

## 2-2 トランジスタの特性

I. 目的 トランジスタの静特性と動特性を調べることにより、電気回路における能動素子の働きを理解する。

II. 原理 トランジスタの性質 トランジスタの性質を厳密に理解するためには、物性論の基礎の理解が必要であるが、ここでは定性的な説明にとどめる。

(A) 半導体 ゲルマニウム(Ge)やシリコン(Si)のような4価の元素の結晶に、リン(P)やヒ素(As)などの5価の元素を不純物として少量加えると、純粋な結晶よりも導電性が増す。これは4価の原子と置き換わった5価の原子が、周りとの共有結合で余った価電子を「電流の担い手」(以後「キャリア」と言う)として供給するからである。この時、キャリアは負の電荷を持つ電子であり、negative の n をとってこの結晶を N 型半導体という。

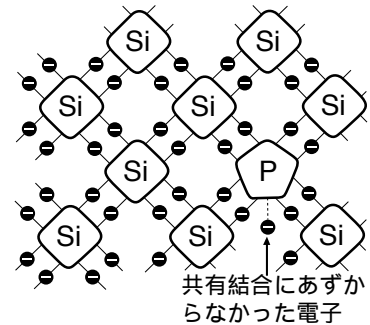


図1 N型半導体

逆に、アルミニウム(Al)やインジウム(In)などの3価の原子をSi、Geに不純物として加えても導電性が増加する。この場合、3価の原子は4価の原子との共有結合で価電子が1つ不足する。この電子の不足した穴(正孔)がキャリアとして振舞う。正孔は電子の存在しない状態であるから、見かけ上、正 (positive) の電荷を担う。このような結晶を P 型半導体という。

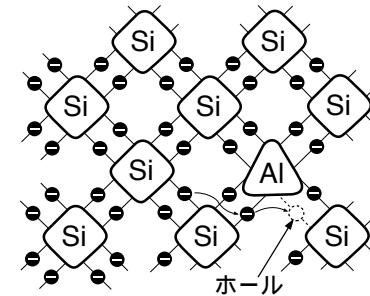


図2 P型半導体

(B) PN 接合 N 型半導体中のキャリアである電子は電荷が負であるため、正電位に向かって移動していく。逆に P 型半導体中の正孔は見かけ上、正電荷であるため、負電位に向かって移動する。図3のように P 型と N 型の半導体を接合したものを考える。P 型の方に正、N 型の方に負の電位をかけると、P 型領域の正孔は負電位に引かれて N 型領域の方へ、逆に N 型領域の電子は正電位に引かれて P 型領域の方へ流れ込み、電流が流れる。逆に P 型に負電位、N 型に正電位をかけると、正孔も電子も接合部分から遠ざかるように動くため、接合部分付近はキャリアの存在しない空乏層となる。この部分

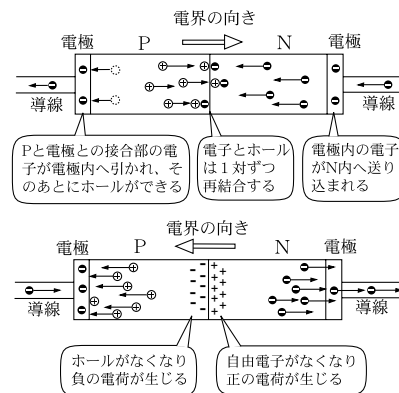


図3

はちょうど絶縁体と同じであり、電流は流れない。このようなダイオードの一方向にしか電流を流さない性質を整流作用という。

(C) **トランジスタ** トランジスタは図4に示すように3つの領域を接合したもので、NPN型とPNP型がある。NPN型とPNP型の違いはキャリアの電荷が(電流の向きが)逆であるだけで、端子の機能は同じである。ここでは、よく用いられるNPN型について説明する。

