

平成14年度 卒業論文

レーザー加工による  
微小立体創生法に関する研究

福岡工業大学工学部

知能機械工学科

99E1020 金口 和男

99E1080 吉田 正和

99E2018 甲斐 晶寛

指導院生 吉井 啓太

指導教員 河村 良行 教授

# 目次

第 1 章	緒言	P3
第 2 章	レーザー加工の原理	P5
第 3 章	実験装置	P8
3-1	実験装置構成	P9
3-2	5 軸加工台	P9
第 4 章	地球儀形状加工	P13
4-1	地球儀の構成	P14
4-2	マイクロ地球儀支持部の作製	P14
4-3	マイクロ地球儀球体部の作製	P15
4-4	レーザーパターニング	P15
第 5 章	マイクロダイヤモンド工具の作製についての研究	P38
第 6 章	結言	P47
	謝辞	P49
	参考文献	P50
付録	加工プログラム設計図（地球儀、ダイヤモンドドレッサー） ギネスブック申請の資料など	

# 第 1 章

## 緒言

本研究室ではレーザーアブレーションを用いたレーザー加工を研究している。これまでの実験で、5軸加工台装置を完成にさせたことにより、被切削物の一側面からの加工では不可能であった3次元加工が行えるようになった。その装置とレーザーアブレーションを用いて、様々な微小3次元加工が行われてきた<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>。

今回我々は、初めにマイクロ地球儀の作製を行った。これは切削、切断など今までのレーザー加工技術の習得のために行ったものである。またそれに加えて、立体形状にパターニング加工を行う研究も行った。パターニングとは我々が定義したもので、表面上に外部入力的位置データを転写し、レーザー加工を行うことである。これは加工技術、精度の向上を目的として加工を行った。

次に我々はダイヤモンドマイクロ工具の製作のための調査を行った。硬度の高いダイヤモンド

でもレーザーによる加工は可能である。しかし、レーザー加工によりダイヤモンドの加工表面に材質の変化が起こり、硬度が下がってしまつては意味がない。そこで今回はレーザー加工がダイヤモンドに及ぼす材質の熱的変化を調査することで、ダイヤモンドの特性を活かしたマイクロ工具の作製に近づけると考えて調査を行った。

## 第 2 章

# レーザー加工の原理

ここではレーザー加工で用いられるレーザーアブレーションについて述べる。レーザーアブレーションとは、レーザー光を固体に照射した場合、レーザー光の照射強度がある一定の大きさ（閾値）以上になると、固体表面で電子、熱的、光化学的及び力学（機械）的エネルギーに変換され、その結果、中性子、分子、正負イオン、クラスター、電子、光（光子）が爆発的に放出され、固体表面がエッチングされるプロセスである。この現象を利用して固体に加工を行うのがレーザー加工である。その原理はレーザー光がその対象物に照射されると、対象物の分子及び原子が高いエネルギーを吸収し、分子や原子の振動が大きくなる。この振動のために分子、原子間の結合力が切断、結合し別の物質に変化し、さらに下の対象物から除去され、これにより穴が空いた状態になる（図 2.1）。この現象はレーザーの蒸散作用と呼ばれ、主にレーザーの照射パワー（レーザー密度）、照射時間（パルス幅）、被加工物の材質に大きく依存し、その条件によってレーザーアブレーションの効果は大きく変化する<sup>(5)</sup>。

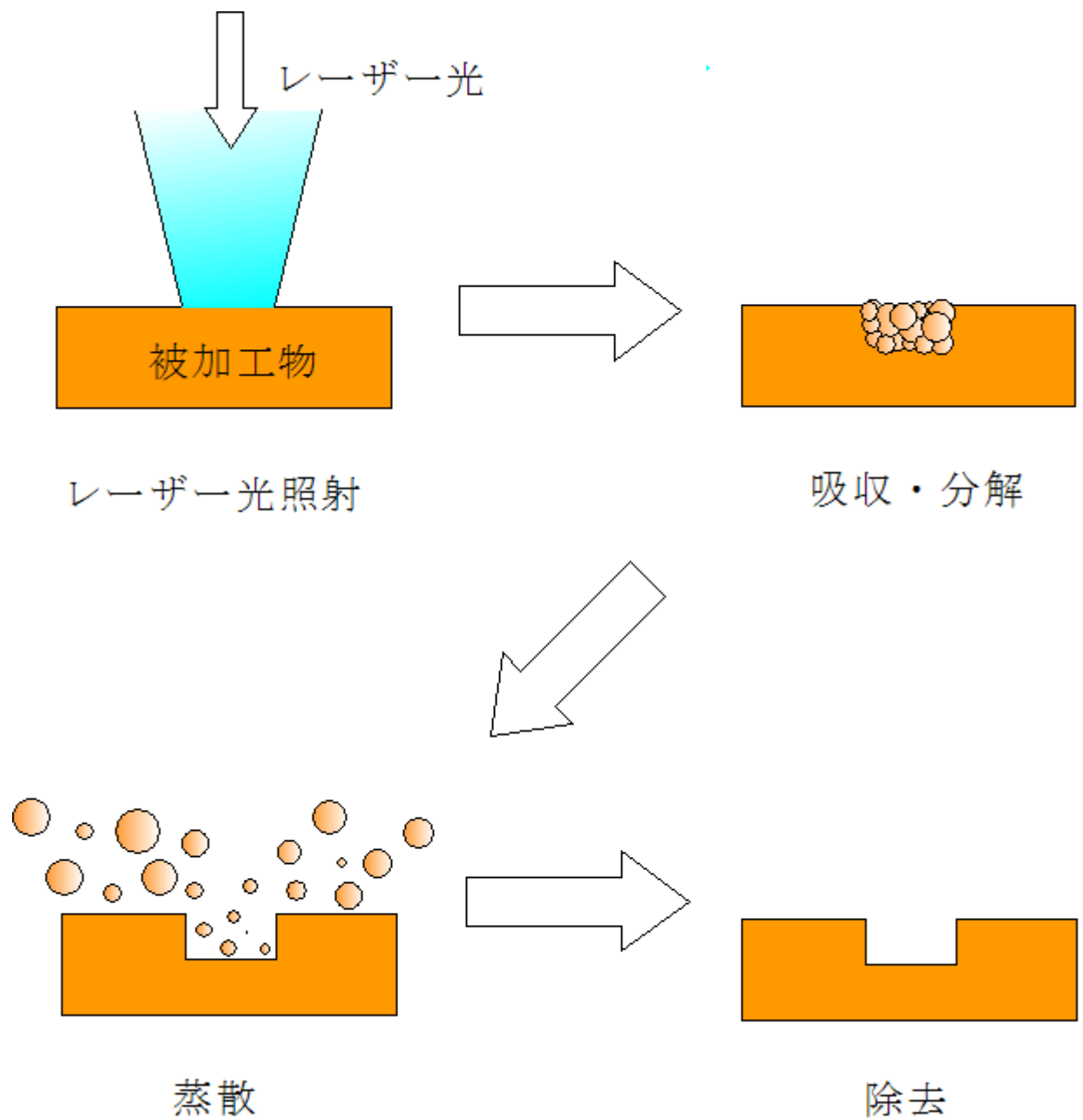


図 2-1 レーザーアブレーションの原理

# 第 3 章

## 実験装置



### 3-1 実験装置構成

実験装置の全体を図 3-1 に示す。レーザーと 5 軸加工台は TTL ボードを介してパソコンの N88BASIC で制御を行った。このレーザー装置 (NEW WAVE RESEACH 社製 POLARIS II) は Nd-YAG レーザー光 (波長 1064nm) を 2 つの KDP (高調波発生装置) に通すことにより、4 倍波 (波長 266nm) に変換されている。レーザー光のエネルギーと発振周期は、レーザーコントローラーによって調節できるようになっている (図 3-2)。集光レンズには  $f=50$  (集光距離 50mm) と  $f=100$  (集光距離 100mm) があり、通常は  $f=50$  で集光するが、5 軸加工台の  $\theta$  を使用する際に 5 軸加工台のステッピングモーターと集光レンズの台が接触してしまうことがあるので、その時には  $f=100$  の集光レンズを用いる。

加工台の前方には CCD カメラが設置されている。CCD カメラをモニターに接続し、レンズでの拡大光学系を用いることでモニター上に加工物を拡大表示することが可能となる。これは、加工前のレーザー光軸と 5 軸加工台との軸調整や加工物の加工状況の確認に用いられる。

### 3-2 5 軸加工台

図 3-3 に 5 軸加工台を示す。この加工台は  $X, Y, Z$  の直線移動ステージと、 $\theta, \omega$  のステッピングモーターの回転軸による 5 軸で成り立っている。5 相ステッピングモーター駆動の直線移動ステージ (シグマ光機株式会社製 MINI-60, MINI-60ZF, MINI-60  $\theta z$ ) を用い、そのドライバーは小型ステッピングモーター (オリエンタルモーター株式会社製 PMD07C) を用いている。 $X$  軸、 $Y$  軸、 $Z$  軸はそれぞれの軸に沿った直線移動が可能であり、単位移動距離は  $1\mu\text{m}$  で最大可動範囲は 4mm である。 $\theta$  軸は回転ステージであり、単位回転角度は  $0.01^\circ$  で最大回転範囲は  $360^\circ$  である。 $\omega$  軸には 5 相ステッピングモーター (オリエンタルモーター株式会社製 PK-543-B) を用い、モーターの軸によって回転できるようになっている。ドライバーにはファインステップ (オリエンタルモーター株式会社製 Fine Step UKF 専用ドライバー) を用いており、単位回転数角度は最小で

0.00288° まで設定できる。本実験ではこの軸の単位回転角度を 0.036° に設定した<sup>(6)</sup>。  
被加工物はこの  $\omega$  軸の先端に取り付けることで加工可能である。

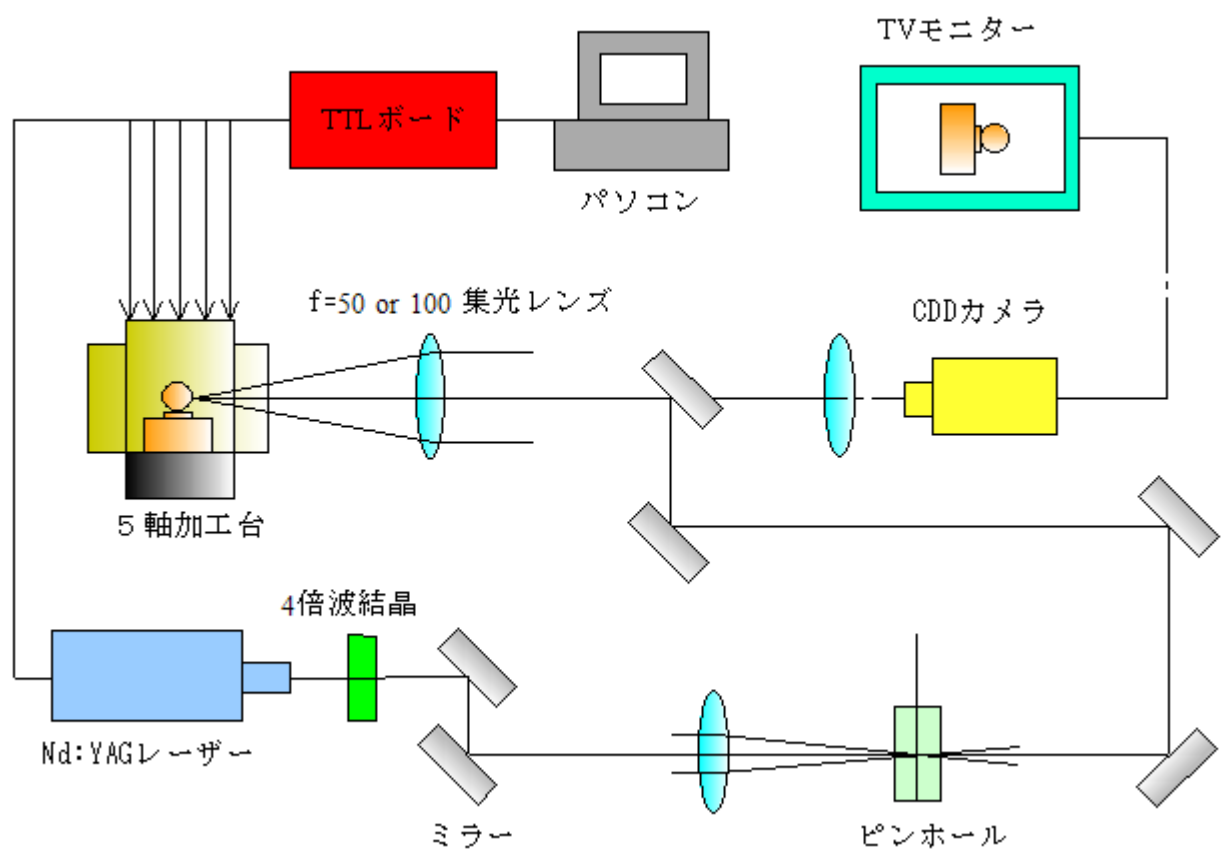


図 3-1 実験装置構成



(a)



(b)



(c)

図 3-2 レーザー装置

(a: レーザーコントローラー、b: レーザーボックス、c: レーザー電源)

