

CNCは顕微鏡手芸に使えるか(レーザー露光編)

大塚 康二

●CNCを使ってホトレジスト露光に挑戦

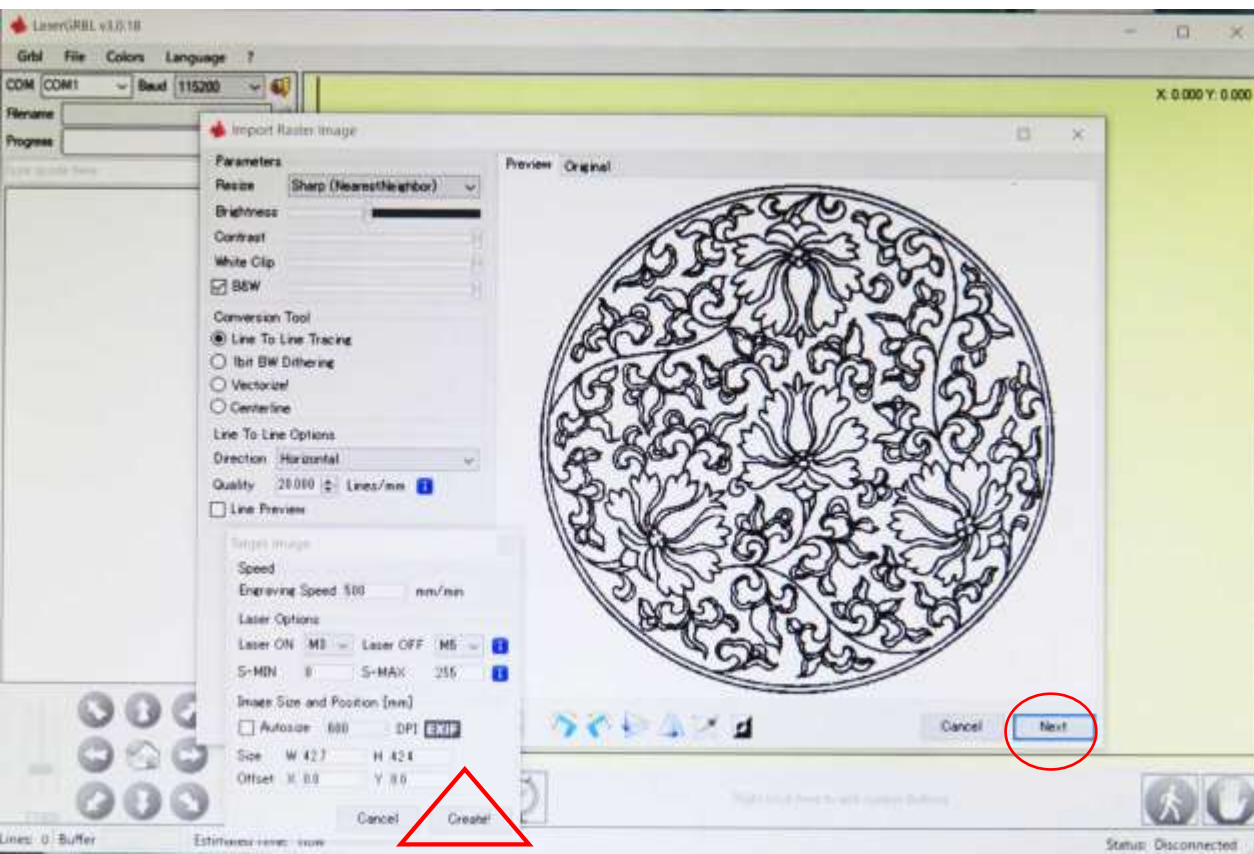
今回購入したCNCはレーザーも付いているので(と言うかスルーホール形成をルータで、レジストの露光をレーザーを使うつもり)いよいよルータをレーザーに換装しなおしてのトライとなります。描画パターンがどこまで緻密に描けるかですが、成功率は正直半々です。これが失敗すると、穴開けはCNCルータ、マスクはキャノンのレーザー・プリンタという相性の悪い組み合わせとなってしまいます。

●最初はサンプル画像を木材に焼き付け

使用するソフトは添付されていたLaserGBRL V3.0.18を使います。開くとレーザーCNCのコントローラです。このままでは

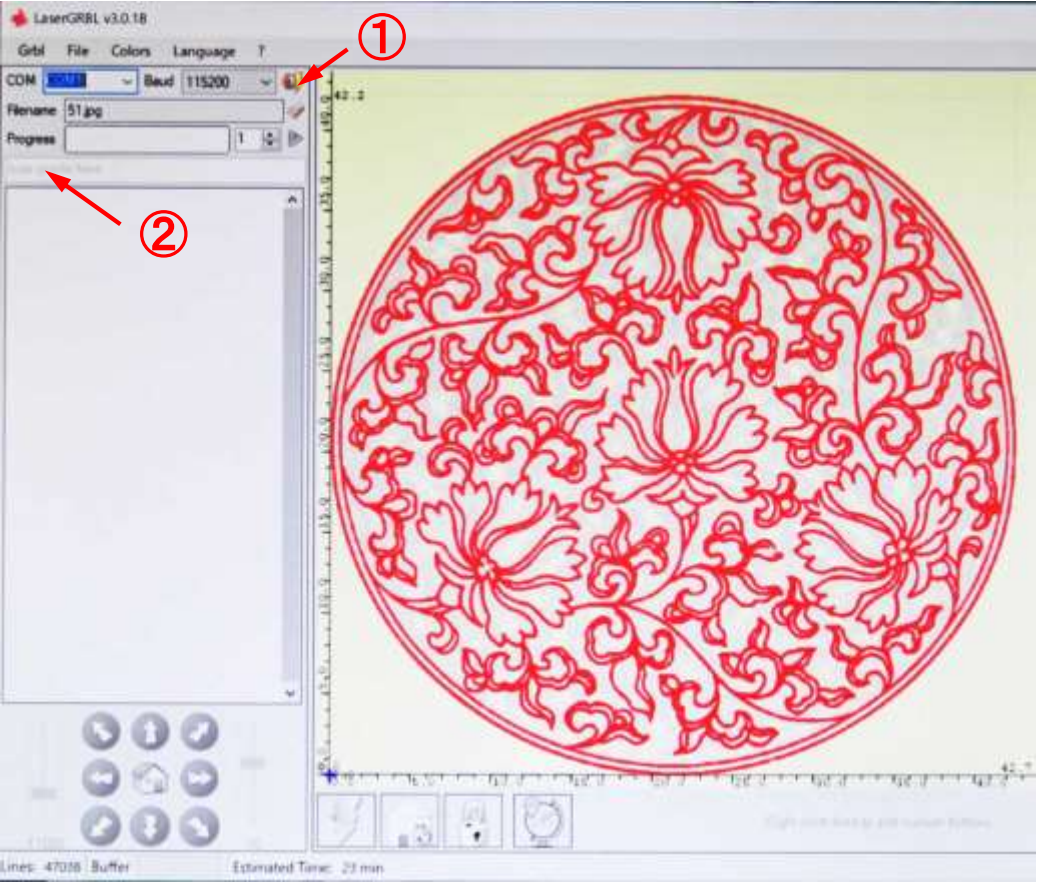
画像ネタがありませんから、Fileから添付のサンプル画像51を選んだ状態が左図です。この新しいウインドウで描画条件を設定するのです。上からResizeはSharpを、Brightness中間、白黒しか興味がありませんから、Contrast最大、White Clip最大、当然B&Wにもチェックを入れます。その下はスキャン方法です。Line To LineをチェックしてHorizontalを選びます。Qualityは最高で1mm当たり最高の20本(50 μ m以下の高精細は無理なんです)のままです。

赤丸枠のNextをクリックするとまた別な画面が出てきます。画像の縮尺です。デフォルトでは300dpiですが、限界の50 μ mラスタをイメージしてギリギリの600dpiにしました。するとイメージサイズが85 ϕ が42 ϕ に縮小しました(実際は508dpiで丁度50 μ m限界ステップです)。



少し戻りますが、S-MINとS-MAXはレーザーがオンの時とオフの時の出力パワーです。ここを255(最大)にして走らせてみます。Engraving Speedは描画速度で、デフォルトは1000になっていますが、丁寧に描画してみようと半分の500を入力してみました。この窓の赤三角のCreate!をクリックするとGコードが生成されます。この画像では膨大な量となります。

Createをクリックすると初めに開いたLaserGBRLに戻り、下図に示す様な描画条件の組み込まれた画像が表示されます。このまま走らせても良いのですが、一応Fileとしてセーブしておきます。



CNCと接続するために左図①をクリックして×マークにしてから、②に”M3 S10”～”M3 S50”の弱い強度のGコードを入力をして焦点合わせを行います。それでも光の強度はかなり強いので眼鏡が必要です。しかし、強烈な光の点を最小化する焦点合わせは結構困難です、これは別途後述します。



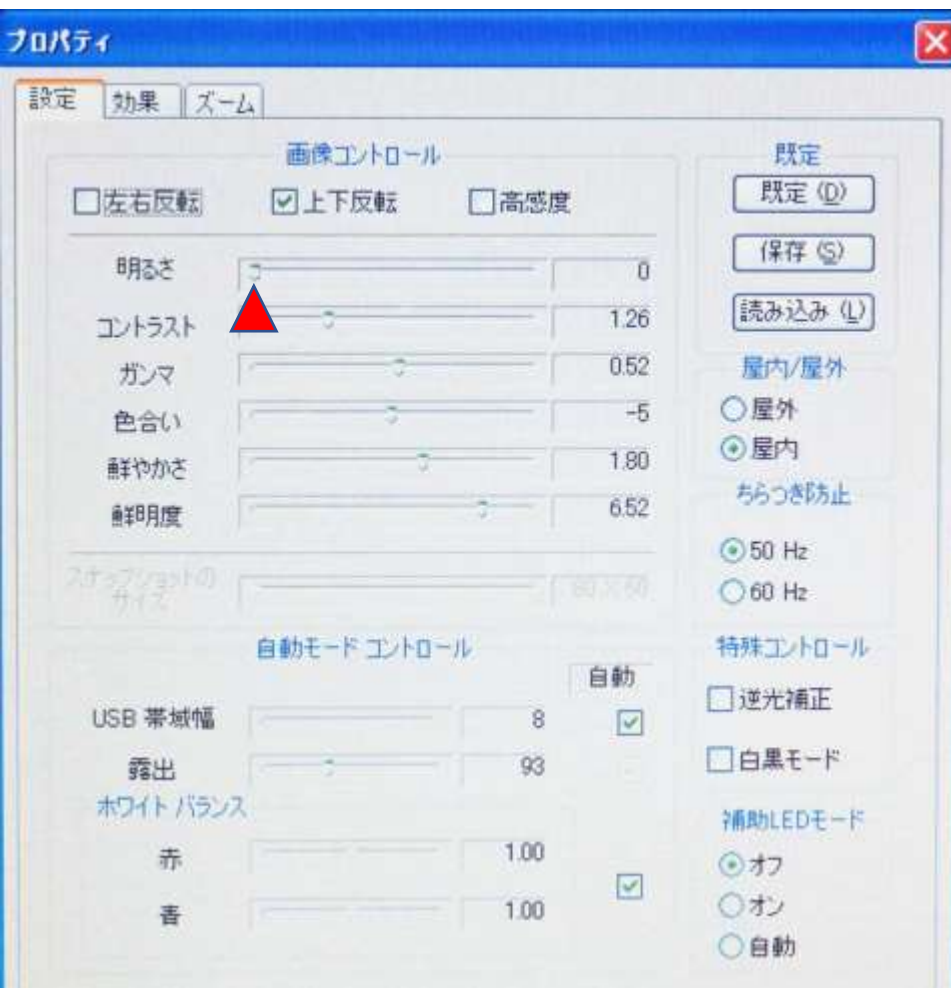
●描画に5時間もかかった

右図が合板に描画した結果です。実は失敗作です。丁寧にじっくり焼いたので色が付けば良いところを最深で1mm近く掘ってしまいました。描画時間が5時間もかかったのです。見比べれば細かい2本の線が結構重なって太い1本になってしまっています。

●なんかレーザーの色が変だ！

前のページの木材に刻印した時に、気が付いていたのですがレーザーの色(当然ですが直接ではなく回りに反射した色)が青に近い青紫色なのです。しかし間違いなく405nmのレーザーだと信じていました。レーザーを絞った状態にするには①モニタの感度を最低に落して高輝度となった焦点位置でのスポット径が確認できるようにする。②レーザーの出射口からフォーカスポイントまでの距離を狭めてレーザーの出射像をより小さく結像させるの2点があります。

①の対策として撮像素子の感度を最低にすることは左下図赤三角に示す様にすでに行っています。後は受光口に減光フィルタを取り付ける方法です。これは後述します。②の対策としてはレーザーを基板側により近づけることです。早速レーザーのホルダを緩めて下方に10mmずらしました。そこで隠れていた右下図のラベルを見てびっくりです。なんと波長450nm, 1Wです。これでは、ドライフィルムを感光させることが無理です。私が間違ったか、騙されたか確認です。



●私の勘ちが良かった

カタログを見直してみたら当初決めていた機種(右上)が405nm,1Wのレーザで、それと同じ内容だと思っていた機種(右下)が450nm,1Wのレーザだった。それ以外のフレームを除くパーツは全て同じだし、価格も同じなのでフレームにねじり変形が起きにくい構造の下のプロを(勘違いで)選んでしまっていたことが判明した。

私の痛恨のミスだ。ドライフィルムの感光波長帯域は450nmから立ち上がる特性なので、光の効率が極めて悪いのだ。

仕方ないので急遽405nm, 500mW / ¥2,735を注文する(描画露光には500mWでも十分なパワーと思われる)。

11月11日のゾロ目セールなので、届くのが早くて11月末となる。それまでは現状に450nmレーザを使った予行演習となる。

当初決めていた機種

ミニレーザー彫刻機 Cnc 3018 レーザー彫刻 DIY 趣味切削工具 ER11 GRBL 木材 PCB PVC ミニ CNC ルータ CNC3018

制御ソフトウェア	GRBL 制御
建設	アルミ+プラスチック
作業領域	300*180*40 ミリメートル
フレームサイズ	400*330*240 ミリメートル
スピンドルモーター	DC24V、最大 120 ワット、10000 rpm
ステップモータ	DC12V 1.3A 0.3N.m
電源	入力: AC100-240V、50/60Hz、1.3A 出力: DC24V 5A
サポートされているシステム	Windows XP/勝利 7/Win の 8/Win10 ホーム
レーザー (オプション)	→ 1000 mw 12 V 405nm 2500 mw/5500 mw/7000 mw 12 V 450nm 10000 mw ことなど金属材料ステンレス鋼

内容は同じと思いねじり強度を重視

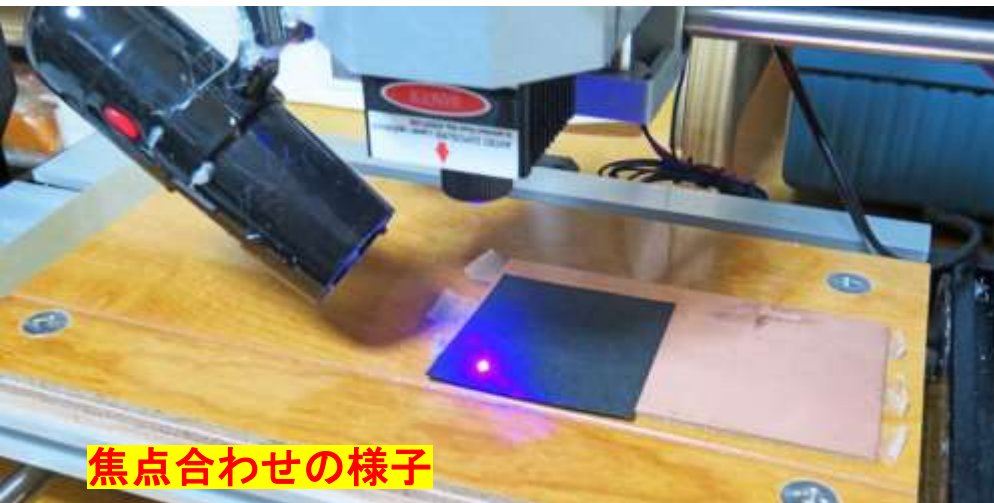
CNC 3018 プロレーザー彫刻木製 Cnc のルーターマシン GRBL ER11 趣味 DIY 彫刻機木材 PCB PVC ミニ CNC3018 彫刻

制御ソフトウェア	GRBL 制御
建設	アルミ+プラスチック
作業領域	300*180*40 ミリメートル
フレームサイズ	400*330*240 ミリメートル
スピンドルモーター	DC24V、最大 120 ワット、10000 rpm
ステップモータ	DC12V 1.3A 0.3N.m
電源	入力: AC100-240V、50/60Hz、1.3A 出力: DC24V 5A
サポートされているシステム	Windows XP/勝利 7/Win の 8/Win10 ホーム
レーザー (オプション)	→ 1000 mw 12 V 450nm 2500 mw/5500 mw/7000 mw 12 V 450nm 10000 mw ことなど金属材料ステンレス鋼

●ビデオカメラにサングラスをかける

少し操作を行っていて気が付くのは焦点合わせの時にGコードを手入力で“M3 S10”（最大出力の $10/255=3.9\%$ だからおよそ39mWに相当）のレーザ出力（PWM変調）にして黒い紙に照射して行いますが、それでも焦点での輝度が高すぎてモニター画像の直径が数百 μm 以下にはなりません（撮像素子の感度は最低）。それでは“M3 S1”にすればよいではないかと考えてしまいますが、実際に描画する段では輝度が強すぎて撮像素子のカラーフィルタの焼き付けを起こしてしまいます。そこで顕微鏡の鏡筒入り口にサングラスを取り付けることにしました（下図参照）。

左上図が焦点合わせ状態の様子です。この顕微鏡の入り口に減光フィルタを取り付けるのですが、左下図に示す100円ショップのプラスチック製サングラスをカットして減光フィルタを製作します。この眼鏡は溶接にも使える5%透過率です。これを2枚重ねにして取り付けた様子が右図です。都合0.25%（ $1/400$ ）の減光となります。強力なLEDサーチライトを絞ってワークに照射してもモニター上では真っ暗で何も見えない状態ですが、焦点合わせには丁度良いくらいなのです。

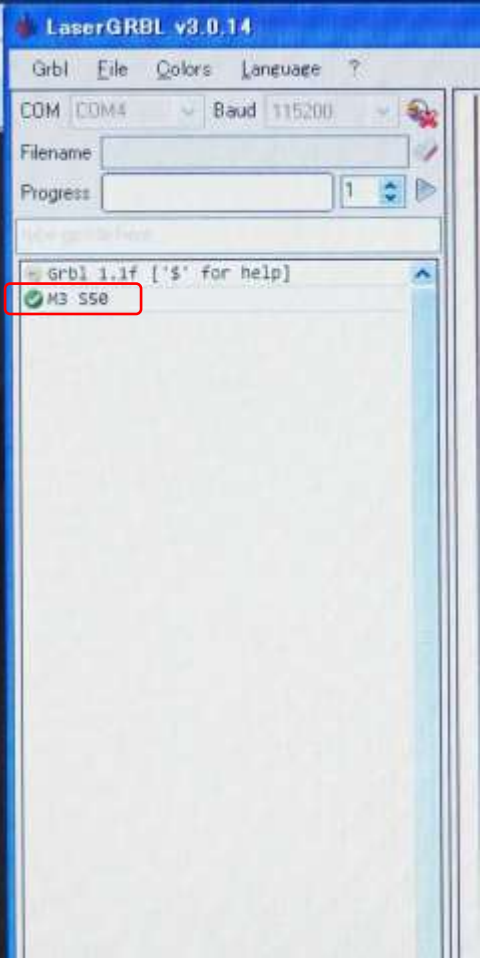


●フォーカス距離を45mmから35mmにした効果

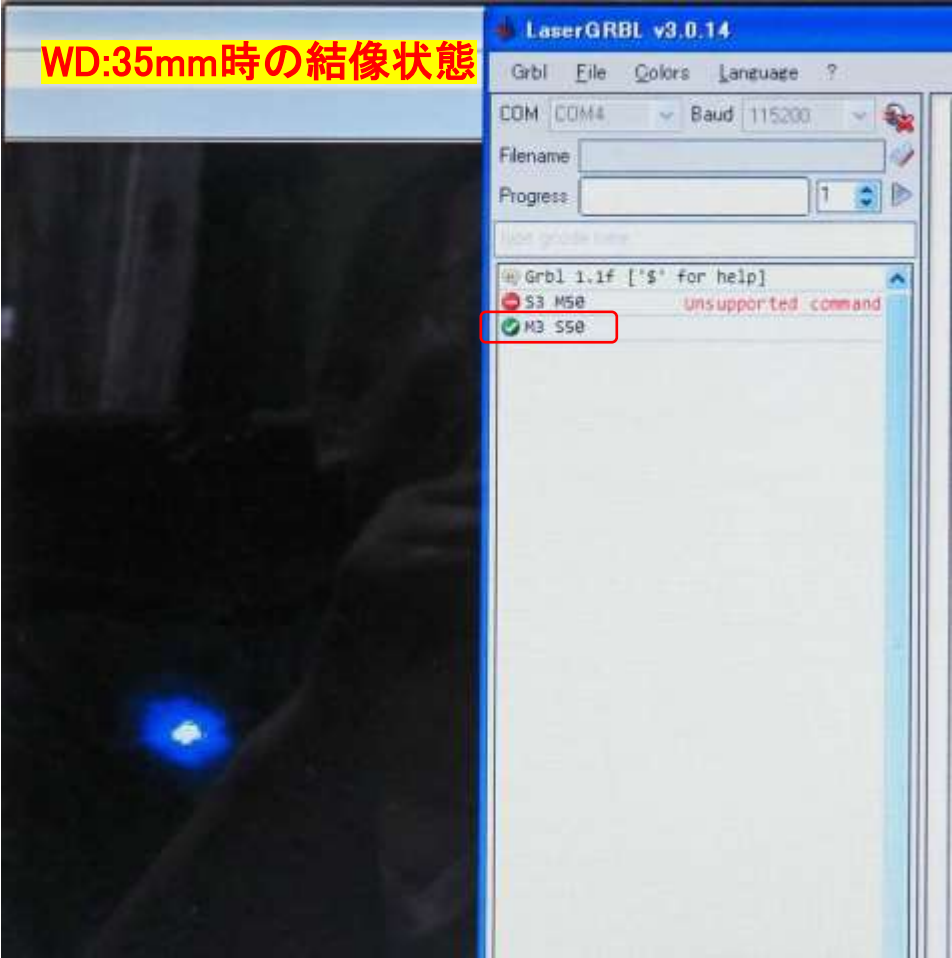
“M3 S50”, つまり196mW時の場合のフォーカス像を観察します. 前記サングラスを使用してワーキング距離(WD)が45mmの場合と35mmの場合でフォーカス時のレーザスポットを比較したのが下図となります. 左が45mm, 右が35mmの場合となります. 明らかに右のWD:35mmの方が小さくなっています. サングラスを装着していない場合は左図の赤枠くらいのハレーション像でしたからかなり改善したことが分かります.

