

ホール効果利用電力変換器

Power Detector Employing Hall Effect

笹 間 純 也* 神 田 洋 三**
Junya Sasama Yôzô Kanda

内 容 梗 概

従来静止形の電力変換器としては、サーマルコンバータが広く一般市場において用いられてきたが、応答速度が遅い難点があったので、応答速度が早く、かつ完全静止形としてホール効果を利用した電力変換器を開発した。

本報告は Ge 素子を用いたホール発電器により開発した電力変換器についての研究結果を取りまとめたものである。

本電力変換器は 500 W 入力にて 15 mV の出力を得るもので、標準誤差 $\pm 0.5\%$ 以下、影響値 $\pm 0.5\%$ 以下、直線性 $\pm 0.5\%$ 以下であり、今後サーマルコンバータに代わり広く利用されることが期待される。

1. 緒 言⁽¹⁾

1879年 E. H. Hall 氏によって見出されたホール効果は、普通の金属においては発生する起電力が微弱なために、物理学者が物質の伝導機構を調べるための一物理現象に過ぎず、あまり顧みられなかったが、戦後半導体研究が急速の進歩をとげ、半導体研究上重要になったばかりでなく、半導体においては発生するホール電圧そのものがきわめて大きいために実用価値を生じ、種々の測定器、応用装置に用いられるようになった。

特に 1952 年 H. Welker 氏によって第三族、第五族金属間化合物が見出されるに及び、にわかにホール効果が注目されるようになった。しかしながら、第三族、第五族金属間化合物を用いたホール発電器においては磁場対ホール電圧特性の直線性が悪い難点がある。

本電力変換器は Ge 素子からなるホール発電器により開発し、標準誤差 $\pm 0.5\%$ 以下、影響値 $\pm 0.5\%$ 以下、直線性 $\pm 0.5\%$ 以下という良好な特性をもっている。

本器は 500 W 入力に対し 15 mV の出力を得たが、本報告においては電力変換器開発において問題となるホール発電器および各構成要素についての検討結果を記述するものである。

本電力変換器の特長を列挙すると

- (1) 完全静止形で小形、堅ろうである。
- (2) 応答速度が瞬時である。
- (3) PCT の消費 VA が小である。
- (4) 高精度である。

であり、従来の完全静止形電力変換器であるサーマルコンバータに比べ一歩進んだ方式のものと考えられる。

2. 構造および動作原理

2.1 構 造

本器は盤取付構造となっており、第 1 図に外観を、第 2 図にケースカバーを取り去った電力変換器本体を示す。

2.2 動 作 原 理⁽²⁾⁽³⁾

ホール発電器出力電圧 V_h は制御電流 I_s と印加磁束密度 B との関係で

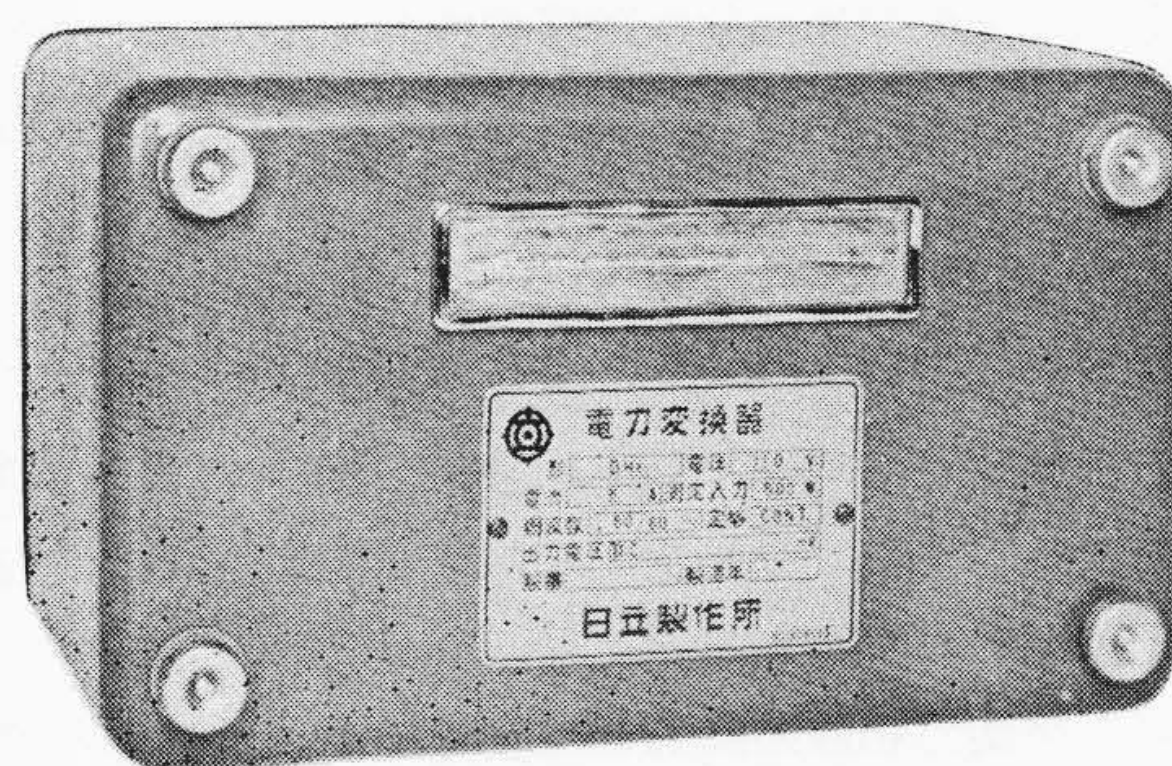
$$V_h = R_h \frac{BI_s}{d} f(l/b) \dots\dots\dots (1)$$

の関係で与えられる。

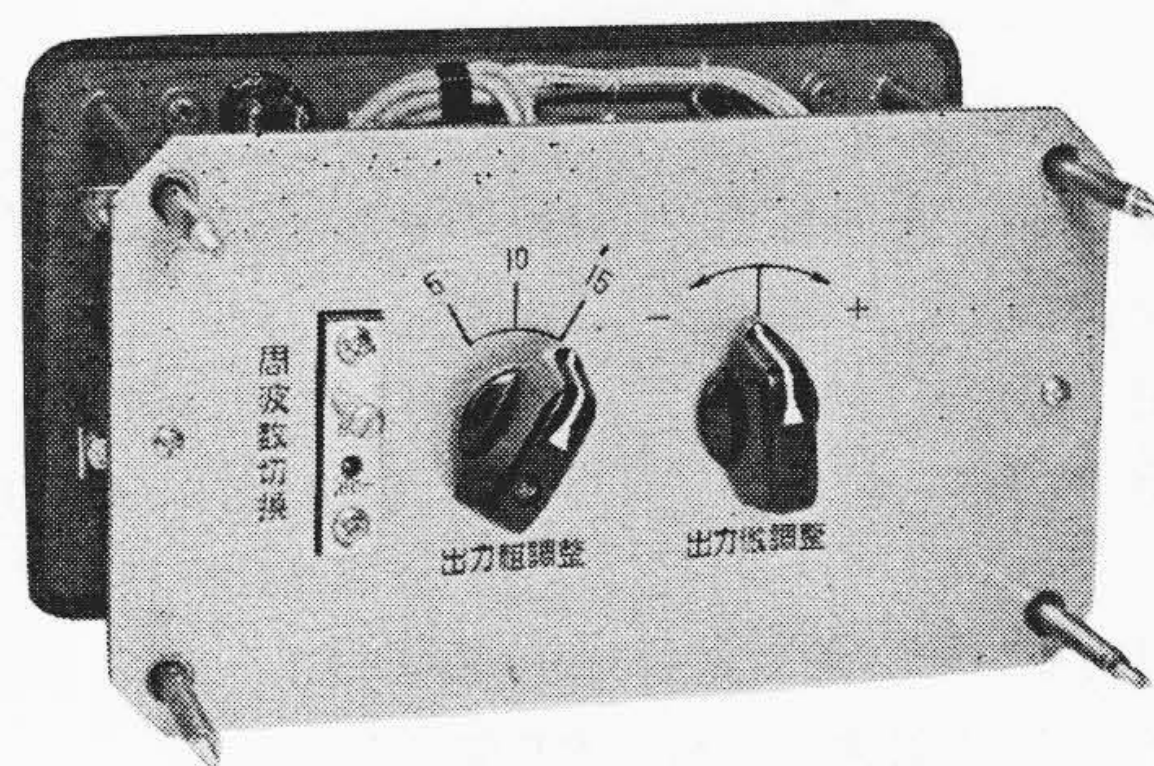
ただし R_h : ホール係数

* 日立製作所那珂工場

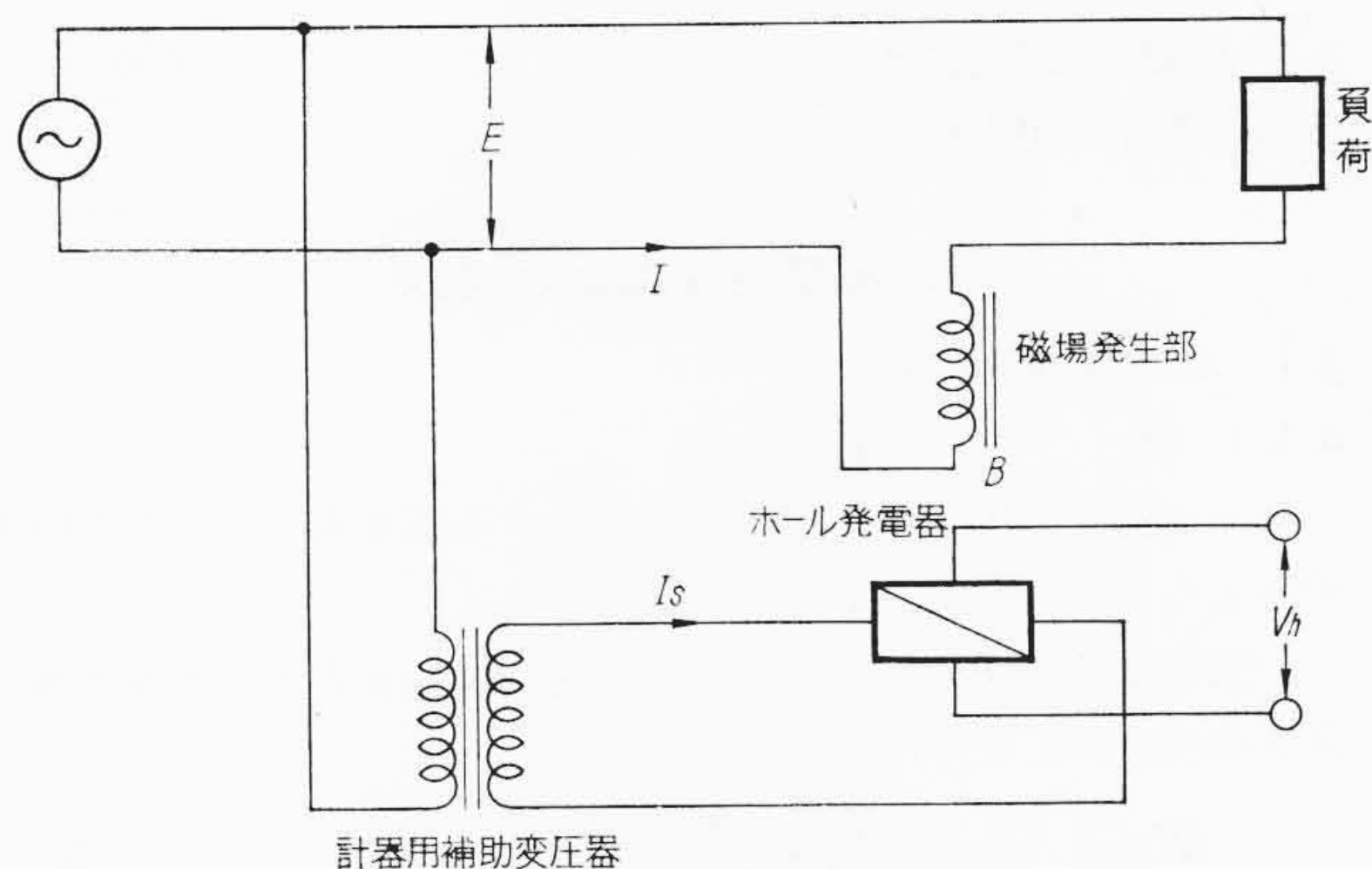
** 日立製作所中央研究所



第 1 図 DH₆₁ 形電力変換器外観図



第 2 図 電力変換器本体図



第 3 図 動作原理図

d : ホール発電器素子の厚さ

$f(l/b)$: ホール発電器素子の長さとの比で決まる形状係数

l : ホール発電器素子の長さ

b : ホール発電器素子の幅

第 3 図に示すように磁心回路に空けきを設け、その間にホール発

電器を配置し、磁束密度を線路電流に比例して発生させるようにし、ホール発電器の制御電流には線路電圧に比例した電流を流すようにする。

したがって、制御電流および磁束密度 B は

$$I_s = k_1 E_m \sin \omega t \dots\dots\dots (2)$$

$$B = k_2 I_m \sin(\omega t - \phi) \dots\dots\dots (3)$$

で表わせる。

ただし k_1, k_2 : 比例常数

(1)式に(2), (3)式を代入すると

$$\begin{aligned} V_h &= \frac{k_0}{2} E_m I_m \{\cos \phi - \cos(2\omega t - \phi)\} \\ &= k_0 E I \cos \phi - k_0 E I \cos(2\omega t - \phi) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ただし $k_0 = \frac{R_h}{d} f(l/b) k_1 k_2$

