

液晶の組織観察に必須の道具は偏光顕微鏡とホットステージである。両方とも、そこそこの金額の道具であり、これらを安価に用意できれば、液晶研究参入のハードルが少しは下がるのではないかと思う。この章では、比較的安価に作れる実用性能のあるホットステージを紹介した上で、自作ホットステージについて検討する。

1 実用的な DIY ホットステージ

ホットステージには加熱したプレートの上に試料を載せ、上面は開放状態にあるものと、試料を上下の加熱プレートで挟み込むタイプがある。簡単に自作できるのは試料を載せるだけの開放タイプで、最初に作るのはこのタイプがよい。図??に実用的な自作ホットステージの本体を示す。周囲の覆いもふくめて、このホットステージの手本としたのはロシアの Pozhidaev 先生に見せてもらったホットステージで^{*1}、Pozhidaev 先生が周囲の覆いは木製がよいと力説されていたのをそのまま信じて木製としている。

ホットステージ本体は 2 枚のアルミ板で古典的な半田ゴテ用の 40W ヒーターを挟み込んだものである^{*2}。上面の大きさは 6cm × 4.5cm。上板は厚さ 5mm、下板は厚さ 3mm である^{*3}。板はホームセンターで購入時にサイズを指定して切断してもらっている^{*4}。上下のアルミ板には固定用に 6 つ、中央部に試料観察用に一つ、合計 7 つの穴が開いている。これらの穴は自分でボール盤を使って開けている^{*5}。固定用の穴は直径 3mm の素通し。試料観察用の穴は上面は 3mm、下面はそれより大きな穴で上面近くまで開けている^{*6}。

上下の板は厚さ 2mm のシナ合板、側面は厚み 5mm 程度の檜材である^{*7}。写真のも

*1 もちろん、もっとちゃんとした工作の品ではあった。

*2 アルミを用いているのは銅や真鍮に比べて安く、加工も楽そうに思えたため。アルミといっても、実際にはジュラルミン系合金だと思う。

*3 もともとは、9cm × 6cm × 0.5cm の板を半分にして使っていたのでこのサイズとなった。その後、厚みを減らすために下板を薄くしたけれども、大きさはそのままになった。

*4 もちろん、自分で金鋸で切断しても良く、試みたこともあるけれども、断面がきれいにならず、使用を断念した。ホームセンターに工作室があるなら、そこに依頼した方が綺麗で楽だと思う。また、ミスミから購入する場合にも工作依頼ができるしフライス加工なので高精度のものを入手できる。

*5 ボール盤はホームセンターで購入した物。購入価格は 1 万円未満。別々に穴を開けると位置がずれるので、2 枚重ねで固定して開けている。

*6 試料観察用の穴径を 4mm にしたこともあるが、視野内で温度の不均一が生じたので、3mm のを作り直した。3mm だと経験の範囲で均一性は悪くない。視野内にある温度差をつかって、相の共存を見るような芸をするなら、穴は多少大きめでよい。

*7 普通のベニヤでなくシナ合板を使っているのは見栄えがよいからで、厚さを 2 mm にしたのは全体の厚さを可能な限りで薄くしたかったためである。側面に檜材を使ったのは、適当な断面サイズのもので容易に入手できたからである。



図 1: 手作り感満載のホットステージ。上板は 2mm の合板で、裏側にカバーガラスをポリイミドテープで貼り付けている。枠の内側にあるのはカーボン系の断熱材。

ので下板の大きさは@@mm × @@mm、上板の大きさは@@mm × @@mm。側面の檜材は幅 5mm、高さ@ mm である。上下の合板に開けた穴にはカバーガラスをマスキングテープで留めている。カバーガラスを接着剤で固定していないのは、汚れがついたときに容易に取り替えられるようにするためである。

このホットステージの上蓋と下部の穴のサイズは、見込み角 NA0.5 での観察ができるサイズにしている。NA0.5 だと見込み角が 30° となる。すると、厚さ 5mm の上板の下側の最低穴径は $\tan(30) \times 5 \times 2 + 3 = 8.8 \text{ mm}$ となる。2 枚の板の間のヒーターの厚みを 2mm とすると、下板の上側の穴径は 11 mm、下板の下側は 14.5 mm。ヒーターブロックと下の合板の間隔を 1 mm、板厚を 3mm とすると、下板の穴径は約 20 mm になる。ボール盤で開けられる穴径は精々 10mm なので、あとはヤスリをつかって穴を拡げている。見た目通りの適当なものであるけれども、試料の位置から蓋の上まで 5mm もなく、幾つかの生物顕微鏡用の対物レンズが使用できる*⁸。

熱源には単価数百円の半田ごて用スペアヒーターを用いている。温度センサーは銅コンスタンタン熱電対で、温度制御には市販の温度制御装置を用いている。詳細は改めて紹介

*⁸ NA が 0.5 に達しなくてよいなら、蓋と特に下部の穴径はより小さくてよい。特別なコンデンサを使わない限りは照明系の NA を 0.5 確保するのは困難なので、下部の穴径はここで示したのより小さくても、多くの場合は実用上問題はないだろう。ただし、下部金属板の側面で反射した光が混ざるとゴーストやフレアとなるので、その面の処理には気をつける必要がある。

するが、部品を購入して組み合わせるだけなので、電気・電子工作に関する知識はほぼ必要ない。一式を作製するのに必要な金額は、工作機器を除いて、ステージ本体は 5000 円程度以下。コントローラは、0.1 °C 温度設定タイプで、コンピュータとの通信機能なし、制御はソリッドステートリレー（+スライドトランス）、で 5 万円程度で収まる*⁹。

図??のホットステージを見て頂ければ、自分でも作れそうという気分になるのではないかと思う。とはいえ、工作を実際にはじめて見ると始める前には予想していなかったようなことも生じて、作業をやり直したりする場面も出てくると思う。本体については、失敗の 2 回程度はしょうがないという気持ちで手をつけた方が途中で挫折しなくて済むかと思う*¹⁰。

実際、図??のホットステージは 3 号機なのである。初号機は上下にヒーターのある物を作ろうとして不格好で、電源を入れると全体が熱くて手に持てないものができあがって放棄された。2 号機は上穴の径を 4mm にしたら視野内で温度が不均一になってしまい、改造を余儀なくされ、上穴だけを 3mm に開け直した 2.5 号機となった。それで完成のもりだったのだけれど、照明側の NA が 0.5 なかったことが発覚して、3 号機を作ることとなった。2 号機までは上下とも 5mm のアルミ板を用いていたが、照明の NA を 0.5 にすると下板の穴径が開けるのが面倒くさいぐらいになりそうだったので、3mm 厚にした。なお、3 号機とは別に切断しないスライドガラスを載せることができるサイズのものを一つ作っている。

ホットステージ本体側の材料費は上に記したように数千円程度であり、また熱電対などの比較的高価な部材は失敗した物から取り外して転用できるので、何度か作り直すことを前提に物事を進めると良い*¹¹。そして、一応は実用的な物が構築できたら、それを使いながら、必要性を感じたなら、より凝った物の構築を始めるのがよいかと思う。

以下、ホットステージ自作に当たって、知っておいた方がよいであろう知識や注意点、部材の紹介を行い、その後、いくつかのホットステージを紹介する。他のホットステージを見ることにより、自分の研究に適したホットステージのデザインを考えるヒントになるかと思う。

*⁹ 家で遊ぶ分には、新品を購入する必要はなく、ネットオークションで出物を待っていれば、全体を 1 万円台で構築できるだろうと思う。

*¹⁰ 制御系は、マニュアルをきちんと読んで接続すれば、失敗はないと思いたい。けれども、研究室では配線ミスから電力調整器がとんだこともあるので、絶対に失敗しないというわけではなさそうである。

*¹¹ その結果として、未使用の本体用金属板がそのあたりに複数転がっているようになりもする。

2 交流電源

ホットステージの話の前に、交流電源についての注意点を記す。コンセントの一方は電位 0V になっており、またスライドトランスの一方が導通していることをご存じの方は、この節を読み飛ばしていただきたい。

2 口のコンセントの一方（長い方）はグラウンドで 0V になっており、もう一方はアクティブで ±141V の正弦波となっている。このため、図@a のような回路を作ると、スイッチが OFF の状態で、電流は流れないものの、ヒーター部分には電圧がかかった状態になる。このため、体の一部がこの部分が触れ、体の別の部分がアースに触れると感電する。このような事故を防ぐためには、図@b のように、必ずアクティブ側をスイッチで切るようにして、またアクティブ側にヒューズを入れるのがよい。普通の 2 極のコンセントは裏表でさせるので、どちらがアクティブに接続するかは定らない。このため図@c のように、両方とも遮断するタイプのスイッチを使うことを推奨する。

アース端子のついた 3 接点のコンセントでは、原理的にグラウンドとアクティブを間違えることはないはずなのだけれども、たまにコンセントへの配線自体が間違っていることがある他、途中で 2 接点のコンセントを挟んでいると、そこで極性が入れ替っている可能性があるので信用しきってはいけない。

2.1 スライドトランス

後述のソリッドステートリレーを用いたシステムではスライドトランスを用いることが多い。スライドトランスは、巻き数調整可能なトランスで、100V の入力に対して出力電圧を 0 から 130V 程度の範囲で連続的に変化できる。100V 入力だとヒーターの発熱量が高すぎる場合など、制御が困難となるので、そのような場合には入力電圧を下げるようにする。

入力電圧を連続的に変化できる。通常のトランスは入力側と出力側はつながっていないが、スライドトランスでは入力側の一端と出力側の一端はつながっている。入力と出力がつながっている側がグラウンドとなるように接続する。もし、アクティブ側が接続されると、スライドトランスの出力電圧によらず、出力側は 100V が出力されており、思わぬ事故の原因となる。スライドトランスの結線はグラウンド側を確認して接続することを原則とする。