どのくらいのサイズに絞れているかの話はチョット厄介です. “M3 S10”=39mWにして絞っていくと, モニタ画像が突然真っ暗になる(画像が無いと判断してオフ状態に, デフォーカスするとまた現れる)状態が起こってしまうのです. およそWD:35mmの状態では50 μ m程度には絞れていそうです. これを改善するには画像内に別の強力な光源像が入る工夫をする必要がありますが, CNC側の描画の最小走査間隔が50 μ mですから, あまり意味はなさそうです. 今は**少なくとも50 μ m解像度の描画が行えるかどうかの方が大事な課題**です.

WD:45mm時の結像状態

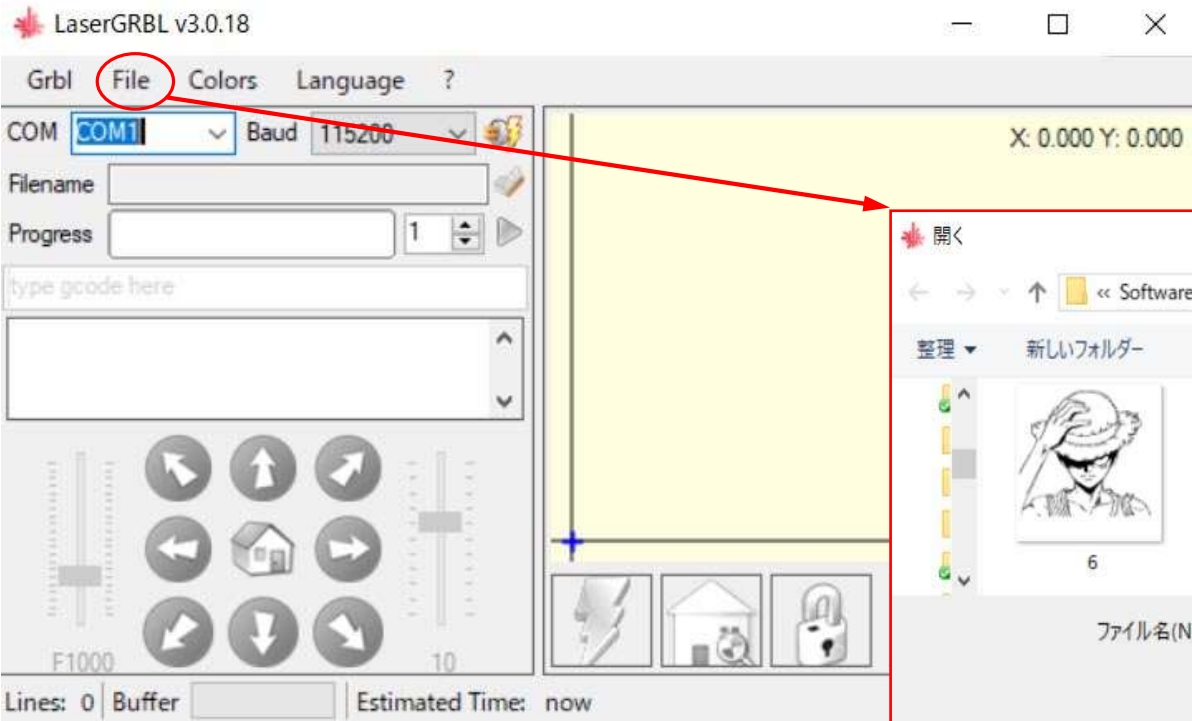
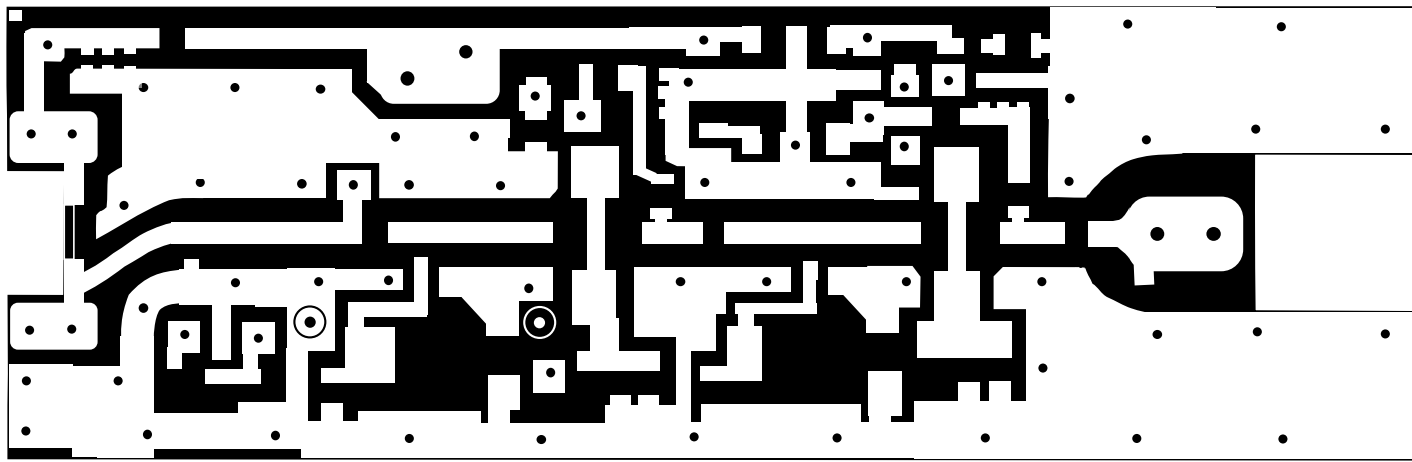


WD:35mm時の結像状態

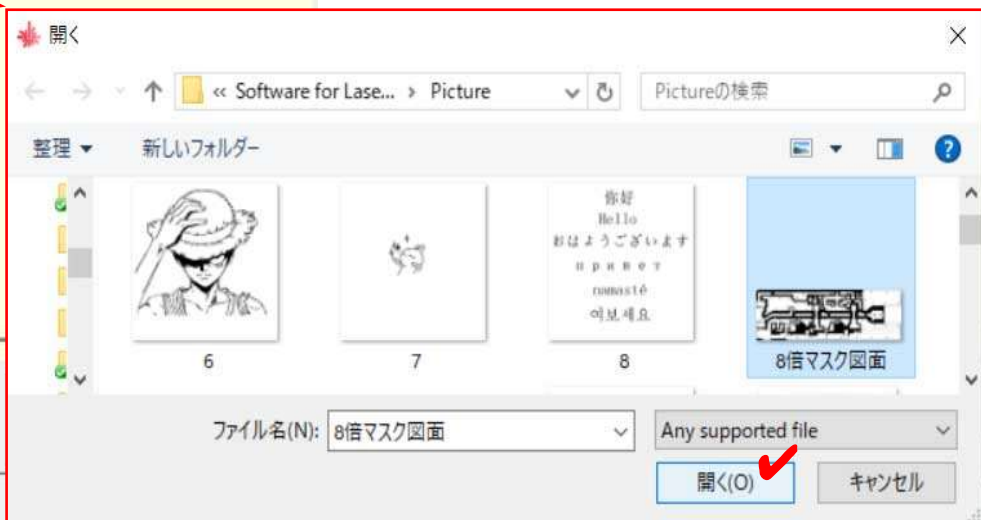


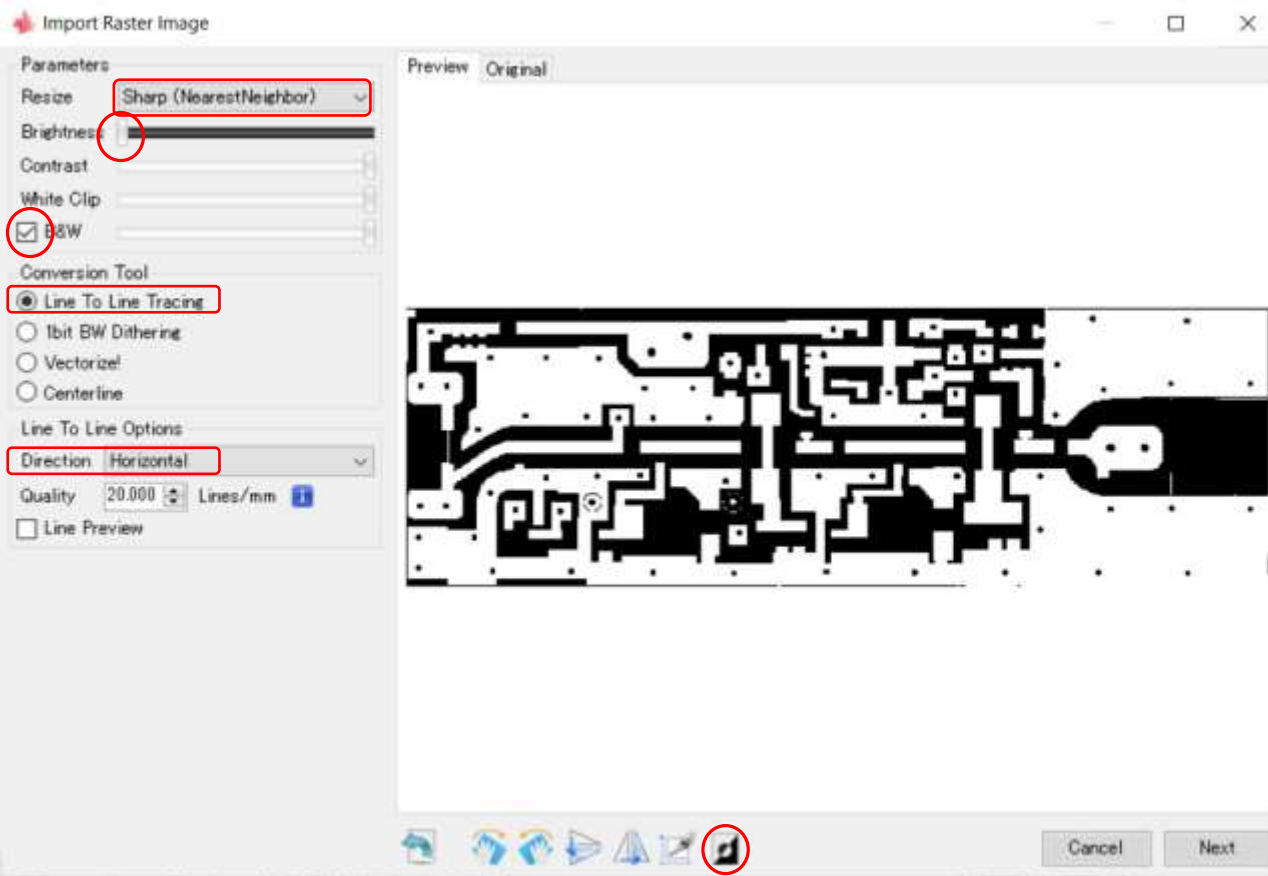
●プリント基板用マスク図面でレーザー彫刻をしてみる

最新(とは言っても3か月前)の光プローブ用の表マスク原画を木版に焼き付けてみることにします, 下図は6倍縮尺の図面ですが, 8倍縮尺のJPG画像を使用します.



まず, LaserGRBL V3.0.18を起動して, 赤丸のFileから上記の8倍画像を保存しておいたJPG画像(8倍マスク図面)を捜して開きます.



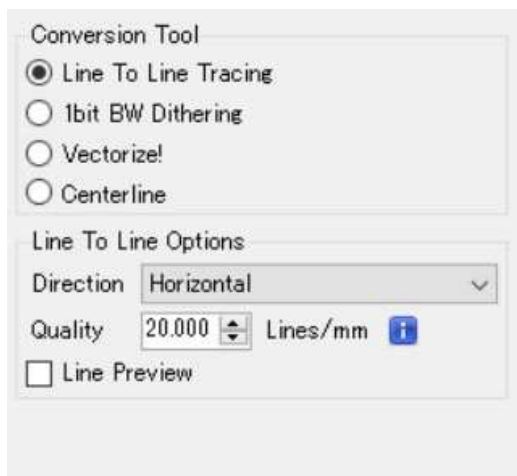


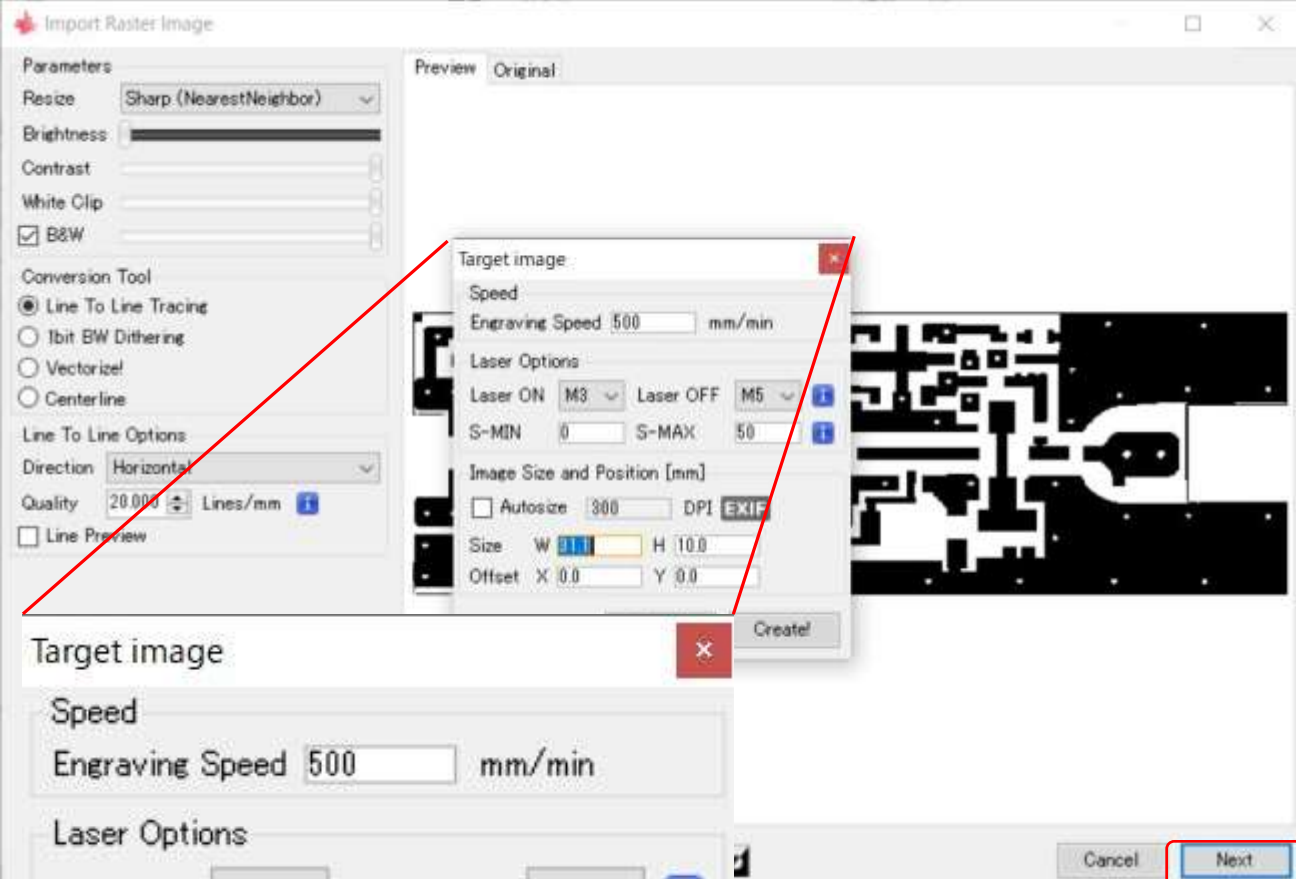
上記の画像を読み込むと別なウィンドウが現れ、そこに画像が表示されます、プリント基板のマスクですから ResizeはSharpを選択, Brightnessは最小, . . . B&Wにチェックを入れます.

Conversion ToolはPreviewで綺麗なLine To Lineを選択, スキャン方向はHorizontalで行います.

(後にLine To Lineで不都合が起こりますからこの項目は一通り効果を確認する羽目になります)

この図面はネガ用ですから, 下中央の赤丸枠をクリックして白黒反転をさせます(ネガのドライ・フィルムを使用しますからレーザー露光では回りまわってポジの画像が必要です). すると下段に示したポジ画像が表示されます. この様にして画像そのものの質の調整を行います.





画質調整が終わったところでNextをクリックするとTarget imageという小窓が現れ、レーザでの描画条件を選択する場面が出てきます。その様子を左図に示します。図では小窓を拡大して上に重ねて貼り付けてあります。

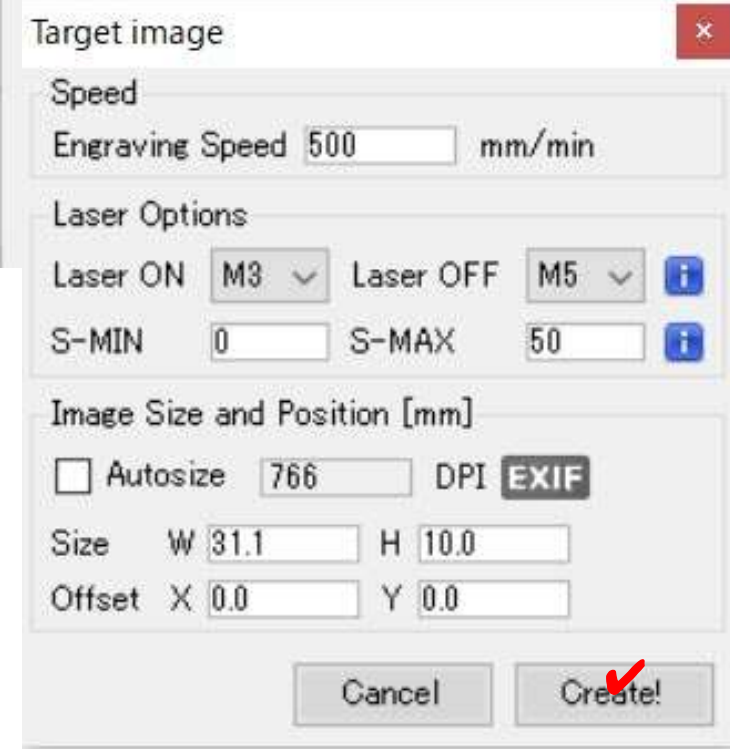
この小窓を上から見ていきます。Speedの欄では彫刻時の速度が設定できます。最初に開いた時は1000となっていて、このスピードでは空白部の移動と彫刻時の移動が同じ様です。ここではゆっくり彫刻したいので500と入力しました。

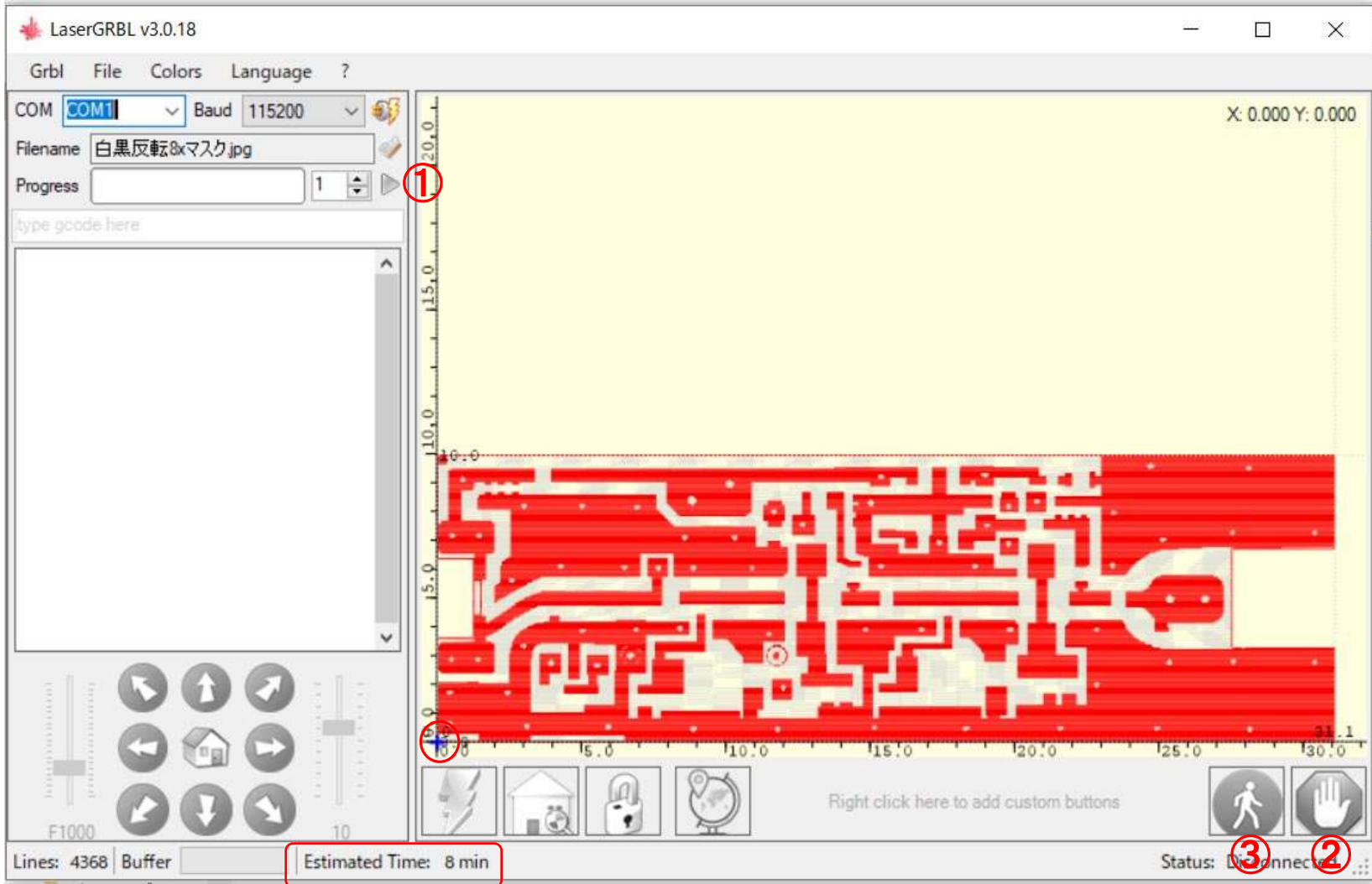
その下の欄ではレーザのオン時とオフ時の強度を設定できます。実験ですからS-MAXを50, 125, 255(最大)の3条件で行う事とします。最初は50です。その次の欄は画像のサイズの設定です。