E : 電圧実効値

I : 電流実効値

で与えられる。

ゆえにホール電圧の直流分は線路を流れる電力に比例するから、ホール発電器出力電圧の直流分を取り出すことにより電力を測定することが可能である。

3. 定格、仕様および性能

三相電力を測定するには平衡三相線路の場合には一相の電力を測定して三倍すればよく、不平衡三相線路の場合には二電力法によって電力を測定する必要がある。

すなわち、平衡三相線路において相電圧が利用し得る場合には、PTの二次電圧は $110/\sqrt{3}$ V の場合が多いので、第4図のように本器を接続して測定可能である。また不平衡三相線路においては第5図に示すように二電力法により測定される。

3.1 定 格

- (1) 被測定入力電圧 110V または $110/\sqrt{3}$ V
- (2) 被測定入力電流 5A
- (3) 定格周波数 50c/s または 60c/s (切換タップ付)
- (4) 出力電圧 500W 入力にて 15mV (切換スイッチにて 5, 10, 15mV 切換)
- (5) 出力インピーダンス 約 100Ω 以下
- (6) PT, CT に対する負担 PT 側 1VA 以下
CT 側 2VA 以下
- (7) 周囲温度 $20 \pm 20^\circ\text{C}$

3.2 仕様および性能

本器の性能は第1表に示すとおりである。

4. 研究結果および検討

4.1 ホール発電器

4.1.1 構造⁽²⁾⁽³⁾

ホール発電器出力はホール効果に対する基本式よりして(1)式で与えられる。

一般に半導体中のキャリアの移動速度はマックスウェルボルツマンの法則にしたがうため

$$R_h = \pm \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{3K(K+2)}{(2K+1)^2} \cdot \frac{1}{ne} \dots\dots\dots (5)$$

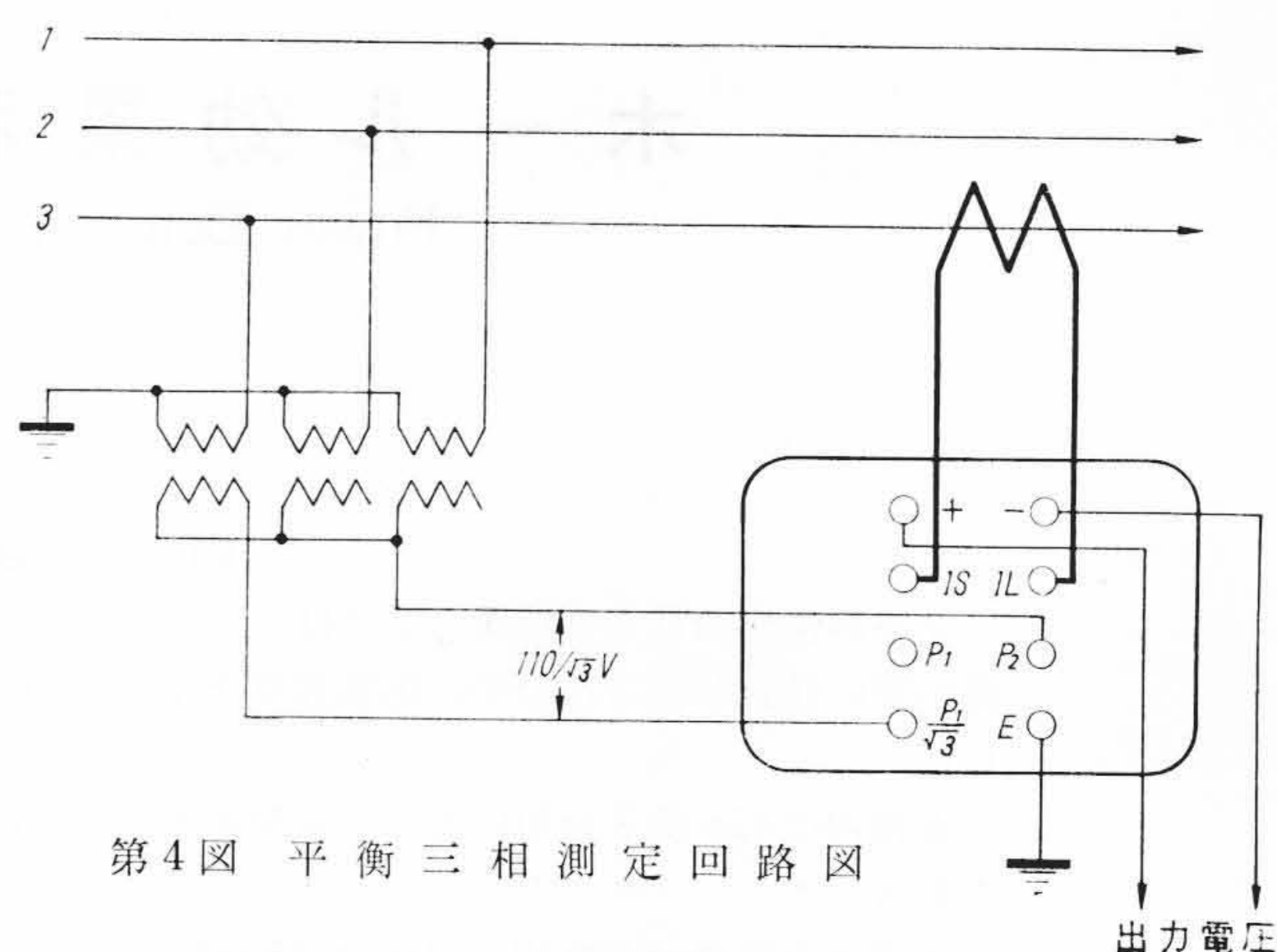
で与えられる。

ただし n : キャリア濃度

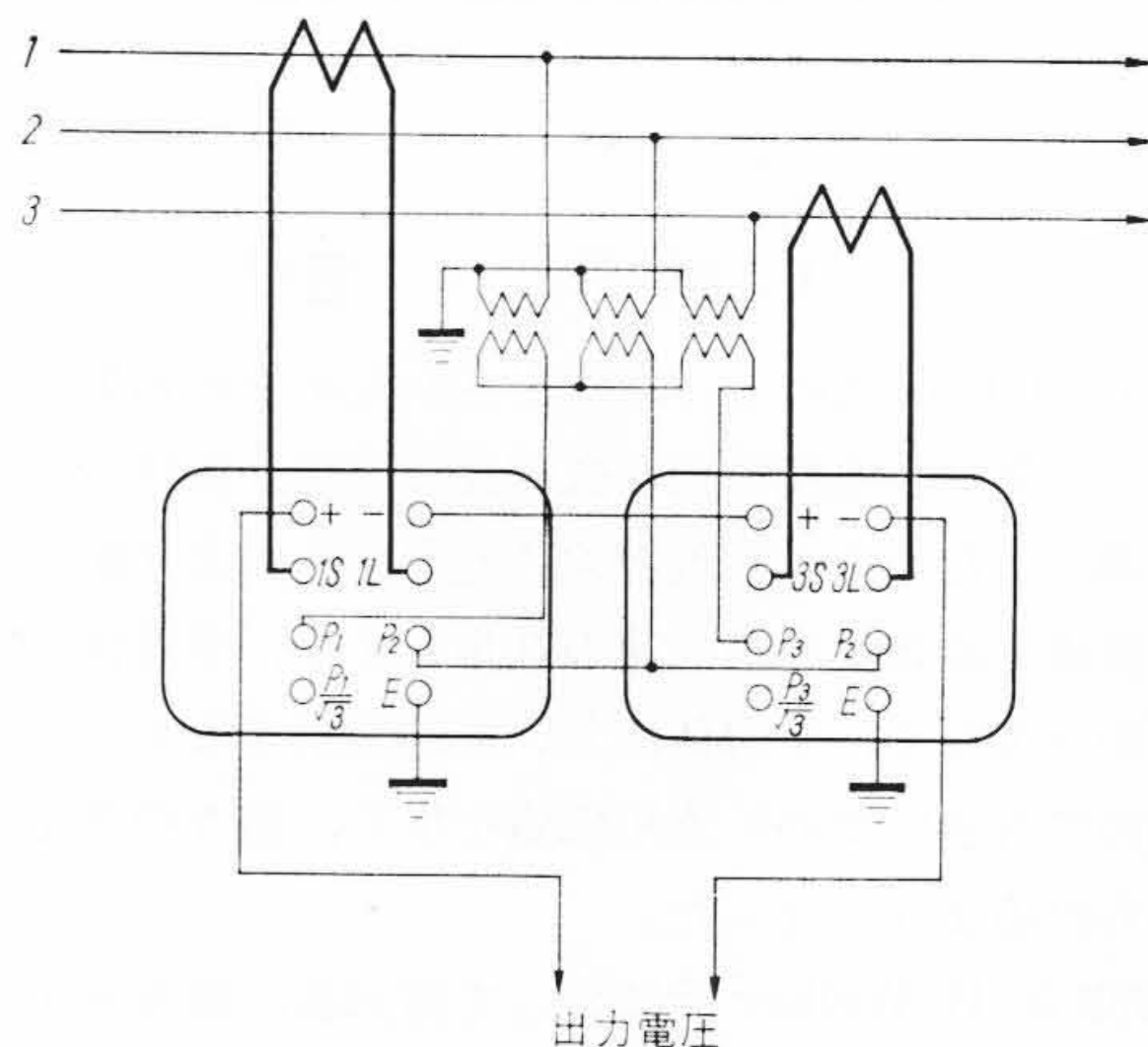
e : 電 荷

$K = m_L/m_T$

m_L, m_T : それぞれ縦方向、横方向の有効質量
n形Geの場合 $K=19$



第4図 平衡三相測定回路図



第5図 不平衡三相測定回路図

第1表 電力変換器特性

項 目	仕 様	性 能
標準誤差		定格入力の $\pm 0.5\%$ 以下
影響値	電源電圧変動	$110V \pm 20\%$ 変動
	電源周波数変動	$+2 \text{ c/s}, -5 \text{ c/s}$ 変動
	力 率	± 0.5 にて
	周囲温度	$20 \pm 20^\circ\text{C}$
入力側絶縁耐力	PT, CT回路間およびそれぞれとアース間 1,500V 1分間	異常なし
出力側絶縁耐力	直流側とアース間 DC1,000V 1分間	異常なし
耐 過 負 荷	電圧側を2倍、電流側を40倍の過電流(1秒間)	異常なし

また形状係数 $f(l/b)$ は I. Isenberg 氏および V. Frank 氏により研究され、つぎのように書きあらわされる。

$$f(l/b) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)^2} \tanh \left(\frac{2k+1}{2} \cdot \frac{b}{l} \cdot \pi \right) \dots\dots\dots (6)$$