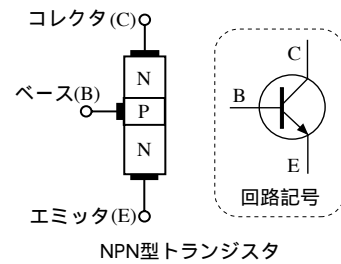


図4

NPN型トランジスタは中央に非常に薄いP型領域(ベースと呼ぶ)を挟んで両側にN型半導体が接合してある。一方のN型領域のキャリア濃度は高くしてあって、エミッタと呼ばれ、もう一方のN型をコレクタと呼ぶ。NPN型トランジスタは通常エミッタをアース側、コレクタに正電位をかけて使用する(エミッタ接地と呼ばれる)。ベースに何も接続せず、コレクタに正電圧をかけると、コレクタ-ベース間のPN接合が逆向きなので電流は流れない。しかし図5のようにベースにも正電圧をかけてやると、ベース-エミッタ間はPN接合が順方向なので、エミッタからベースへ電子が移動しベース領域内の正孔と再結合してベース電流が流れる。ところがベースが極めて薄く、エミッタのキャリア濃度が高いので、大部分の電子はコレクタにまで流れ込み、コレクタ電流となる。ベース電流とコレクタ電流の比はベースの厚さで大体決ってしまうので、ほぼ一定である。この事は小さなベース電流で大きなコレクタ電流を制御できることであり、これがトランジスタの増幅作用である。コレクタ電流( $I_C$ )とベース電流( $I_B$ )との比( $I_C/I_B$ )を電流増幅率と呼ぶ。

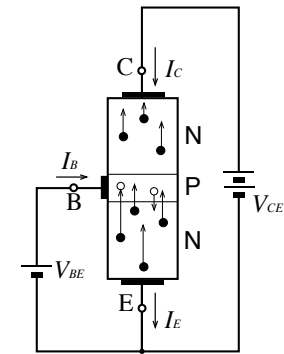


図5

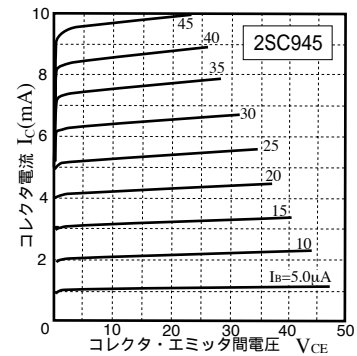


図6

(D) **A級増幅** 図6に代表的なトランジスタの特性図( $V_{CE}-I_C$ 特性図)を示す。

$I_C$ は $V_{CE}$ からも少し影響を受けるが、主に $I_B$ で決ってしまう。トランジスタはエミッタを接地して使用されることが多く、その基本的な回路を図7に示す。入力信号はベースに加えられ、出力はコレクタから取り出される。ここでは出力を電圧として取り出すために抵抗 $R_o$ が負荷として接続されている。この時電源電圧を $V_{CC}$ とすると出力電圧 $V_{CE}$ は

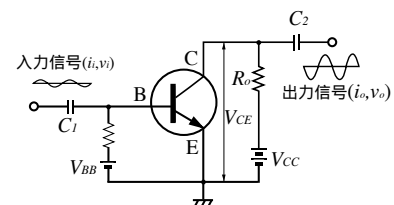


図7

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \times R_o$$

となる。この関係を特性図の上で表すと、図8の直線ACになる。 $I_B$ が変化したときに $I_C$ 、 $V_{CE}$ の変化はこの直線上に沿って起こる。この直線を動作線という。A級増幅回路では、正負の入力信号に対して歪の少ない増幅をするために、無信号時でもB点のように動作線の中央付近の $I_C$ 、 $I_B$ を流しておく。この無信号時の電流に対応する点を動作点と呼ぶ。

(E) B級増幅、C級増幅 図9のように動作点を $I_B$ がほぼ0の付近までずらした場合、入力信号の正側しか増幅されなくなる。これをB級増幅と呼ぶ。さらに $I_B = 0$ の領域まで動作点をずらすとC級増幅と言われる。これらは出力波形の歪は大きくなるが、コレクタ電流の流れる割合が減るため、発熱が少なく、電力効率が良い利点がある。そのため、おもに電力増幅やスイッチングに用いられる。