デフォルトでは300DPIが設定されていますが、最高解像度が50 μ mですからもう少し上げたいので、オートサイズを外して766DPIにします(この元画像はもっと高解像度ですが画像サイズが目的のマスクサイズに合致する値を捜す必要が有ります)。

オフセットはゼロ点でフォーカス調整をする場合は露光が進んでしまうので(木材を焦がす場合は焦げないので気にする必要はない)数ミリほどXかYをずらしておくか、別途ゼロ点の位置調整をする必要が有ります。

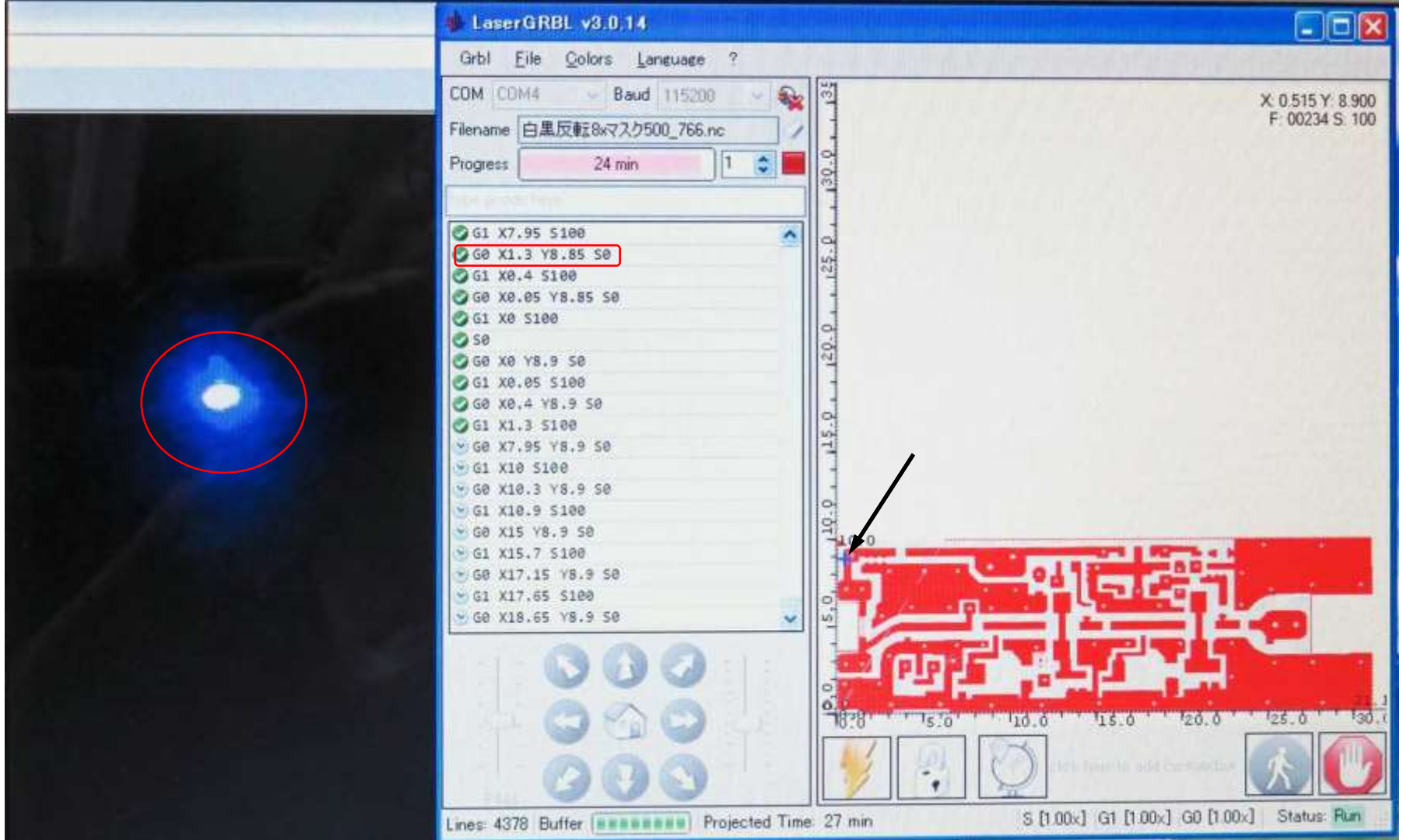
私の将来の使用法(このレーザ描画がうまく行っての話)は穴開き基板うら/表にドライ・フィルムを貼ってパターン描画を行うので上記の様な安易な方法は取れず、別途やり方を構築する課題がまだ残っています。ここでCreate!をクリックすることで数千ステップのGコードが生成されます。



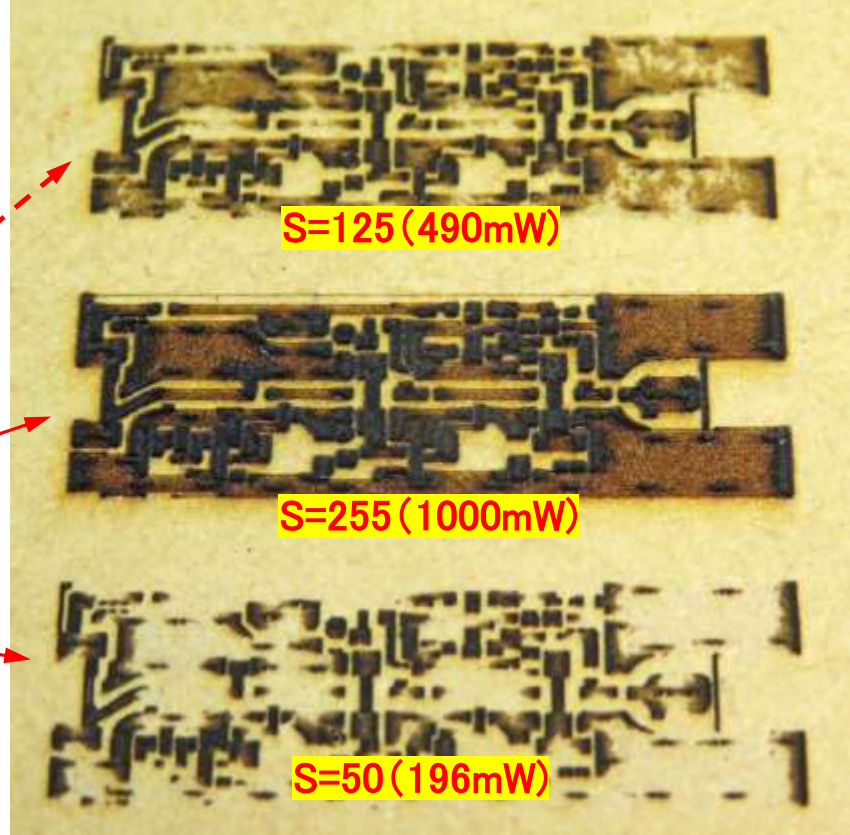
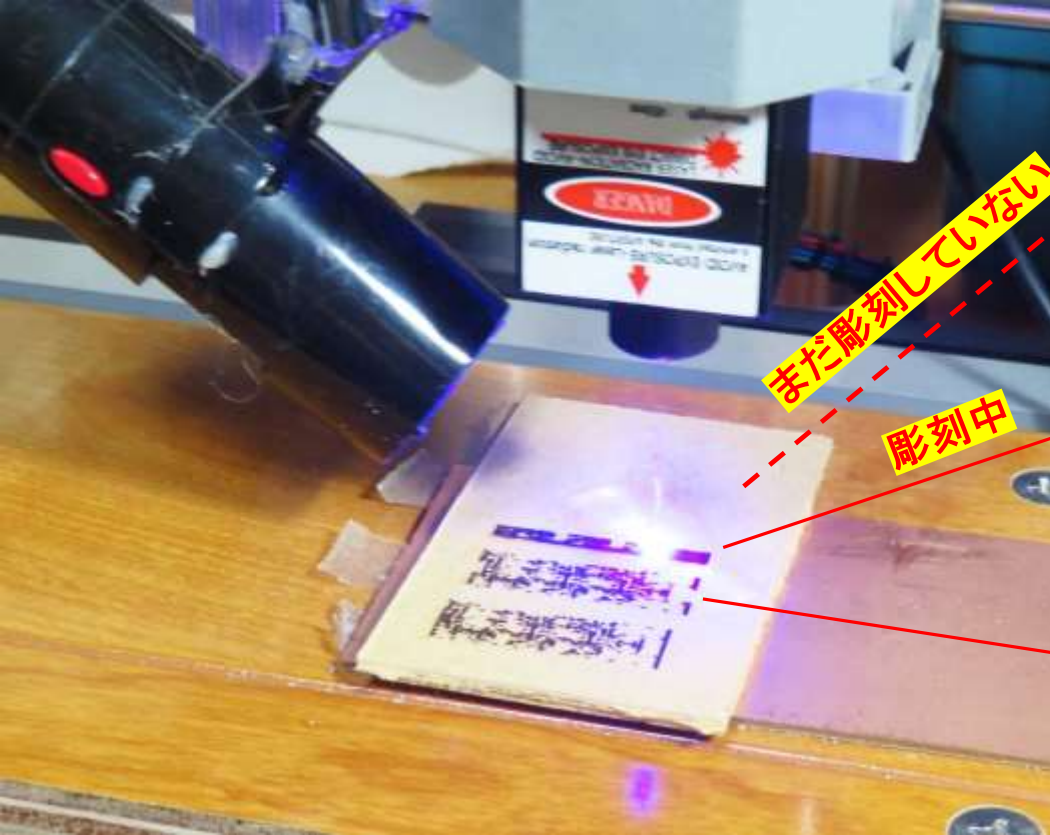


上図に示す最初に開いたドライバのソフトにやっと戻ってきました。フォーカス調整が済んでいれば、ここで▶の①のボタンをクリックすればプログラムは走ってしまいますが、その前にこのGコード・プログラムを条件内容(逆プロセスが出来ないので後から条件を探り出すのが大変)を含めた名称でセーブをFileからしておく(彫刻が終わると出来栄に気が行ってしまいセーブを忘れがちになるので)ことが肝要です。

ラン状態でも②のボタンで一時停止、再開は③のボタンで手軽に行えます。彫刻の進行状況は赤丸枠の十字マークが移動してオンタイムで示してくれます。Estimated Timeは2割以上進行してからでないだと全く宛てになりません、実際はこれを走らせると27分もかかりました(一時停止はレーザが弱出力されたままですから露光の場合避けるべきです)。



上図はプログラムが終了間際(24分後)でのパソコン画面の様子です。モニターではサングラス装着前ではレーザーがオンの時に赤丸ぐらいの大きな輝度飽和した光点とともに周りの状態(黒く刻印されていく様子)が分かりましたが、サングラス装着後(99.75%の減光)では焦点合わせ時よりも数倍大きな光点の点滅しか分かりません。進行状況は十字(↓)の位置で知ることが出来ます。Gコードの表は動きが早くて読むことは難しく、の付いているところまではCNCが読み込みを終えたことを表しているだけで、実行位置は赤枠部分あたりだと思われれます。



これまでのモニタ画面では暗闇の中でレーザー照射していたイメージですが、実際のレーザー彫刻の様子は上左写真の様に普通に明るい室内光の中での作業です。しかし、S=255のフルパワーでの彫刻時(丁度掘っている場面)はさすがに危険なので短波長カットの眼鏡着用です(ドライ・フィルムの場合は室内は雰囲気の良い薄暗いイエロー・ライト使用となります)。右写真がレーザー・パワーを3パラメータで彫刻した場合の圧縮ボール板(2.6t)の様子です。

写真を見ると焦げた様子に不安が山積みです。レーザー・パワーの違いは下から196mW, 1000mW, 490mWです。ドライ・フィルムを感光させる場合は大丈夫だろうとは思いますが、心配の内容はどれもラスタ・スキャンしているところは焦げが薄く、水平方向のスキャンで細かいパターンのエッジでは黒々と(深く)えぐられているのです。

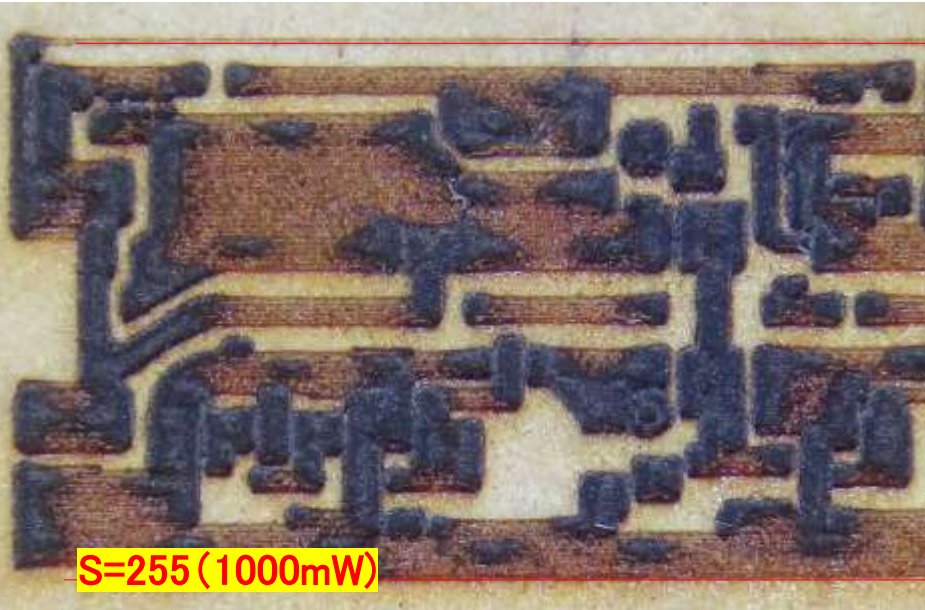
熱によっておこる現象だと信じたいのですが、**スキャンの様子をビデオで確認してみると**レーザーのオン/オフに関係なく、**次の地点に移動する時にゆっくり動き始めて高速移動し、ゆっくりと移動を止めている**ようです。動作時の静音性とマシンの寿命の確保のためだろうと思いますが、**これではエッジだけがレーザーパワーが強く照射されることになってしまう**こととなります。8ページに示した1bit BW Ditheringの描画の画像変換(多分ドット画像に変換する?)が必要なのではないかと思われます。とにかくこの試験片を顕微鏡観察で詳しく状態を確認することをまずやってみることにします。



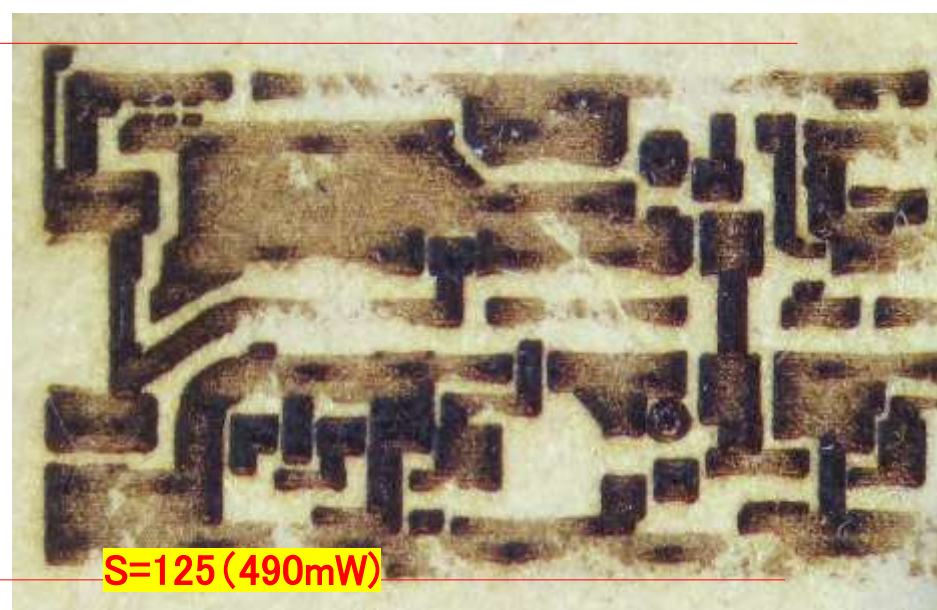
原画



S=50 (196mW)



S=255 (1000mW)

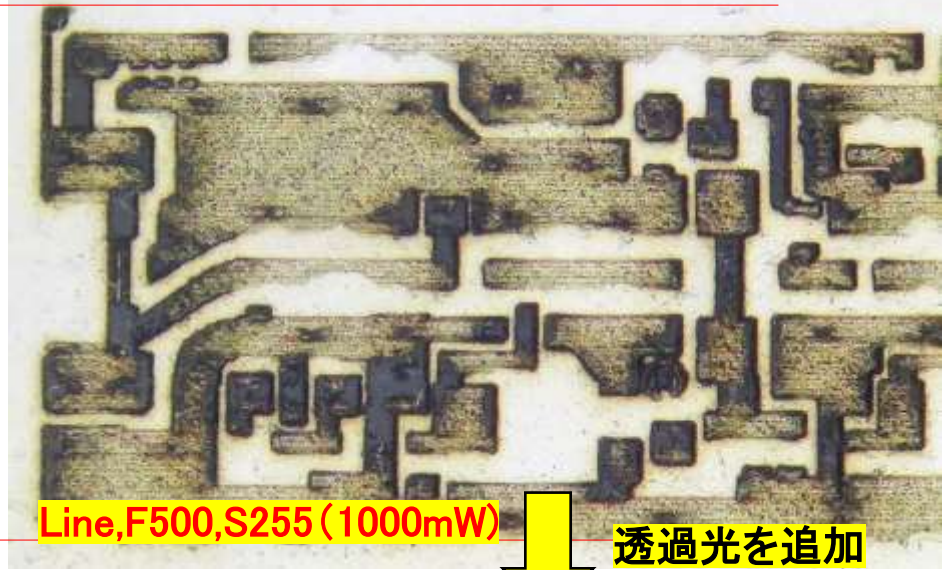
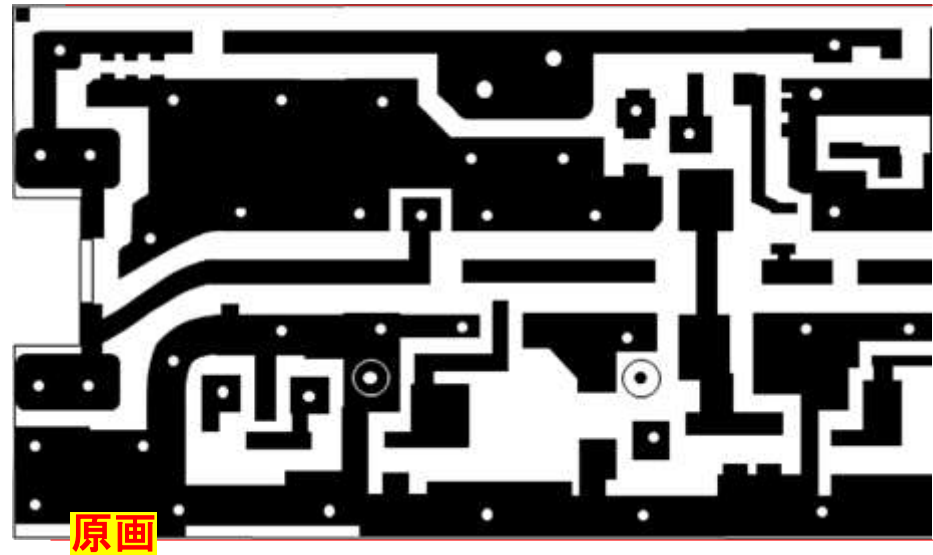


S=125 (490mW)

前のページで、圧縮ボール板(2.6t)にレーザー・パワー3水準で彫刻を行った試料の左半分の顕微鏡写真を上図に示します。左上が原画、右が196mW、左下が1000mW、右が490mWです。基本的にどれも表面状態(反射率)で黒化のスピードが決まっている①、水平(スキャン方向)のエッジが強く黒化している②、黒化幅が太くなっている③、スルーホールが再現できていない④、と4項目の点でこのままでは使い物にならないことが明らかです。

①は最終ターゲットがドライ・フィルムへの感光なので関係ないのですが、②～④は2ページ前にも述べたスキャン方法に起因している可能性が最も高い。このままではスキャン方法をラインではなく1bit B&Wのディザリング変換しないと改善されない可能性も高い。

表面状態がより均一な白(反射率が高く効率が悪い)のボール紙(0.3t)を使用して、1000mWでの彫刻をまず確認してみたのが下図です。右上が落射光のみでの撮影で、これまでの試験試料の中で最も緻密な仕上がりがみられるが、やはり

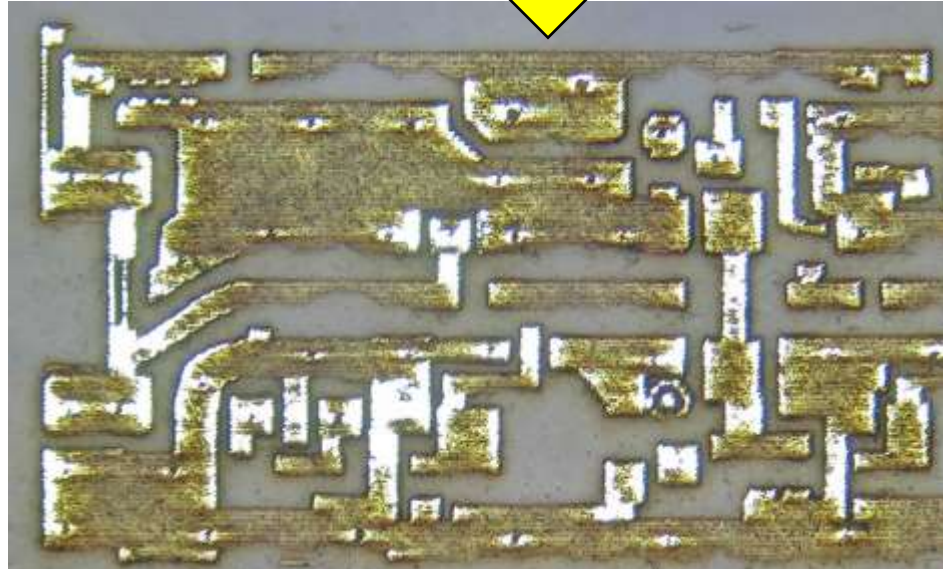


透過光を追加

スルー・ホールは解像は出来てないし、逆に周辺に深い掘り穴が見られる。確認のための透過光を含めた撮影画像が右下図です。写真を見て分かる様に縦ラインエッジの殆どが穴だらけなことが分かります。特徴的なことは殆どのスルー・ホールの左右が貫通穴となっていることです。

