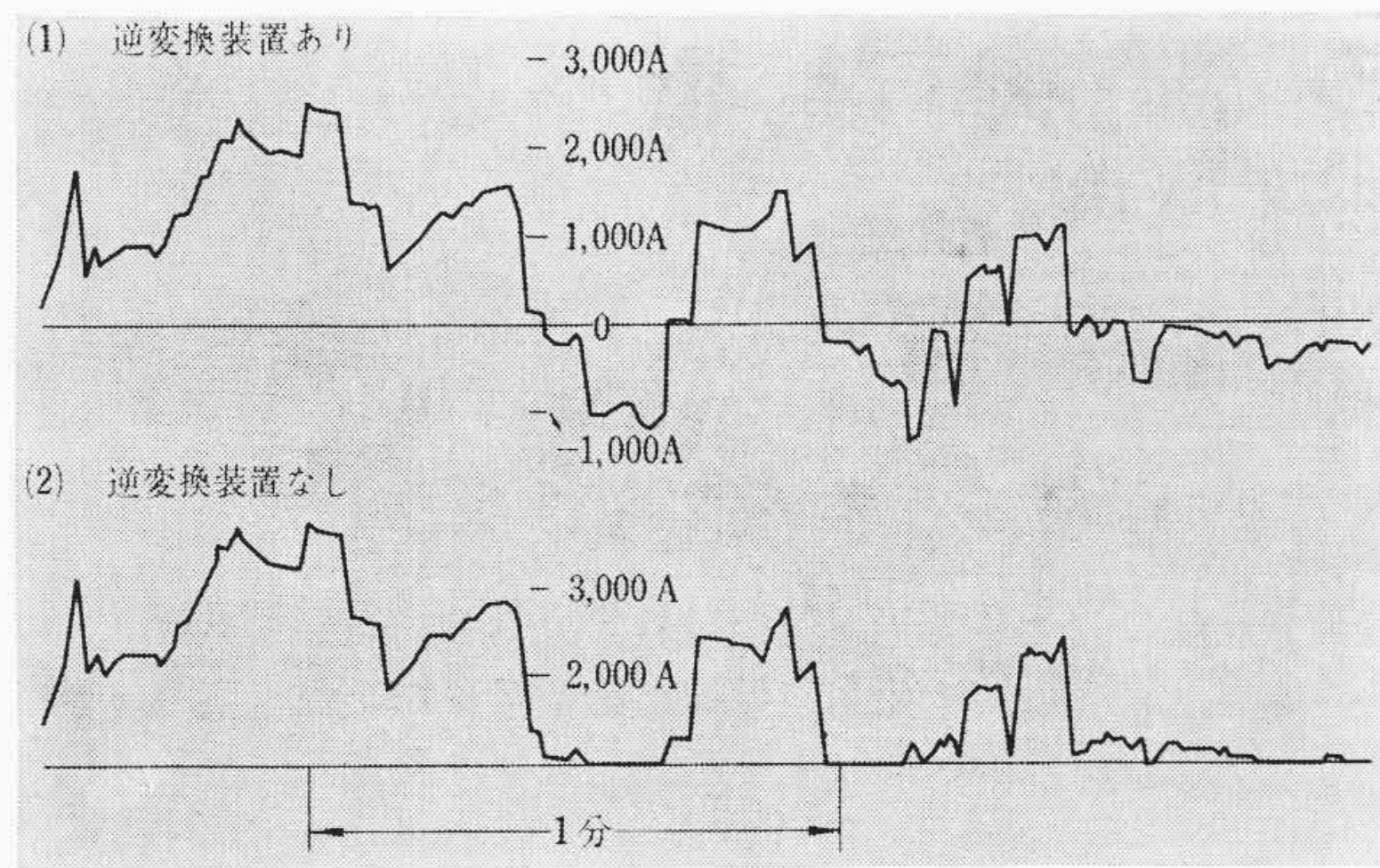


図8 変電所電流の時間的变化

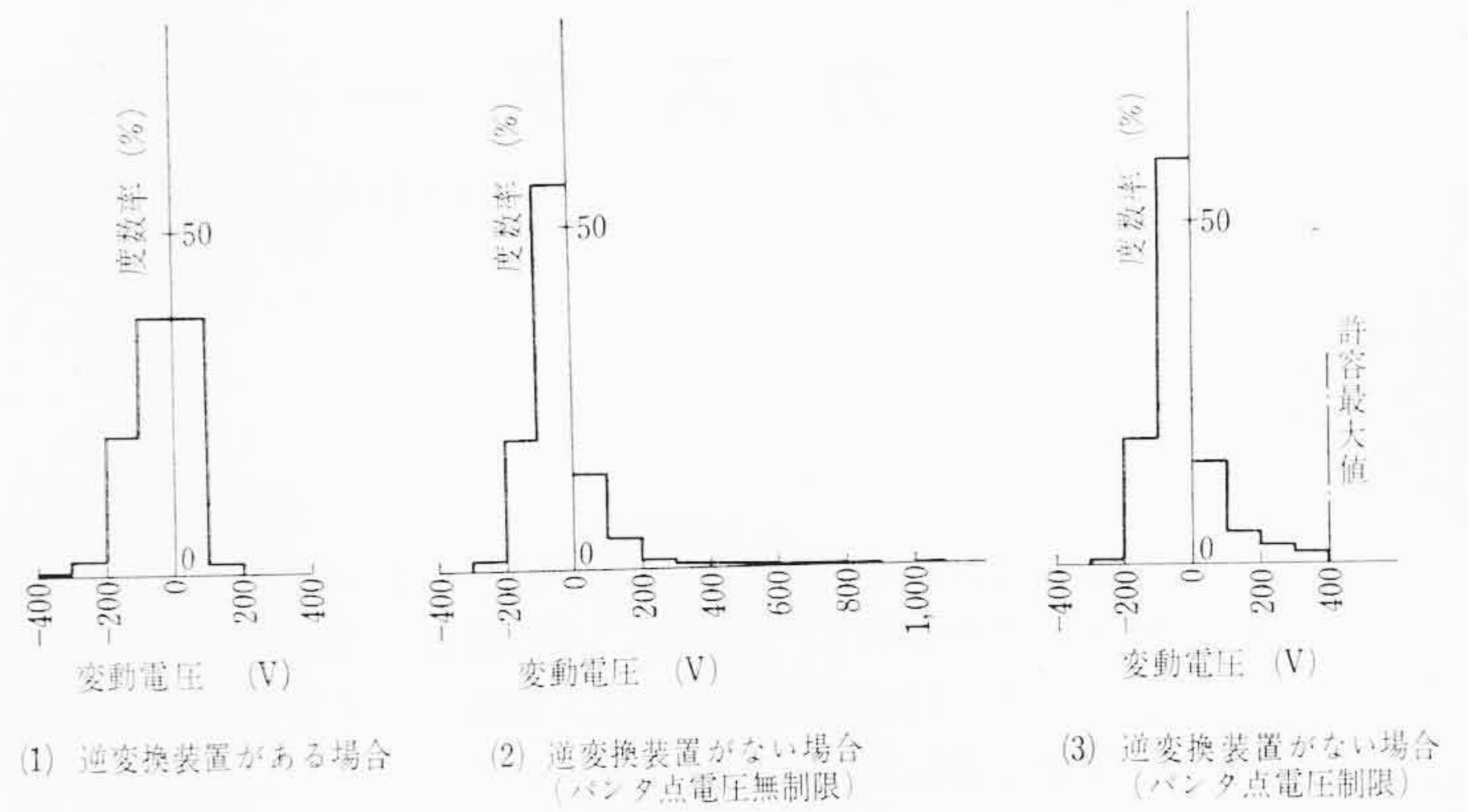


図9 パンタ点電圧度数率
電圧の基準は変電所無負荷電圧

び図9に示す。この計算においては理想回生率が約40～45%であるのに対し、変電所に逆変換装置を置かず、パンタ点電圧上昇を400V以下に制限することによって実際の回生率は低下するが、なお35～45%程度は期待できるという結果を得た。

5. 結 言

以上、回生ブレーキ付チョップ式電気車を採用した直流電鉄のき電系統に関して、電気車が実際に走行している状態を模擬して行なう計算の方法について述べた。この計算法によれば、さらに次のような事項も明らかにすることができる。

(1) 変電所の主回路機器容量の決定

(2) 回生ブレーキ方式を採用することによって節減される電力量

(3) 逆変換装置を採用することの効果

(4) 許容最大パンタ点電圧値の回生率に及ぼす影響

(5) 一部の变電所を開路して運用する場合の影響

なお、ここで述べた計算法は回生ブレーキを行なわない電鉄のき電系統の計算にも適用できることは言うまでもない。

終わりに、本計算法についてご指導いただいた帝都高速度交通営団の石原理事をはじめ、関係各位に厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) 刈谷ほか：日立評論 48, 1229 (昭41-10)
- (2) 坪井ほか：昭和43年電気4学会連大 No. 764

Vol. 50

日 立 評 論

No. 11

目 次

■ 論 文

- ・大形圧延機用界磁切換式可逆静止レオナード制御の研究
- ・窒化鹵車の疲れ強さ
- ・ガスタービン用重油の水洗処理装置
- ・富士製鉄株式会社東海火力発電所納50MW 3号発電用日立電子式ボイラ制御装置
- ・最近における上下水道の制御装置
- ・HITAC 9030 データ収集システム
- ・複合集東ビジコン H8325, H8326 の特性

- ・ペン書きオシログラフの直線書き機構の検討
- ・冷暖房ユニットの構造および特性
- ・日立アルミニウム低温溶接棒“Hi-Bral”の諸特性

■ 超高周波技術特集

- ・超高周波固体素子とその応用
- ・GaAs 結晶の生成
- ・超高周波固体素子と回路(ミリ波ダイオード)
- ・テレビ中継用通り中継機(ガンダイオード)
- ・低雑音アンプ

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内1丁目4番地
郵便番号 100

取次店 株式会社 オーム社書店

振替口座 東京 71824 番
東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
郵便番号 101

振替口座 東京 20018 番