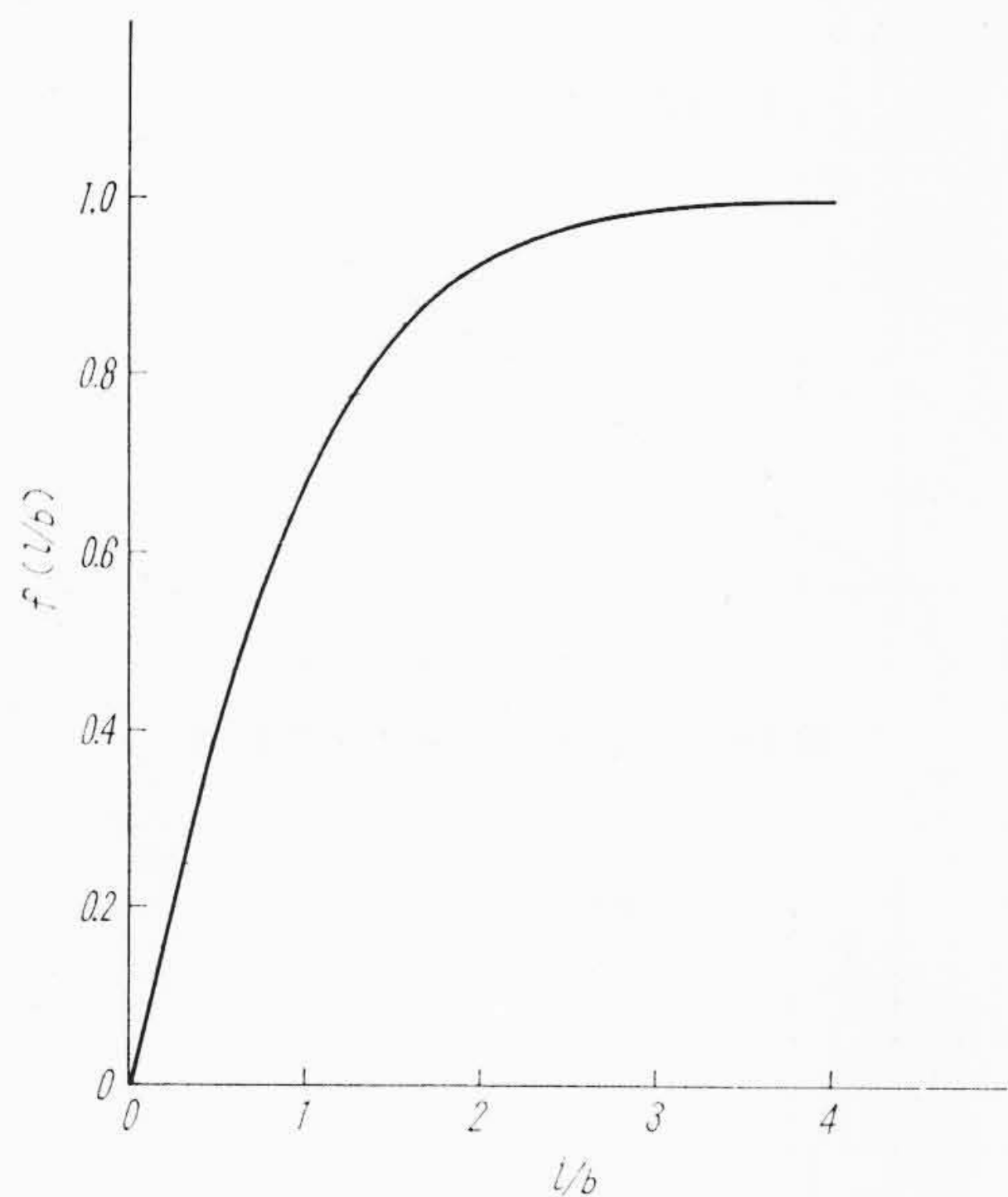
$f(l/b)$ と l/b の関係を図示したのが第6図である。

したがって l/b を2以上に増すことは材料消費の割にホール電圧の上昇は認められないので、寸法形状としてホール発電器素子の長さとの幅の比を2にとる必要がある。

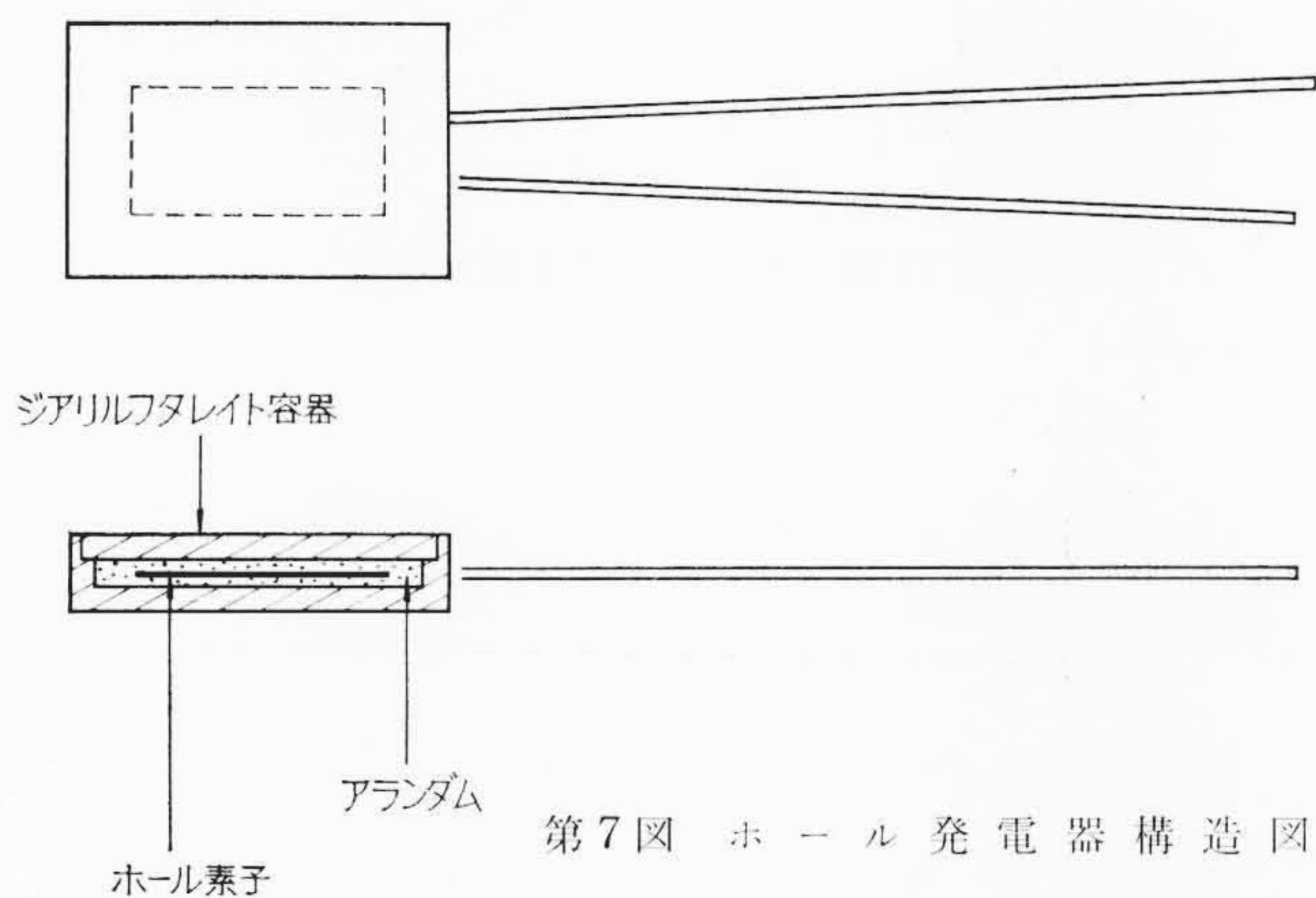
ホール発電器の構造は第7図に示すように、ジアルフタレート容器の中にアランダムをつめ、その中にホール素子を入れている。このような構造にすることによって制御電流をホール発電器素子に流すことにより、発熱にともなう出力端子にあらわれるピエゾ電圧の発生を取り除いている。第8図にホール発電器外観を示す。