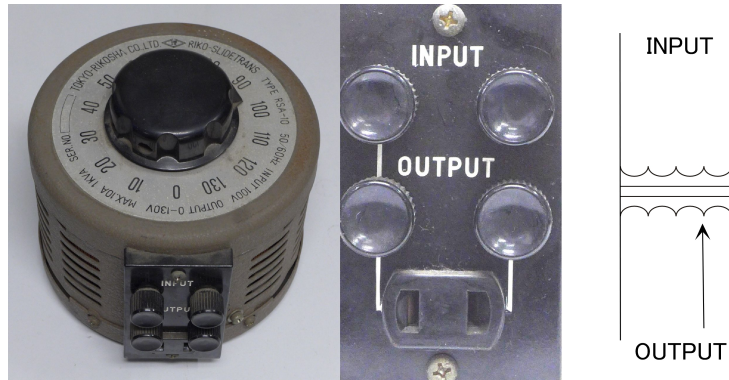


図 2: スライドトランス。左が全体像で真中が端子部分。端子部分は入力に AC100V を接続する。出力は端子でもコンセントでもできる。端子部分の右側は入力と出力が線で結ばれている。これは右図のように、結線されていることを意味している。メーカーによっては線が表記されていないが、それでも、内部は結線しているはずである。

3 温度調整の方法

多くの温調は PID(Proportional-Integral-Differential) ベースの制御を行っている（と思う）。この節では PID の概念を前段となる ON/OFF 制御を含めて簡単に説明する。

3.1 ON/OFF 制御

温度調整で最も単純なのは ON/OFF 制御である。設定温度以下ではヒーター ON、設定温度より上では OFF にする。昇温時に設定温度に到達してヒーターを OFF にしても、ヒーター近辺の温度は設定温度以上になっており、その熱が伝わるために、しばらく温度が上昇した後に温度が低下する。そして、設定温度に到達してヒーターが ON になっても、その熱が伝わるのに時間がかかるため、しばらくは温度低下する。結果として、ON/OFF 制御では図@のように設定温度を挟んで温度が振動する事になる。

3.2 P 制御 (Proportional-Controller)

ヒーターを ON/OFF の二値制御するのではなく、出力を連続して変えるようにすれば温度の振動を抑制できる。これが比例制御で、設定温度を挟んだ領域を比例域とし、比例域の下端まではヒーターは 100 % 出力にし、比例帯に入ると連続的に出力を下げ、設定温度で 50 %、上端で 0 % 出力とする。P 制御では「比例域」という設定パラメータが出

現する。このパラメータで、目標温度に対しての比例領域の幅を指定する。

比例制御で振動は避けられるのだけれど、制御結果は設定温度からのずれが生じる。例えば、ヒーター出力が強すぎて 50 % 出力でも、比例帯の上限を超えてしまう場合を考えると、図④のように設定温度を超えても温度は上昇し続け、上端に近い場所でようやく平衡状態に達して安定する。

3.3 PI 制御 (Proportional-Integral-Controller)

P 制御単体では目標温度と異なった温度で安定してしまった時に、目標温度との温度差を積分して、その積分値も使ってヒーター出力を調整すれば、最終的に目標値との温度差をなくすことができる。これが PI 制御である。PI 制御で新たに加わるパラメータは積分時間である。これは、積分による制御への寄与が比例制御による寄与と等しくなるまでの時間なので、積分時間が小さいほど、急激に温度差を補正するようになる。しかし、その結果として目標温度を行きすぎて温度が振動してしまうことがある。また、PI 制御では、制御温度に保たれている状態から温度が変化した場合に、積分の効果が生じるのに時間がかかるために応答が素早く出来ないという問題もある。

3.4 PID 制御 (Proportional-Integral-Differential-Controller)

一定温度の状態から、ホットステージの覆いを外すなどして温度低下が起こった場合、P 制御では温度低下の差分しかヒーターパワーが増加しななし、I 制御でも、ある程度の時間がたたないと積分効果が聞いてこない。そこで、出番となるのが D 制御で、温度変化率に応じてヒーターパワーの調整を行うことにより、急激な温度変化に対して、より適切な制御が可能となる^{*12}。

3.5 PID 制御のパラメータ調整

ホットステージを設定温度の変化時などにオーバーシュートすることなく、安定に動作させるためには、PID 制御のパラメータの調整が必要となる。パラメータを手動で調整するには、ある温度に設定した後のホットステージの温度変化を観察してといった操作が必要になるが、幸いに、ほとんどの温調には PID の自動調整機能があるので、マニュアルを眺めて、使用頻度の高い温度領域で自動調整を行えばよい。ただし、ここで自動調整し

^{*12} PID の説明、いい加減だから、詳しく知りたい人はきちんと調べてね。

た値はその温度領域に対するものなので、異なる温度設定ではオーバーシュートを起こしたりする場合もあるかと思う。しかし設定温度事に最適なパラメータ値に変更していくのは手間のかかる作業であり、それよりは、スライドトランスの電圧や、電力調整器の最大出力を調整する方が手早く対応できるだろうと思う*13。

4 温度センサー

ホットステージ用の温度センサーは熱電対か白金測温体を用いることが多い。温度センサーには低温用に炭素抵抗体、サーミスタなどもあるが、ここでは、温度調整器とともに用いられる2種類について、簡単に説明する。

4.1 熱電対

熱電対はゼーベック効果を用いたセンサーである。金属線は両端の温度が異なると起電力が生じる。この起電力は金属により異なるため、異種金属を接合して接合点を異なる温度にすると電位差が生じる。ホットステージの温度センサーとして銅-コンスタンタンかクロメル-アルメル熱電対が用いられることが多い。

熱電対の一方の接点は測定対象に設置されるが、もう一方は一定の温度に保ち、一方の電線の途中を電圧計に接続して電位差の測定を行う。一定の温度としては水と氷を共存させた0℃が容易に実現できるので規準に用いられていた。その後、電圧値を変換表を使って温度に変換する必要があった。現在では、熱電対の一方のを装置に直結すれば温度が表示される。装置内部に温度センサーがあり、それを用いて校正を行っている。

熱電対線には内部抵抗がある。内部抵抗の影響で測定される電圧が正しい値より低くなる危険性がある。このため、熱電対の線は太く、内部抵抗が低い方がよい*14。一方、熱電対の線が太いと、線を通して熱の出入りがあるため、試料近辺の熱電対素線は細い方がよい。この二つの要請を満たすため、試料付近には細い素線を用い、試料の外で太い素線に接続することが行われる。

熱電対接続には専用のコネクタを用いる。熱電対の種類によっては素線が高価なため、接続線には補償導線といわれる別の材質の線を用いることがあるが、銅-コンスタンタンやクロメル-アルメルでは普通に熱電対材質を使うことが多いと思う。素線には裸線

*13 原理的には、いくつかの温度のPID設定値から、温度補間で各温度の値を決め、温度設定時に、PCからそのパラメータも書き込むのがベストの手法であろうかとは思うのだけれども（そして、市販のホットステージはそうやっているかもしれないけれど）、そこまでしなくても、実用上はなんとかなっている。

*14 そして、測定に用いる電圧計の内部抵抗は高い事が望まれる。

の他、テフロン被覆の物がある。コネクタや被覆線の色は熱電対の種類により定まっている。ところが、色の対応が JIS と ANSI で異なっているため、どちらの規格のものであるかを確認する必要がある^{*15}。

4.2 白金測温体

白金測温体は金属の電気抵抗に温度依存性があることを利用したセンサーである。熱電対が内部抵抗による電圧の降下が問題となるように白金測温体の場合は、接続線の抵抗が測温体の抵抗に加算されてしまうので、その分を補正する必要がある。このため、白金測温体では 3 線もしくは 4 線式の配線を行う。3 線式では測温体の一端に測定線と同じ材質の線をつけて、それを測定器に接続し、測温体を通さないループでの抵抗値も評価することにより、差し引きで測温体の抵抗を求めるようにする。4 線式では、測温体の両側に 2 本ずつの線をつけて補正を行う。

4.3 センサーの取り付け位置

ホットステージの温度センサーは試料の温度を正確に測定するためには、試料の傍に設置したくなるが、センサーがヒーターから離れると、温度制御が悪くなる。ON/OFF 制御を例にすると、センサーがヒーターから離れていると、センサー位置で設定温度に達した瞬間にはヒーターはかなり高温になってしまっている。センサーがヒーターに密着していれば、設定温度に達した瞬間にヒータの温度もほぼ設定温度であり、ヒーター付近の温度がそれ以上上昇することなく OFF になるので、振動は少なくともすむ。PID 制御にしても事情は同じで、センサーがヒーターから離れていると、遅れ時間が長くなり制御が不安定になりやすくなる^{*16}。

センサーが試料位置から離れてしまうと、試料付近の温度は設定温度とずれてしまう可能性はあるが、それでも、振動は抑えられるので、差分を評価できれば、困ることはない。試料付近の温度を評価したい場合には、試料付近に 2 つめのセンサーを設置して温度をモニターするようにする。

*15 色は違うが接続できてしまう。

*16 防寒夜話 物理の散歩道

5 温度調整器

温度調整器ユニットは複数のメーカーから市販されている。機種を選択するときに考慮すべきことは、

- 温度設定の最小単位
- 使用できる温度センサーの種類
- 制御周期
- 制御出力
- 通信機能の有無

の4点である。温度設定の最小単位は0.1℃のものが多いが、高性能タイプとして、0.01℃のものもある。0.1℃/分程度以下の降温速度が必要な場合には、高性能タイプを選択しておく必要がある。

