

ペルチェ素子を用いた電子冷却槽による高精度温度制御・比較校正システムの設計と製作

大半の電子部品や電子回路の特性は温度により変化するため、温度制御・温度校正は温度計測の専門家でもなくとも電子回路設計に携わっている多くの技術者にとっても必要とされる技術です。また、温度制御・温度校正に関する製品は数多く存在しますが、それらの多くは高価である上に実際の設計、製造の現場に適合しない場合も多々、存在します。

そこで、本短期連載では電子回路技術者自身が現場に適応した温度制御・温度校正装置を設計、製作することを目的に温度制御・温度校正技術について解説します。この目的のため、

1. ペルチェ素子を用いた電子冷却槽
2. ラバーヒータを用いた恒温オイル槽
3. 氷点槽

の設計と製作について解説します。

今回はペルチェ素子を用いた電子冷却槽(写真1)を取上げます。ペルチェ素子については多くの電子回路技術者が取扱った経験をお持ちであり、非常に身近な存在です。これを上手く使うと、-50~+50 の温度範囲で高精度な温度制御・温度校正を実現することが可能です。

ペルチェ素子とは

基本構造

ペルチェ素子とは、図1で示すようにN型とP型の半導体を銅などの金属片により接合したもので、熱電冷却素子と言います。この素子に電流 I を流すと一片が吸熱、そして他片が放熱します。その接合部で放熱、または吸熱する熱量 Q_p は電流 I に比例し、次の(1)式で示すことが出来ます。

$$Q_p = \pi I \quad \dots\dots(1)$$

π をペルチェ係数と言い、ゼーベック係数 α (Appendix 参照) との間に次の関係が成立します。

$$\pi = \alpha T \quad \dots\dots(2)$$

T は接合部の絶対温度です。

複数のペルチェ素子を電氣的に直列に接続し、冷却能力を高めたものをペルチェモジュールと呼び、その構造と外観を図2と写真2に示します。また、更に冷却能力を高めるためにペルチェモジュールを2段にしたものもあります。

ペルチェモジュールの基本特性

ペルチェ素子などの熱電材料の性能をあらわす指数として性能指数

$$Z = \frac{\alpha^2}{\lambda \rho} \quad \dots\dots(3)$$

ρ : 材料の抵抗率、 λ : 材料の熱伝導率

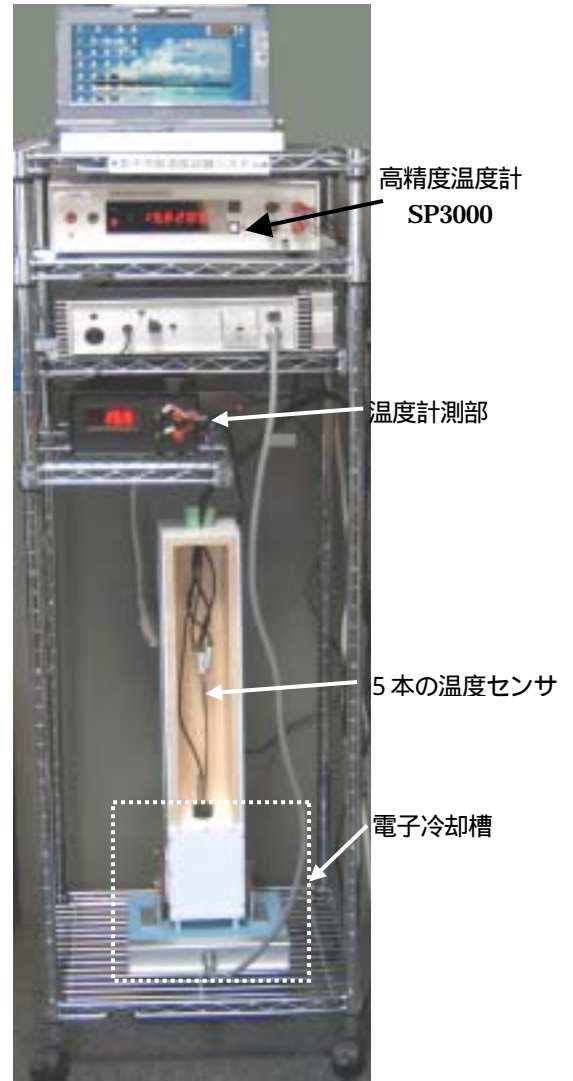


写真1 電子冷却槽を使った温度制御システムの外観

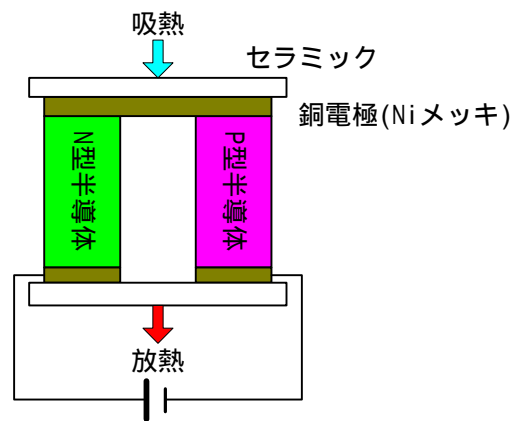


図1 ペルチェ素子の基本構造



写真2 ペルチェモジュールの外観

ペルチェ素子を用いた電子冷却槽による高精度温度制御・比較校正システムの設計と製作

があります。すなわち、**ペルチェ素子を選定する場合、ゼーベック係数が大きく、内部抵抗 R と熱伝導率が小さい素子を選べば良いことになります。**

次に、ペルチェモジュールの特性について検討します。数多くのメーカーからペルチェモジュールが販売されており、その中から幾つかのモジュールの基本特性を表1に示します。基本特性は最大電流 I_{max} 、最大電圧 V_{max} 、最大吸熱量 Q_{Cmax} 、最大温度差 ΔT_{max} 、内部抵抗 R などにより決まります。これらの特性の定義を表2で示します。

ペルチェモジュールの各特性と性能指数の関係について、図3のペルチェモジュールの熱伝導に関する模式図を用いて考えます。

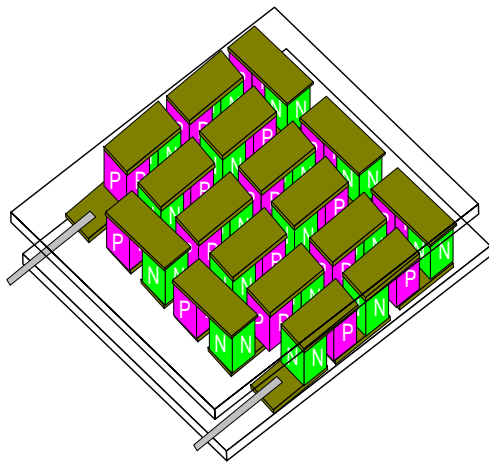


図2 ペルチェモジュールの構造

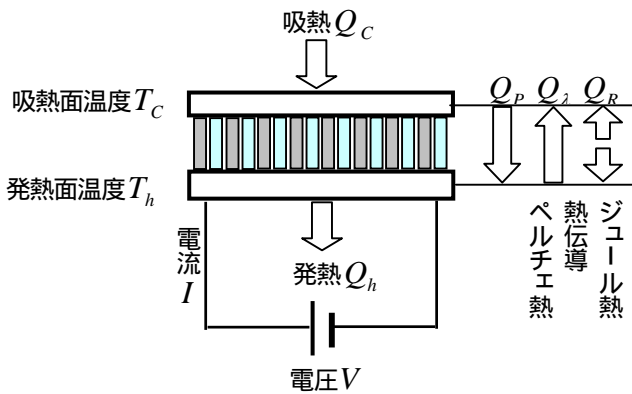


図3 ペルチェモジュールの熱伝導に関する模式図

実際のペルチェモジュールにおいては熱伝導による熱の移動と内部抵抗によるジュール熱が発生していますので、吸熱量 Q_C は

$$Q_C = Q_P - Q_\lambda - \frac{1}{2} Q_R \quad \dots\dots(4)$$

となります。

吸熱面と放熱面の温度差 ΔT により放熱面から吸熱面に熱量 Q_λ が伝わり、内部抵抗 R によりモジュール内部で生じるジュール熱 Q_R が吸熱面と放熱面に伝わりま

$$\begin{aligned} Q_P &= \alpha T_C I \\ Q_\lambda &= \lambda \Delta T \quad \dots\dots(5) \\ Q_R &= R I^2 \end{aligned}$$

となりますので、吸熱量 Q_C は

$$Q_C = \alpha T_C I - \lambda \Delta T - \frac{1}{2} R I^2 \quad \dots\dots(6)$$

となります。 $T_C, I, \Delta T$ を一定とすると、 α が大きく、 λ, R が小さいほど、すなわち、性能指数 Z が大きいほど吸熱量 Q_C が大きいと言えます。次に、最大温度差 ΔT_{max} について考えます。最大温度差 ΔT_{max} とは完全

断熱で吸熱量 $Q_C = 0$

の理想状態での温度差 ΔT ですので、(6)式より

$$\Delta T = \frac{2\alpha T_C I - R I^2}{2\lambda} \quad \dots\dots(7)$$

また、 $\frac{\partial(\Delta T)}{\partial I} = 0$ が ΔT_{max} の条件になるので、

$$\alpha T_C - R I_{max} = 0$$

が成立するので、

$$I_{max} = \frac{\alpha T_C}{R}$$

表2 ペルチェ基本特性の定義

| | | |
|-------|------------|--|
| 最大電流 | I_{max} | 完全断熱で吸熱量が零の状態、吸熱側と発熱側に最大温度差 T_{max} がつく時の電流値 |
| 最大電圧 | V_{max} | 最大電流 I_{max} を流すために必要な端子間電圧 |
| 最大温度差 | T_{max} | 完全断熱で吸熱量が零の状態、吸熱側と発熱側に生じる温度差 |
| 最大吸熱量 | Q_{Cmax} | 最大電流 I_{max} を流した時、吸熱側と発熱側に生じる温度差 T が零の時の吸熱量 |

