

紫外レーザーアブレーションによる光学素子表面形状の高精度調整法の開発

米田研究室 西尾茂晃

1. 序論

顕微鏡などの光学システムを製作した場合に、一般には光学素子の面精度を高めて組み合わせを行っていくが、この方法では、1つ1つの面のエラーが積算されることになる。これを解決するために、大型のレーザーシステムでは、デフォーダブルミラーで修正している場合がある。しかし、波面のエラーに対しては、時間的に変化するものだけではなく、固定されたものもあるので、必ずしも動かせる高価なデフォーダブルミラーを使用するのは適していないことがある。一方、光学系として組んだ後に面を加工することも考えられるが、非接触で行う必要があり、現実的には行われていない。そこで、本研究では、レーザーアブレーションによる非接触加工技術を用い、光学素子表面形状の高精度調整法を開発することを目的とする。

2. 原理

2.1 試料の加工

本研究では ArF エキシマレーザーで試料に対してビームを当てることによりレーザーアブレーションを起こし、加工を行っていった。レーザーアブレーションとは、レーザー光の照射強度がある大きさ（閾値）以上になると、照射している固体表面の構成物質が原子、分子、プラズマ状態となって爆発的に放出される現象のことである。レーザーアブレーションにより固体表面がどのように変化するかという問題については、物質やレーザー光の性質により変わってくるので、その特性は複雑である。レーザーアブレーションによる加工ではレーザー照射部周囲に熱ダメージがほとんどなく、加工部の断面が極めてシャープに加工できることがメリットである。

従来の紫外線レーザー加工では、光学素子の透過率の問題や得られる出力の大きさなどから、一般に KrF エキシマレーザー ($\lambda = 248\text{nm}$) あるいは YAG レーザーの 4 倍波 ($\lambda = 266\text{nm}$) が使用されてきた。しかし、この波長では光学プラスチックでさえ加工を進めるに従って表面の粗さが増加し、光学素子としての使用に適さなくなるという問題点が存在する。この現象は紫外線の場合でも波長が長くなると、物質内部での吸収長が長くなるため、レーザー光が表面から内部まで深く浸透することによって考えられる。母材の分解が表面の薄い層だけではなく、深い深度でも生じるため、物質が剥離するときに大きな固まりとなって除去されるのではないかと推定できる。ArF エキシマレーザーは物質内部での吸収長を短くし、より母材の表面での非熱加工を実現することができる。また、波長 193nm というのは空気中で加工できるほぼ限界の波長で

あり、パルス発振したレーザー光のエネルギーが 6.2eV と高いのも特徴である。エキシマレーザーから出たパルスビームは加工対象に 45 度の角度で入射するよう調整し、さらにアイリスでエネルギー強度を変化させるようにした。また、照射部での単位面積当たりのエネルギー密度を変えるために集光に用いたレンズも可変とした。実験のセットアップは図 5 に示した。

また、本研究では紫外レーザーアブレーション加工をする光学素子としてミラーを使用した。1 つは HR (High Reflection) ミラーと呼ばれる TiO_2 などのコーティングが施されたコーティングミラーである。コーティングミラーの材質自体は SiO_2 であるが、これはレーザーアブレーションを起こすためのエネルギーが約 9.6eV と高く加工が難しいため、加工がしやすいコーティングミラーを採用した。この材質についてレーザーアブレーションを起こし、それぞれの加工面特性について調べた。

2.2 加工面の評価

加工部がどれほど加工されているのかを判断するために、He-Ne レーザーをシングルモードファイバーに通し、その出力光を加工対象に当て、その反射波を Shack-Hartmann 型波面センサーで読み取った。シングルモードファイバーに通す理由としては、単一モードのビームを取り出すことができるというメリットが挙げられる。シングルモードファイバーから出た光は拡散光となっているので、レンズを入れて平面波となるように調整を行った。実験セットアップは図 5 に示した。