センサーの種類については、最小単位が0.01℃のものには白金測温体のみに対応するものもあるが、多くの機種では熱電対も含めて多種のセンサーに対応する^{*17}。

制御周期は温調が制御値を更新する周期である。温調は、ある時点での温度計測値(とそれ以前の情報)により出力の大きさを決めると、一定時間はその出力で制御を行い、一定時間後に次の制御値への変更を行う。温調が制御値を更新する周期が制御周期である。ホットステージのように小さな機器では制御周期が短いと制御周期の間に温度が設定値から外れる危険性が高くなる。

制御出力は、ソリッドステートリレー用の12V(24V)出力タイプのものや、電力調整器用の4mA~20mA出力のものなどある。温度調整器によっては、出力ユニットが別売で組み込むものもあり、これなら、後からでも制御出力の変更が可能である。

通信機能は、コンピュータを使って温度制御をする場合には必須の機能である。液晶の組織観察では、設定温度を一定の変化率で変化させたいことなどがある。市販の温度調整器の中には、プログラム機能があり、温度の連続変化ができるものもあるけれども、経験的には、液晶の組織観察には必ずしも使いやすいものではない。コンピュータから設定温度の調整ができると、コンピュータ上でプログラムを組めば、より柔軟な温度変化設定などが可能になる。通信機能は、オプションで、また活用するためにはプログラムの知識が必要となるけれども、使いこなす価値は十分にある。

^{*17} ただし、白金測温体は0.01℃だが熱電対ではものによっては、0.1℃単位の設定になったりする。

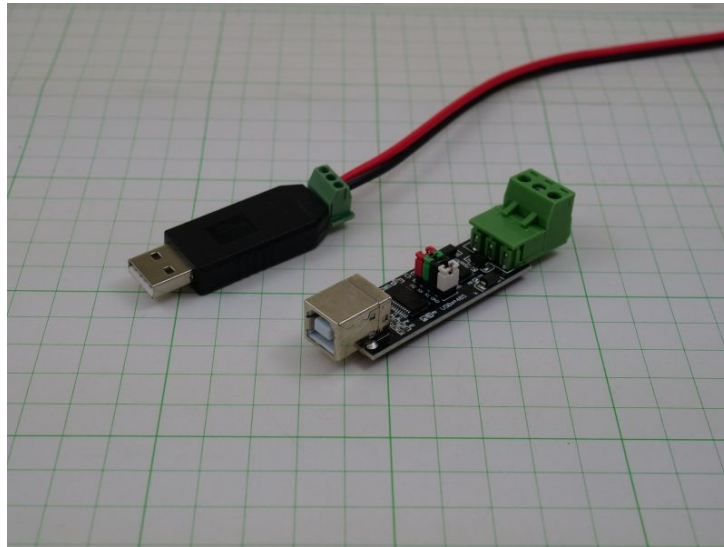


図 3: USB-RS485 コンバータ。USB に直接さえるタイプとコードを介して接続するタイプがある。

通信規格には RS232C、RS422、RS485 がある。RS-422 は数が少なく、RS-232C と RS485 が主流である。コンピュータの通信では RS232C がポピュラーで、コンピュータにも RS232C の通信ポートが備付けてあったが、最近のマシンではポートは省略され、USB-RS232C コンバータを介しての接続となる。RS485 も同様に USB-RS485 コンバータを介しての接続となる。ネットで探せば安価なコンバータが見つかる。RS485 側の結線が 2 本で済むので、個人的にはこちらを使っている。手元のシステムでは、両者は同じプログラムで動いている。

コンピュータと接続する場合には、コンバータのドライバをインストールする必要がある。安価なアダプターだとネット情報を頼りにドライバを見つける必要があるかもしれない。通信ポートを使うプログラムが書けるなら、その言語でプログラムを書けばよいのだけれど、そのような芸がない場合には、通信ポートを使えるプラグインがある言語を選択する必要がある。幸いなことに、多くのコンピュータにインストールされているであろう Excel で通信ポートを使えるようにするプラグインが安価に提供されている^{*18}。それを使えば、Excel の VBA で温度調整プログラムを実装できる^{*19}。

^{*18} 使っているのは Vector にある RS232C Excel add-in というシェアウェアで 1352 円だった。以前はフリーの物を使っていたが、Windows のバージョンを上げたら動かなくなり、現在はこれを使っている。

^{*19} 動かない時に、どこに問題があるのかの切り分けが容易ではない場合があり、実際に動くようになるまでに、かなりのたうち回った記憶がある。そこで、この章の最後に最低限のプログラムは公開する。

6 制御方式の詳細

6.1 ソリッドステートリレータイプ

ソリッドステートリレー (SSR) は交流専用の電子的なスイッチの一種で、制御信号が ON になると導通し、OFF になると、その次に交流の被制御出力が 0V を横切る時点で回路を遮断する。SSR 側の制御入力には 12V から 24V 程度の直流電源で対応する温調の出力は DC12V か 24V である。SSR は単価数千円の小型の機器である。SSR の許容電流値は小さなものでも 5A 程度はあり、ホットステージ用には十分な容量である。SSR には通常タイプの他にゼロクロスタイプがある。通常タイプは制御入力が入った瞬間にスイッチ ON となるが、ゼロクロスタイプでは、制御入力が入った後に最初に出力電圧が 0 V を横切る時点でスイッチが ON となる。通常タイプでは、スイッチ ON の瞬間にパルス電流流れノイズを発生したり、下流にコイル要素がある場合には大きな逆起電力を発生させる可能性があるが、ゼロクロスではそのような問題は抑えられる。ただし、ゼロクロスでも完全に 0V をよぎった瞬間に ON になるわけではないので、通常タイプの問題が完全に回避できるわけではない。

SSR は単なるスイッチなので、電力の調整は導通時間により行う。例えば、50 % 出力にしたい場合は、繰り返される一定期間の中で 50 % の時間だけ SSR を ON にする。この一定期間は「制御周期」と呼ばれている。制御周期の時間設定ができる温調もある。

出力が 50 % 時に、制御周期が 60 秒になっていると、1 分の内、連続する 30 秒はヒーターは ON 状態に、残りの 30 秒は OFF 状態となる。ヒーターの ON/OFF に対する時間遅れはあるかと思うが、試料の温度も 60 秒周期で上下しそうである。制御周期が 1 秒に設定されているなら、0.5 秒でヒーターの ON/OFF が繰り返される。制御周期が 60 秒の場合と比べて、試料温度の揺らぎは遙かに抑えられる。

上の議論からは制御周期は短いほど良さそうだが、SSR の特性上、短すぎる制御周期は別の問題を引き起こす。たとえば、制御周期を 0.5 秒に設定すると、交流 50Hz の地域では、制御周期の間に電圧が 0 をよぎるタイミングは 50 回しかない。ゼロクロスタイプの SSR を使うことを考えると、0 をよぎるタイミングが 50 回しかないので、電気が流れる時間が 2 % 単位でしか変化できない。制御出力が 90 % 程度あるなら 2 % 変化は大きなものではないが、制御出力が 10 % の時には 2

このため、SSR を使う場合にはスライドトランスを使って、設定温度で制御出力が小さい場合にはヒーターへの印加電圧を下げて制御出力を上げるようにする。スライドトラン

スによる電圧の制御はオーバーシュート防止にも有効である。ステージに対してヒーターパワーが高すぎると、昇温速度が速く、昇温時に設定温度より高温にオーバーシュートしてしまう。印加電圧を下げれば、昇温速度は低くなりオーバーシュートを低減できる。スライドトランスは必ず SSR の上流側に入れる。スライドトランスが下流側の場合は SSR のスイッチによる電圧の急変によりスライドトランスの 2 次側に高い電圧が発生する。

6.2 電流出力と電力調整器

電力調整器は入力信号に応じて出力を連続的に変化する装置である。連続変化といっても、直流制御ではなく、交流波形をある繰り返し毎に一定の位相で遮断して調整を行う。電流調整器の入力は多くの機器で 4mA~20mA であるが、最近の機器では 0mA~20mA の場合もある。電力調整器に合わせて温度調整器の出力を選択する。

電力調整器による制御では制御周期はなく、出力は連続的に変化していく。電力調整器には入力信号に対する勾配設定機能がある (図@)。ホットステージに対してヒーターパワーが高すぎる場合は勾配を緩くして昇温速度が速すぎないようにするとオーバーシュートを低減できる。

電力調整器では、交流電流を適当な位相値で遮断するので、遮断動作にともないノイズが発生する。微弱な電流測定ではヒーターの発するノイズにより測定が困難になることがある。

6.3 電圧出力と直流電源

0~5V または 0~10V の電圧出力と、それらの電圧の入力により出力電圧がコントロールできる直流電源を組み合わせれば、直流でヒーター駆動ができる。ヒーター電源の ON/OFF によるノイズもなければ、直流駆動だと交流周波数のノイズも発生しないので、電気測定との組み合わせには向いている*²⁰。

6.4 リレー出力

温調に機械的接点を持つリレーが組み込まれていて、それにより ON/OFF を行うものである。接点の繰り返し寿命は高いものではなく、また制御周期も長くなるので、ホットステージの制御用には適していない。

*²⁰ 電力調整器で制御したホットステージでは、ノイズで測定不可能だった電気信号が、直流電源では測定できたことがある。温調がより大げさにはなるけれども、手法としてありだと思ふ。