4.1.2 不平衡電圧および整流電圧⁽²⁾

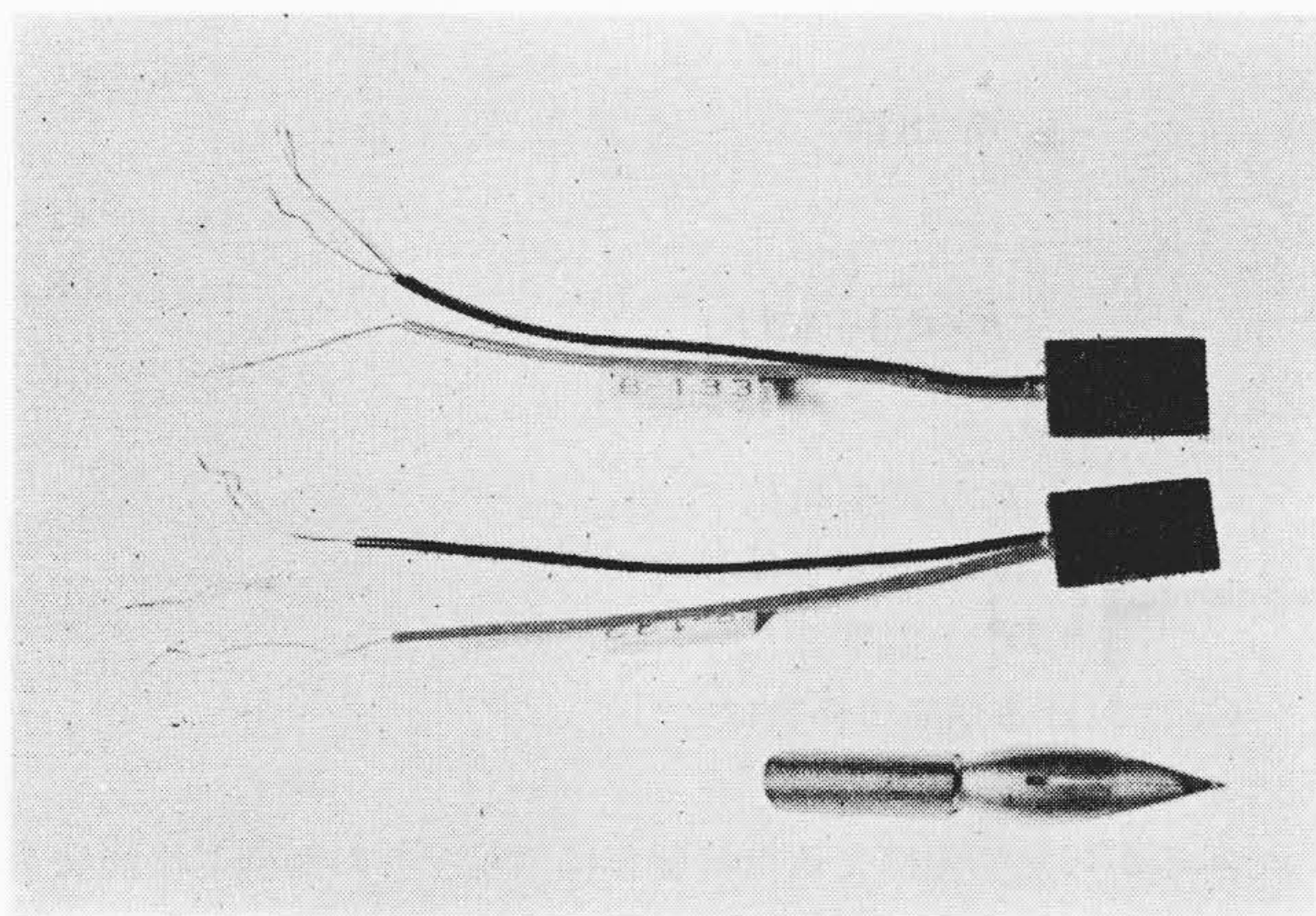
出力端子が完全対称についておれば制御電流を流すことによ



第6図 形状係数



第7図 ホール発電器構造図

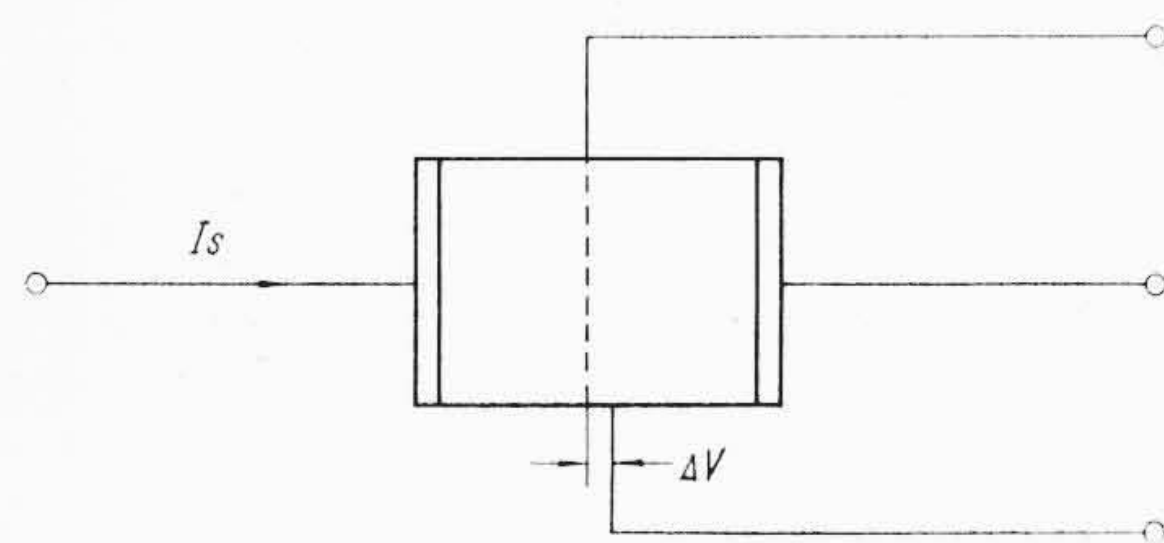


第8図 ホール発電器外観

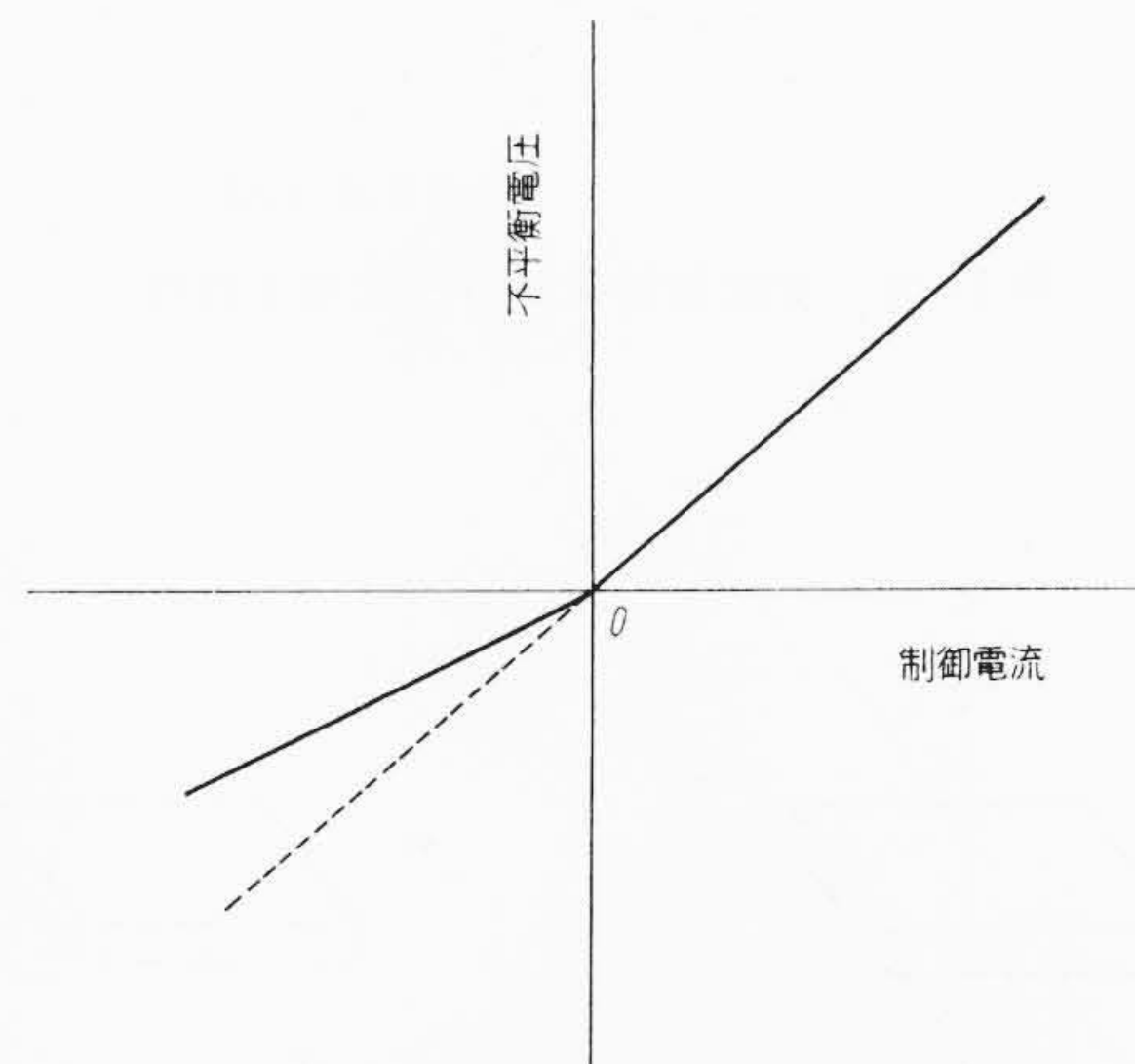
て抵抗降下による不平衡電圧を生じないが、実際問題として完全対称につけることは不可能のため、第9図に示すようにある一定の不平衡電圧 ΔV を生ずる。

また制御電流側端子が完全抵抗接触をなしておるならば、制御電流の方向を変えても不平衡電圧の大きさには変化がなく、整流電圧の発生がないが、実際問題としてはむずかしい問題である。

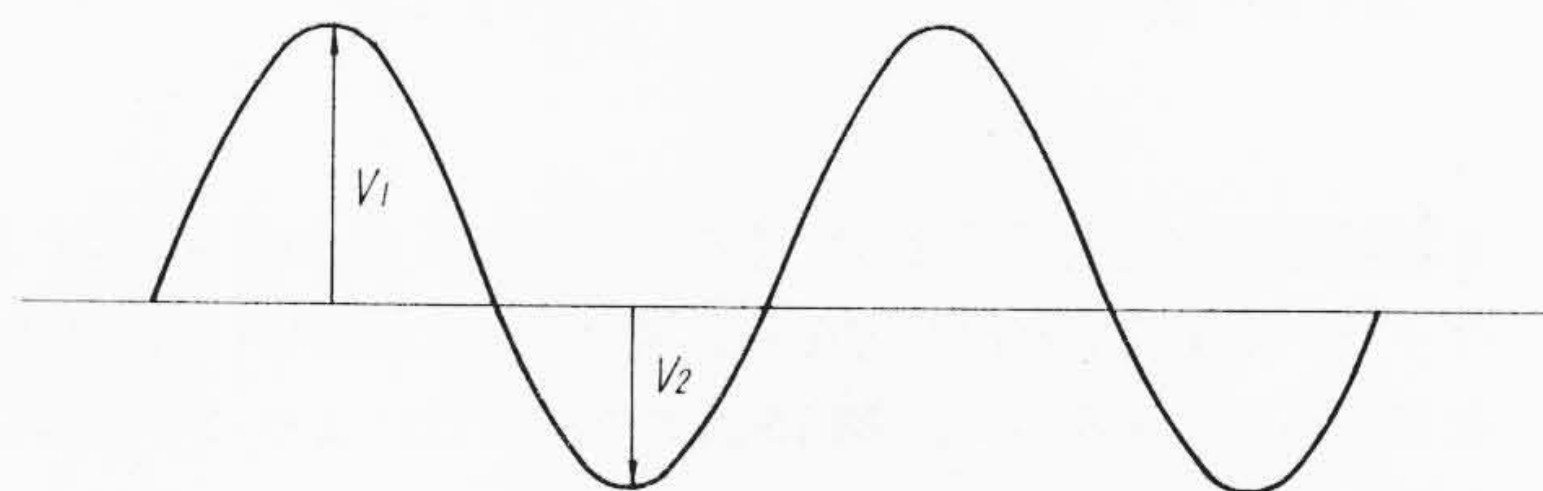
今、第10図に示すように制御電流対不平衡電圧特性が得られたとすると、ここに交流の制御電流を流した場合には第11図のような交流不平衡電圧および整流電圧が発生し、次式のとおり表