ペルチェ素子を用いた電子冷却槽による高精度温度制御・比較校正システムの設計と製作

表 1 各社のペルチェ・モジュール一覧

| 型式名 | 最大電流 | 最大電圧 | 最大温度差 | 最大吸熱量 | 素子数 | 内部抵抗 | 寸法 | メーカー/販売店 |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------|------|-------------------|----------|
| 1段モジュール | I _{max} (A) | V _{max} (V) | T _{mac} () | Q _{max} (W) | (PNペア) | () | L*W*H(mm) | |
| CP1.4-071-06L | 6 | 8.6 | 67 | 28.7 | 71? | | 30*30*3.8 | |
| CP1.4-127-06L | 6 | 15.4 | 67 | 51.4 | 127? | | 40*40*3.8 | 熱電子工業 |
| CP1.4-127-045L | 8.5 | 15.4 | 65 | 68.8 | 127? | | 40*40*3.8 | |
| TEC1-07106 | 6 | 8.6 | 66 | 31 | 71? | | 30*30*3.8 | |
| TEC1-12706 | 6 | 15.4 | 66 | 58 | 127? | | 40*40*3.8 | 電子通商 |
| TECB1-12708 | 9 | 15.4 | 74 | 74 | 127? | | 50*50*4.7 | |
| TN-08E192-QD0 | 2.93 | 11.81 | 72.5 | 21.44 | | | 20*20*3.3 | アイシン精機 |
| TN-14E142-QD0 | 8.96 | 8.73 | 72.5 | 48.57 | | | 30*30*3.3 | |
| FPH1-7107 | 6 | 8.6 | 68 | 30 | 71? | | 30*30*3.9 | |
| FPH1-12707 | 6 | 15.4 | 68 | 53 | 127? | | 40*40*3.9 | フジタカ |
| FPH1-12708 | 8.5 | 15.4 | 68 | 75 | 127? | | 40*40*3.9 | |
| TS07106 | 6 | 8.6 | 65 | 28.7 | 71 | | 30*30*4.2 | |
| TS12706 | 6 | 15.4 | 65 | 51.4 | 127 | | 40*40*4.2 | テクニスコ |
| TS12708 | 8 | 15.4 | 65 | 68.8 | 127 | | 40*40*3.8 | |
| F3030-MT | 6 | 10 | 70 | 32 | 71 | 1.3 | 33.5*34.7*2.6 | |
| F4040-MT | 6 | 16 | 70 | 55 | 127 | 2.2 | 45*46*2.6 | フリジスター |
| F7070-MT | 6 | 26 | 70 | 130 | 241 | 3.3 | 71*72*3.1 | |
| 6300/071/060 | 6 | 17.5 | 72 | 32 | 71 | | 29.8*29.8*4.2 | |
| 6301/127/060 | 6 | 17.5 | 72 | 57 | 127 | | 29.8*29.8*3.6 | フェローテック |
| 6300/071/060 | 6 | 17.5 | 72 | 57 | 71 | | 39.7*39.7*4.2 | |
| 2段モジュール | I _{max} (A) | V _{max} (V) | T _{mac} () | Q _{max} (W) | (PNペア) | () | L*W*H(mm) | |
| 2CP1.4-71-125-044L | 8.5 | 6 | 90 | 16 | | | 30*30*8.4 | 熱電子工業 |
| FPK2-15828 | 2.8 | 15 | 95 | 5.25 | | | 15(30)*15(30)*7.2 | フジタカ |

となります。更に(7)式より

$$\Delta T_{\max} = \frac{2\alpha T_C I_{\max} - R I_{\max}^2}{2\lambda}$$

$$= \frac{\alpha^2 T_C^2}{2\lambda R} \propto Z T_C^2 \quad \dots\dots\dots(8)$$

最大吸熱量 $Q_{C \max}$ とは温度差が $\Delta T = 0$ の理想状態で
の吸熱量であり、(6)式より

$$Q_{C \max} = \frac{\alpha}{2R} T_C^2 \quad \dots\dots\dots(9)$$

最大吸熱量 $Q_{C \max}$ 、最大温度差 ΔT_{\max} は吸熱面温度 T_C 、
つまり放熱面温度 T_h の 2 乗に比例しますので、各社の
ペルチェモジュールのカatalogにより特性を見る場合、
特性を決めている放熱面温度 T_h の違いに注意する必要
があります。

次に再び、(6)式に戻り、吸熱量 Q_C と温度差 ΔT の関
係を図4のグラフで示します。

最大電流 I_{\max} に近い電流でモジュールを使用すると、ジ
ュール熱が大きくなるため熱効率が悪く、また、モジ
ュールの寿命が短くなるため故障原因にもつながります。

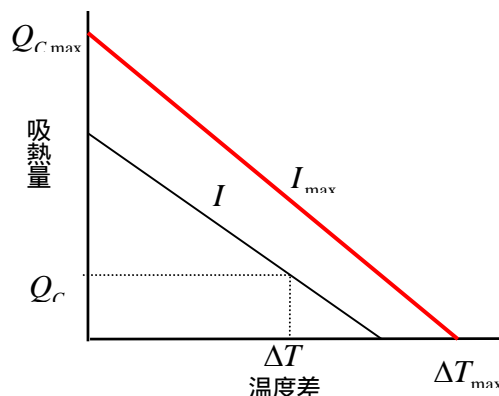


図4 温度差 T と吸熱量 Qc の関係

よって、最大電流 I_{\max} の 60% 程度の電流で使用すること
が熱設計上好ましいと言えます。

すなわち、最大吸熱量 $Q_{C \max}$ 、最大温度差 ΔT_{\max} とは理
想状態での特性であり、また、最大電流より小さい電流
でモジュールを使用することになります。よって、**実際**
の使用において得られる吸熱量 Q_C は最大吸熱量 $Q_{C \max}$

の 50% 以下、また、温度差 ΔT は最大温度差 ΔT_{\max} の
70% 以下になるので、モジュールを選定する場合に注意
が必要です。また、大きな温度差が必要な場合、熱伝導
による熱の移動が大きくなるため、吸熱量が著しく小さ
くなります。

ペルチェ素子を用いた電子冷却槽による高精度温度制御・比較校正システムの設計と製作

ペルチェモジュール選定での注意点

ペルチェモジュールの選定の際、表1に示す基本特性を参考にすることになりますが、基本特性の数値に大きな違いがないため、選定については迷うことになるかもしれません。しかしながら、信頼性については大きく異なる場合もありますので、十分に注意する必要があります。例えば、電流の極性を一定にし、冷却、もしくは加熱を一方的に行う場合と、電流の極性を頻繁に反転し、冷却と加熱を繰り返して温度制御をする場合ではモジュールに求める信頼性と耐久性は大きく異なります。また、冷却によりペルチェモジュールは常に結露状態に置かれるため腐食やマイグレーションなどの故障原因になります。信頼性に関する基本的項目を次に示します。

- ・ ON/OFF サイクル耐久性
- ・ 温度サイクル耐久性
- ・ 極性反転耐久性
- ・ 機械的衝撃耐久性
- ・ 寿命

ペルチェモジュールの内部ではN型とP型半導体の接合が多数あり、また、その接合を半田で行っており、また、半田接合部の寿命がモジュールの寿命を決定するので、モジュール選定においては半田接合部の信頼性についても十分な注意が必要です。

冷却システムの基本設計

冷却槽(アルミブロック)の冷却設計

図5に示すように冷却槽にアルミブロックを用い、これをペルチェモジュールで冷却する場合を考えます。また、アルミブロックの全表面積Sは厚さtの断熱材(発泡ウレタン)で覆われているとします。周辺環境温度をTeとすると、周辺から断熱材を通じて流入する単位時間当りの熱量Q_{SI}は

$$Q_{SI} = \frac{S(T_e - T_c)}{0.137 + t/\lambda} \dots\dots\dots(10)$$

となります。

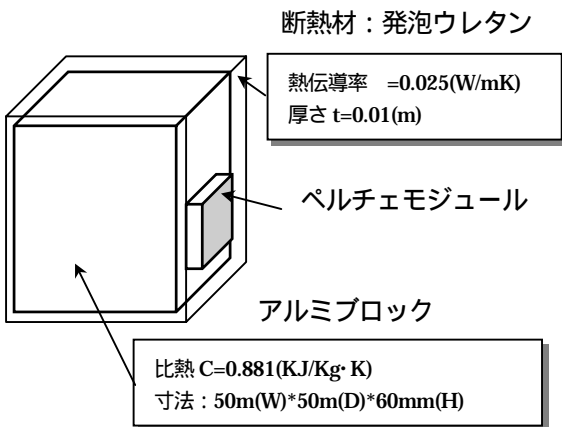


図5 アルミブロックによる電子冷却槽の基本構造

また、冷却前の冷却槽(体積V、比熱C、比重)の温度をT₀とすると、時間τ後に設定温度T_cに達するには単位時間当り

$$Q_{\tau} = \frac{C\rho V(T_0 - T_c)}{\tau} \dots\dots\dots(11)$$

の熱量が必要になります。よって、ペルチェモジュールに必要とする単位時間当りの吸熱量Q_Cは

$$Q_C = Q_{SI} + Q_{\tau} \dots\dots\dots(12)$$

となります。

例えば、寸法 50mm(W)*50mm(D)*100mm(H)のアルミブロック(C=883J/kgK, ρ=2700kg/m³)と断熱材に発泡ウレタン(t=0.01m, λ=0.025W/m·K)を用い、周辺温度Te、T₀=30、設定温度T_c=-15、到達時間=60分とします。(10)、(11)式より、Q_{SI} 1.7W、Q_τ 7.4W となりますので、モジュールに必要とする吸熱量はQ_C 9W となります。

ペルチェモジュールの冷却設計

ペルチェモジュール TEC1-12706(I_{max}=6A, T_{max}=66, Q_{max}=58W at Th=30)を例にとり、モジュールの冷却設計を行います。各放熱面温度Thにおける温度差T-吸熱量Q_Cの関係を図6に示します。吸熱面の設定温度をT_c=-13とすると、吸熱量Q_C=9Wの場合の各放熱面温度での必要とする電流Iは I=3.1A(Th=27), 3.7A(Th=35), 5A以上(Th=50) となります。すなわち、Thが高くなると、所要の設定温度を得るために必要なモジュールの電流値が大きくなり、Th=50では必要とする電流値は使用上限を越えており、所要の設定温度T_c=-15を得ることは不可能です。