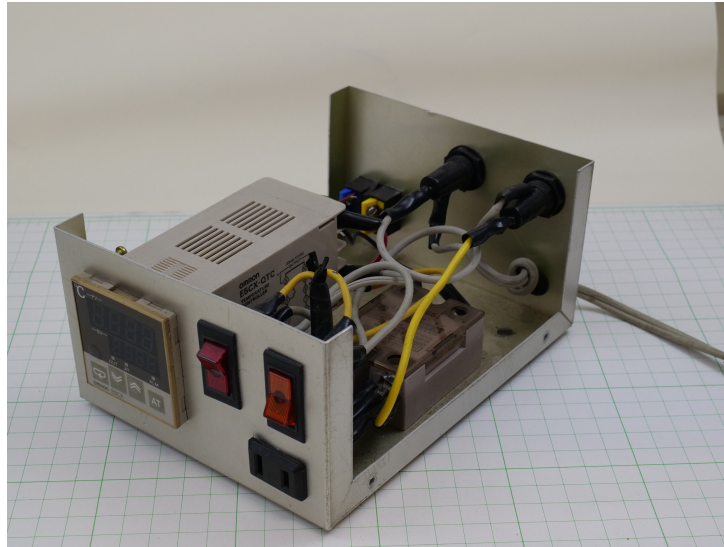


図 4: ソリッドステートリレーを用いた温調ユニット、電力調整器に対してコンパクトになる。

7 コントローラの組み立て

温調は、部品を接続すれば動作はするけれども、可搬性などが悪いので、適当なケースに部品を取り付けるようにする。全体を覆うケースをつかってもよいし、アルミのシャーシの上に作りこむのもよい。図 4 はソリッドステートリレーを用いた物、図 5 は電力調整器を用いたものである。両方とも組み込み温調は正面パネルが 5cm 角のものである。電力調整器を用いたものの方がコントロール部分は大きくなるが、外付けのスライドトランスまで考えに入れると似たようなものである。直流電源を駆動する場合には、コントローラ内部に適切な電源を組み込むか、コントローラは本体のみで、外付けの電源へケーブルが伸びていくことになる。

8 ヒーター

熱源として用いるヒーターには次のような選択肢がある。

- 半田ごて用ニクロム線ヒーター
- カートリッジヒーター
- ラバーヒーター

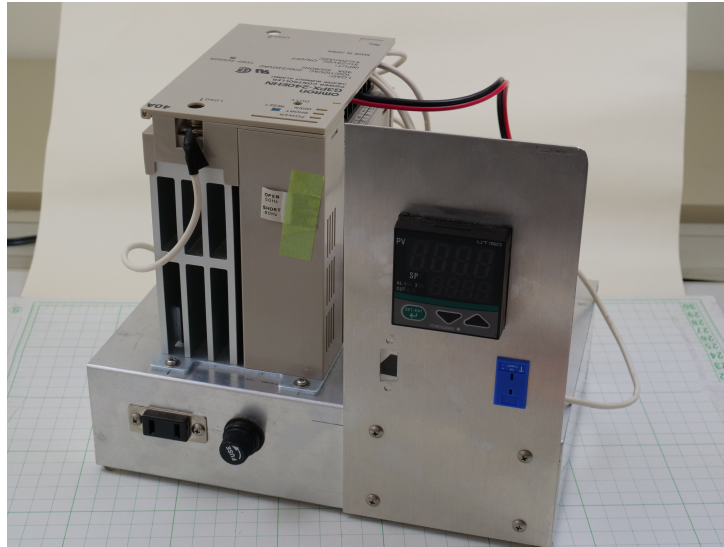


図 5: 電力調整器を用いた温調ユニット、使っているのは旧型機種で、現行機種は見た目がもう少し格好いい。

- ポリイミドヒーター
- フレキヒーター
- セラミックヒーター
- 絹巻マンガン線

それぞれの特徴を簡単に記す。

8.1 半田ごて用ニクロム線ヒーター

ニクロム線の巻かれた雲母板を雲母の薄板とトタンで包んだ小型で長方形のヒーターで2つつながった形状のものである。本来の用途は、古典的な半田ごての先端部分の根元を2枚のヒーターで挟んで加熱するためのもので、修理部品としてヒーター部分のみが販売されている。容量は40Wから100W程度のものである。5cm角程度の小型ホットステージなら40Wのもので十分である。

半田ごて用ヒーターはそのままだと2枚の間隔が狭すぎて光路を塞いでしまうので、1個ずつに分解して用いる。2枚のヒーターは短い線で接続されているので、それを外して、より長い線と交換しなければならない。そのためには、ユニット内部のヒーターと接続線の接続部分をむき出しにしなければならないので、一旦はトタンのカバーを外して中を取り出す必要がある。トタンのカバーの分解は時計工具の「こじ開け」を用いると楽に

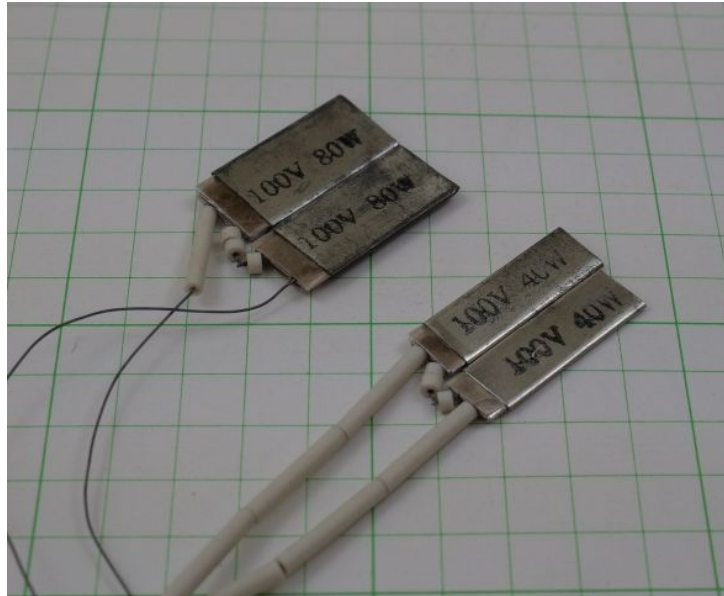


図 6: 半田ごて用のヒーター。雲母にニクロム線を巻き付けたものをトタンで包んでいる。左上が 80W、右下が 40W。

行える。

ヒーターのカバーを外すと、中には雲母の芯にニクロム線が巻いてあり、それをさらに雲母でくるんでいる。雲母の芯の方端に穴があり、そこで、外側の線との接続が行われているので、その部分の線の交換を行う。作業後に、改めて元のカバーで固定し直すけれども、このときに、熱電対などの温度センサーをヒーター本体をくるんでいる雲母とトタンカバーの間に入れて固定する*21。

8.2 カートリッジヒーター

円筒状のヒーターで様々なサイズのものがある。本体は 800 °C 程度まで対応しているものもあるが、空だきをすると断線してしまうので、被加熱部位との熱接触をよくする必要がある。本体が円筒状なので、被加熱体に穴を開ける必要があるが、普通のドリルだと穴径が厳密には定まらないため、小さめの穴を開けた後にリーマドリルで正確な穴径とすることが推奨されている。

カートリッジヒーターは同じ大きさでも異なるパワーの物があり、高パワーの物ほど表

*21 固定は側面で行う上面や下面に温度センサーを入れるとヒーターが一方だけ、部分的に厚くなって熱接触が悪くなるし、均等に挟み込みできなくなる



図 7: カートリッジヒーター。左の物は直径 6.5mm、長さ 100mm で定格は 100V-100W。右上のものは、直径 1/8 インチ (約 3.1mm)、長さ 5/4 インチ (31.8mm)。定格は 120V-50W。単位表面積当たりの発熱量は小さい方が遙かに大きく、伝熱に注意しないと寿命が短くなる。個人的には可能な限り表面の発熱密度が低いものを選ぶようにしている。

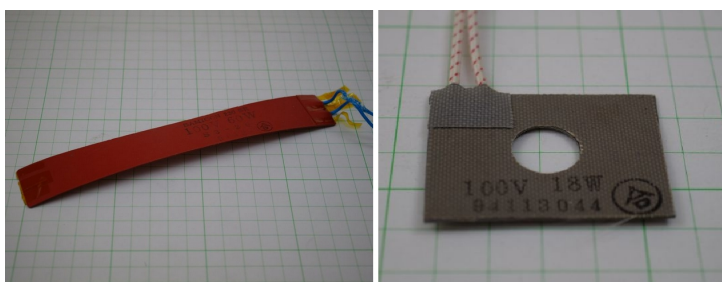


図 8: ラバーヒーター。左の物は細長いタイプで、ホットステージというより円筒形のものの加熱などに使うことが多い。右の物は真中に穴が空いているが特注品で、普通のものには穴が空いていない。

面の発熱密度が高くなる。発熱密度が高いほど故障の確率が高くなるので、必要な熱量が確保できる限りは低パワーのものを選択する方がよい。カートリッジヒーターは電源導入端子部分が折り曲げに弱いので、導入部が固定されておらず、取り付け取り外し時に動いてしまうような作りだと、導入部分が比較的短時間で折れることがある。

8.3 ラバーヒーター

シリコンゴムでできているヒーターで、標準品その他特注により真中に穴の開いたような形状の物も入手できる。ヒーター自体は厚みは均一であるけれども電極の取りだし部分はヒーターより厚いため、その部分はヒーターの外側にするか、ヒーターを削り込んでおく必要がある。