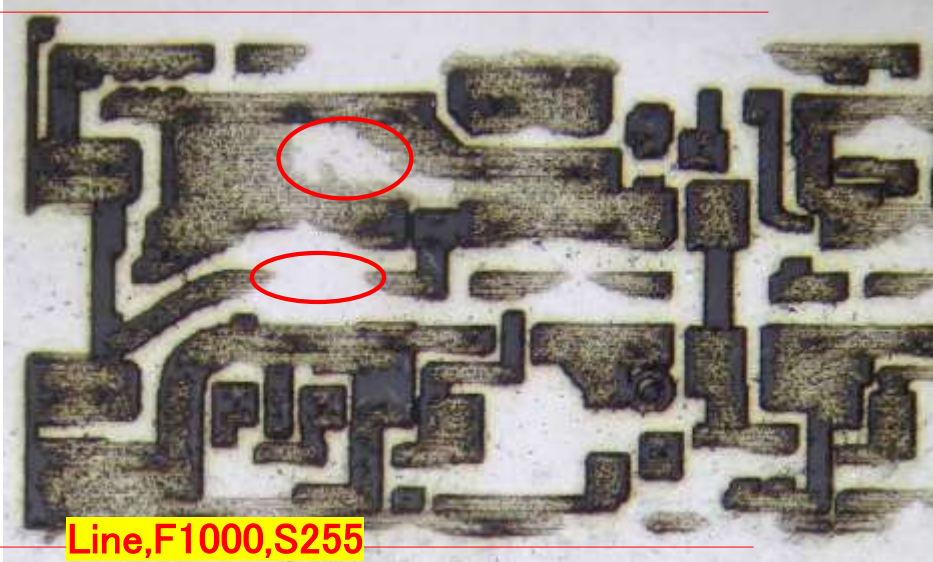
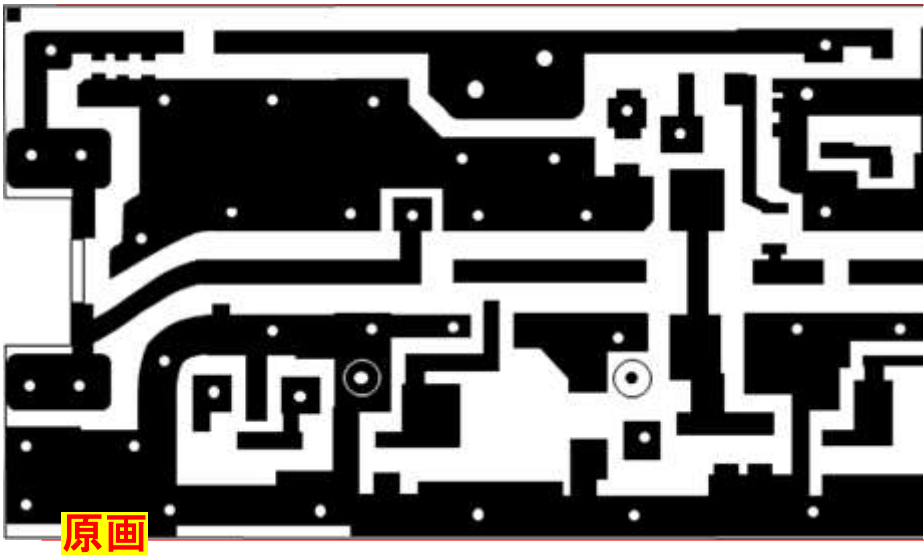
解像度はある程度ありそうだが、先の②～④の問題は解決していない状態です。できる改善はスキャン・スピードを常に一定にして、描画の立上り下がりスピードとの差を最小限にする方法が残されている。

一方ドット描画方式を最終回避策とする考えもあるが、これは描画の長時間化に直結するので、何とかスキャン・スピードの変更でまずは実験を試みたい。



●スキャン条件を変えてみる

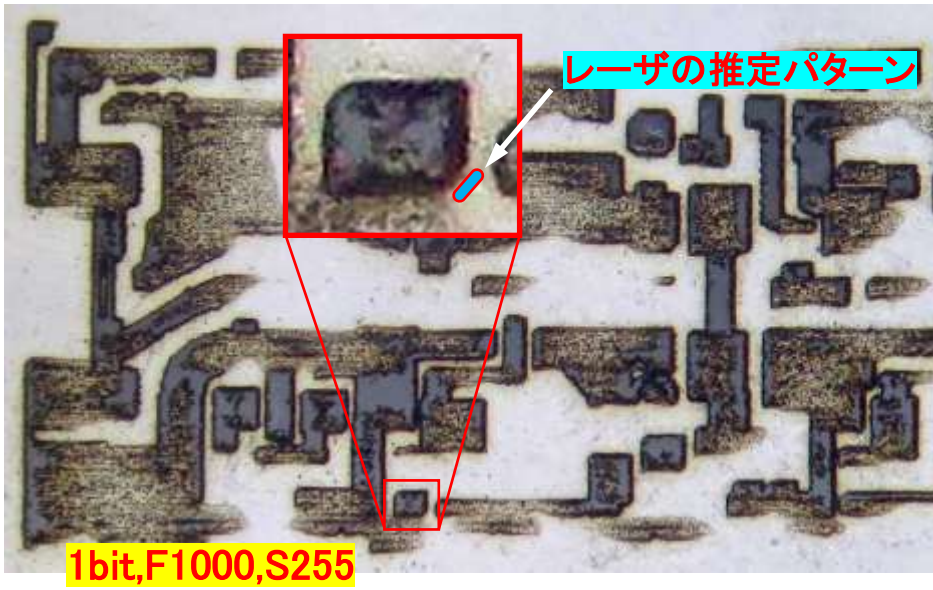
前のページで指摘した、レーザの走査時の強度変化を連続して行っているのではなく、一旦止めてからオン・オフを行っている問題です。そこで逆にスキャンを早く(デフォルトの1000mm/minに)した場合の確認とその速度で(ラインスキャンから)1bitスキャン・モードではどうかの確認を行ったのが下図右の上下の写真です。前のページの比較して**等価光量が半分になっているにも関わらずエッジの深堀問題は同じ**で、ラスタ(黒潰し)部分の抜けが増加しただけです。**赤丸枠**の



抜けは**安物レーザのドローブ特性が出ている**と思われます。またスキャン・スピードが上がると位置精度も悪くなっていることに気が付きます。このことから時間がかかってもパワーを下げてゆっくりスキャンするしかなさそうです。

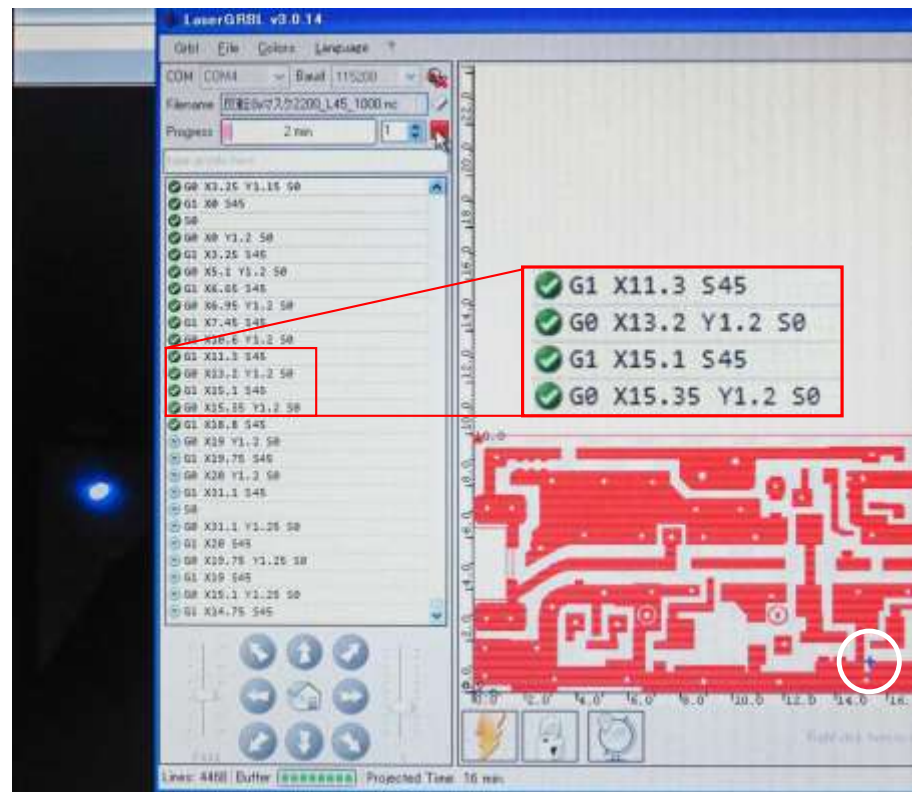
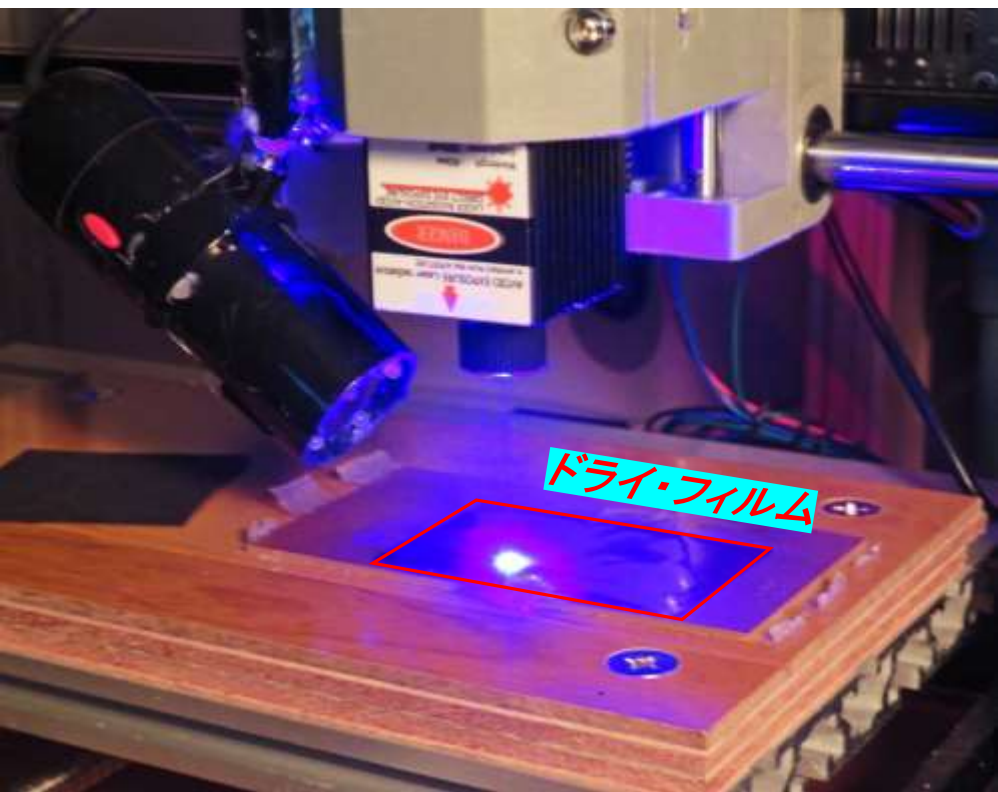
右図の2条件(ラインとドットの違いだと思っていた)の描画時間は27分と同じだったのでそんな馬鹿など、実行ファイルをテキストで開いて比較したら全く同じ内容でした。

一番気になるのは、代表として下図の**赤四角枠**の拡大で示す様にレーザのフォーカス・パターンが「/」の状態はまだサイズが大きいのではないかとと思われることです(パワー物はキャビティ幅が広いので仕方のない事)。もっとWDを近接するか、ダメなら顕微鏡対物に変えるしかなさそうです。



●ドライフィルムの露光をやってみる

前のページのフォーカスパターンの問題は残っていますが、とりあえず露光感度の低い450nmレーザーでも露光工程の予行演習が出来るかの確認を行いました。下図左がドライ・フィルムへの露光を行っている環境で、右がその時のパソコン

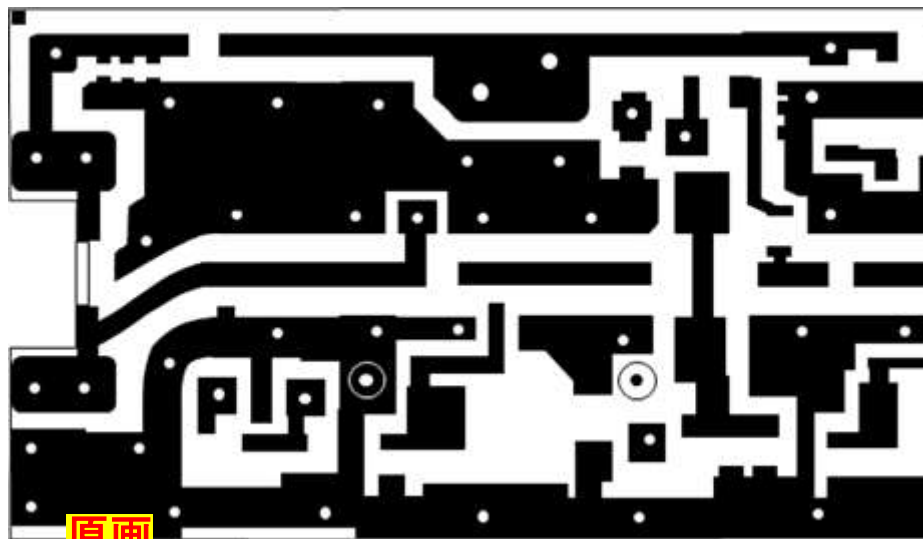


の画面です。部屋の照明は落し、スタンドのLED電球を100V、95Wの白熱電球に交換、スライダックで50Vの電圧にして照明しています。この状態では電球の色温度は~1700Kですから、感光の恐れのある紫外線を放出する恐れはありません。

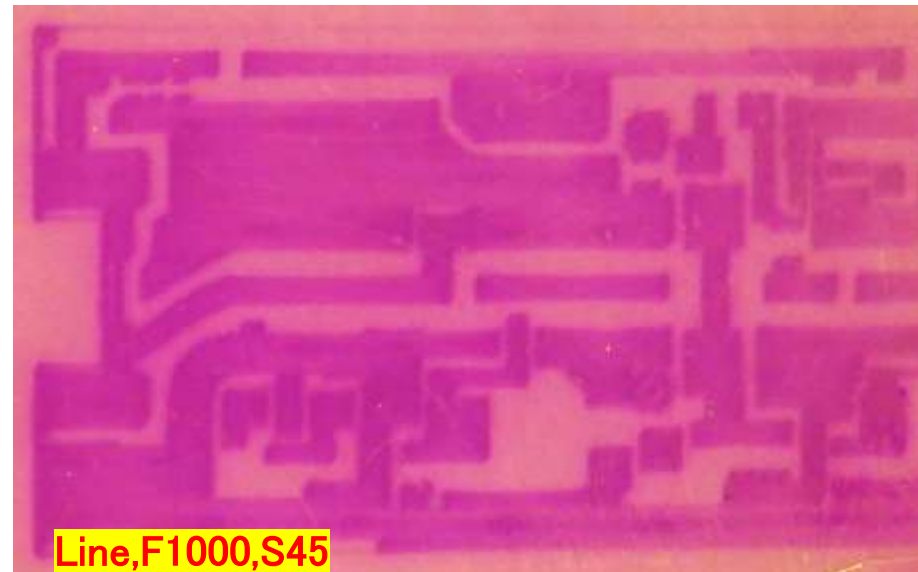
右のパソコン画面の拡大を見るとGコードの実行状況が分かります。4行の1行目がY=1.2mmでX=11.3mmまでレーザーをS=45(176mW)で照射して、2行目がX=13.2までは照射オフ、3行目がX=15.1mmまで照射、4行目がX=15.35mmまで照射オフとなっています。その位置が赤図面の右下の白丸枠の十字位置にあることを表しています。スキャン速度F1000はこのプログラムの先頭に一回宣言しておくだけで済んでいます。

スキャンはこの十字を見ているだけではスロースタート、スローストップをしていることは分かりませんが、ビデオで光点の動きをスロー再生しながら注視することで判別できます。

その時のドライ・フィルムの感光状況が下右図となります。S45(176mW)での感光をさせている理由はS100(392mW)ではドライ・フィルムの一部に熔融痕が出てしまうのでやむなくパワーを下げた事情があります。しかし右図の様に露光不足で十分なコントラストが出ていません。



原画



Line, F1000, S45

さすがに450nmの光ではドライ・フィルムへの効率の良い感光が出来ないことが表れています。ここで気が付くのはレーザ・パワーを定格の1/5まで絞ると高速でスキャンしている黒ベタ面の白抜け(ドループ現象)が起きておらず、コントラスト・エッジだけの強露光が現れている(スロー・スタート&ストップ現象:以後スローSt & Sp)ことが分かります。

ドライ・フィルムへの高精細露光の道が少し見えてきたようです。その道は

- ① レーザの定格出力に対して、数分の1の低い出力を使う(ドループ対策)
- ② スキャン・スピードを落としてスローSt & Spの影響を少なくする(露光時間がかかるがエッジ強露光対策)
- ③ WDをより短くし、レーザ光さらに小径に絞る(黒パターン太り対策)。最終手段は顕微鏡用対物レンズを使用
- ④ 早急にレーザの波長を短いものと交換する(ドライ・フィルムへの効果的露光)

の4点が課題解決への適切な対応だと思われれます。

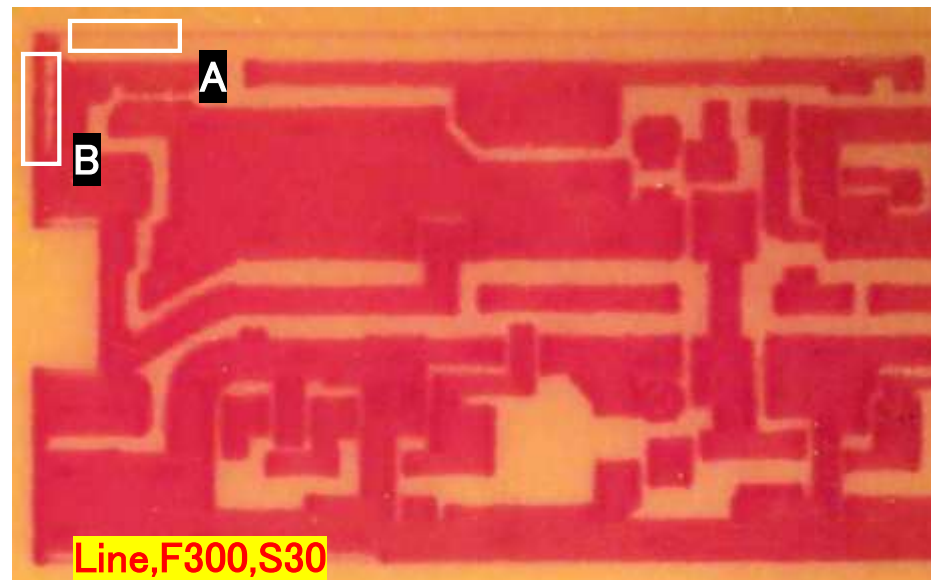
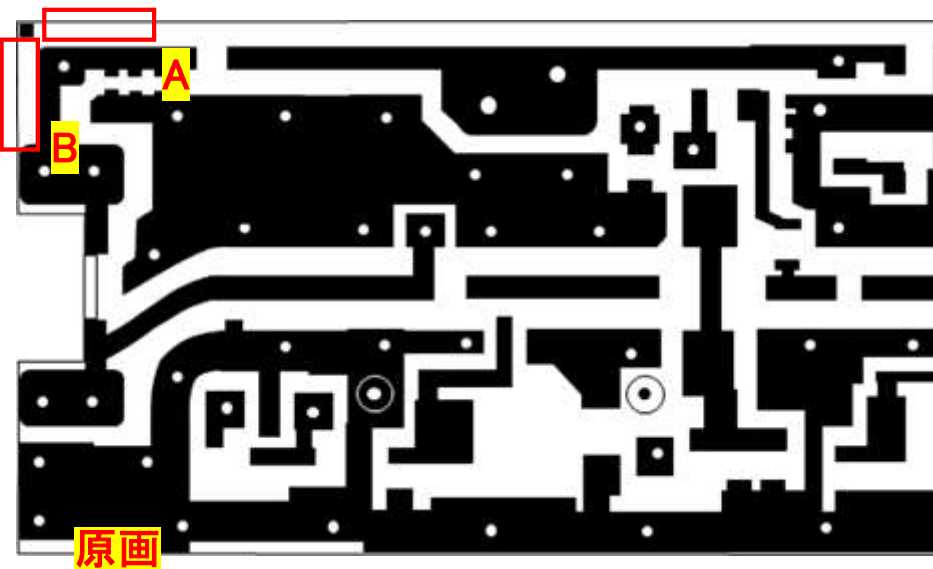
以上から、短波長レーザが納品されるまでの今後の実験は

1. 小径光スポットでもモニタ上調整が可能ないようにダミー光源(LED)を撮像素子の視野に入れる。
2. WDを短くしてより小径光スポット形成を実現させる。
3. ドライ・フィルム感光を低速スキャンにする。縦・横クロス走査でエッジ強調の許容方式(細リマスクの設計が必要)。

などの積み上げで高性能化(一部ごまかし)していく予定となります。

● スキャンスピードを1/3(F300), 露光強度を2/3(S30)に

スローSt & Spの影響を少なくするためにスキャンスピードを1/3にし, 露光強度を2/3にすることでドライフィルムの変質(熔融)に対するマージンを取る, さらにWDを5mm近づけて30mmにするなどの方策で再度露光を行ってみました。