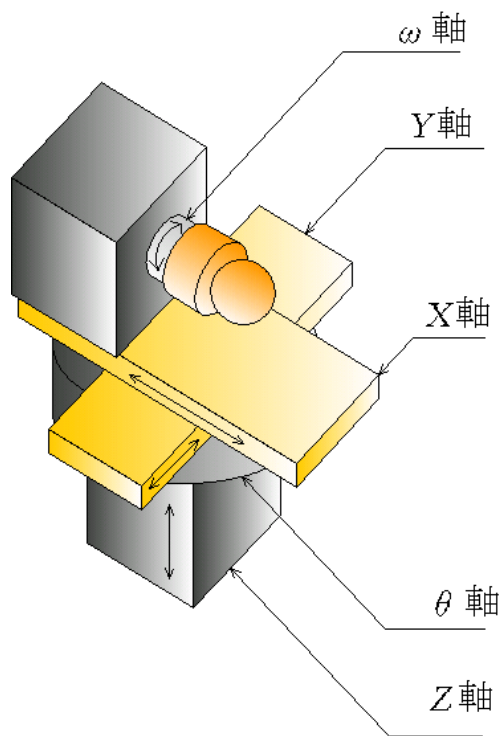


図 3-2 5 軸加工台

# 第 4 章

## 地球儀加工

## 4-1 地球儀の構成

地球儀作製には主に球体加工と台座加工、パターニング加工の三つの工程がある。いずれも5軸加工台の $\omega$ 軸に加工物を取り付け、レーザー加工を行う。その際に5軸加工台の直線移動や回転移動を制御することにより、平面や立体といった形状を製作することが可能である。

## 4-2 マイクロ地球儀支持部の作製

レーザーマイクロ加工技術を用いて、マイクロ地球儀の支持部を作製した。材質にはポリイミド樹脂を用いた。このときの加工条件は、レーザーの照射エネルギー2.7mJ、レーザー集光径60 $\mu$ m、照射エネルギー密度 $9.7 \times 10^2 \text{J/cm}^2$ で行った。

試作として、一体型の地球儀支持部を作製したものを図4-1-1に示す。試作した支持部は、球体取り付け部(図4-1-2)の作製が困難であったため精度が低く、球体部の脱落が目立った。この問題の解決策として、支持部と軸部を別々に作製した後で取り付ける方法を用いた。さらに、地球軸が23.4度傾いていることも考慮することにした。

二つの部品からなる地球儀支持部の加工工程を下記の①から③項目に分けて行う。

### ① 第一工程

地球儀球体部を直接支持する球体軸支持部の作製。図4-1-3に示す。

### ② 第二工程

球体支持部を取り付ける台座部の作製。図4-1-4に示す。

### ③ 第三工程

二つの工程で作製した部品の組み立て。図4-1-5に示す。

上記の工程を用いて実際に作製した地球儀支持台座を図4-1-6に示す。支持部を二つの部品に分けたことで、球体取り付け部の精度も向上し、球体部の脱落を防ぐことがで

きた。球体支持部と台座部を組み合わせる部位 図 4-1-7 は、数  $\mu\text{m}$  の精度で作製すること  
とで接着剤などを用いずに組み立てることができた。

### 4-3 マイクロ地球儀球体部の加工

図 4.2 に地球儀球体部の加工工程を示す。工程としては 3 工程に分けて加工を行った。

第 1 工程では地球儀上部の軸を作製した。レーザーを照射し続け、同時に  $\omega$  軸を回転  
させることで円柱加工を行った。

第 2 工程では地球部球面部を作製した。5 軸のうちの 2 軸、 $X$  軸と  $Z$  軸を用いて円弧  
の動きを BASIC でプログラムした。このプログラムとレーザー照射を組み合わせること  
により円弧加工を行い、その後に  $\omega$  軸を回転させる。この一連の作業を繰り返し行った。

第 3 工程では地球部下部の軸を第 1 工程と同様の加工を行い、作製した。

### 4-4 レーザーパターンニング

ここではレーザーにより任意の文字や絵などを再現するレーザーパターンニング(以下  
パターンニングと呼ぶ)について述べる。パターンニングの方法としては、自分達がパター  
ニングを行いたい絵や文字などを N88-Basic<sup>(7)(8)</sup> で 0 と 1 の配列データとして作成し、0  
のデータでは何もせずに 1 のデータの部分ではレーザーを照射するといったプログラム  
を 5 軸ステージの動きと組み合わせ、実行することで図 4-3-1 のような数字や絵、文字  
などのパターンニングを行うことが可能である。図 4-3-1 において(a)では自分たちがパ  
ターンニングを行いたい絵や文字等を用意し、(b)で縦、横ともに任意の枠数でのデジタ  
ルデータの作成を行う。そのデータをもとに(c)のようにレーザーパターンニングを行う。

この方法を用いて図 4-3-2 のようにアルミや金をコーティングしたポリイミドフィル  
ム上やポリイミド樹脂の球体に世界地図のパターンニングを行った。パターンニングに用い  
たのはメルカトル図法で描かれた世界地図を用い、5 軸ステージの  $\omega$  軸で経度方向、 $\theta$   
軸で緯度方向の回転を行いパターンニングした。世界地図の配列データはデータ内容が非

常に膨大で普通に作成すると時間的な損失が大きいためデータの内容は0と1では表さずに1と-1で表すことにし、1のデータに-1を乗算しデータ内容を反転させることで世界地図の陸と海の境界線部分にあたるデータのみ作成し、その間の大陸内部に当たる1のデータは積算により-1に反転するためデータ作成に要する時間の過剰な浪費を避けることができた。使用したデータ作成のプログラムやパターニングに用いたプログラムは付録に記載することにする。

#### 4-4-1 ポリイミド樹脂へのパターニング

先に述べた手法を用いポリイミド樹脂へのパターニングを行う。パターニング中は $\omega$ 軸の送りステップ角が常に一定な為、北半球と赤道の間でレーザーの照射回数に差が生じ、その結果レーザーアブレーションによる掘り深さが均一ではなくなるといった問題点が挙げられた。

この問題を解決するため、まず球体の北半球と赤道にあたる場所でのレーザーの照射回数の差を求めそれに基づきレーザーのパワーをパターニング中に緯度が増える毎に調整し、レーザーアブレーションによる掘り深さを均一にしたものに仕上げることにした。

そのためにレーザーの出力を調整する装置であるアテネータとレーザーの照射エネルギー密度を測定した結果を図4-3-3に示す。

次にレーザー単発照射時におけるポリイミド樹脂のレーザーアブレーション深さとその時のエネルギー密度を測定するためにポリイミド樹脂に縦 $6\mu\text{m}$ 、横 $2\mu\text{m}$ の送り量でレーザーを照射して図4-3-4のような縦長さ $600\mu\text{m}$ 、横長さ $200\mu\text{m}$ の長方形のアブレーションを行い表面粗さ測定器によって加工面の深さを測定した。測定結果は図4-3-5に示す。

この2つの測定結果をExcelで、それぞれの近似曲線

$$Z = -1 \times 10^{-9} X^4 + 3 \times 10^{-7} X^3 + 0.0025 X^2 - 0.9135 X + 84.61 \quad (\text{式 4-1})$$



$$f=0.2814X^4-1.5012X^3+2.9861X^2+2.4035X+0.2374 \quad (\text{式 4-2})$$

を求め、それを基にしてアテネータ調整によるレーザーの単パルスアブレーション深さを導き出す命令文をプログラムに組み込んだ。これにより地球儀の北半球から赤道、赤道から南半球部分のパターニングにおいてその間徐々にアテネータを調整することにより均一な任意のアブレーション深さを再現することが可能となった。

#### 4-4-2 蒸着を用いたパターニング

回転角が一定のため起こるレーザーアブレーションによる掘り深さの違いはレーザーパワーを調整することにより解決したが、レーザーパターニングとして陸と海に段差が生じるのは不自然であることやポリイミド樹脂にそのままパターニングを行うと同材質では陸と海を区別して認識することが困難であるといった理由から加工した球体にアルミや金を蒸着してパターニングを行うことにした。図 4-3-6 は蒸着パターニングの大まかな流れを示している。(a)はポリイミドフィルムに真空蒸着を用いてアルミ蒸着を行い、(b)でイオンスパッタリング法によって金をコーティングした。そして金のみをレーザーアブレーションすることにより(c)のように金とアルミの材質の違いが表れると考えた。使用した蒸着装置とイオンスパッタリング装置は付録に掲載することにする。

蒸着を用いたパターニングの目的としてはアルミと金の違いで陸と海の境界線を浮き立たせることで陸部分と海部分の認識向上を目指した。ここでも前に述べたポリイミド樹脂へのパターニング時と同様にレーザーパワーの調整が非常に重要となってくる。そこでアルミ膜を全てアブレーションしないようにレーザーエネルギー密度とアルミのアブレーション深さの関係を求めるための実験を行った。

#### 4-4-3 アルミのアブレーション深さを求める実験

アブレーション深さを求めるために厚さ 1mm 程度のアルミ板に縦、横共にモーターの

送りを  $10\mu\text{m}$  とし  $1000\times 200\mu\text{m}$  の長方形アブレーションを行い表面粗さ計で深さを測定した。

実験条件は

A: ピンホール無しでアブレーションを行った場合

B:  $0.5\text{mm}$  のピンホールを用いた場合

C:  $0.5\text{mm}$  のピンホールと光アテネータ (10%透過) を用いた場合

の3つで行った。実験前にパワーメーターで測定したレーザーの出力電圧の関係を図 4-3-7 に示す。そして A と B の出力電圧とアルミのアブレーション深さの関係を図 4-3-8 に示す。C についての測定は行っておらず、図 4-3-7 のグラフより近似式を利用してレーザー出力電圧  $0.11\text{mV}$  を導き出した。図 4-3-9 はアブレーション後のアルミ板を電子顕微鏡で撮影したものである。

結論として実際のパターニングの条件に当たる C において単一パルスでのアルミのアブレーション深さが  $0.01\mu\text{m}$  といった結果が得られたが蒸着されたアルミの厚さとレーザーの重なり回数から推測しても  $1\mu\text{m}$  程度のアルミ膜ならばすべてレーザーアブレーションは行われなかったと明らかなにおかしい結果であった。我々が予測したアルミの膜厚は約  $1\mu\text{m}$ 、そしてレーザーの重なり回数は球体直径を  $1200\mu\text{m}$  とした場合、最大で約 33 発程度であり、この場合にアブレーションされるアルミの深さは  $0.33\mu\text{m}$  でアルミの膜は残ることになるのに完成したものはアルミがすべてアブレーションされ、残っていなかったからである。

原因として挙げられるのは以下の2点である。

1 点目は実験試料としてアルミ板を用いたこと。本来は蒸着されたアルミの厚さで行うべきであったがオシロスコープで測定できない弱いパワーでも  $1\mu\text{m}$  程度のアルミはアブレーションされるため、レーザーパワーとアルミのアブレーション深さを確実に測定する方法としてアルミ板を用いたわけだが、アルミ板にアブレーションを行うと図 4-3-9 のように飛散物が発生、堆積してしまいこれがレーザービームを遮って本来のア

ブレーション深さの測定が行えないと考えられる。

2点目は測定できなかったレーザーパワーをAとBの結果をExcelの近似曲線を用いてCの測定できなかったレーザーパワーを導き出そうとした結果、誤差が生じてしまい正確なデータをえることができなかった。

以上の2点から正確なアルミのアブレーション深さとレーザーパワーを測定することができなかった。

#### 4-4-4 ターニングに用いるレーザーパワーの選定

アルミのアブレーション深さを求めるために行った実験結果より具体的なレーザーパワー数値を用いてパターンニングの評価を行うことが現時点で非常に困難であると判断したため、薄い金の膜だけをレーザーアブレーションし、アルミの膜を残すレーザーパワーを選定するためにポリイミドフィルムに蒸着とイオンスパッタリングを行いそれにレーザーパワーを調整しながら図4-3-10のように文字のパターンニングを行って視覚的な判断をもってして最適パワーの選定を行った。蒸着された球体のアルミの厚さを測定するのは困難であったためスライドガラスに蒸着されたアルミの膜厚を2箇所剥離し、表面粗さ計で測定した。その時の試料を図4-3-11に示す(丸印で示された所が剥離した場所)。蒸着条件として

径が0.5mmのV型タングステンフィラメント

試料とフィラメントの距離が約7cm

蒸着に用いたアルミの体積が約 $24\text{cm}^3$

でフィラメントに約5分間、20Aの電流を流してスライドガラスに蒸着されたアルミの厚みは表面粗さ計での測定の結果、図4-3-12より約 $1\mu\text{m}$ 程度であることが解った。次に行うイオンスパッタリングでの金コーティングの膜厚は装置に付属されていたマニュアルのグラフ、図4-3-13より約 $250\text{\AA}$ の厚みになるように行った。

最適パワー選定の結果、金に対するアブレーションは図4-3-2のグラフで測定された最小エネルギー密度よりもさらに低い値でも行われていることが解ったが、そのエネルギー

一密度の値を測定することが困難であった為、世界地図のパターニングには測定されたエネルギー密度の中で最小のもの約  $29\text{J}/\text{cm}^2$  で光アテネータ(10%透過)と 0.5mm のピンホールにレーザーを透過させて行うことにした。

#### 4-4-5 まとめ

本来地球儀パターニングに用いるべき最適エネルギーは今回測定が不可能であった領域に存在すると考えられ、我々が用いたエネルギーはパターニングを行うには強すぎ、その結果完成した地球儀はアルミと金の材質の違いでパターンを明確に識別するという当初の目的を達成するに至らなかった。