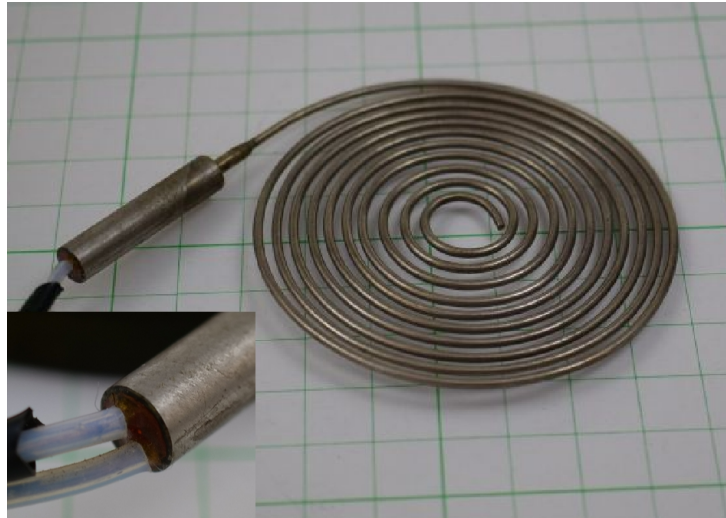


図 9: マイクロヒーター。販売時には伸びた状態なので、使う形状に合わせて自分で加工する必要がある。曲げると加工硬化し、同じ箇所を曲げ直すと折れることがある。写真のように緩いカーブならよいが、四角く曲げる場合は、曲げるのは一度と考えるべきである。。

8.4 ポリイミドヒーター

ポリイミドで発熱体を挟み込んだヒーターでヒーター本体は薄く曲面への貼り付けが可能である。ラバーヒーターと同様に電極の取りだし部分はヒーター部分より厚くなっている。

8.5 フレキヒーター・マイクロヒーター

シースヒーターの一種で、直径 2-3mm 程度で長さが数十 cm から 1m 程度のヒーターで、自由に折曲げができる*22。このヒーターも電極導入部分が折り曲げに弱いので、カートリッジヒーターと同様に電源導入部分は動かないように固定した方がよい。

8.6 マイクロセラミックヒーター

セラミックに発熱体を埋め込んだヒーターであるが、ここで念頭においている物は、厚さが 1mm 台で 1cm × 2cm 程度のコンパクトなものである。電極導入部分も厚さは変わ

*22 折曲げができるが、金属疲労が生じるので、同じ所を折り曲げると破断してしまう。

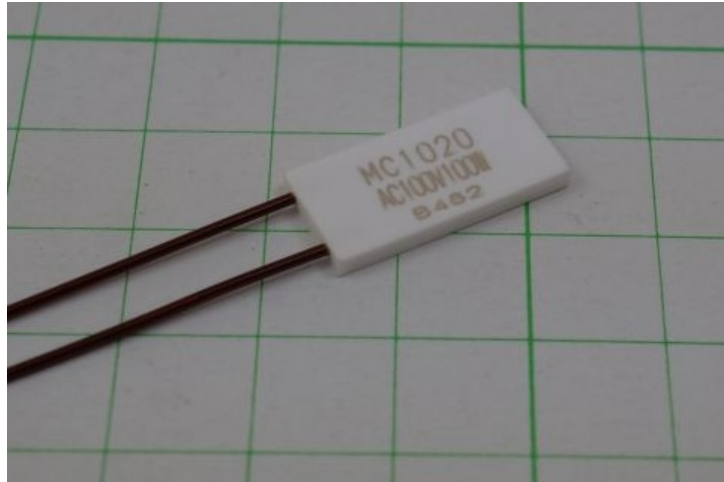


図 10: マイクロセラミックヒーター。10mm × 20mm と小型だが 100V-100W とパワーがある。リード線はヒーター本体より厚みがないので、取りだし部分の加工が楽。旧製品と現製品でリード線の位置が異なっているので、旧製品を使っていた物を現製品に置き換えるのには注意が必要。

らないので、そのままホットステージの中に埋め込んで電線だけ外にだすような使い方ができる。坂口電熱で取り扱っている*²³。

8.7 絹巻マンガン線

一部の玄人さんに愛用されている熱源。絹巻のマンガン線を無誘導巻で被加熱体に巻き付ける芸があるらしい。

9 いくつかのデザイン例

この章の最初に紹介したホットステージは、実用上の問題はないのだけれども、格好いいとは言いがたい品である。また、より良い温度均一性を望むなら、両面加熱のホットステージが検討対象となる。フライスなどの工作機械が利用できるなら、より凝ったホットステージも自作できるが、通常は図面を描いて外注することになるかと思う。以下、そのような倍の参考のために、工作依頼して作成したいくつかのホットステージの概略を紹介

*²³ 先代を最初にしたときは 10 × 20mm の品で 4000 円だった。そのつもりで現行品を頼んだら 4 倍以上の値段になっていて魂消してしまった。あと、電極の取り出しが先代の方が外側で、それに合わせて設計したら、新しいタイプが入らずに、再工作が必要となった。

する。

9.1 片面加熱型

外注を前提として、自作のものよりは格好いい片面加熱タイプを設計した。ホットステージ全体の厚みを薄くするために、ヒーターにはマイクロセラミックヒーターを用いている。全体の厚みは 6mm で、外周の下板との間隔は 1mm、下板は 2mm のベニヤ板なので、液晶セルに 1mm のガラス板を用いるとして、顕微鏡のステージ上面からほぼ 10mm の位置に試料面がある。これならニコンの正立顕微鏡用の長作動コンデンサで*24、なんとかケラー照明が可能になる*25

図 11 に設計図面を示す。ヒーターの大きさは 10 × 20mm であるが、角の部分は耳がついたような形になっている。これは、フライス加工は丸い刃先を使って削るため、角の部分をきちんと出すためには余計に削る必要がためである。温度センサーは直径 2mm のシースに収められた白金測温体を使っている。

図 12 に全体の様子である。本体の覆いは、相変わらずシナ合板と檜角材で組み立てている。

9.2 両側加熱タイプ (I)

セルの上側にもヒーターブロックのあるホットステージ。片面タイプと比較してセルの上下方向での温度差が少なく、また、セルの実温度もヒーターブロックの測定温度とより一致していると期待できる。温度センサーは下側のみについている*26なので、上下ブロックの温度差が生じにくいように、上と下のブロックはほぼ同形状で、下のブロックのみ白金測温体の取り付け穴が開いている他、内部の保持板を取り付けるためのネジ穴が設けられている。

このホットステージの特徴は、上下のヒーターブロックで、直接セルを加熱するのではなく、上下のヒーターブロックが作る空間内部に、銅板に挟んでセルを固定するようになっていることである。銅板はヒーターブロックから突き出たネジでテフロンスペーサーに上に乗る形で設置されており、ヒーターブロックとの熱接触は、あまり良くないようになっている（つもりである。）セルがヒーターブロックと直接接触していると、熱の伝達

*24 作動距離 10mm、最大 NA0. 6

*25 なのだけれども、少し足りてない気がする。

*26 これまメトラーなどの市販装置でも同じで上下のヒーターブロックは同じコントローラで制御されていると思う。

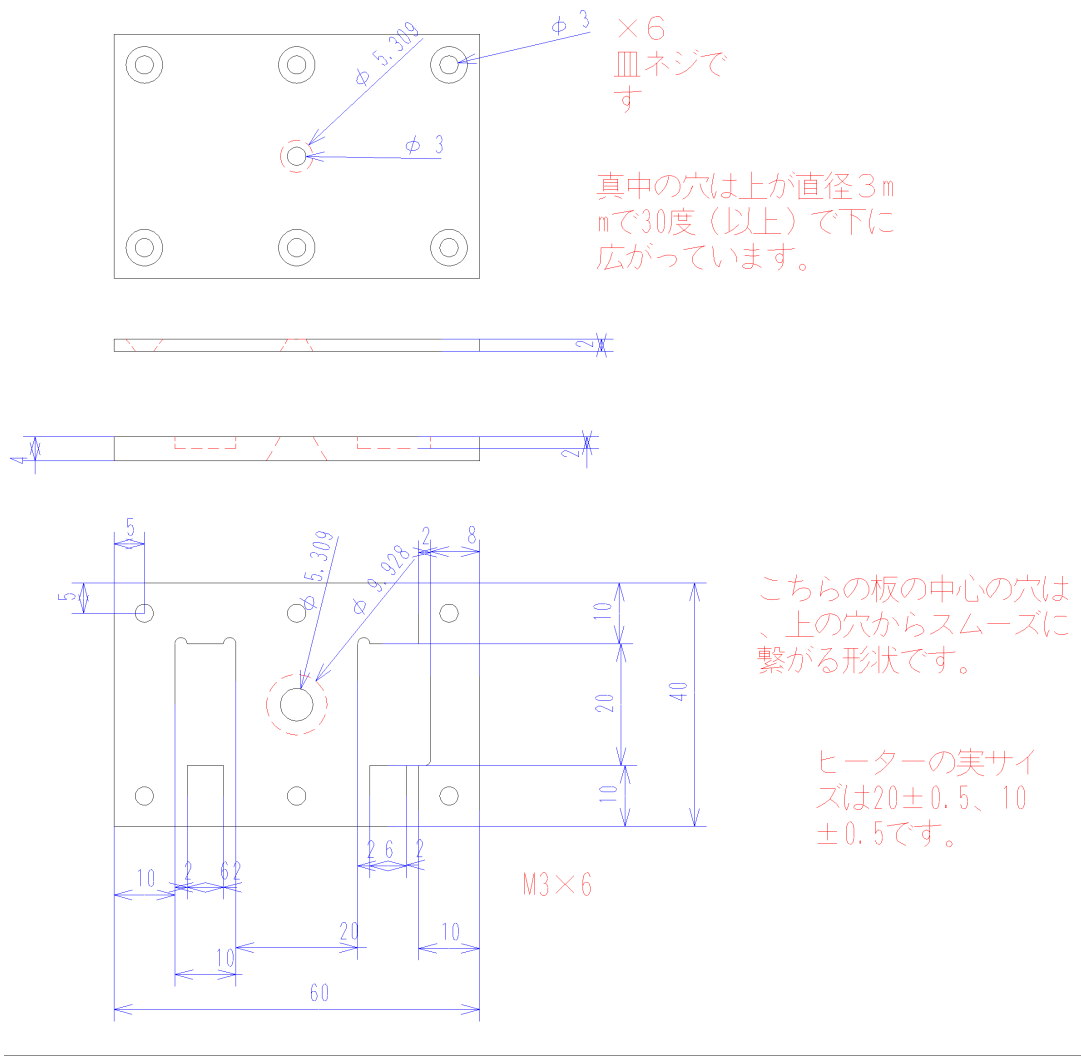


図 11: 工作依頼して作成した片面加熱型ホットステージの本体部分図面。上板は厚さ 2mm、下板は厚さ 4mm で全厚 6mm である。

は良いけれども、ヒーターブロックの温度揺らぎが直接セルに伝わってしまう。ヒーターブロックが作る空間内部に熱接触がよくなくセルが設置してあると、ヒーターブロックの温度変化に対する追従には時間がかかるけれども、ヒーターブロックの温度揺らぎに対しては応答が鈍感になるので、温度安定性がよくなることが期待できる^{*27}。

