

CNCは顕微鏡手芸に使えるか(穴掘り編)

大塚 康二

●Aliさんから購入したのはコレ

安くなりました(しかも最近ではYahoo経由で購入すると3%のポイントもついてくるのです)。ルータ機能に1Wレーザー(ドライフィルム露光に最適な405nm)まで付いて2万円以下です。問題は高密度プリント基板に導入できるか?です。使い方は①ルータで0.15φ~0.20φのスルーホールを開口し、②レーザーでパターン露光を行う。この2点だけです。

CNC 3018 PRO



CNC 3018 PRO Laser Engraver Wood CNC Router Machine GRBL ER11 Hobby DIY Engraving Machine for Wood PCB PVC Mini CNC3018 Engraver

★★★★★ 4.8 ∨ 249 Reviews 541 orders

¥ 19,341 ~~¥ 38,681~~ -50%

Ships From: China

China

Russian Federation

Color: Add 1000mw laser



Quantity:

- 1 + 275 pieces available

Free Shipping

to Japan via DHL ∨

Estimated Delivery: 8-16 days ⓘ



10xCutters

4xPlates

1000mw Laser

goggle

Er11



Buy Now

Add to Cart

♥ 4544



●動作はOKだが・・・

組立に2時間、動かすパソコンは4年前に引退したXPだ。1時間充電して電源が入る様になるが、プラグを抜くと即落ちる。今度は添付のCD (Grblcontrol) が読めない。常用のWin10で簡単に読めたので、USBメモリに入れてXPにインストール。添付のCNCコントローラはCandle。添付のデモサンプル(Gコード)を実行したらドリル未装着だが動いた。結構スピンドルはうるさい。一応XYZ位置やスピンドルの回転数などをCandle上でテストできる。位置調整は目視でしかできないので、原点を決めたら一気に通貫で数値加工するしかないのです。

半日かけて友人宅のブラザーCNC(トンクラスの本格的マシン)のソフトを拝借しようとやってみたが、エラーばかりで動作不良だ。使用しているGコード発生はNCVC(フリーソフト)を使用してるのだから、ブラザーのパッチ(購入品)を当てており、これ一本で作図してGコードを発生させるという驚くべき方式を取っていた。これが作るGコードでは全く動かないのだ。

そもそも本格的CNCは高級すぎる。ドリルの種類も何十本も装着してあるし、回転数も1万回転、切削油の吹き出し量・・・制御ステップも1 μ m単位と何もかも専用で意味不明Gコードの羅列だから動くはずない。

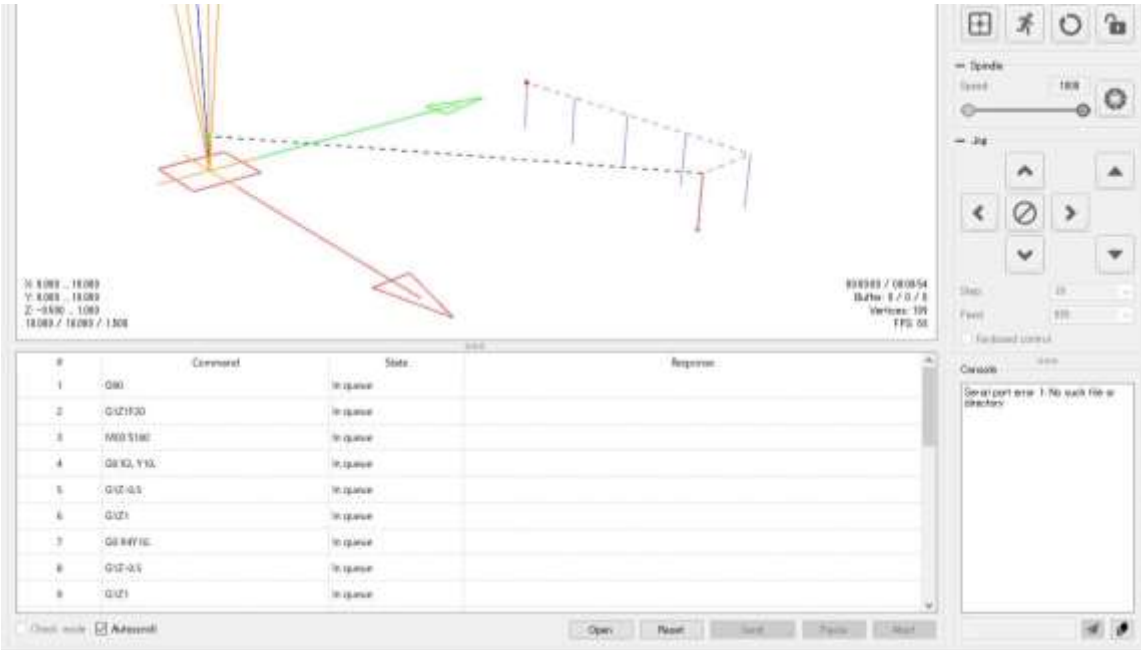
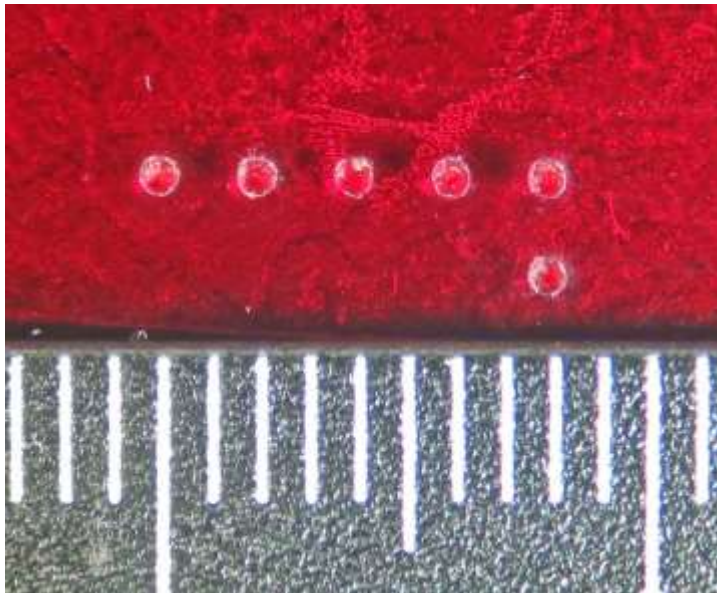
購入品のオモチャは最大回転数1000rpm(音からするともっと高い回転数だと思われる←未測定)、10 μ mステップ、鈍い。Z軸の刃の接触センサや自動原点調整なし、刃の切換なし・・・の何もない。このCNCに装着できるスピンドルで12,000回転以上のものが販売(¥12,000～)されてはいるが本CNC価格と同等と高額だ(というかCNCマシンの方が安すぎ)。

●とにかく切削を試みる

というわけでGコードになっている添付サンプルを使ってCNCの方は原点指定をマニュアルでしておいて、走らせてみたのが右の写真だ(ワークは3tの亚克力板)。このGコードを見ると、簡単な表現なので解読がすぐにできた。およそ理解できたので8x2mmの範囲に0.5tの深さの穴を開けるGコードプログラムをコントローラ上で組んでみた。XPのパソコンは作業台でCNCの横位置なので長時間キー入力は疲れる。同じコントローラを常用のWin10で展開して楽な姿勢でやることにした。直接は動かせないがこの方がタイプミスも少なくやりやすい。

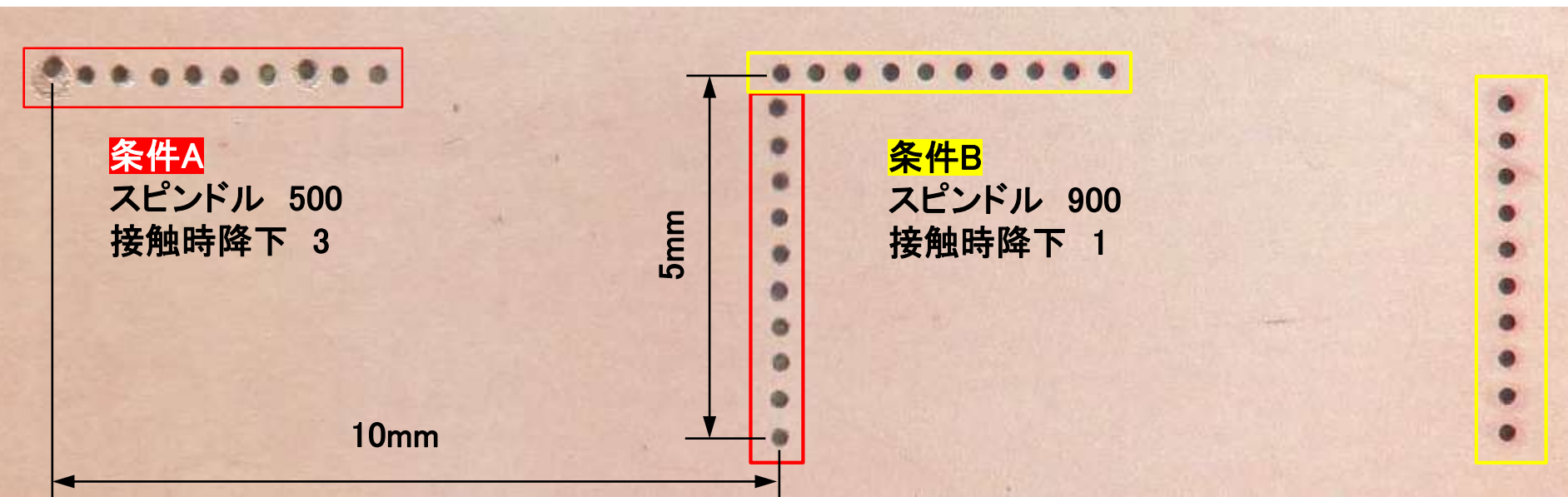
同じコントローラソフトをWin10で展開すると、Gコードのコマンドを入れる度にその軌跡がちゃんと表示されるのでびっくり！それが下図だ。XPだと上半分が何かチラチラしてよくわからない空白だったところに3次元図が出てきて加工の様子が表示されるではないか！しかも視点を変えてGコードの実行の様子(位置情報だけ)が立体的に確認できる(次頁参照)。簡単なプログラムであれば(作図は無理だが)、コントローラ上で組めてしまうのです。このプログラムを使って切削したのが次ページの写真です。





●安ドリル装着の安物CNCでも使える！

0.8t両面基板に0.2φの安物ドリル(10本, ¥141)で穴あけを試してみた。A条件とB条件で縦列と横列0.5mmピッチで10個ずつ穴あけしたのを下図に示します。プログラム内ではバックラッシュの確認も含まれているがまるで問題がなかった。問題となったのはセンタリングの無い基板面にドリルが接する時、先端がブれてズレた位置に穴が開くことだった。





条件A

スピンドル回転指示 500
接触時降下速度 3

すべり痕



条件B

スピンドル回転指示 900
接触時降下速度 1

●このドリル刃でもいける！

下降速度を落とせばよりブレが少なくなるはずですが、そこで**条件B**のスピンドル900(1000だと特に音が大きくなる)、接触時降下速度1(さらに落せます)でやったのです。もはや穴の周辺のバリが全くありません。ドリルの先端が触れた時は小さくぶれているのですが、穴を開けた後にはわからない状態です。

位置精度については全く触れなかったのですが、私がやるよりはるかにマシです。というかセンター窪みを付けていないと手動穴開けは滑ってしまい無理です。

というわけで目指している**次のステップの穴あけ精度はCNC優勢**です。



当初はスピンドル回転を1000でGコード命令で下降速度を10前後で行っていた。その時の基板接触時に表面で食いついてくれなくて200 μ m(ドリルの直径)程度の振れが起きてから掘り始める状態からぬけだせなかったのです。

アスペクト比が20以上のドリルですからしなっただまま(位置ずれで)穴あけをしていますが。ここはアスペクト比が5以下のお高い専用ドリル使用でなければ使えないのか...とがっかりしました。

休憩兼食事をしていても、ドリルの刃が食いつく前に暴れてしまいすぐ折れる想定映像が頭から離れません。この状態ではドリルはすぐ疲労して折れるのは間違いありません。そこでZ下降速度を接触位置 $\pm 50\mu$ mを極端に遅くすることを思いつきました(これだったら加工時間にあまり影響がない)。Gコードステップは250にもなりました。

その**条件A**がスピンドル500(実際の回転数は未測定)で接触時の下降速度3です。ルーペで観察していてすごく改善しました。しかし、時には**赤矢印**で示した様に大きくブレてしまった痕が付いていますその他の穴もよく見ると穴周辺にバリが存在しています。やはり穴位置が決まる前に少しブレが出ているのが分かります。

●モニタ・カメラの装着

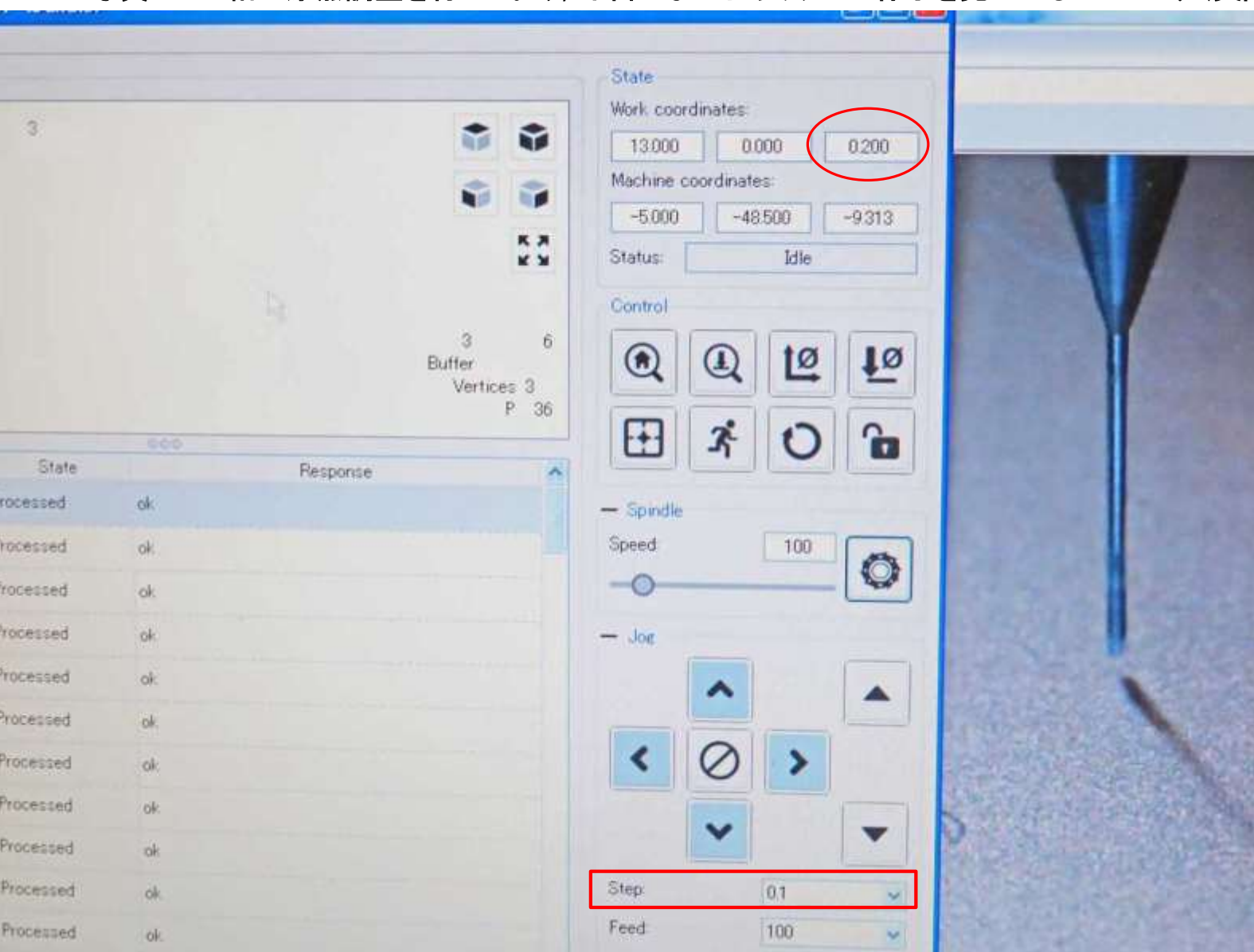
プリント基板に回転しているドリルが接触する時の導通検出を試みましたが、プリント基板での検出は困難でした。ルーペで覗きながらのZ=0.000をセットするのは危険なので、余っている顕微鏡カメラをZ軸に取り付けました。接続は1/4インチのネジとなっているので、6tのアルミ板に沢山の1/4インチネジ穴を付けた板1枚をモータクランプ側面に装着しただけです。この様子を下の写真に示します。カメラの取付によりドリルの刃が折れて飛んでくる時の危険を避けられます。



●パソコン画面上のドライバー画面の横に画像を表示

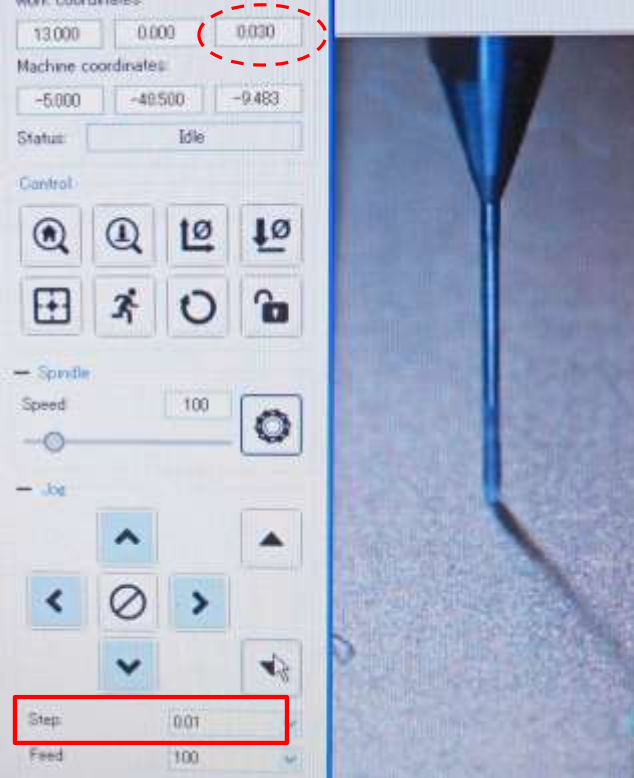
下の写真はパソコンの画面です。CNCドライバの表示画面(左)の横(右)にドリル先端に焦点を合わせておけば、Z軸のゼロ点調整、切削している様子を常に観察できます(特にドリルの刃が切削対象物に触れた時に先端が滑って泳いでしまう場合の確認などが楽にできます。一見順調の様ですが**これからいろいろなトラブルが続出**です)。

この写真ではZ軸の原点調整を行っており、下降しながらギャップの様子を見ているところです(実際は調整後なので、



基板上空0.2mmが分かります: 図中**赤丸**参照)。ドリルは0.2φなので影とのギャップがほぼ0.2mmなのが分かります。赤四角を見ると移動ステップが0.1mmのままではいきなり下降してトラブルになる可能性もあります(スピンドルは回転させていますので、通常はゼロ点が変わらず掘ってしまうだけ)。そこで、下降ステップを0.01mmに落す必要が有ります。

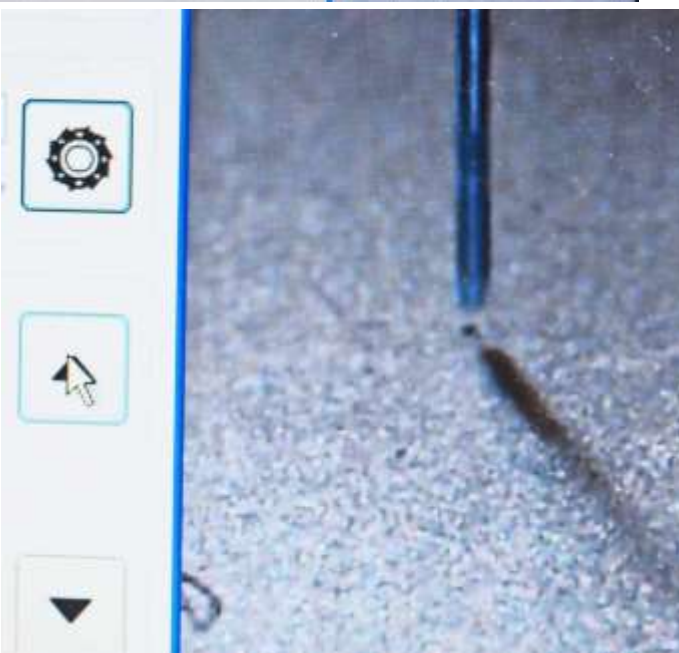
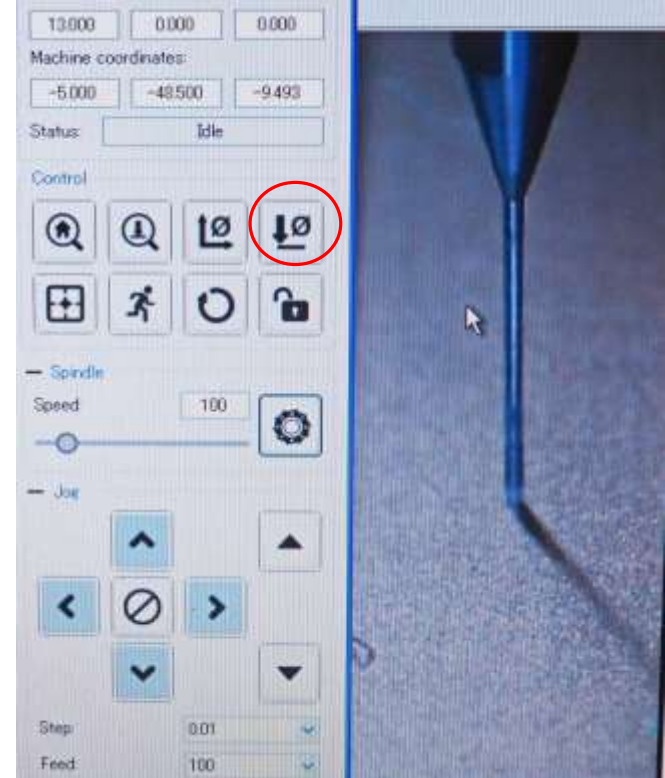
左の写真でドリルの刃が見えないのは回転しているためです。