次に、モジュール TEC1-12706 の吸熱面温度T_cと印加電圧Vの関係を図7に示します。これらの関係により、各放熱面温度Thに対する電圧Vの値は

$$V=7.6V(Th=27), 10.2V(Th=35)$$

となります。よって、各放熱面温度Thにおけるモジュールの電源の供給電力は

$$Wp 23.6W(Th=27), 37.7W(Th=35)$$

となり、放熱面温度Thが高くなると、モジュールの電源に必要とする電力容量が大きくなり、電源設計上においても不利になります。

すなわち、より低い冷却温度の実現と電力効率の面から、ヒートシンクの熱設計においては出来る限り放熱面温度Thを低く抑えることが重要となります。

空冷ヒートシンクの設計

ペルチェモジュールからの放熱量Q_hは

$$Q_h = Q_i + Q_C \dots\dots\dots(13)$$

となります。ここでQ_i = I*Vです。

この熱Q_hをヒートシンクにより外部に放出する必要

ペルチェ素子を用いた電子冷却槽による高精度温度制御・比較校正システムの設計と製作

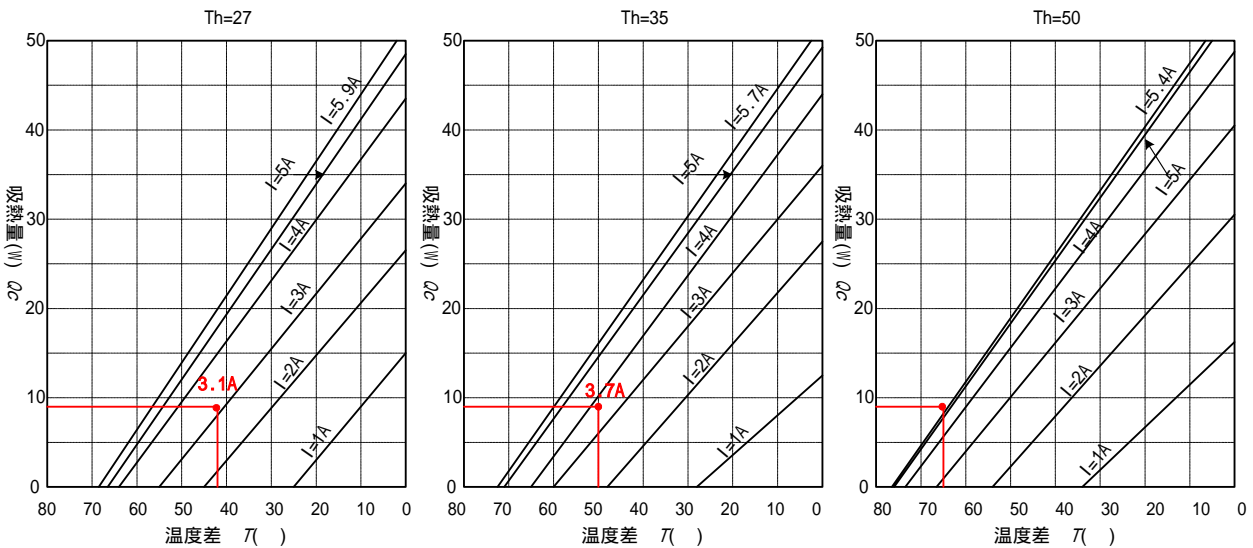


図6 ペルチェ・モジュール TEC1-12706 における吸熱量と温度差の関係

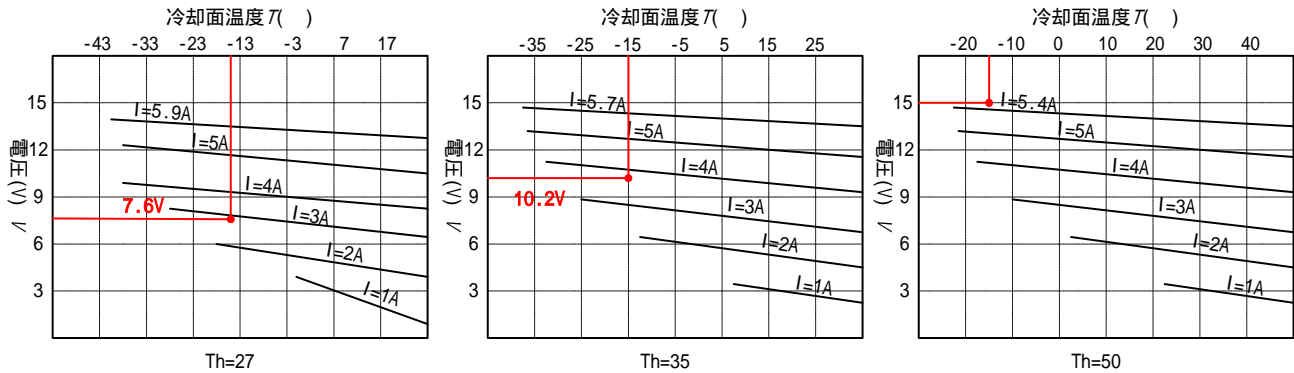


図7 ペルチェ・モジュール TEC1-12706 における冷却面温度と電圧の関係

があります。ヒートシンクの設計上、重要な概念として熱抵抗 θ があります。熱抵抗 θ とはヒートシンクのような物体に 1W の熱を加えた場合の温度上昇で定義されます。

$$\theta = \frac{T_h - T_e}{Q_h} \dots\dots\dots(14)$$

熱抵抗 θ のヒートシンクの周辺環境温度 T_e はが一定であるとすると、ヒートシンクに熱量 Q_h を加えた場合、ヒートシンクの温度 T_h は

$$T_h = T_e + Q_h \theta \dots\dots\dots(15)$$

にまで上昇しますので、熱抵抗 θ が小さいヒートシンクを用いた方が効率よく外部に熱を放出するため、ヒートシンクの温度上昇を抑えることが出来ることとなります。また、熱抵抗 θ は熱伝導率（アルミニウムの場合は $0.0297W/m \cdot K$ ）とは次の関係にあります。

$$\theta \propto \lambda S$$

ここで、 S は放熱面積です。放熱面の温度 T_h を 35 以下に抑えるためには、 $Q_h \approx 47W, T_h - T_e = 15$ であるので、熱抵抗 θ が $0.32K/W$ 程度のヒートシンクを選定する必要があります。

通常、自然空冷のヒートシンクの熱抵抗 θ は 1 ~ 10K/W 程度ですので、不十分と言えます。しかし、ファンモータを用いた強制空冷の熱抵抗 θ は $0.3K$ 後になり、今回の目的にほぼ適合することが出来ます。

水冷ヒートシンクの採用

今回、冷却設定温度を仮に -15 に設定しましたが、更に低い温度を実現するには放熱面温度を下げる必要があります。このため、水冷ヒートシンクの採用が必要となります。この一例を図 8 に示します。熱抵抗 θ は $0.005K/W$ 以下と非常に小さい値であり、冷却水温度が低ければ放熱面温度を低く抑えることが可能です。

ペルチェ素子を用いた電子冷却槽による高精度温度制御・比較校正システムの設計と製作

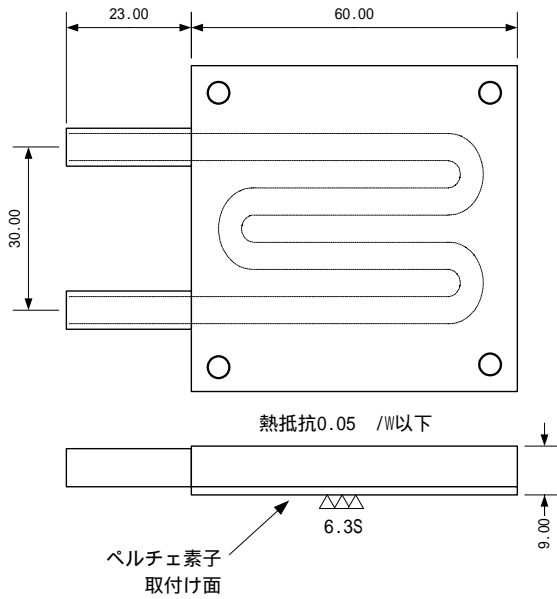


図8 水冷ヒートシンク的设计例



写真3 強制空冷ヒートシンクによる電子冷却槽の外観

ペルチェ素子による電子冷却槽の製作と評価試験

1個のペルチェモジュールによる電子冷却槽の特性
強制空冷ヒートシンクによる電子冷却槽

50mm*50mm*100mmのアルミブロックからなる電子冷却槽を製作します。その製作図と外観を図9と写真3に示します。

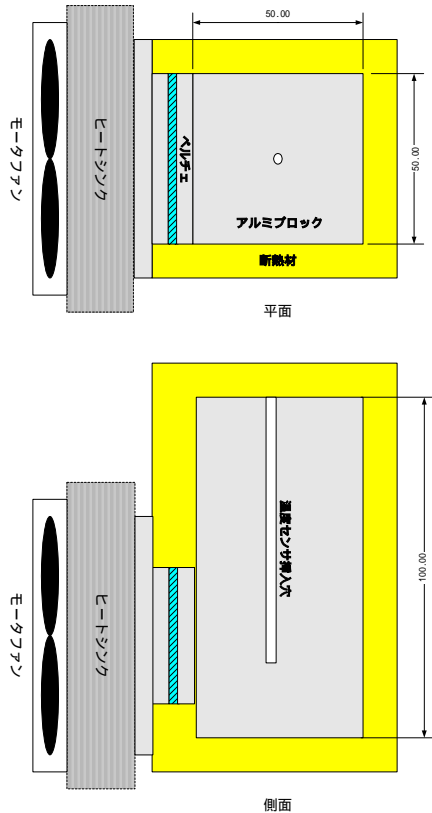


図9 強制空冷ヒートシンクによる電子冷却槽の製作図

この電子冷却槽のペルチェ電流Iを1, 2, 3Aに設定した場合の電子冷却槽(冷却面)とヒートシンク(放熱面)の温度を表3に示します。また、ペルチェ電流Iが3Aの場合の冷却特性グラフを図10に示します。