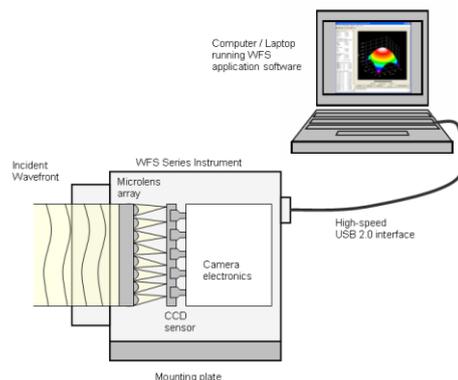


図 1: Shack-Hartmann 型波面センサーの構成

Shack-Hartmann 型波面センサーとは、図 1 に示すように 1 μm 程度の小さなレンズを整列させたマイクロレンズアレイと CCD センサーで構成されている波面センサーである。

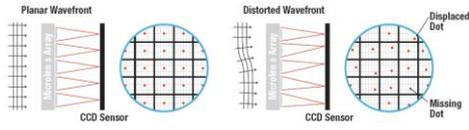


図 2：シャックハルトマン型波面センサーの仕組み

この波面センサーでは、まずレンズアレイに対して光を垂直に入射する。この光が、空間的に波面のそろった理想的な平面波であるときは、レンズアレイを通った光は各レンズで同じように集光され、CCD 上には等間隔に並んだビームスポットが現れる。しかし、波面の歪んだ光が入射したときは、各レンズ位置における波面に応じた角度でばらばらに集光されるため、CCD 上のビームスポットは等間隔にならない。この位置ずれを CCD カメラの画像から計算することで、各レンズの位置での波面の傾きを測定し、波面センサーに入射した全体的な波面情報が得られる。

2.3 加工面の後加工

本研究では COHERENT 社製の E-1000 シリーズを使用し、レーザーアブレーションによって加工された光学素子表面の修正をおこなった。これは、レーザーアブレーションによって加工部の底部に突起物が生じることから、それを除去する目的で行った。

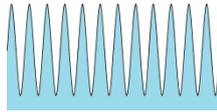


図 3：アブレーション加工面底部の形状

一般的にはレーザーアブレーション加工を行った部分の底部は図 3 のようになり、突起物が生じることとなる。その長さは数 μm ほどであり、この突起物によって光学素子の透過光や反射光が拡散していく現象が起こる。この拡散があまりに大きい場合、観測に大きな影響を与えてしまうので、本研究では炭酸ガスレーザーを照射して熱的処理を加えることで突起物のスムージングを行った。

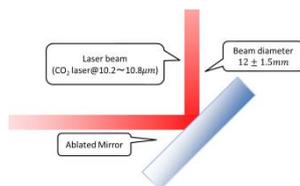


図 4：炭酸ガスレーザーによる加工面のスムージング

紫外レーザーアブレーション加工をしたミラーに炭酸ガスレーザーを入射角度 45 度で照射し、その変化を見た。使用した炭酸ガスレーザーの波長は $10.2\sim 10.8\mu\text{m}$ であり、ビーム径は約 12mm、パルス幅は $120\mu\text{s}$ 、パルス間隔は $10000\mu\text{s}$ 、そしてパワーを 20W とし 10 秒間照射した。

