

# 熱電変換物質による温度制御計測への応用

電気工学科

美濃部 吉 亨

## 1 緒 言

Seebeck 効果, Peltier 効果で表現される熱電変換現象は, 既に前世紀に発見されたが, これらが実用に供されたのは最近である。特に  $(Bi_{1-x}Sb_x)_2$   $(Te_{1-y}Se_y)_3$  の形の半導体が開発されてからは色々な応用製品が生まれるに至った。

熱電物質(サーモエレメント)をエネルギー利用の面から分類すれば次の三つとなる。

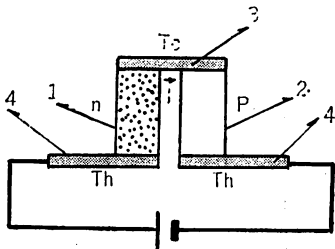
- i) 熱電冷却(電子冷却) … Peltier 効果の利用
  - ii) 熱電加熱 … Peltier 効果の利用
  - iii) 熱電発電 … Seebeck 効果の利用
- i), ii) の現象を利用して温度制御を行わせ, また計測に利用することができる。

## 2 原 理

### i) 熱電冷却

図1において, 1はn型半導体で Seebeck 係数が  $\ominus$

図1: 熱電冷却原理図



である。2はp型半導体で同じく $\oplus$ である。3, 4は金属電極。図の如く電流を流すときの各部のエネルギー準位を図2に示す。

いま  $\Delta T = T_h - T_c$ ,  $T_M = \frac{1}{2}(T_h + T_c)$ ,  $l$ : 長さ,  $S$ : 断面積,  $\sigma$ : 電気伝導度,  $K$ : 熱伝導度,  $p, n$  の素子にそれぞれ  $p, n$  の suffix をつける。

$$\text{全抵抗 } R = \frac{l_n}{S_p \sigma_p} + \frac{l_n}{S_n \sigma_n} \quad \dots\dots (1)$$

$$\text{全熱伝導度 } K = \frac{S_p K_p}{l_p} + \frac{S_n K_n}{l_n} \quad \dots\dots (2)$$

Peltier 係数を  $\pi_{pn}$ , Seebeck 係数を  $\sigma_{pn}$  とすれば冷接点における吸熱は

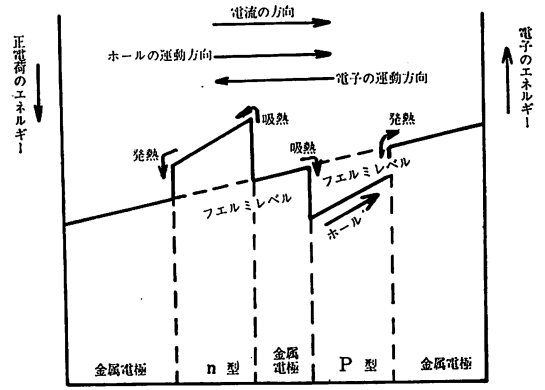


図 2

$$\pi_{pn} I = \alpha_{pn} \left( T_M - \frac{\Delta T}{2} \right) I \quad \dots\dots (3)$$

両脚で発生する joule 熱の  $\frac{1}{2}$  と, 熱接点からの熱伝導による逆流が入るから, 冷接点での吸熱量  $Q$  は

$$Q = \alpha_{pn} \left( T_M - \frac{\Delta T}{2} \right) I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T \quad \dots\dots (4)$$

つぎに, サーモエレメントへの入力  $W$  は

$$W = \alpha_{pn} \Delta T \cdot I + I^2 R \quad \dots\dots (5)$$

吸熱量と入力との比が実用上大切でこれを成績係数 COP (Coefficient of Performance) といい  $\phi$  で表わせば

$$\phi = \frac{\alpha_{pn} \left( T_M - \frac{\Delta T}{2} \right) I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T}{\alpha_{pn} \Delta T \cdot I + I^2 R} \quad \dots\dots (6)$$

与えられた材料の場合には COP は  $I, R, K$  の関数である。また  $R$  と  $K$  は互に独立ではない。もし寸法が

$$\frac{l_p S_n}{l_n S_p} = \left( \frac{\sigma_p K_p}{\sigma_n K_n} \right)^{1/2} \quad \dots\dots (7)$$