図 4-3-14 は電子顕微鏡を用いて撮影した地球儀で、蒸着後のパターニングを行ったものとポリイミド樹脂になにも手を加えずにパターニングを行ったものを比較したものである。また図 4-3-15 は蒸着後のパターニングを行った地球儀を光学顕微鏡で撮影したもので球体の直径は約  $1200\mu\text{m}$  となっていて、図 4-3-16 のようにアフリカ大陸やユーラシア大陸が鮮明パターニングされており、その他にも南北アメリカ、オーストラリア大陸といった 6 大陸の内 5 つの大陸がパターニングされていたことが確認できた。

当初の目的は達成できなかったが、完成した地球儀は金とポリイミド樹脂の材質の違いが明確に出て、世界地図を認識することが可能であった。

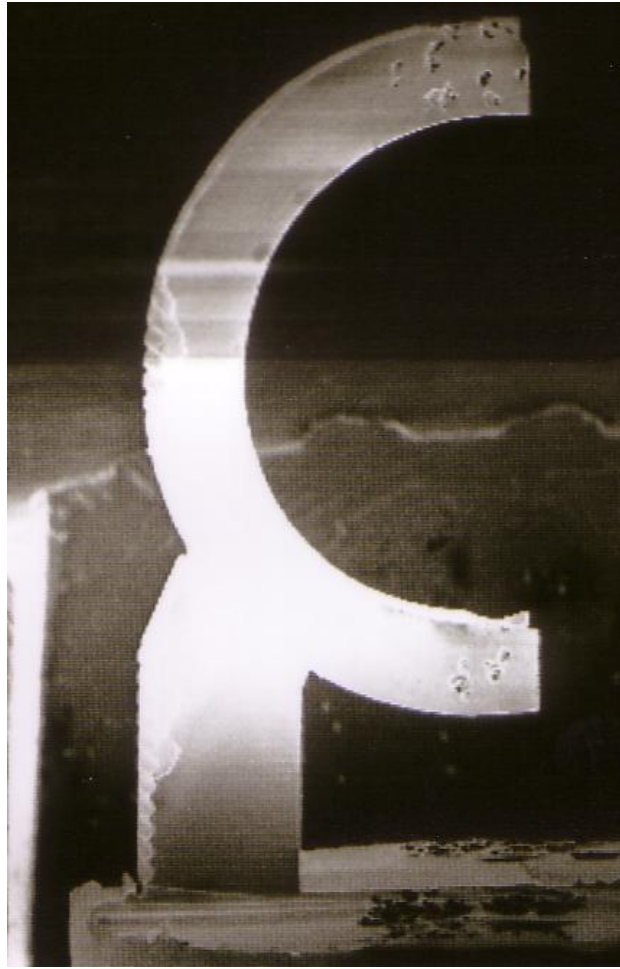


图 4-1-1 一体型地球儀支持部

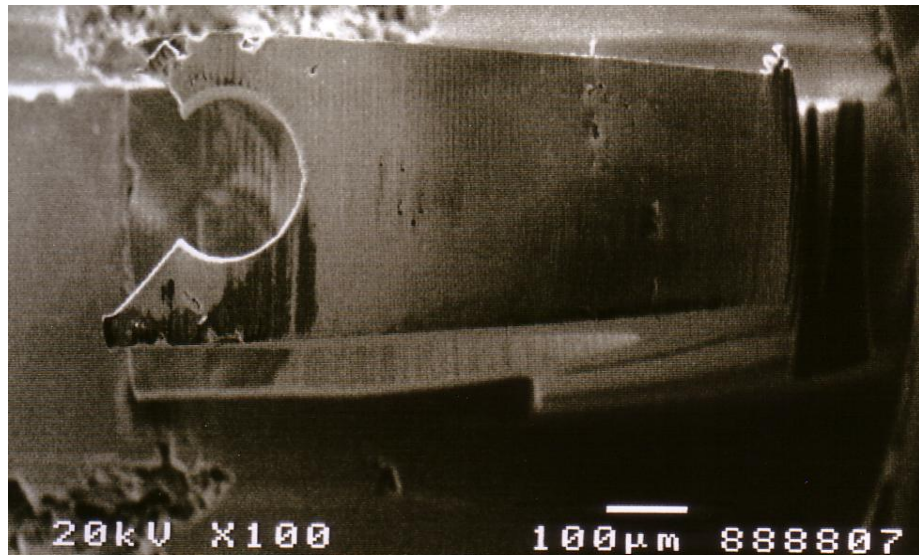


图 4-1-2 一体型地球儀上面取り付け部

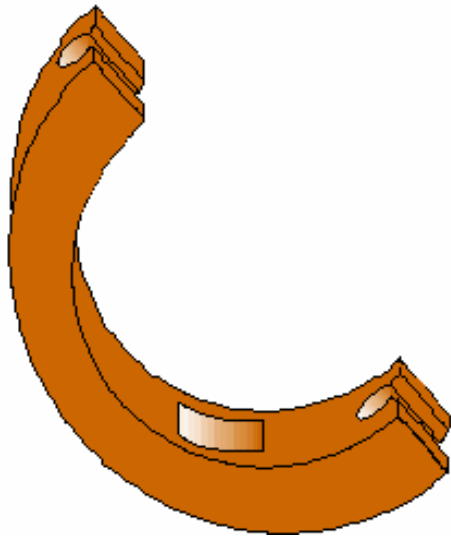


图 4-1-3 球体支持部

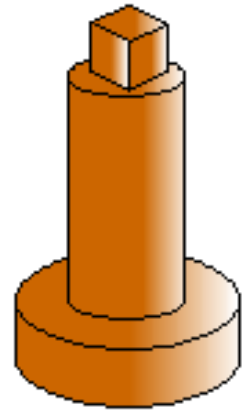


图 4-1-4 台座部

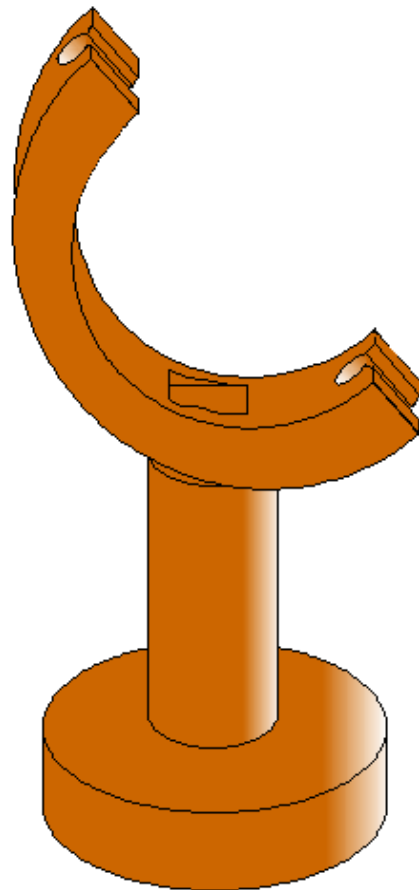


图 4-1-5 地球儀支持台座

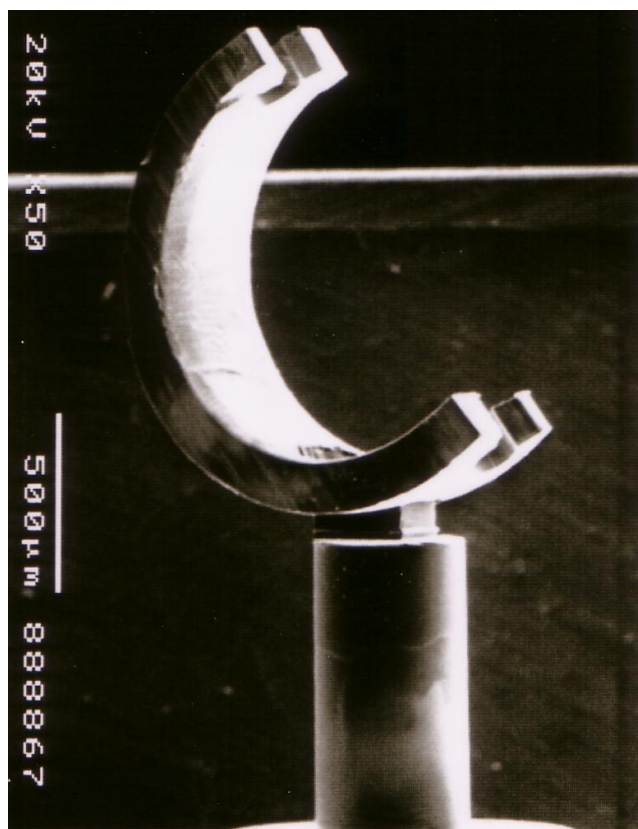


図 4-1-6 地球儀支持台座

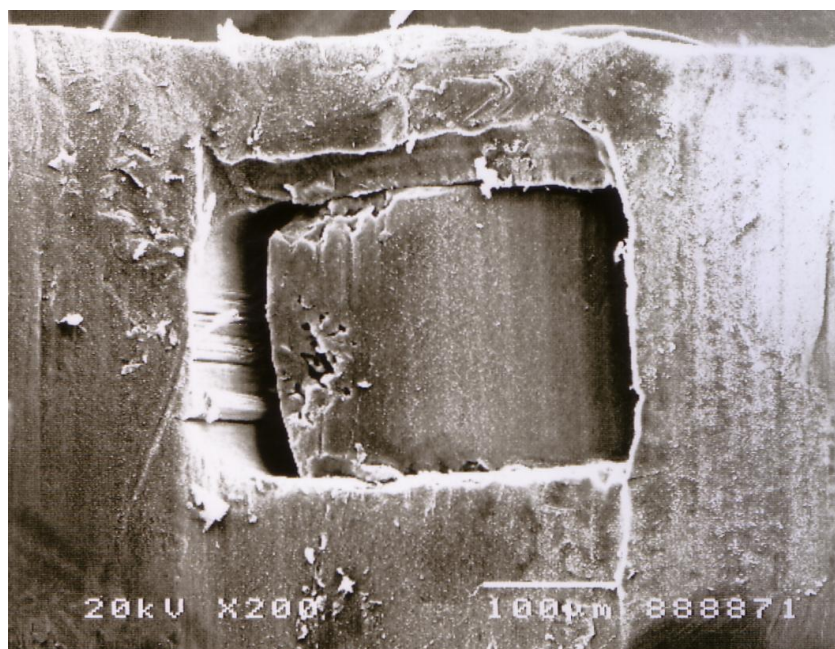


図 4-1-7 はめ込み部の拡大

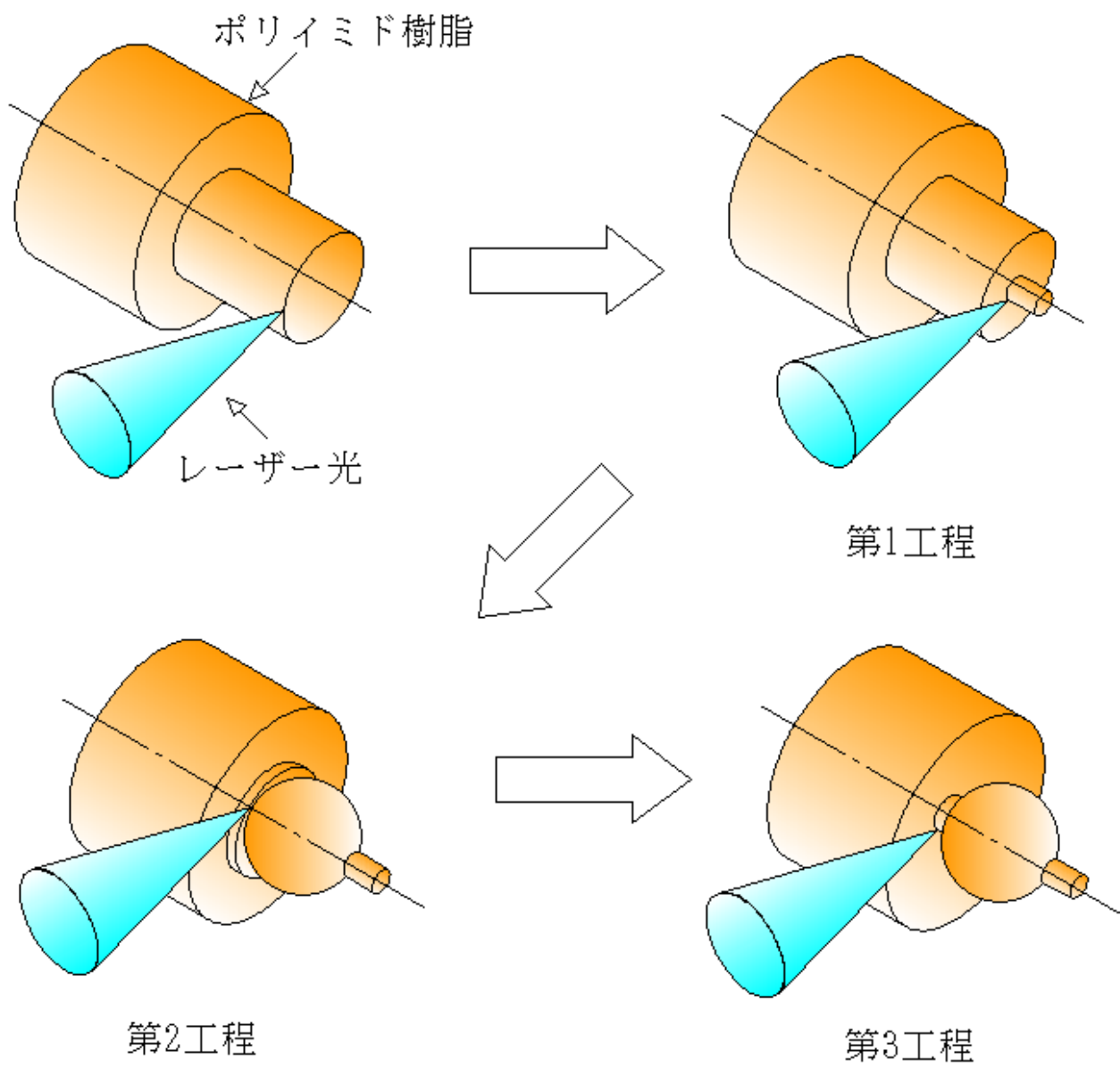


図 4-2 地球儀球体部の加工工程

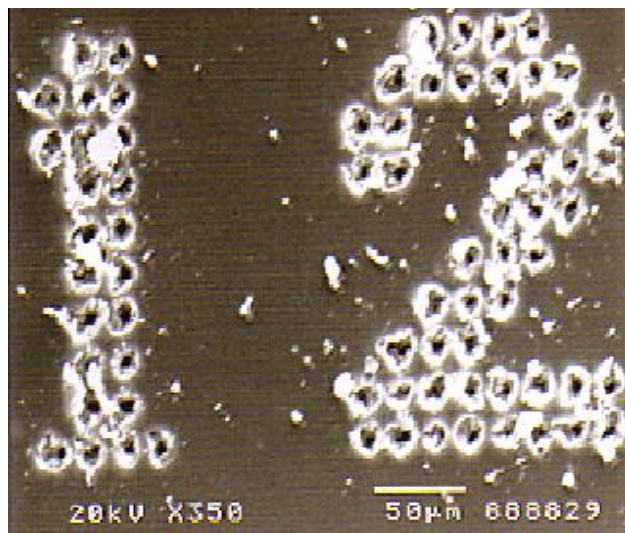


# 1

(a)