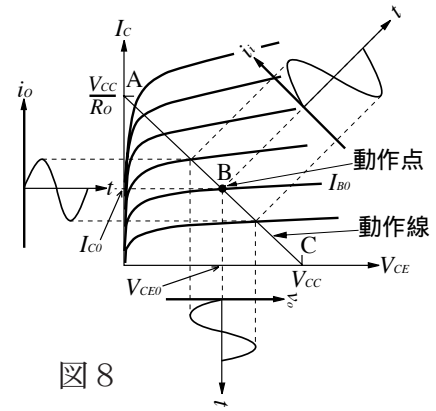


図 8

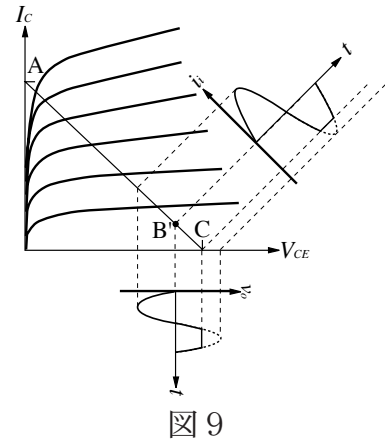


図 9

【参考文献】 CQ 出版：久保大次郎著『トランジスタ、ダイオードの使い方』  
CQ 出版：鈴木雅臣著『定本 トランジスタ回路の設計』

### III. 装置

1. オシロスコープ 取扱方法等は「オシロスコープ」の章を参照。
2. CR 発振器 取扱方法等は「オシロスコープ」の章を参照。
3. 回路盤 パネル面を図10に、回路図を図11に示す。この回路盤は、可変抵抗