をみたすときは

$$KR = \left\{ \left( \frac{K_p}{\sigma_p} \right)^{1/2} + \left( \frac{K_n}{\sigma_n} \right)^{1/2} \right\}^2 \quad \dots\dots (8)$$

となるから

$$(IR)_{opt} = \frac{\alpha_{pn} \Delta T}{\sqrt{1 + Z T_M} - 1} \quad \dots\dots (9)$$

のとき  $\phi$  は Max となる

$$\phi_{MAX} = \frac{T_M(\sqrt{1+ZT_M}-1)}{\Delta T(\sqrt{1+ZT_M}+1)} - \frac{1}{2} \dots\dots(10)$$

ただし  $Z = \frac{\alpha_{pn}}{\left\{ \left( \frac{K_P}{\sigma_P} \right)^{1/2} + \left( \frac{K_n}{\sigma_n} \right)^{1/2} \right\}^2} \dots\dots(11)$

この Z は性能指数 (figure of merit) といい、材質の良否を判別する大切な値である。

つぎに  $\Delta T_{MAX}$  を求めよう。冷接点が断熱状態におかれたときは  $Q \rightarrow 0$ 、従って  $\phi \rightarrow 0$ 、ゆえに

$$\Delta T_{MAX} = 2 T_M \frac{\sqrt{1+ZT_M}-1}{\sqrt{1+ZT_M}+1} \dots\dots(12)$$

$T_M = 20^\circ\text{C}$  のときの  $\phi_{MAX} - \Delta T$  を図3に、 $\Delta T_{MAX} - Z$  を図4示す。

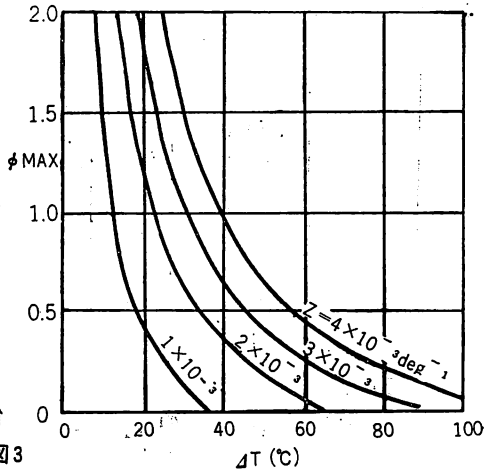
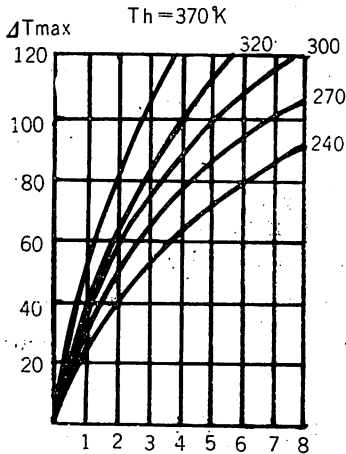


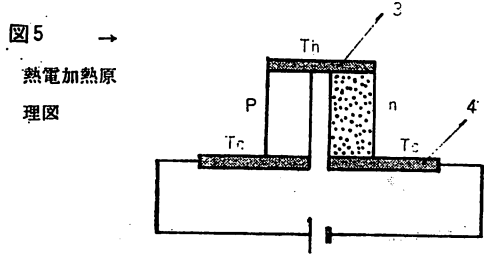
図3  $T_M = 20^\circ\text{C}$  のときの  $\phi_{max} - \Delta T$



← 図4  $T_M = 20^\circ\text{C}$  のときの  $\Delta T_{max} - Z$

ii) 熱電加熱

図5で3は加熱され  $T_h$  に、4は冷却して  $T_c$  となる。熱電加熱の成績係数を H とすれば、



$$H = \frac{\alpha_{pn} \left( T_M + \frac{\Delta T}{2} \right) \cdot I + \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T}{\alpha_{pn} \Delta T \cdot I + I^2 R} \dots\dots(13)$$