0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	0	0

(b)

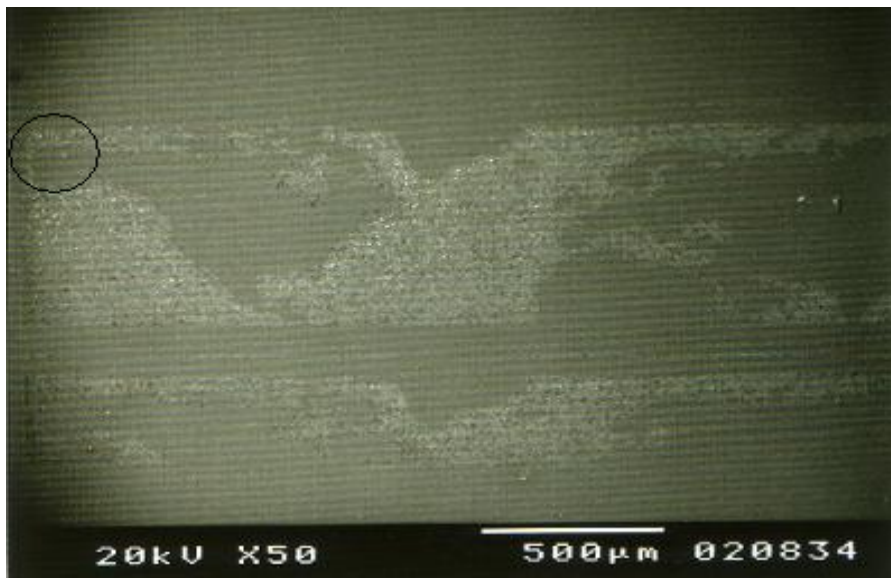


(c)

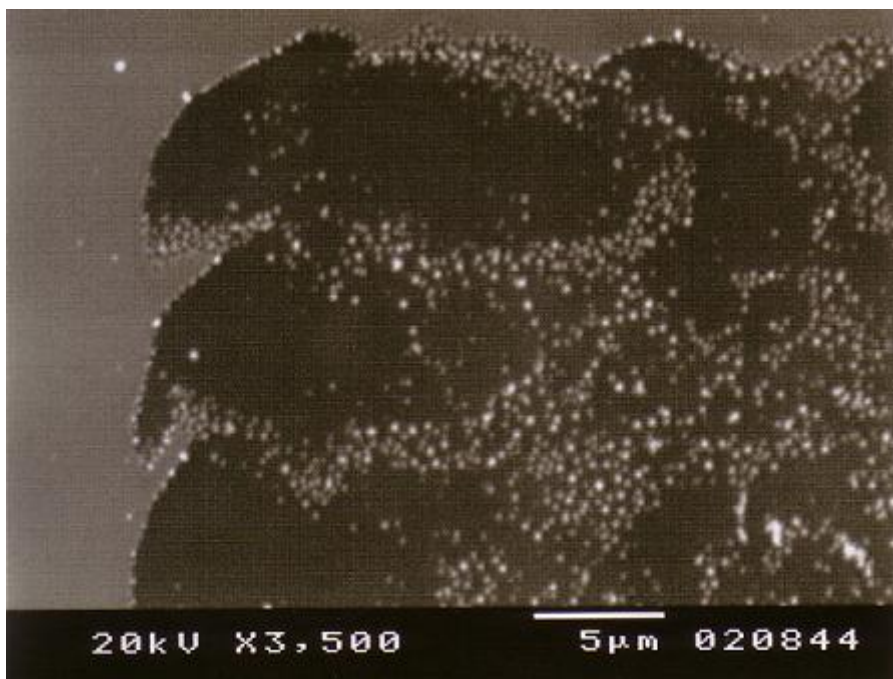
図 4-3-1 パターニングのイメージと実際にパターニングされた数字

(a)はパターニングのもとになる数字 (b)はデジタルデータに変換された数字

(c)はパターニングされた数字



(a)



(b)

