

## 1. 目的

さまざまな場所においてセンサは使われている。センサの動作原理を理解し、この特性を活かすことでどのような測定に応用されるかを理解する。

## 2. 概要

センサとは、光・電気・磁気・熱などといった物理量を感知し、これは電気信号に変換する素子のことである。また人間の持つ五感（視覚・臭覚・味覚・聴覚・触覚）では定性的にしか物理量を評価できないが、センサを用いた測定では定量的な評価が可能となる。

センサに用いられる材料に、金属、半導体、超伝導体、磁性体、誘電体がある。それぞれの特性を活かしたセンサが多種多様に存在する。その中で、半導体は様々な用途への応用が考えられており、広く用いられている。半導体は絶対零度 ( $T=0[\text{K}]$ ) のもとでは絶縁体の特性を呈するが、温度の上昇により禁制帯幅を上回る熱エネルギー  $k_B T$  ( $\therefore k_B$ : ボルツマン定数 ( $=1.38 \times 10^{-23} [\text{J/K}]$ )) が加わると、価電子帯の電子は伝導帯へ遷移する。また、熱だけではなく光による電子の遷移もあり、たとえ絶対温度の状況下でも、禁制帯幅を上回る光エネルギー  $h\nu$  ( $\therefore h$ : プランク定数 ( $=6.63 \times 10^{-34} [\text{J}\cdot\text{s}]$ ),  $\nu$ : 光の振動数  $[\text{Hz}]$ ) が供給されると、電子 - 正孔対が生成される。このため、絶対零度で外部からエネルギーを供給されない状況下では、半導体に電界を印加しても伝導電子が伝導帯に存在しないため電流は流れない。一方、熱や光のエネルギーにより電子が伝導帯に励起されると、電流は流れるようになる。このような特性を有する半導体をセンサに用いることで、熱や光を感知することが可能になる。

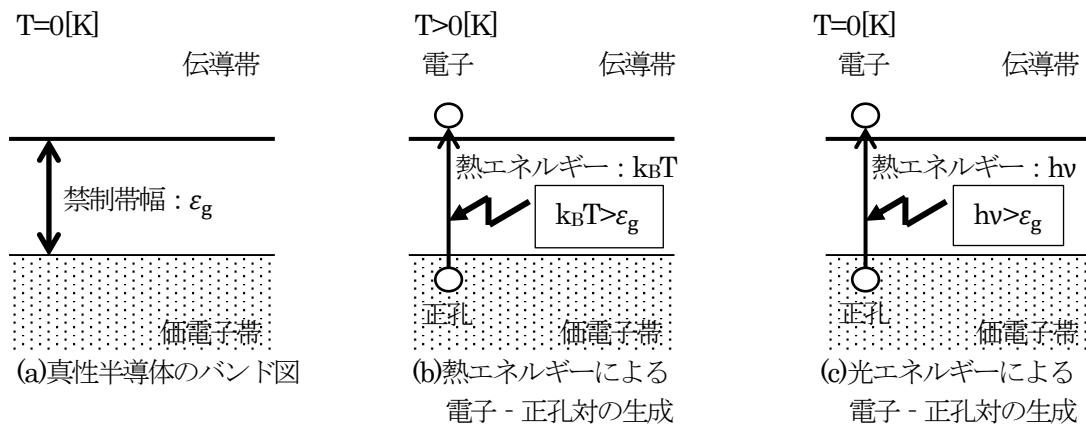


図1 熱と光のエネルギーによる真性半導体の電子 - 正孔対の生成モデル

## 3. 使用機器

表1に実験に用いたしよう機器を示す。

表1 センサの実験の使用機器

名称	メーカー名	製造番号	型番	仕様
赤液棒状温度計	———	———	———	0~100℃
テスタ	YOKOGAWA	No.0150901	2412	DC 20kΩ/V AC 10kΩ/V
テスタ	YOKOGAWA	No.0149501	2412	DC 20kΩ/V AC 10kΩ/V
テスタ	YOKOGAWA	No.0147901	2412	DC 20kΩ/V AC 10kΩ/V
乾電池	Panasonic	———	LR(×3)	1.5V
LED	———	———	———	赤色
サーミスタ	———	———	———	———
フォトダイオード	———	———	———	———