(IR)<sub>OPT</sub> =  $\frac{\alpha_{pn} \Delta T}{\sqrt{1+ZT_M}-1}$  のとき

$$H_{MAX} = \frac{T_M + \frac{\Delta T}{2}}{\Delta T} \left\{ 1 - 2 \frac{\sqrt{1+Z \cdot T_M}}{\left( T_M + \frac{\Delta T}{2} \right) Z} \right\}$$

$$= \frac{T_c + \Delta T}{\Delta T} \left\{ 1 - 2 \frac{\sqrt{1+Z \left( T_c + \frac{\Delta T}{2} \right)}}{\left( T_c + \Delta T \right) Z} \right\}$$

$T_c = 300^\circ\text{K}$  のとき Z,  $\Delta T$  によって H<sub>MAX</sub> がどう変化するかを計算してみると表1の如くなる。

表1  $T_c = 300^\circ\text{K}$  のとき Z と  $\Delta T$  に対する H<sub>max</sub> の関係

| $\Delta T$ | Z | $1.0 \times 10^{-3}$ | $1.5 \times 10^{-3}$ | $2.0 \times 10^{-3}$ | $2.5 \times 10^{-3}$ | $3.0 \times 10^{-3}$ | $4 \times 10^{-3}$ | $5 \times 10^{-3}$ | $10 \times 10^{-3}$ | $T_h$ |
|------------|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------|
| 5          |   | 4.9                  | 5.8                  | 7.0                  | 8.3                  | 9.7                  | 11.6               | 13.6               | 21                  | 61    |
| 10         |   | 3.1                  | 3.5                  | 4.0                  | 4.6                  | 5.2                  | 6.2                | 7.3                | 10.6                | 63    |
| 15         |   | 2.1                  | 2.3                  | 2.7                  | 3.1                  | 3.7                  | 4.4                | 5.0                | 7.3                 | 21    |
| 20         |   | 1.8                  | 2.1                  | 2.3                  | 2.6                  | 3.0                  | 3.6                | 4.0                | 5.6                 | 16    |
| 25         |   | 1.6                  | 1.75                 | 2.0                  | 2.3                  | 2.5                  | 3.1                | 3.5                | 4.7                 | 13    |
| 30         |   | 1.3                  | 1.4                  | 1.65                 | 1.8                  | 2.15                 | 2.5                | 2.8                | 4.0                 | 11    |
| 40         |   | 1.0                  | 1.2                  | 1.45                 | 1.6                  | 1.8                  | 2.1                | 2.3                | 3.2                 | 8.5   |
| 50         |   | 1.0                  | 1.05                 | 1.25                 | 1.45                 | 1.6                  | 1.8                | 2.0                | 2.7                 | 7.0   |

$Z > 2 \times 10^{-3}$ ,  $\Delta T < 40^\circ\text{C}$  のときには熱電加熱の merit がはっきりわかる。水を  $10^\circ\text{C}$  加熱するのに、普通の加熱に比し 1/4 の電力で済むことを表わしている。これは大変なことでは将来は冷却よりも加熱の方にこそ熱電変換の道が開けると思われる。

3 計測, 制御への応用

熱電冷却, 加熱は,

(a) 湿度計

(b) 恒温槽

(c) パワートランジスタ等の電子素子の冷却などに使用されるが、試作した超小型恒温槽(サーモカップセル)を中心にして(b)について説明する。

(1) 温度制御のダイアグラム

十分に熱遮断された空間をサーモエレメントで熱電冷却, 加熱し, この温度を任意の一定温度に制御する。この温度偏差をサーミスタまたは熱電対によって検出し, 図6のダイアグラムで恒温にする。

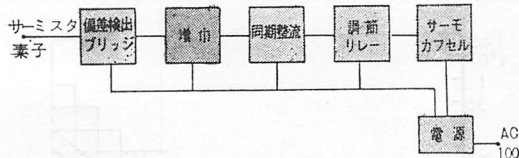


図6 温度制御ダイアグラム

(2) 使用サーモエレメント

| 型 | 組   | 成                          |
|---|---|----------------------------|
| p | Bi <sub>2</sub> (Se <sub>0.25</sub> Te <sub>0.75</sub> ) <sub>3</sub> | + Cu Br <sub>0.065</sub> % |
| n | (Bi <sub>0.25</sub> Sb <sub>0.75</sub> ) <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> | + Se <sub>1.75</sub> %     |
| 型 | Z   |                            |
| p | 3.0 × 10 <sup>-3</sup>  | deg <sup>-1</sup>          |
| n | 3.0 × 10 <sup>-3</sup>  | deg <sup>-1</sup>          |