図 4-3-2 パターニングされたメルカトル図法の世界地図

(a)は4分割した世界地図データのうち

2つをパターニングしたもの

(b)は(a)に示した丸印の一部を拡大したもの

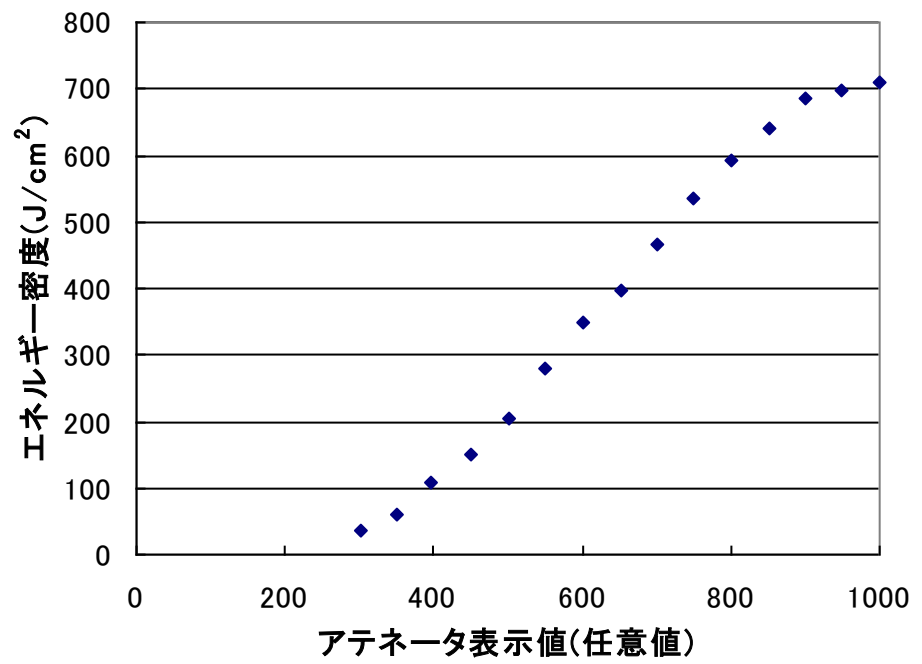


図 4-3-3 アテネータ表示値とレーザーエネルギー密度の関係

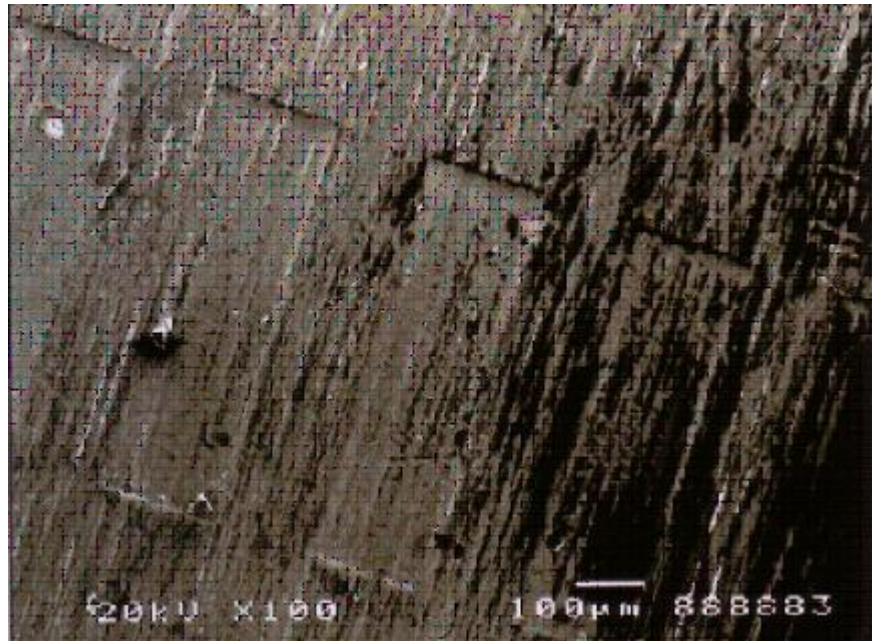


図 4-3-4 アブレーションされたポリイミド樹脂

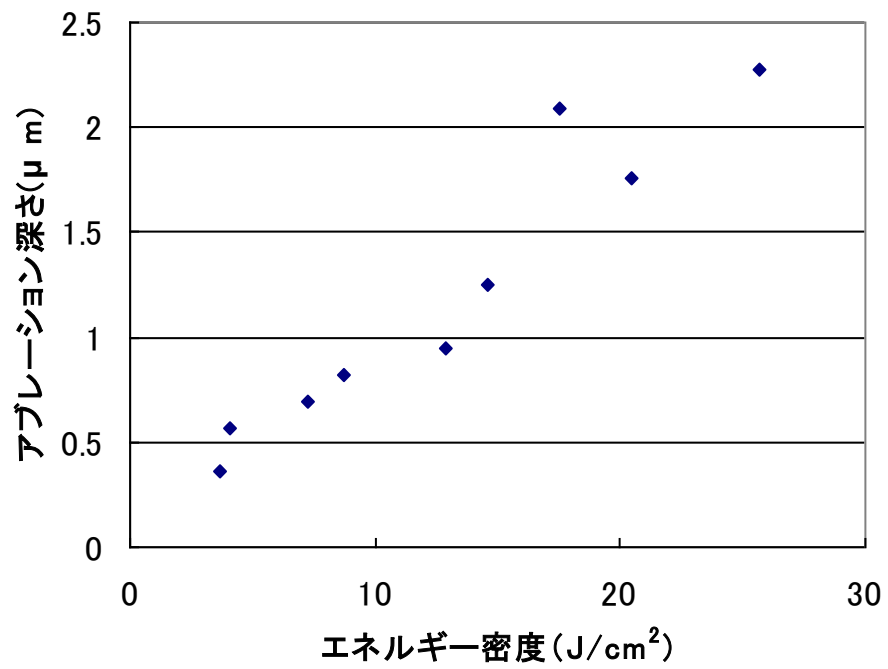


図 4-3-5 エネルギー密度とポリイミド樹脂のアブレーション深さ

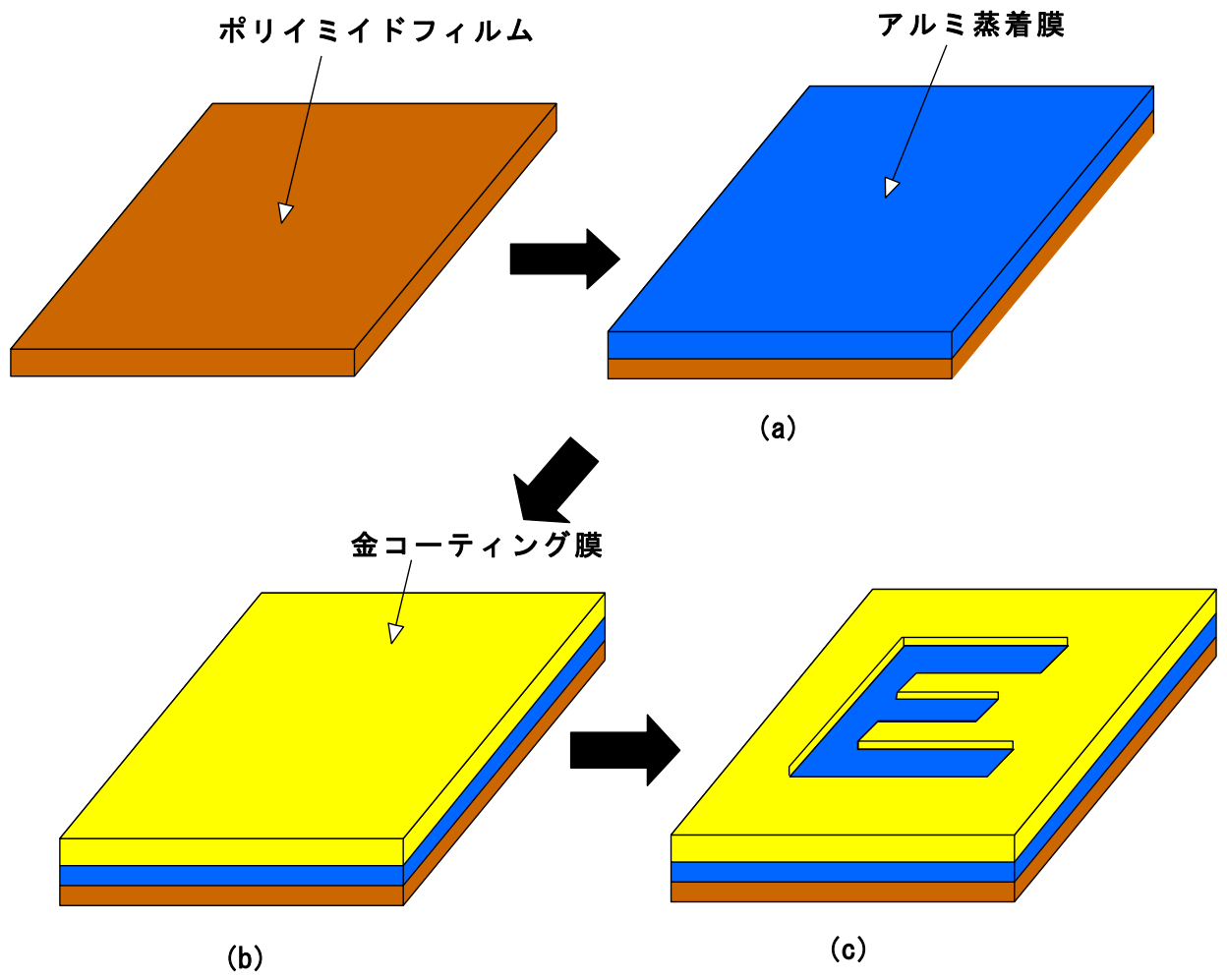
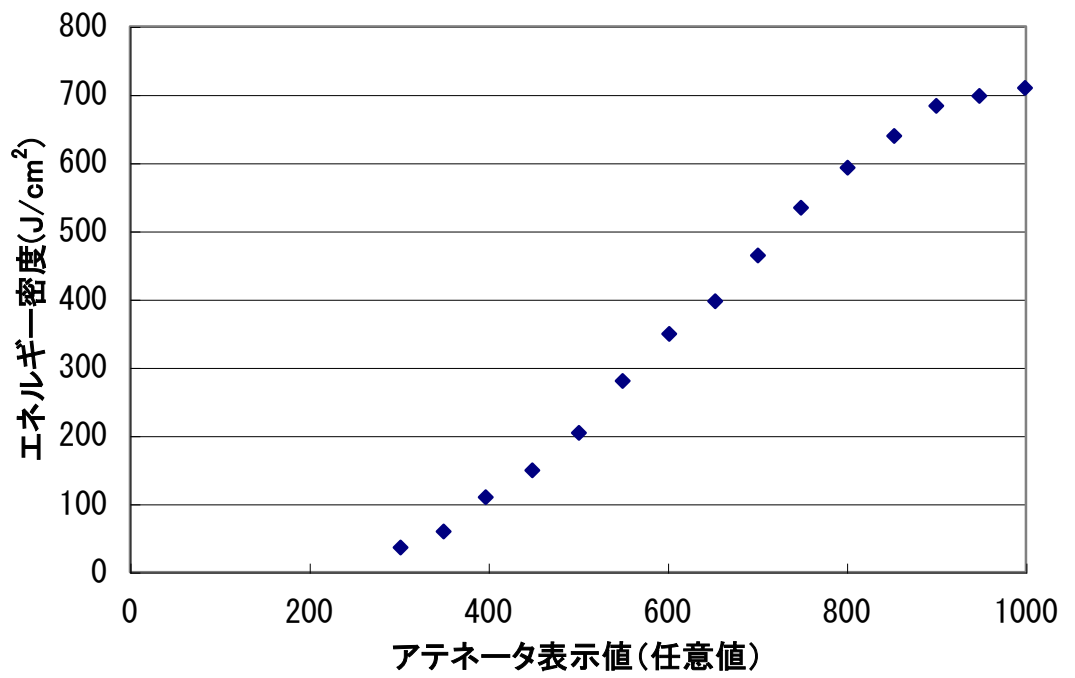
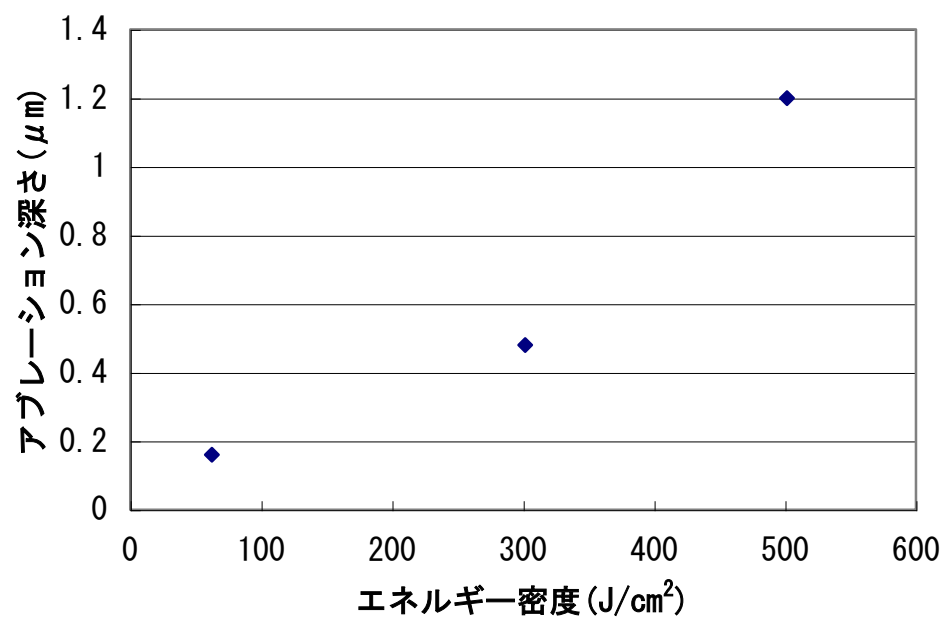


図 4-3-6 蒸着パターニングの概要図

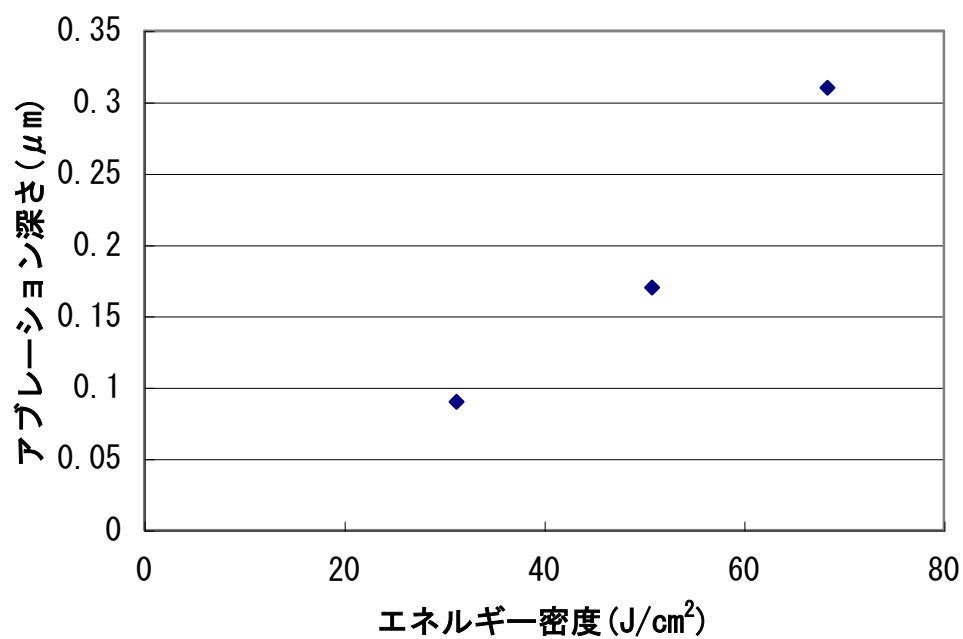
図



4-3-7 レーザーエネルギー密度とアテネータ表示値



(a)



(b)