左写真はステップを0.01mm(赤四角枠)に落としてから下降させている状態です。まだ切削粉は出ていないのでもう少しの様です(すでに調整済みなので0.03mm高い位置にあることが分かっています)

右写真はさらに3ステップ下降させたところでドリルの先が一瞬ぶれました(すぐにブレは止まる)僅かですが切削粉も出たようです。ここでZ軸ゼロ点調整のボタン(赤丸)をクリックすればセット完了です。

(本当はドリルチャックがへボなので、ドリルを単純に取り付けても偏芯が激しくて取付調整が大変なのです)



左写真は調整後にステップを0.2mm上昇させたところです。わずかにドリルが接触した痕が付いています。この段階で痕が付いていない事が分かれば再度下降しながら(0.01mmステップ)のゼロ点調整を行います。

これまでの説明でドリルの先端がブレる(泳いでしまう)のをすべりが良くて起こるとしていたが、切削用オイルを使用するとフィード・スピードを速くしても解消するので、本当はひっかかり(ドリルの先端のどこかでスティッキング)が起きているのではないかと思えてきます。ピンポイント条件探しでも数多くやると、ずっこけも出るので、乾式切削よりもオイル使用がどうやら正解の様です。オイル使用となるとプロセス変更が必要でまず全穴あけを行い、洗浄後、その穴をおもてでも裏でもホトマスクのアライメントマークとする方法に変更です。その際、プリンタ画像とCNCの寸法精度のマッチングが不可欠です。その他、安物CNCの扱いには多くのノウハウが必要ですが、紙面の都合、見っとも無さ等の理由でここでは省略します。

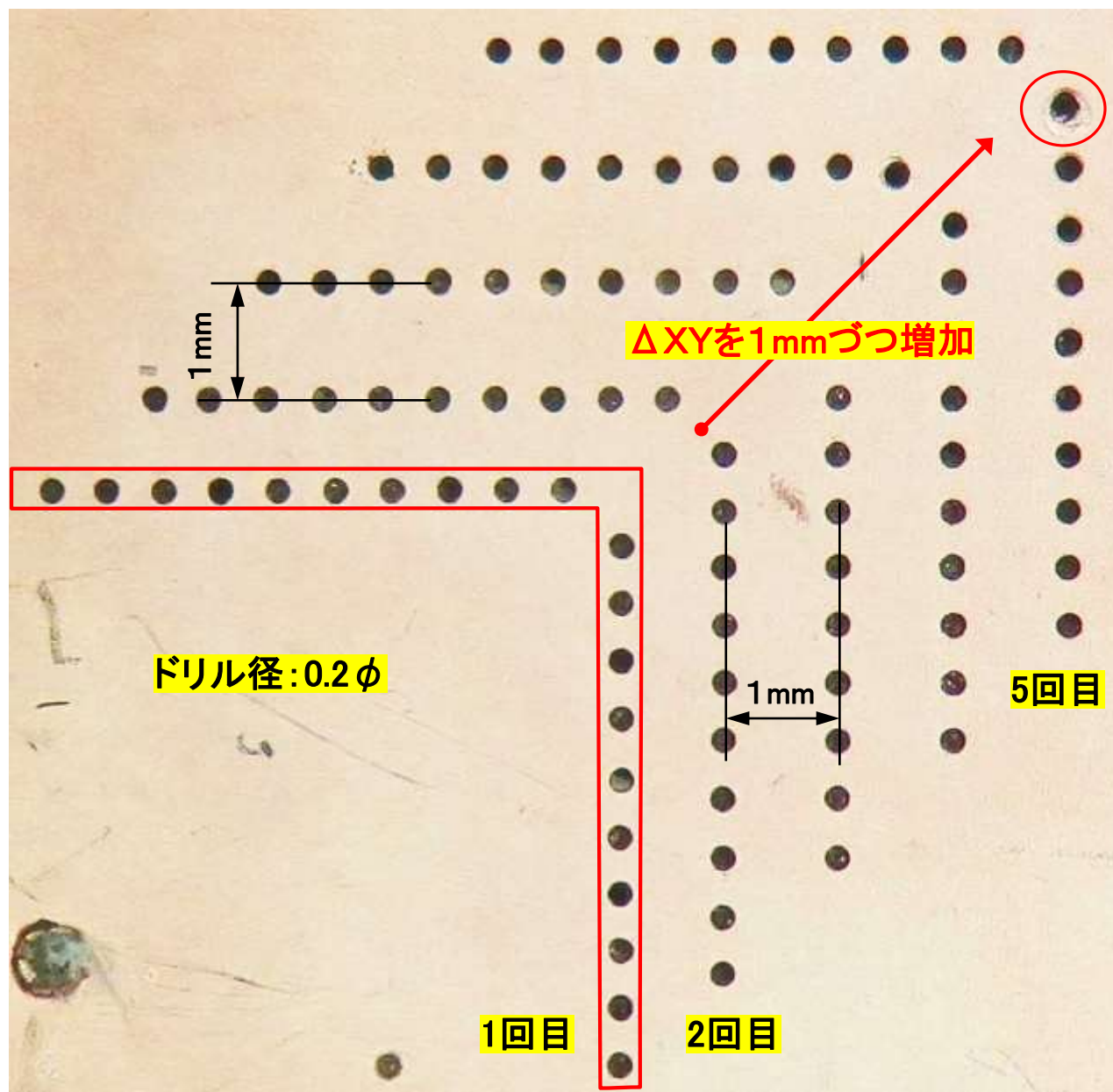
●穴あけ作業をすべてモニタだけで行う

右図はFR4 0.8tの両面基板に0.2φ貫通穴あけ(列内ステップ0.5mmピッチ)プログラムを5回繰り返してみた場合です。これらをゼロ点調整から切削を終えるまで、実物を見ないでモニタだけでやってみた結果です。赤枠が1回目です。終わるとXY原点をプラス1mmずつ右上にずらしています。

1回目と2回目の間に前ページのゼロ点調整の説明写真を撮るためにXY座標を移動しております。それを記録していなかったため、1回目から2回目の位置だけはおよそ1mmとなっています。

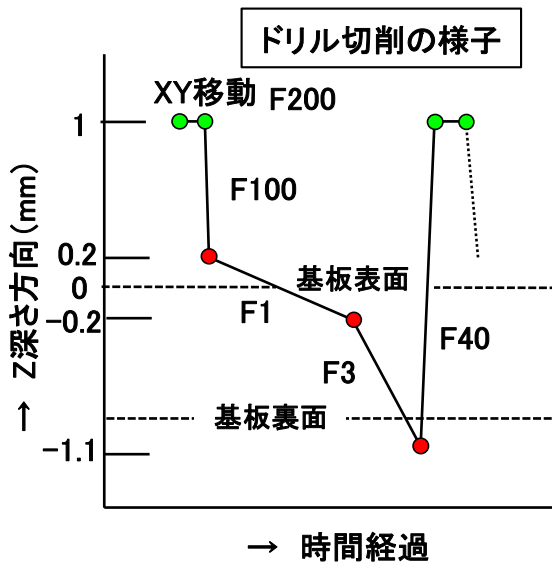
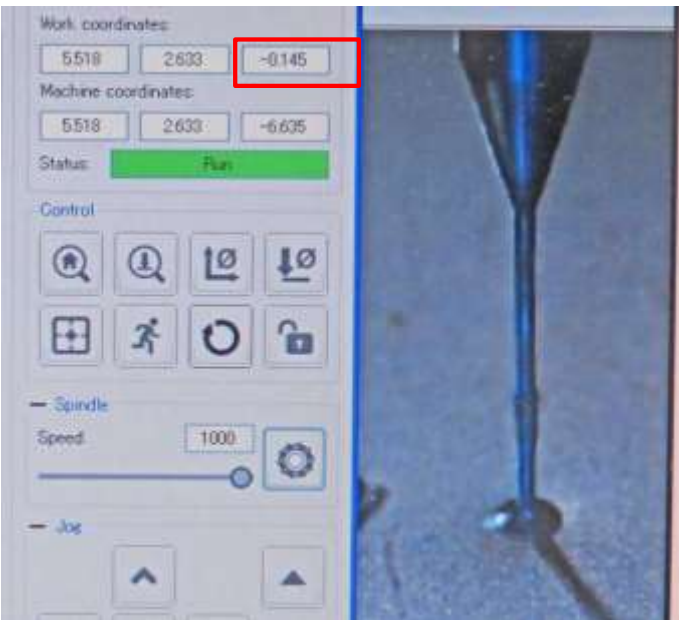
これらはゼロ点調整から切削を終えるまで、実物を見ないでパソコンのモニタだけでやってみた結果です。赤枠が1回目です。終わるとXY原点をプラス1mmずつ右上にずらしています。

これら100個の穴あけに対して3回目まではモニタを見ていたのですが、大丈夫そうなので、切削時の録画ビデオをみていましたので、**赤丸**だけ刃の接触時暴れ特有のパターンが出ていました。残念ながらその場観察が出来ていませんでした(ビデオに撮っておくのも手)。このブレが繰り返されるとドリルの刃の寿命が短くなります。参考までに1回の所要時間は9分14秒ですから、全部で50分となります。手作業といい勝負です。仮に2倍かかったとしてもCNCの方を選びたい心境です(**手作業には根性が必要**だからです)。

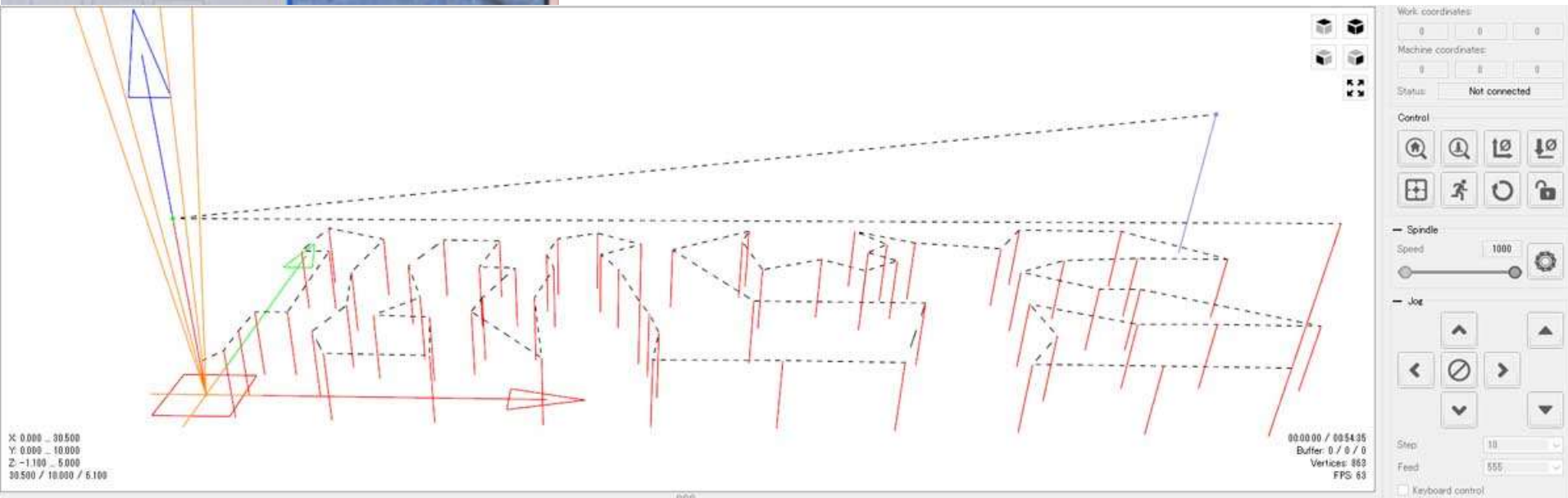


●CNCに切削油を使用して最新マスク用の貫通穴を開ける

下の写真はタッピング油を生両面基板0.8tに塗布してから切削している様子です。油を使用するとかなり広い条件範囲でドリルの先端が泳がないでピタッと止まったまま切削が始まります。写真では**赤枠の表示**で示す様に深さ0.145まで掘り進んだ状態です。掘り込みのプログラム(Gコード)は単純ではなくXY移動は1mmの高さで、速度F200です。各穴掘りの位置から下降するのですが、

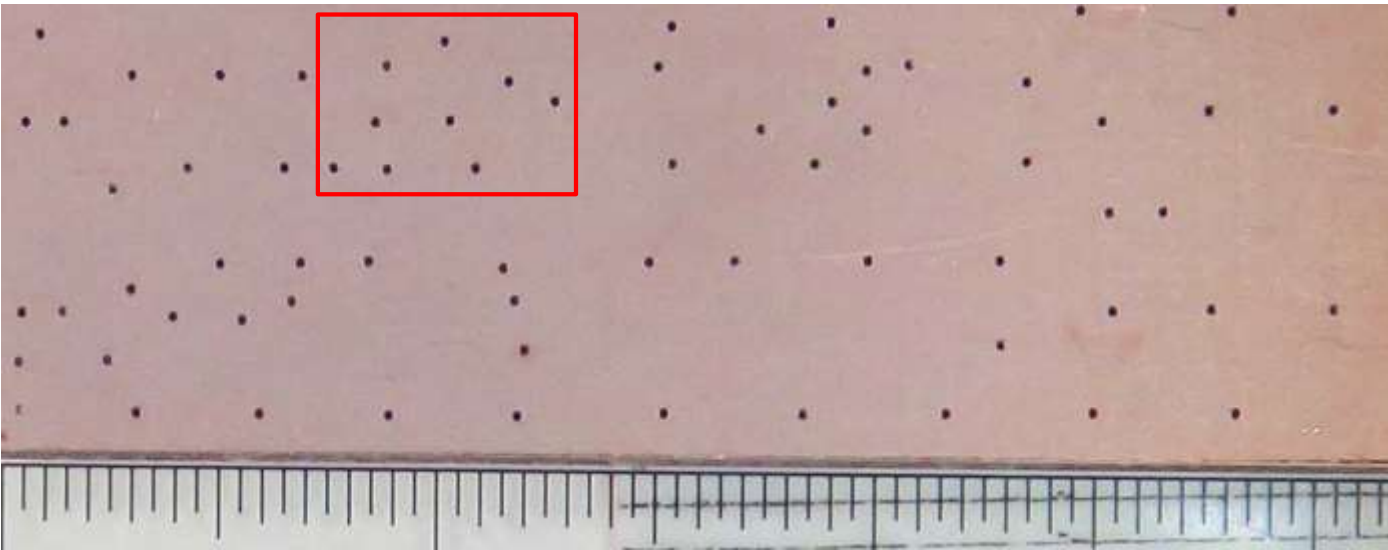


位置から下降するのですが、0.2mmまでF100、-0.2mmまでF1、-1.1mmまではF3、1mmまでの上昇はF40と速度を上げています。これは穴あけ上空0.2mm~-0.2mmの間は丁寧に切削するように配慮しています(左図参照)。下図はOCN添付ソフト(Candle)でプログラム全体の経路を3Dで鳥瞰したものです(まだ手入力で行っています)。この図を実際走らせるには350ステップを要しました。この小基板1枚、69の穴あけで38分15秒を要します。



●寸法が違う！

下図上が0.8t両面基板に穴あけした状態です。穴あけプログラムは細心の方法をとっているのに、時間がかかります。このまま6枚取りの母基板の414カ所の穴あけには休みなしでも4時間もかかる計算となります。手作業の方が早く6割で済む理由は、あらかじめセンターの窪みを素早く付けられ、ドリルの先端をその場所に落とし込めるので楽なのです。CNCでは窪み位置が数値上異なっていればドリルの刃の破損も頻繁になってしまいます。表の様子は見る限り刃先の暴れ(滑り?ひっかかり?)問題はなさそうです。この上にプリンターで製作した最新のホトマスク(2段アンプVer.3)を重ねたのが下図です。

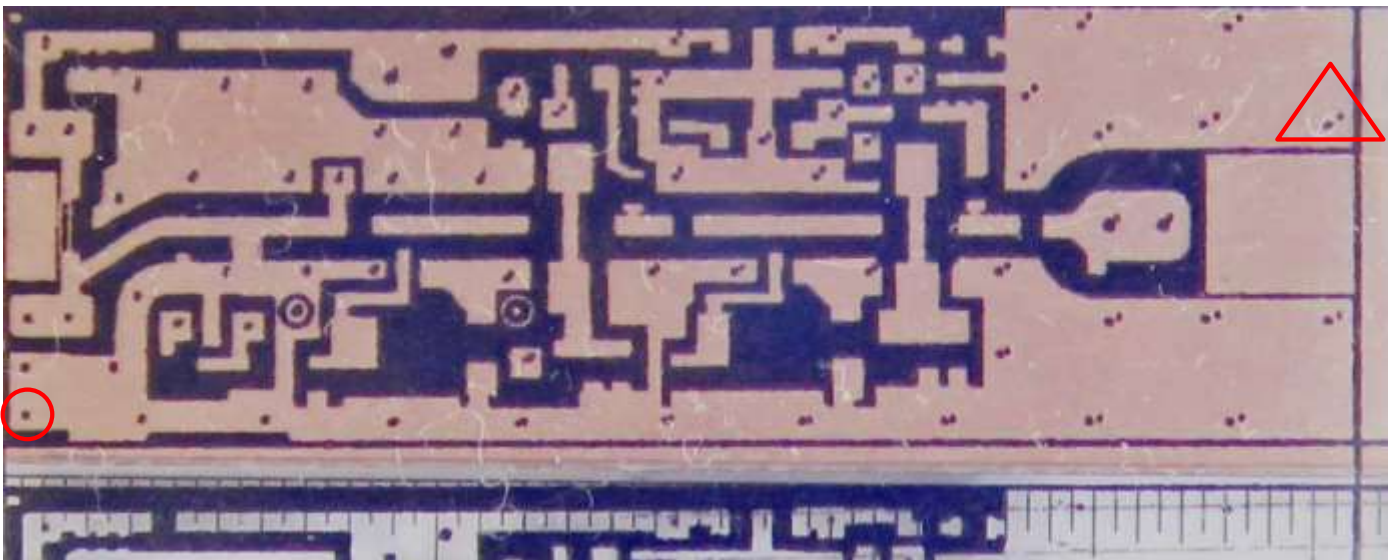


赤丸枠を合わせると、赤三角枠の35mm離れたところでなんと横方向で0.8mmも基板の方が大きいのです。マスクだけを基準にする場合は問題なかったのですが、別々の出力ですからどちらかにミスが発生しているはずです。

元の図面をチェックしてみました。プリンターは問題なしです、CNCの方が倍率が高い。

例えば上の図で右↑穴から左↑穴間の距離は29.85mmですがマスクの方は29.41と小さい。各要素のチェックにてプリンターの寸法は正確でした。つまりCNCが1.50%横サイズが大きいのです。本体にはロクな説明書もなく、補正はCAMの方でやるしかなさそうです。

(後でわかったことですが、この大きなずれは図面の縮小作業にミスがあったようです)



使用するCAMをまだ決めていません。穴あけでは同じ手続きのGコード4行を小基板用に69回もコピー&ペースト、母基板では414回なのでとても無理です。工程をサブルーチン化ができるCAMが必須です。当面の掘り込はGコード数値入力に補正をかけますが、CNCコントローラ上での作業は大変なので、将来的にはコントローラ上での数値修正なんてありません(CAMに早く移行しないと補正の煩雑な作業に忙殺されます)。

●裏の抜けが悪い問題

右図の上と中間はそれぞれ前のページの赤四角枠部分のおもて、裏の拡大写真です。表は手作業の場合よりも綺麗な穴が開きますが、裏は切り取れないバリが飛び出しています。手動ではレジストが裏に付いている状態での穴掘りですが、レジストを剥離した後での確認ではバリもなく非常に綺麗です。実は裏に木の台に貼り付けてのCNC穴形成でも同様な状態でした。

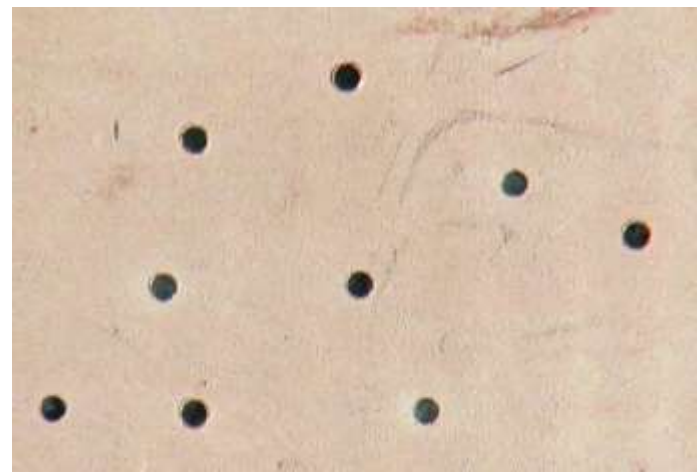
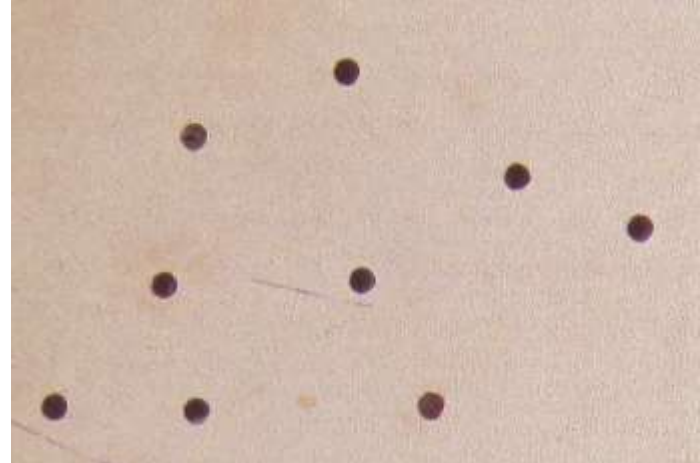
というわけで今回は1.5tの生基板を台(やとい)にしてUV樹脂で切削基板周辺で貼り付けていたのですが、切削途中で一部の剥がれがおきていましたので、このバリは本来のやといの機能が発揮できていない結果だった可能性もあるため、正確な寸法補正(定規上にてXY目いっぱいの振り幅で検定)後に再確認を行う予定。