以上のものを使用し, 図1の如き単一型に組立てたものをさらに数個直列につないだ集積型である。

これの吸熱特性を図7に示す。横軸は吸熱量Q(W)で, 縦軸は得られる温度差ΔTである。Qを大きくすればΔTはそう大きくとれないし, ΔTを大にすればQが僅かになる。電流値に対するΔTの極大値をΔTiとすれば

$$M(\Delta T_i - \Delta T) = Q \quad \dots\dots (4)$$

MはW/°Cなるディメンジョンをもち吸熱定数といわれる。

図7より3Aのとき1w吸熱させた場合にはΔT = 28.6°Cとなるから, T<sub>c</sub> = T<sub>h</sub> - ΔT = 27 - 28.6 = -1.6°Cとなる。Qが小さくなればΔTはだんだん大きくなり, ついに真空中のごとくQ → 0の場合にはΔTは極大値ΔTiとなり, さらに最適電流5AでQ = 0の場合にはΔTは式(4)で与えられるΔTMAXとなる。またΔT = 0すなわちT<sub>c</sub> = T<sub>h</sub>のときは吸熱量Qは最大になる。3Aのとき約2.8wである。

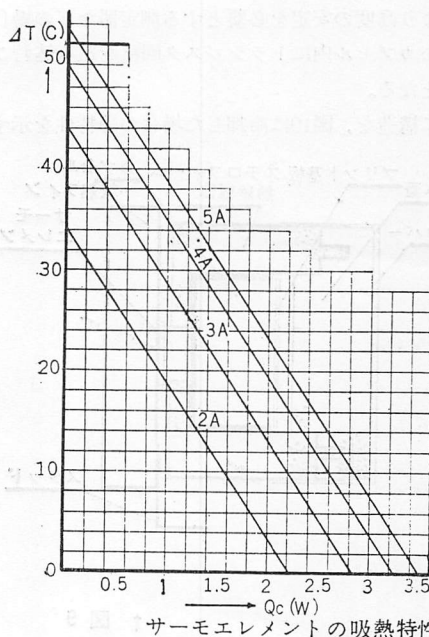
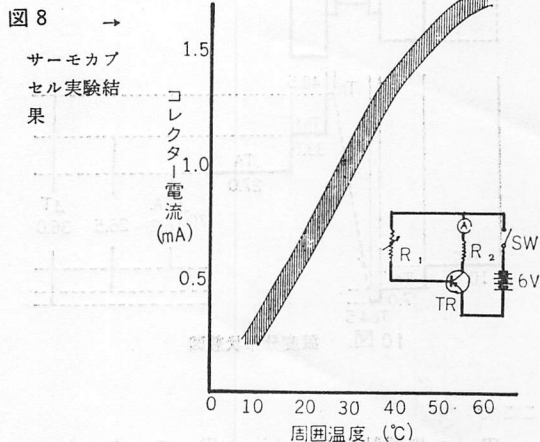


図7 サーモエレメントの吸熱特性

③ 試作超小型恒温槽(サーモカップセル)

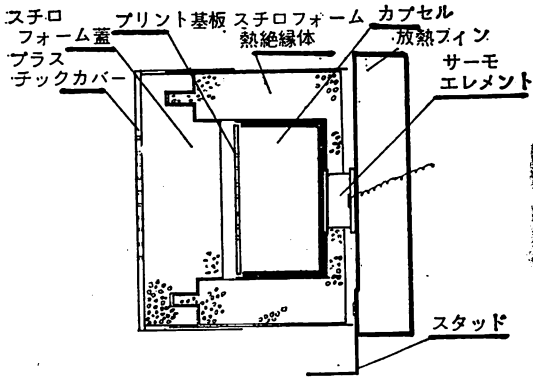
5 cm × 5 cm × 5 cmのごく小さなものでトランジスタなどの温度特性改良のために試作した。まず図8のような簡単な実験をしてみる。某社の最も一般的なゲルマ