図 4-3-8 (a)は条件 A と (b)は条件 B におけるレーザー出力電圧と

アルミのアブレーション深さ

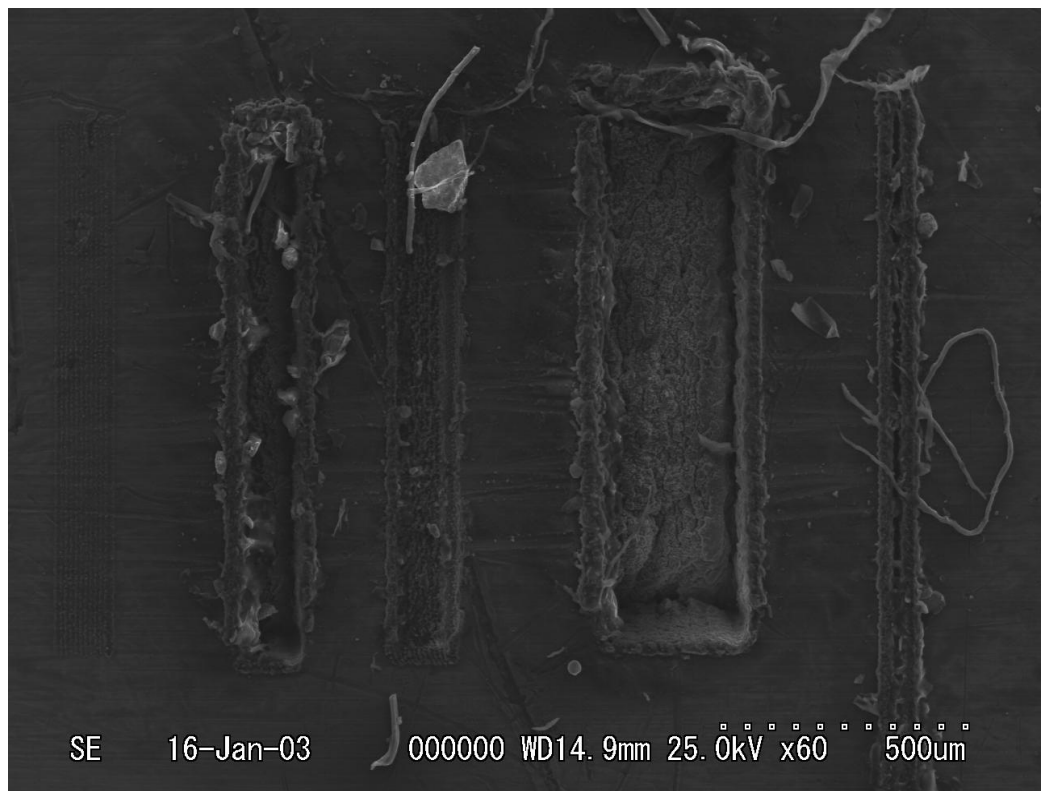


図 4-3-9 アブレーションされたアルミ板



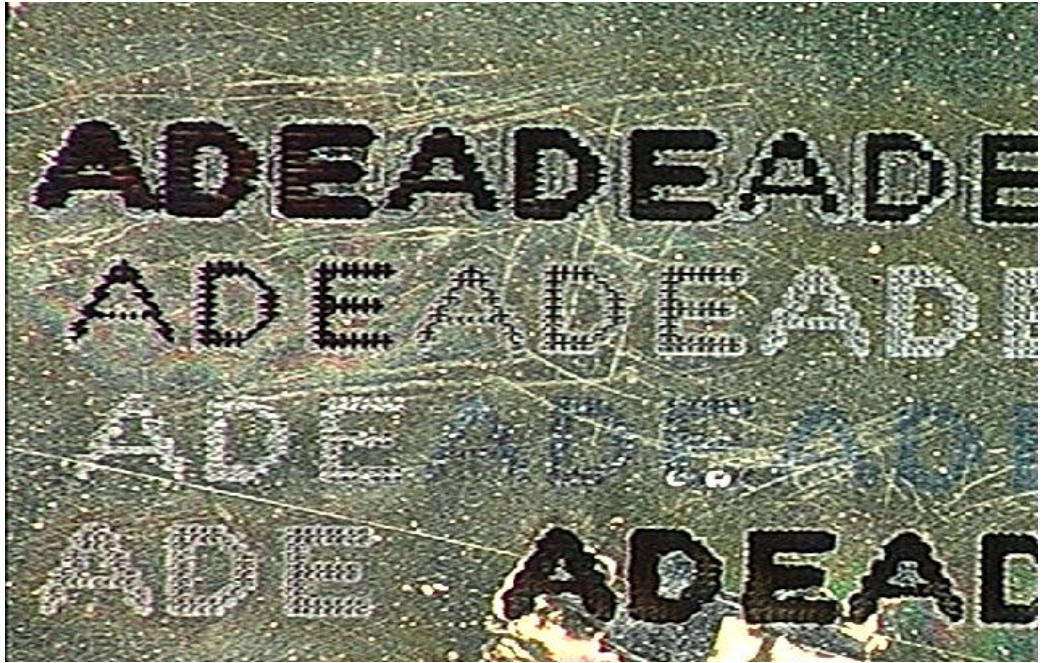


図 4-3-10 視覚評価のための文字パターンニング

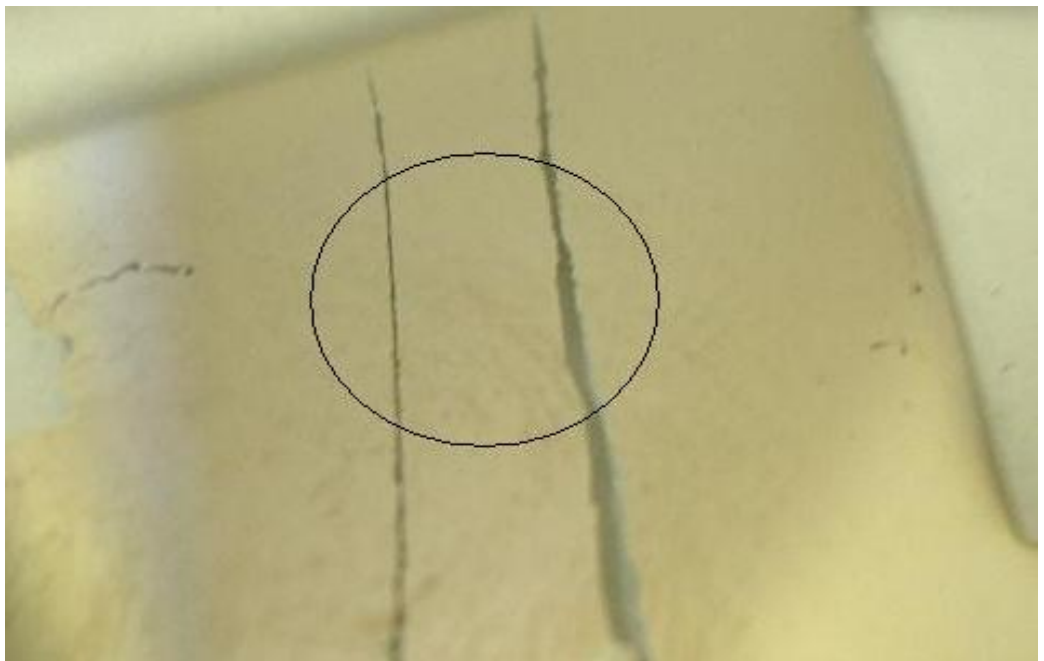


図 4-3-11 アルミ蒸着されたスライドガラス

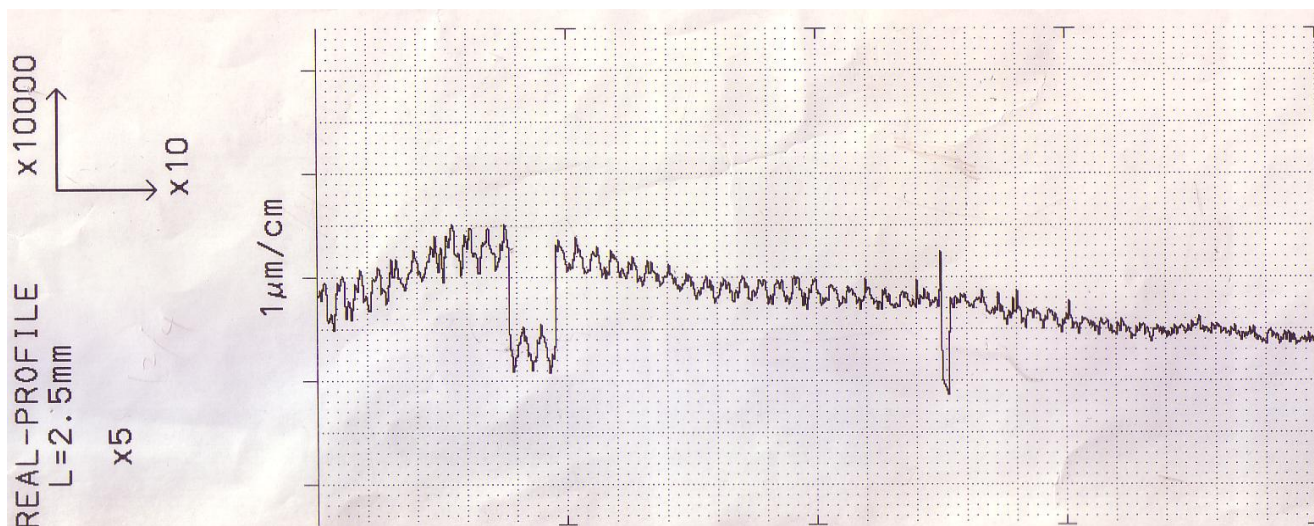


図 4-3-12 スライドガラスに蒸着されたアルミの厚さ測定

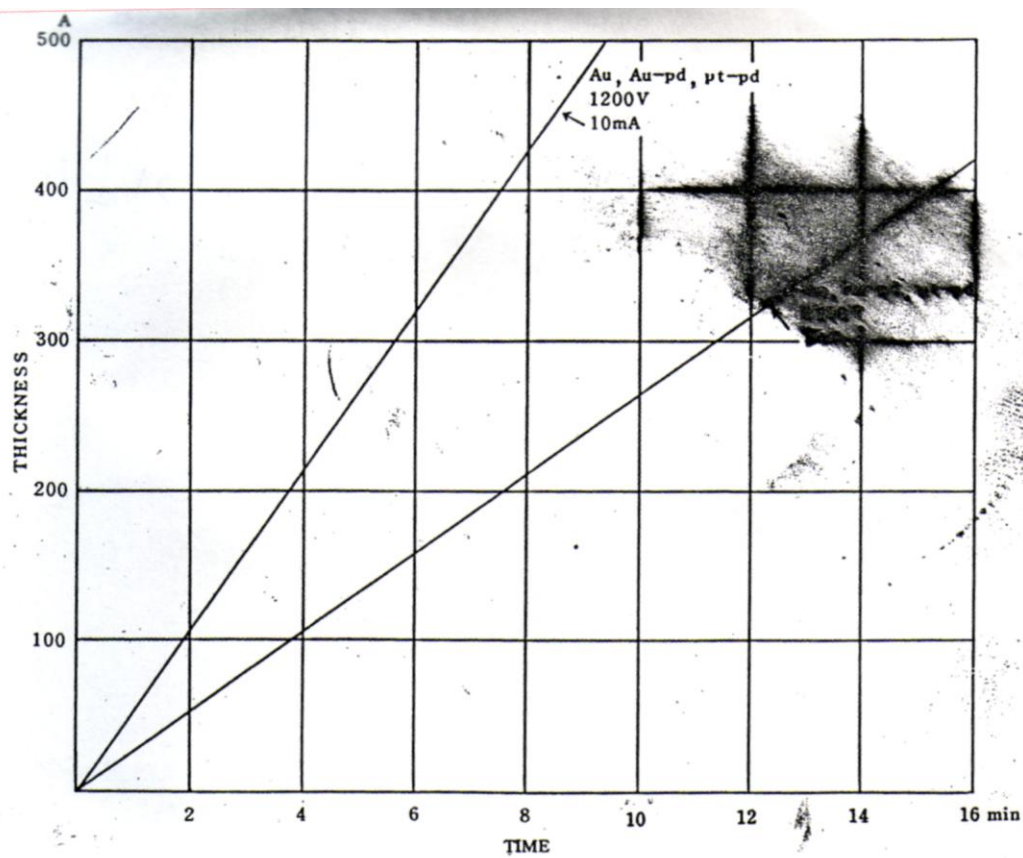


図 4-3-13 スパッタリングの厚みと時間(マニュアルより引用)

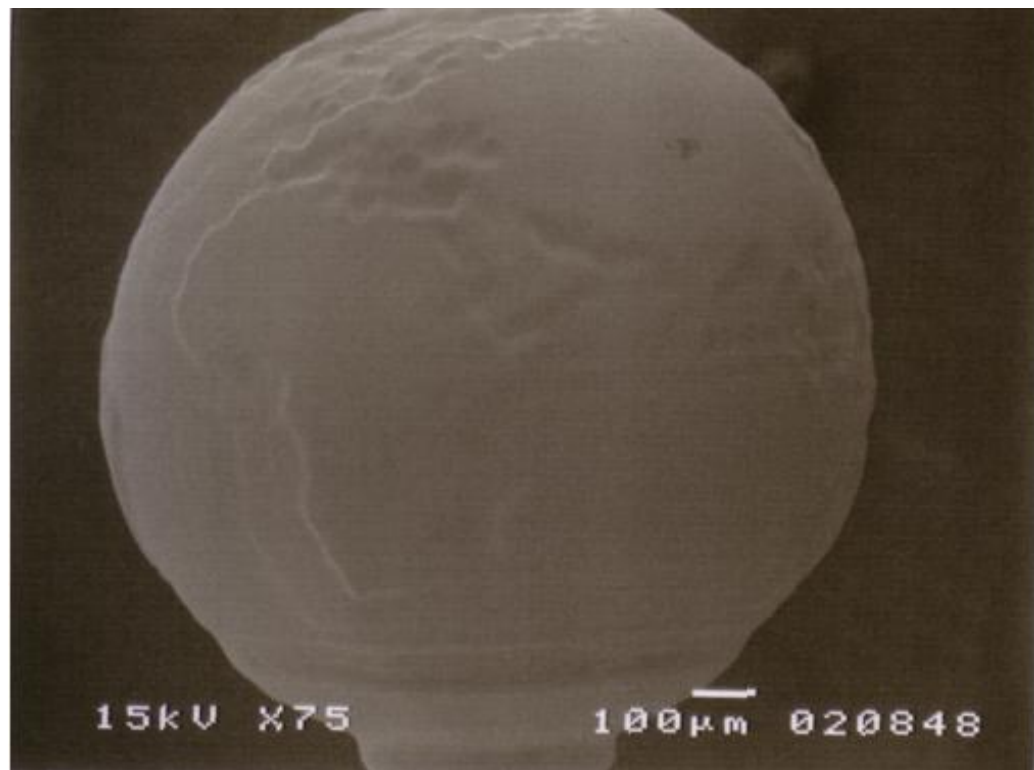


図 4-3-14 蒸着パターンニング(上図)とポリイミドへの直接パターンニング(下図)

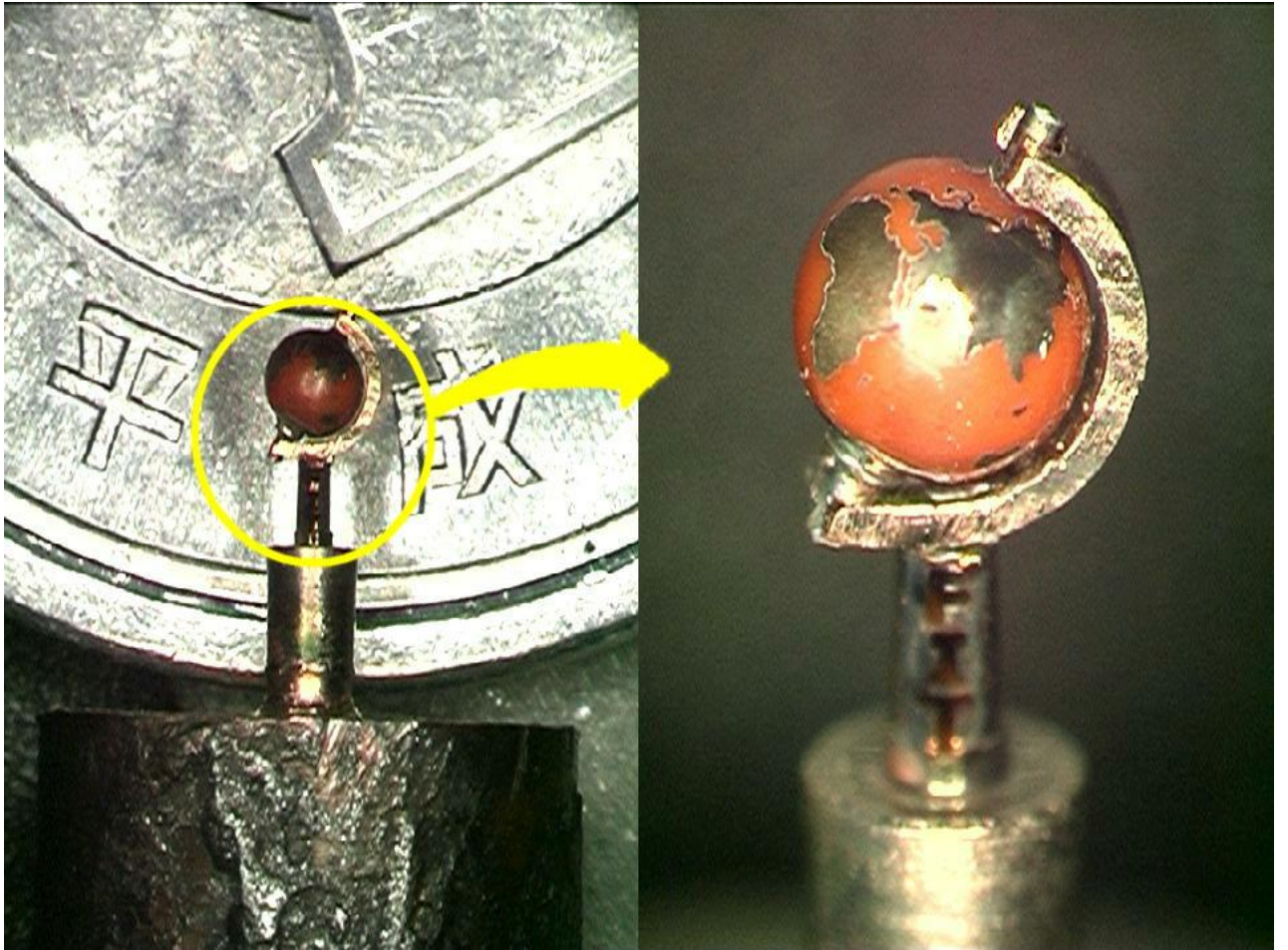


図 4-3-15 完成した地球儀と 1 円硬貨との比較



図 4-3-16 作製した地球儀

## 第5章

# マイクロダイヤモンド工具の 作製についての研究

## 5-1 研究背景

レーザー加工を用いることで、マイクロサイズの微細加工が可能であることはこれまでも実証済みである。レーザーマイクロ加工は硬度に関係なく加工できるが、加工時間が長時間必要であるという問題点が存在し、大量生産には向かない。この特性を考慮すると、レーザー加工の特性を十分にいかすには付加価値の高いものを作ることが最適だと思われる。このことから、今回はマイクロ工具の作製についての研究を行うことにした。