#### 4. 結線図

サーミスタによる温度の測定を図2，フォトトランジスタによる発光ダイオード（LED）の発光色（光の波長）による影響の測定を図3に示す。

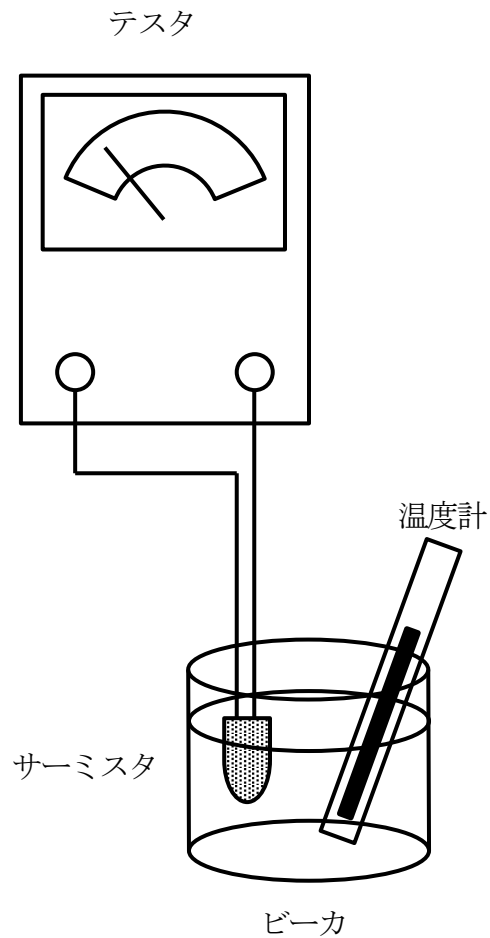


図2 サーミスタによる温度の測定

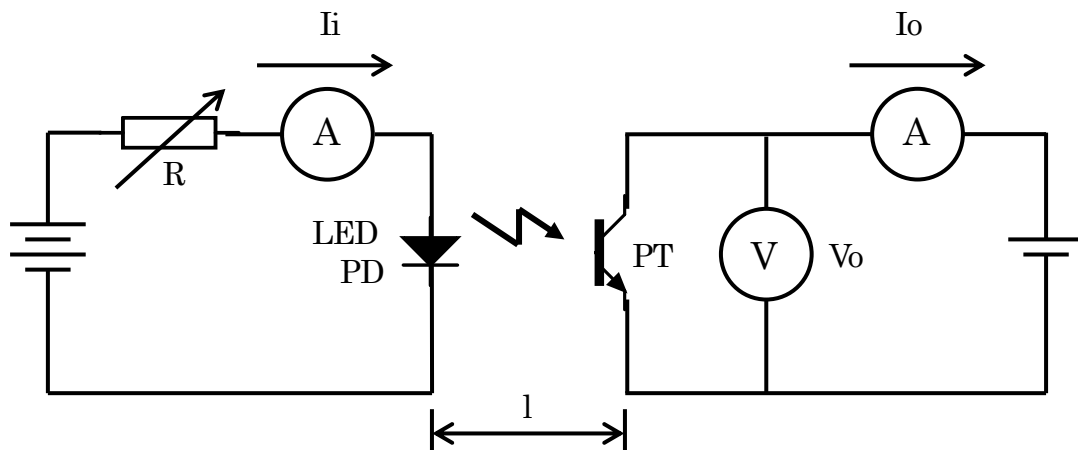


図3 フォトトランジスタを用いた光検出回路

## 5. 実験方法

### 1. サーミスタによる温度の測定

- ① ビーカにお湯を少量入れる。
- ② ビーカを回し、お湯でビーカを温める。
- ③ 別のビーカに水をいれ、準備しておく。
- ④ テスタの抵抗値を零調整する。
- ⑤ お湯を一度捨て、8分目までお湯を入れる。
- ⑥ 温度計とサーミスタを入れる。
- ⑦ 図2のように結線する。
- ⑧ 温度と抵抗値を測る。
- ⑨ お湯の入っているビーカに棒温度計でかき混ぜながら、水を少しずつ足していく。
- ⑩ ⑧, ⑨を繰り返していき、最低温度まで測る。

### 2. フォトトランジスタによる発光ダイオード (LED) の発光色 (光の波長) による影響の測定

- ① PD と PT の距離  $l$  を 10mm にし、取り付ける。
- ② 図3のように結線する。
- ③ 可変抵抗  $R$  を変化させ、 $I_i$ ,  $I_o$ ,  $V_o$ , LED の明るさを測定する。

## 6. 実験結果

### 1. サーミスタによる温度の測定

測定結果を表2, 3に示す。

表2 温度と抵抗の関係

温度 [°C]	抵抗 R[Ω]
85.5	1120
79	1320
70	1780
60	2560
50	3600
40.5	5200
34.5	6500
30	7800
25	9100

表3 班別の最低、最高温度時の抵抗の関係

班	最高温度[°C]	抵抗[Ω]	最低温度[°C]	抵抗[Ω]
野村, 橋本	83	3500	26	15800
長谷川, 早川 K, 早川 H	85.5	1120	25	9100
平均	84.25	2310	25.5	12450