余談だが下の写真はやといに使用した1.5tの生基板の様子です、やとい上では綺麗な穴が開いているのでワークの裏のバリは浮いていた可能性が高いと思われます。

●スピンドル軸の剛性問題

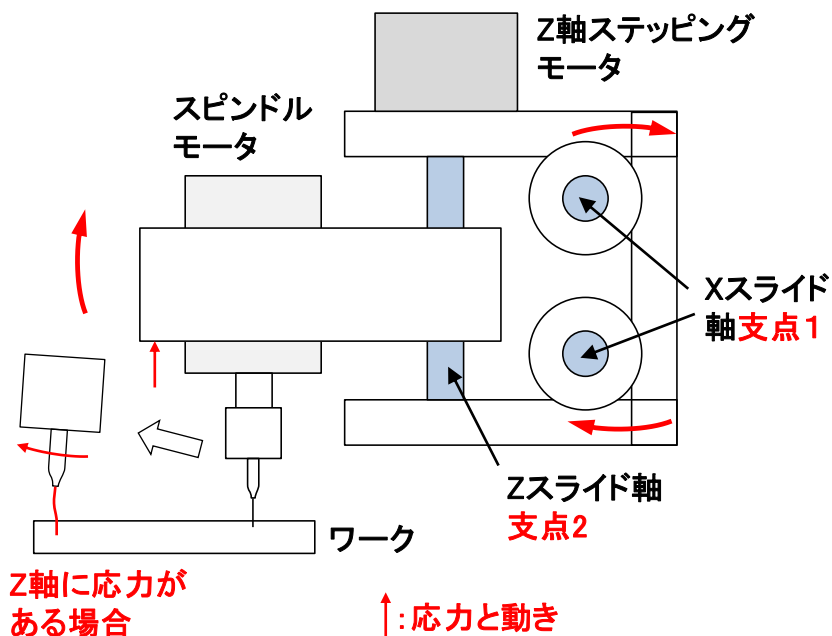
Z軸下降中の切削では下降速度を相当遅くしないとスピンドル軸のあごが上がってしまいドリルが湾曲しながら切削してしまう状態になっていることが拡大モニター画像のビデオで確認されました。

具体的には2ページ前の「ドリル切削の様子」のグラフで説明すると、 $Z=0.2$ ~ -0.2 の間はF1で全く問題なくドリルはまっすぐだが $Z=-0.2$ を過ぎるとF3に変わる。その時からスピンドル軸のあごが上がってしまいドリルが $100\mu\text{m}$ から $150\mu\text{m}$ ほど湾曲してしまう。基板を抜けるとまっすぐに治り、やといに穴を開ける段になると再びドリルの湾曲がはじまるのが確認できます。これは明らかに僅かでも負荷が増える時のZ軸のしゃくり上げが起こっているためです。



●スピンドル軸の剛性(あご上り)問題

切削中に湾曲がはじまるのが確認できます。これは明らかに僅かでも負荷が増える時のZ軸のしゃくり上げ(あご上り)が起こっているためです。その様子を下図に示します。



安価CNCのZ軸がしゃくり上がる機構

Z軸に力がかかると図中**支点1, 2**が一番弱い場所となります。特に**支点2**の剛性を高めることが重要です。Y方向(図では左右)の位置をずらしたスライド軸を加えたZスライド軸構造とするか、通常のスライダと同様Z軸は同軸保持(理想的ですが、それでは安価な商品にはなりませんから、無いものねだりと言いか本格的CNCになってしまいます。ここは切削時間がかかってもZ軸の下降時のF値を小さく(遅く)するしかないかもしれません。

一方、Gコード実行プロセスの確認とドリル軸のモニタ監視を同じパソコン画面上だけで行えるようになったのは大きな進歩でした(実際実物をチェックするのはワーク取付時の確認とリセットを行うときだけで、切削時はモニタ使用だけになっている)。

しかし、上述してきたように課題満載です。こんな状態ですからまだやればやるほど、課題が増えていきそうです。安価なCNCを精密なマシンとして利用するのは結構大変そうです。**実用化は早くて数か月後となりそうな気配**になってきました。

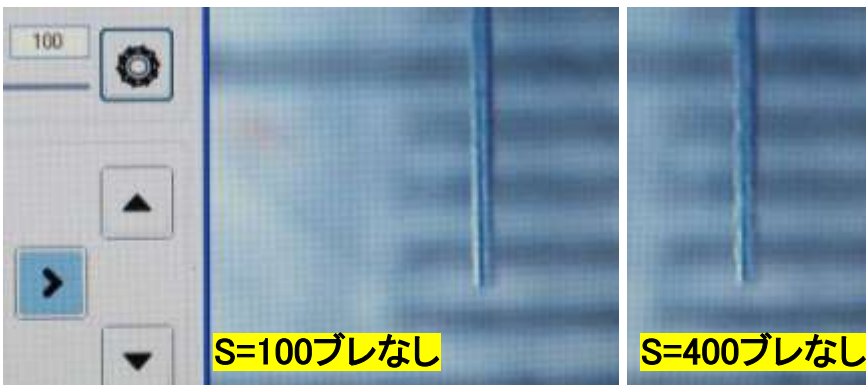
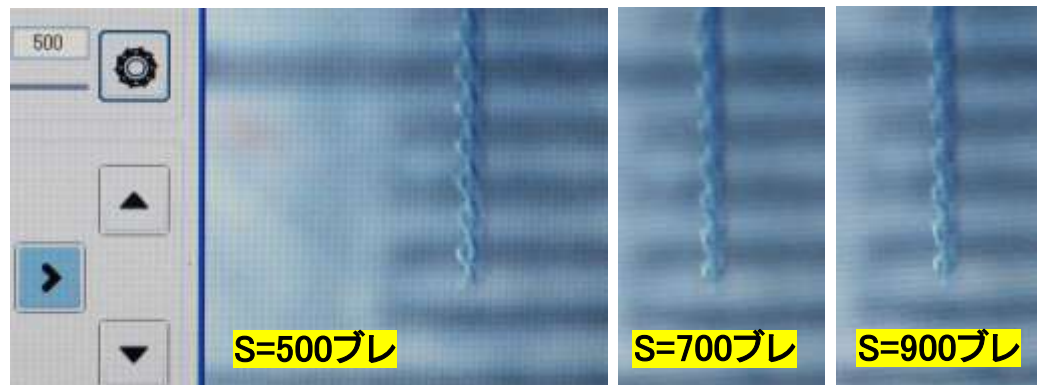
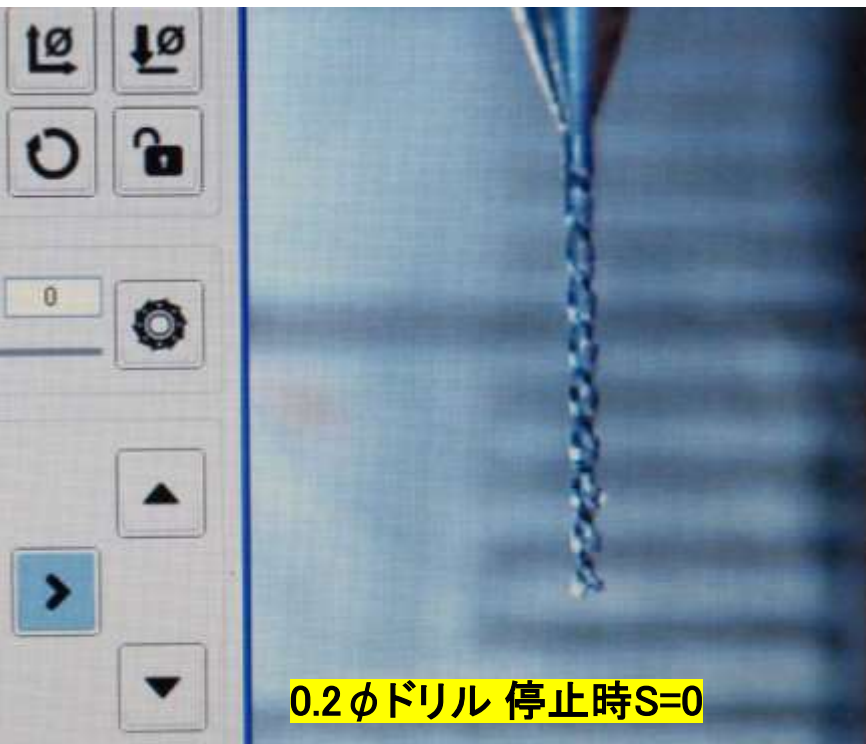
●寸法精度はCNCの方が正しかった！

先に、CNCのXY寸法精度がくそだと記述しました。確認のためJIS規格のメジャー(SUS製)で誤差を計測したところ200mmのスペンで最大誤差が-0.16mmでした。これは-0.08%となり、この誤差はメジャーなのかCNCなのかわからない領域です。**ホトマスクとの1.5%の食い違いは明らかにbrotherのプリンター側の誤差だと断定**できます。

そこでプリンターの方の誤差を紙に印刷して確認した。X軸(送り側)±0.1%、Y軸(レーザ・スキャン側)-0.33%と先の食い違いの1.5%の差は出てきませんが、やはり**プリンターの方が誤差が大きい**。どうやらホトマスクの透明PETの熱特性(プリント時に熱で伸びていて室温では縮んでいると考えるのが妥当と思われる。これまでは紙への印刷で結構精度が高いと認識していたがホトマスク製作に於いてはPETを使用しているので実際は**パターンが縮小している現実が盲点**だったようだ。PETが収縮していたとしても、これを原器として使っていたので問題が発生しなかっただけなのでしょう。

●もう一つのスピンドル問題(回転時の固有振動)

スピンドル用Z軸受けが華奢で、ドリル・チャックがへボなので偏芯の少ないドリル取付に時間がかかります。その上、回転数Sにより機械的バランスが取れていないので固有振動を起こします(車のタイヤみたいなものです)。回転数400まではドリルの振動は起きていませんが、500を超すと900まで僅かなブレとビビリ音が出ます。1000で少し音も小さくなりブレがピタッと止まります。切削は1000でやるしかありません。これは機械固有なのでどれでも同じではないと思います。



●裏のスルーホール開口がバリだらけ

やとい(生基板)を裏に貼り付けてバリの発生を抑えることが出来なかったのは、やといへの基板貼り付けが弱く浮いていた可能性があったからだと思いますが、これが解決しないと次には進めない。手作業で0.2φの穴あけをやっていてもこんなことは全くありませんでした。問題がなかった手作業の場合やといは使用しておらず粘着性の高いシリコン・ラバー(1t)の上にワークを載せていただけの簡単な方法でした。違うのは裏面にはドライフィルムが貼り付けてあった事、ドリルの回転が遅かったのと開口後のドリルの裏からのみ出し量が0.5~1mmと多かった(手動なのでどうしても抜け時の突き出しが多いのは否めない)事、そして回転数がCNCの数分の1程度と遅かったなどの相違要素が挙げられる。そしてCNCの方が高速回転のため発熱で裏面の発熱で銅が柔らかくなっている。などが考えられます。

解決方法として ①基板抜け誤の追加掘り込み量を0.5mm以上とする ②①の方法で裏に抜ける時の回転数を400に落とす ③ドライフィルムを裏に貼っておく(密着したやといの代わり) ④やとい基板をちゃんと密着させるの3点が考えられる。これらを順に実験で確かめることにする(油不使用は表の穴観察結果から、実験項目にはならない)。

実験①

最初に行う実験はやとい基板上、裏貼を両面テープ使用

- ①ab: 掘り込み量を-1.1と-1.3(a')で比較する
- ②c: 掘り込み量を-1.3で抜ける前後の降下速度をF1に落とす
- ②d: 掘り込み量を-1.3でF40で上げ下げを1回行う
- ②e: 掘り込み量を-1.3で抜ける前後(-0.7~-1.1)の回転数を300に落とす
- ①f: 掘り込み①dの条件プラスF40での上げ下げを1回行う

次に行う実験を基板の裏にドライフィルムを貼りの場合。その次にやといとワークを接着剤で密着させる場合をを予定する。手離れのよい順、①、②実験を進めるので良い結果が出た段階で実験を中止する。

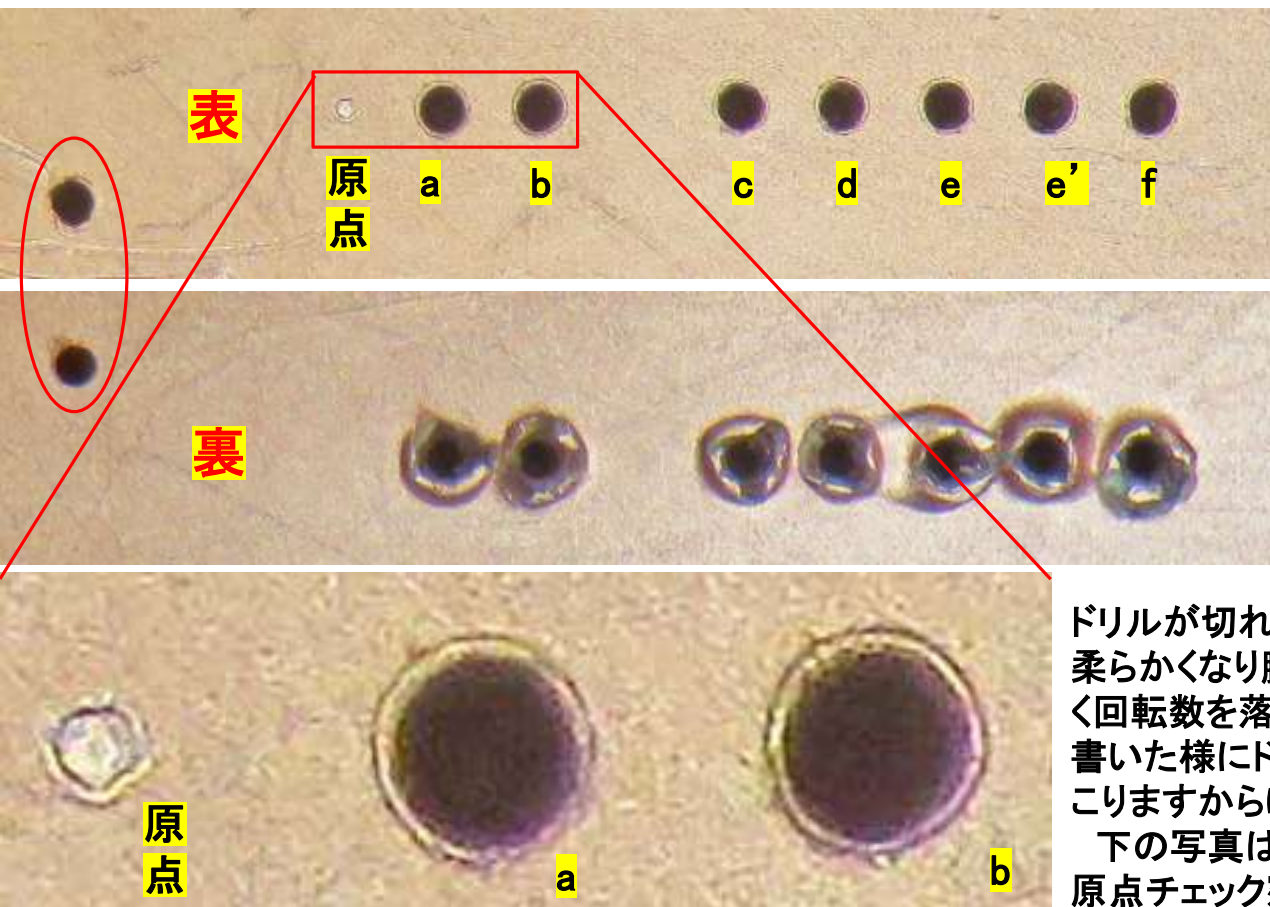
XYの位置決め部分を省き共通のGコード・プログラムは以下の様になる。

- ①a: G1 F200 Z0.2 G1 F1 Z-0.2 **G1 F3 Z-1.1** G1 F40 Z1.0 と **G1 F3 Z-1.3** の比較
- ①b: G1 F200 Z0.2 G1 F1 Z-0.2 G1 F3 Z-0.7 G1 F1 Z-1.1 G1 F1 Z-1.3 G1 F40 Z1.0
- ②c: G1 F200 Z0.2 G1 F1 Z-0.2 G1 F3 Z-1.3 G1 F40 Z-0.7 G1 Z-1.3 G1 Z1.0
- ②d: G1 F200 Z0.2 G1 F1 Z-0.2 G1 F3 Z-0.7 **M03 S300** G1 Z-1.1 M03 S1000 G1 Z-1.3 G1 F40 Z1.0
- ②e: G1 F200 Z0.2 G1 F1 Z-0.2 G1 F3 Z-0.7 **M03 S300** G1 Z-1.1 M03 S1000 G1 Z-1.3 G1 F40 Z-0.7
G1 Z-1.3 G1 Z1.0

※**M03 S300**のコマンドは回転数がビビりの領域を通過するので一旦基板上空に出してから行う

●実験①, ②の結果→穴掘り条件を変えてもダメ

前のページの6種類の実験結果は全て裏に大きなバリ(どちらかというとパンク)が出てしまった. それが下の写真だ. おもては許せたとしても裏はバリというより切れないドリルを高回転(熱)させながら裏の銅箔を膨らませながら突き破った感じにしか見えない. とにかく小細工は効かない状態だ.



左の上が表, 中段が裏の状態だ. それぞれの条件は**赤丸枠**が手動で開けた穴(ドリルは違う)で裏のバリがない状態. その右に1個の窪みと7個の穴があります. ここでは条件の違いを説明するのは無駄なのでダメな事と今後の取り組みについての展開としたい.

原点の窪みは20 μ mの掘り込みで, ドリルが上昇した時に僅かな窪みが見えれば続行OK, 穴であれば原点ミスとしてプログラム緊急停止用の確認に使用しています.

問題は中段の写真で分かる様に7個の穴の裏は全て銅箔パンクです. ドリルが切れないか, 高速回転の為, 発熱で銅箔が柔らかくなり膨れてパンクしたようなバリです(油をよく回転数を落とすことも必要そうです. 3ページ前にも書いた様にドリルにかかる力Z軸のしゃくり上げが起こりますからゆっくり(F1)下降の必要もありそうです.

下の写真は上の写真の**四角枠**を拡大した写真です. 原点チェック窪みの径が大きすぎる事, a, bの穴の

淵に土手が出来ていることからドリルの寿命かもしれません. しかし, 手作業では800穴は軽く持ちますが, このCNCに取り付けてからまだ120穴ぐらいしか使っていません(Z軸にスプリングが付いているタイプのCNCの方がよかったのかもしれない). とりあえずドリルの刃を交換してドライ・フィルム裏張りや密着したやとい基板を使用した実験に移行していくかありません. その前に油を多めに使用, 回転を落とし(S400), 下降速度を遅く(F1)してやといなしの穴あけ状況を確認しておくことも大事です(裏張りや, 強く密着差せたやといを作る工程が増えるのは好ましくない). この実験を始める前に不注意でドリルを折ってしまいましたが, プレ回転数はその前と同じく500~900の領域でした.

● やっと唯一の**良い条件が見つかった**

裏に密着やといを入れる(やりたくない)前の最後の手段として2点の策があるのでそれやってみた. 一つ目は切削中に切削オイルを中まで導入するために途中何度も(大事な層を通過させる)ドリルを一旦上昇させ戻してから再切削する方法です(回転数は400に落とす, 切削時の下降速度は**あご上り問題**のためF1に固定).

具体的にはZを表面から-0.2mmまで切削したところで一旦+0.2まで上昇させ, 戻し, -0.2~-0.7mmまでを切削したら, 再び抜き差しして-0.7~-1.3mmまでを切削する. これでバリさえなければ切削を終了しても良いのだが, 念のために抜けた後に-1.3~-1.5mmの架空切削もしました.

二つ目は前記抜き差し切削に加え, 基板裏にドライ・フィルムを貼っておく(ドライフィルムは柔らかいので効果のほどは?)方法です.

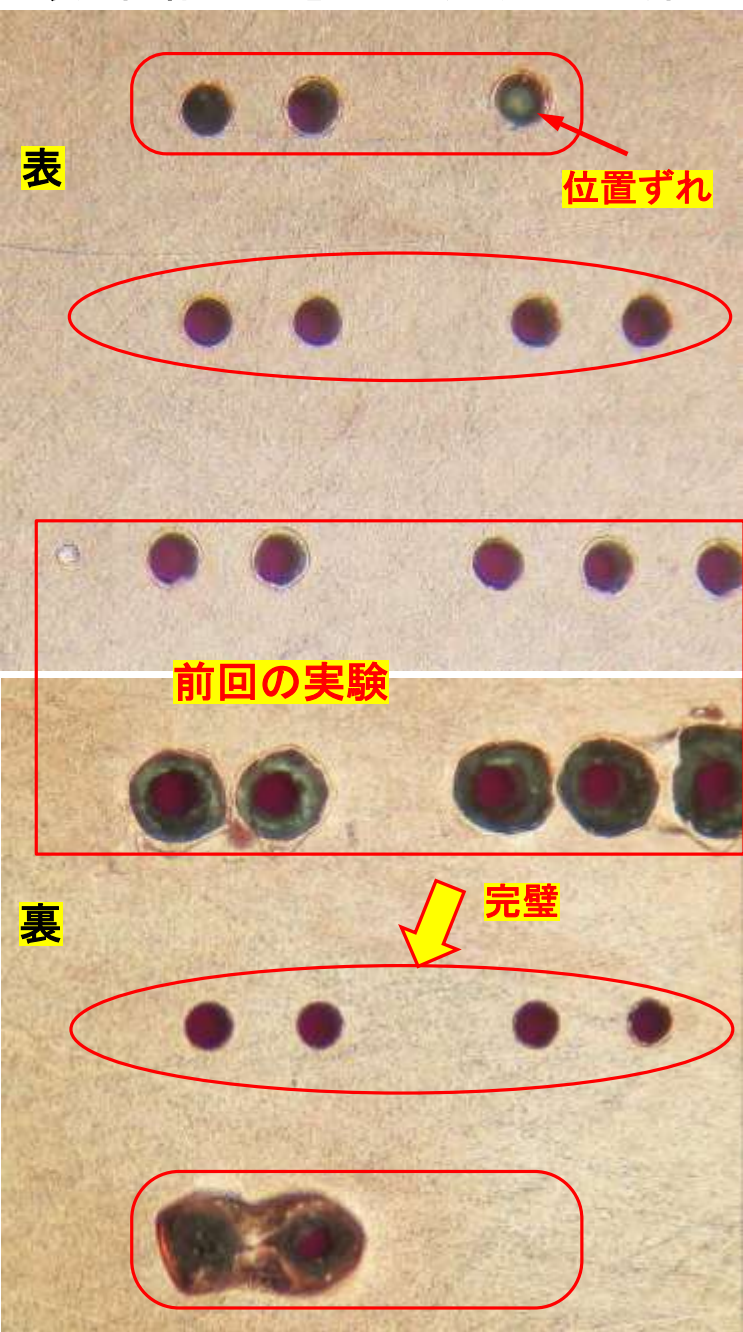
●結果を先に言うと, **切削オイルの穴導入の抜き差しが効果大で, 裏と表の違いが分からなくなるほどバリなし切削が可能**となりました. **赤四角枠**は前回の実験で, 裏のバリを取ってみると穴の周辺の傷みと銅箔の浮きもありフラット化出来ればバリを取れば済むというレベルではなかったことが分かります.