すなわち、この場合では設計通りに冷却開始から約60分後に冷却槽温度が-15℃近くに達することが出来ました。

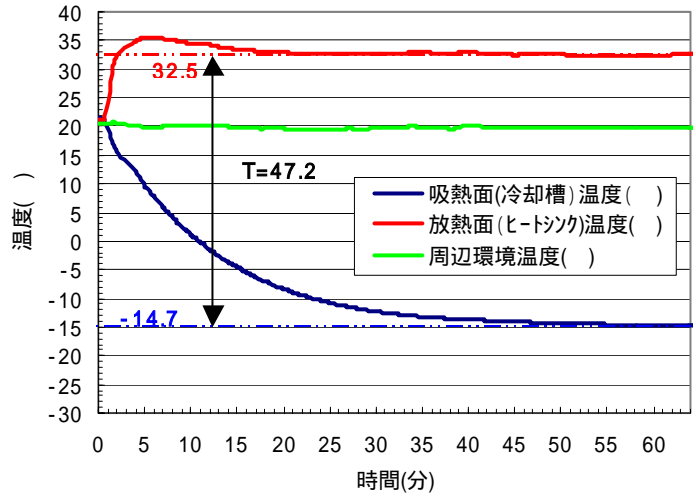


図10 強制空冷電子冷却槽の冷却特性

表3 電子冷却槽とヒートシンクの温度

| ペルチェ電流 | 1A | 2A | 3A |
|---------|------|------|-------|
| 放熱面温度Th | 24.5 | 29.0 | 32.5 |
| 吸熱面温度Tc | 0.5 | -8.0 | -14.7 |
| 温度差 T | 24.0 | 37.0 | 47.2 |

ペルチェ素子を用いた電子冷却槽による高精度温度制御・比較校正システムの設計と製作

水冷ヒートシンクによる電子冷却槽

強制空冷によりペルチェ電流 I が 3 A の場合では温度 -15 近い冷却槽温度を得ることが出来ましたが、更に低い冷却槽温度を得るため、強制空冷ヒートシンクに代わり水冷ヒートシンクを採用します。水冷ヒートシンクを用いることにより、放熱によるヒートシンクの温度上昇を抑えることが出来るため、より低い冷却槽温度を実現することが出来ます。但し、図 11 に示すようにヒートシンク温度、すなわち放熱面温度 T_h が低くなると、同じ値のペルチェ電流を流しても得られる温度差が小さくなることに注意する必要があります。

水冷ヒートシンクでペルチェモジュールに 3 A の電流を流した場合の冷却特性を図 12 に示します。すなわち、この場合では冷却槽の温度を -25 以下に達し、強制空冷に比べて約 10 低い冷却槽温度を得ることが出来ました。

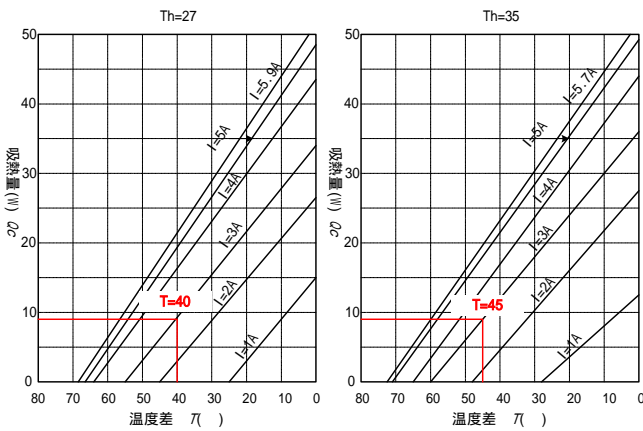


図 11 放熱面温度 T_h と温度差 T の関係

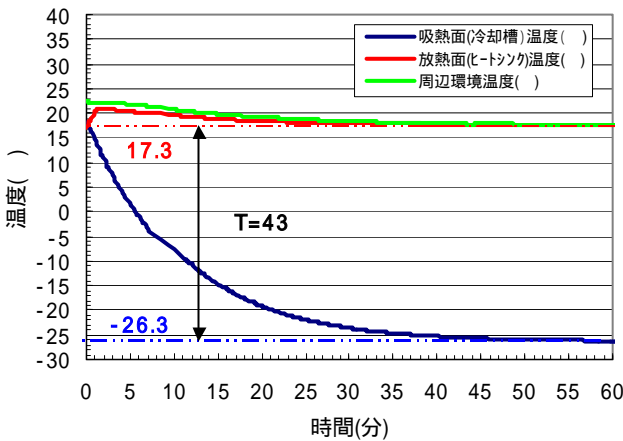


図 12 水冷電子冷却槽の冷却特性

2 個のペルチェモジュールによる電子冷却槽の特性

後段で検討しますが、アルミブロックの 1 面のみペルチェモジュールを取付けた場合、アルミブロック内の温度勾配が大きくなります。また、ペルチェ電流を増加させることもなく、より低い冷却槽温度とより短い冷却時間を得るためにアルミブロックの両側に各 1 個のペルチェモジュールと用い、アルミブロックの両側に取付け

た場合の冷却槽の製作図を図 13 に示します。

ペルチェ電流 3 A の場合の冷却槽の冷却特性を図 14 に示します。すなわち、この場合においては 50 近い温度差を得ることができ、-30 以下の冷却槽温度を実現することが出来ました。また、冷却時間も 1 個の場合の半分位に短縮できました。これはペルチェモジュール 1 個当りの吸熱量を半分にしたことによる効果です。

次に、ペルチェ電流を 0 ~ 5 A の間で変えた場合、ペルチェ電流と温度差の関係を図 15 に示します。すなわち、ペルチェ電流を大きくしていくと得られる温度差も大きくなりますが、最大電流 6 A の 60%(3.6A) 近くになるとペルチェ電流を大きくしても温度差の大きさがあまり大きくなり、70%(4.2A) 以上では温度差はほとんど変化しません。よって、効率上、最大電流の 60% 以下の電流で使用するべきです。

また、各ペルチェ電流により安定する冷却槽温度が決まりますので、ペルチェ電流を設定することにより簡易な温度制御を行うことが出来ます。

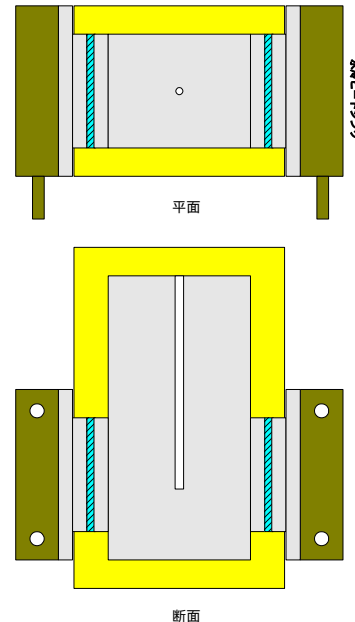


図 13 両面ペルチェ冷却槽の製作図

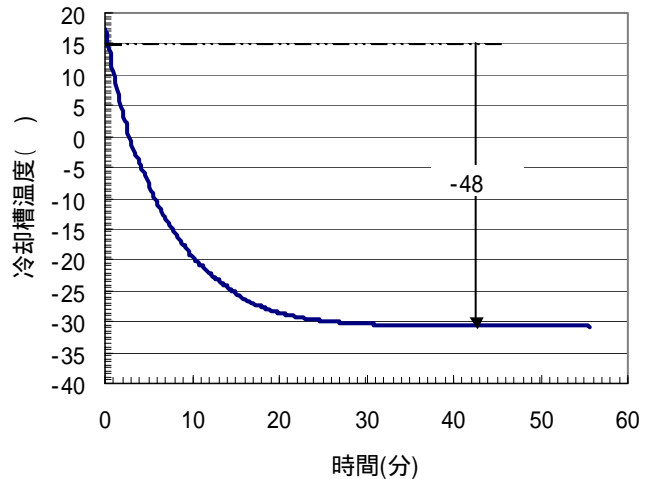


図 14 両面ペルチェ冷却槽の冷却特性

ペルチェ素子を用いた電子冷却槽による高精度温度制御・比較校正システムの設計と製作

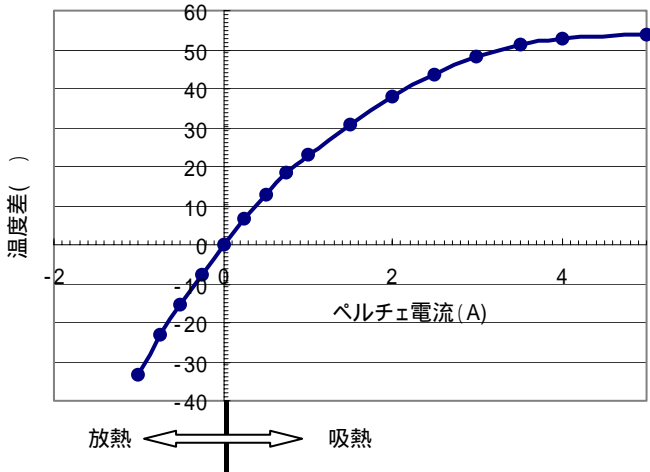


図 15 両面ペルチェ電子冷却槽の電流と温度差の関係

2 段のペルチェモジュールにより電子冷却槽温度 -50 を実現

2 段ペルチェ電子冷却槽の設計、製作

2 個のペルチェモジュールを採用したことにより、-30 以下の冷却槽温度を得ることが出来ました。最終目標の-50 近辺の冷却槽温度を得るには、温度差 $T=70$ を実現する必要があります。しかしながら、吸熱量が大きいペルチェモジュールを採用し、ペルチェ電流を大きくしても温度差 $T=70$ を実現することは不可能です。そこで、吸熱量の異なる 2 つのペルチェモジュールを 2 段にした冷却槽を設計、製作します。この製作図を図 16 に示します。

2 段ペルチェモジュールを設計、製作する上での注意点を次に示します。

- ・ 1 段ペルチェモジュールの吸熱量に比べ 2 段目のそれを 2 倍以上にする。
- ・ 2 段目のペルチェモジュールの素子数に比べ 1 段目のそれを小さくする。
- ・ モジュール間にアルミ、もしくは銅材によるスペーサーを設ける。
- ・ 冷却槽用アルミブロックとモジュール、およびモジュールとスペーサー間の熱接触を完全に行う。
- ・ モジュール間の断熱を完全に行う。
- ・ モジュール、スペーサーの取付けビスを出来る限り排除し、ビスによる熱伝導の小さい構造にする。
- ・ 1 段と 2 段ペルチェモジュールを直列接続とし、同一電流を流すために同じ最大電流のモジュールを採用する。