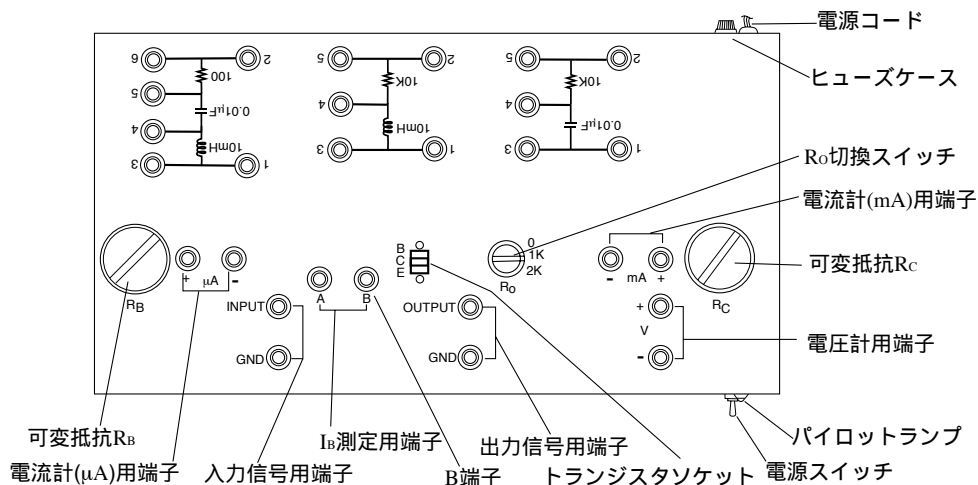


図 10

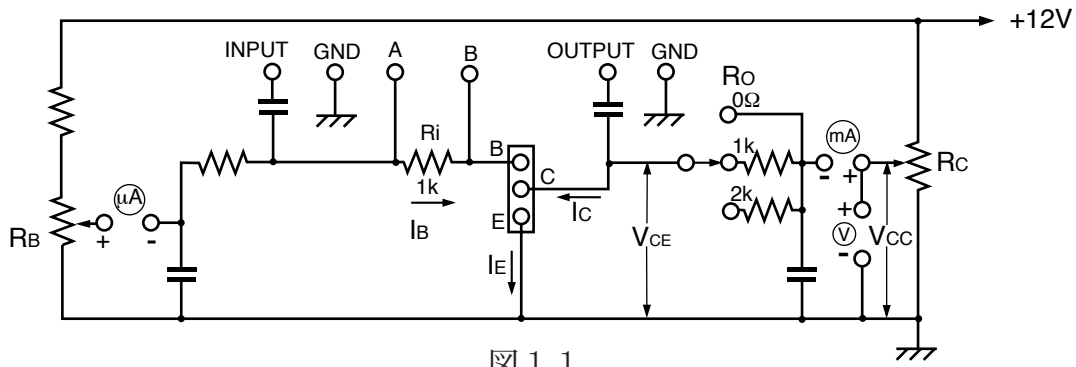


図 1 1

器  $R_B$ 、 $R_C$  によって、 $I_B$  と  $V_{CC}$  を変えることができる。 $V_{CC}$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  の値は、それぞれ接続された V、 $\mu\text{A}$ 、mA のメーターから直読できるようになっている。入力信号は INPUT 端子からコンデンサを通して加え、出力信号は OUTPUT 端子からコンデンサを通して交流成分だけを取り出すようになっている。入力信号の電流値はベースに直列に入った  $R_i$  の両端に生じる電位差  $v_{R_i}$  から  $i_i = v_{R_i} / R_i$  で求める事ができる。また、同様にして出力信号の電流値は  $R_o$  の両端の電位差  $v_{R_o}$  から  $i_o = v_{R_o} / R_o$  で求められる。従って電流増幅率  $A_i$  は以下のように求められる。

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_{R_o} \times R_i}{v_{R_i} \times R_o}$$

静特性を測定する時には、 $R_o = 0\Omega$  とすれば  $V_{CE}$  は  $V_{CC}$  と同じとなり、電圧計で  $V_{CE}$  を直読できる。

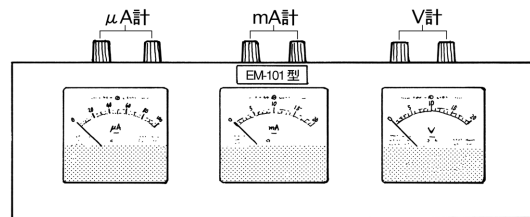


図 1 2

4. **メーター** 回路盤と接続してトランジスタの各端子の電圧、電流を表示させる。使用するものは図 1 2 に示すように  $\mu\text{A}$  計、mA 計、電圧計が一体となっているものである。いずれも直流計であるから、接続の際は極性に注意する。
5. **テスター** 使用法等はこの章末の付録を参照。
6. **配線コード** 両端がバナナプラグになっているものと片側がバナナプラグ、もう片方がミノムシクリップのものがある。たいていは両端がバナナプラグのコードだけで接続できるが、トランジスタの抵抗をテスターで測定する場合にはミノムシクリップでトランジスタの端子をはさむとよい。また、GND 端子の配線には黒、信号線の配線には赤を使うと、配線ミス防止するのに便利である。
7. **方眼紙** 静特性等の作図には方眼紙を使用する。

#### IV. 方法

##### 1. 静特性の測定

- (A) **測定するトランジスタのピン接続の確認** 被測定トランジスタのピン配置を図 1 3 に示す。実際に手に取って PN 接合の向きを確認する。

【注意】 この実験で使用するテスターでは、抵抗測定時に「+の測定端子」に一、「-の測定端子」に+の電圧がかかっているので電流の向きに注意する。また、抵抗レンジの目盛りの読み方にも注意する。テスターの簡単な使用法の説明は44ページにある。

- ①テスターを抵抗測定のレンジにし、「+、-の測定端子」に接続した配線コードを接触させて、その時の表示が $0\Omega$ になるように「 $0\Omega$ 調整つまみ」を操作する。
- ②次にトランジスタを回路盤からはずし、配線コードでトランジスタのエミッタおよびベースをテスターに接続し、順方向と逆方向の抵抗値を調べる。その時の抵抗値と抵抗の測定レンジをレポートに書くこと。
- ③コレクターベース間についても同様に行う。異状があれば担当教員に報告する。