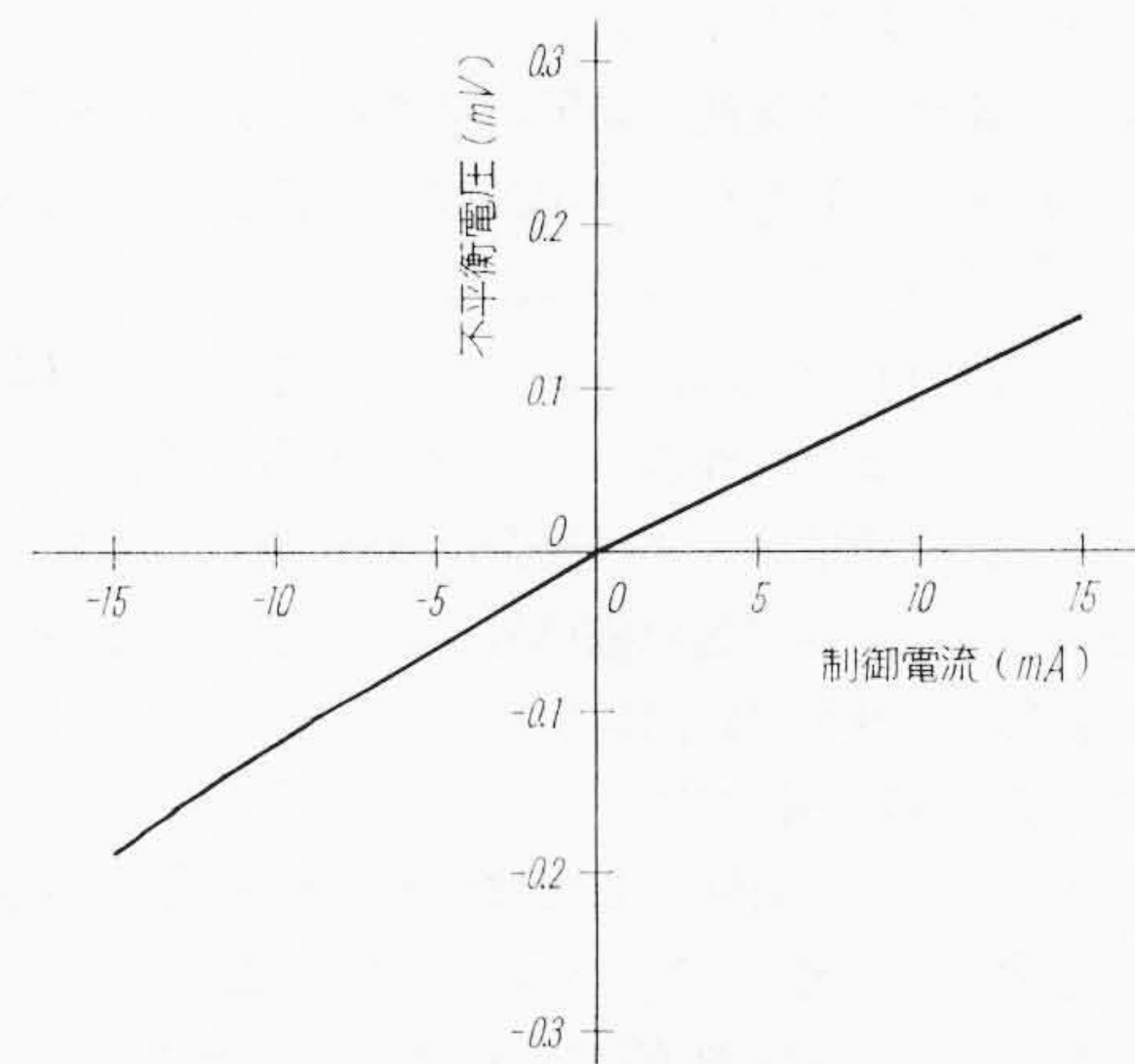
第9図 ホール発電器出力端子取付



第10図 制御電流対不平衡電圧特性



第11図 交流制御電流を流した場合の不平衡電圧波形



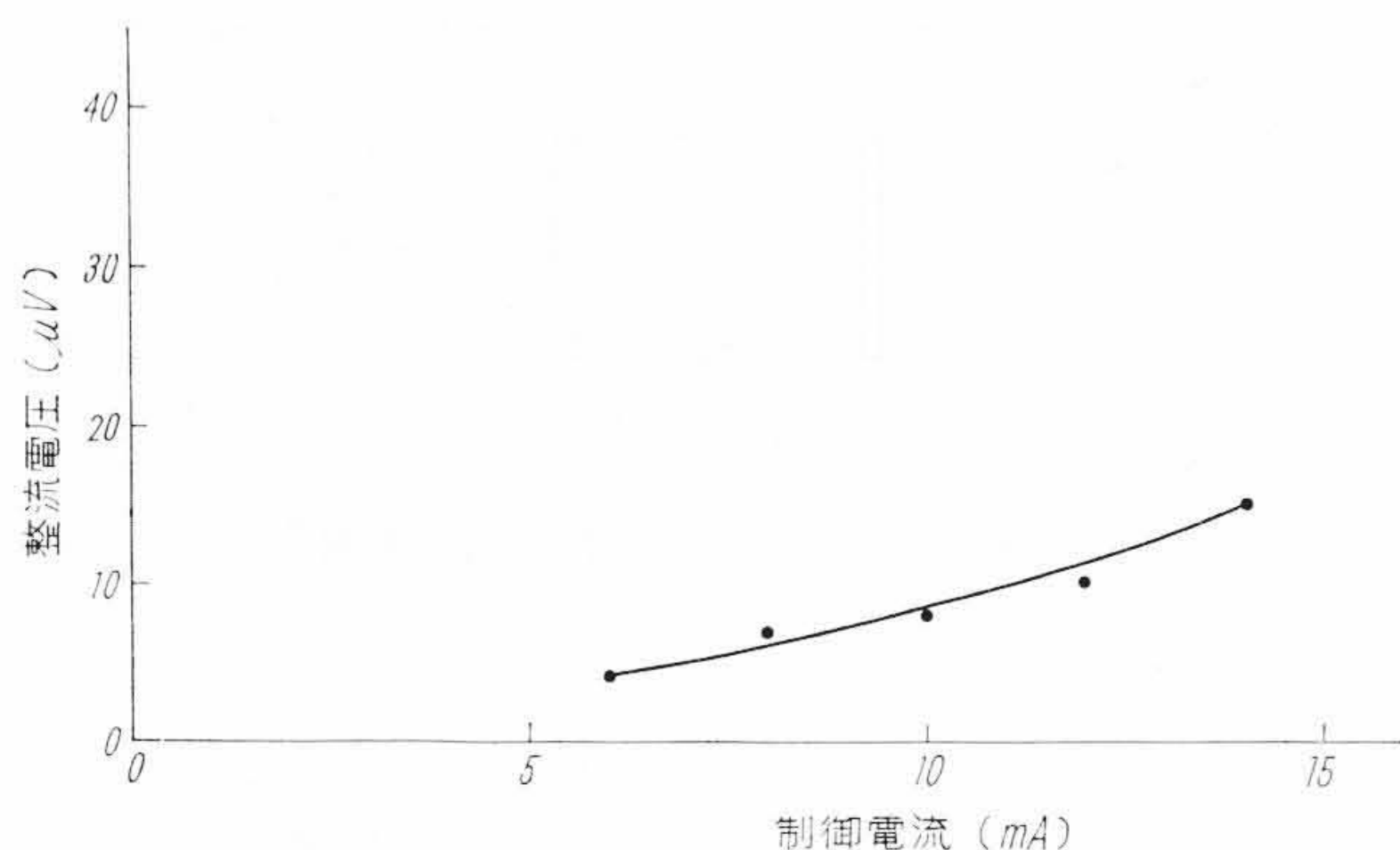
第12図 制御電流対不平衡電圧特性

わすことができる。

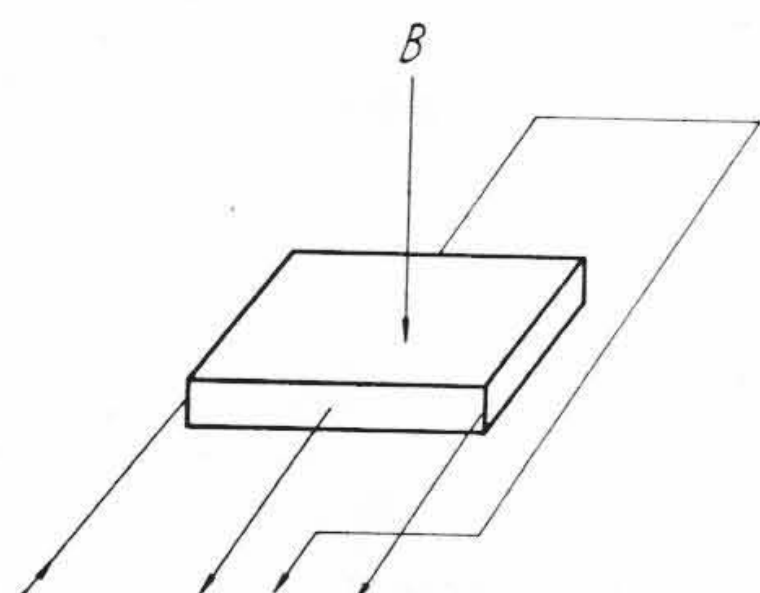
$$F(\omega t) = \frac{1}{\pi} (V_1 - V_2) + \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \sin \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} \left\{ \frac{V_1 - V_2}{\pi (1+n)(1-n)} (1 + \cos n\pi) \cos n\omega t \right\} \dots (7)$$

第12図に制御電流対不平衡電圧特性、第13図に交流制御電流対整流電圧特性の測定結果を示す。したがってホール発電器製作にあたっては不平衡電圧をできる限り小さくし、整流電圧発生をなくす必要がある。

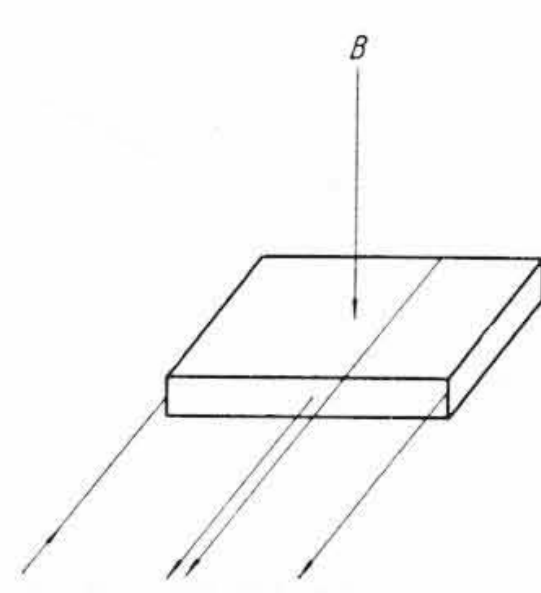
またホール電圧端子リードの引き出し方によって交流磁場によ



第 13 図 交流制御電流対整流電圧特性



第 14 図 ホール電圧リード
取り出し法



第 15 図 ホール電圧リード
取り出し法

る誘起電圧の発生が異なってくる。すなわち第 14 図に示すようなホール電圧の取り出し方をした場合には交流磁場に対応した誘起電圧が発生するので、第 15 図に示す方法によりこの影響を取り除いている。

4.1.3 直 線 性⁽³⁾⁽⁴⁾

動作原理図に示したように、ホール発電器に加える磁場の強さを変化させた場合、磁気抵抗効果の現象によりホール発電器の電気抵抗が変化する。したがって制御電流側端子間の抵抗が加える磁場によって大幅に変化する場合、制御電流を定電圧源から駆動すると制御電流の直線性は害され、ホール電圧の磁場に対する直線性は悪くなる。また同様にしてホール電圧出力端子に負荷をつなぐと、磁気抵抗効果が大きい場合は直線性は害される。

第 16 図はホール発電器の磁場対ホール電圧の関係を求めたもので、直線性は $\pm 0.5\%$ 以内にはいっている。

4.1.4 温 度 特 性^{(4)~(6)}

ホール発電器の温度特性としては、ホール係数の温度特性と制御電流側端子間の抵抗の温度特性に分けることができる。

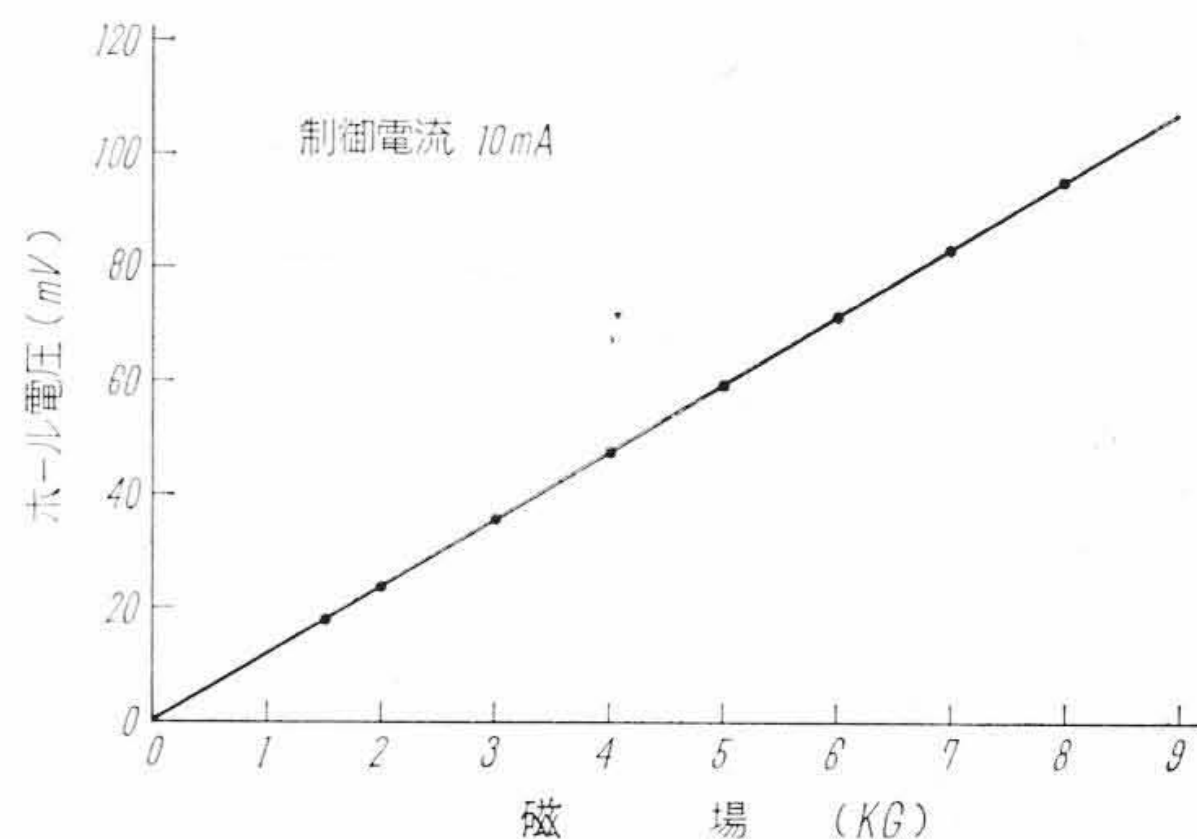
前述のようにホール係数 R_h は(5)式で表わせるから、ホール係数の温度特性はキャリア濃度 n の温度特性で決定される。

不純物密度が大であれば温度特性の良好なる範囲は高温側へのびるが、ホール係数は小になり、逆に不純物密度が小であるとホール係数は大となり、温度特性の良好なる範囲は低温側へずれてきて高くなると急速に低下する。したがって不純物密度はホール係数の大きさおよび温度特性から決定される。

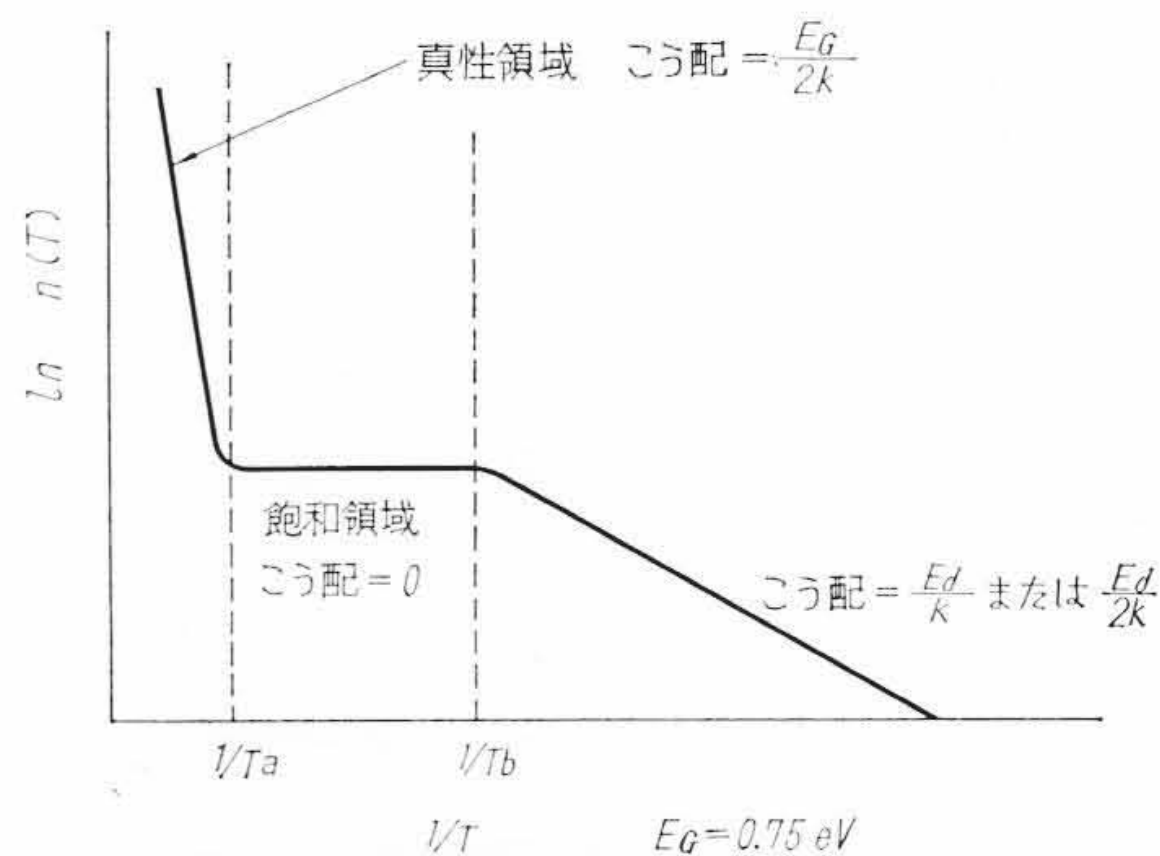
一般に n 型 Ge のキャリア濃度 n の温度による変化を定性的に示したのが第 17 図である。