例えば、モジュールとスペーサーの取付けにおいて、ビスを用いないで熱伝導率が高いシリコン接着剤を用いる方法があります。これらの接着においては熱接触を出来る限り完全に行うため表面の汚れや平面度に対して十分に配慮する必要があります。また、掌の親指の付け根付近でペルチェモジュールを押付けながら前後左右にスライドしたり、回転させながら気泡を追出して密着性を向上させることも必要です。

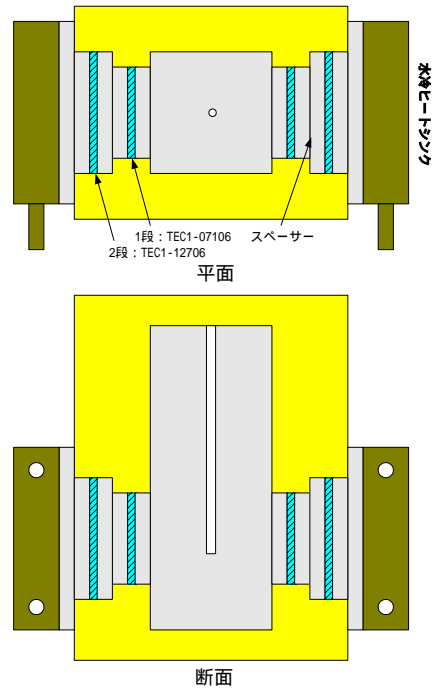


図 16 2 段ペルチェ電子冷却槽の製作図

2 段ペルチェモジュールの冷却設計

1 段目のペルチェモジュールに TEC1-07106、そして 2 段目には今まで同様に TEC1-12706 を用いることを前提としてペルチェモジュールの冷却設計を行います。冷却槽アルミブロックからの 1 個の 1 段目ペルチェモジュールの吸熱量を 4.5W、ペルチェ電流を 3A とした場合、図 17 より 1 段モジュールにより得られる温度差は約 40 になります。また、3A の電流を流すのに必要なペルチェ電圧は 3.5 ~ 4V になりますので、1 段目ペルチェモジュールの発熱量は約 15W になります。すなわち、2 段目ペルチェモジュールの吸熱量は 15W になりますので、ペルチェ電流を 3A とした場合、2 段目ペルチェモジュールで得られる温度差は図 18 で示すように 30 になります。よって、TEC1-07106/12706 の 2 段のペルチェモジュールで得られる温度差は 70 になり、水冷ヒートシンク温度を +20 とすれば、-50 の冷却槽温度を実現することが可能になります。

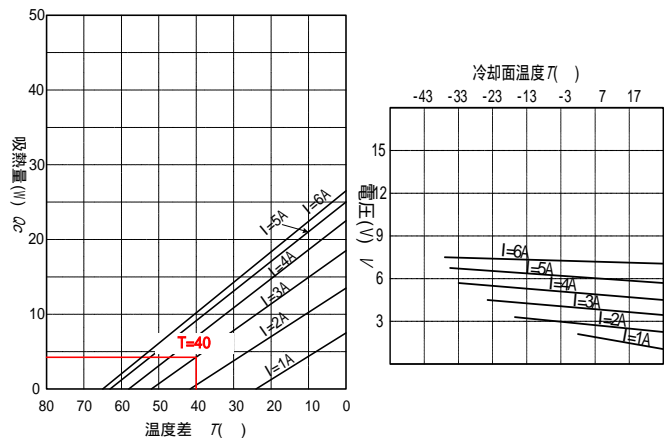


図 17 1 段目ペルチェ(TEC1-07106)の特性

ペルチェ素子を用いた電子冷却槽による高精度温度制御・比較校正システムの設計と製作

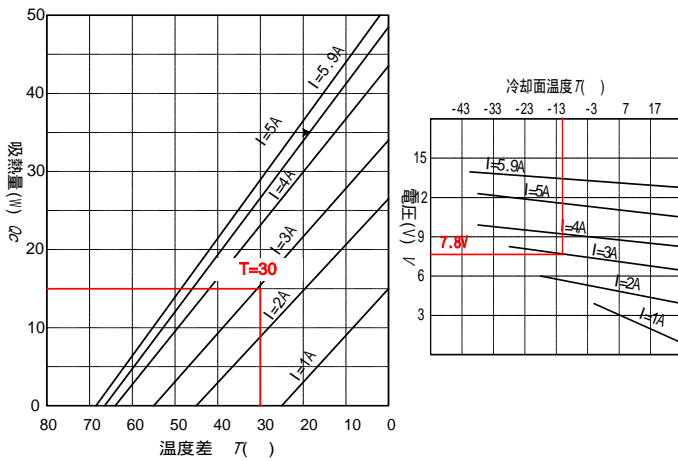


図 18 2 段目ペルチェ(TEC1-12706)の特性

2 段ペルチェ電子冷却槽の評価試験

図 16 の 2 段ペルチェ電子冷却槽の評価試験結果を図 19 に示します。すなわち、2 段ペルチェによりペルチェ電流 3 A で温度差-72 を実現しましたので、ほぼ、設計通りの結果が得られています。ペルチェ電流を 3 A 以上に上げて温度差はほとんど上昇しませんので、や

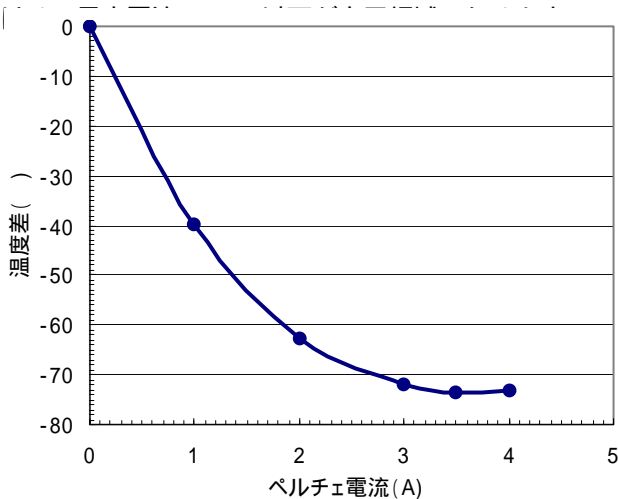


図 19 2 段ペルチェ電子冷却槽の電流 - 温度差の関係

電子冷却槽内の温度分布

水平温度分布

電子冷却槽により温度の比較校正を行う場合、アルミブロック中の温度分布の状態を知ることが重要です。そのため、図 20 に示す電子冷却槽のアルミブロックに 5mm 間隔で温度センサ挿入用の穴をあけた温度分布測定用の治具を製作します。中央には温度センサが 4 本まとめて挿入するため、少し大きめの直径 4mm の挿入穴をあけ、また、他の挿入穴は直径 2mm としました。

4 本の温度センサの値を同時、且つ、高精度に測定できる温度計 SP-3000(田澤 R&D 技術士事務所製 写真 4)を用い、最初に中央の 4mm の挿入穴に 4 本の温度センサをまとめて挿入します。一定のペルチェ電流を加え温度が安定した時の各チャンネル(ch)の温度センサの温度測定結果を図 21 に示します。すなわち、各 ch の温

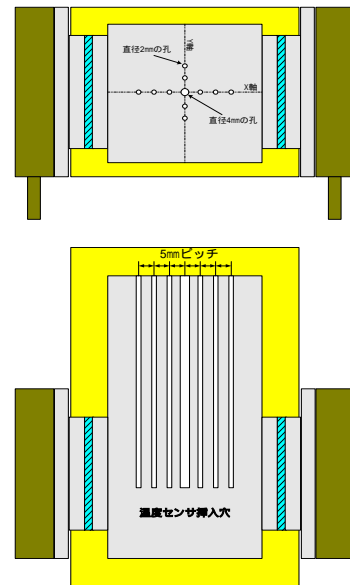


図 20 温度分布測定用治具の製作図

度測定値のばらつきが 0.005 以内にあることが分かります。

次に Y 軸方向に配列している各穴に各 ch の温度センサを挿入した場合の各 ch の温度を図 22 に示します。先ほどの中央の穴に一括挿入した場合より、各温度センサが示す温度値のばらつきが少し広がってはいますが、そのばらつきは 0.01 よりかなり小さいことが分かります。

更に、X 軸方向に配列している各穴に各 ch の温度センサを挿入した場合の温度測定結果を図 23 に示します。すなわち、アルミブロックの中央からペルチェモジュールに近づくほど温度が低くなり、比較校正の誤差を 0.01 以内にするには、比較する温度センサの設置間隔を 5mm 以内にする必要があります。

最後に、片方のペルチェモジュールのみに電流を流した場合のアルミブロック中の温度分布を図 24 に示します。温度勾配の値が非常に大きくなっていることが分かります。すなわち、**一個のペルチェモジュールをアルミブロックの一片に取付けた方法では、ブロック内の温度勾配が非常に大きく、均一温度の電子冷却槽を得ることは不可能です。均一な温度を得るにはブロックの両側から同じ特性のペルチェモジュールで冷却する必要があります。**

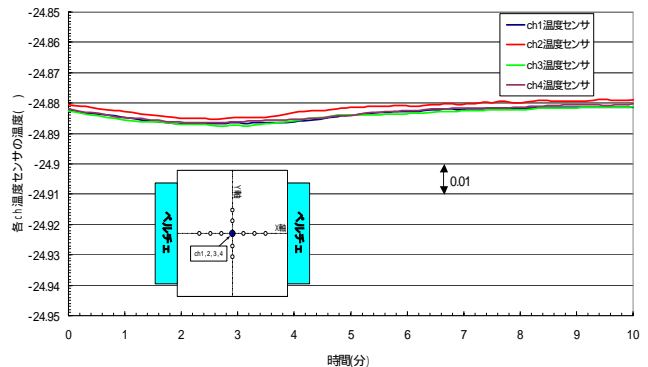


図 21 電子冷却槽中心部の温度測定(ペルチェ電流 = 2 A)