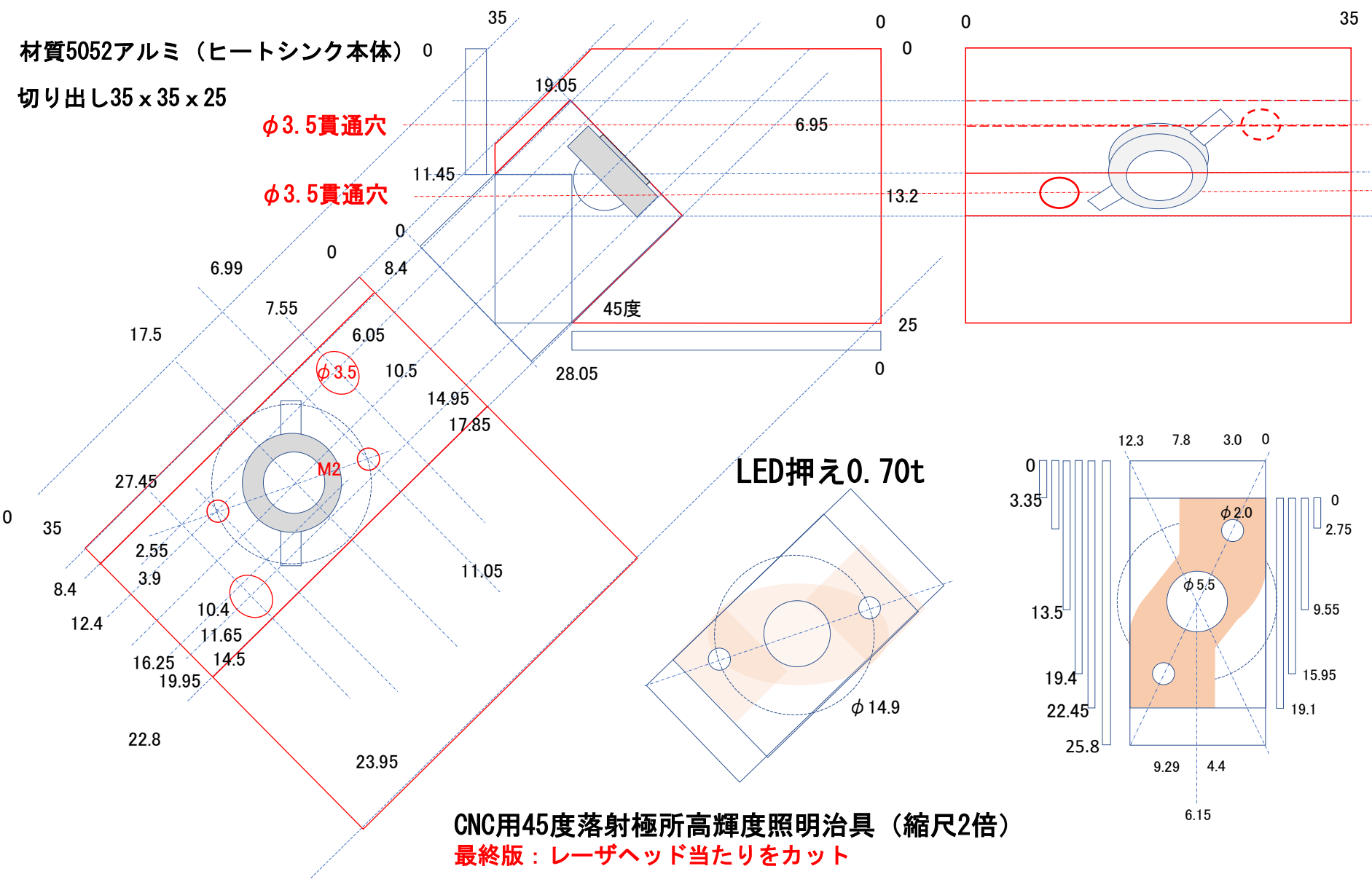
その結果が上図となります。スキャンスピードを1/3とすることで露光量は3.3倍, 露光強度を2/3(67%)としていますので都合露光量は2.2倍になっています。写真を見て分かる様に感光はかなり進んでおり(経験上から)現像するに十分な露光(光学濃度は50%以上)が稼げたようです。スキャン・スピード1/3にしましたが描画時間は27分が30分になっただけです。理解不可能でもあります。これで前のページで上げた①と②はクリアできたようです。しかし、**左の原画Aの横線に対応する右のドライ・フィルムの感光像は細い横1回スキャンのみの露光不足の現象ですが、左Bの縦線に対応する右の感光像は横幅の広い(しかも十分な光学濃度)状態となってしまう。**

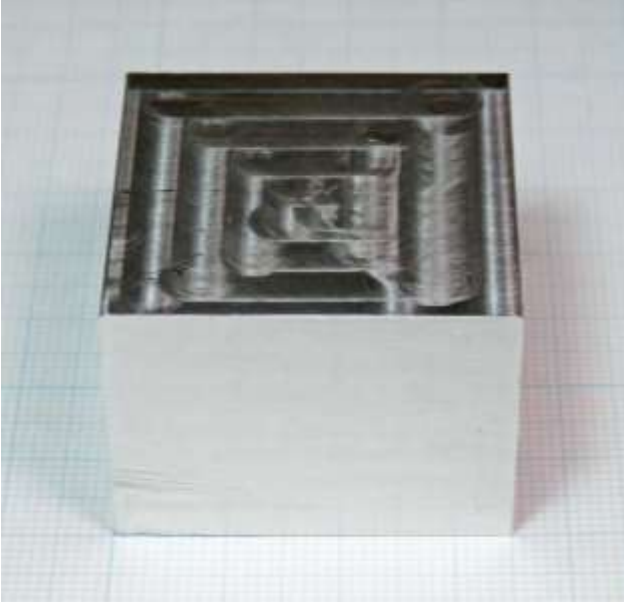
この原因はとりも直さずレーザースポットの像が必要とされる解像描画ではなかったのです。木などに焦げ目をつける彫刻ではスポットの中心のみ焦げる超解像現象(温度分布は非線形状態)があったために気付かなかった。この現象の解決には前記の「③レーザーをより細く絞る」しかありません。よりWDを短くしていくとしても数十 μm に絞られたレーザー光のサイズを肉眼では判別できないのでデジタル顕微鏡での確認となりますが、(2種の顕微鏡では)真っ暗な画像に極小1点の光点では自動で暗黒と判断して画像処理を放棄してしまうため調整作業が現状では出来ないのです。

本来は顕微鏡の倍率を上げるなどの手立ても必要ですが、まずは正常動作をさせるために、周辺環境を照らし出す強力な照明装置(デジタル顕微鏡にはサングラスを取り付けているため)を付加しないと先に進めません。そこで少し遠回りとなりますが、**パワーLEDを用いたレーザースポット径の観測のため専用の強力照明を製作すること**にします。

●レーザースポット径調整用の高輝度LED照明治具の製作

レーザースポット径調整用の高輝度LED照明治具をアルミブロックを切り出すところから始めます. その図面(2倍)を下図に示します. 面倒なのは45度傾斜の深堀加工を行う事です.





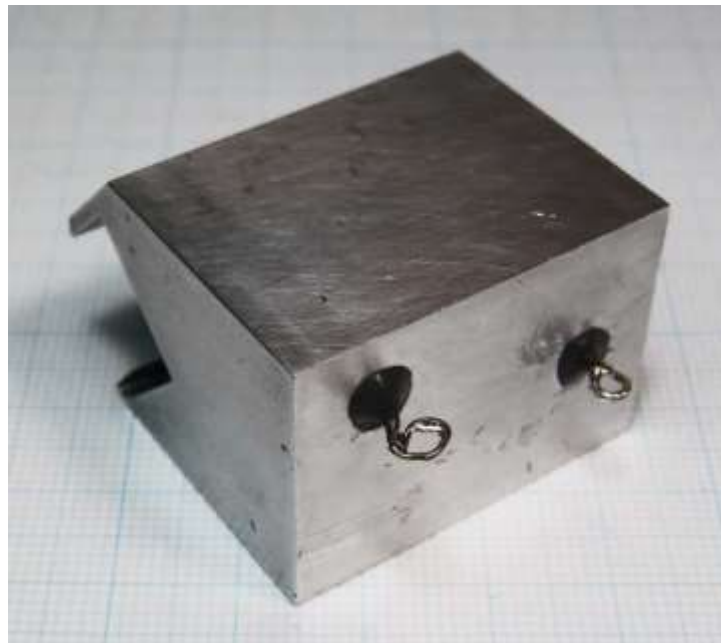
左の写真はA5052アルミのブロック(35x35x25)を切り出した状態です. これを前記図面の様にフライス加工したものが右写真です.

LEDは0.7A定格なのでヒートシンクに取り付ける必要が有ります. また5VのUSB電源を使用する予定ですので, 電流制限用1Wパワー抵抗も(3.5φアキシャル)このブロックに穴を開け, 挿入して冷却します. 抵抗挿入時には耐熱性高熱伝導強力樹脂を充填します(硬化後は切削やネジ穴堀もできる高密度酸化金属粉混練樹脂).

左の写真は組み上がった照明治具. の出射口側, 右が裏から見た様子の写真です.

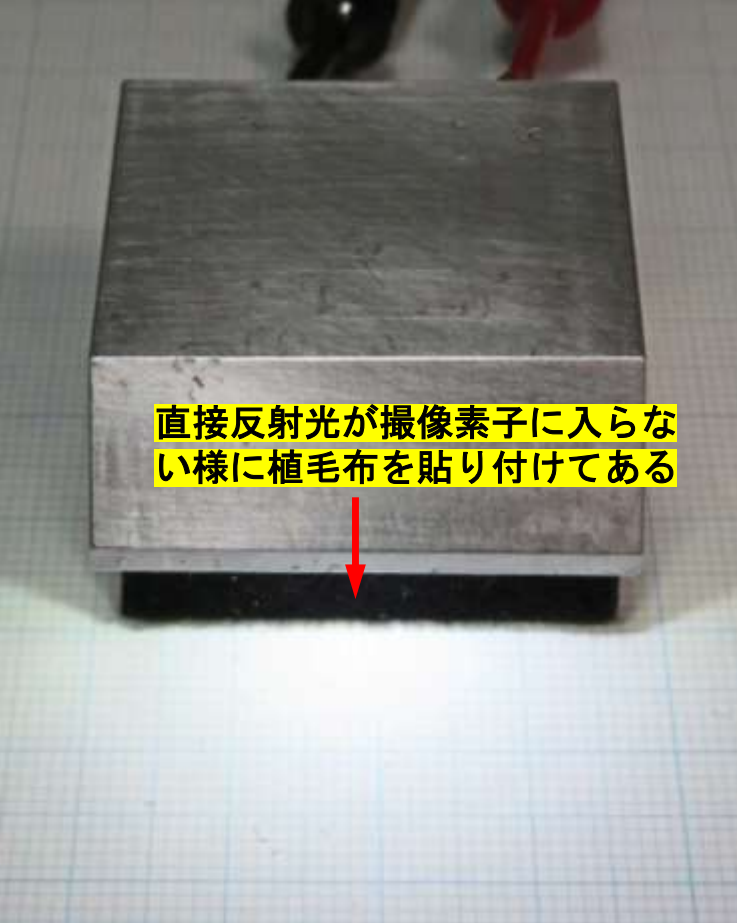
切り出した35.0×35.0×25.0の50アルミのブロック

組立準備が整った各部品

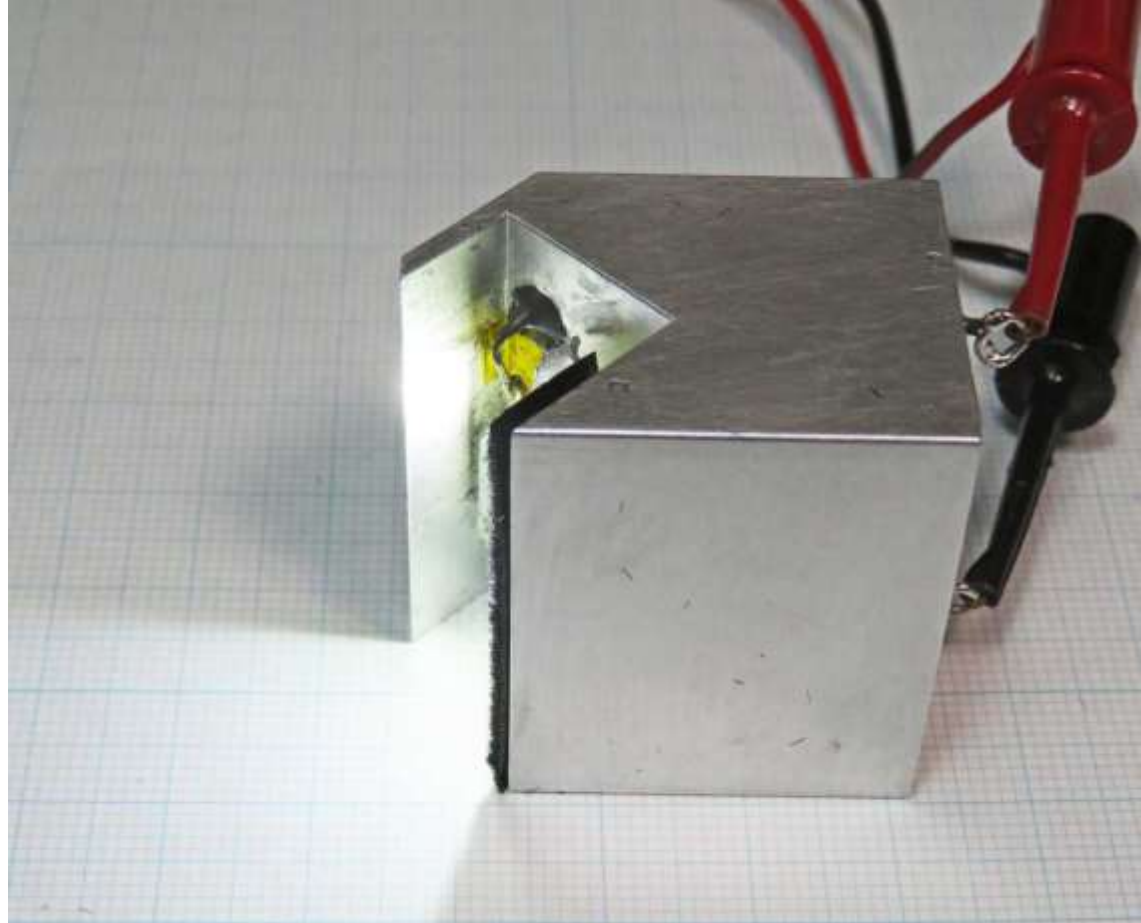


組み上がった照明治具

同左, 裏から見た様子



直接反射光が撮像素子に入らない様に植毛布を貼り付けてある



立てれば側面照明の用途にも使用可 (使途不明)

デジタル顕微鏡側からみた使用状態での45度落射照明の様子

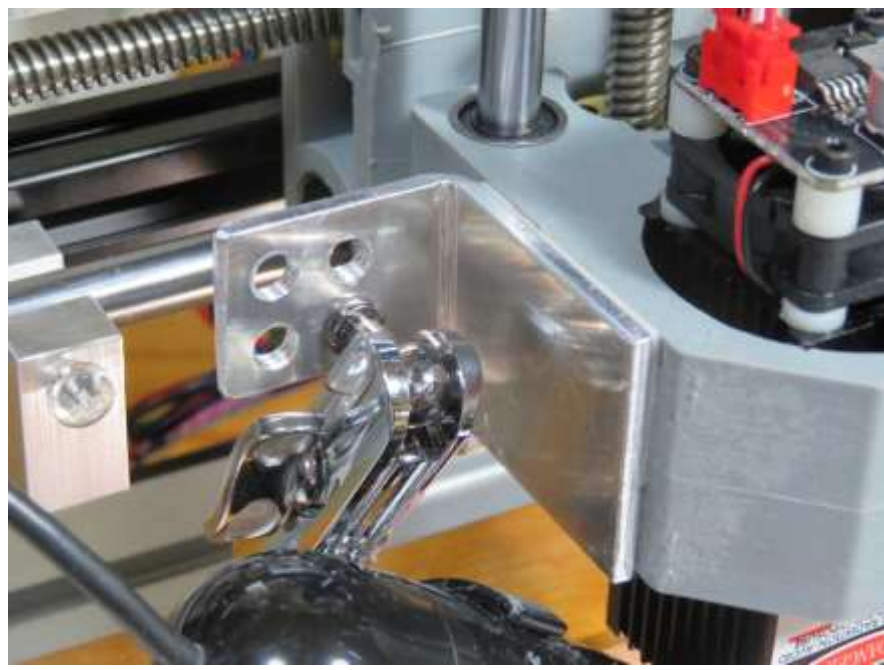
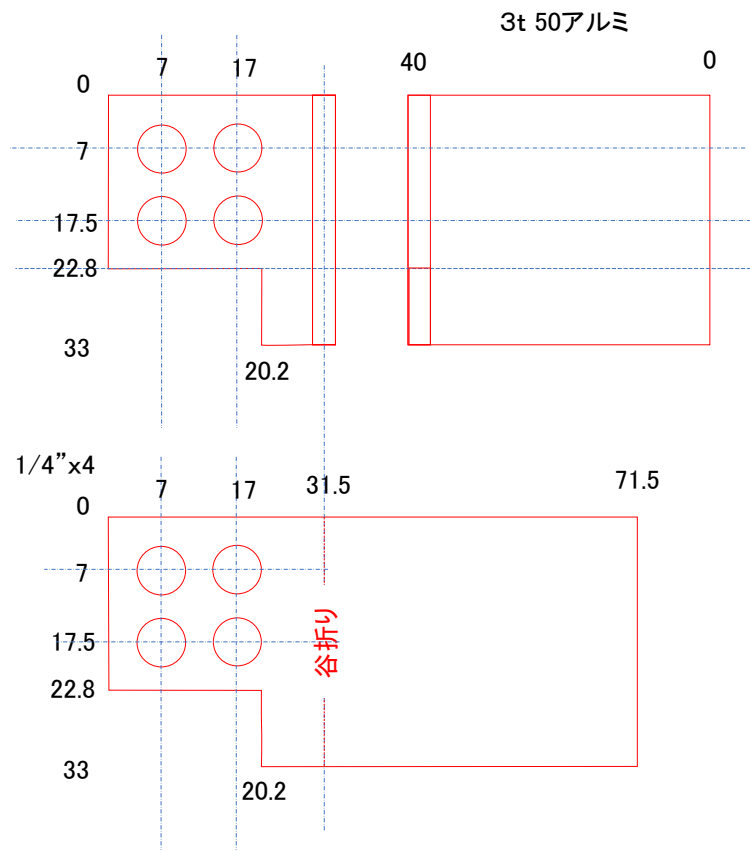
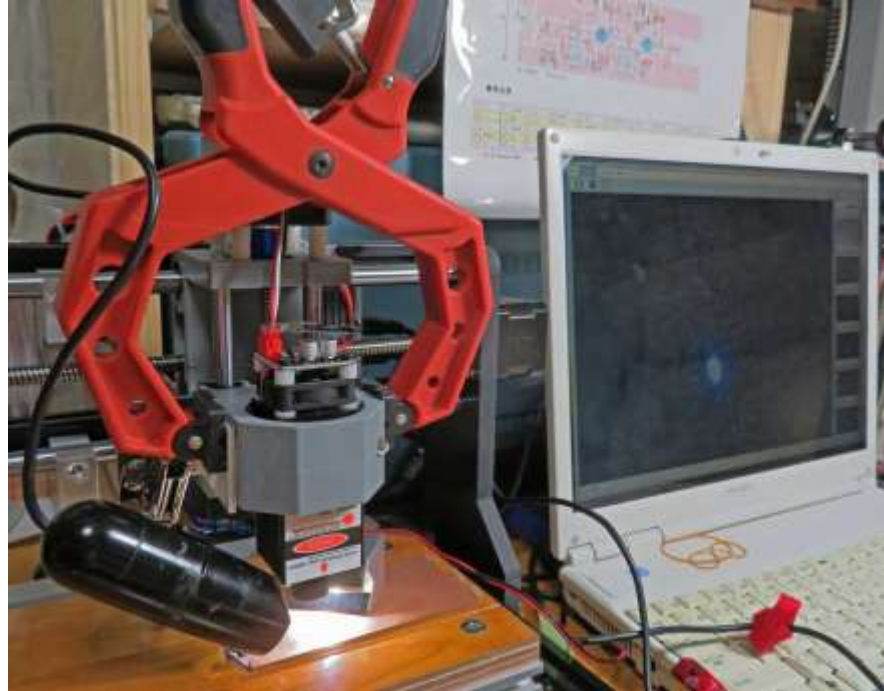
左右上図の写真は定格の1/7の100m点灯での撮影写真です。電気スタンドの照明下ですが100mAでも十分明るいことが分かります。実際は700mAまで流しての照明は不要かもしれません。

明るい照明は解決したが、本丸が残っている。WDを近くするとデジタル顕微鏡の拡大率が少し稼げるからよいのだけど、基板面に鏡筒が当たる。更に顕微鏡レンズが単純な2群式であれば前玉を繰り出せば、数倍の拡大率の虚像が得られるはずなので**レンズのヘリカルガイドを前方に移動する(大変な作業)ことで数百倍の顕微鏡に改造できるはずだ。**

一方スポット径を小さく、つまりWDを短くして焦点を合わせるために**レーザ付属のレンズがネジから外れ落ちるギリギリまでしか下げられない。とりあえずこのレンズのまま極限まで近づけた状態でデジタル顕微鏡の配置を動かして何処まで絞れるかの実験を行う。**

●デジタル顕微鏡用ステーの製作

下図が新たに必要となったWD最小化(拡大率最大+ α)用の顕微鏡用ステーです。顕微鏡自身の改造の話(イチかバチかの破壊工作)は省略しますが**虚像を利用した(光学系は暗い)約8倍の拡大率が成功したのでその系での顕微鏡取付となります。**右上写真がシステムとして成立するかどうかの確認のためステーを使い仮組試験中の様子、その下が本組込下状態の写真です。**従来のやり方よりも真横45度を維持しながら顕微鏡のWDを自由に変えられる優れた方式となりました。**