セルを挟む銅板は中心穴が 3mm のものと 5(6)mm の物を用意した。片面セルの場合に

^{*27} 実際に良くなったかは……、現在なら、何らかのシミュレーションで評価可能だろうけれども、そんな根性はないので、作って試すになっている。

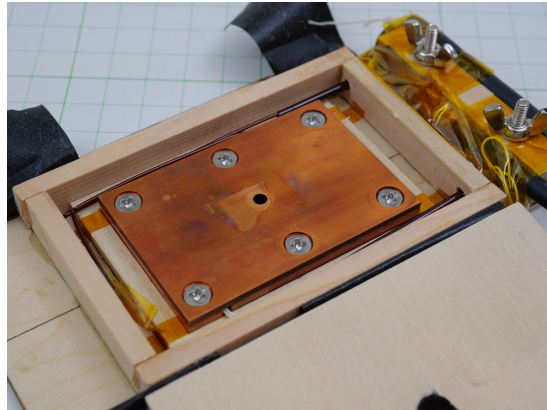


図 12: 工作依頼して作成した片面加熱型ホットステージ。外周は DIY。

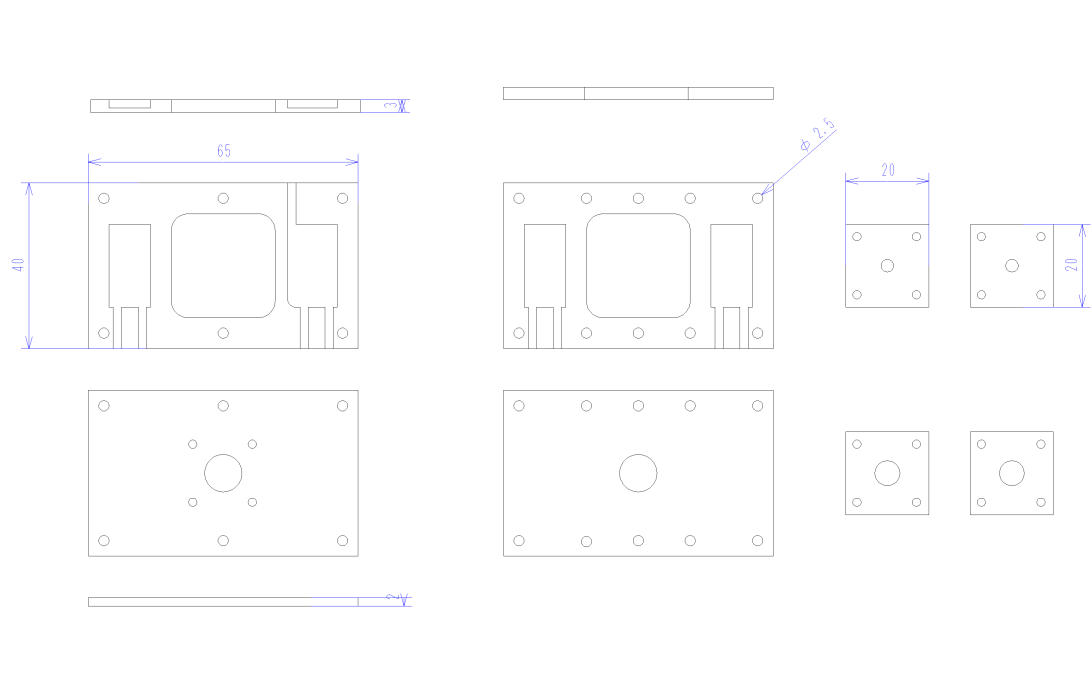


図 13: 両面加熱型ホットステージの概略図面。

は 4mm 程度以上だと観察領域内に温度分布が生じてしまうけれども、この両面加熱タイプでは、設定温度によるかもしれないけれども、より広い領域で温度分布が均一に保たれている。

このホットステージは次に紹介するホットステージの簡易版として設計された。セルの温度均一性を良くするためには、ステージの対称性が高いことが望まれる。このため、次

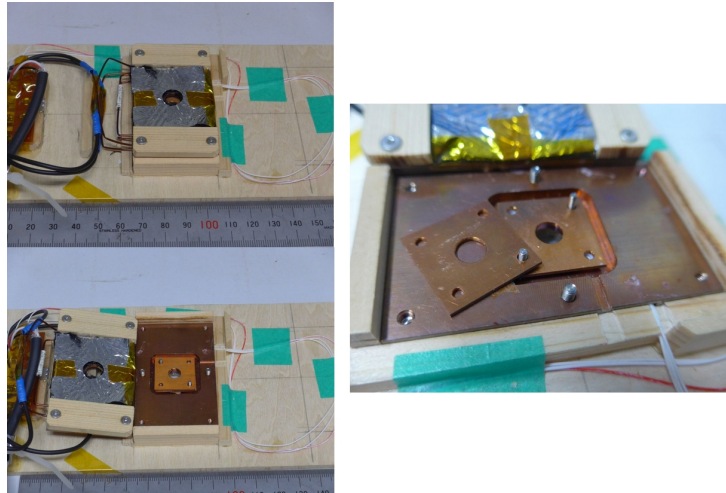


図 14: 両面加熱型ホットステージ。外周は相変わらずの DIY。上部サイドのネジを使って木片を接続し、素手で試料交換できるようにしている。上部中央部に見える銀色のものは断熱材。右側の写真で中央部に 2 カ所ネジが出ているがこれを使って上部との位置合わせをしている（そのため上部は別の場所で板のネジ止めをしている）。

に紹介するホットステージは 4 回回転対称の作りになっている。また、試料を押さえる銅板の大きさも大きく、より大きなセルにも対応している。その代償として、マイクロセラミックヒーターを 8 枚使用しており、また工作の難易度も高くなっている。さすがにやり過ぎ感があり、簡易版を設計することとした。

9.3 ヒーターが多すぎるホットステージ

上記の両面加熱タイプと同様に、外側のシェルにヒーターがあり、試料は内側の空間で銅板に挟まれて保持されているタイプのホットステージ (図 15)。全体を 4 回対象の形として、セルの四方にヒーターを配置している*²⁸。前のホットステージと同様に、試料は 2 枚の銅板で押さえるのだけれども、銅板は一枚は M2 ネジで固定されているが、もう一方は、ネジは固定されておらず、外側シェルとの間にバネが入っており、液晶セルを押さえつけるようになっている。

*²⁸ これを作った当時はヒーターの単価は 4000 円だったので 8 本使っても、まあ、許容範囲かなと思ったのだけれども、現在の単価を考えると、ちょっと作る気がしないものとなっている。



図 15: 両面加熱型ホットステージ。全体の対称性を高くするためヒーターを片面 4 枚、合計 8 枚使っている。

9.4 円筒型高安定ホットステージ

磯部氏設計によるホットステージで、顕微鏡観察ではなく、レーザー光を使った複屈折測定用に設計されたものである。東工大の江間研（当時）の方々にアドバイスを頂いており、使用したヒーターなども江間研御用達のものである。

本体はアルミ合金製で 3 重構造となっている。真中のシェルの外側に細長いポリイミドヒーターが巻いてある。真中のシェルに、温度制御用測温体があり、内側のセルに試料温度モニター用の測温体がある。外界の環境変化を外側のシェルで緩和し、内側への影響を抑えている。また、ヒーターを真中のシェルにつけることにより、内側のセルの揺らぎを避ける構造となっている。

9.5 ラバーヒーターを用いたホットステージ

ラバーヒーターを使っており、少なくとも上面は特注の穴あきタイプを用いている。外側のケースはベークライトの削り出しで、その中に、銅製のヒーターブロックが入っている。両面加熱タイプだけれども、下側ブロックと上側ブロックは非対称構造であり、上下の温度の均一性が大丈夫なのか、不安な点はある。

ベークライトは熱硬化型高分子で 200 °C 程度の耐熱性があり、また切削加工できるので、ホットステージの外周用には手頃な材料ではある。手作りの木枠よりは、遙かに見栄えのよいものができあがるだろうと思う。