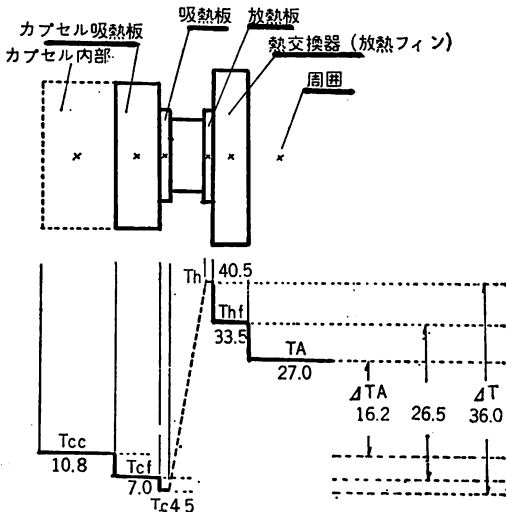
ニュームアロイジャンクション型でR<sub>2</sub> = 3KΩ, R<sub>1</sub> = 1MΩで20°CのときIc = 600μAになるよう調節した。周囲温度TAを10°~60°Cの間に変化したところ, 室温附近では10°Cの変化に対し, Icはほぼ2倍の変化を示すという驚くべきものであった。熱ドリフトは本質的なもので, これを避けるために回路的補償法もあるが, 限度が

あり、より高度の安定を必要とする測定器などの場合にはサーモカプセル内にトランジスタ回路を組み込むことが必要となる。

図9に構造を、図10に冷却した場合の静特性を示す。



↑ 図9  
構造



10 図. 温度分布状態図

ここで

- TA : 周囲温度 (Ambient Temperature)
- Thf : 放熱フィンの温度
- Tcf : カプセル内部の吸熱部の温度
- Tcc : カプセル内部の温度
- $\Delta TA \equiv TA - T_{cc}$  : 実用上大切な温度差
- $r \equiv \Delta T - \Delta TA$  : 構造温度差 (カプセルやフィンの構造材質によりきまる)
- L : カプセルの固有の熱リーク (W/°C)

P : カプセル内部にとりつけた半導体素子などより発生する熱量 (W)

図10は DC 3 A, TA = 27°C, P = 0.2w のときの温度分布を示す。電流を流し初めてから13~14分で平衡に達する。つぎに周囲温度 TA が与えられたときに、内部がどの位まで下がり得るか？これは実用上大切なことである。これは TA のほかに、エレメントの吸熱定数 M (W/°C), カプセルの熱リーク L (W/°C), 内部の発熱量などで決定される。P をパラメータとしたときの Tcc - TA を図11に示す。超小型であるため甚だしく低温にはなら

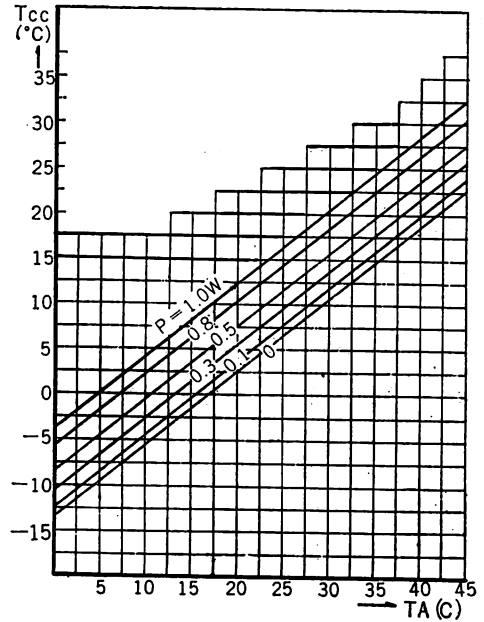
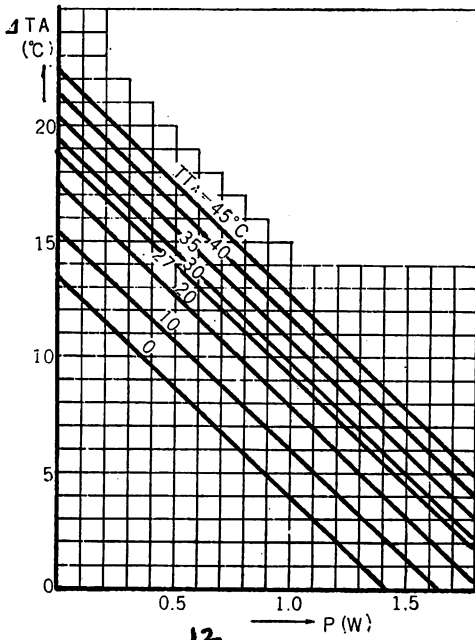