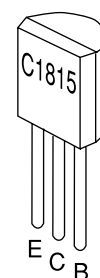


図 1 3

### (B) $V_{CE}-I_C$ 特性

- ①回路盤に何も接続されていない事および電源スイッチが OFF であることを確認して、電源プラグをコンセントに差し込む。
- ②  $R_B$ 、 $R_C$  を左（反時計方向に）いっぱい回しておく。 $R_o$  は 0 に合わせる。
- ③メーター（V、mA、 $\mu A$  計）をそれぞれ回路盤の対応する端子に、極性を間違わないように接続する。この時、メーターが正しく 0 を指していることを確認する。
- ④ピン接続を間違わないようにトランジスタをソケットに差し込む。
- ⑤配線コードの接続をもう一度確認した上で電源スイッチを ON にする。この時、メーターが3つとも振れなければよい。さもなくば直ちに電源を OFF にし、③から接続を再確認する。
- ⑥  $R_C$  を少し右に回し、 $V_{CE}$  を 1V 程度にする。
- ⑦次に  $R_B$  を右に回して  $I_B=5\mu A$  とし、 $V_{CE}=0.5 \sim 12V$  までの間で  $I_C$  を測定する。
- ⑧同様にして、 $I_B=10 \sim 45\mu A$  についても測定し、図6のような  $V_{CE}-I_C$  曲線の図を作成する。 $I_B$  の測定間隔は  $5\mu A$  がよい。

【問題】  $V_{CE} \times I_C$ （トランジスタで消費される電力）が大きい領域では手早く測定しないと結果が変わってしまうが、それはなぜか？

## 2. 動特性の測定

### (A) A 級増幅

- ①回路盤の電源を OFF にする。
- ②  $R_o$  は  $1k\Omega$  にする。メーターおよびトランジスタは前の実験のままでよい。
- ③CR 発振器の周波数は  $1kHz$ 、波形は正弦波、ATTENUATORは  $-30dB$ 、AMPLITUDE は左（反時計）回しいっぱいとし、電源を入れる。
- ④オシロスコープの電源も入れる。TIME/DIV= $0.5ms$ 、VOLTS/DIV= $2V$ 、AC-GND-DC は DC とする。
- ⑤オシロスコープ側の GND と回路盤の OUTPUT 端子の下側の GND、CR 発振器

の GND と回路盤の INPUT 端子の下側の GND、オシロスコープの INPUT と回路盤の OUTPUT、CR 発振器の OUTPUT を回路盤の INPUT に接続する。

- ⑥  $R_B$  を左（反時計方向へ）いっぱい回して回路盤の電源を ON する。
- ⑦  $R_C$  を右（時計方向）いっぱい回す。その時の電圧計の読みを  $V_{CC}$  とし、記録する。

### (B) 動作点の決定

- ① 1-(B) で求めた  $V_{CE}-I_C$  静特性図に  $R_o=1k\Omega$  として動作線を描き、適当な動作点を決める。（動作線の中央付近がよい）
- ② 今決めた動作点の  $I_B$  と  $I_C$  になるように  $R_B$  を調節する。 $I_B$ 、 $I_C$  を記録する。
- ③ CR 発振器の AMPLITUDE をゆっくり右に回して出力を増やしていくと、オシロスコープの画面に正弦波が表示されてくる。さらに CR 発振器の出力を大きくしていくと正弦波の上端や下端がたいらになり波形が歪んでくる。

### (C) 電圧増幅率

- ① トランジスタの電圧増幅率  $A_v$  は出力電圧  $v_o$  と入力電圧  $v_i$  の比で求まる ( $A_v = v_o / v_i$ )。 $v_i$  は回路盤の B 端子で、 $v_o$  は OUTPUT 端子で測定する。発振器の出力を少しずつ増やし、 $v_o$  の振幅が増加しなくなるまで  $v_i$  と  $v_o$  を同時に測定し、それらの関係をグラフに描く。交流信号の電圧は 3 5 ページの図 1 4 に示すように、正弦波の上端と下端の間の大きさ (peak-to-peak 値) を読み取るとよい。オシロスコープの波形が見えない場合