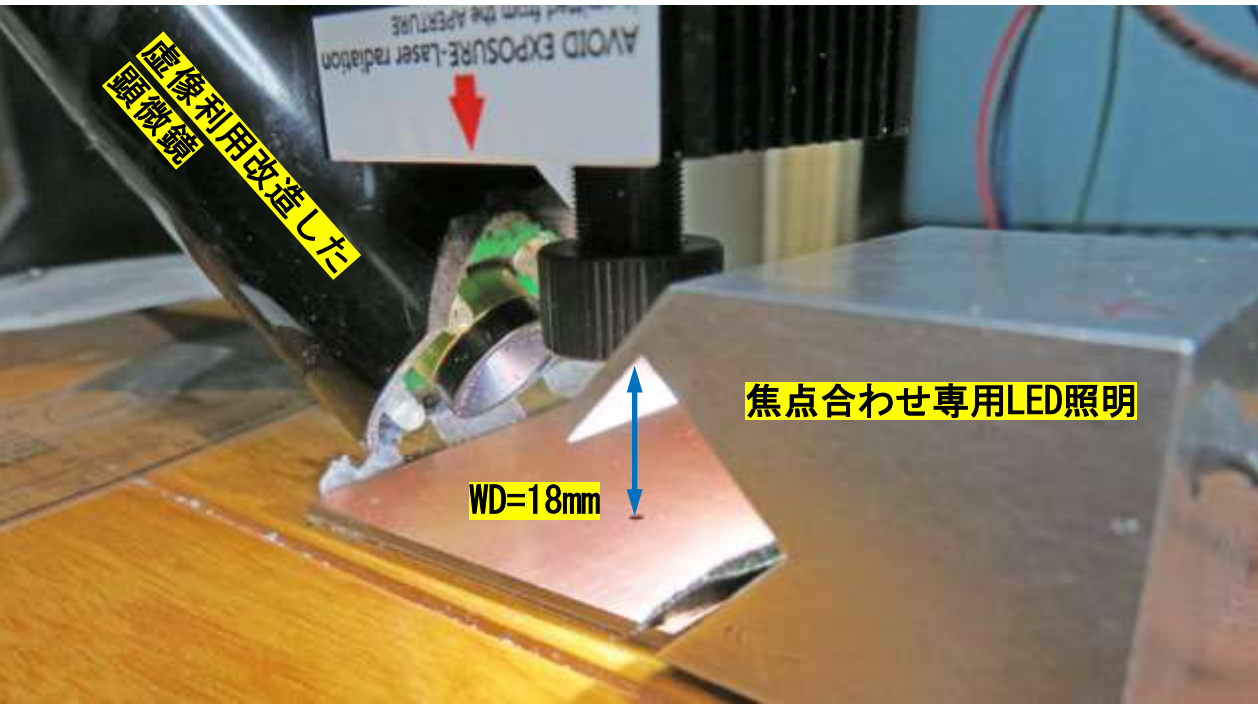
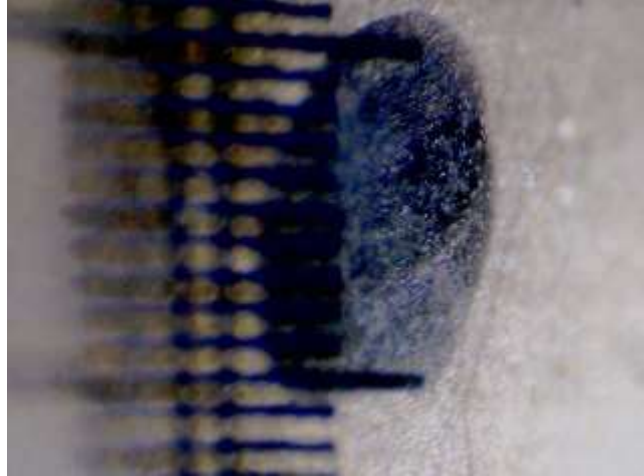
●WDを18mmまで接近できると嬉しさいっぱい

下図が**改造**(鏡筒を一旦割って中身を取り出し、前玉位置をヘリカル摺動パイプごと前方移動)したデジタル顕微鏡環境です(壊れなくてよかった)。図から分かる様に**顕微鏡前玉とWDともフォーカス・ポイントまで18mmが限界**です。

この状態でこれまで使っていた**実像**(前玉を30mm引っ込める)位置にピントが合うかの確認が**右上写真**(パソコン全視野表示)です。これでも以前より1.5倍くらいの拡大率です。**前玉を繰り出した虚像が中段の写真です。焦点深度が浅く、すごく暗い**(写真では同じに見えますが1/10:減光フィルタが不要)ですが5倍つまり当初の状態から7.5倍の像が得られました(改造したので50mm以上のWDに焦点は合いません)。

実はレーザーの焦点はこの拡大画像を使い合わせています。黒いのは反射率を下げるためにPILOTのCD/DVDマーカで印を付けて焦点合わせをしています。

下段の写真は100μmスケールと一緒に撮影しています。黒マーク縦のサイズが1.1mm(横サイズは45度なので1/1.4に圧縮)。つまり**絞ったレーザーの飽和した光径が80μm(半分の強度径では~50μm)であることを確認**できます。



●実は厄介な問題もあったのです

実は前のページの終着点に行くまでにくつかのトラブルを解決した後の状態だったのです。レーザのパワーはS255(1000mW)を最大にしてS1(4mW)までしか落とせません。それでも絞った光点は明るすぎて最小径化していく様子がモニタ画像では確認できません。右上の写真の様に高解像度のデジカメ写真を拡大(同じ画像を拡大して貼り付けている)しても解像度よりもはるかに大きな飽和円しか見ることが出来ませんでした。

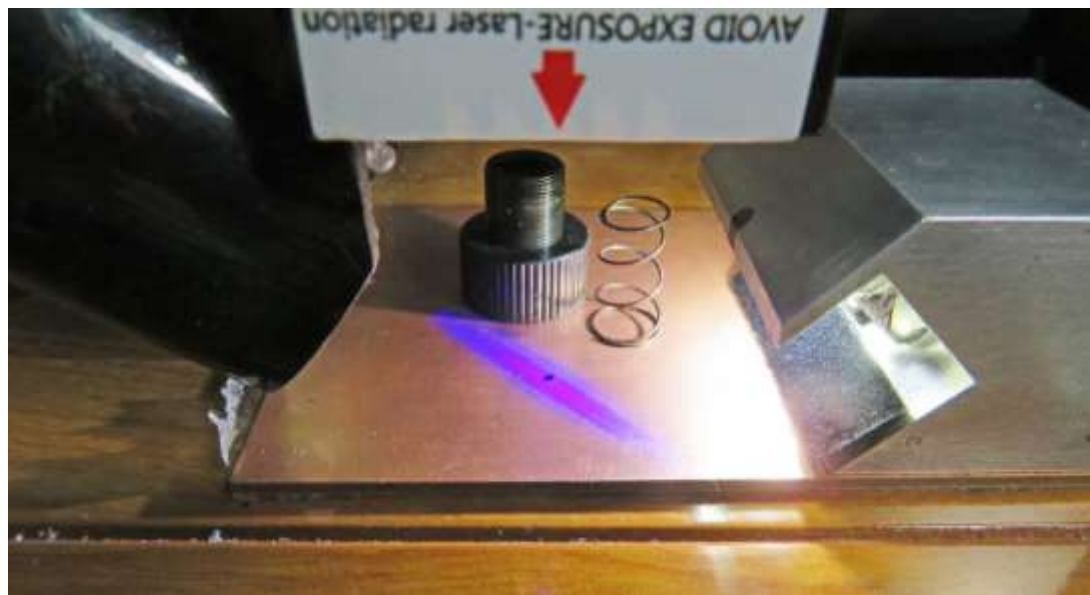
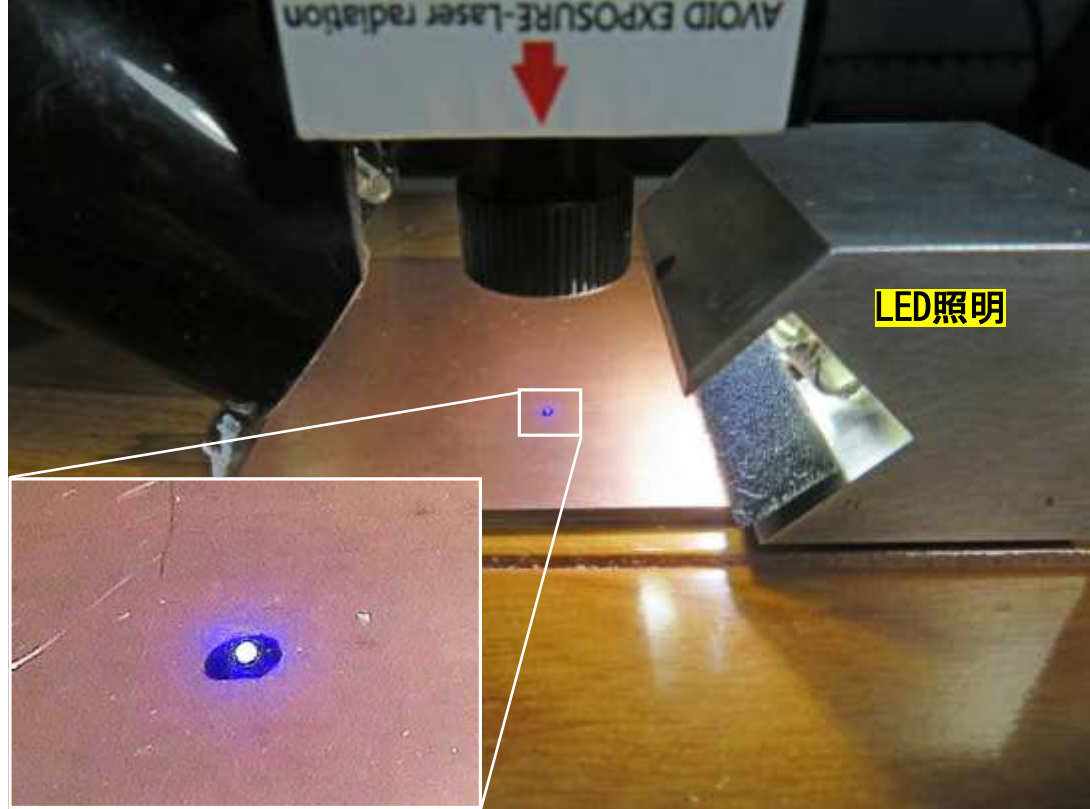
そこで助かったのが強力なLED照明(200mA)と黒のマーカです。虚像の拡大像がすごく暗い(解像度は悪くない)ことにも助けられました(それでも輝度飽和状態なので本当の径は不明確です)。

以上の対策でWDを前回の30mmから少しずつ短くしていくことで絞られていく径が確認できたわけです。ところが、WD24mmからレンズのガタの加減で余計なスポットが頻繁に発生することが起きました。

もしかしたら小径のレンズを離していくのでレーザのファーフールドパターンに入りきれない光が迷光を発生させているのではと思い始めました。

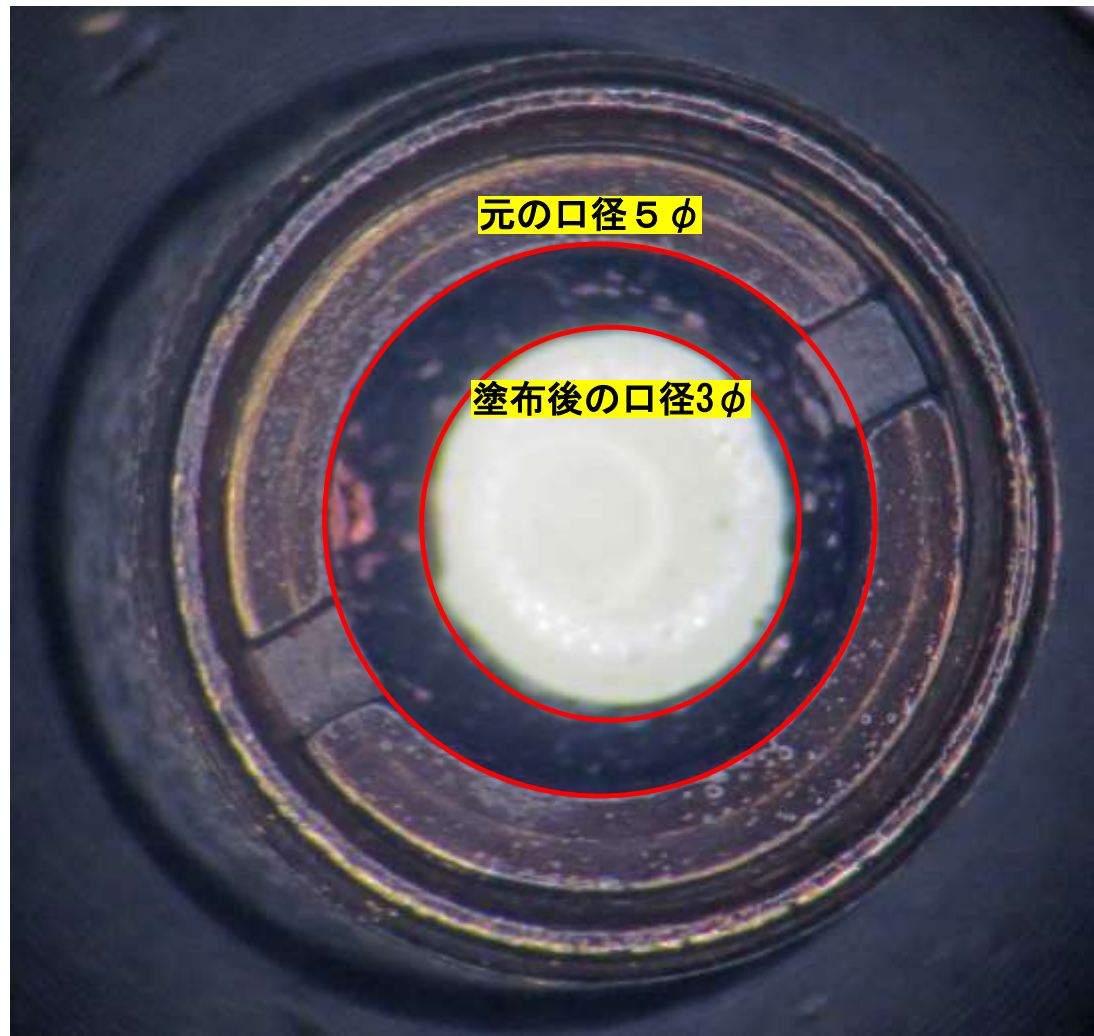
4mWの状態ではレンズを外してみると下の写真の様にかなり広がったファーフールドパターンが現れました。このままではよりレーザを絞るためのWDを短くする努力は無意味です。レーザであればみんな接合方向(キャビティー断面の狭い方向)に広がるのは当たり前で異常でもなんでもありません。

ちゃんとしたレンズであれば蹴られた光が迷光にならないように処置がしてあるはずですが。そこでこのレンズを調べてみました。



● レーザ光を絞るレンズがへボ

下の写真がレーザーヘッドから取り出したレンズです(バックライトの上に乗せている). 写真はコントラストを弱めていますがいまですが、それでも**黒化処理が甘く迷光対策が不十分**です. ネジ部の直径が9mmですからレンズ止めリングの内径:**実効径は5φ程度**です. ファーフィルドの通常の広がり(広い方)を60度とすると、レーザーの出射口から10mmも離れると蹴られてしまうので迷光が発生しやすくなります. 仕方ないので蹴られる光を取り除くために、右の実体顕微鏡写真のように**レンズの有効径を狭く(径として60%)**するために先ほどのPILOTペンで周辺を塗り潰し**3φ**にしました(口径が小さくなくても絞れる径は変わらない). これでWD18mmまで**異常なスポットは現れなくなりました**. しかし**最大光出力は50%(500mW)~30%(300mW)**になってしまったでしょう.

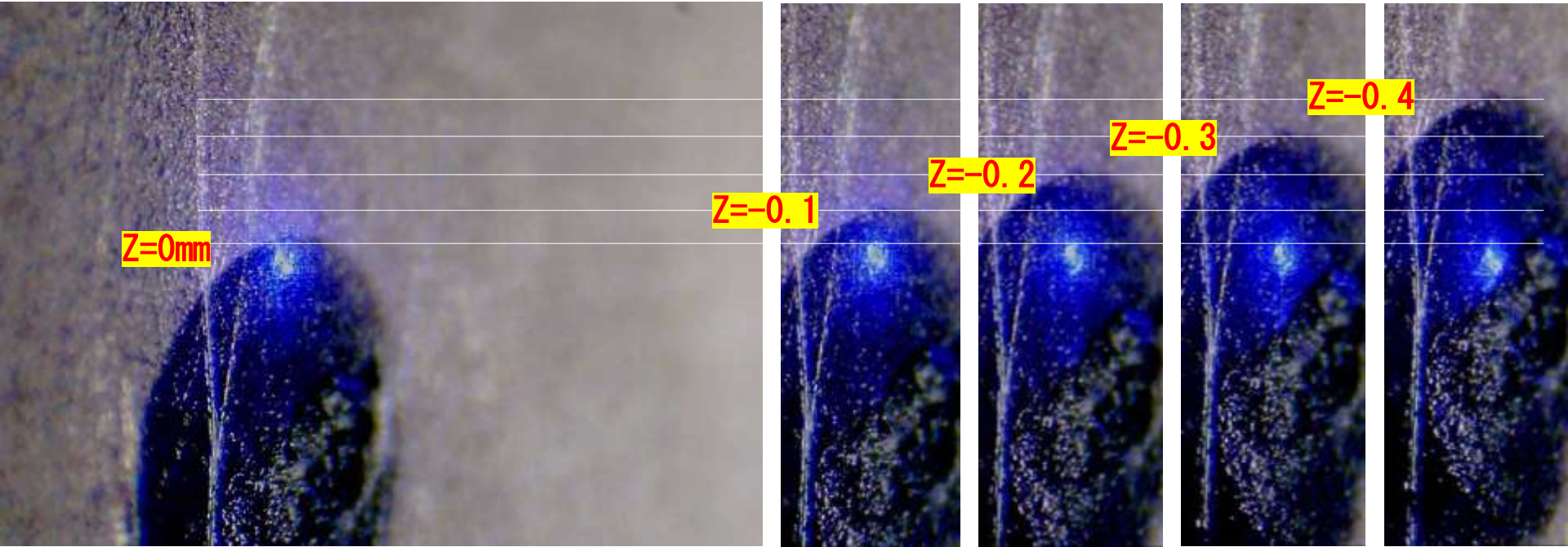


●飽和光スポットだが正確な径の計測方法

十分な拡大像の取得と共に、レーザのスポットの光飽和軽減策でWD18mm(もう半回転緩めるとレンズが脱落する状態)で50 μ m(半直径)まで絞れるようになりました。前述したように下図左端の写真の様に高さ1.4mmが215mmのパソコン画面に表示される倍率ともなると焦点深度が浅くフィルム・スケールではピンぼけや影の影響で正確な計測は無理でした。

そこで思いついた(当たり前なのに気が付いていなかっただけ)のがピンが合っており、サイズが計測もできるZ方向にCNC指令で移動させれば結果的にスポット径を正確に測れるということです。

それを行ったのが下図の写真となります。レーザの位置は画面内で移動しませんのでピンが合い続けているZのマイナス方向(CNCでは左下隅をゼロとしますので上側)に100 μ mづつ移動しながらセーブしていきます。各記録画像共通の特徴的な場所(この場合は黒印の頭)を狙いに横線を引っ張って行けばこのラインの間隔が自動的に100 μ mの格子が引け、レーザのスポット径を測るための正確なスケールとなるのです。この写真の場合、微小凹凸のあるプリント基板上のペイント面(たっぷり塗ればOKかも)なので正確な数値が出せませんが50 μ mの半値直径ではないかと思われま

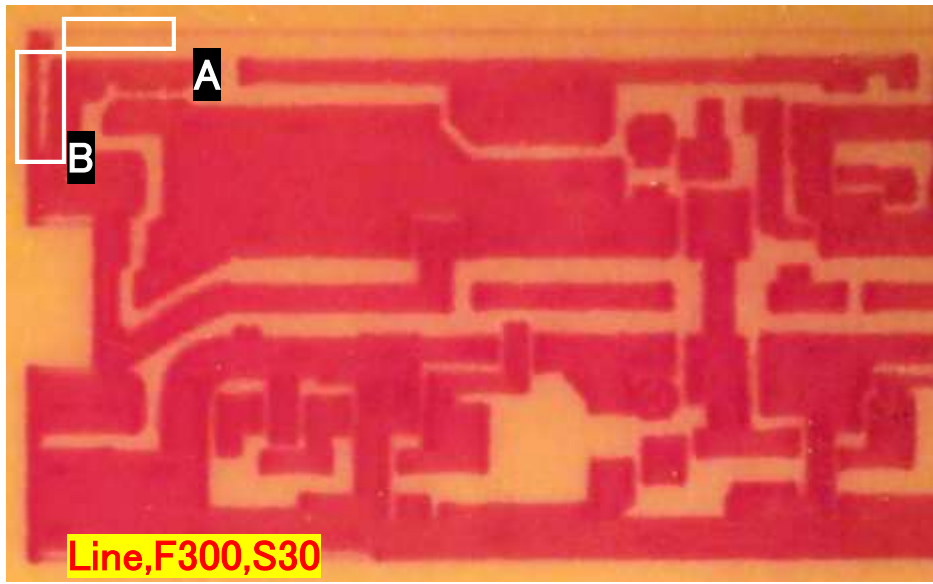
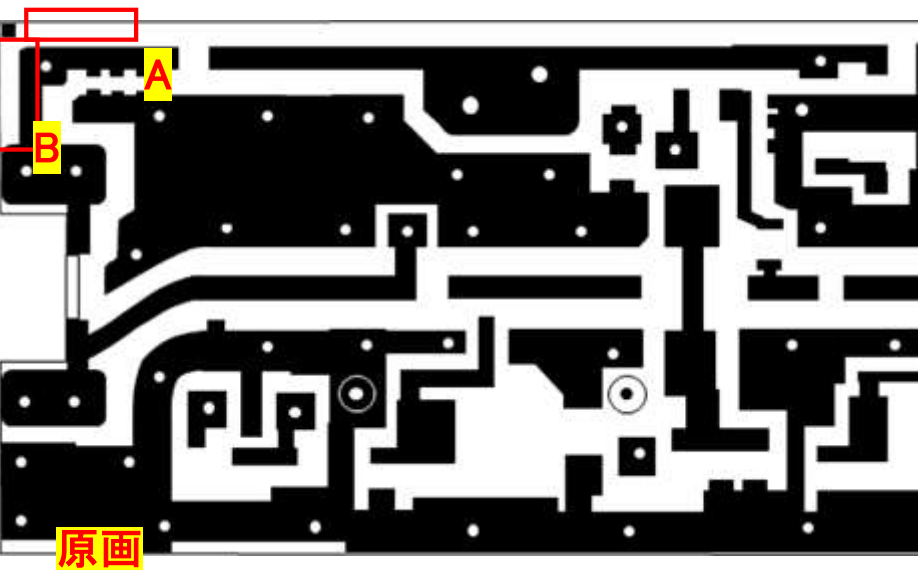