3. 実験

3.1 実験セットアップ

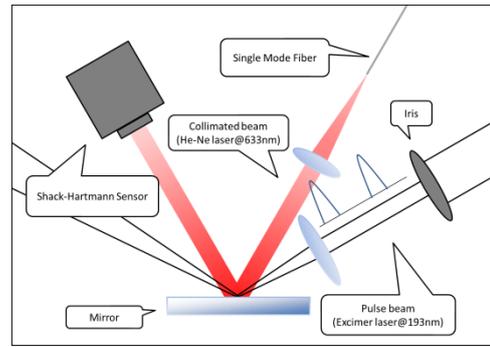


図 5：実験セットアップ

実験セットアップは図 5 のようになっている。ArF エキシマレーザーから照射されるパルスビームをアイリスで絞ることでエネルギー強度を調節できるようにし、さらにレンズによって集光させ対象となる試料（今回はコーティングミラーとモールドガラス）に照射してレーザーアブレーションを起こした。この集光に用いたレンズも光路方向に可変となるようにすることで単位面積当たりのエネルギーを調節できるようにした。ミラー表面の観測には He-Ne レーザーから照射されるビームをシングルモードファイバーに通し、レーザーアブレーションを起こす部分に当ててその反射波をシャックハルトマン型波面センサーで読み取ることによって観測した。シングルモードファイバーから出たビームは拡散光となっているので、途中にレンズをいれて平面波となるよう調節した。レーザーアブレーション加工をしたミラーはノマルスキー微分干渉顕微鏡や走査型電子顕微鏡で表面の観察を行った。

3.2 エキシマレーザーの照射強度とフルエンス

エキシマレーザーから照射されるエネルギーについてであるが、エキシマレーザーの操作パネルにパルスのエネルギー量が表示されるので、そこから表示される値の平均値を取った。また、ビームはアイリスで絞ることで照射するエネルギー強度を変えているので、アイリスによって切り取られたビームの面積を差し引いたものとの比をとり、照射されるエネルギーを算出した。

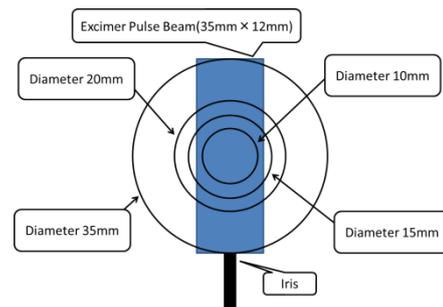


図 6：アイリスによる照射される総エネルギーの調整

実験では主にアイリスの直径が 10mm、15mm、20mm、35mm（解放）となるように設定して測定を行った。なお、実験ではエキシマレーザーのガスを 1 度入れ替えているために照射されるエネルギーの強度が若干変化している。そのため、エキシマレーザーのガス交換前と後での 2 つのデータを利用した。

表 1：エキシマレーザーガス交換前

Iris 直径[mm]	ビーム面積[mm ²]	照射エネルギー[mJ]
10	78.54	1.69
15	158.32	3.42
20	224.70	4.85
35	419.64	9.06

表 2：エキシマレーザーガス交換後

Iris 直径[mm]	ビーム面積[mm ²]	照射エネルギー[mJ]
10	78.54	4.25
15	158.32	8.56
20	224.70	12.15
35	419.64	22.71

また、レンズによってエキシマレーザーからのパルスビームを集光させてレーザーアブレーションを起こしていたが、その照射するビームの単位面積当たりのエネルギー（フルエンス）を求めるために照射後のアブレーション痕の面積を測り、先ほど求めた照射エネルギーをその面積で割ることでフルエンスを求めた。

表 3：エキシマレーザーガス交換前

Iris 直径[mm]	ビーム面積[mm ²]	フルエンス[mJ/mm ²]
10	78.54	84.94
15	158.32	171.91
20	224.70	243.79
35	419.64	455.41

表 4：エキシマレーザーガス交換後

Iris 直径[mm]	ビーム面積[mm ²]	フルエンス[mJ/mm ²]
10	78.54	23.71
15	158.32	47.79
20	224.70	67.83
35	419.64	126.79

4. 結果と考察

4.1 レーザーアブレーションによる加工

エキシマレーザーによるレーザーアブレーションをシャックハルトマン型波面センサーで観測し、もっとも変化量の大きいところのデータを選択し、縦軸に変化量を、横軸に照射したショット数をグラフ化した。