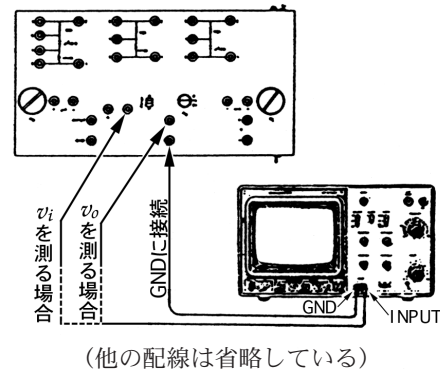


図 1 4

には LEVEL または V-POSITION を調節してみる。オシロスコープの垂直軸入力端子が 1 つしか無いので、図 1 4 に示すように B 端子と OUTPUT 端子に交互に接続し、かつオシロスコープの垂直軸感度を適当に調節して交流電圧を読む。この時、入力結合切換スイッチ (AC-GND-DC) を AC に切り換えておくこと測定が容易になる。

- ②  $v_i$  対  $v_o$  のグラフを作成し原点付近の直線部分から電圧増幅率 ( $A_v = v_o / v_i$ ) を最小二乗法を用いて求めよ。

### (D) 電流増幅率

- ① 上で求めたグラフの直線部分上の任意の 1 点で、端子 A、B、OUTPUT に現れる電圧の交流成分  $v_A$ 、 $v_B$ 、 $v_o$  を測定し、電流増幅率  $A_i = \Delta i_c / \Delta i_B = v_{Ro} R_i / v_{Ri} R_o = v_o R_i / (v_A - v_B) R_o$  を求めよ。（この時  $v_o = V_{CC} - v_{Ro}$  であるが、交流の振幅の絶対値を扱うので  $v_o = v_{Ro}$  と考えてさしつかえない。なお、 $R_i = 1k\Omega$ 、 $R_o = 1k\Omega$ 。）
- ② また 4 2 ページの (B) ⑧ で作成した特性図から  $A_i$  を求めて比較してみよ。

### 3. 後片付け

- ① CR 発振器の AMPLITUDE を左(反時計方向)に回しきっておく。ATTENUATOR は -0dB にしておく。
- ②  $R_B$  および  $R_C$  を左(反時計方向に)いっぱい回す。
- ③ オシロスコープの感度は 5V/DIV、入力切り替えは GND にしておく。
- ④ 回路盤の電源を OFF にする。
- ⑤ 配線コードを全て外す。コードがからまないように束ねておく。
- ⑥ CR 発振器とオシロスコープの電源を OFF にする。
- ⑦ オシロスコープ、CR 発振器、回路盤の電源コードをコンセントから外し、からみ合わないようそれぞれ束ねておく。
- ⑧ 机上を整頓して退席する。

## 【付録】 テスターの使用方法

I. 原理 テスター (circuit tester) は、1 台で直流電圧、直流電流、交流電圧、電気抵抗が測定できる簡便な測定器である。外形を図 15 に、内部の原理的な回路を図 16 に示す。表示器としての高感度電流計に、抵抗、整流器、乾電池を組み合わせて各種の測定ができるようになっている。メーターでの小さい値の読み取りには限界があるから、1つの機能内でもいくつかのレンジ(測定範囲)に分けられている。機能および測定レンジの選択はパネル面のレンジ切替つまみで行う。