以上のことからして温度特性の良好なホール発電器を得るには使用温度範囲において飽和領域にあるような n 型 Ge を使用すればよい。第 18 図にホール発電器のホール係数の温度特性を示す。

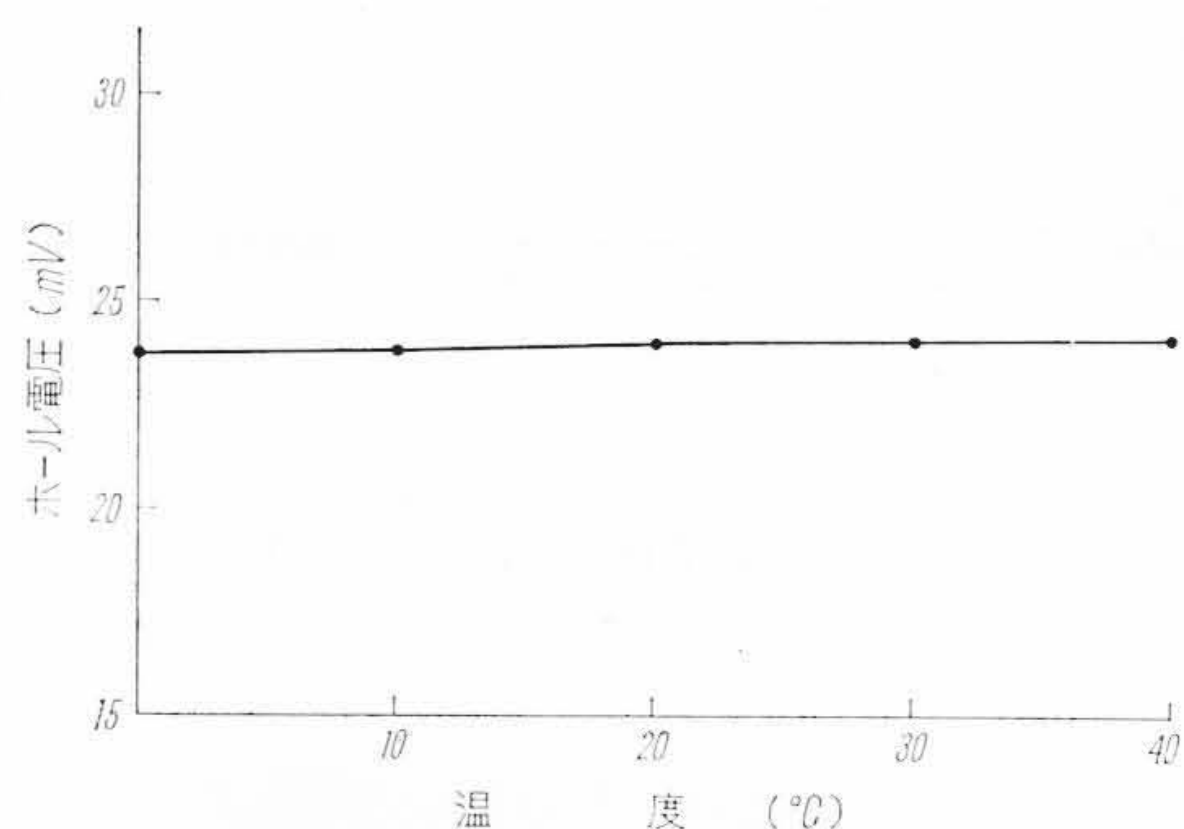
つぎに制御電流側端子間抵抗の温度特性につき検討すると、制御電流側端子間の抵抗値 R は



第 16 図 磁場対ホール電圧特性



第 17 図 キャリヤ濃度温度特性



第 18 図 ホール係数温度特性

$$R = \rho \frac{l}{b \cdot d(1 + \alpha \Delta T)} \dots \dots \dots (8)$$

で表わされる。

ただし ρ : 固有抵抗
 α : 熱膨張係数
 ΔT : 温度変化分

Ge における熱膨張係数は

$$\alpha = 6 \times 10^{-6} \text{deg}^{-1}$$

であるから熱膨張による抵抗変化は無視でき、制御電流側端子間抵抗値の温度変化は比抵抗の温度変化のみに注目すればよい。

比抵抗 ρ は

$$\rho = \frac{1}{n e \mu} \dots \dots \dots (9)$$

で表わせるから、比抵抗の温度特性はキャリア濃度 n 、移動度 μ の温度特性により決定される。

使用 Ge のキャリア濃度は飽和領域にあるため n は一定である。したがって比抵抗の温度変化は移動度 μ の温度変化にのみ依存する。

移動度 μ の温度変化は

$$\mu = A T^{-\tau} \dots \dots \dots (10)$$

ただし A : 常 数

で表わされ、

$$\gamma \approx 1.66$$

であることが知られている。

$$\rho = \frac{1}{n A e} \cdot T^{\gamma} \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} = \gamma \cdot \frac{1}{T} \dots\dots\dots (12)$$

$$\gamma = 1.66 \text{ の場合 } \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} = 0.60\%/\text{deg}$$

第19図に制御電流側端子間抵抗の温度特性を示すが、 $\gamma = 1.66$ で300°K近辺で実測値とよく一致する。

4.2 電力変換器構成要素

4.2.1 磁 場 発 生 部⁽⁷⁾

ホール発電器に加えるべき磁場を発生する部分であって、線路電流に比例した磁場が作られる。

$$B = k i \dots\dots\dots (13)$$

ただし k : 比例常数

i : 線路電流

で表わされる。

第20図に示すような構造の磁気回路の空げきの磁束密度は次式で与えられる。

$$B = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{\mu n i}{l_M + (\mu - 1)g} \dots\dots\dots (14)$$

ただし n : 励磁コイルの巻数

i : 励磁電流すなわち線路電流

l_M : 磁路の長さ

g : 空げきの長さ

μ : 鉄心の導磁率

鉄心の磁気抵抗が空げきの磁気抵抗に比して小さく

$$l_M \ll (\mu - 1)g$$

なる関係が成立するならば、(14)式は次式のように近似される。

$$B \doteq \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{n i}{g} \dots\dots\dots (15)$$

つぎに消費電力と磁束密度との関係を求めるが、抵抗分による消費電力は無視し、リアクタンス分による消費電力のみに注目する。

(15)式より

$$n = \frac{10}{4\pi} \cdot \frac{Bg}{i} \dots\dots\dots (16)$$

鉄心断面積を S とし、漏えい磁束があるため漏えい磁束と有効磁束との割合を γ とすると、全磁束 Φ は

$$\Phi = B(1 + \gamma)S = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{n i (1 + \gamma)}{g} \cdot S \dots\dots\dots (17)$$

また励磁コイルにかかる電圧を e とすると

$$e = \frac{2\pi f n \Phi}{10^8} = \frac{f B^2 g (1 + \gamma)}{2 \times 10^7 i} S \dots\dots\dots (18)$$

ただし f : 被測定電源周波数

消費電力を W とすると

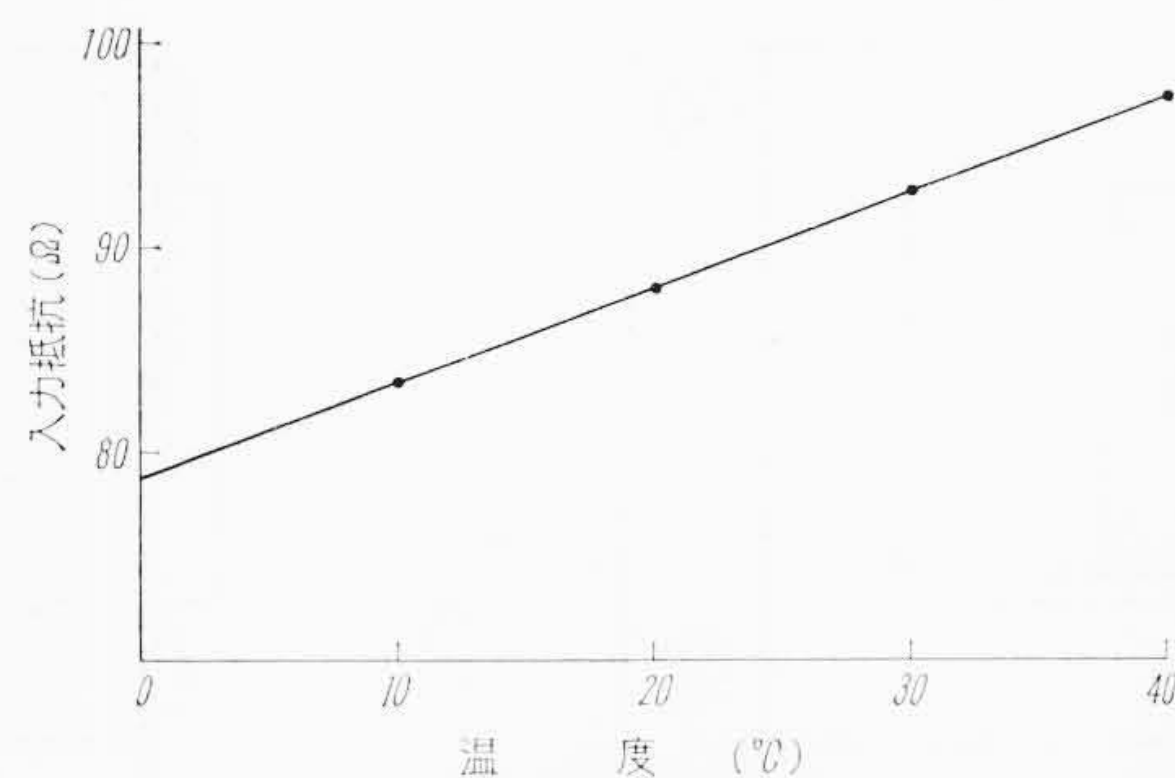
$$W = e i = \frac{f B^2 g (1 + \gamma)}{2 \times 10^7} \cdot S \dots\dots\dots (19)$$

ゆえに

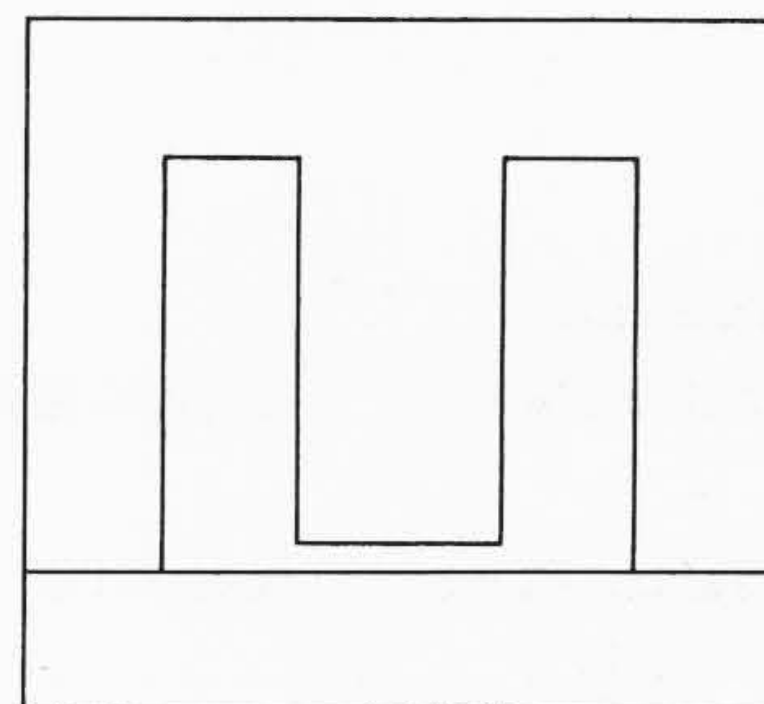
$$B = \sqrt{\frac{2 \times 10^7 W}{f g (1 + \gamma) S}} \dots\dots\dots (20)$$