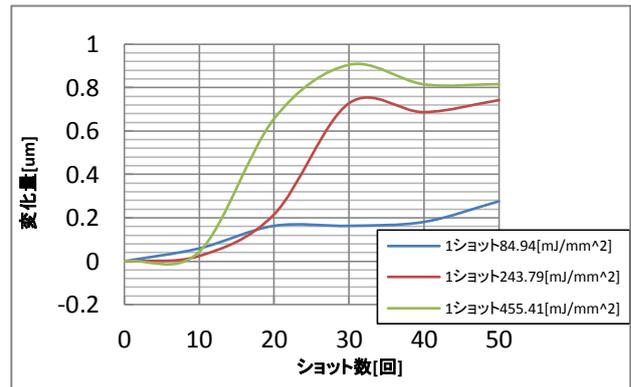


図 7：アブレーションによる波面形状の変化

1 ショット 84.94[mJ/mm²]の場合、20 ショットほどで約 200nm 削れることが分かった。より精度良い加工には単位面積当たりのエネルギーをさらに小さくしなければならない。200[mJ/mm²]以上では急激なアブレーションによって表面が一気に削れてしまい、光学素子表面形状を逆に損ねてしまう危険がある。

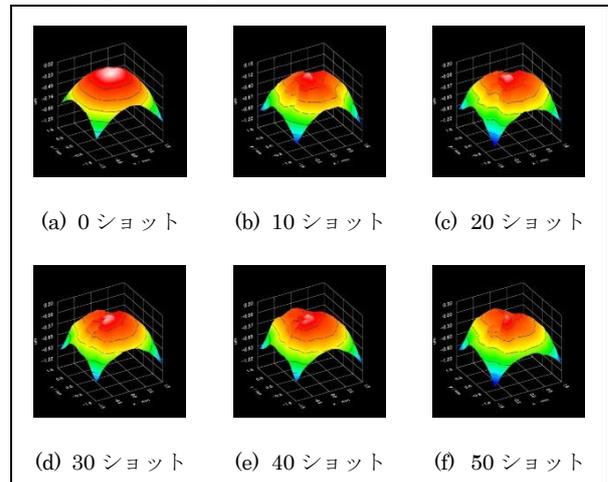


図 8：1 ショット 85[mJ/mm²]

図 4.2 は 1 ショット 84.94[mJ/mm²]で照射したときの波面の変化をシャックハルトマン型波面センサーで観測したものである。図 4.2(a)では滑らかな球面波となっているが、ビームショットを重ねていくことで波面が変化していくことがわかる。図 4.2(f)では波面にあるピークが立っており、図 4.1 で示したグラフはこの変化部である。z 軸は[μm]単位であり、x、y 軸は[mm]単位であるので、縮尺は事実上 1m²の面にわずか約 2mm の変化が起きたことと等しい。すなわち、先ほど球面波という表現を用いたが、ほぼ平面波となっていると考えられる。

4.2 加工部の観察

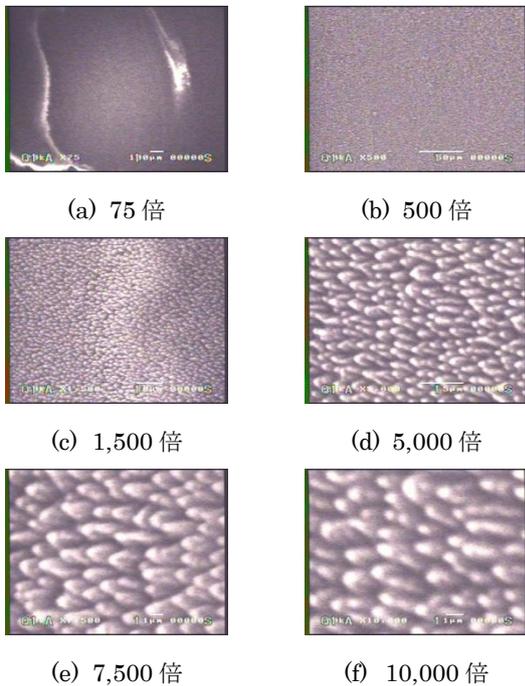


図9：電子顕微鏡によるコーティングミラーの表面形状の観察

図9はコーティングミラーの表面形状を電子顕微鏡で観察したものである。図9(e)からレーザーアブレーションによって加工された面に規則正しい突起物が生じていることがわかる。