赤楕円枠が抜き差しの結果です. 左2穴が1つ力所の穴での抜き差しで右2穴がオイル浸透の時間をかけるため, 左右を交互に掘り進めたものです. 結果的にどちらの穴の裏表も綺麗な開口が出来ています.

赤角丸四角枠が一見調子よさそうなので, オイルフリーもやってみました. 最初は調子良さそうでしたが3個目の穴開け時に例のオイル無し症状である位置ずれが起こったので中断で貫通穴とはなっていません. 裏を見るとやはり回転数400でもパンク症状が出ていました. 手作業と異なり, CNCではオイルがないため(理由不明)なのです.

赤楕円枠の条件であれば, 切削深さは-1.1mmで十分なことが分かります. 抜き差し回数5回を3回で済むことが分かります. とは言っても

●こんなにも複雑なプロセスなったので**CNCを使うと手作業の3倍(414穴では6時間)もかかってしまいます**. 手作業では根性と職人的ワザを習得する必要がありますが, CNCであればだれでもすぐできるようになる利点(私にとっては?根性不要の分だけ)があると言えます.



表

位置ずれ

前回の実験

裏

完璧

すでに結論が出てしまっていますが、ドライフィルム貼り方式の確認実験も同時に行っていたのでその報告です。切削プログラムは同じで、切削オイルは前の実験と同様に十分に使用しています(ドライフィルム貼りが加わっただけ)。うまく行かなかったのでドライ・フィルム貼りの条件は省略します(概ねマスク工程と同様の方法)。

下の写真(上:表, 下:裏)がその結果です。

表



裏



上のおもてから観察した穴の開き方は前の実験と同じく目立った土手の形成もなく綺麗に開口できています。ここまでは裏にドライフィルムが貼ってであろうがなかろうが条件は全く同じでドリルの抜き差しと十分なオイルの効果が表れています。下の裏を見ると、前の実験以前よりは改善されていますが、ドライ・フィルムの効果というより、逆にドライフィルムが綺麗に抜けるはずの所を邪魔してバリが出ていると考えています。

それは、柔らかいドライフィルムは膨らんでくる銅箔に押されて風船の様に柔軟に追従するため、仮に銅箔が破れた直後でもシール状態を維持するためにオイルが流れ出していく道がない状態がしばらく継続するのです。ドリルの抜き差しでも中に空気が溜まっている場所の存在のためにオイルの流れが上層部に留められている(あるいは十分なオイル供給がない)ため銅箔のバリが解消しないものと考えられます。

不思議なのは手作業で開口している時は同じロットのドリルでもサクサク感があるのに、CNCの場合はツルツル滑っている感じです、まだ回転数が高すぎるのかもしれませんが。

裏面ドリル抜け時のバリ発生については、すでに先に述べた解決策があるため、また現行の手作業穴開け工程時には裏面にドライフィルムが付いているだけで、裏張りなしの方法はいくらでもありますからこれ以上深入りしないで、穴あけ改善実験はここまでで打ち止めとします。

◎一番の問題は寸法が合わない事！

細かい課題は後回しとして、一番の問題は2種マシン(紙プリントではOK)の作図スケールが異なっていることだ。精度から見るとレーザー・プリンタのX軸(スキャン方向)が大きな誤差を生んで、もっと問題なのは透明シート(PET)の熱間印刷における伸び縮(室温になって縮む)だと思われます。

現在の立ち位置から見ると解決への道のりの近い順から列挙すると

①プリントするサイズを設計原寸に微調整する

プリント時の縮尺変更は最小単位が1%オーダでしか変更できないので設計図面サイズを微調する方法だ。反対にPETに印刷した寸法を精密に測定してCNCへの命令寸法を微調するのは現実寸法から離れていくので候補としない。

つまり、プロセスとして、先にスルー・ホール開口し、表、裏とも同時期(連続)露光(PETにプリントしたホトマスクで)を行いたい。(やはり、CNCを原器としてPETに印刷したパターンの寸法を測定するのが妥当な方法と言える)

②同じCNCを使ってレーザーでドライ・フィルムを露光する

寸法精度と再現度の高いCNCを使ってスルー・ホール開口してある基板にドライ・フィルムを貼り同じマシンでレーザーで露光する(ただしゼロ点の位置決め方法の開発が必要)。

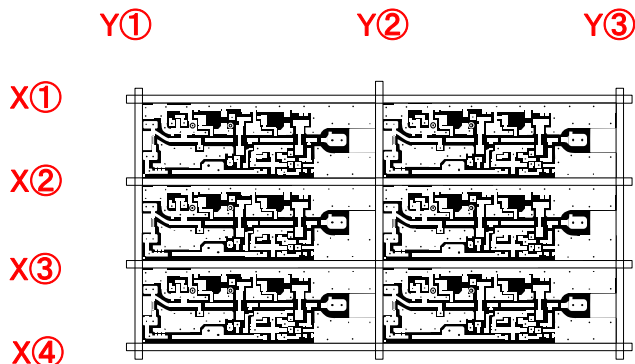
(後ろ向き番外編)0402用の微細マスクを製作するには最新(疑似2400dpi)のレーザープリンタでホトマスクを製作するつまり、CNCを使わないで(諦めて)2枚貼りマスク方式を継続(残念過ぎるので避けたい結末)。

●まず現実を知る

PETに印刷するために準備した図面寸法と、PETに印刷したマスクそれぞれを突き合わせをする。左図が印刷原稿なのでこのスペーサー・バー縦Y①～Y③、横X①～X④の7カ所の図面上の長さ寸法を抽出します。

図面上のX①66.9 X②66.9 X③66.9 X④66.9 Y①35.9 Y②36.8 Y③35.9

と等倍まで縮小した図面計測では100 μ mまでの精度でしか表示してくれないので丸め込み誤差が出ます。したがって少しでも精度を出すために2倍サイズの図面から抽出します。



Y①71.7(35.85)

35.58

Y②73.6(36.80)

36.67

Y③71.7(35.85)

35.59

X①133.8(66.9)

66.78

X②133.8(66.9)

66.78

X③133.8(66.9)

66.78

X④133.8(66.9)

66.78

2倍サイズ図面のスペースだけを左にコピーしてきました。スペース長さとその半分の値を図面上に記入しました。

X① 66.9

X② ↑

X③ ↑

X④ ↑

Y① 35.85

Y② 36.8

Y③ 35.85

100μmの誤差が50μmに縮小しましたが数値上大差ありませんでした、

実際のマスクの測定値(熱収縮で縮んでいる)を黒で記します。これを見てまずおかしいと感じます。

上図に示した両者の数値差は10ページに示したほどの差がでていないのです。とにかくこれらを下表に整理しました。当初の測定結果より小さな誤差です。X軸が0.18%の縮小、Y軸(レーザスキャン方向)が0.61%の縮小が起きていることになり

ます。これらの結果を元に図面のX軸とY軸の倍率を拡大させてプリントしてみることにします。X軸のみ顕微鏡の視野ぎりぎりなので30mmに変更して図面を製作します。図面は縦横とも3種類寸法、の全部で9種類を念のため一緒にプリントします。

図面の中にいくつかの穴も用意して、CNC加工穴との照合も試みることにします。

パワーポイントでの座標は第4元座標のY軸をプラスにした(左上が原点)なのでCNCの第元座標系に直さないと数値入力ができないので2倍図面から数値を読み取り等倍に直します。

設計とPETプリントとの誤差

場所	製図サイズ*	PETサイズ*	PET/製図	PET誤差%	平均%
X 1	66.9	66.78	99.82	-0.18	-0.18
2	66.9	66.78	99.82	-0.18	
3	66.9	66.78	99.82	-0.18	
4	66.9	66.78	99.82	-0.18	
Y1	35.85	35.58	99.25	-0.75	-0.61
2	36.8	36.67	99.65	-0.35	
3	35.85	35.59	99.27	-0.73	

実寸法Y逆座標		実寸法Y座標					
④0,32.9	32.9	39.0, 21.2	10.6	⑧29.4,32.9	97.8, 21.2	⑫61,32.9	161, 21.2
③0,22	22	39.0, 43.1	21.55	⑦29.4,22	97.8, 43.1	⑪61,22	161, 43.1
②0,11	11	39.0, 65.0	32.5	⑥29.4,11	97.8, 65.0	⑩61,11	161, 65.0
①0,0原点	0	39.0, 87.0	43.5	⑤29.4,0	97.8, 87.0	⑨61,0	161, 80.7
実寸法X座標		0		29.4		61	

①～⑨の各ノードには計測用の点0.1φを入れてある(この2倍図では0.2φ)

上図示す200%図面でX,Yともサイズ調整を行います。赤字が等倍座標で、CNCで使用する数値となる。これをプリント原稿にするにはX,Y倍率調整をそれぞれ3水準変化させた後、1/2にし、調整値が異なる計9種類のPET印刷です。基準倍率でCNC穴開けした基板にどれが最も適合するかを確認する実験をこれから行います。

左図が図面のパラメータ表です。X軸とY軸それぞれの調整率無しを含めて2P前で求めた調整(拡大)率を最大の補正とその半分の補正で、計9枚の試験パターンをPETに印刷してみることにします。9種以上のパラメータもふりたかったのですが、A4紙1枚には9種類のプリントが限界なのでまずこれで進めてみます。

縮尺パラメータ

	X100.4%	X100.2%	X100%
Y100.6%	4.6	2.6	0.6
Y100.3%	4.3	2.3	0.3
Y100%	4.0	2.0	原寸

縮尺数値

Y \ X	12.34	12.29	12.27
6.85	12.34/ 6.85	12.29/6.85	12.27/6.85
6.83	12.34/6.83	12.29/6.83	12.27/6.83
6.81	12.34/6.81	12.29/6.81	12.27/6.8

当初の寸法測定結果よりかなり少ない調整率なので不安もあります。

	4.6

	2.6

	0.6

Xを0.4%, Yを0.6%拡大の意味

	4.3

	2.3

	0.3

	4.0

	2.0

	原寸0.0

マスクのプリント原稿1

縮尺パラメータ

	X100.4%	X100.2%	X100%
Y100.6%	4.6	2.6	0.6
Y100.3%	4.3	2.3	0.3
Y100%	4.0	2.0	0.0

縮尺数値

Y \ X	12.34	12.29	12.27
6.85	12.34/ 6.85	12.29/6.85	12.27/6.85
6.83	12.34/6.83	12.29/6.83	12.27/6.83
6.81	12.34/6.81	12.29/6.81	12.27/6.81

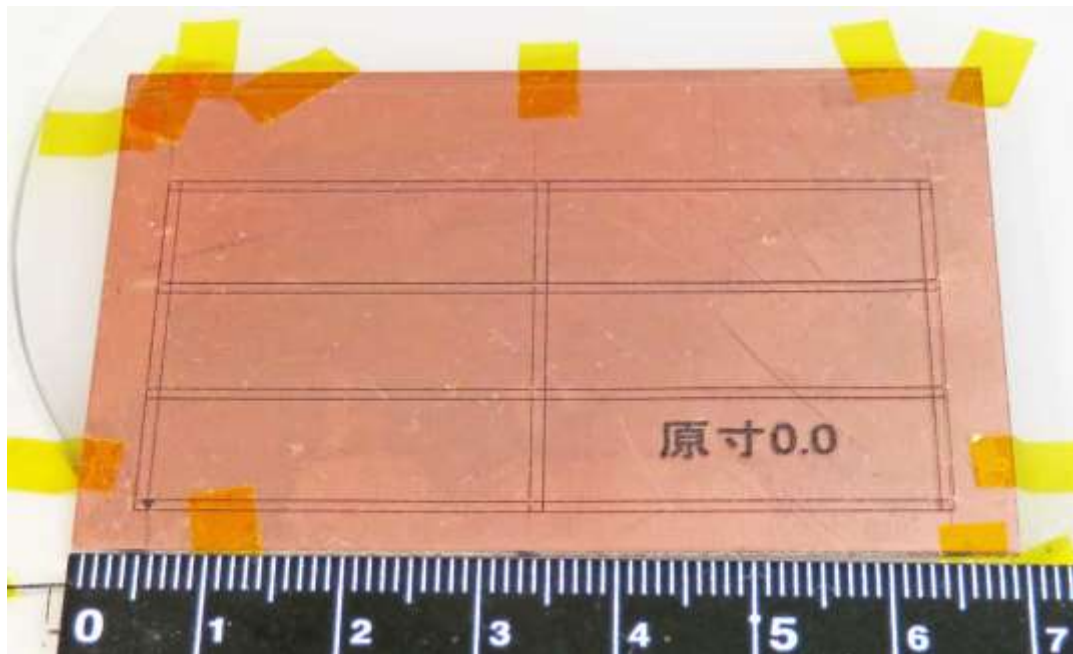
●CNCで穴あけを行いどの縮尺が合致するか？

前のページで示した様に**拡大率の異なる調整用マスクを9種類用意**しました。たぶん、今回の調整マスクでドンピシャがあったとしても、PETの伸び縮みは温度、湿度などで変化するでしょうから、永遠に同じ倍率ですむとは思えません。およその倍率が決まったとしても毎回その前後の縮尺マスクを数種類用意する必要があると思われます。

そういう意味では一度に裏表のマスクを1枚のプリントで製作して、それを基準に穴あけなどを進めていく方が優れています。またpptxで製作する図面は最小ピッチが100 μ mでしか調整できません。したがって今回は2倍図面の上で拡大率を調整し、それを50%に縮小することで原寸マスクを製作せざるを得ませんでした。したがって最小調整ピッチは50 μ mとなっています。将来的にはpptxの原稿サイズをA3にして4倍か5倍の図面を描きそこでサイズ調整を行う事を考えなければいけません(一旦等倍まで持っていた図面も拡大して戻しても調整値は復元しますので内部で扱っている数値計算の有効桁数は表でコントロールできるピッチよりも細かいことは確認できています)。CADソフトに比べればめんどくさい話です、

●CNCで穴あけした基板とPETに印刷したマスクを重ねてみる

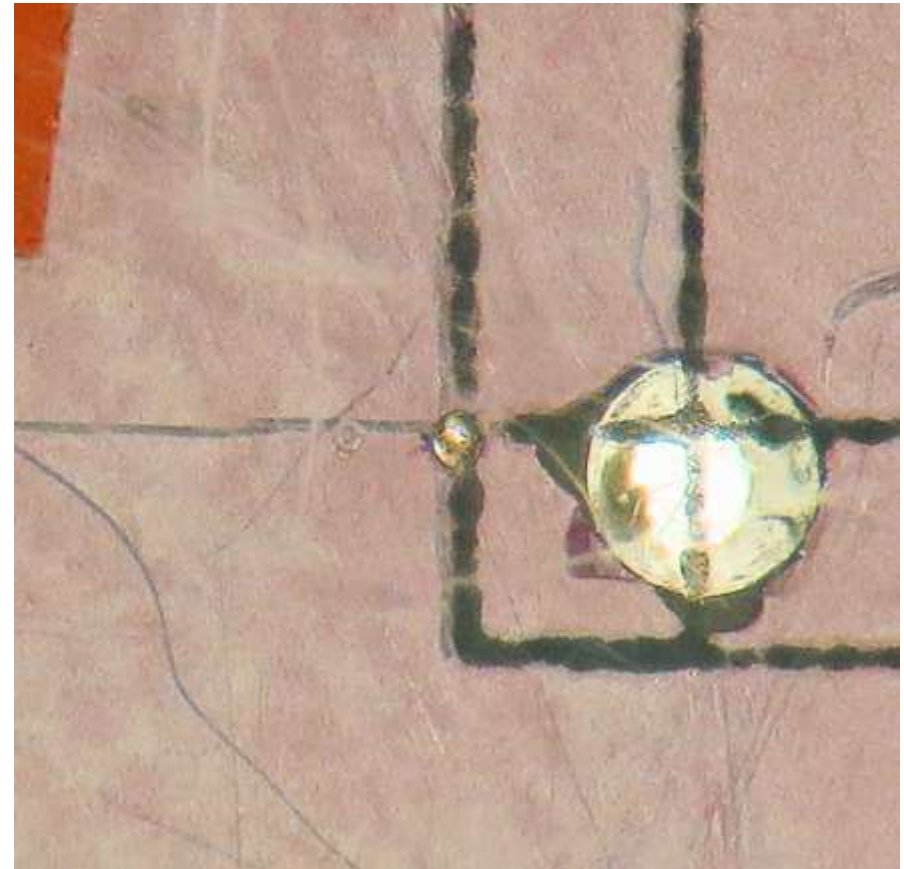
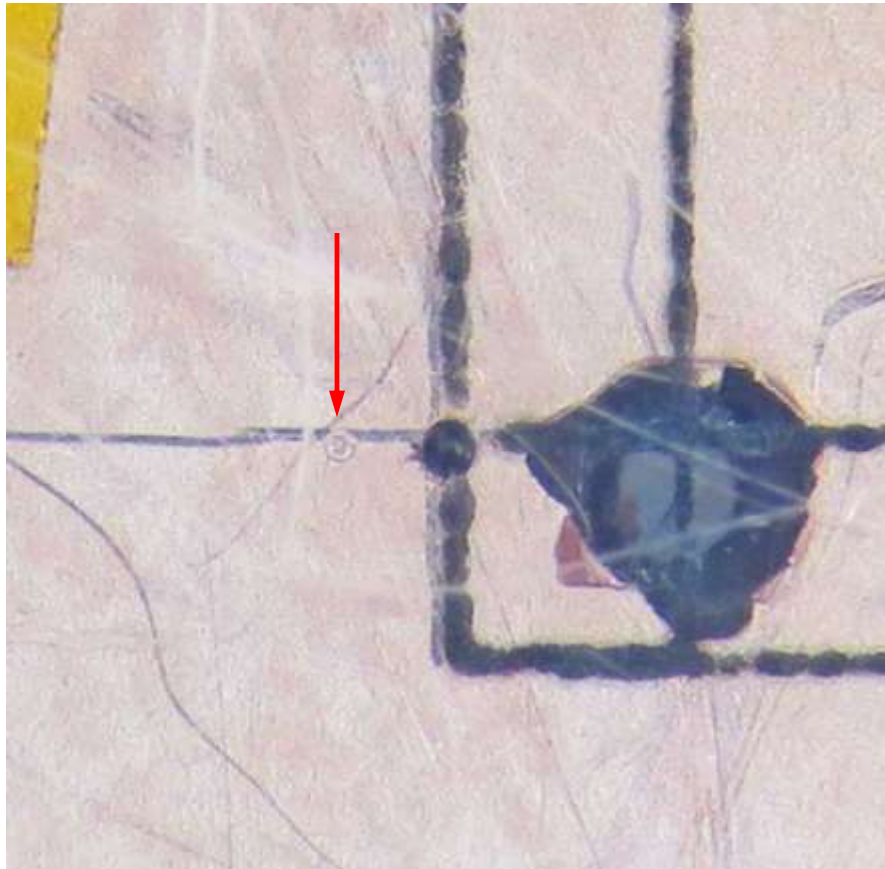
CNCで穴あけした0.8t基板(50x70)の上にPET印刷した原寸マスク(製作した18枚の中の1枚:原寸マスク)を重ねてみたのが左下の写真です。これらには座標位置を明確にするための12カ所の印が仕込んであったのです。実はこの寸法違いマスクには格子状の図面(2ページ前に描いている)について省略していた話があります。2ページ前の2倍図面で説明しますと、4倍表示(8倍に相当)赤枠で示した部分をさらに4倍の拡大鏡を使って32倍相当に表示させた図面が右下の図



です。最新のpptxでは拡大鏡が16倍までズームできますから、この状況からさらに4倍の128倍まで拡大して表示できるのです。つまりCPUが裏で行っている座標数値処理桁数には十分に余裕があるという根拠となります。ただし、それを原寸大に戻した図面だからと言って緻密なプリントができるわけもないので32倍を超す表示での図面描きは無意味です。とは言いつつもブラザ・プリンタの限界点(100 μ m角)を12カ所の測定ポイントを仕込んであったのです。このポイントがプリンターで印刷されなくてもそれに付随するラインのクロスでズレは計測できるようにしてありますので大丈夫です。

●原寸マスク(縮尺補正無し)とCNC穴あけ基板との照合

下の2枚の写真が原点(0.00, 0.00)の位置の拡大です。先に断っておきたいことがあります、1 ϕ 第の大きな穴が開いていますが、これはCNCにおよそのX,Y原点を設定するためにあらかじめ基板に各12ポイントの十字のケガキにX,Y原点を合わせ、続いて少し左にずらした↓の位置でZ軸0.00をセット(痕が僅かに残っています)した後、ドリルの刃先を1mm上昇させ、プリント基板が平行(およそ)に貼り付けてあるかのチェックのためX軸を61mmまで10mmステップで高速移動しようとしたときに、無線のマウス・ポインタがたまたま画面のZ軸のダウン・アイコンに飛んでしまった(このパソコンとマウス

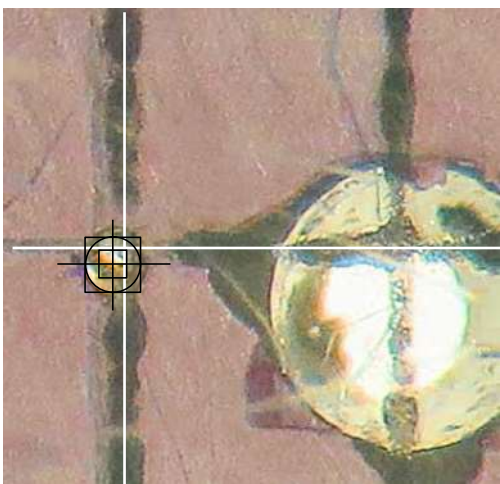


では時々起こる)のに気づかずボタンを押してしまったので400回転のまま10mm下降を初めてしまい、0.2φのドリルはあえなくバキバキに折れて、軸の太くなっているテーパ部まで基板にめり込み、オーバーロードでCNCがロック(回転は継続)してしまうトラブルが最初に起こってしまった。その傷跡がこの大きな~1φの穴なのです。教訓は「**CNCを扱う時は危険なのでワイヤード・マウスを使用すべき**」です。