マイクロサイズの工具でも、通常の工具と同様に十分な硬度が得られなければ工具として使用することが困難である。よって、マイクロ工具の材質は、現存する材質のなかで最高度の硬度を持つダイヤモンドを採用することにした。

レーザー加工を用いればダイヤモンドを加工することも可能だが、現在私たちが使用している Nd-YAG レーザー4 倍波で加工を行うと、ダイヤモンドの加工表面に数ミクロンの厚さで熱的な変性が起こり、ダイヤモンドの硬度が著しく低下することがわかっている。これでは工具として使用することが困難になる。この問題点の解決策として、レーザーを Nd-YAG レーザー4 倍波から、フェムト秒レーザーに変更するという方法が考えられた。レーザー装置については、パルス幅が約 100fs、毎秒 1000Hz で照射が可能なフェムト秒レーザーを用いることにした。フェムト秒レーザーは超短パルスで加工が行なえるため、加工表面に熱的な変性が起きにくいと考えられている。

これらのことから、ダイヤモンドマイクロ工具作製には、ダイヤモンドのレーザー加工特性を調べるが必要不可欠なので、このことに関する研究を行った。

## 5-2 実験装置

加工用レーザーは、フェムト秒レーザーと Nd-YAG4 倍波レーザーの二種類を用いる。フェムト秒レーザー装置は高額なために、大阪大学レーザー核融合研究センターのものを、共同研究という形で利用した。

二種類の装置概要を、フェムト秒レーザー使用時図 5-1 (詳細は図 5-2 に示す)、Nd-YAG4 倍波レーザー使用時 (図 3-1) に示す。フェムト秒レーザー装置は、照射回数を TTL ボードで制御することができないため、機械的シャッターを用いて照射回数を制御する。機械的シャッターは最速で、レーザー照射パルスをおよそ 5 発おきにカットすることができる。

### 5-3 加工条件・材料

フェムト秒レーザー使用時は、最大繰り返し照射速度 1000Hz 毎秒、波長 800nm、パルス幅 100fsec、出力約 0.7mJ で、加工時の集光径  $30\mu\text{m}$ 、照射エネルギー密度  $9.9 \times 10^2 \text{J}/\text{cm}^2$  で、行った。

Nd-YAG4 倍波レーザー使用時は、最大繰り返し照射速度 30Hz 毎秒、波長 266nm、パルス幅 10nsec、出力約 2.75mJ で、加工時の集光系  $60\mu\text{m}$ 、照射エネルギー密度  $9.7 \times 10^2 \text{J}/\text{cm}^2$  で、行った。

加工に用いるダイヤモンドは、ダイヤモンドドレッサー (株式会社ミスミ製 製品番号 DIADR-C-8 図 5-3) の先端に使われている天然ダイヤを使用する。ダイヤモンドドレッサーを選んだ理由として、ドレッサーとして使われるためダイヤモンドと金属の安定度が高く、工業用に用いられるために安価であるということがいえる。

### 5-4 実験方法

フェムト秒レーザー、Nd-YAG4 倍波レーザー、それぞれを用いて図 5-4 の a 図に示す形に面加工を行った。図 5-4 の b 図は実際に面加工を行ったダイヤモンドの写真を示している。それぞれのレーザー加工面に硬度試験を行い、その試験結果からレーザー加工特性を考察した。

硬度試験は、島津総合分析試験センターに依頼しダイナミック超微小硬度計 (DHU-W201) を用いて行った。試験工程は、ダイヤモンド三角圧子 (稜間角  $115^\circ$ ) の先端を、試験面に垂直に速度一定で押し込み、そのときの押し込み深さ ( $\mu\text{m}$ ) と、押



し込み強さ (mN) の二つのデータから硬度を算出した。

## 5-5 実験結果

硬度試験結果を図 5-5 に示す。図 5-5 では、速度一定での押し込み強さ、押し込み深さの関係から、フェムト秒レーザーの加工面が、Nd-YAG4 倍波レーザーの加工面よりもかなり硬く、非加工面と比較しても同程度の硬さであることがわかった。

図 5-6 で得られた押し込み強さを  $P$  (mN)、深さを  $h$  ( $\mu\text{m}$ ) とすると、

$$DHT_{115} = \frac{3.8584 \times P}{h^2} \quad (5-1)$$

この式からダイナミック硬さ  $DHT_{115}$  を算出することができる。

算出した硬さ  $DHT_{115}$  と、押し込み深さの関係を比較したものを図 5-6 に示す。図 5-6 から、深さ方向の硬度の変化を見ることができる。押し込み開始直後の高い硬度は試験特性で、押し込み深さ  $1\mu\text{m}$  以降硬度が低下しているのは、三角圧子と試験面が垂直でなかったために起こったと思われる。

上記の特性を考慮した上で、三種類の深さ方向の硬度を比較すると、Nd-YAG レーザー加工面は深い領域まで軟化していることがわかる。フェムト秒レーザーでは、深さ  $0.3\mu\text{m}$  まで硬度の軟化が見られるものの、その後は非加工面と同等の硬度になっている。このことから、フェムト秒レーザーは、加工面への熱的な変性が存在するがその影響は小さく、マイクロサイズの工具を作製するためのツールとしては、最適であることがわかった。

これまでの実験結果から、レーザー加工が加工物表面に与える熱的な影響は、レーザーの照射パルス幅に強く依存していることがわかった。

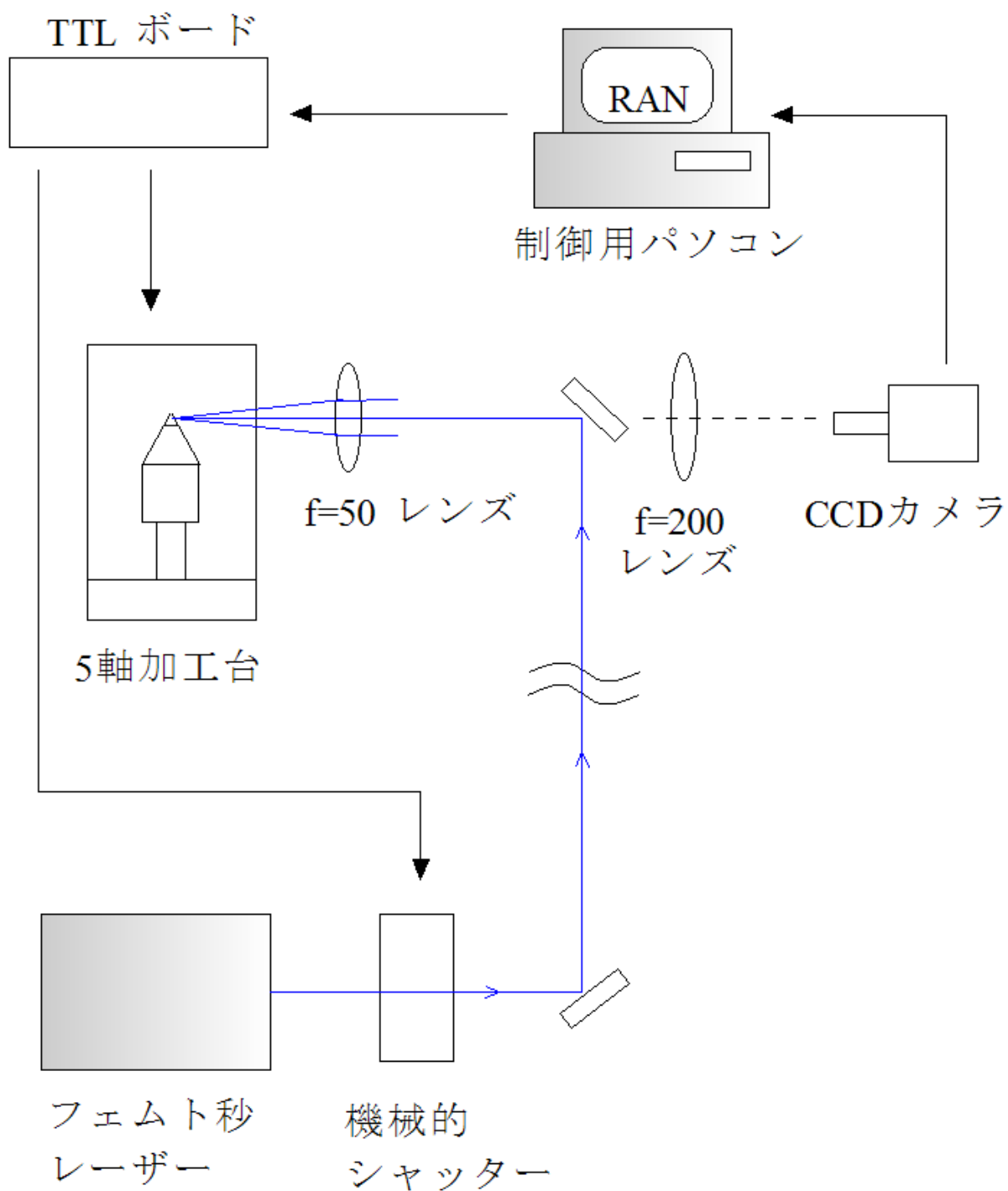
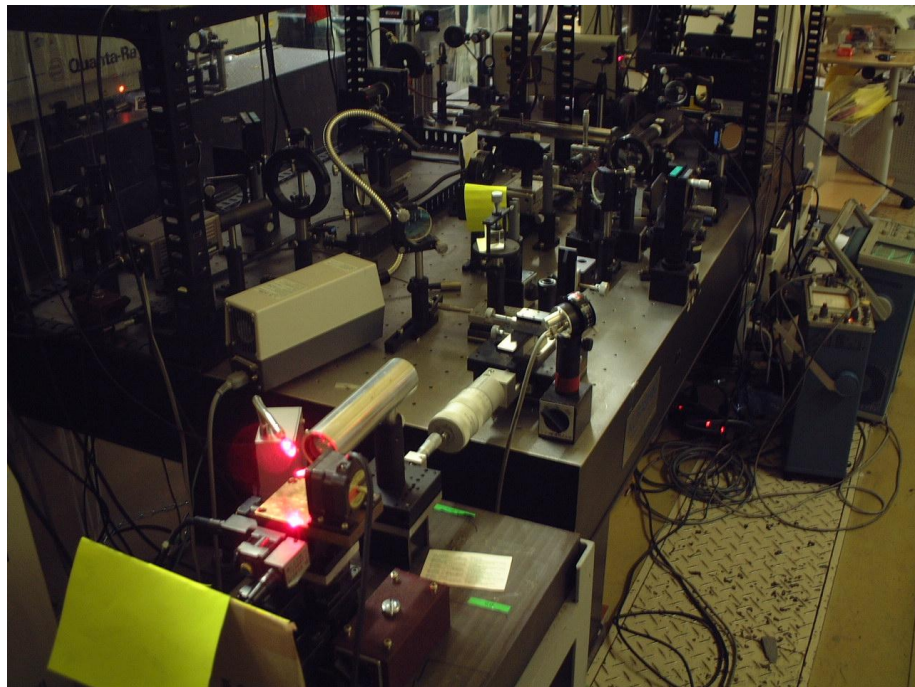