消費電力は磁束密度の2乗に比例し、鉄心断面積に比例するから鉄心断面積はできる限り小さい方がよい。

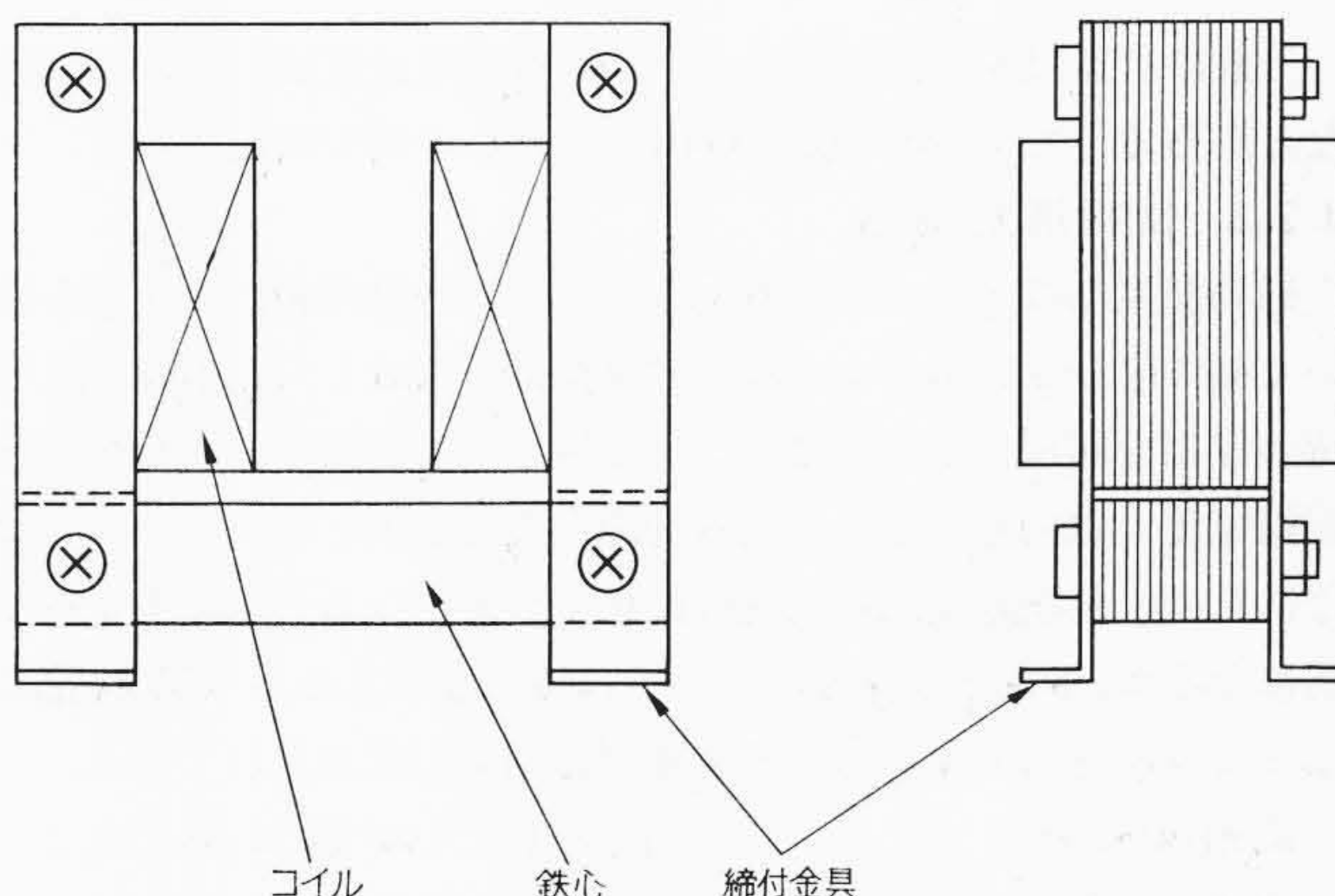
(20)および(16)式により励磁コイルの巻数を決定することができる。



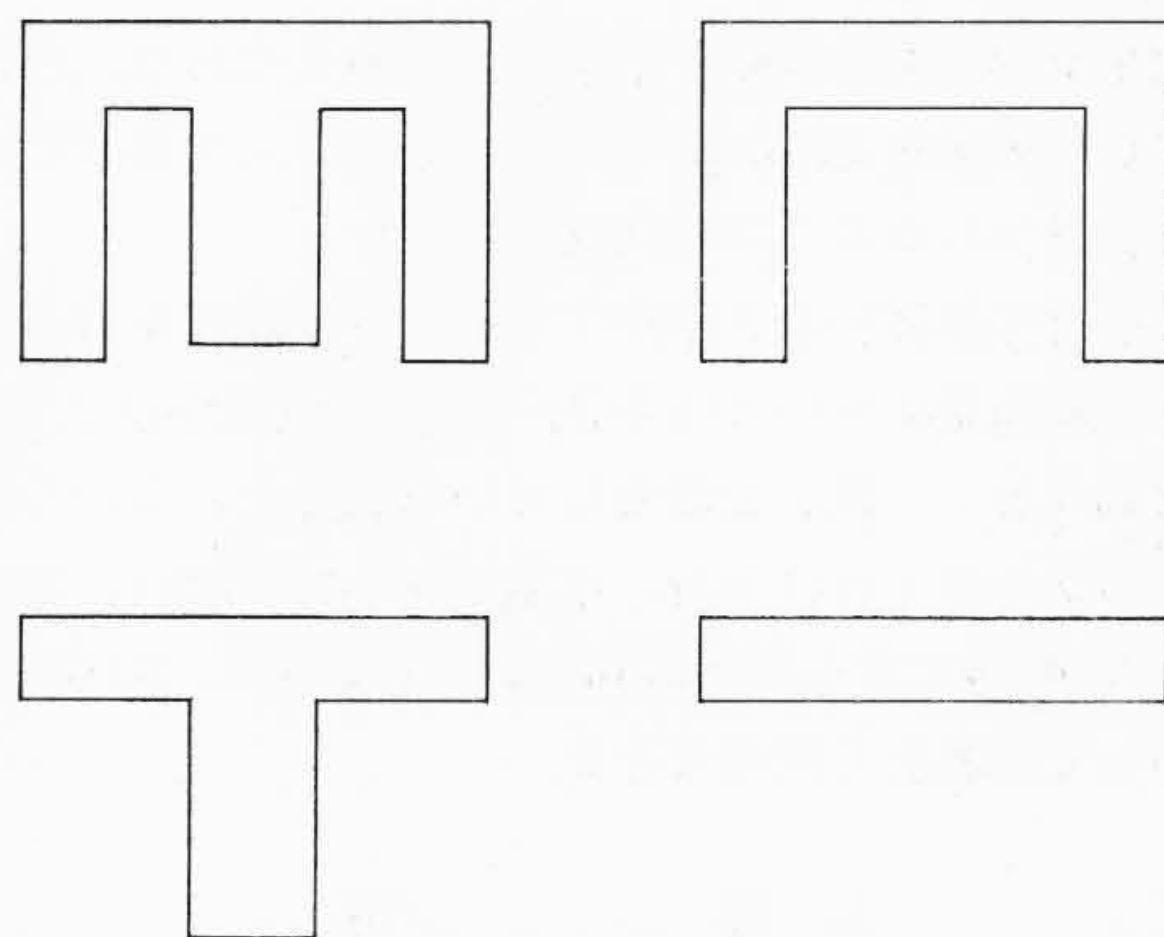
第19図 制御電流側端子間抵抗温度特性



第20図 鉄心形状図

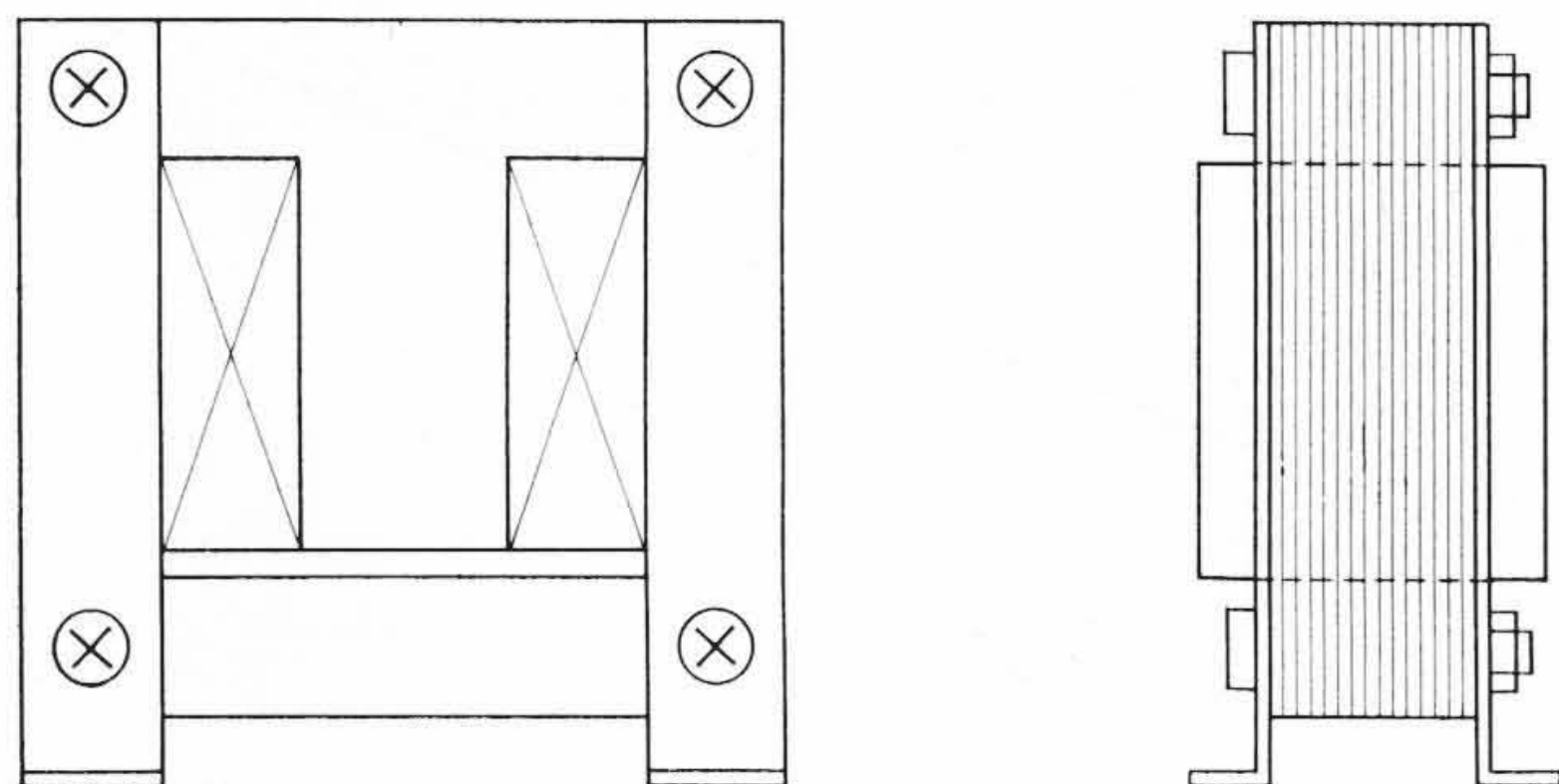


第21図 磁場発生部構造図



第22図 鉄心形状図

鉄心構造としてEI形鉄心をそのままつぎ合わせ第21図のような構造にすると、締付金具による締付具合により鉄心間げき g が製品ごとに異なり、また温度特性は締付金具の伸縮によって決定され、磁束密度の温度に対する変化割合の一様性が期待できないので、第22図に示す4種の形状の鉄心を交互に積み重ね合わせることによってばらつきをおさえることができる。第23図は磁場発生部構造図を示す。



第23図 磁場発生部構造図

4.2.2 計器用補助変圧器⁽⁸⁾

電圧に比例した制御電流をホール発電器に流すために使用される。

変圧器の一次側巻数は次式により決定される。

$$E_1 = 4.44 f N_1 \Phi 10^{-8} \dots \dots \dots (21)$$

ただし E_1 : 一次側電圧

N_1 : 一次側巻数

Φ : 磁束

一般に計器用変圧器においては、磁束密度は電圧特性、位相角などから考えて7,000~9,000 Gauss ぐらいの間で使用される。

4.2.3 位相調整回路

磁場発生部にホール発電器をそう入し、計器用補助変圧器を用いて動作原理図に示すように電力変換器を構成し、被測定電圧、電流の位相を同相よりずらせていった場合、変圧器の一次側電圧と制御電流、磁場発生部における励磁電流と磁束との間に位相差がなければ、被測定電圧と電流の位相差が90度なるとき出力電圧が零になるが、本電力変換器においては位相差があるので第24図に示すように第三次巻線による位相調整回路が付加されている。