表2を元にサーミスタの温度 - 抵抗特性のグラフを図4に示す。

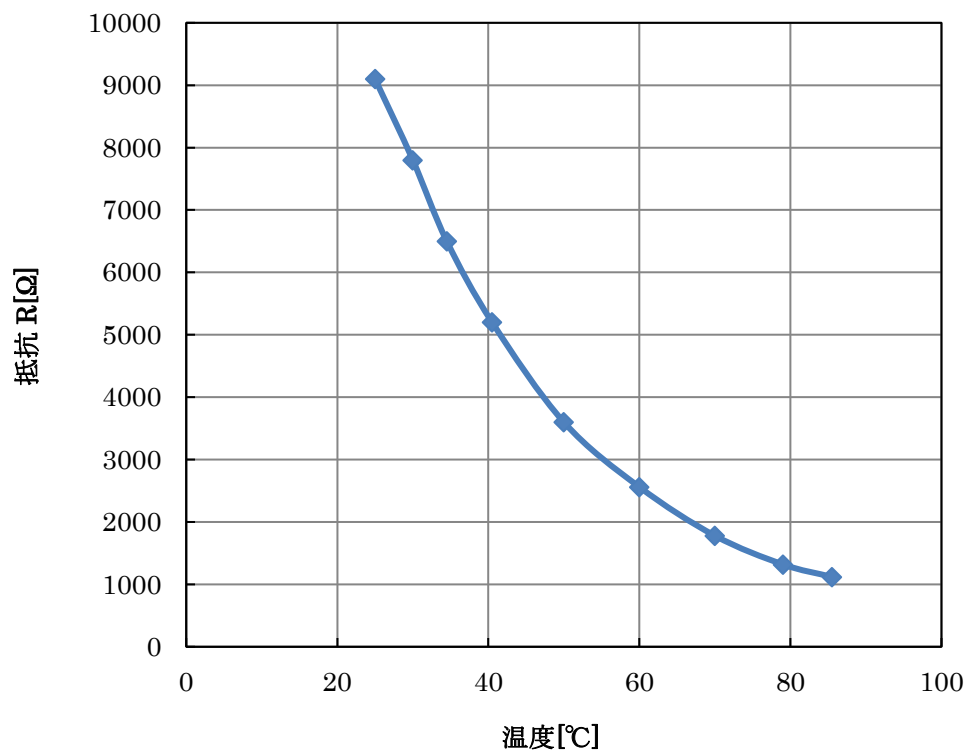


図4 サーマスタの温度 - 抵抗特性

2. フォトトランジスタによる発光ダイオード (LED) の発光色 (光の波長) による影響の測定  
測定結果を表4に示す。

表4 フォトトランジスタによる LED の発光色による影響の測定結果

入力側 (PD 側)					出力側 (PT 側)					
Ii			入力抵抗 [Ω]	LED の 明るさ	Io			Vo		入力抵抗 [Ω]
レンジ値 [mA]	電流値 [mA]	内部抵抗 [Ω]			レンジ値 [mA]	電流値 [mA]	内部抵抗 [Ω]	レンジ値 [V]	電圧値 [V]	
0.5	0.118	1700	27124	とても微光	0.05	0.0282	5100	2.5	1.390	54391
5	0.5	190	6190	微光		0.0283			1.375	53687
50	5	19	619	弱光		0.0301			1.370	50615
	10		319	やや中光		0.0324			1.355	46921
	15		219	中光		0.0342			1.350	44573
	20		169	中光		0.0367			1.345	41749
	25		139	やや強光		0.0380			1.340	40363
	30		119	やや強光		0.0399			1.320	38183
	35		105	強光		0.0411			1.315	37095
	40		94	強光		0.0428			1.305	35591