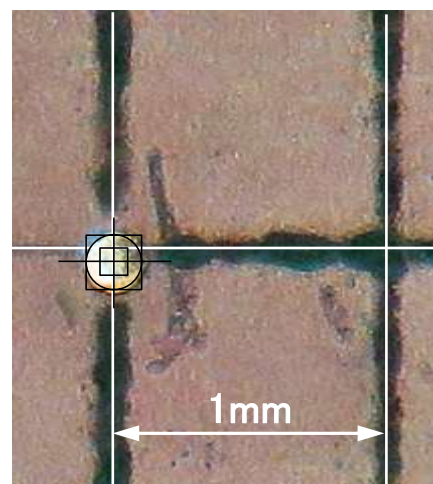
左の暗い穴ではせっかく入れたポイントが見えませんが、落射照明に加え透過光照明もオンしてみたのが右の写真です。残念なことが2点、せっかくのゼロ点なのに50~80μmズレてしまっていたことと、期待した12カ所の100μmマーカの半分くらいしか印刷されていなかったことです(丁度そこにトナー粒子が居なかった)。線の幅もトナー粒子のありなしで一定していません。そんなことはある程度予想していましたから穴の位置は十字の補助線を引いて10μm精度での計測は続行可能です。以下原寸マスク12ポイントの穴位置とのズレ計測には落射光と透過光を混ぜた撮影写真を使用します。(写真画面のもやもやはPETマスクの浮きを防ぐために傷がチョット多いアクリル板を重しにしたためです)

●計測

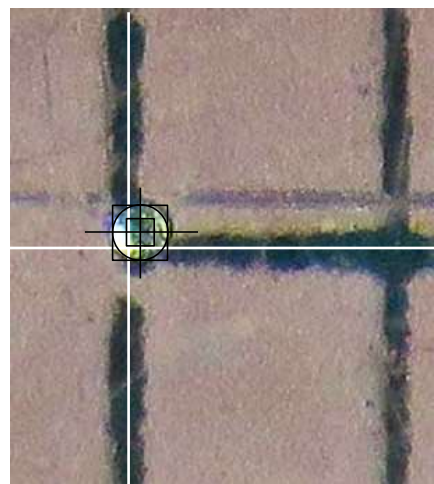
まず**X=0**系列の**4点計測**です。基準をCNCホールとしてマスクのズレをΔX, ΔYとして数値化します。



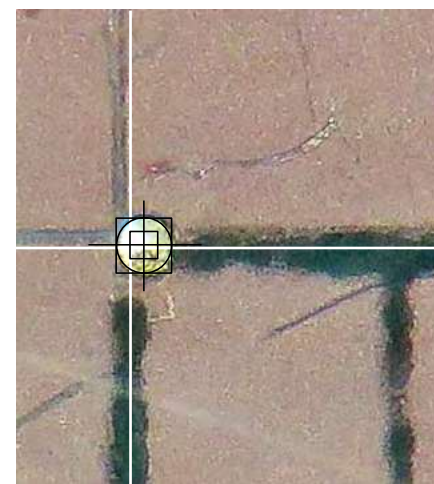
座標1 (0.0, 0.0)
 相対差 Δμm 40, 60
 原点穴基準差 0, 0



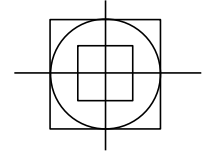
座標2 (0.0, 11.0)
 相対差 Δμm -0.5, 50
 原点穴基準差 -45, -10



座標3 (0.0, 22.0)
 相対差 Δμm -35, -60
 原点穴基準差 -75, -120



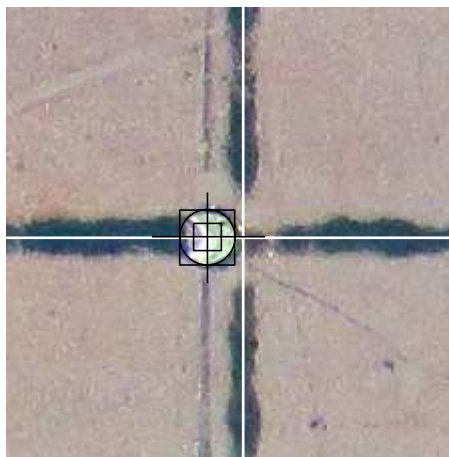
座標4 (0.0, 32.9)
 相対差 Δμm -50, -10
 原点穴基準差 -90, -70



図中に入れた計測マーカを2倍表示でその意味の説明
 ○が直径200μm, □大が1辺200μm, □小が一辺100μmこれで目測5μm単位での計測ができます

原点穴基準差は傾きをまだ考慮に入れていないので、全データを見てから可能な限り正しい値としたい、

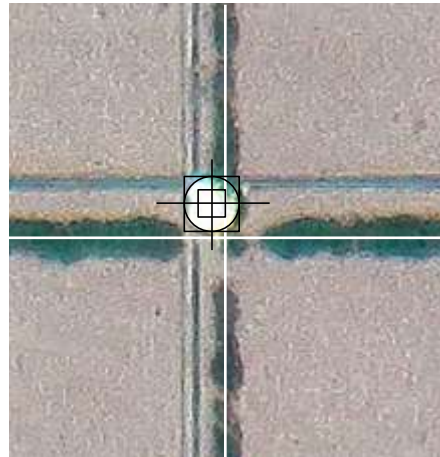
X=29.4系列の4点計測



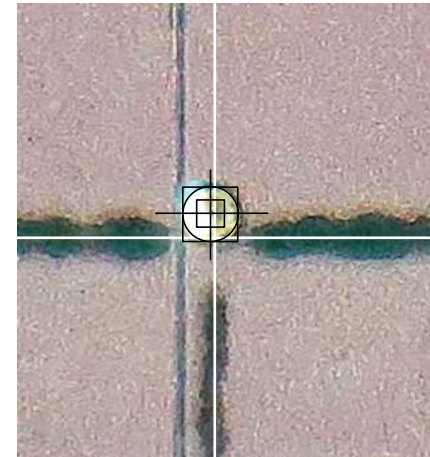
座標5(29.4, 0.0)
相对差 $\Delta\mu\text{m}$ 120, 0
原点穴基準差 80, -60



座標6(29.4, 11.0)
相对差 $\Delta\mu\text{m}$ 75, 0
原点穴基準差 35, -60

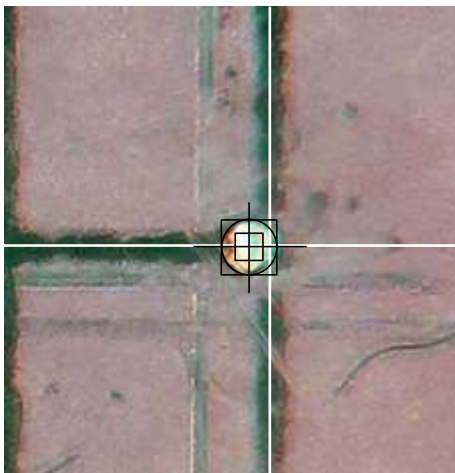


座標7(29.4, 22.0)
相对差 $\Delta\mu\text{m}$ 50, -120
原点穴基準差 10, -180

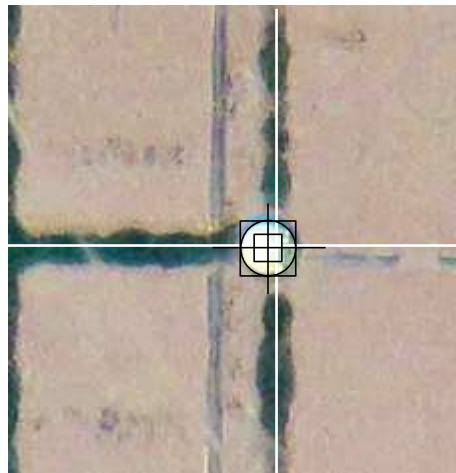


座標8(29.4, 32.9)
相对差 $\Delta\mu\text{m}$ 30, -85
原点穴基準差 -10, -145

X=61.0系列の4点計測



座標9(61.0,
0)相对差 $\Delta\mu\text{m}$ 75, 0
原点穴基準差 35, -60



座標10(61.0, 11.0)
相对差 $\Delta\mu\text{m}$ 35, 10
原点穴基準差 -5, -50



座標11(61.0, 22.0)
相对差 $\Delta\mu\text{m}$ 0, -100
原点穴基準差 -115, -180



座標12(61.0, 32.9)
相对差 $\Delta\mu\text{m}$ -35, -65
原点穴基準差 -45, -125

縮尺率の異なるPETマスクを9枚作ったまでは良いのですが、最初の1枚(縮尺無し)だけでこんなに手間暇を毎回やってはいただけませんが、とりあえず先の縮尺無しマスクに対する計測データをまとめて以下に示します。

座標配置図

4	8	12
3	7	11
2	6	10
1	5	9

CNCのX/Y(mm)座標

0/32.9	29.4/32.9	61/32.9
0/22	29.4/22	61/22
0/11	29.4/11	61/11
0/0	29.4/0	61/0

CNC穴との違い(μm) ΔX/ΔY

-90/-70	-10/-145	-45/-125
-75/-120	10/-180	-115/-180
-45/-10	35/-60	-5/-50
0/0	80/-60	35/-60

縮尺無しPETマスク(原寸0.0マスク)により得た計測データ左:穴位置番号, 中央:その座標, 右:CNC穴とのXYZズレ

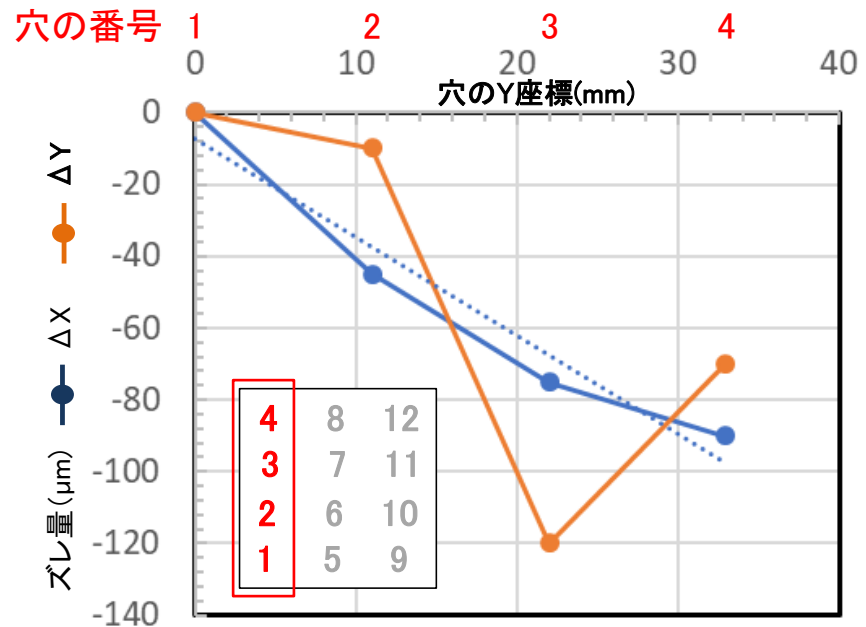
これらを使って数値処理を行い、●CNCの送り機構(スライドレールのスティッキングによるチョンボ, 移動ネジ切りバーの精度) ●プリンタの機構(Y軸:レーザのスキャン精度, fθレンズの精度, ポリゴンミラーの平面度, X軸:紙送りローラの回転ムラ<ローラの半径精度も絡む>等をできるだけ検証を行い、その結果一発でマスクのX,Y縮尺率を決定する方策を編み出すことが命題となります。

●グラフにして可視化すると見えてくる

まずX=0の系列の穴座標1~4のズレについて調べます。それをグラフ化したのが右図です。ΔXはY値が上昇(1→4)するにしたがってマイナスのズレが拡大しています。これはPETマスクを重ねた時に左回転の角度を(破線の近似式から)2.7mラジアン傾けてアライメントしたことを表しています。したがってマスク図面の縮尺とは関係ない偏差です。

一方ΔYはY方向の寸法(縮尺調整)に直接関係する指標となります。概ねマイナスの偏差を示していますからプリントしたマスクのY方向の寸法を伸ばしてプリントしなければいけないことが分かります。

しかし穴番号3が特に原点に近寄った場所にありますから何か異変があると考えるのが妥当です。平均的なラインを想定しますと、Yが32.9進んだところでおよそ100μm不足ですから、Yの縮尺を100.3%に修正しなければいけないことが分かります。



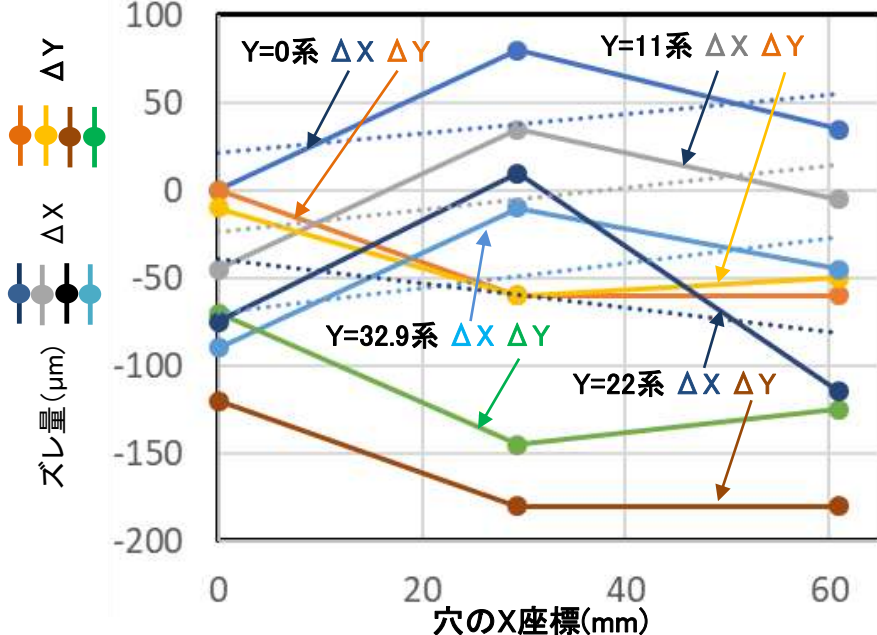
原寸マスク:X=0系列の穴とマスクX,Yズレ(μm)の関係

この穴3の偏差の大きな原因はプリンター(レーザスキャンの歪)なのか, CNCマシンのY軸ネジ切りピッチ等機械的揺らぎ(あるいはYスライドレールのひっかかり)なのかはこのデータだけでは判断不能です。

続いてX=32.9mmライン系とX=61mmライン系の ΔX と ΔY を付け加えたのが右図となります。一変に4本のラインが加わったので複雑な印象ですが, 傾向は同じでマスク合わせの傾きも同等で, Y=22mm座標上の ΔY のズレの特異性も継承しています。この特異性を除けばどのライン系からもYの縮尺は100.3%程度との結論がえられます。

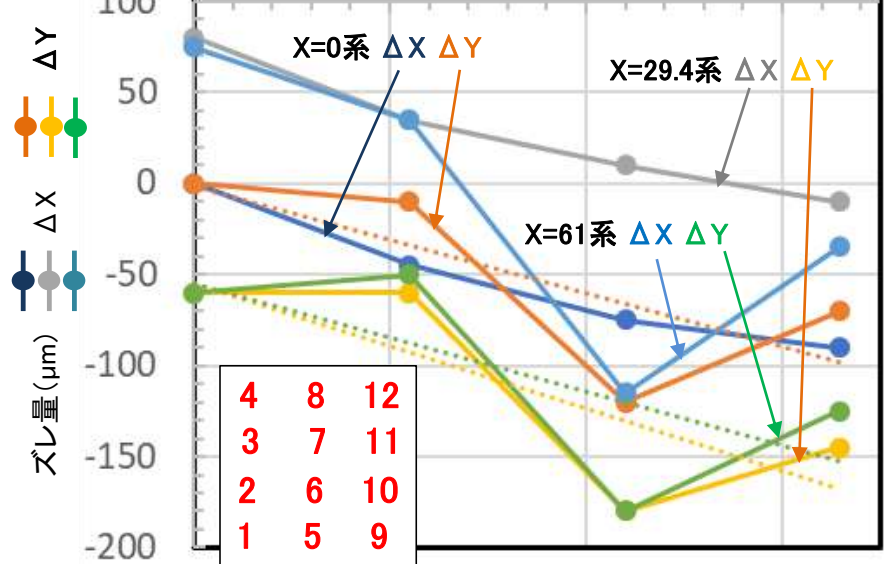
次にYライン系の整理(Xの縮尺確定)の議論に入ります。

穴の番号	4 →	8	12
	3 →	7	11
	2 →	6	10
	1 →	5	9



原寸マスク: Yの4系列の穴とマスクX,Yズレ(μm)の関係

穴の番号	9 →	10	11	12
	5 →	6	7	8
	1 →	2	3	4
	0	10	20	30



原寸マスク: Xの3系列の穴とマスクX,Yズレ(μm)の関係

X軸系でおよその結論が出たのでY軸系での整理をしてみます。Y軸系では4本のラインですから計8本となり複雑ですがよく見れば傾向がすぐに読み取れます。

どの値のY軸でもほぼ傾向が同じでアライメントの角度ミス(実際はどの穴にも差分が少なくする場合にはあえて角度を付けることによりトータルでズレ量を少なくできるので単純にミスとは言えない)がX軸系で得た角度ミスの約1/3の左回転0.8mラジアンとなりました。1枚のPETフィルムでこれだけ異なるのも不思議ですが, もしかしたらどこかにシワが寄っている可能性もあります。

X軸方向の例の問題のY=22系列の異常穴を除いて他の3ラインは同じ傾向でその値は横61mmの距離で40 μm の

伸びズレ99.93%, つまり伸び縮み無しと見なせました。

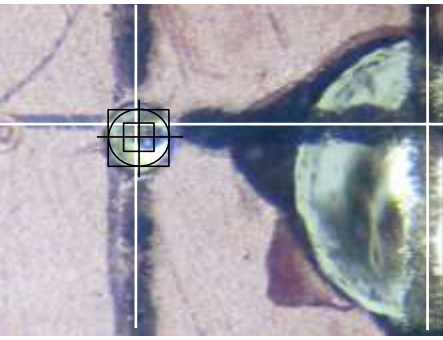
以上の結果からX方向100.0%, Y方向100.3%の縮尺原稿でプリントすれば良い(時間, 温度, 湿度, 機械の調子と同じであれば)という結論になりました。あらかじめ製作していたプリント原稿1のPETマスク(右下表参照)9種の中に丁度あります(赤四角枠)のでこれを穴基板に乗せて合せてみることにします。

プリント原稿1の縮尺内容

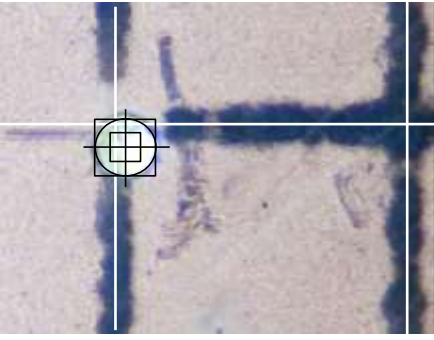
	X100.4%	X100.2%	X100%
Y100.6%	4.6	2.6	0.6
Y100.3%	4.3	2.3	0.3
Y100%	4.0	2.0	原寸

●縮尺X=100%, Y=100.3%のマスクでの合致性計測

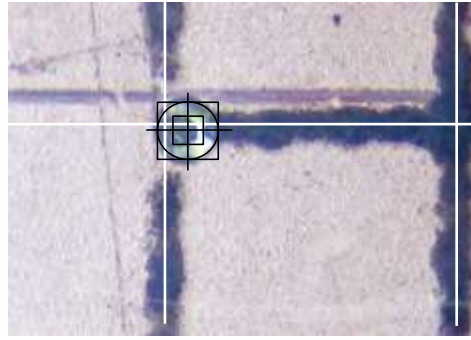
X=0.0系列の計測



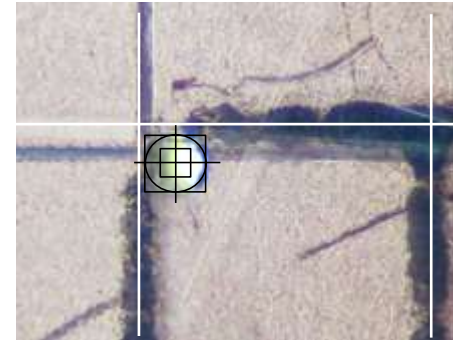
座標1 (0.0, 0.0)
 相对差 $\Delta\mu\text{m}$ -10, 45
 原点穴基準差 0, 0



座標2 (0.0, 11.0)
 相对差 $\Delta\mu\text{m}$ -35, 75
 原点穴基準差 -25, 30

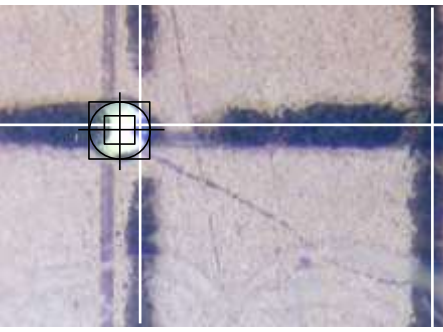


座標3 (0.0, 22.0)
 相对差 $\Delta\mu\text{m}$ -75, 20
 原点穴基準差 -65, -25

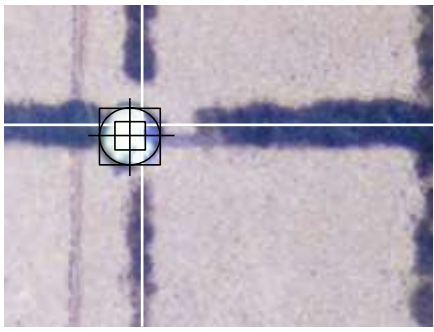


座標4 (0.0, 32.9)
 相对差 $\Delta\mu\text{m}$ -120, 130
 原点穴基準差 -110, 85

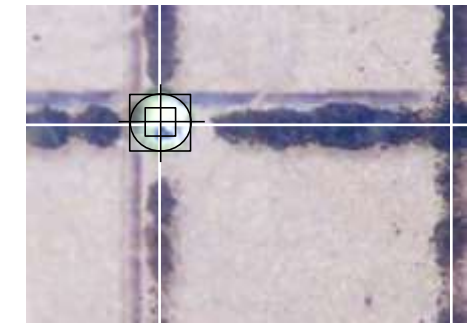
X=29.4系列の計測



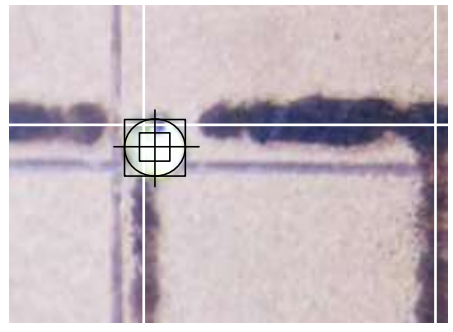
座標5 (29.4, 0.0)
 相对差 $\Delta\mu\text{m}$ 70, 20
 原点穴基準差 80, -25