図 5-1 フェムト秒レーザーを用いた実験装置図

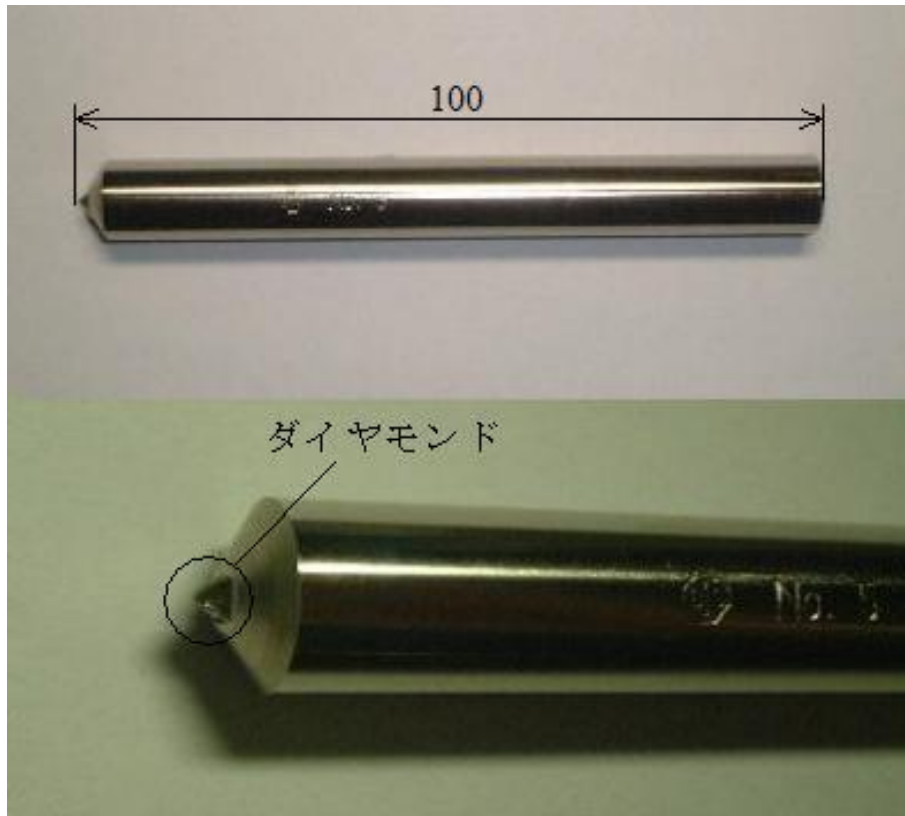


a) 5軸加工台周辺と集光レンズ



b) フェムト秒レーザー装置

図 5-2 フェムト秒レーザー装置周辺

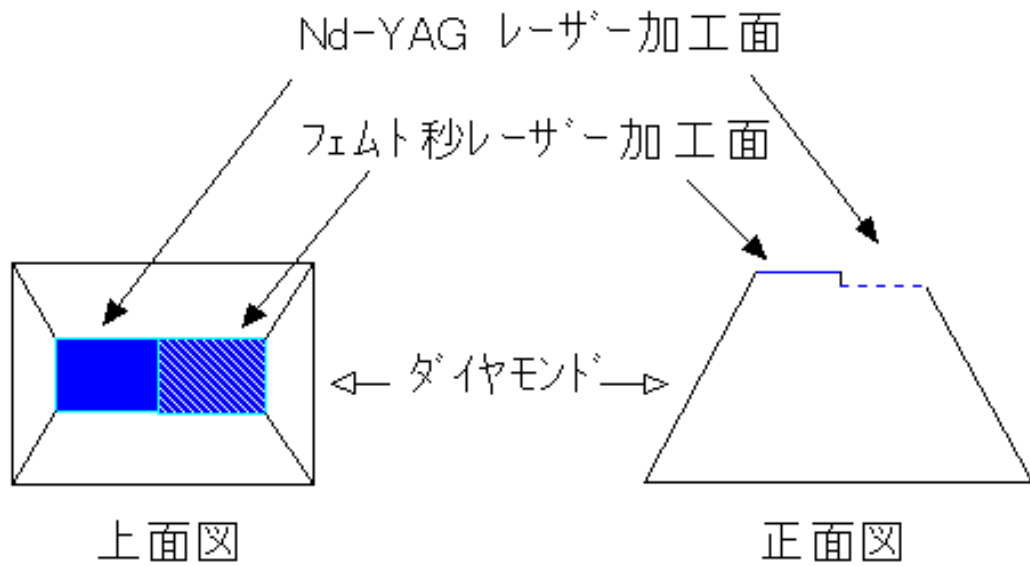


a) レーザーのターゲットとして加工前

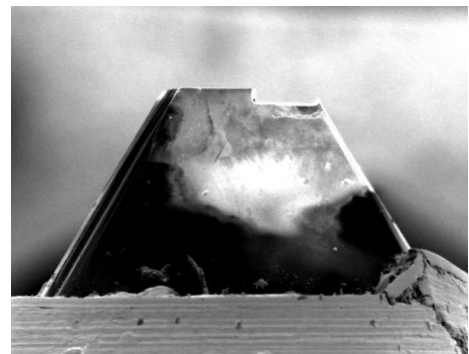
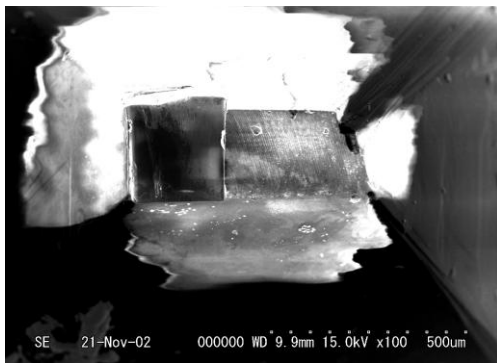


b) レーザーのターゲットとして加工後のダイヤモンドドレッサー  
5軸加工台に取り付け可能になっている、詳細は付録に示す

図 5-3 ダイヤモンドドレッサー



a) 硬度試験用資料加工



b) 硬度試験用資料

図 5-4 硬度試験用資料の作製

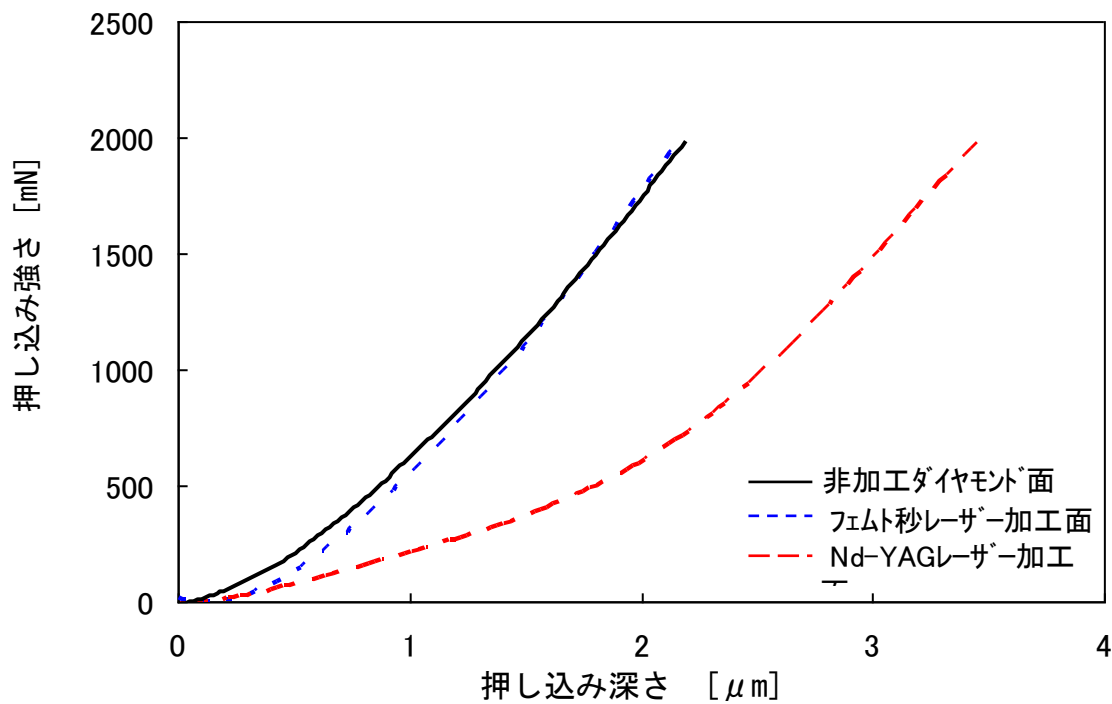


図 5-5 押し込み深さ、押し込み強さ比較グラフ

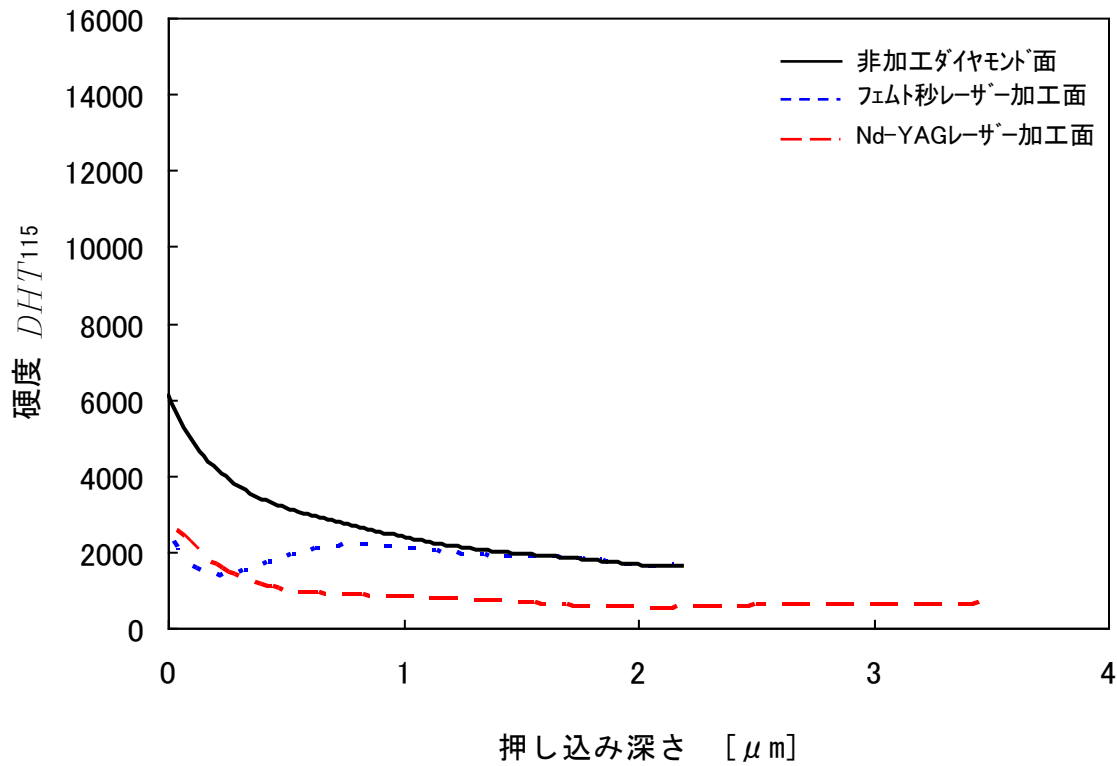


図 5-6 深さ方向硬度  $DHT_{115}$  変化比較

## 第 6 章

## 結 言

マイクロサイズの地球儀作製に関する研究では、マイクロ地球儀作製という一つの目標を達成することができた。この目標を達成すること、加工工程の効率向上、加工時間の短縮、パターニングなどの新しい加工法を確立することができた。マイクロ地球儀の加工は、すべてが完成したわけではなくまだまだ問題点も多数存在する。問題点は、レーザー加工を用いて球体を作製すると、加工表面にクレータ状の傷がつくことや、パターニング時に集光径のサイズによって加工面へプロットされるデータの精度が決まることなどである。これらの問題点を解決していくことが、マイクロ加工の今後の課題となる。

マイクロサイズのダイヤモンド工具作製に関する研究では、主にダイヤモンドに対するレーザー加工特性について研究を行い、レーザーの特性によって加工面に与える影響の違いを、島津硬度試験機の *DHT*<sub>115</sub> という単位で測ることができた。今後は、この実験結果を活用し実際にマイクロダイヤモンド工具の作製を行い、工具としての性能実験を実行することが今後の課題となる。レーザー加工特性についても今後研究を続けることで、レーザー加工の精度を向上させることが必要となる。

加工精度を追求する上で、現在のレーザー加工環境はあまり精度が高いとは言えない。この問題の解決のためにも、加工ステージ周辺の整備は必要不可欠となる。加工中の単パルスあたりの堀深さを、リアルタイムで測定する技術、装置の行っていく必要がある。



## 謝辞

最後に、本研究を行うにあたり 1 年間ご指導、ご助言をいただいた福岡工業大学知能機械工学科所属の河村良行教授に深く感謝いたします。河村研究室指導院生、吉井啓太先輩、楠橋伸樹先輩、酒井貴先輩、呉鐘彬先輩、に感謝いたします。

本研究を行う上で必要不可欠であった、フェムト秒レーザーを共同研究という形で使用させていただいた、大阪大学レーザー核融合研究センター、藤田雅之先生、橋田昌樹先生、硬度試験を依頼した島津総合分析試験センター、秋吉様、に感謝いたします。

さらに、ギネス記録提出資料の英訳添削をしていただいた治田先生、責任者になっていただいた村山先生、工作センターの大西先生、長野先生、工学顕微鏡を利用させていただいた大森先生、表面粗さ計を使用させていただいた藤山先生、ダイヤモンド切削工具資料の提供をしていただいた仙波先生、エレクトロニクス研究所養母さん、ならびに本研究を行うにあたり多大なご助言、ご助力をいただいた皆様に謝辞を評します。

## 参考文献

- 1) 西村義輝 他：「紫外パルスレーザーによる工業用ダイヤモンドの微細加工に関する研究」平成 11 年 福岡工業大学 卒業論文
- 2) 中本 他：「紫外線パルスレーザーによる微細工具の加工法に関する研究」平成 12 年 福岡工業大学 卒業論文
- 3) 吉井啓太：「レーザー加工による微小立体形状創生法の研究」平成 12 年 福岡工業大学 卒業論文
- 4) 吉本隆司：「紫外線パルスレーザー加工」平成 13 年 福岡工業大学 修士論文
- 5) 「レーザーアブレーションとその応用」コロナ社
- 6) 「オリエンタルモーター総合カタログ」平成 6 年 オリエンタルモーター株式会社
- 橋田昌樹：「フェムト秒レーザーによる物質プロセッシング」平成 14 年 光学 31 巻 8 号
- 7) 河西朝雄：「最新はじめての BASIC」昭和 63 年 技術評論社
- 8) 戸川隼人：「ザ・BASIC」昭和 62 年 サイエンス社