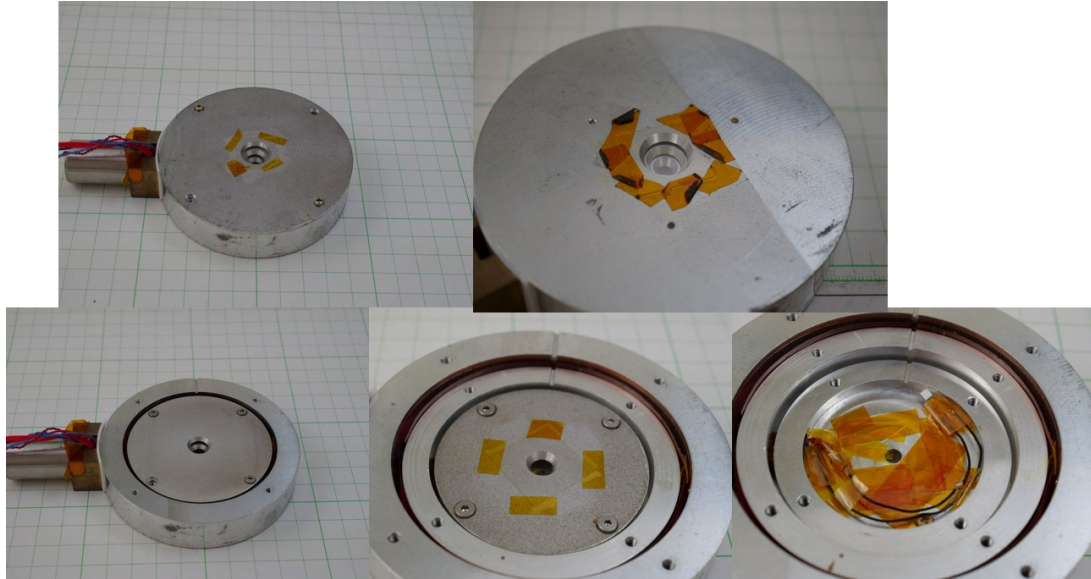


図 16: 3 重構造のホットステージ。

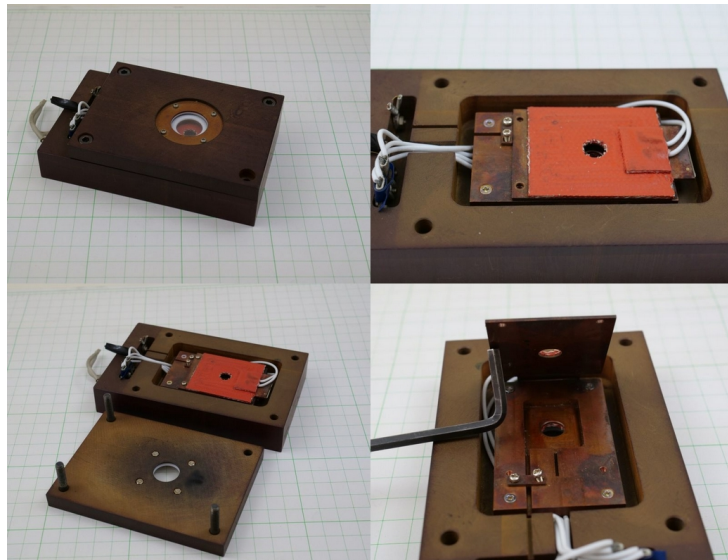


図 17: ラバーヒーターを使ったホットステージ。

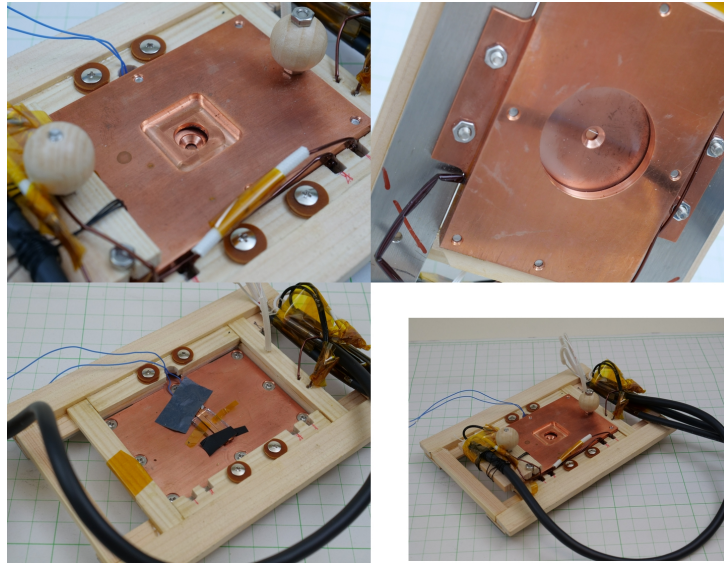


図 18: 倒立顕微鏡用のホットステージ。

9.6 倒立顕微鏡用ホットステージ

倒立顕微鏡に組合わせて、作動距離が 3mm 程度の液晶観察用補正環付きの対物レンズで観察可能な設計になっている (図 18)。そのため、下側に対物レンズが差し込めるような大きな穴があいている。当然、対物レンズは周囲からの輻射熱にさらされることになる。対物レンズが熱破損しないかは確かめていない。

上側も下側と同じ作りではあるが、対物レンズを入れる必要がないので、穴サイズは小さくなっている。両面加熱タイプではあるけれども、ステージ本体にはヒンジがなく、そのままでは上下の位置合わせもできない。周囲を木製の枠で囲んで、枠内に上側を落とし込んで位置合わせをするようにしている。上下の平行を合わせる機構もなく、必要な場合は、セル厚と同程度の板を周囲に挟むことで対応する作りになっている。

9.7 レーザー測定用斜入射対応ホットステージ

非線形分光測定などではセルに対して斜入射での測定が必要となる場合がある。図 19 は、そのような要請に応えられるホットステージで円筒の部材でセルを保持している。顕微鏡での観察には不向きな作りであるが、レーザーのように直進性のよい光なら問題なく、測定が可能である。

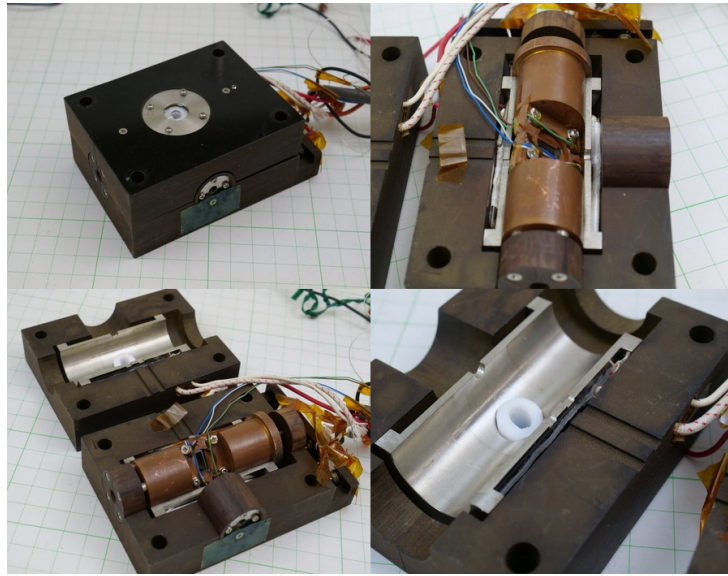


図 19: 斜入射対応ホットステージ。

10 Excel VBA プログラム

温調との制御を行う VBA プログラムの基本的な部分を紹介する。メーカーや機種によりコマンドが異なることがあるが、プログラムの基本的な構成は同じである。

プログラムの詳細を説明する前に、コンピュータから温調の制御をする上で重要な注意事項の紹介を行う。温調の設定温度は 0.1 °C または、0.01 °C 刻みである。ある温度から一定の温度勾配で昇温、降温する時には、コンピュータ側から同じ時間刻みで温調の設定温度を変化していく。通常は温調の設定温度の最小値での変化を繰り返す。温調が 0.01 °C 刻みの場合には、10 °C の温度幅で昇温、降温するのに、温調の温度設定を 1000 回書き換えることとなる。通常の温調では、電源を遮断して再投入した時にも、その前に設定してあった温度となるように設定温度は不揮発性メモリーに書き込まれる。この不揮発性メモリーの書き換え回数には上限があり、メーカーにもよるが 10 万回程度である。つまり、10 °C の温度変化を 100 回やると不揮発性メモリーへの書き込みができなくなってしまい、機器として使えなくなってしまう。それを避けるために、温調では、温度変化情報を不揮発性メモリーに書き込まないようにするコマンドが用意されているので、コンピュータから温調を制御する場合には、必ず、不揮発性メモリーに書き込まないモードにした上で運用する必要がある。その方法の詳細は温調のマニュアルを熟読されたい。

10.1 初期設定

まず最初に通信条件を設定する。RS232C や RS485 では通信速度や文末の符号等を手動で設定する必要がある。本体側の設定を確認して本体側とコンピュータ側の設定値が一致するようにする。

10.1.1 通信速度

1 秒間に何ビット送信するかの設定。装置とコンピュータで通信速度が異なると通信が成立しない。今回のプログラムでは 9600bps (ビット/秒) に設定している。

10.1.2 通信ユニット番号

本体識別のための番号。コンピュータからの通信が、どの機器に対するものかを示す。1 台しか接続していない場合でも、仕様上必要なので設定している。

10.1.3 通信データ長

一文字の信号を送信するのに、7 ビット使うか 8 ビット使うかの設定。数値とアルファベットだけだと 7 ビットですむけれども、8 ビットにしておいた方が楽な気がするので 8 にしている。

10.1.4 通信ストップビット

通信文の最後につけて、通信がそこで終了することを示す文字列の指定。1 か 2 が選択できる。

10.1.5 通信パリティ

通信が正しく到達したかを確認するためにデータの最後に付与できるもの。パリティビットをつけると通信の信頼性は高まるが、データからパリティビットの値を計算する必要が生じるため、例として示したプログラムではパリティビットはつけない設定にしている*29。