ペルチェ素子を用いた電子冷却槽による高精度温度制御・比較校正システムの設計と製作

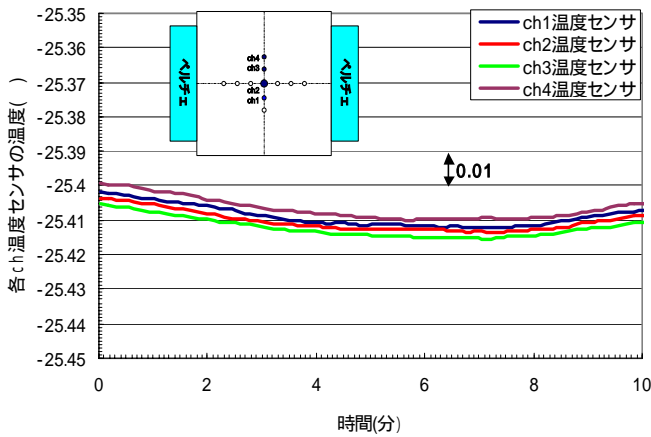


図 22 電子冷却槽 Y 軸方向の温度分布(ばらつき ±0.01 以内)
(高精度温度計 SP3000 使用)

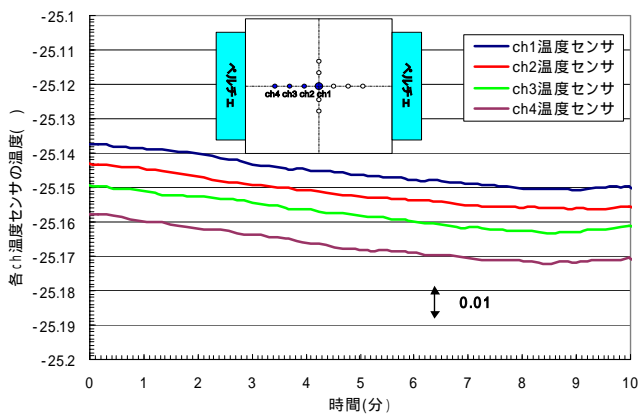


図 23 電子冷却槽 X 軸方向の温度分布
(高精度温度計 SP3000 使用)

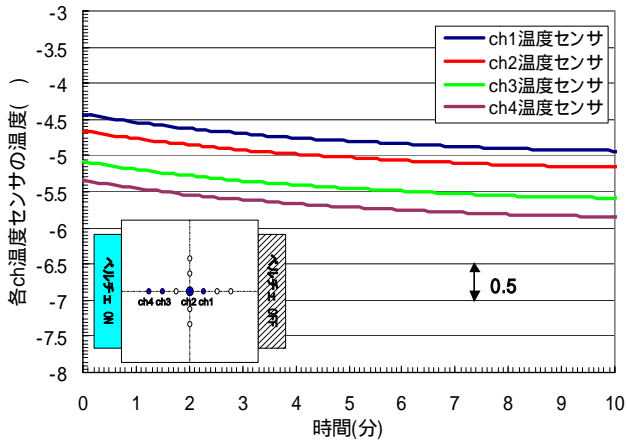


図 24 片方ペルチェのみ通電時の X 軸方向温度分布

垂直温度分布

電子冷却槽の垂直方向温度分布の実測データを図 25 に示します。すなわち、ペルチェモジュールの中心部から 5mm 離れると温度が約 0.01 上昇することが分かります。よって、温度の比較校正においては、各温度センサの挿入の深さを正確に一定にしないと予想以上の校正誤差が生じてしまいます。

垂直方向の温度勾配を小さくする方法として、上下 2

段にペルチェモジュールを取付ける方法がありますが、より温度勾配を小さくする方法として、冷却槽のアルミブロックを間接冷却する方法があります。すなわち、図 26 に示すように、周囲がアルミ板からなるアルミボックスの外壁面にペルチェモジュールを取付け、その内側に空気攪拌用のモータファンを取付けます。これによりアルミボックスによる空気恒温槽を作ります。そして、その空気恒温槽内に温度比較用のアルミブロックを設置します。すなわち、アルミブロックはペルチェモジュールにより直接、冷却されないで、温度がある程度均一になった空気を介して、ブロックの全周囲から冷却されるため、アルミブロック内の温度分布が均一になります。より信頼性の高い比較温度校正を行うには、この方法が望ましいのですが、この方法ではより大きな吸熱量のペルチェモジュールが必要であり、また、あまり大きな温度差を実現することが困難である等の欠点があります。

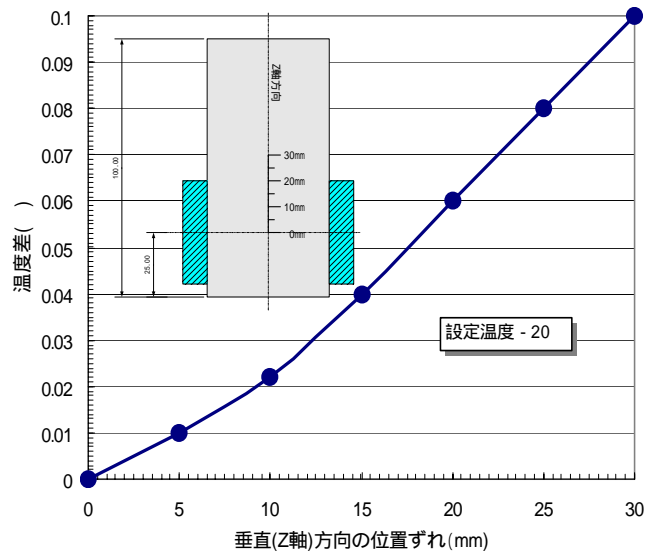


図 25 電子冷却槽 Z 軸方向の温度分布
(高精度温度計 SP3000 使用)

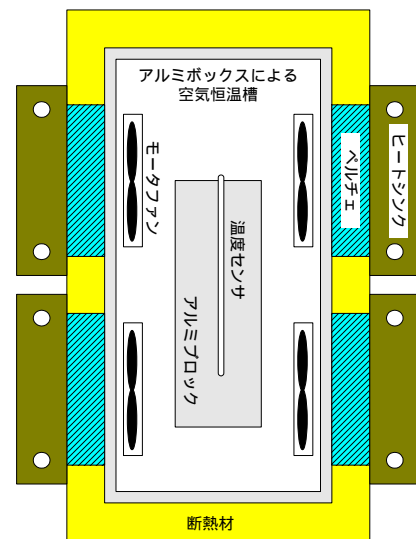


図 26 間接冷却法による電子冷却槽

電流制御型温度制御回路の設計と製作

電流制御回路の設計と製作

今回は株秋月電子通商など秋葉原で簡単に入手できる部品を使い、安価で簡単な電流制御回路を設計、製作します。

回路の入力する制御電圧 0.1V 当りペルチェ電流を 1 A とし、最大電流 3 A を目安に設計します。負荷はペルチェモジュール TEC1-07106 と TEC1-12706 が各 2 個を直列接続しますので、ペルチェ電流 3 A を流した場合、必要なペルチェ電圧は 22.8V になります。

冷却用の電流制御回路の例を図 27 に示します。オペアンプ 1 個とトランジスタ 2 個の極めてシンプルな回路です。槽の制御の上限が +50 ですので、ペルチェによる槽の加熱も考えて電流が逆方向の制御を行う場合でも図 28 のようにトランジスタ 2 個を追加するだけで可能になります。但し、ペルチェ電源には ±24V の電圧が必要になりますので、片電圧(+24V のみ)で電流反転制御を行う場合には、更にアナログスイッチ 1 個を追加した図 29 の回路を用います。

どれも非常にシンプルな回路で製作は簡単ですが、パワートランジスタと抵抗 0.1 5W からなる電流出力部分の製作には次のような注意が必要です。

- ・ パワートランジスタの発熱対策に十分な容量のヒートシンクを用いる。発熱対策が不十分であるとトランジスタの最大コレクタ損失 P_{c^*} が著しく小さくなり、破損の可能性が生じます。
- ・ 発熱による抵抗値の変化による誤差を抑えるため、抵抗 0.1 5W もヒートシンクに取付け、発熱対策を十分に行います。
- ・ リード線抵抗による影響を防ぐため、オペアンプから抵抗 0.1 5W への配線は抵抗端子に直接接続します。(写真 4 参照)

出力電圧 24V の電源は簡単に入手でき、この電源電圧でペルチェモジュールをドライブするため、抵抗 0.1 5W に生じる電位差を出来る限り小さい値の 0.1 としました。

通常、ペルチェモジュール TEC1-07106 と TEC1-12706 を直列にした負荷を使用し、この場合ではコレクタ損失は 3W 程度で非常に小さいですが、一応、TEC1-07106 一個で使用する場合も考慮し、コレクタ損失が最大 60W 程度になることを前提としてパワートランジスタを選定しています。多少、過剰設計気味ですので、あまり大きなコレクタ損失を前提としない使用であれば、容量の小さいトランジスタを使用することも出来ます。また、手元に大容量トランジスタがない場合は、図 30 に示すようにトランジスタを並列接続することも可能です。

温度制御用簡易温度計測回路の設計と製作

電子冷却槽により温度の比較校正を行う場合、槽内温度の安定性は重要であります。温度制御用の温度測定

の値は目安に過ぎないとも考え、必ずしも高精度である必要がありません。よって、電流制御回路同様に秋葉原で簡単に入手できる部品を使い、安価で簡単な 4 線白金測温抵抗体温度センサ(Pt100)を用いた温度計測回路を設計、製作します。この回路を図 31 に、また外観を写真 5 に示します。オペアンプ 1 個からなる簡単な回路です。

温度 T に対する白金測温抵抗体の抵抗 R_t の特性は(参考文献(2)を参照)

$$R_t = R_0 + aT + bT^2 \approx 100 + 0.3895T \quad \dots\dots(16)$$

となりますので、抵抗 R_t の特性は温度 T の 1 次式で近似することが出来ます。

温度 0 と 20 を校正点とし 1 本の直線で校正した場合の本温度計測回路誤差の理論値と実測値を図 32 に示します。すなわち、理論と実測値が正確に一致していることが分かります。