座標6 (29.4, 11.0)
 相对差 $\Delta\mu\text{m}$ 45, 40
 原点穴基準差 55, -5

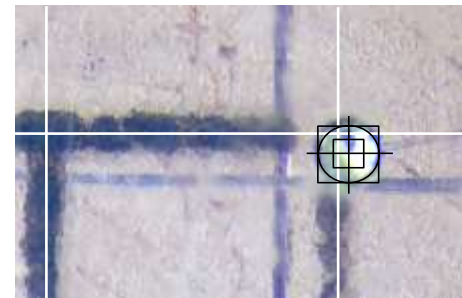
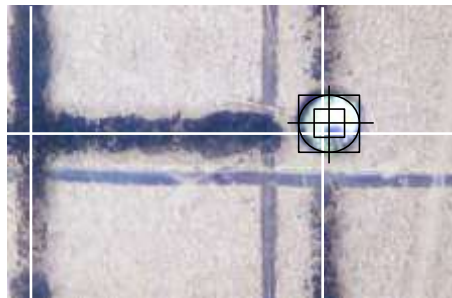
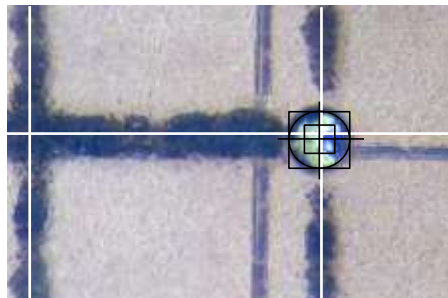
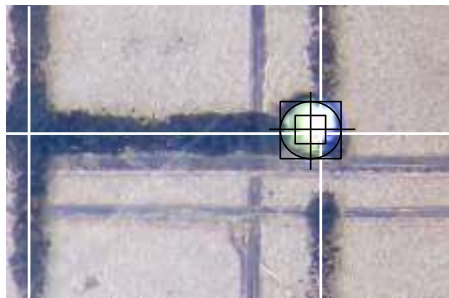


座標7 (29.4, 22.0)
 相对差 $\Delta\mu\text{m}$ 0, -10
 原点穴基準差 10, -55



座標8 (29.4, 32.9)
 相对差 $\Delta\mu\text{m}$ -30, 75
 原点穴基準差 -20, 30

X=61.0系列の計測



座標9(61, 0.0)
 相対差 $\Delta\mu\text{m}$ 30, -20
 原点穴基準差 40, -65

座標10(61, 11.0)
 相対差 $\Delta\mu\text{m}$ 5, 15
 原点穴基準差 15, -30

座標11(61, 22.0)
 相対差 $\Delta\mu\text{m}$ -20, -40
 原点穴基準差 10, -85

座標12(61, 32.9)
 相対差 $\Delta\mu\text{m}$ -30, 70
 原点穴基準差 -20, 25

以上をまとめて、縮尺プリント(X=100.0%, Y=100.3%)でのCNC穴とのズレを整理すると以下の表の様になります。この縮尺では最大のズレが4番穴のX1点だけですので期待できます。

座標配置図

4	8	12
3	7	11
2	6	10
1	5	9

CNCのX/Y(mm)座標

0/32.9	29.4/32.9	61/32.9
0/22	29.4/22	61/22
0/11	29.4/11	61/11
0/0	29.4/0	61/0

CNC穴との違い(μm) $\Delta X / \Delta Y$

-110/85	-20/30	-20/25
-65/-25	10/-55	10/-85
-25/30	55/-5	15/-30
0/0	80/-25	40/-65

●縮尺無し(100%)マスクとY縮尺のみ100.3%マスクでのズレ比較

表題の比較を次ページに示します。見てすぐに分かったのは、Y軸のスケール不足を0.3%拡大したところ(破線の)傾きがオーバー気味になった事が表れています。つまり、**Y軸の補正最適値は100.2%である**ことが判明しました。

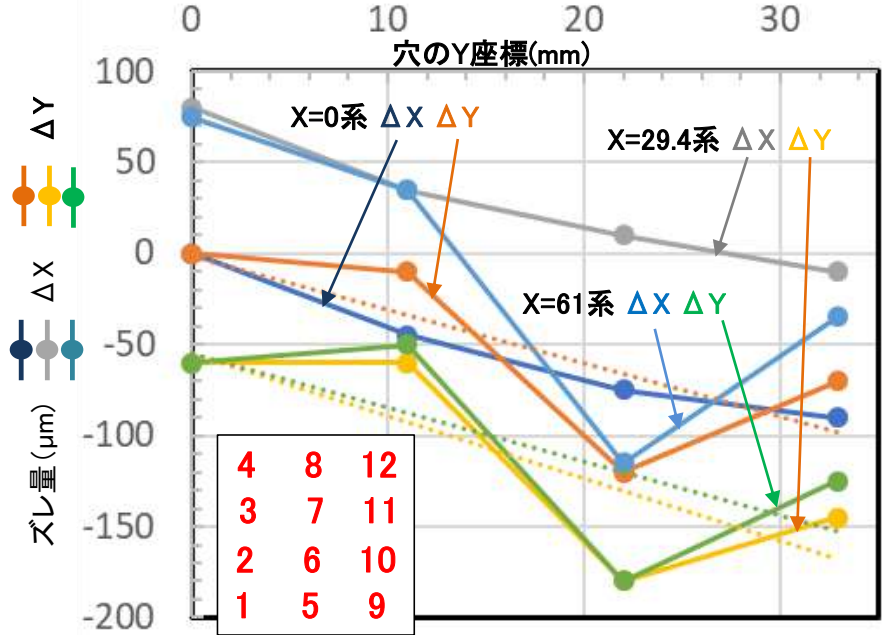
※ここで**重大な点が考察から漏れていた**ことが判明です。

それは相も変わらずY軸の傾きが2.7mRadなのです。つまり菱形の図形！！・・・※レーザのスキャンには時間がかかるので**33ミリの距離をレーザがスキャンしている間に紙送りローラが100 μm 分回っている**あるいはスキャンの軸が感光ドラムに対して僅かに傾いているのです。これを図面上で補正するのは大変です。つまり横長紙面で縦方向に長い図面は逆菱形歪を加えない限り使えないといった問題となるのです。現実には、マスク図面は縦短、横長なので穴の半径分(100 μm)のズレはギリギリ許容ですが、精密にはCNC用穴データのずらしを行って対応する(近道)ことも拡大図面で出来る技です。

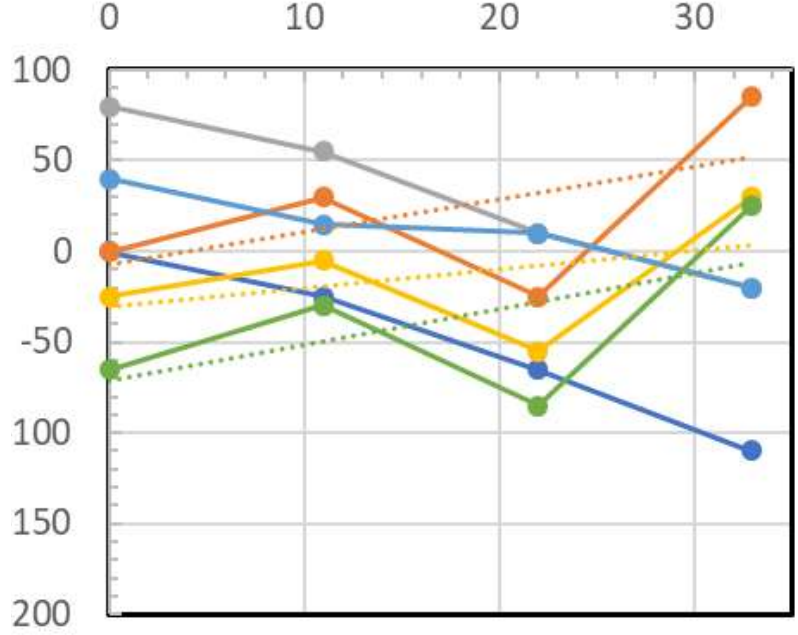
●縮尺無し(100%)マスクとY縮尺のみ100.3%マスクでのズレ比較

※ Xの3系列での比較を下に示します(左:100%, 右:Yのみ100.3%).

穴の番号 9 → 10 11 12
 5 → 6 7 8
 1 → 2 3 4



原寸マスク: Xの3系列の穴とマスクX,Yズレ(μm)の関係

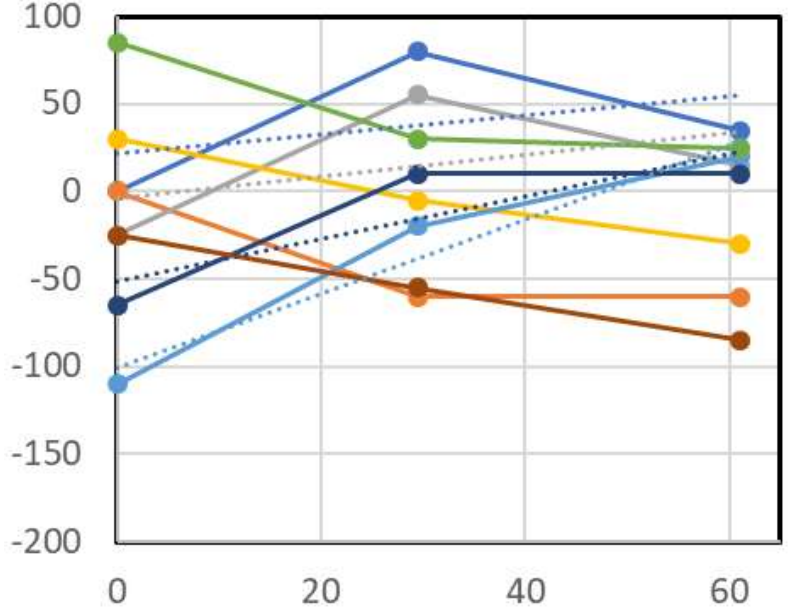
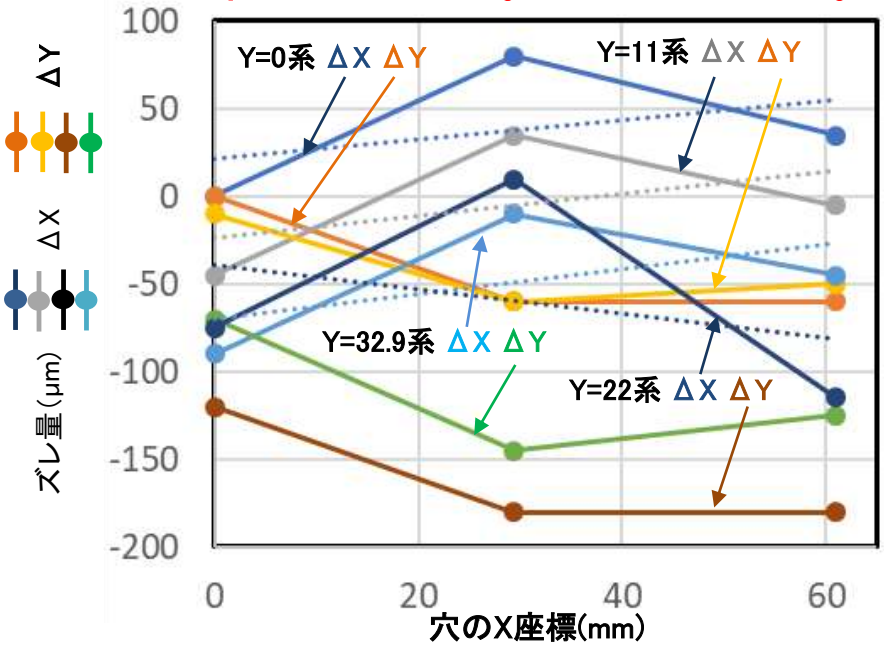


Yのみ100.3%修正マスクでのXの3系列のズレ関係

マスクが変わっているにも関わらず相変わらずX=22mm穴でのYズレ異常が起こっていますので、これは**CNCの責任であることが判明**しました。せめてもの対応はCNC、マシンのY軸機構に十分はグリスアップ(油をさすだけ)を行うしかありません(移動中にガタガタ音が僅かにしますから注油で改善の期待も)。

※ 次にYの4系列データでの比較を下図に示します(左:100%, 右:Yのみ100.3%)。

- | | | | |
|------|-----|---|----|
| 穴の番号 | 4 → | 8 | 12 |
| | 3 → | 7 | 11 |
| | 2 → | 6 | 10 |
| | 1 → | 5 | 9 |



原寸マスク:Yの4系列の穴とマスクX,Yズレ(μm)の関係

Yのみ100.3%修正マスクでのYの4系列のズレ関係

これらのグラフを眺めると、相変わらずY軸も左回転(レーザのスキャン時間分)が起きていることが分かります。この対応は前述しました。Yスケールの改善が進んだので、Xスケールの増大傾向が目立ってきました。できれば**X軸の倍率補正を99.9%にすべき**でしょう。以上プリンタとCNCマシンの癖が把握できたわけです。PETフィルムの伸び縮みの問題より別な原因が解明できたわけです。今後は**プリンタ用修正はX軸99.9%, Y軸100.2%で進める**こととなります。

●CNC穴あけを方法を改善した効果確認

次のページの写真は、新たに丁寧な穴あけ方法(Z軸のあごしゃくりを少なくするGコードプログラムを変更:右図参照)でZ軸の負担がかからない様に穴あけをしたプリント基板上に、既製作のPETマスク(縮尺X=100%, Y=100%)を重ねて12カ所の穴部分の拡大撮影した写真をX, Y上に整列させたものです。

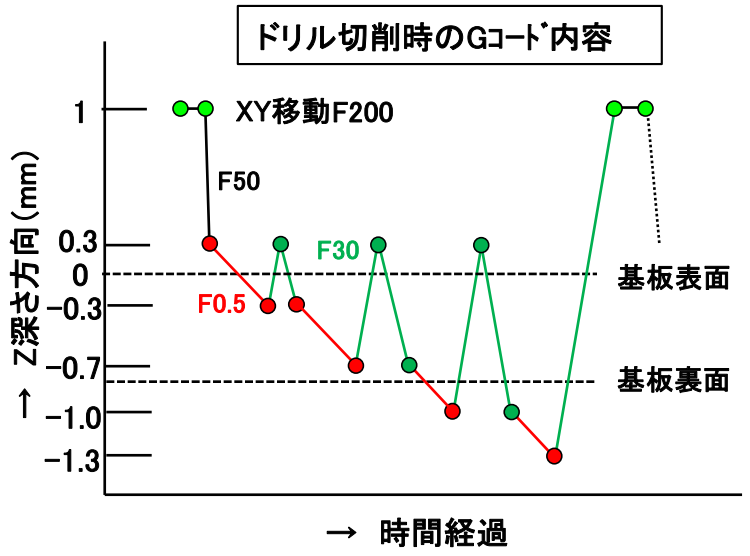
切削時のドリルの湾曲を極力なくし、穴あけ位置の精度確保とドリルの長寿命化を狙って右図に示す様に切削する時は全てF0.5で下降する方式、そしてオイルの導入を促す(切削中断における上下)回数を計4回に増やしています。

また、次のページの図はこれまでの整理の仕方と異なりCNCによる穴あけ位置を正規の位置と仮定しての観察結果です。データ整理をするまでもなく、この図を見てスキャン方向(Y軸)が傾いているのが再確認できます。出図(プリント)したものが菱形なんだからたちが悪い。座標1を原点(0, 0)としたときの座標4(Yが32.9mmの位置)のXズレが-110μm、一方座標9(Xが61mmの位置)のYズレが-50μmだから、座標4におけるXの真のズレ(傾き)は $(32.9/61 * -50 - 110 = -137\mu\text{m})$ と計算されます。

そもそもこんな微妙な傾きはpptxの機能(1%単位)では修正できない。プリンターメーカーに問い合わせしてマシンの調整ができるのか確認したいところです。今はCNC側で穴あけデータに位置補正をかける(面倒くさい)しかない状況です。

ここまでの実験はCNC穴開けで少しはズレ問題に改善の余地があるのではないかとの思いで、これまでのズレ状況を再確認するためでしたが、現実にはCNC穴あけシーケンス変更では顕著な改善はみられていません。

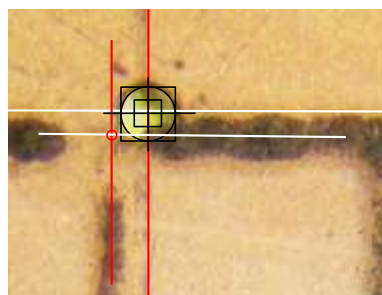
ここで、Y軸の距離不足を補正できるX=100%, Y=100.3%のPETマスクも準備出来ているのでこれを使い、菱形図形マスクを少しだけ左回転して重ねて何処まで穴とのズレを総合的に最小化できるかの実験をやってみます(傾きを微妙に変えながら位置変更をやって誤差最大値をいかに小さくするかは、サラリーマン問題の様で統計数値を扱うより実施してみるのが早い)。この結果を次々ページに示します。



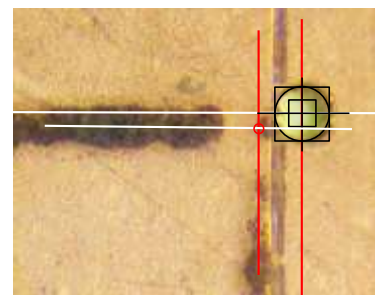
●縮尺X=100 %, Y=100 % のマスクでの合致性計測



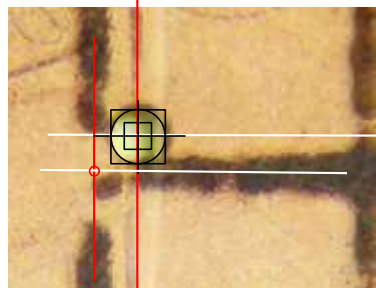
$\Delta \mu\text{m}$
 相差 -145, -205
 原差 **-110**, 85
 座4 (0.0, 32.9)



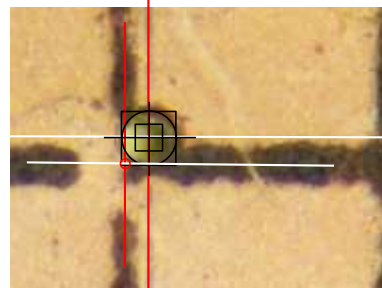
$\Delta \mu\text{m}$
 相差 -120, -165
 原差 -75, -5
 座8 (29.4, 32.9)



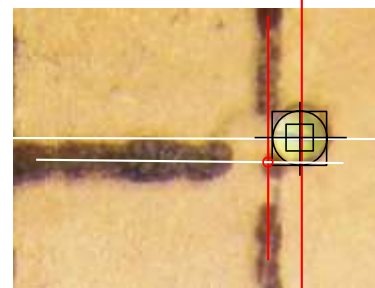
$\Delta \mu\text{m}$
 相差 -150, -55
 原差 -105, -245
 座12 (61, 32.9)



相差 -150, -120
 原差 -65, -205
 座3 (0.0, 22.0)



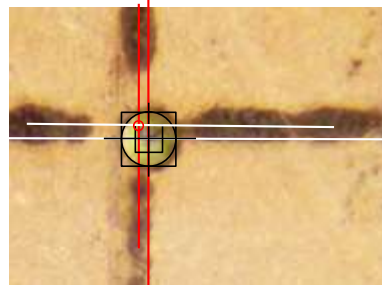
相差 -80, -95
 原差 -35, -180
 座7 (29.4, 22.0)



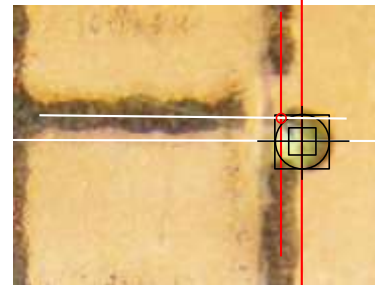
相差 -115, -90
 原差 -70, -175
 座11 (61, 22.0)



相差 -70, 35
 原差 -25, -50
 座2 (0.0, 11.0)



相差 -35, 50
 原差 -10, -35
 座6 (29.4, 11.0)



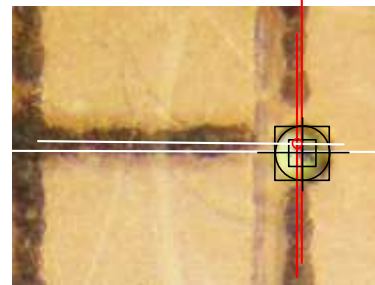
相差 -35, 90
 原差 10, 5
 座10 (61, 11.0)



相差 -45, 85
 原差 0, 0
 座1 (0.0, 0.0)



相差 10, 15
 原差 55, -70
 座5 (29.4, 0.0)



相差 -20, 35
 原差 25, **-50**
 座9 (61, 0.0)

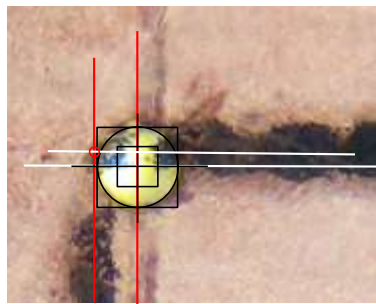
X=0.0系列の計測

X=29.4系列の計測

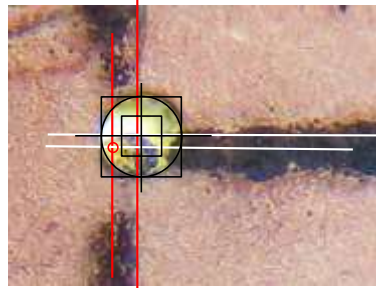
X=61.0系列の計測



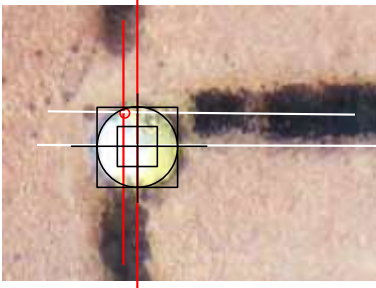
●縮尺X=100 %, Y=100.3 % のマスクでの平均合致性計測



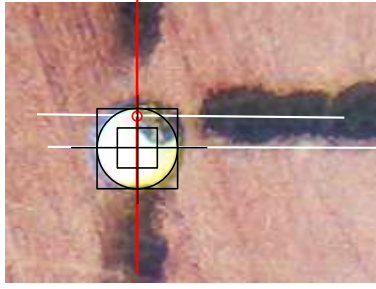
$\Delta \mu\text{m}$
 相差 **-110, 35**
 座4 (0.0, 32.9)