図11 Tcc-TA関係

ない。TA = 30°C の場合、P = 0.3w で Tcc = 13~14°C となることがわかる。本試作の場合 L = 0.035W/°C で、0.3φ の回路用リード線20本がカプセル内に導入されたとした。

つぎに TA をパラメータとした場合、P が変わるにつれ  $\Delta TA$  がどう変化するかを示すのが図12である。同じ P の値でも、TA が約 1°C 上昇することに  $\Delta TA$  も約 0.2°C 増加することがわかる。以上から次のことが判る。

- i) TA = 45°C, P = 0.3w → Tcc = 25.6°C まで下る
- ii) TA = 40°C, Tcc = 25°C → P = 0.65w まで吸熱 OK
- iii) P = 0.5w, Tcc = 20°C → TA = 35°C 以下にすることが必要
- iv) TA = 30°C, P = 0.3w →  $\Delta TA = 16.5°C$  に達する



12  
図12  $\Delta T_A - P$

つぎに  $T_A$  の変動に無関係に、 $T_{CC}$  が常に一定になるようにするには、図6に従い、図13の回路で行う。本例の場合  $T_{CC} = 20^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$  に保持され、熱ドリフトはほとんどなくなった。また冷却加熱の1サイクルは約3分

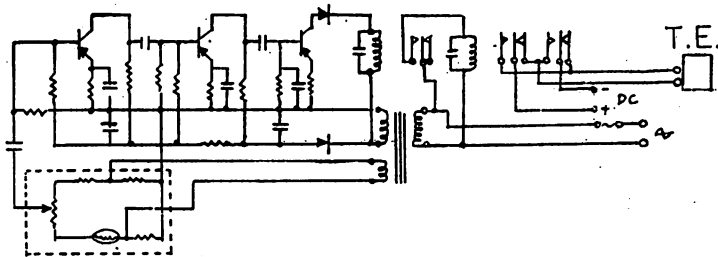


図13 カプセル実施例1

であった。

(4) 用途

トランジスタなどの半導体素子の熱ドリフトによる特性変動は本例のサーモカプセルで著しく改善される。広く次の如きトランジスタ回路の低レベル部分の温度調節に有効である。

- i) 標準電圧回路
- ii) 標準周波数回路
- iii) DC アンプ
- iv) ブロックパルス回路
- v) V.F.O.回路
- vi) ゲインを特に安定させたい場合
- vii) 局部発振回路

4 結 言

熱電冷却の長所は、その構造が極めて簡単でかつ小形な点にある。圧縮冷却式のものでは被冷却物が小さくなるほど不利となるが、これに対しサーモエレメントでは小さいほど効果的になる。また温度制御への利用は「温度差が  $40^\circ\text{C}$  以内の場合には特に有利である。あまり大きくない対象物の温度制御、恒温化、ことに上記の半導体素子の特性安定化に対する応用に適している。

一般に熱伝導や輻射なしに、熱エネルギーを伝達移動する現象が Peltier 効果であって、その応用の一つに熱電加熱があり、今後大きな可能性を秘めている。

サーモエレメントの計測・制御への応用も将来上記の如き分野において進められよう。

文 献

1) H. Goldsmid et al : Brit. J.A.P.9, 365

(1958)

2) A. Joffe and L. Stil'bans : Reports on Progress in Physics Vol. 22, 167 ~ 203 (1959)

3) 青木昌治 : 応用物理 29, 371 (1960)

4) 美濃 部 : 計装 9-2, 62 (1966)