リニアライズ処理など面倒なことを行わなくても、温度 -10 ~ +30 の範囲で誤差を 0.1 以下に抑えることも可能な回路です。但し、簡易化のために全ての処理をアナログ回路でおこない校正に必要な調整を回路中の可変抵抗器(VR1, 2)で行っているため、調整が面倒である上に機械的振動等による誤差要因があります。このため、可変抵抗器には信頼性の高い多回転ボリュームを採用することが必要です。

また、回路中から可変抵抗器を取去り、温度センサ Pt100 と回路定数のばらつきに対する調整をソフトウェアにより行う方法の方がより好ましいでしょう。すなわち、温度センサ Pt100 と温度計測回路からなる入出力特性(温度 T -回路出力電圧 V_o)を

$$V_o \approx a + bT \quad \dots\dots(17)$$

で近似し、2 つの校正点 $(T_1, V_{o1}), (T_2, V_{o2})$ から次の演算処理を行うことにより各特性に対応する定数 a, b を与えることにより校正を行います。

$$a = \frac{T_1}{T_2 - T_1} V_{o2} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} V_{o1}$$

$$b = \frac{V_{o2} - V_{o1}}{T_2 - T_1} \quad \dots\dots(18)$$

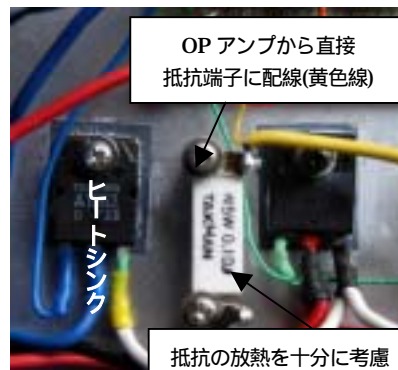


写真 4 電流制御回路出力段の配線例

ペルチェ素子を用いた電子冷却槽による高精度温度制御・比較校正システムの設計と製作

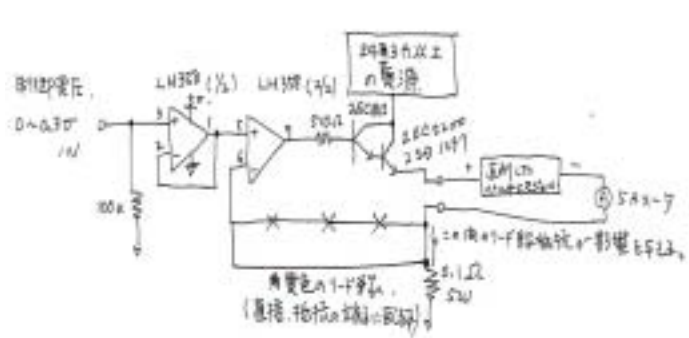


図 27 冷却用簡易電流制御回路

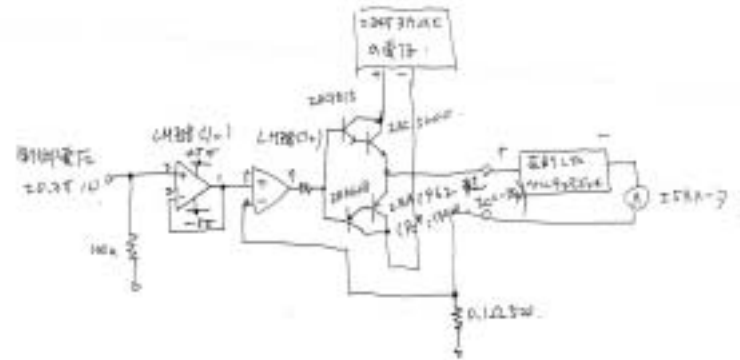


図 28 冷却・加熱用簡易電流制御回路

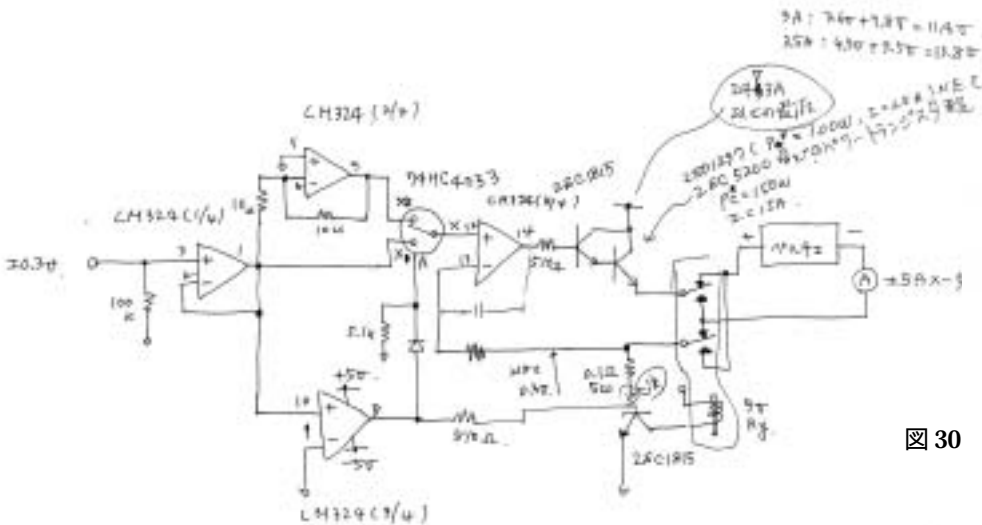


図 29 単一電源による冷却 - 加熱用電流制御回路



図 30 トランジスタ 2 個並列によるドライブ

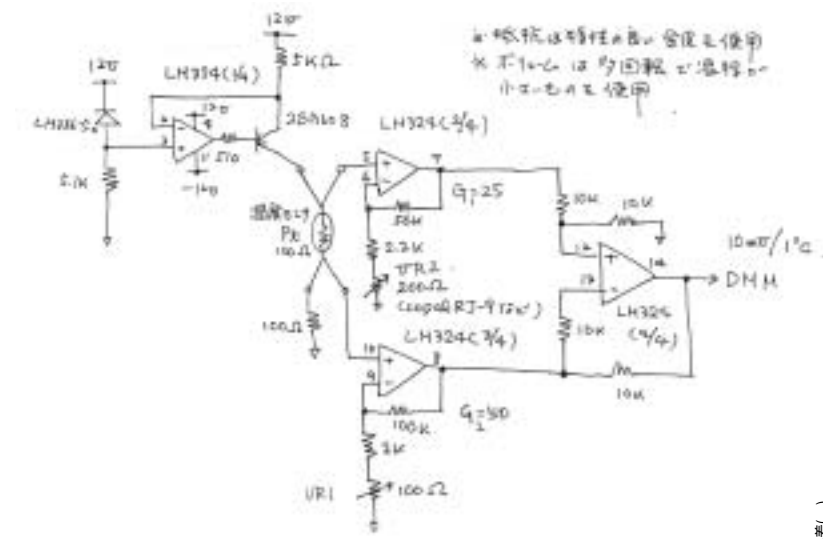


図 31 簡易白金測温抵抗体用温度計測回路



写真 5 簡易白金測温抵抗体用温度計測器

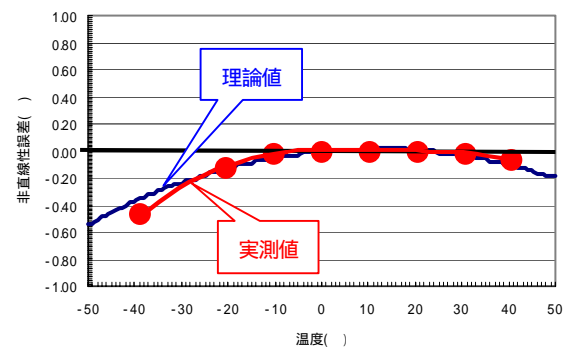


図 32 簡易白金測温抵抗体用温度計測回路の誤差

ペルチェ素子を用いた電子冷却槽による高精度温度制御・比較校正システムの設計と製作

電子冷却槽による温度比較校正システム
による温度制御の評価試験

システム構成

製作した電子冷却槽、電流制御回路、簡易温度計測回路などからなる温度比較校正システムの構成を図 33 に示します。

評価試験

高精度温度計 SP3000 の 4 チャンネルの温度センサを電子冷却槽にセットし、本システムの設定温度が +20、0、-30 の場合の各設定温度における SP3000 の各温度センサの温度の変化を図 34, 35, 36 に示します。各温度センサの温度値のバラツキが 0.01 以内であり、温度比較校正用電子冷却槽の当初の設計目標を満たしていることがわかります。

<参考文献>

- (1) 森本晃弘、中野吉信；ペルチェ素子の使い方とその駆動回路、2003 年 11 月、トランジスタ技術
- (2) 田澤勇夫；白金測温抵抗体と熱電対の正しい使いかた(前編)、2006 年 9 月、トランジスタ技術
- (3) 田澤勇夫；白金測温抵抗体と熱電対の正しい使いかた(後編)、2006 年 10 月、トランジスタ技術
- (4) サーモモジュールガイドブック、熱電子工業(株)
- (5) ペルチェ・モジュール技術資料、電子通商(株)
- (6) ペルチェガイド、(株)フジタカ