可変抵抗 : 0~10kΩ

・各側での入力抵抗

入力側 (PD 側) の電圧 : 3.0[V], 電流 : Ii[mA],

出力側 (PT 側) の電圧 : Vo[V], 電流 : Io[mA]であるので, 以下の式で求められる。

$$\text{入力抵抗} = \frac{\text{電圧値}}{\text{電流値}} + \text{内部抵抗}[\Omega]$$

表3を元に電流の入力 - 出力特性のグラフを図5に示す。

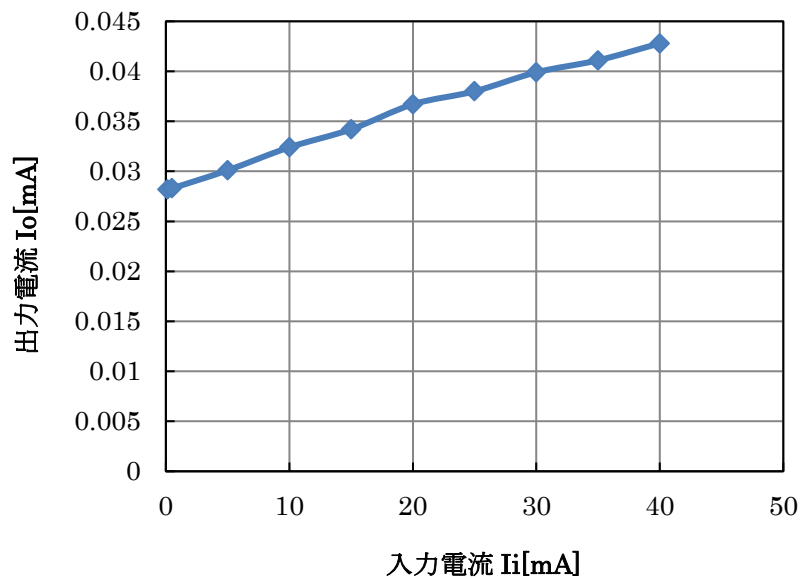


図5 電流の入力 - 出力特性

## 7. 考察

### 1. サーミスタによる温度の測定

図4のグラフから温度が上昇するとサーミスタの抵抗が低下していることがわかる。普通、温度が上がると、抵抗値も上がると予想される。しかし、サーミスタの抵抗値の求める式は、

$$R = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} [\Omega]$$

$R_0$ =周囲の温度  $T_0$ [K]のときの抵抗

$R$ =サーミスタの温度が  $T$ [K]のときの抵抗

$B$ =サーミスタの常数[K]

で求められる。この式より、抵抗は温度  $T$ [K]の逆数の指数関数となるので、温度の上昇とともに抵抗値が下がっていくと言える。また、このサーミスタは温度の上昇とともに抵抗値が減少するものであるので、直熱型サーミスタだと考えられる。

### 2. フォトトランジスタによる発光ダイオード (LED) の発光色 (光の波長) による影響の測定

今回の実験では LED は赤色のみを使用したため、色の違いによる依存性についての考察が行えないため、光の強弱について考察をしていく。

表4から LED の入力電流を上げていくと、LED の光が徐々に強くなり、出力電流も比例して上がっていることがわかる。もし、他の色の LED で実験した場合、波長の違いからフォトトランジスタの出力に違いが出ると思われるが、入力電流と出力電流は比例の関係にあると考えられる。

## 8. 課題

- 1) LED の色 (光の波長) の違いによって、フォトトランジスタの出力に違いが生じた理由を考えよ。

LED の色は光の波長によって決まる。例えば、可視光線で考えると、380nm~700nm である。波長が短いほうが紫色で、長いほうが赤色である。長いほうが禁制帯幅が短く、遷移する電子の量も多くなるので、フォトトランジスタの出力の違いが生じたと考えられる。

- 2) 速度測定以外にフォトトランジスタを用いた装置を考えよ。

赤外線センサ

- 3) 光以外の物理量を用いて、速度を検出する原理を考えよ。

・集積化加速度センサ

物体の運動は速度の他に加速度と変位で表せることができる。この3つはお互いに関係を持ち、速度の積分が変位、微分が加速度を表す。よって、同じセンサを利用して、少し測定条件を変えるだけで全ての測定が可能になる。そこで、磁気加速度センサを考える。重りの慣性によって、永住磁石を含む移動体と重りとは相対運動を起こす。このときの相対変位の時間的変化は、差動トランスなどで測定が可能である。移動体の変位量と移動に要した時間より、計算で速度と加速度を求めることができる。

- 4) サーミスタを用いた温度測定では、被測定物の温度上昇と共にサーミスタの抵抗は小さくなる。その理由を考えよ。

サーミスタに印加される電圧が低く、サーミスタの中を流れる電流によってその内部で消費される電力が、サーミスタを多少加熱させるが、その値が小さい範囲内では、電圧と電流の間にはオームの法則即ち直線的な関係が成り立つ。

しかし、サーミスタに流れる電流が大きくなるとその内部で消費される電力が増加し、サーミスタの温度が周囲温度よりも上昇するとその抵抗が減少し、同一電流で抵抗値が普遍の場合に比べて端子電圧を低くして平衡を取るようになる。即ち電圧と電流の間に非直線的な関係が生じる。さらに電圧が増加するとその曲線の彎曲が大きくなり、終にある電流値で電圧 - 電流特性曲線に山ができる。その山を電圧が越すと、電流の増加に従って端子電圧は減少し、負抵抗の特性を示すようになる。即ち、サーミスタに入り、そこで消費される電氣的エネルギーは熱エネルギーに変換されてサーミスタの温度を上昇させる。一方、サーミスタの温度が上昇し周囲温度との差が大きくなるほど、それから放散される熱エネルギーが大きくなる。

## 9. 参考文献

なるほどナットク！ センサがわかる本（都甲潔，宮城幸一郎著，平成 14 年 4 月 25 日）

課題の 3)は P82, P83 を参照。

サーミスタとその応用（加野洋吉著，昭和 30 年 3 月 10 日）

課題の 4)は P10, P11 を参照。