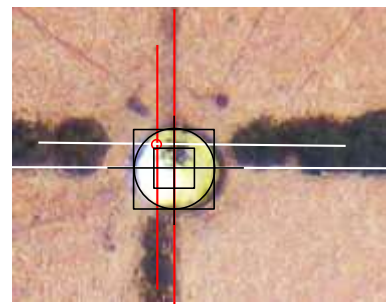
相差 **-70, -30**
 座3 (0.0, 22.0)



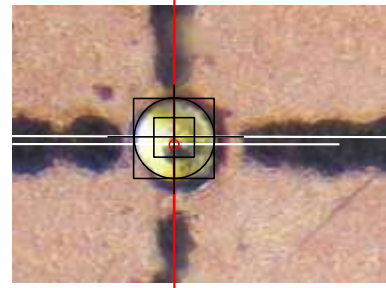
相差 **-35, 80**
 座2 (0.0, 11.0)



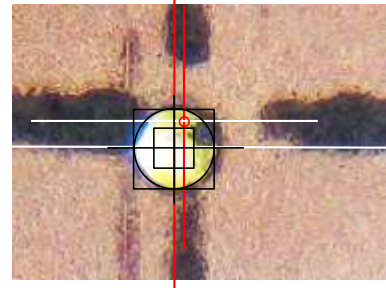
相差 **0, 80**
 座1 (0.0, 0.0)



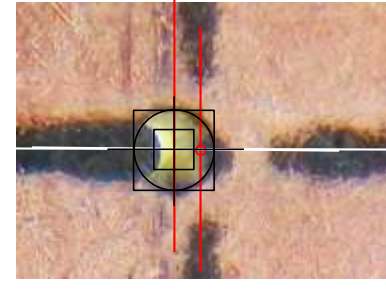
$\Delta \mu\text{m}$
 相差 **-40, 60**
 座8 (29.4, 32.9)



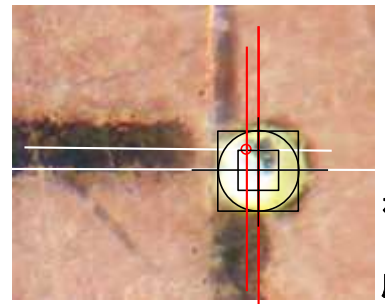
相差 **0, -20**
 座7 (29.4, 22.0)



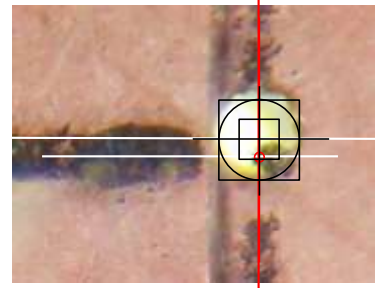
相差 **25, 70**
 座6 (29.4, 11.0)



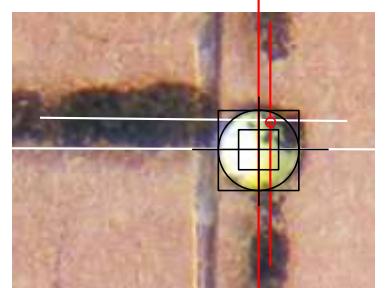
相差 **65, 0**
 座5 (29.4, 0.0)



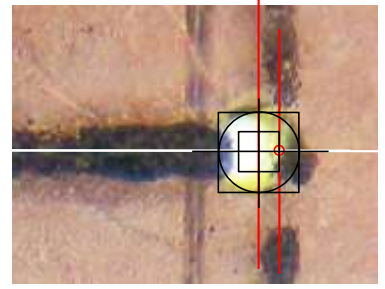
$\Delta \mu\text{m}$
 相差 **-30, 50**
 座12 (61, 32.9)



相差 **0, -45**
 座11 (61, 22.0)



相差 **30, 75**
 座10 (61, 11.0)



相差 **50, 0**
 座9 (61, 0.0)



X=0.0系列の計測

X=29.4系列の計測

X=61.0系列の計測

●図面の傾斜補正を穴位置移動でつじつま合わせのアライメントでどこまでズレを最小化できるか

前のページの図は、縮尺X=100%, Y=100.3%のPETマスクを重ね合わせてみの場合です。今度は各穴の最大ズレを最小化する意図で重ねた場合となります。顕微鏡で12カ所の穴を個別に観察しながらの合せだから、最小化はもぐらたたきに等しく、ドンピシャは無理だが、およその解に近いところは出来ているつもりです。ここではズレの平均値最小化ではなく(飛びぬけてずれているものが出てくる方が応用上問題ですから)あくまでズレ最大値の最小化を目指す。

数値的にXの最大一側ズレを捜すと座標4の-110μmが見つかる。一方最大+側は座標5の65μmがある。つまり全体を右(+側)に22だけX平行移動することで座標4が-88μm、座標5が87μmに出来る。続いてYの最大+側ズレは座標1, 2の80μm、最大一側ズレは座標11の-45μmだ。これも同様に下(-側)に17μmだけY平行移動することでそれぞれ 63μm, -64 μmとすることが出来るはずです。

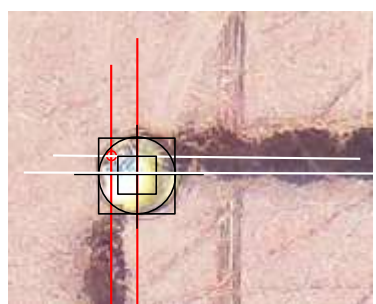
さらにズレを詰めるにはX軸の縮尺を30μm/61mm詰める。つまり99.95%にする(Y軸の縮尺は限度内なので変更不可)。残るは菱形プリントを直すか、Xの穴開け位置をY原点からの距離に対して2.7mRadだけ+側(右にY*0.0027)にずらすことです。つまりGコード命令はG0 XA YB の命令を送出したいときはAの値にB * 0.0027を加算した値とする方法です。この方式は比較的単純なルーチンなので導入可能です。以下に現行のブラザー製レーザープリンタを使用する場合の補正方法をまとめると以下の2点となります

① PETにレーザープリントするホトマスクはpptx上
X=99.95%, Y=100.3%の縮尺で設計を行う (Xの補正は10倍以上の図面上で行う必要がある)

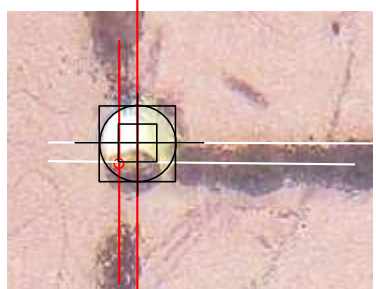
② プリントされる台形歪をCNCの穴位置変更で対応するには
Xの値から修正値を除する (修正値=Y値 * 0.0027)方法です。
具体的にはY=0座標1, 5, 9...X補正なし

Y=11	→X=-0.030(座標2),	29.370(座標6),	60.970(座標10)
Y=22	→X=-0.059(座標3),	29.341(座標7),	60.941(座標11)
Y=32.9	→X=-0.089(座標4),	29.311(座標8),	60.911(座標12)

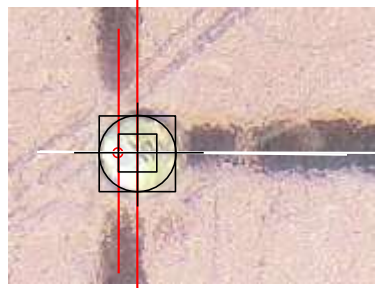
●縮尺X=100 %, Y=100.3 % + 傾斜補正2.7mRadのマスクでの平均合致性計測 → 傾斜はより強く(3.5mRad), Y縮尺は少なめ(100.2%)



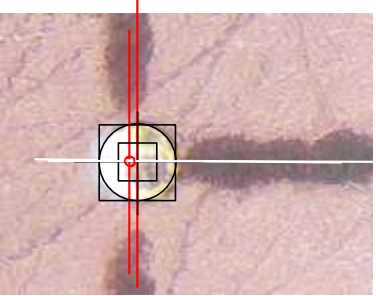
$\Delta \mu\text{m}$
 相差 **-65, 50**
 座4 (0.0, 32.9)



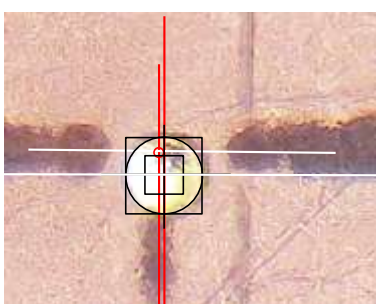
相差 **-50, -55**
 座3 (0.0, 22.0)



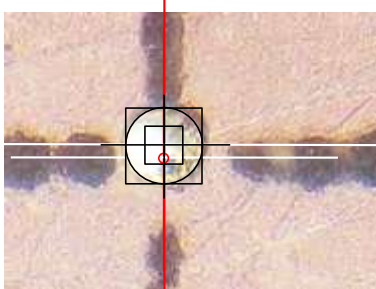
相差 **-50, 0**
 座2 (0.0, 11.0)



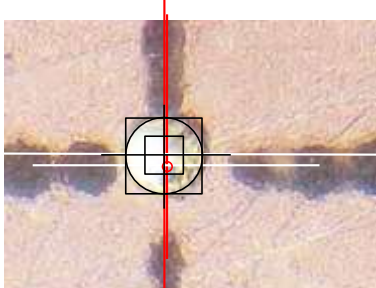
相差 **-20, 0**
 座1 (0.0, 0.0)



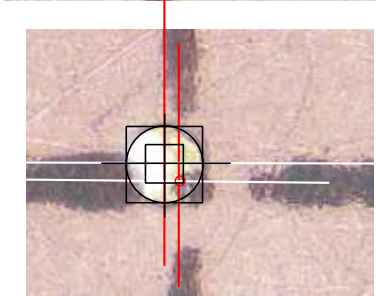
相差 **-15, 60**
 座8 (29.4, 32.9)



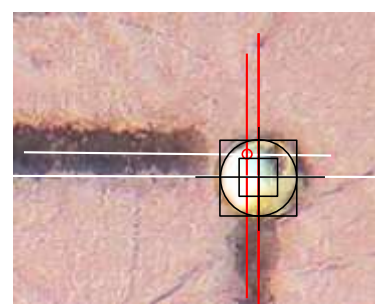
相差 **0, -30**
 座7 (29.4, 22.0)



相差 **10, -30**
 座6 (29.4, 11.0)



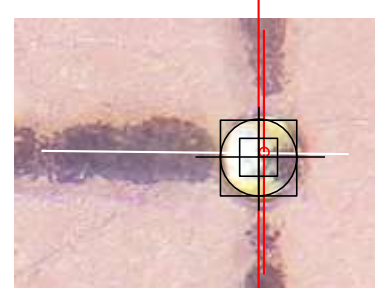
相差 **40, -45**
 座5 (29.4, 0.0)



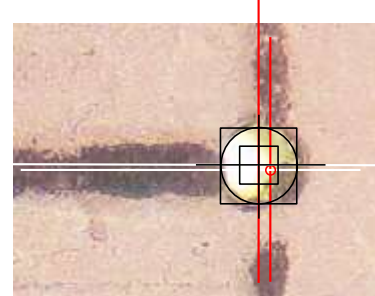
平均 $\Delta Y=57$
 $\Delta \mu\text{m}$
 相差 **-30, 60**
 座12 (61, 32.9)



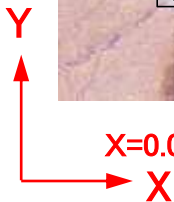
平均 $\Delta Y=-42$
 相差 **0, -55**
 座11 (61, 22.0)



平均 $\Delta Y=10$
 相差 **15, 5**
 座10 (61, 11.0)



平均 $\Delta Y=-20$
 相差 **30, -15**
 座9 (61, 0.0)



X=0.0系列の計測

max $\Delta X=-45$

X=29.4系列の計測

max $\Delta X=-55$

X=61.0系列の計測

max $\Delta X=-60$

●傾斜補正の最適化とX,Yの縮尺最適化で本方式のズレ限界

前のページの図は、穴開け位置を2.7mRad左回転させたプリント基板に、縮尺X=100%, Y=100.3%のPETマスクを重ね合わせてみた場合です。図を一見して分かる通り、当初より合致度がずいぶんを良くなっているし、まだX軸の左傾斜の傾向が残っていることにも気付きます。

ΔX の-最大値は座標4の $-65\mu\text{m}$ 、+最大値は座標5の $40\mu\text{m}$ です。またY値の-最大値は座標3, 11の $-55\mu\text{m}$ 、+最大値は座標8, 12の $60\mu\text{m}$ となりました。この結果からアライメントの調整でXを $12\mu\text{m}$ 右に、Yを下に $2\mu\text{m}$ 平行移動することでそれぞれX値が $\pm 52\mu\text{m}$ 、Y値が $\pm 57\mu\text{m}$ の範囲に収まることが分かります。

これらを修正値をさらに変更して

縮尺X=100%, Y=100.3% + 傾斜補正2.7mRadを

→縮尺X=100%そのまま、Y縮尺は少なめの100.2%, 傾斜はより強い3.5mRad

とすることで $\Delta X, \Delta Y$ とも $\pm 50\mu\text{m}$ 以下のアライメントが実現できることが予測されます。残るY軸上の特異点バラツキは正体不明(多分プリンタのf- θ レンズの歪み)のためこれ以上は手が付けられません。これが限界です。

一方、プリント基板上のスルー・ホールのはたぎりは裏がベタGNDの場所なのでマウンド対マウンドの場所だけ気を付ける対応で問題の多くは回避可能だと思います。これらを加味したスルーホール用の裏表のマウンドサイズは最小で $500\mu\text{m}$ 角まではCNC使用の穴掘りであっても可能と言えます(手作業穴開けの方がはるかに合致精度が高い)。CNCにこだわる理由は手作業による穴あけには体調も絡んだやる気と根性が必要と言う理由(楽をしたい)ばかりではありません。手作業による 0.15ϕ の穴あけではドリルの刃の破損度がすごく高くなるという壁を乗り越えたいという事情もあるからです。

●おわりに

今回はCNCを使用して ① スルーホール用 $0.15\phi \sim 0.2\phi$ 開口をルータで行う(CNC穴あけ後にPETマスクで露光)

② ドライフィルム of 描画露光を405nmレーザで行う(CNCで露光と穴あけを行う)

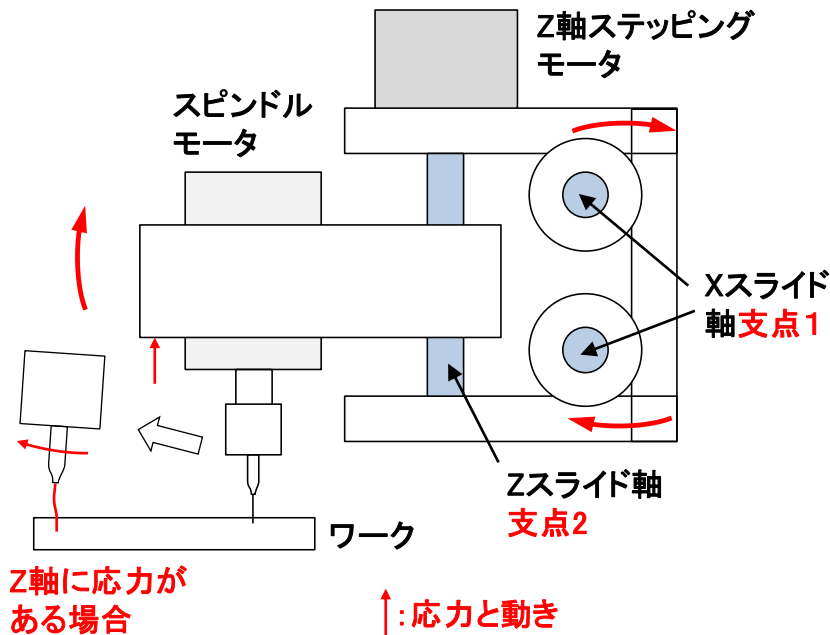
の内の①の可能性を具現化した段階です。①の難題は解決しましたが、②を手掛ける前に①の実践を積み練度を高める必要がありますのでとりあえず予定している②の技術レポートである

「CNCは顕微鏡手芸に使えるか(露光編)」の挑戦はしばらく後になると思しますので、①の技術レポートを

「CNCは顕微鏡手芸に使えるか(穴掘り編)」として終了します。

*** スピンドル軸の剛性(あご上り)問題・追補版 ***

切削中にZ軸に力が加わるとモニター画像ではドリルの湾曲がはじまるのが確認できます。これは明らかに僅かでも負荷が増える時のZ軸のしゃくり上げ(あご上り)が起こっているためです。その様子を下図に示します。



安価CNCのZ軸がしゃくり上がる機構

Z軸に力が加わると図中**支点1, 2**が**一番弱い場所**となります。特に**支点2**の剛性を高めることが重要です。Y方向(図では左右)の位置をずらしたもう1本Z軸を加えた3点スライド軸構造とするか、通常のフライス盤と同様Z軸は同軸保持(理想的ですが、それでは安価な商品にはなりませんし、無いものねだりと言いか本格的CNCになってしまいます。ここは切削時間がかかってもZ軸の下降時のF値を小さく(遅く)するしかないのかもしれませんが。

一方、Gコード実行プロセスの確認とドリル軸のモニタ監視を同じパソコン画面上だけで行えるようになったのは大きな進歩でした(実際実物をチェックするのはワーク取付時の確認とリセットを行うときだけで、切削時はモニタ監視の方が動作の詳細状況が把握できます)。

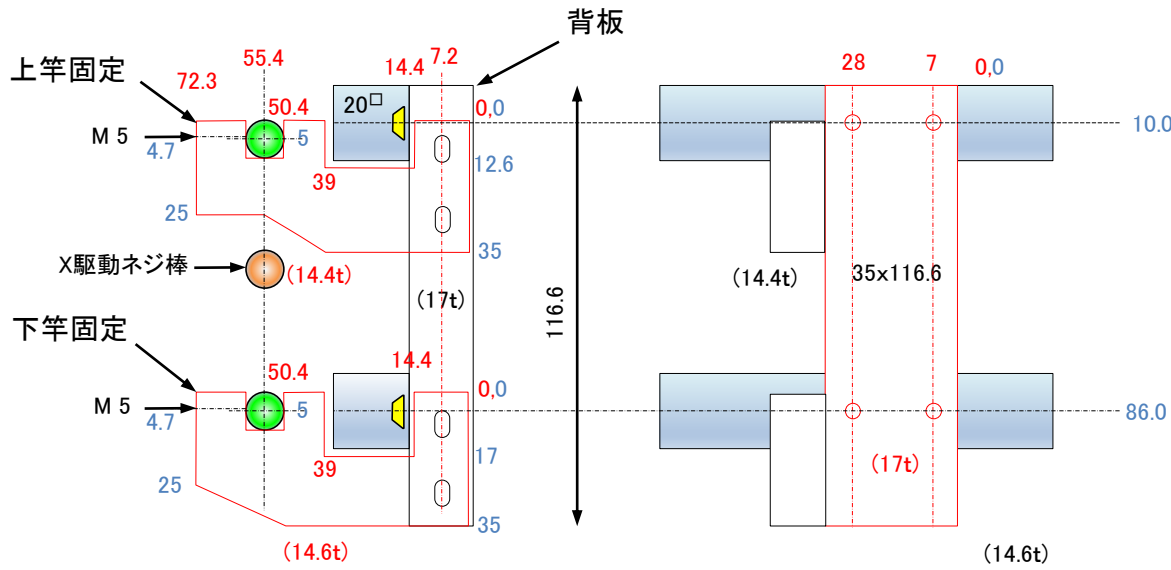
しかし、上述してきたように課題満載です。こんな状態ですからまだやればやるほど、課題が増えていきそうです。安価なCNCを精密なマシンとして利用するのは結構大変そうです。**実用化は早くて数か月後となりそうな気配**になってきました。

●テンションゲージで測定したらXスライドもへボだった



先に、**支点2**がへボであると記述したが、テンションゲージを各場所に当てながらドリルの刃先の変位を計測してみたところ**支点1**の方も**問題である**ことが分かりました。つまりZ軸のあご上りはZ軸そのものばかりではなくX軸も原因だったのです。それは2本のXスライドのSUSレール(10φ)が360mmの長さに対して**華奢なためZ軸に力が加わるとたわんでいる**のです。本来、この構造のままであればX軸の長さは1/3(120mm)にすべきです。**大は小を兼ねるとの考えは間違い**でした。購入してしまった限り貧乏人にとっては買いなおすよりも補強をするしかありません。

そこで今行っている比較的小さい母基板専用**Xのスパンを1/2に限定固定した場合のZ軸強靱化治具**を製作することにしました(最初からXスパンの半分の製品を購入していればこんな治具の製作は不要だったのです)。



● Z 軸強靱化ステーション5(縮尺1/2):製作途中で改良アイデアが出てくるので図面修正4回目



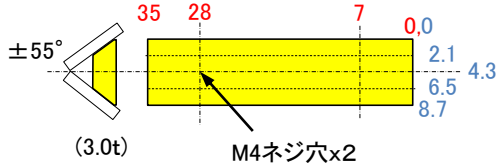
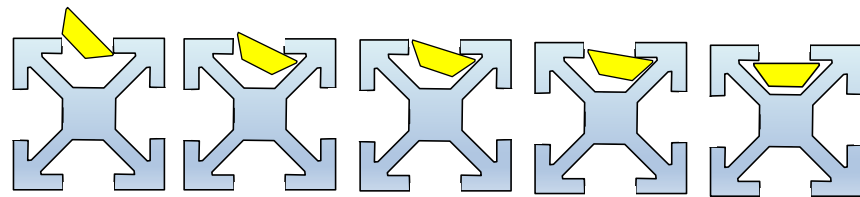
既存構造体