●いよいよ露光実験に入るが

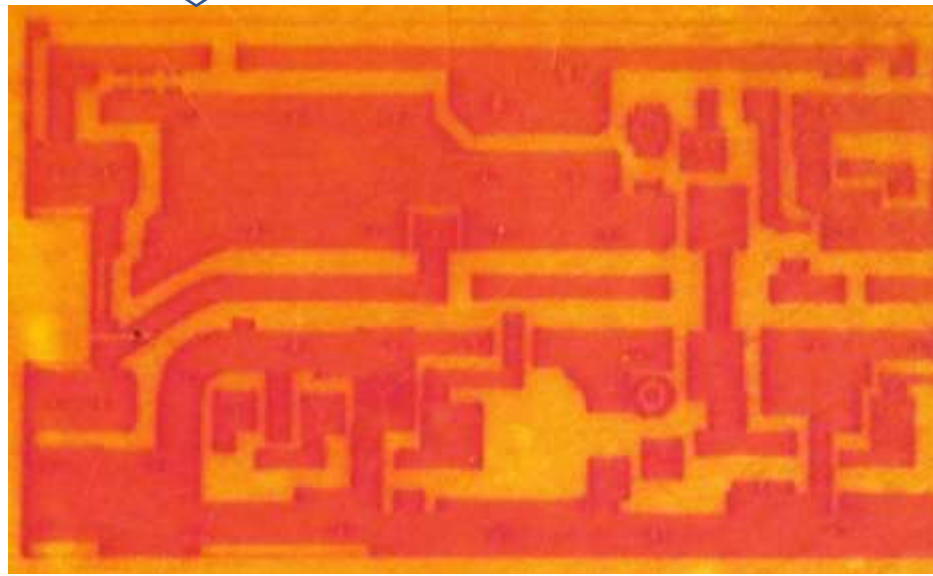
急いでドライ・フィルムへの露光実験に入りたいところですが、仮止め状態の為耐振動安定性確保などの仕上げ作業が残っています。これをかたづけ、机上の散らかし状態なども整理・整頓しておきたいのです。つまり次に降りかかってくるであろう次の問題に対する冷静な対応ができる心の準備を行います。

●付属レンズでレーザ光を限界まで絞ったが

下の上段に絞る前の状態を、下段の絞った場合と比較のために再度掲載しました。その結果ですが、想定していたほどの描画パターンの解像度の改善が得られませんでした。光学的な口径を小さくする(蹴られによる迷光防止)などで



↓ 付属レンズで極限まで絞ったが



露光不足気味(半分程度)ではありますが、僅かながらの解像度の向上は見られています。実使用に当たっての問題は①まだ0.2φのスルーホールが描画できていない事、②ギリギリ回路のアイランド間の分離が出来た状態だが、まだレーザによる横スキャン時のオン/オフ境界での太り現象の程度が問題、の2点があげられます。

最終手段として、レーザ露光専用のパターンを使用することも考えられますが、無理やりレーザ露光するほどのうれしさ要素が見出されている段階ではありません。

丁度、405nm(500mW)の本来使用すべきレーザが届いたので、これを使用しながら対策を練っていくことにしたい。

●405nm (500mW)のレーザのピン配列が違う！！

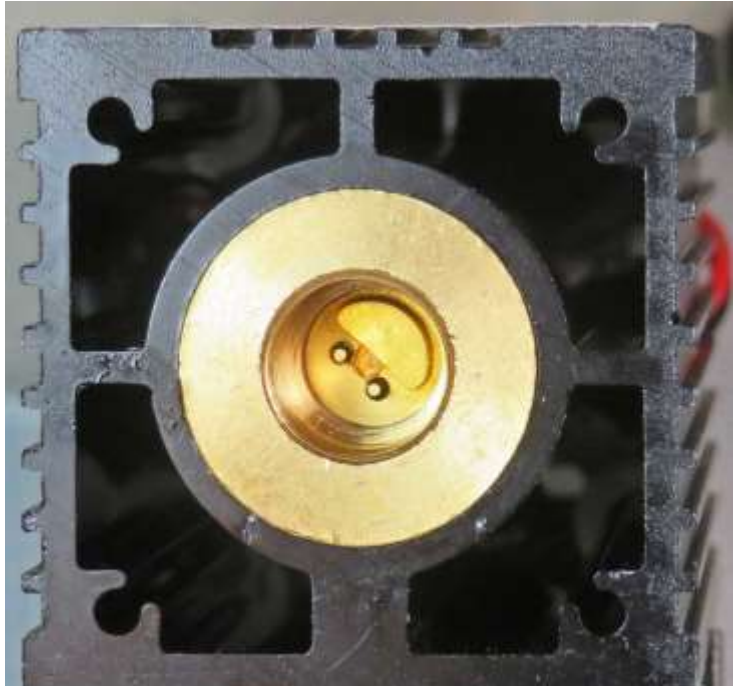
私のうっかりポカミスをまたやっしまいました。405nmレーザに切換ようと開封したら、コネクタのピン配置が違っているのです。ピンの入れ替えをすればよいと思っていたのですが、よく見ると12Vのレーザ基板電源の+がどうもGNDでコントローラからのPWM信号をそのまま入力するとやばそうです。

レーザ基板の電源を別なACアダプターで供給し、この+側とPWM入力信号のGNDを結線しなければ動かないはずで、Aliの発売元にチャット(最近チャットでしか連絡が取れない)で解決策を尋ねたら半日もかかっていた返事がコネクタ配線(3ピン)の入れ替えだけでよいとの返事。それは最初に私も考えたことで、レーザ基板側の+GNDにコントローラの-GNDのPWM信号は直結できないはずだと尋ねなおしたが今度は1日経っても返事が来ないのだ・・・(すでに4日経過)

●急遽450nm(1000mW)のレーザを顕微鏡対物レンズで絞ってみる実験に変更

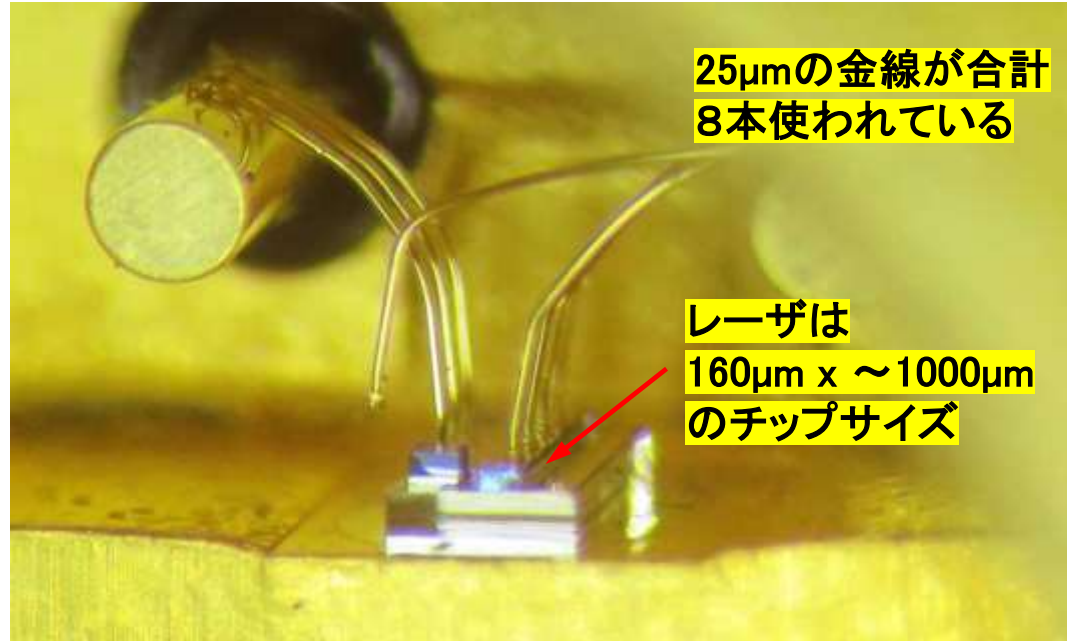
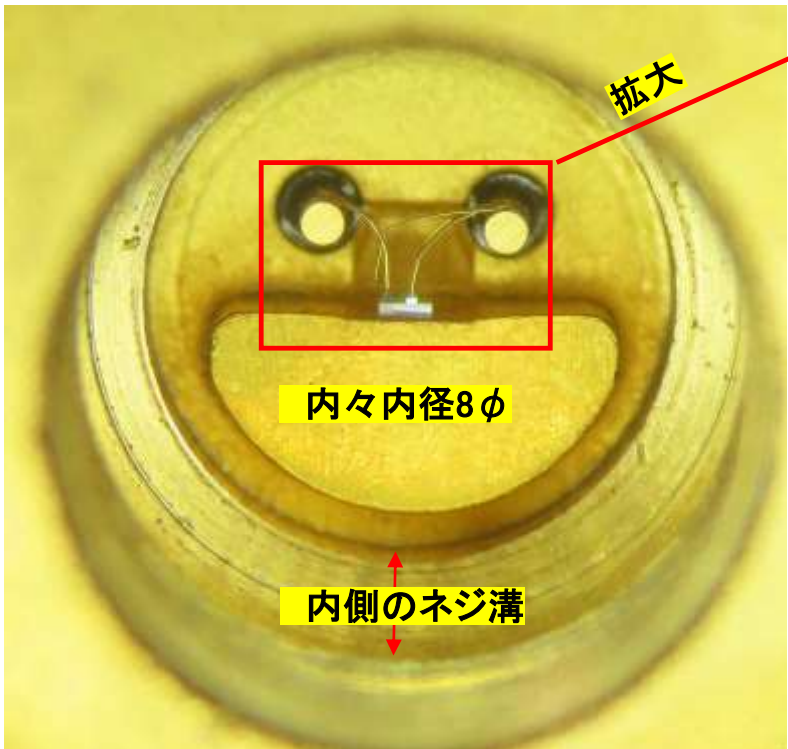
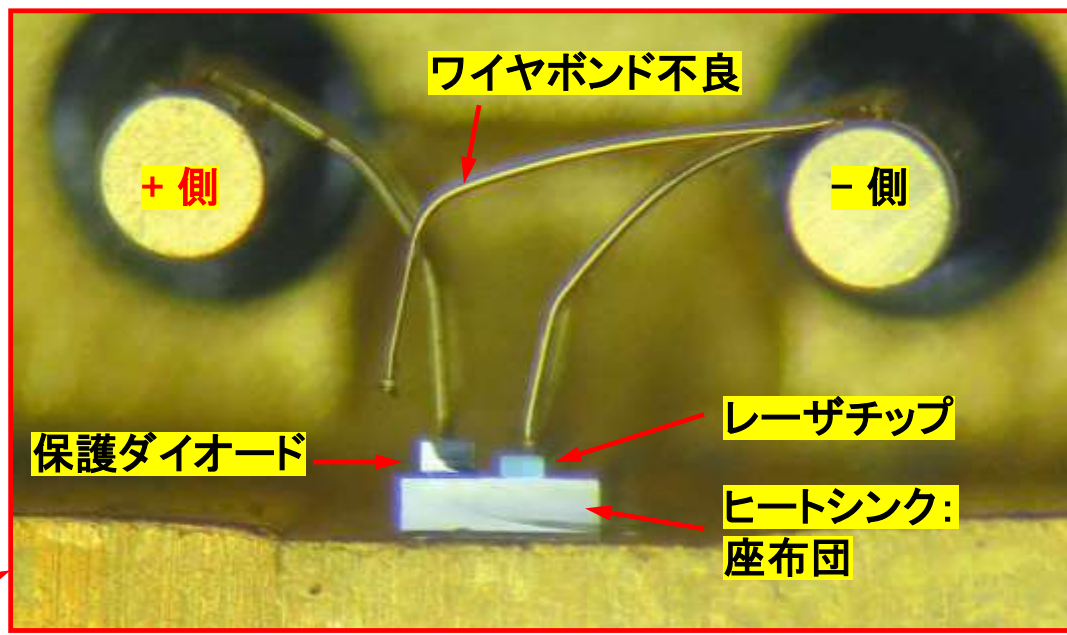
レーザ付属の単レンズに代わって、顕微鏡用対物レンズMPlanApo10xを使ってみます。左下写真の左がそうです。このクラスのレンズは新品だったらこれ1本でCNCが3~4台が買えてしまいます。画像上どの位置でも正確にX,Y寸法の測定が保証される優れ物です。本用途は単一波長で収差も許容なのでアクロマートのグレードでも十分目的にかないます。

右写真は付属レンズを取り去って内部を見た様子です。レーザチップは裸でした。これでは頻繁に使った場合の寿命が1年あればよい方だと思われます。ついでにこの内部を実体顕微鏡で覗いてみることにします。



下の写真はレンズを取り除いた時の8φ穴を実体顕微鏡(低倍率)で観察した様子です. これではよくわかりませんので、倍率を上げて撮影したのが右上写真です. **あ！ワイヤー1本が外れている. 逆接保護用のSiダイオードの1stボンドが剥がれている不良品です.** この状態では, GaN系素子はサージにも弱いので取り扱いに注意が必要です. **中国産らしい...**

ヒートシンク(750μm幅)にはSi(本来はAlNを使うべき)らしきものが使われています. その上左には保護素子のDiチップ(200μm角), 右には細長いレーザチップ(横幅160μm)がフェースダウンでマウントされています. 奥行きを知るために左側に傾けて撮影したのが下図となります. 一侧は25μmの金線が奥行(キャビティー長)が1000μmぐらいありそうなレーザチップに4本ボンディングされ, **+側**はメタライズされたヒートシンクに3本の金線がボンディングされています. 2nd側のリードピンにはボンディング失敗の跡もあり, 生産工程のずさんさが現れています.



●顕微鏡用対物レンズ10xの取付

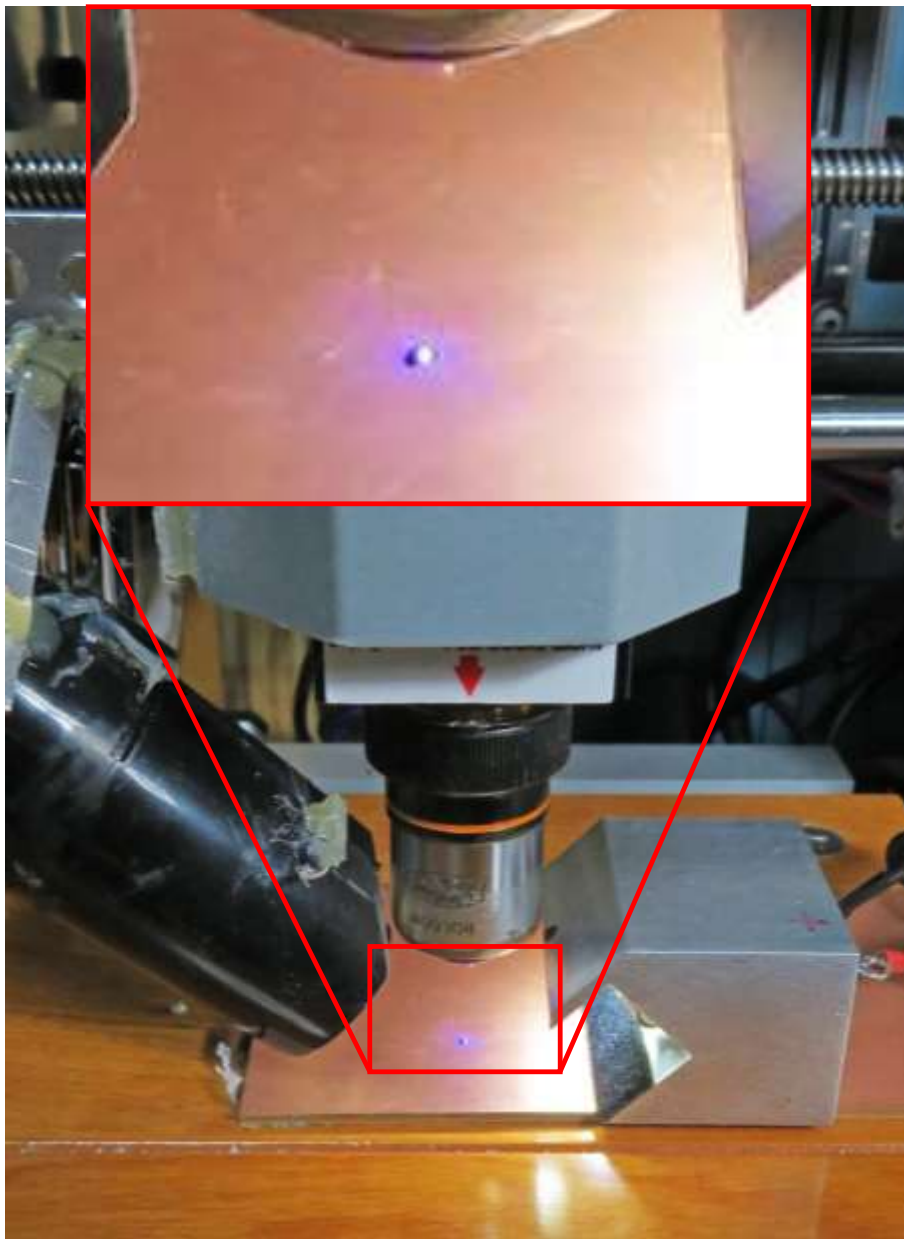
チョット横道にそれていましたが、話を元に戻します。顕微鏡用対物レンズMPlanApo10xの取付をホット・ボンドで行いました。その様子が左下写真です。せっかくの高級レンズですから、中心軸はしっかり合わせて接着してあります。レーザをCNCに取り付けた様子を右に

示します。取付ネジによる焦点深度の調整はもう出来ませんから、CNCで本体ごとZ軸の上げ下ろしをして焦点調節をすることになります。写真は丁度焦点が合っている時の様子を示しています。

前回の付属レンズでの限界WDが18mmでしたが、10倍の顕微鏡レンズ装着では14mmまで接近できることが可能となりました。うまく行けばレーザを絞ったスポット径がより小径になっているはずですが、

上部に貼り付けてある画像同じ写真を切り取り拡大表示したものです。

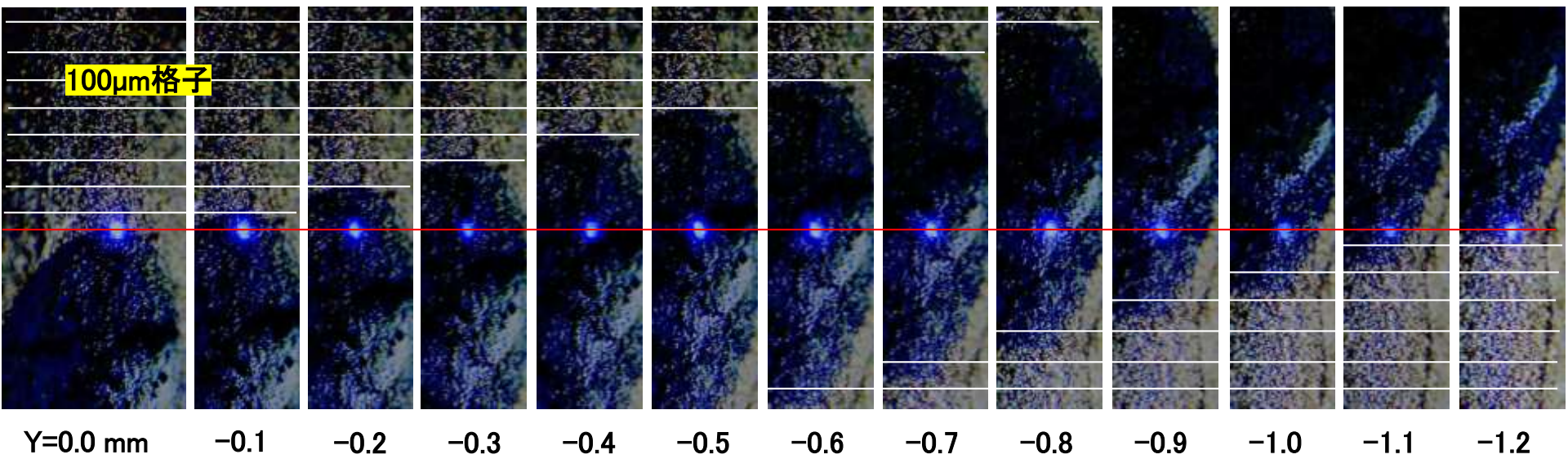
口径が大きな顕微鏡の対物レンズですが距離も離れているので、ファー・フィールドパターン全体がレンズに入っているかどうかは不明です。写真ではS1 (4mW)でもスポット輝度は飽和しています。実際にこの様子をデジタル顕微鏡の画像で検証します。



● 35μmまでレーザースポットが絞れたようだ

26ページで示したのと同じ黒い点(PILOTのCD/DVDマーカ使用)の上に絞ったレーザー光を当て、Y軸をCNC指令で100μmずつ上方に動かした画像を横に並べて、絞ったスポット径を計測してみたのが下図です。

表示される画像では、レーザーの光量が高くなるとスポット径は大きく見えてしまいますから26ページに示した時と同じレーザー・パワーS1(4mW)での撮影画像です(今回の方が明るい光学系になっているので直接比較はできません)。



付属レンズでの限界WD18mm時と異なり、ゴースト像もなく、スポット径も小さくなっています。およそですが、半値半径は35μm程度には絞れたのではないかと考えられます。一方、WDを14mmまで近づければその分当然焦点深度が浅くなってしまいます。したがってフォーカスポイントからZ軸を0.5mmの上げ下げでも明らかにスポット径が広がっていくことが確認されます。これ以上WDを短くすると(20Xの対物レンズを使うなど)さらに焦点深度が浅くなりますからX,Yスキャン幅の広い面積を露光する場合、場所による高さの違い(焦点ボケ)による影響から実用的ではなくなる可能性も出てきます。とりあえずこの段階でドライ・フィルムに懸案のマスク・パターンを露光をして何処まで改善できたかを検証してみます。