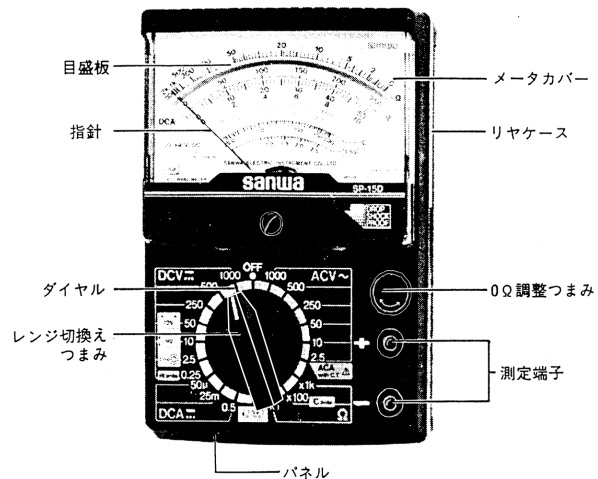


図 15

II. 測定法 基本的には測りたい機能及びレンジにレンジ切替つまみを合わせて、赤いテストリードを+側に、黒いテストリードを-側に接触させる。ただしレンジの上限を越える入力を加えると壊れるおそれがあるので、安全策として一番大きいレンジから値を確認しながら順々にレンジを下げていく方法が良い。使用が終わればレンジ切替つまみを OFF に合わせておく。テストリードは、はずして束ね、テスター本体と一緒に箱に入れておく。

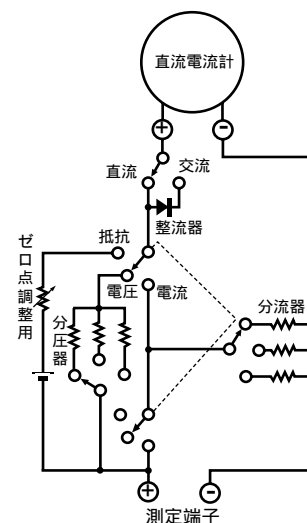


図 16

## 1 . 測定の準備

- ①メーター 0 位置調整：OFF の状態でメーターが 0 を指しているかを確認する。
- ②テストリードの接続：「+の測定端子」に赤色、「-の測定端子」に黒色リードを差し込む。

## 2 . 直流電圧の測定

- ①レンジ切り換えつまみを DCV の適当なレンジに合わせる。
- ②被測定回路のマイナス電位に黒、プラス電位に赤のテストリードを当てる。
- ③メーターの振れを V 目盛りで読み取る。
- ④電池の電圧はそれぞれの表示の有るレンジで測定する。

## 3 . 交流電圧の測定

- ①レンジ切り換えつまみを ACV の適当なレンジに合わせる。
- ②被測定回路にテストリードを当てる。
- ③メーターの振れを V 目盛 (AC2.5V レンジは専用の赤色目盛り、他は DCV と共通) で読み取る。

## 4 . 直流電流の測定

- ①レンジ切り換えつまみを DCA の適当なレンジに合わせる。
- ②被測定回路を切り離し、マイナス電位側に黒、プラス電位側に赤テストリードを当てる。
- ③メーターの振れを DCA 目盛りで読み取る。

## 5 . 抵抗の測定

- ①レンジ切り換えつまみを  $\Omega$  の適当なレンジに合わせる。
- ②テストリードの赤と黒をショートして、メーターが 0  $\Omega$  を指すよう、0  $\Omega$  調整つまみを回して合わせる。(0  $\Omega$  調整つまみを右一杯に回しても 0  $\Omega$  まで振れない時は内蔵電池を新品と交換する。)
- ③テストリードを被測定物に当てる。
- ④メーターの振れを  $\Omega$  目盛りで読み取る。抵抗の目盛りは、電圧などの目盛りと大小関係が逆になっているので (図 1 7) 注意する。

### 【注意】

\* $\Omega$  レンジの測定時には+、-の極性が測定端子の表示と反対になる。半導体の測定の場合に注意すること。

\*DCA および  $\Omega$  レンジの時に過大な入力を与えないこと。

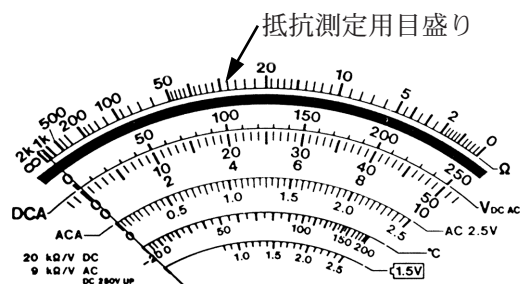


図 1 7