-  SUS製X軸スライドレール
-  Al製引き抜き架台一部
:チャンネル

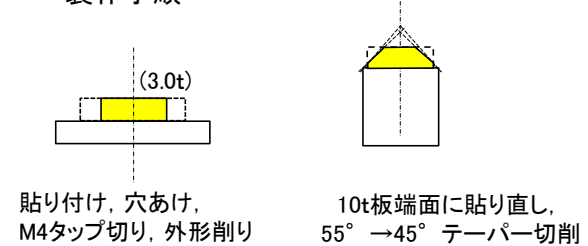
追加加工物

-   50アルミ
- M5: プラスチックネジ

チャンネル(架台)に背板を固定する2連特殊ナットの製作(等倍)



製作手順

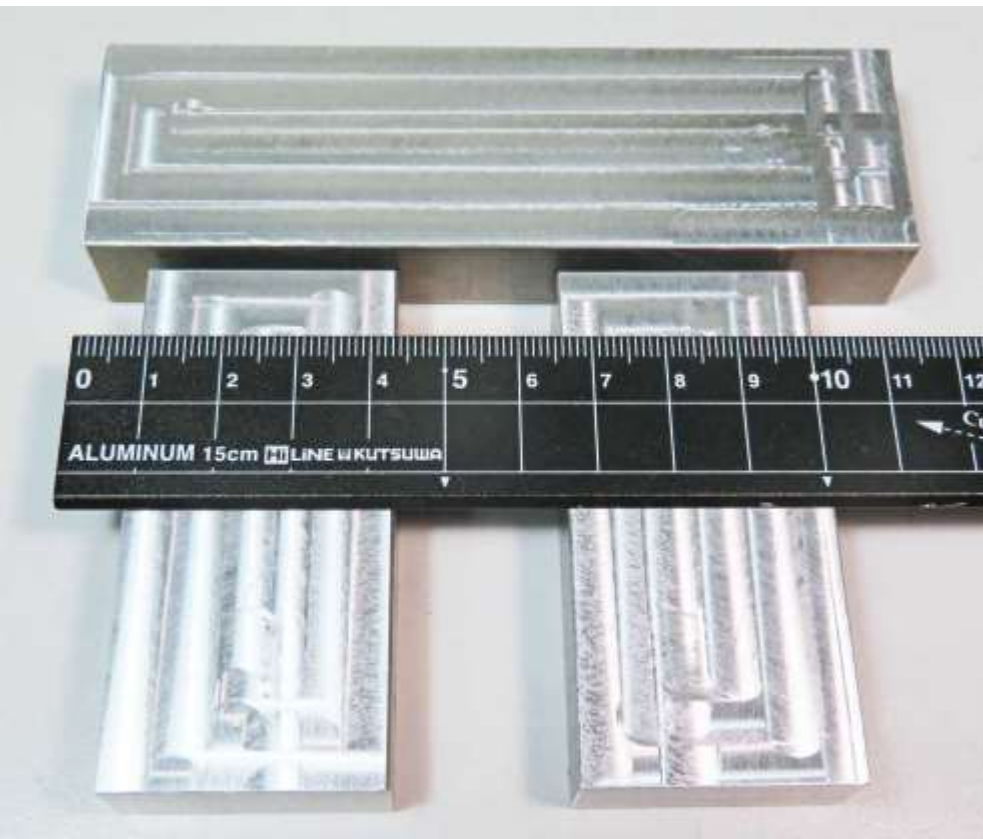




●2連特殊ナット

チャンネルの溝に上からはめ込み，法線方向から引っ張ることで溝に引っかかりナットの役目をさせ背板を固定する，2連特殊ナットを2個製作した(左図参照)。

できるだけ引っ掛かり面を多くして強くしたいので，フライス切削後にヤスリで徐々に細くして，最後にパチンとはまり込む(取る時もグリツとなる)手仕上げで製作。材質は硬い50アルミです。



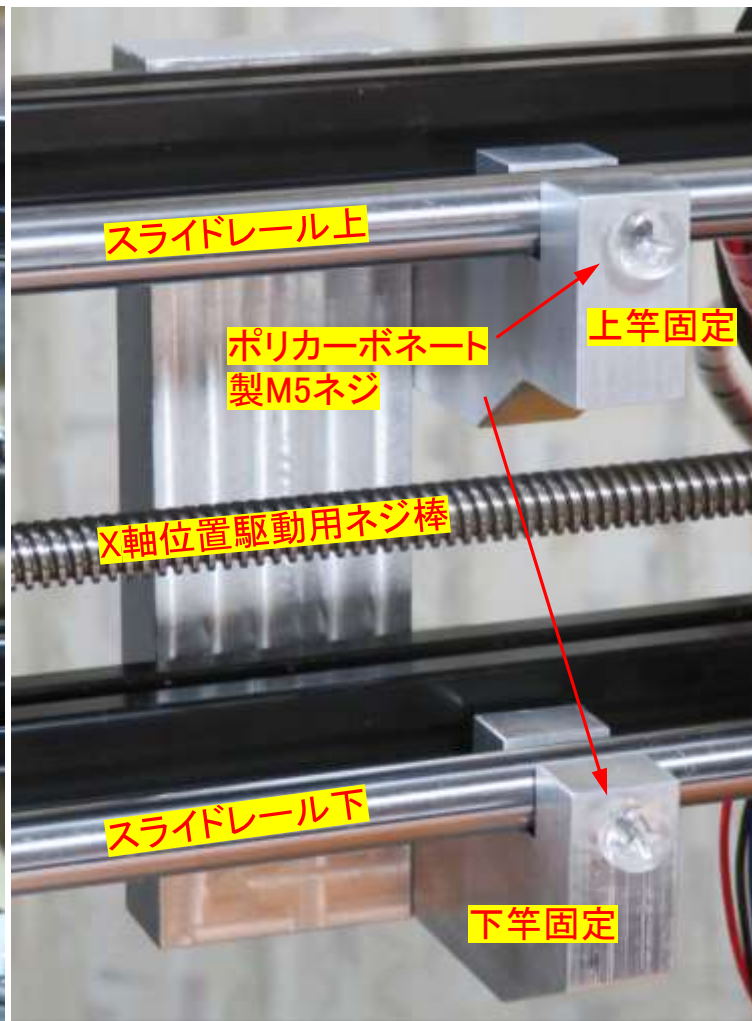
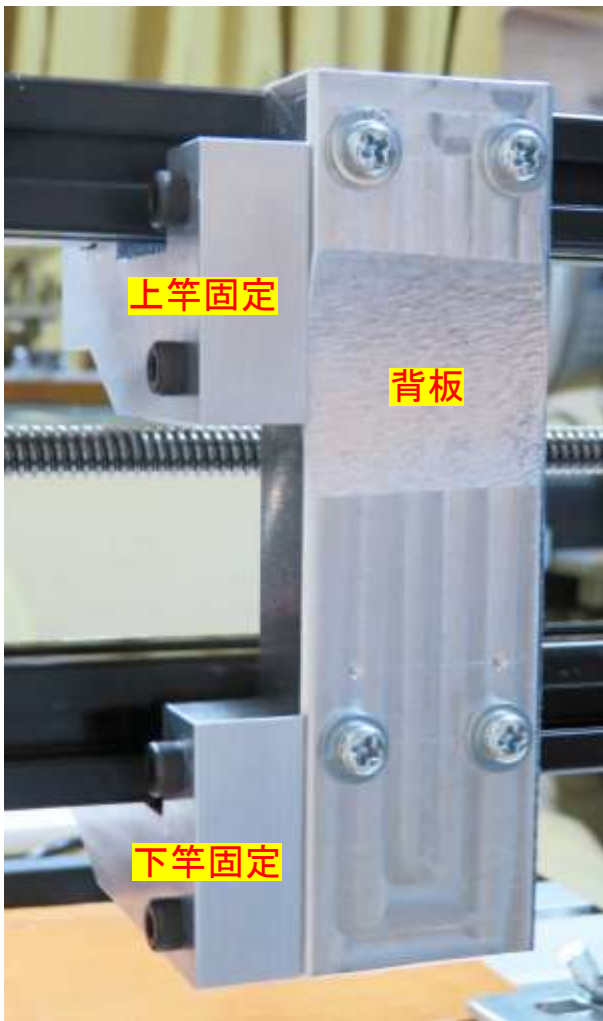
●3つの構造体の切り出し

左図に示すブロックが300x300, 35tのデカイ板から切り出した主要3点です。上が116.6x35, 17tの「背板」用，左下が72.3x35, 14.5tの「上竿固定」用，右が「下竿固定」用です。この段階では寸法は同じです。

この切り出しには元ブロックが重量級で，大きいので結構時間もかかり大変です。最初は，非力ながらバンドソーを使って数時間かけて～2mm大きめに切り出し，目的寸法に落とし込むために8φのフライスで削りだしています。結構な量の切削屑が出ます。

● 組立後の取付写真

製作した個別部品の説明は図面の通りなので省略し、これら部品を組立た状態での写真説明をします。



左の写真は裏から見たものです。上、下のチャンネル(架台)に入れてある2連特殊ナットを使ってM4の+ネジで背板をX軸のほぼ中央に固定してあります。内側(スピンドルのある側)の左側面にM4の六角ボルトで上下それぞれの「竿固定」ブロックを取り付けてあります。

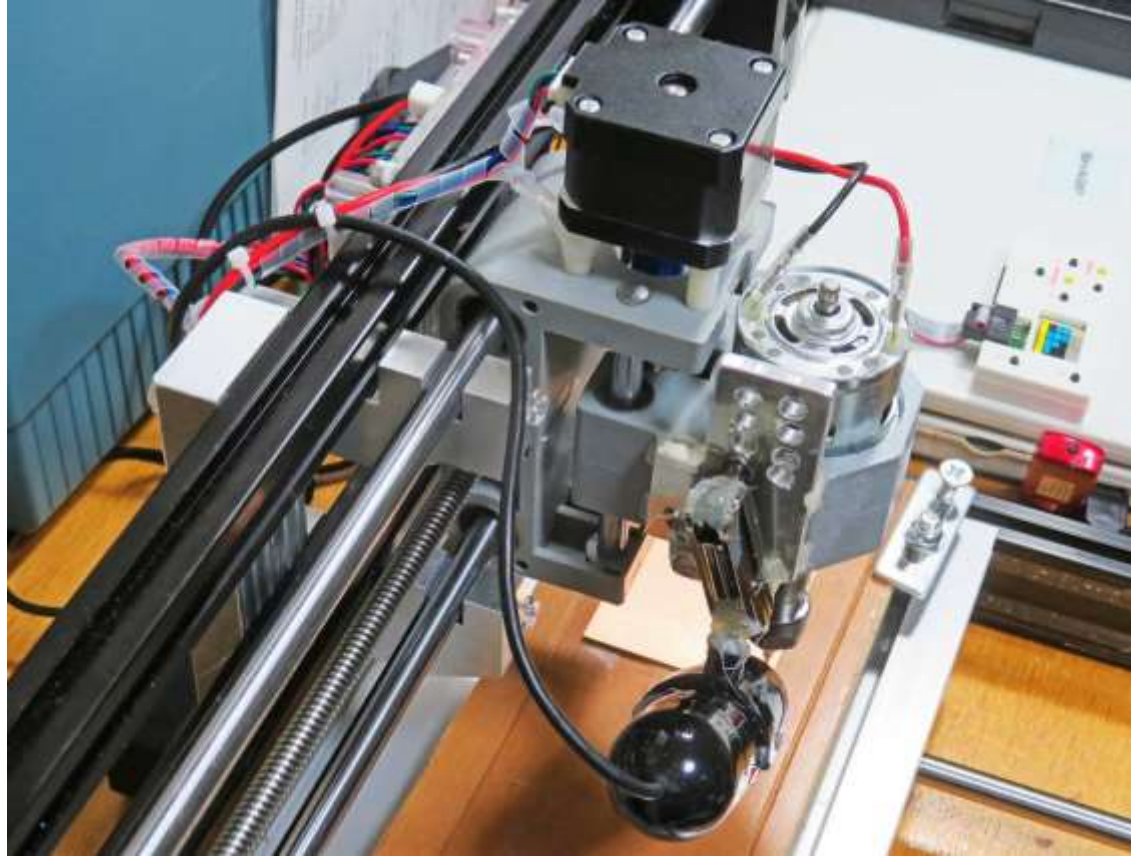
これら竿固定ブロックは10 μ m単位の高精度加工で製作しています。背板の上下のネジ4本を緩めることでX軸の位置をスライドして変更できます。

右の写真は前から見た様子です。上下の竿固定ブロックの凹受け部はスライドレールを軽く押し上げる様にまた押し出す(手前側)様にして六角ボルトを締めていますので、手前のポリカーボネートM5ネジを締めることで、スライドレールはがっちりと固定されます。凹部は上がオープン

となっていますのでスライドレールのずり上がりが心配されますが、M5ネジの位置はスライドレールの中心位置より0.5mm上に配置してありますのでスライドレールを抱え込んでおり、ずり上がりが防止出来ています。

この対策でスライドレールは横から力を加えてもびくともしなくなりました。また、スピンドル側のZ軸を上下に力を加えても殆ど動かなくなりました。感覚的にZ軸のあごのしゃくり上げが1/5以下になりました。大成功です！

目いっぱい左右にX軸を振っても160mm(Yは元々180mm)はありますから当分はこの状態で稼働できます。またX軸を左右に振っていてもビビリ音が消えるという予想外の嬉しい副産物も得られました。



上左写真はX軸を右20mm残して止めた状態です。右写真はX軸を中央、追加した竿固定部の手前15mmで止めた状態です。どんどん良い方向に改良されていくので、今後はストツパに当たりオーバーロードで止まる様な若葉マーク・トラブルを起こさない様大事に扱おうと気持ちを新たにしました。

● モータの固有振動も消えた！

さらにうれしい出来後です。以前は回転Fが500~900の間は固有振動(ビビリ音も)のためにドリルの刃先がぶれて使えなかったのですが、**竿固定ジグを装着してからは回転数全領域でブレが無くなった**のです。スライドレールのたわみとの競合振動が消えた様です。振動の無い回転数範囲でしか使えなかった制限が消えたのです。素晴らしい！

実践でどれだけの能力を発揮してくれるのか楽しみです。

追:この際とばかり、Xのスライドレールの左右(300mm)平行度を確認しました。その結果0.1/300以下、つまり0.33mRad以下と組立作業には問題がなかったことが再確認されました(やっぱり傾斜問題の元凶はプリンターだった)。

● 0.15φの穴開け確認

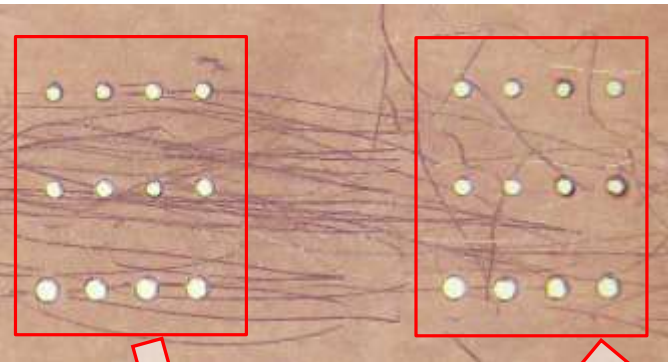
高い周波数を安定動作させようとする場合は裏GNDと表GNDのスルーホール短絡の密度を高くせざるを得なくなります。部品密度が高くなるとこのスルーホールが邪魔です。スルーホール開口を現行の0.2φから0.15φへ移行したかったの

ですが、手作業での穴開けではドリルの破損が多く躊躇していました。今回はCNCでの各種問題が解決してきたので、0.15φの穴あけテストです。

左上の写真は0.3t両面基板に0.2φと0.15φの穴あけを行った結果です。左の赤枠ブロックがスピンドル回転S400(6000rpm)、右がS1000(15000rpm)の場合です。それぞれのブロックの拡大が下の2枚の写真となります。表面が傷だらけの理由は給油に1ccの注射器を使ったため、そのSUS針が当たって付けてしまったことが後で判明しました(要改善)。今回の大きな収穫は、モニタ画面を注視した限り**切削時のあご上り現象が全く起こっていません**です。

下左(S400)右(S1000)の拡大写真それぞれの内訳は下段:0.2φ, 中, 上段

:0.15φの穴です。ドリルの刃が基板に接触する時の下降スピードが、中段がF0.5, 下段がF0.1と異なっています。これはドリルの刃が細くなるほど表面のチョットした引っかかりで簡単に湾曲してしまうことを気にしてのことでした。ドリルの回転スピードが高く(右), 接触時の下降スピードが低い(上段)ほど正確な位置に穴あけが出来るのではないかとパラメータを変えてみましたが回転スピードが高い方が綺麗な様な気がします。これは**多くの穴開けを行い成績を見なければ判定は困難**です。



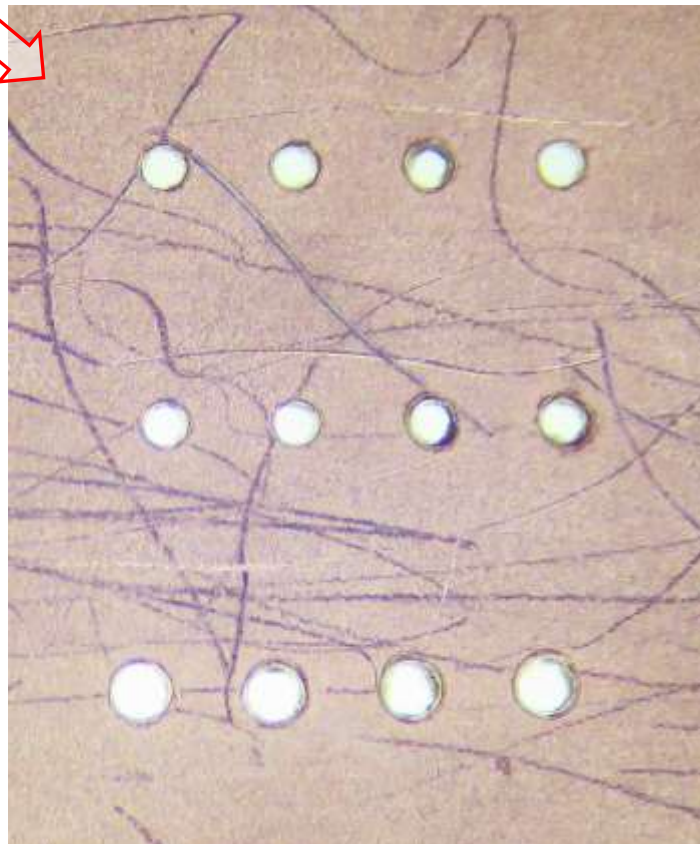
S400

S1000



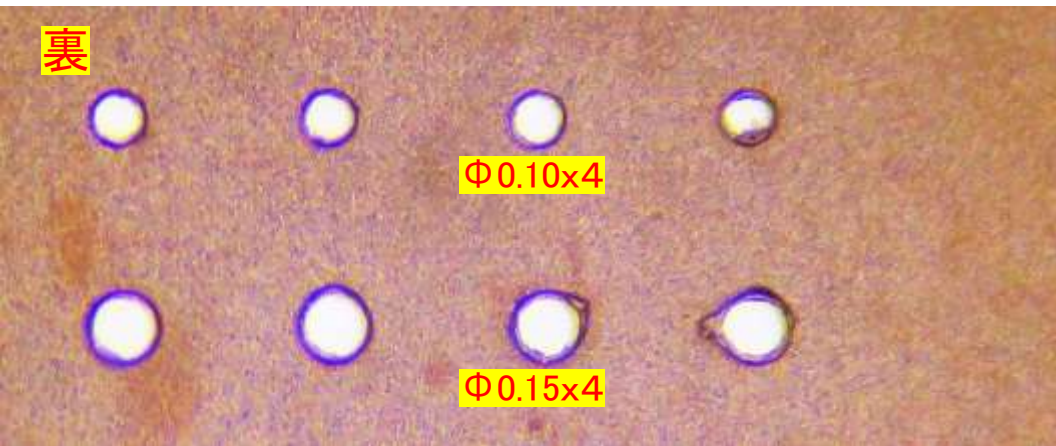
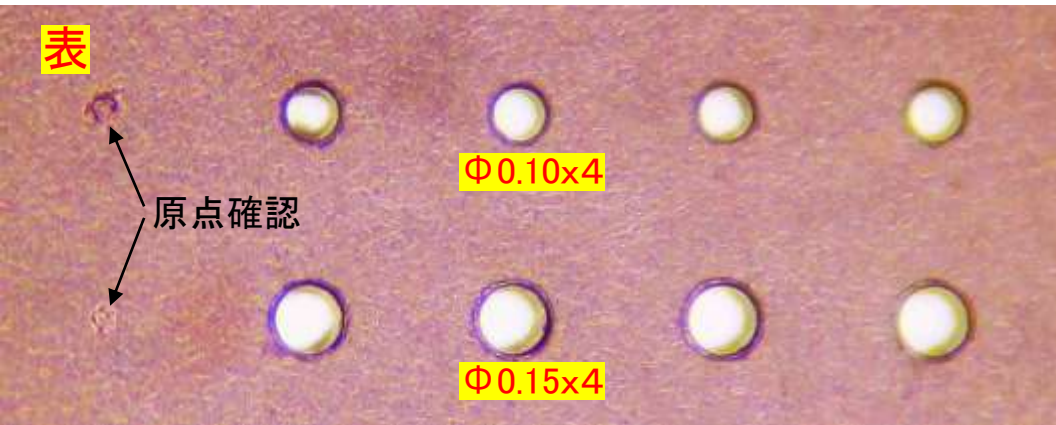
Φ0.15x8

Φ0.20x4



● 0.10φの穴開けもOK!

Aliさんから3.175φシャンク用予備のドリル・チャックが届きましたが、これも軸の偏芯があり、ヘボです。こうなったら頑張って偏芯を打ち消す取付方で頑張るしかありません。30分もかけてやっと±25μmの偏芯に納めました。これで0.1φ穴開けに挑戦です。左上図が穴あけ後の表です。下の4穴がφ0.15で上4穴がφ0.10です。綺麗に0.10φの穴も開いています。下が左右反転の裏の様子です。裏も綺麗に抜けていますし、バリも許容範囲です。



写真の右側がぼけていたり紫のリングが穴の周辺に見えるのは、それぞれ実体顕微鏡の対物レンズがロンパリになっているため高倍率では全画面にピントが合わない、使用しているレンズが安いアクロマートレンズであるため色収差が出ているなどのためです。

NCNのステージも出っ張りが無い様に改良していますのでその様子を右の写真に示します。硬質床板の上に乗せているプレートは1.5tの生基板で、穴だらけになったら交換するやといになります。