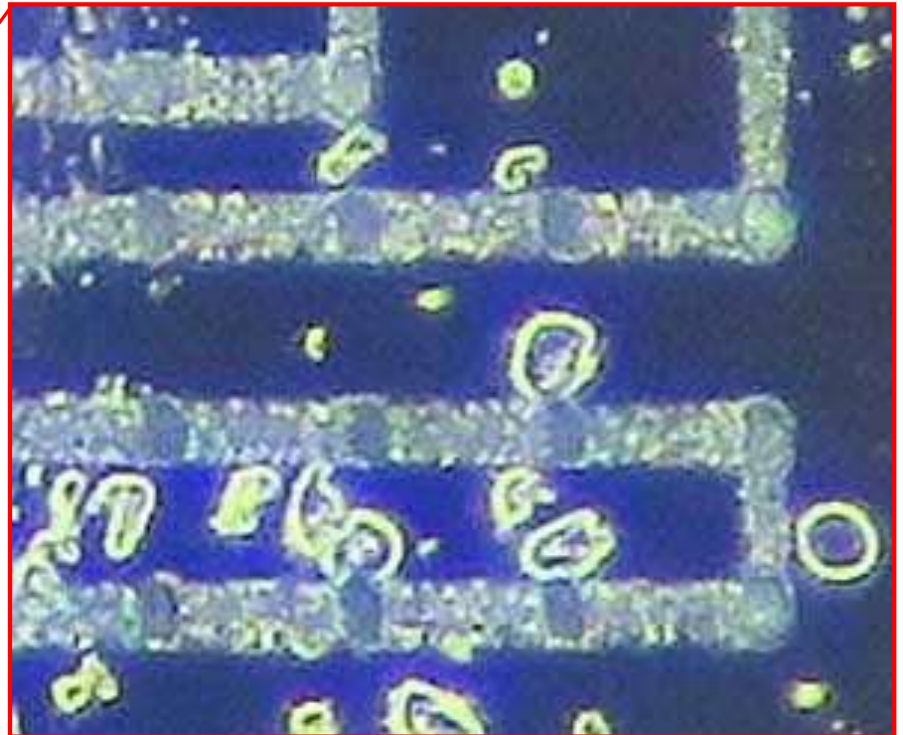
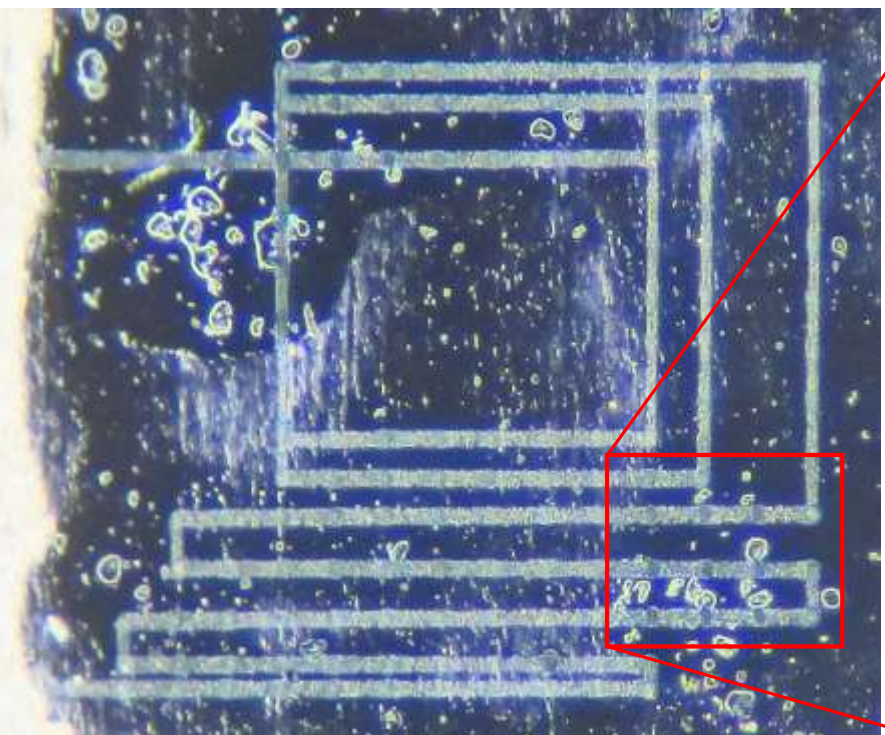
●ドライ・フィルム露光の準備

前ページの土台(プリント基板)の上に、マーカで黒の点を付けた1.55mmのプリント基板(ドライ・フィルムを貼り付けて準備している基板と同じ)を置いて、まずは焦点調整です。CNCでZ軸上方に1.55mmほどレーザーを上昇させて、黒の点に



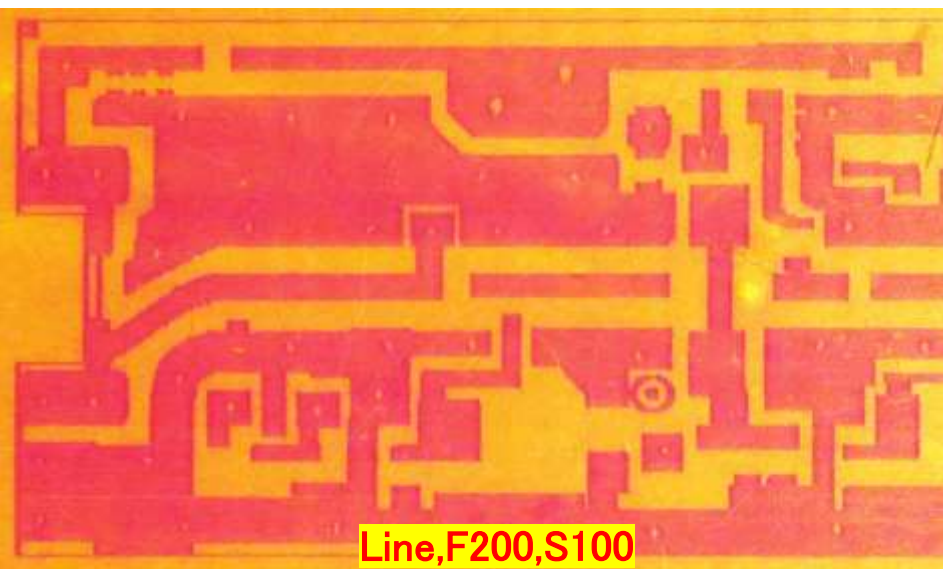
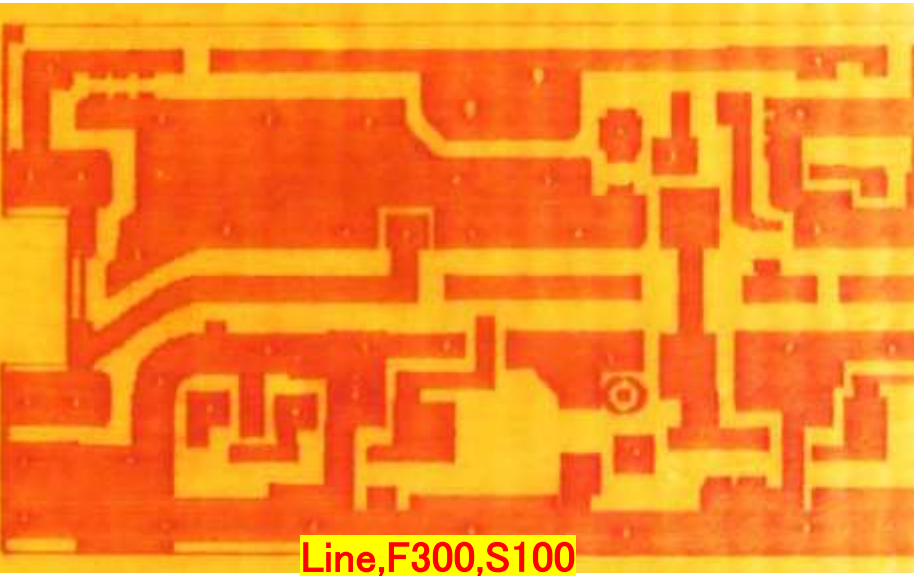
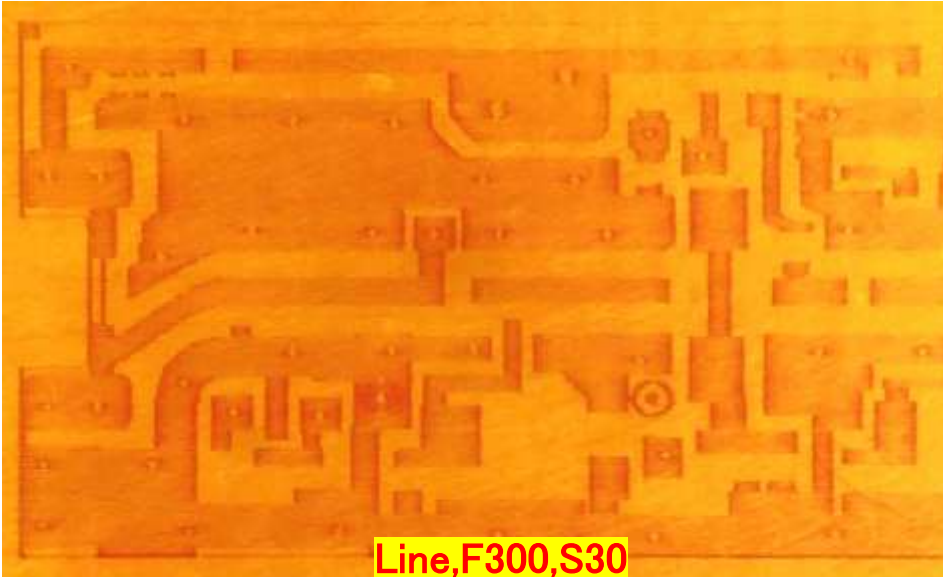
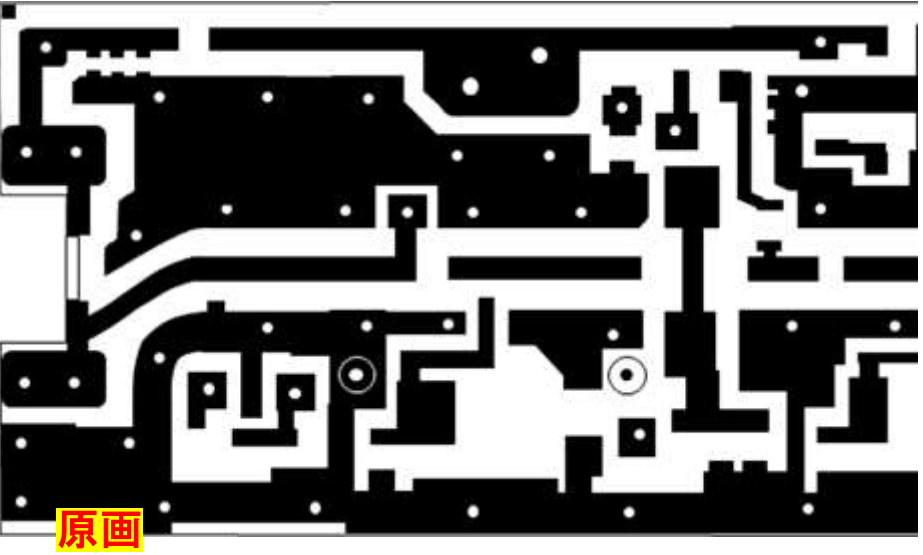
S1(4mW)を照射してみたところパターンが細長いので近すぎです。その基盤を実体顕微鏡で見ると、たった4mWなのに左写真の様にペイントが斜めパターンで焼損しています。今度は0.2mmレーザーを追加上昇させ、焦げないように1カ所に1秒以上留まらないようにチョンチョンとXYを0.1mmずつ手動で素早く移動させた場合が、左下の写真です。なんと移動している軌跡までマーカの黒が変質しています。

赤枠の部分を拡大した写真を右下に示します。よく見ると直径40μmの掃引跡の中に0.1mmステップの1秒弱留めた痕も入っています。焦点スポットをこれ以上絞れたとしてもCNCのステップは50μmですからラスタがでてしまいますので、焦点合わせはこの状態で良しとして、次のドライ・フィルムへの露光に移行します。



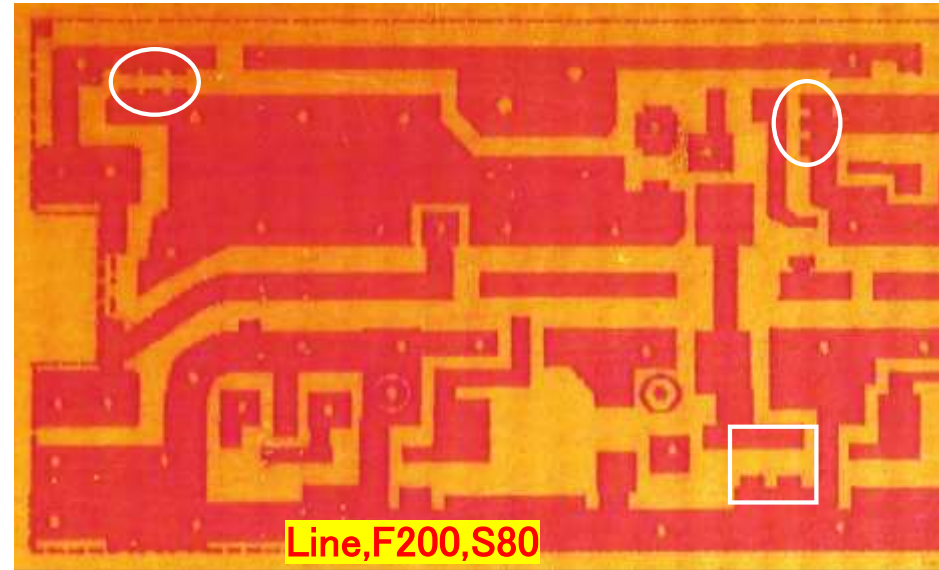
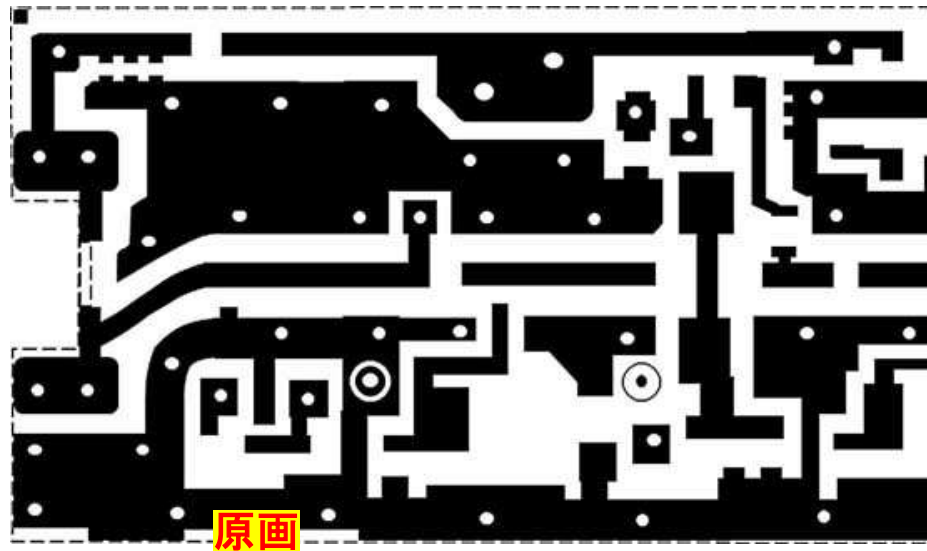
●ドライ・フィルムへの露光

下に示す写真は原画と露光の様子を比較したものです。原画の右はF300(露光のスキャン速度が300mm/分), S30(レーザ出力118mW)の場合です。どういうわけか露光不足ですが、解像度は満足いくレベルです。左下がS100(392mW)の場合です。これで露光はジャストですが、スキャンをF200と遅くし33%ほどオーバ露光してみたのが右下となります(これらは露光をさけるためイエロー・ライト照明下での実体顕微鏡撮影です)。これでも支障は無さそうです。(やった!!)



●ドライ・フィルムへの露光2

前出の露光条件では露光オーバでしたからレーザー出力S100をS80(314mW)にした露光2を行いました。そのほか、露光されたパターンを見るとレーザー露光では幅広になりがちで潰れる傾向があるので**原画を修正**した方が良い点、①**スルーホール・パターン0.2φの円を縦0.3横0.33の楕円に変更**、②**狭くて際どいスペースを広めに取って余裕を持たせる**、③**外周の区切りの実線を破線にする**などです。また黒ペイント上の痕跡幅が40μmでも、50μmステップのラスタ像が現れていなかったのもより絞って**痕跡幅を35μmまでフォーカスを絞る**などを行いました、その結果が下の写真です。



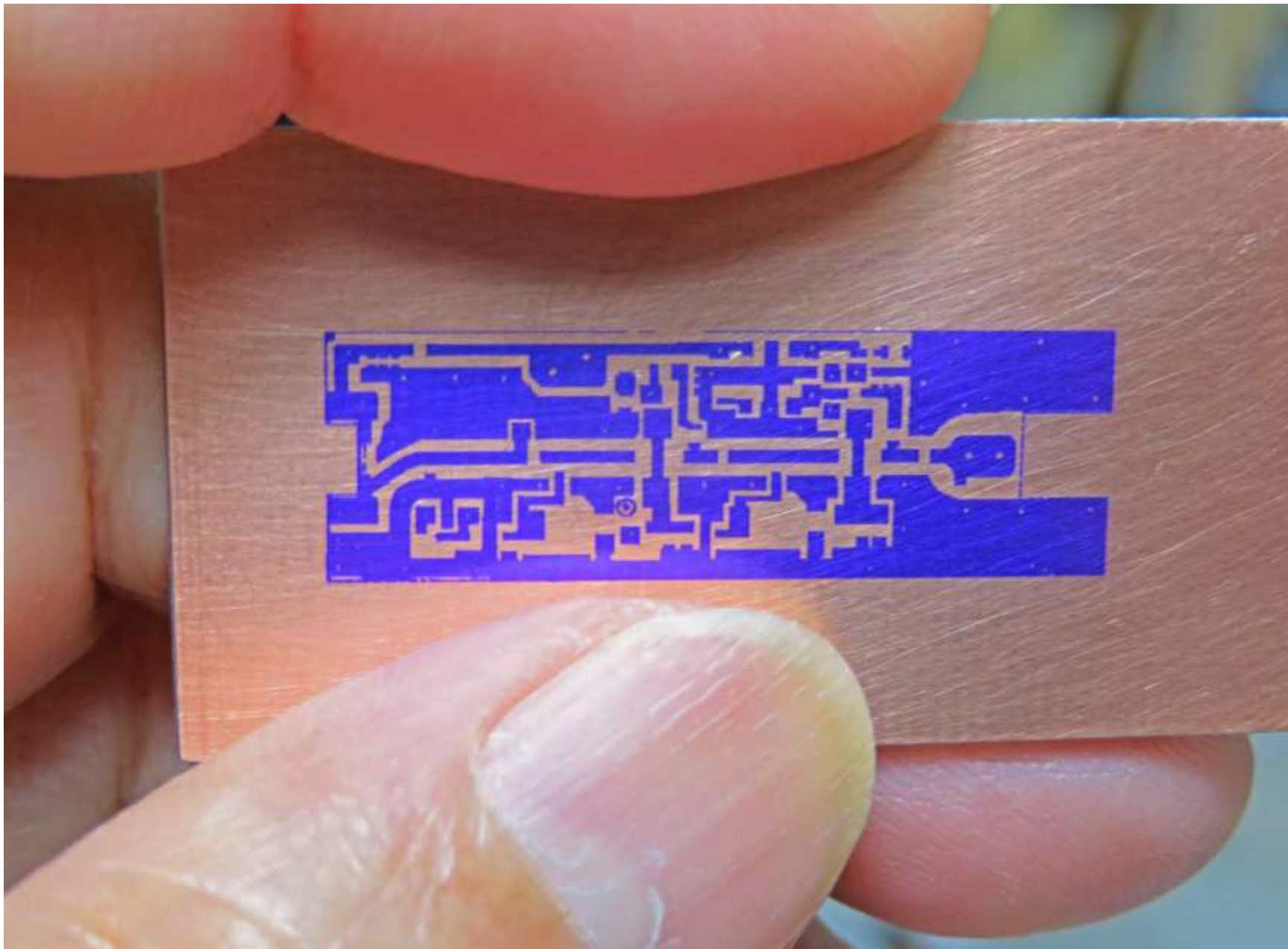
左右(原画と露光パターン)の画像を比較すると、これまでよりかなり忠実に露光パターンが再現していることが分かります。①のスルーホールの明確な再現、②:狭く際どいスペースの消滅、③の破線の描画によるショート状態の改善などです。レーザープリンタによるホトマスクでは細い直線は切れ切れになっていたもので問題はなかったのですが、レーザー直接描画では太さ50μmの細い横線もはっきりと再現しているための破線変更でした。

こういった意味ではCNCによる直接描画露光の方が解像度が高いと言えます(ただし、横太り問題は設計図段階で処理しておく必要が有ります。例として2つの白丸枠部は3個の0603コンデンサが並ぶ場所(他の多く1005用はんだパッド:例として白四角枠部は2個の1005が並んではんだが付く場所)ですが、はんだパッドが綺麗に描画されています(これまでプリンタでは形状が崩れていました)。

欲を言えば描画されたスルーホールの径が原画と比較すると半分程度に小さくなっているのも、まだ露光オーバ状態である懸念が残ります。

●現像を試してみたら・・・

前のページの露光基板を、2%の炭酸ナトリウム水溶液で現像してみました。それが下図です。高さ9.95mm、横31.1mmのパターンですから肉眼では見事にエッチング・レジストが形成されています。これを実体顕微鏡でチェックしてみます。



●顕微鏡用対物レンズ10xの威力でやっと実用レベルのCNC露光が実現

下図が実態顕微鏡で撮影した現像済基板です。十分なコントラストもあり何とか行けています。しかし、スルーホール径は、潰れにより100 μ mレベルになっていますので露光量をS80をもう少し下げてS60(235mW)程度にして露光オーバを解消する必要があるようです、**赤枠四角の場所で破線が途切れています**が、現像途中にて終点を確認するためエアガンで水を吹き飛ばすことを複数回行ってはいますが、この圧力が強すぎてレジストが剥がれてしまっています(時間をケチらないで丁寧にやればこれは防げる)。



●本実験ノートはここで一旦終了しますが、今後本当の実用化までには、**①高精度に合致する裏パターンと表パターンの確認**、**②スルーホールを用いた裏・表パターンの高精度アライメントを可能にする技術開発**、**③405nmレーザーによる効率の良い露光方法への移行**(ただし、使用する顕微鏡対物レンズは紫外線用と交換する必要がある)などがあげられます。中でも②は意外と難題となりそうです。③については、450nmレーザーでもなんとかなりそうなので、一番後回しの課題となります。

●以上だれもやろうとしなかった(やる意味が無いのかも)テーマである、「**安価CNCを応用して(前回の実験ノート)0.1 ϕ ~0.2 ϕ のスルー・ホール形成(多くの細かい穴開け)自動化と今回の高精細露光を一貫して行う**」という命題がやっと片付いたのです。今後のブラッシュアップ経過にも注目していただければ幸いです。