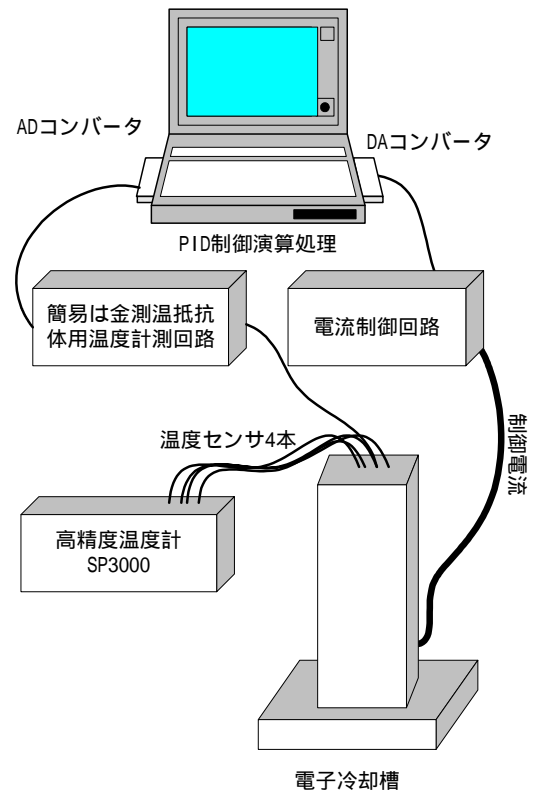


図 33 温度比較校正システムの校正図

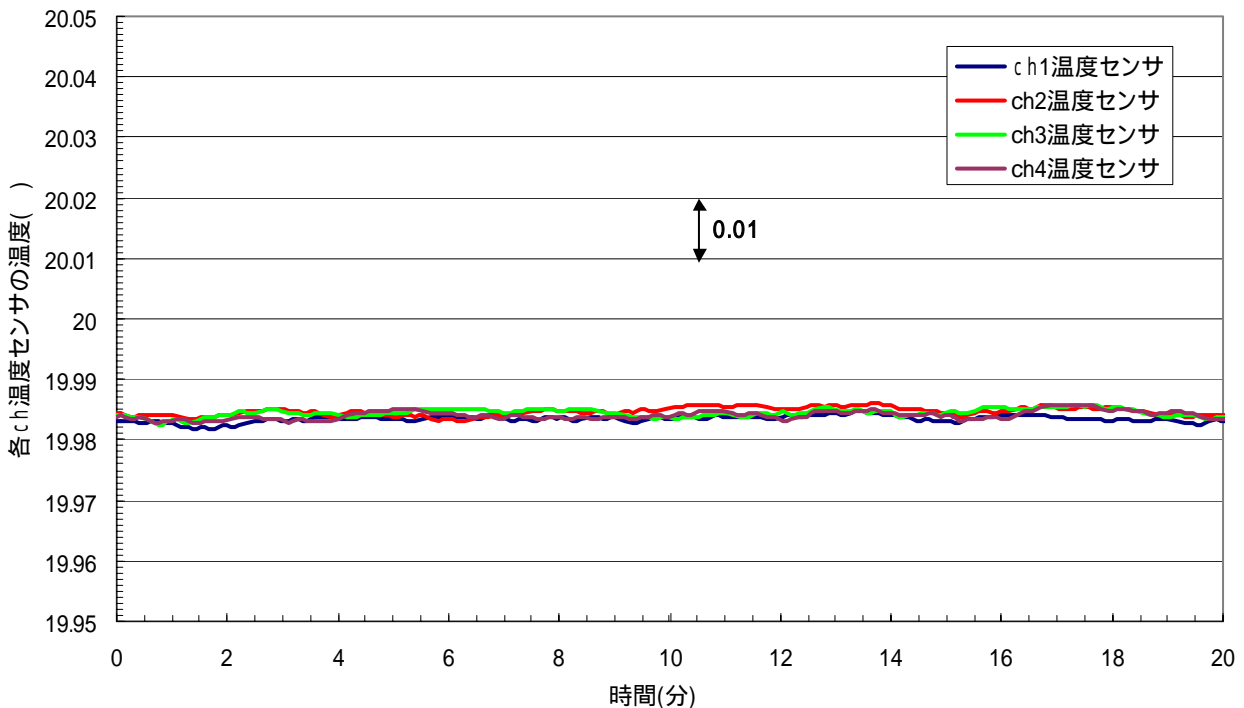


図 34 電子冷却槽を PID 制御で温度制御した場合の測定データ(設定温度 = +20)
(高精度温度計 SP3000 を使用)

ペルチェ素子を用いた電子冷却槽による高精度温度制御・比較校正システムの設計と製作

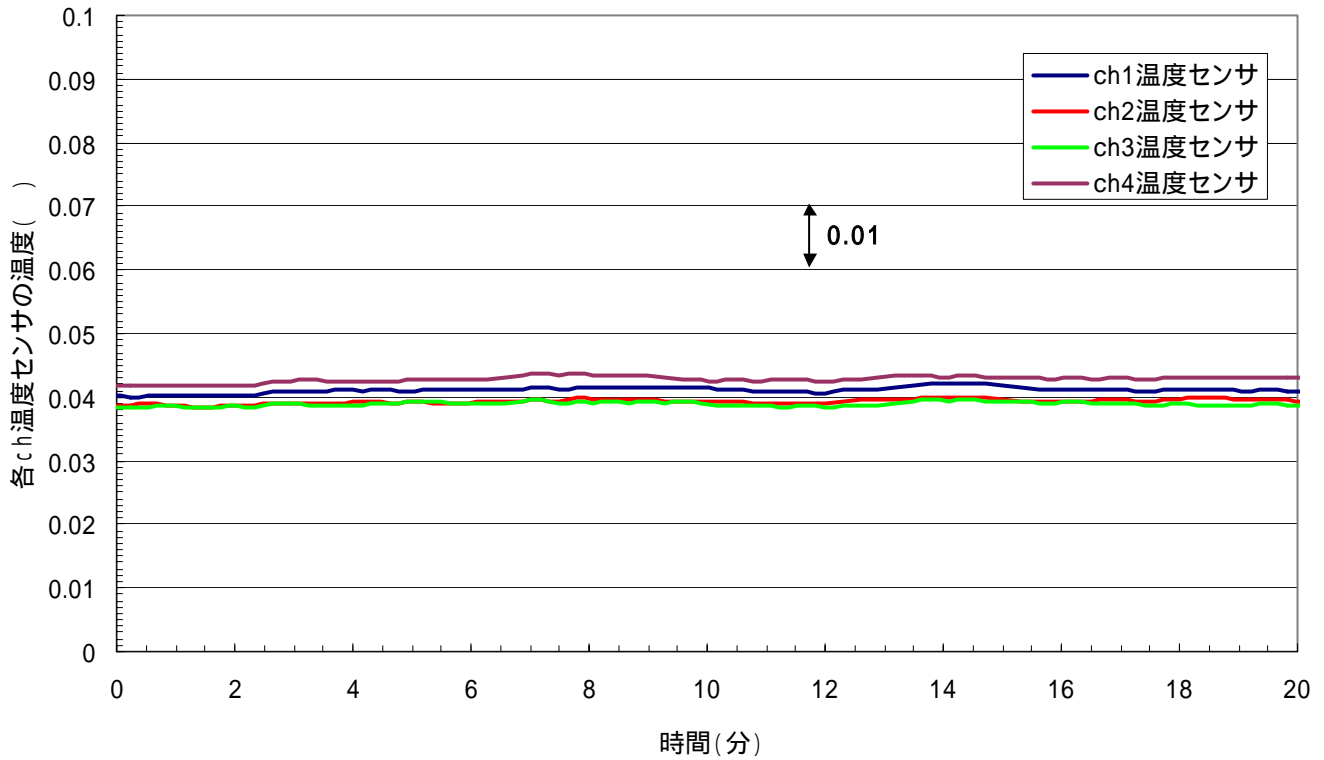


図 34 電子冷却槽を PID 制御で温度制御した場合の測定データ(設定温度=0)
(高精度温度計 SP3000 を使用)

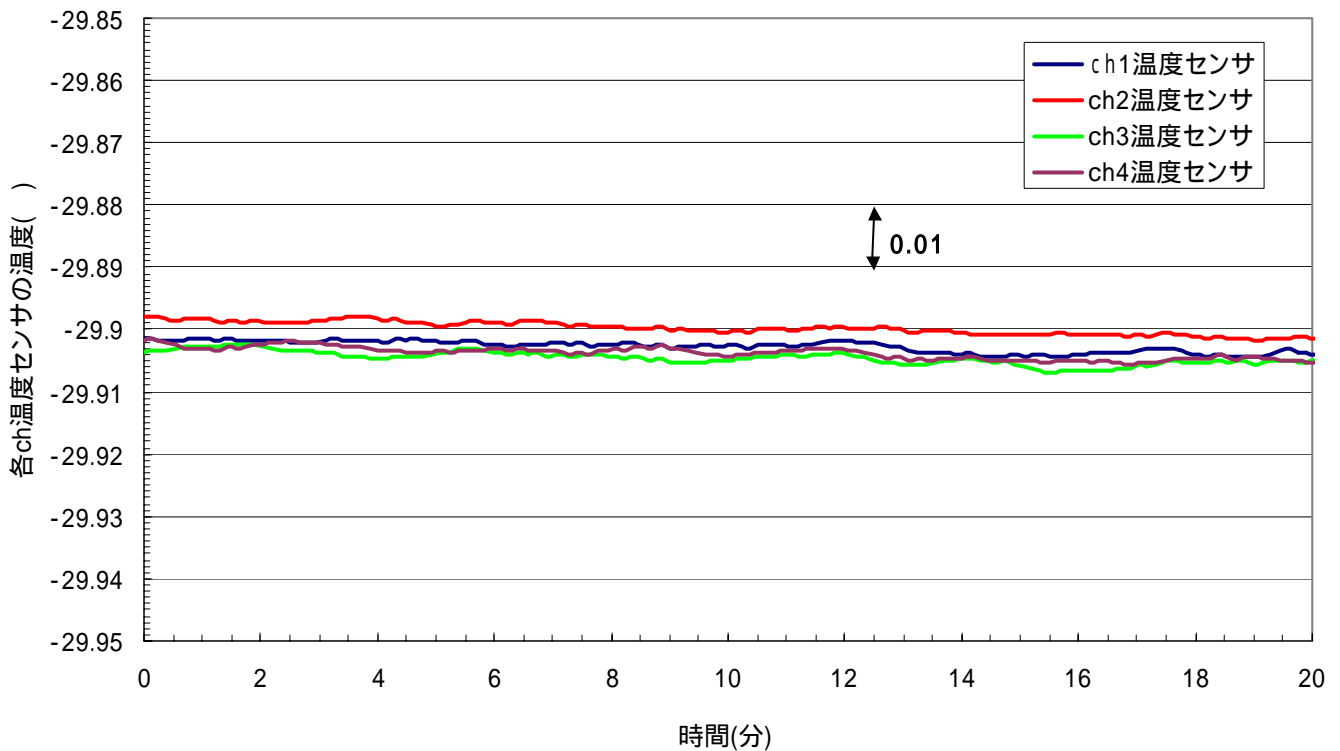


図 36 電子冷却槽を PID 制御で温度制御した場合の測定データ(設定温度=-30)
(高精度温度計 SP3000 を使用)