位相調整回路につきベクトル図を示したのが第25図である。二次誘起電圧 E_2 を基準ベクトルにとり、磁束 Φ の右側ベクトルは二次の値、左側ベクトルは一次の値を示す。

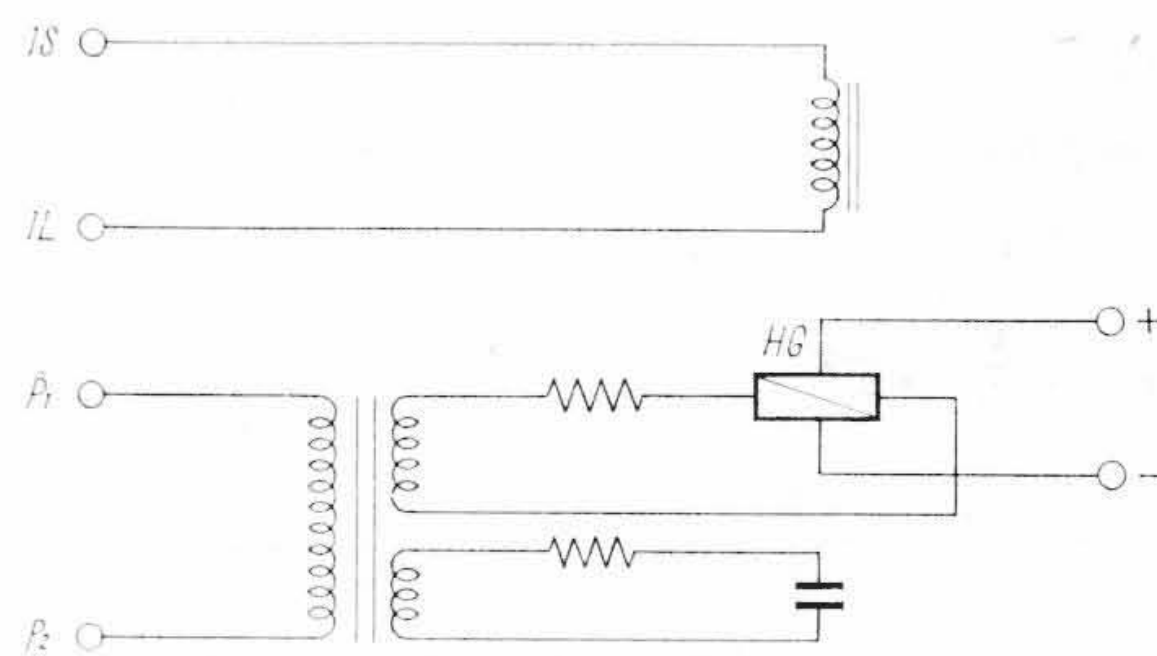
4.3 総合特性

電力変換器の総合特性は第1表に示すとおりであり、応答速度について測定した結果を第26図に示す。したがって従来のサーマルコンバータに見られるような時間遅れはない。

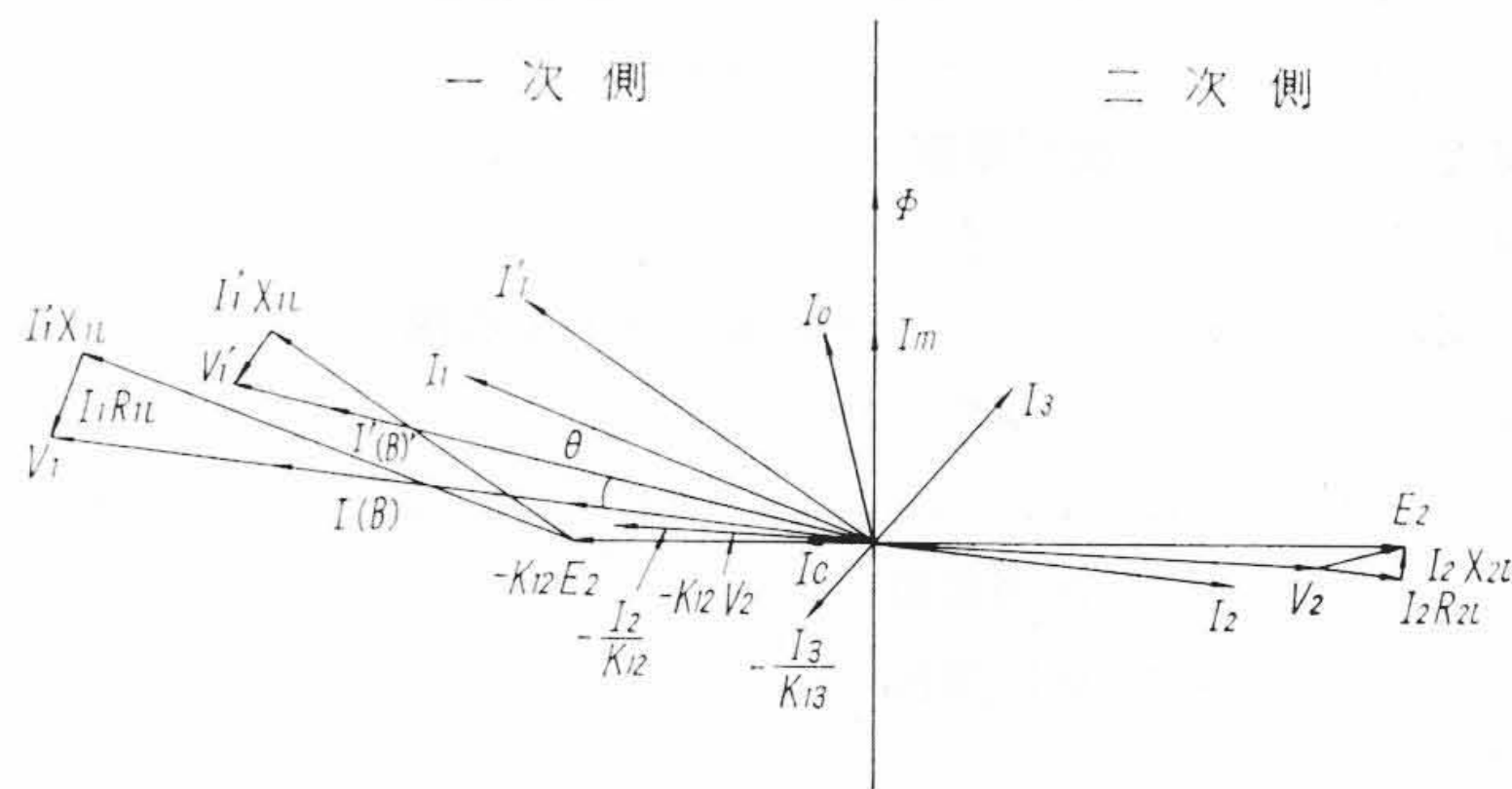
ホール発電器は磁界により動作するため外部磁界影響が問題となるが、本電力変換器においては5 Oe の外部磁界を加えた場合0.1% 以下の影響値であり、鉄心を使用している関係上、電源の波形ひずみが問題になると考えられるが、本器においては第三、第五高調波をそれぞれ15% 加えても影響値0.1% 以下であり、電源波形の波形ひずみに対して問題なく使用できる。

5. 結 言

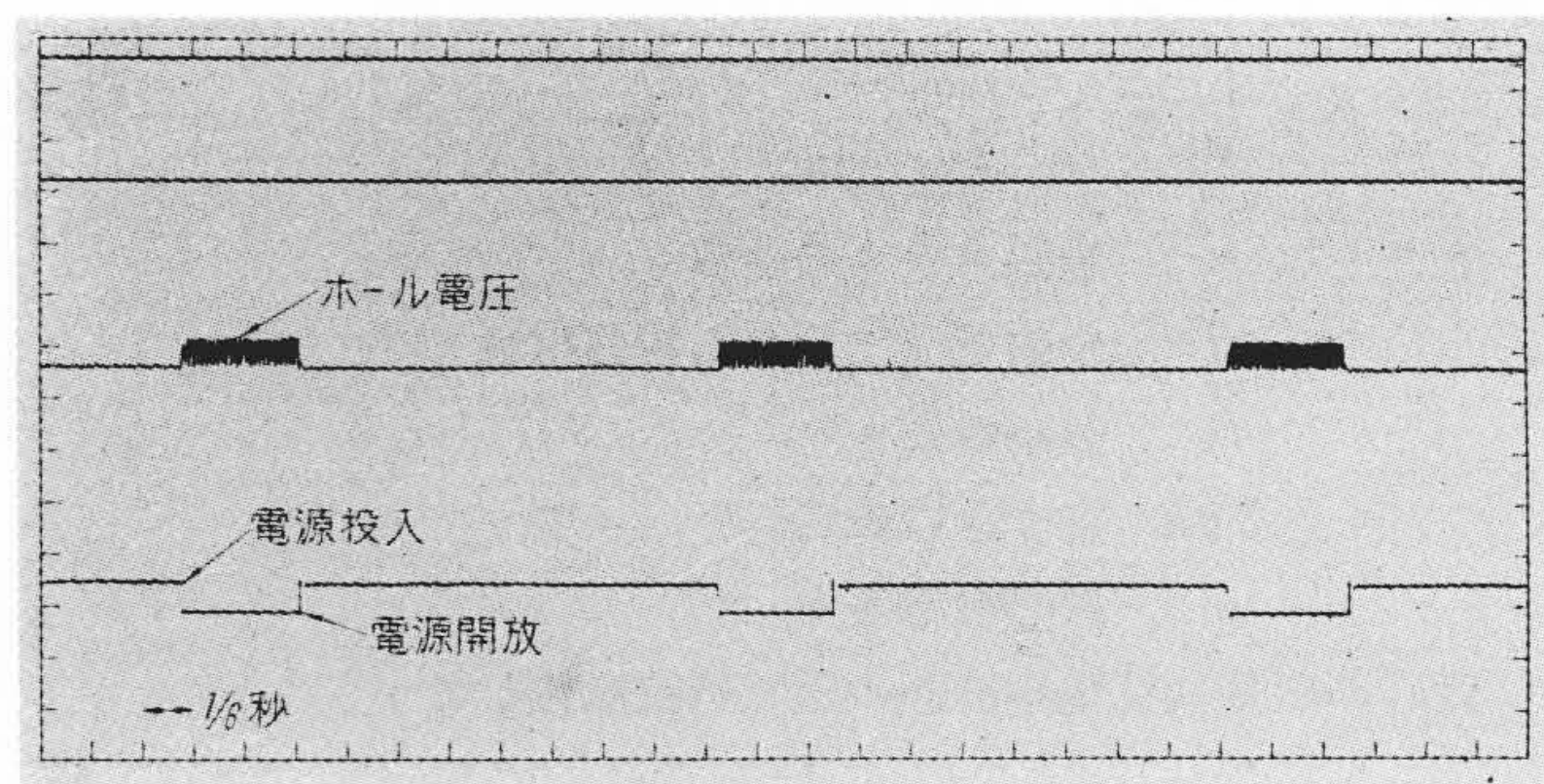
Ge 素子を用いたホール発電器によりホール効果応用計測器として電力変換器を開発したが、測定結果に見られるように標準誤差 $\pm 0.5\%$ 以下、影響値 $\pm 0.5\%$ 以下、直線性 $\pm 0.5\%$ 以下にはいる良好



第24図 位相調整回路



第25図 ベクトル図



第26図 応答速度

なる特性を得た。

第三族、第五族金属間化合物からなるホール発電器を用いたものでは直線性が $\pm 1\%$ 程度で、かつ PCT 負担が大となるに比べ、Ge 素子からなるホール発電器においては直線性が $\pm 0.5\%$ 以下にはいる、PCT 負担がともに2 VA 以下にはいるので、ホール発電器より電力を取ることを要せず、電圧平衡方式で用いるような電圧のみを必要とするものでは、第三族、第五族金属間化合物のホール発電器を用いるよりも Ge 素子のホール発電器を用いたほうがよいと考えられる。

今後サーマルコンバータに代わり、遠隔測定など各方面への利用が期待される。

参 考 文 献

- (1) W. Hartel: Siemens ZS., 28, 376 (Sept. 1954)
- (2) F. Kuhrt: Siemens ZS., 28, 370 (Sept. 1954)
- (3) 酒井善雄: 新しい半導体素子 (昭-36, 誠文堂新光社)
- (4) 小林秋男: 半導体 (岩波全書, 昭-32, 岩波書店)
- (5) 渡辺寧: 半導体とトランジスタ (1) (昭-32, オーム社)
- (6) 堤, 枝本, 寺本: 計測 8, 142 (昭33-3)
- (7) 竹山説三: 電磁気学現象理論 (昭-26, 丸善)
- (8) 池田三穂司: 計器用変成器 (昭-35, 電気書院)