*29 本体ではパリティなしだけれども、オムロンの機種では内部でパリティチェックが必要で、結局手間がかかる。

10.1.6 送信待ち時間

コンピュータからの信号を受け取った後に、コンピュータへの信号を送信するまでの待ち時間。コンピュータが受信可能になるまえに信号を送るとコンピュータが受け取れないので、受信エラーが生じる場合は値を変えてもよいかもしれない。この項目は温調側のみにある。

10.1.7 リターンキー

文章の終わりのコード。オムロンの温調側には設定はないみたいだけれど、コンピュータ側には設定があり、Cr に設定している。

10.2 送信信号の形式

10.2.1 オムロン

オムロンの温調の信号は次のような形式になっている。

[先頭コード (STX)][機器番号][サブアドレス][サービス ID][通信文][終了コード (ETX)][エラーチェック (BCC)]

先頭コードは 16 進数表記で 02H、文字記号で STX と表記される。終了コードは 16 進で 03H、文字表記で ETX である。最後のエラーチェック (BCC) は通信文が正しく送られたかを確認するためのもので、計算して決定する必要がある。

機器番号は機器に設定した番号で 00~99 の数値かすべての機器に送信する場合は XX とする。今回は機器番号は 1 番としたので、01 とする。サブアドレスとサービス ID は [00] および [0] に指定されている。

通信文はさらに [メインリクエストコード (MRC)][サブリクエストコード (SRC)][データ] という構成になっている。本体の設定温度や現在温度を読み込みたい時は、変数エリア読み出し命令を使い対応する MRC と SRC のコードは [01][01]、新たな設定温度を書き込む時は変数エリア書き込みなら [01][01] である。本体の動作の変更は [30][05] である。

設定温度 (目標値) 読み出しをしたい場合は、マニュアルによれば変数種別が [C1] でアドレスが [0003] なので [C10003] となる。現在温度の読み込みなら [C00000] である。この後に、[ビット位置] と [読み込み要素数] が必要である。ビット位置は [00] 固定で、要素数は [0001] で作動している。通信文は設定温度読み込みでは [0101C10003000001]、現在温度読み込みでは、[0101C00000000001] となる。

ここまでで STX から ETX までは定まり、設定温度読み出しでは [STX] [01][00][0]

[0101C10003000001] [ETX][BCC] となる。ここから BCC を計算で求めることになる。BCC はノード番号 ([01]) から ETX までの個々の文字の ASCII コードの論理排他和で、VBA の「Xor」演算子で評価できる。現在温度や設定温度の読み込みでは文字列は不変なので、一度計算してその値を用いればよいが、設定温度を書き込む場合は、文字列が変化するので都度計算する必要がある。

10.2.2 横河および理化電子

送信命令はメーカー毎に異なっており、それぞれのメーカーのマニュアルに従って記述する必要がある。手元にある横河と理化電子工業について、設定温度読み込みと現在温度読み込みの送信内容を示す。いずれのメーカーも BCC がなく、オムロンに比較すると命令は単純である。

横河の設定温度読み込みコマンドは [STX][01010WRDD0003,01] [ETX][Cr]、現在温度読み込みは [STX][01010WRDD0002,01] [ETX][Cr] である。最後の Cr はリターンで 0DH である*³⁰。

理化電子の設定温度読み込みは [EOT][00MS][EQN]、現在温度読み込みは [EOT][00M1][EQN] である*³¹。

10.3 受信データの処理

いずれのメーカーも文字列データとして現在温度や設定温度を戻してくるので、それを数値データに変換する必要がある。また、戻してきたデータのすべてが温度情報ではないため、必要な部分を抜き出す必要がある。具体的には以下のようなコマンドとなる。

```
Val(" &H " & (Mid(aa, 20, 4))) / 100
```

aa が戻ってきたデータで、Mid コマンドで aa の指定した位置から指定した長さだけ切り出す。切り出したものは 16 進数表記なので、&H を先頭につけ、Val を使って数値データにする。この数値データは少数点を含まない形式なので、100 で割って、少数点を含む実温度データとしている*³²。横河も理化電子も同様の処理でデータを数値の温度データに変換できる。*³³。

*³⁰ UT100 シリーズの温調 (UT150) で動作している。他の機種では動作未確認。

*³¹ 理化電子の HA900 で動作確認している。他の機種では動作未確認。

*³² 最小温度が 0.1 °C 刻みなら、100 ではなく 10 になる。

*³³ 横河は 16 進表記でデータが戻る。理化電子は 10 進表記の数値を文字列として戻すので、文字列を数値に直すコマンドを使う。

10.4 プログラム例

Option Explicit

Public STX As String

Public ETX As String

’ 制御文字を定数設定をしたかったが chr() が使えず断念して変数として設定。

Public Rdata As Variant ’ 通信データ読み込み

Public TTemp As Double ’ 変更前設定温度

Public STemp As Double ’ 変更後設定温度

Public CTemp As Double ’ 現在温度

Sub Initeialize()

’ USB-COM 変換アダプタの Com 番号をデバイスマネージャーで確認する。

セル B1(=(2,1)) に記入した Com 番号ポートに接続する。

Com ポート番号指定コマンド = Cells(1, 2)

’ 「Com ポート番号指定コマンド」の部分は実際には、Com ポートを使った通信を行うソフトの実際のコマンド名が入る。Vector で見つけたシェアウェアを使っているが、規約上、コマンド名が分かる形での公表ができないので、このような表記となっている。以下、コマンドがつく部分は同様。

’ 以下 Com ポートの設定

接続設定コマンド = "9600,n,8,1"

区切り文字設定コマンド = "CR"

タイムアウト設定コマンド = 500

’ 制御文字変数への代入。

STX = Chr(2)

ETX = Chr(3)

’ 現在温度と設定温度の読み込みとフォームへの書き込み。

Call ReadST

Call ReadCT

’ フォームの名称は「ST」、現在温度は SetT、現在温度は CurT

```
ST.SetT.Value = STemp
ST.CurT.Value = CTemp
```

、温調の温度設定時に、不揮発メモリーには書き込まない設定にする。不揮発メモリーは書き込み回数に制限があり、いちいち不揮発メモリーに書き込んでしまうと、書き込み回数を超えると、コントローラがそれ以上使えなくなる。それを防ぐために不揮発メモリーに書き込まない設定とする。

```
Call SetRamMode
```

、準備が終わったのでフォームを表示する。

```
ST.Show
```

```
End Sub
```

、ここまでで初期化は終了してフォームが表示される。

```
Public Sub SetRamMode()
```

、本体の温度設定値を不揮発メモリーには書き込まない設定にするサブルーチン。コマンド部分が分かるように書いている。

```
書き出しコマンド = STX & "0100030050401" & ETX & Chr(49)
```

```
Rdata = 読み込みコマンド
```

```
End Sub
```

```
Public Sub ReadST()
```

、設定温度の読み込みサブルーチン

```
書き出しコマンド = STX & "010000101C10003000001" & ETX & Chr(66)
```

```
Rdata = 読み込みコマンド
```

```
STemp = Val("&H" & (Mid(Rdata, 20, 4))) / 100
```

```
End Sub
```

```
Public Sub ReadCT()
```

、現在温度の読み込みサブルーチン

```

書き出しコマンド = STX & "010000101C000000000001" & ETX & Chr(64)
Rdata = 読み込みコマンド
CTemp = Val("&H" & (Mid(Rdata, 20, 4))) / 100
End Sub

Public Sub SetTemp()
    ' 温度設定のサブルーチン
    Dim STempInt As Integer
    Dim STempHex As String
    Dim XORB As Integer
    Dim icount As Integer

    ' 温度の値の前までの論理排他和を計算して XORB に代入している。
    XORB = 66

    ' 入力温度範囲は 0~200 °C。それ以上の場合は注意を出して設定温度は変更しない。低温の場合はしらっと 0 °C に設定する。マイナス温度は扱いが別になるので避けている。
    If STemp > 200 Then
        MsgBox ("最大入力温度は 200 °C")
        STemp = ST.SetT.Value
        Exit Sub
    ElseIf STemp < 0 Then
        STemp = 0
        STempHex = "0000"
    Else
        STempInt = (STemp + 0.001) * 100
        ' 温度を 100 倍して整数値にする。0.001 加算しているのは何らかの切り捨てが生じるのを防ぐため。
        STempHex = Hex(STempInt)
        ' 整数値を 16 進数値に直している。送るべき桁数が決まっているので以下の Select 文で桁数に応じて 0 を付け足す
        Select Case Len(STempHex)
            Case 1

```



```

        STempHex = "000" & STempHex
    Case 2
        STempHex = "00" & STempHex
    Case 3
        STempHex = "0" & STempHex
End Select
End If
' 送信の最後煮付ける排他論理和の計算。XORB の初期値 66 は温度部分（と最後の ETX）
以外の排他論理和の計算結果で、あとは温度部分のみの計算でよい
For icount = 1 To 4
    XORB = XORB Xor Asc(Mid(STempHex, icount, 1))
Next icount
' 排他論理和の ETX 部分の計算。ここだけ別にする必要があるのか不明。
XORB = XORB Xor 3
書き出しコマンド = STX & "010000102C100030000010000" & STempHex & ETX & Chr(XORB)
    Rdata = 読み込みコマンド

End Sub

```

フォーム部分

```

Private Sub TSet_Click()
    STemp = ST.NSetT.Value
    Call SetTemp
    Call ReadCT
    ST.SetT.Value = STemp
    ST.CurT.Value = CTemp
End Sub

```