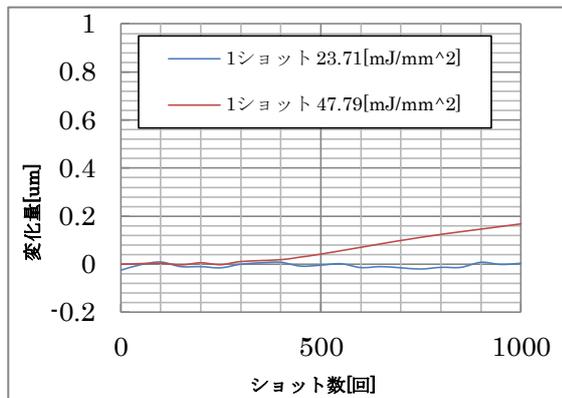


図10：アイリス調整後の表面形状の変化（コーティングミラー）

加工自体をより細かく制御するために、表面の形状を損なわないエネルギー強度で、かつ緩やかな変化となるようアイリスで照射するエネルギー強度を調整し、かつレンズで単位面積当たりのエネルギー量を調整した。

1ショット 23.71[mJ/mm²]では波面の形状に大きな変化が見られなかったが、47.79[mJ/mm²]では500ショット付近から変化が見え始めた。このことから、表面加工にはあるしきい値が存在し、それ以上になるとアブレーションが進んでいくことが確認できた。

このようになる原因としては、レーザーアブレーションによって原子や分子の結合が徐々に切り離されていき、最

終的に一定量のエネルギーが加えられると同時に切られていった結合部分ののところからまとめて剥がれ落ちていくという現象が起こったと考えられる。

4.3 炭酸ガスレーザーによる後加工

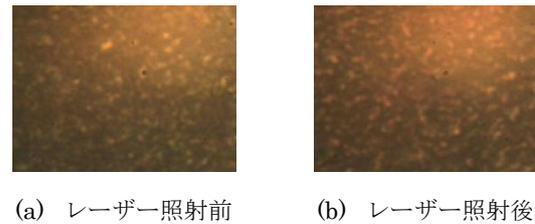


図11：炭酸ガスレーザー照射前後の変化（コーティングミラー）

最後に、表面形状の調整を行うためにレーザーアブレーションが起こったコーティングミラーの表面に炭酸ガスレーザーを照射し、表面形状の変化を観察した。炭酸ガスレーザーは120μsのパルス幅で、パルス間隔10000μs、そしてパワーを20Wとして入射角45度で10秒間照射した。表面には目立った変化が見られなかったことからパワーやパルス間隔など様々な問題点が残されていると考えられる。炭酸ガスレーザーは波長が長いので光学素子内にまでエネルギーが伝わり、表面加工だけでなく光学素子そのものに大きな影響を与えてしまう。それを防ぐためにパルス間隔やパルス幅をより細かく制御して調査を行う必要がある。

5. 結論

エキシマレーザーによるレーザーアブレーションは集光する面積を小さくするとエネルギー強度が上がり、ミラー表面で爆発的なアブレーションを起こし、デブリの発生につながってしまうのでその調整を精度よく行うことが必要であった。レーザーアブレーション自体、レーザー光の照射強度がある閾値まで達しないと起こらないことから、その値の測定が非常に重要なパラメーターとなった。また、レーザーアブレーション後の面を炭酸ガスレーザーで整える過程でも、炭酸ガスレーザーのエネルギーが強いと最悪ミラー自体の破損につながりかねず、照射するエネルギー強度に細心の注意を払う必要があった。エキシマレーザーによる加工面をできる限り鏡面の数μm以下の精度で加工し、炭酸ガスレーザーの照射強度を適切な値に調整することが求められる。今後さらに研究をすすめ、鏡面の加工に適した各パラメーターを導出していきたい。