

# レーザーを用いた光学素子整形法とその応用

=レーザー核融合の波及技術=



研究ノート

實野 孝久\*

Laser ablative shaping of optical elements and their applications  
=Industrial use of laser fusion technology=

Key Words : laser ablation, optical phase correction, laser diode, optical connection

## 1. はじめに

大阪大学レーザー核融合研究センター(以下センターと略す)では大型のガラスレーザー(レーザーガラスと呼ばれる固体活性媒質を用いたレーザー装置)による慣性核融合実験が行われている。慣性核融合とは重水素(D)-3重水素(T)燃料を高温・高密度で閉じ込めて核融合反応を効率よく得るため、慣性力を用いてプラズマ閉じ込めを行う方式である。燃料を含んだペレットを大きなエネルギーのレーザーで均一に照射し、外に向かって噴出するプラズマの反作用で加速し、慣性力で短い時間だけ高い密度に保つことでこの要請を満たしている。この目的のためには数十kJ~数MJにおよぶような大きな出力エネルギーのレーザーが必要であり、特殊な高出力レーザー技術が用いられている。大きなレーザー出力を得るために、活性媒質(レーザーを増幅する物質)にはネオジウム(Nd)イオンを含んだ燐酸ガラスが用いられ、強いレーザー光による光学素子の損傷(ダメージ)を避けるために35cmを越える大きな口径と多数のビーム数を用いるなどの特殊な工夫がなされている。このような核融合用レーザー装置では、以下のような特異な技術が必要とされている。

- (1)高いレーザー損傷閾値をもった光学素子を作る技術
- (2)直径1mにおよぶ大型光学素子製造技術

(3)波面収差の小さい高精度光学素子技術

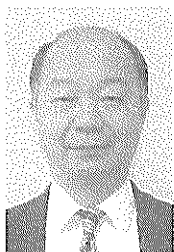
(4)安価な光学素子製造技術

現在の核融合用レーザーに用いられる光学素子は、ほとんどが従来の研磨・蒸着技術で製造されていたため、口径とビーム数の増大につれて、製造コストと製作時間の増加が大きな課題となっていた。このため、光学素子を安価に高い精度で作製する新しい光学技術が必要であった。これまでにも、新しい研磨技術として、イオンビーム<sup>1)</sup>、反応性プラズマ<sup>2)</sup>や磁性流体<sup>3)</sup>を使う方法などが提案されていたが、いずれも加工装置が大がかりになるとか、研磨精度の確認が別工程になるなどの問題があり、従来の研磨法に置き変わることはなかった。この観点から、著者らは短波長の紫外線レーザーを用い、ガラス材料の形状を計測しながらアブレーション現象により加工する方法の開発を行って来た。レーザー用光学素子では、表面の形状を数十nm(ナノメートル:10<sup>-9</sup>m)で制御する必要があるため、波長の短いレーザー光を物質の表面の非常に薄い層で吸収させ、蒸散除去することで形状を制御することを試みた。本来は高出力レーザーに最も良く使われる石英基板を加工する必要があるが、石英は160nmの真空紫外線の領域まで透明であり、フッ素レーザー(波長158nm)のような特殊なレーザーと大気を排除する照射装置が必要であるため、研究の手始めに大気中を伝播できるより波長の長いArF(アルゴン・フッ素)エキシマレーザー(波長193nm)を用いて光学プラスチックの整形を試みた。

## 2. プラスチック光学素子の波面制御

世の中では実に多くのプラスチック光学素子が多数の用途に使われているが、高精度の光学素子として見た場合、以下の大きな問題点を含んでいた。

- (1)内部の屈折率が一定ではなく、不均一性(脈理)



\* Takahisa JITSUNO  
1948年4月生  
1981年甲南大学・大学院自然科学研究科修了  
現在、大阪大学レーザー核融合研究センター、助教授、理学博士、レーザー物理学、レーザー光学  
TEL 06-6879-8768  
FAX 06-6877-4799  
E-Mail jitsuno@ile.osaka-u.ac.jp

が排除できない。

- (2) 応力がある場合の複屈折性(透過する光の偏光方向が乱れる性質)が大きい。
- (3) 空気中の湿気を吸い込み、屈折率がゆっくり変化する。

これらの問題のため、高精度の光学素子にはプラスチックは使えないものと考えられてきた。そこでプラスチックの加工性を活かし、欠点を補うためにガラス基板の表面に数十 $\mu\text{m}$ のプラスチック層を形成することを考案した<sup>4)</sup>。この結果、従来の問題点が厚さに比例することから、すべて1/100以下の値となり、課題ではなくなった。実際の加工基板は良

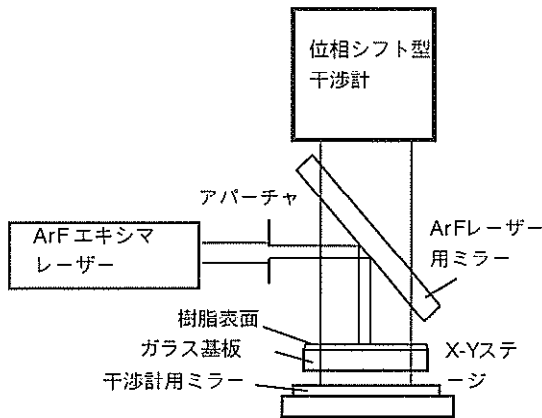


図1 レーザーアブレーション整形装置の構成

く研磨された石英窓とガラス基板の間に紫外線硬化樹脂を挟み、紫外線を石英基板側から照射して作製した。このガラス-石英複合基板を縦型の干渉計(波面収差を測定する装置)に置き、図1に示すようにArFレーザーを照射した<sup>4)</sup>。まず最初に透過波面を測定し、素子の厚みの分布を求め、余分な部分をアブレーション除去したところ、図2に示すようにきれいな平面や球面を作製する事に成功した<sup>4)</sup>。(図中の $\lambda$ とは観測に使用したHe-Neレーザーの波長(0.63 $\mu\text{m}$ )で、波面の誤差をこの波長を単位として与えている。この値が $\lambda/4$ より小さいと理想的な光学特性が得られる。)この成功は世界で初めてレーザーを用いて高精度の光学素子が整形された報告となった。実はこれまでも多くの研究者がレーザーで光学素子の整形を行おうとして来たが、いずれも成功しなかった。我々が成功した理由は、従来の研究で使用されたKrFレーザー(波長248nm)やYAGレーザーの4倍高調波(波長266nm)よりも短い波長のArFレーザーを使用したからであると推測される。短い波長のレーザー光はより薄い表面層で吸収されるため、表面を精密に削ぎ取ることができるためと考えられる。この成功から研究は以下に述べる3つの方向に展開した。

### 3. ガラス・石英基板の加工

我々の最終目的は核融合レーザーに使えるような大型ガラスレーザー用の光学素子を加工することであるため、ガラス特に石英ガラスを加工できなければいけない。そこでまず、ガラス基板をArFレーザーで加工することを試みた。石英はこの波長では吸収がほとんどないため、ガラスにArFレーザー光を集光して密度を上げて照射した。その結果、図3に示

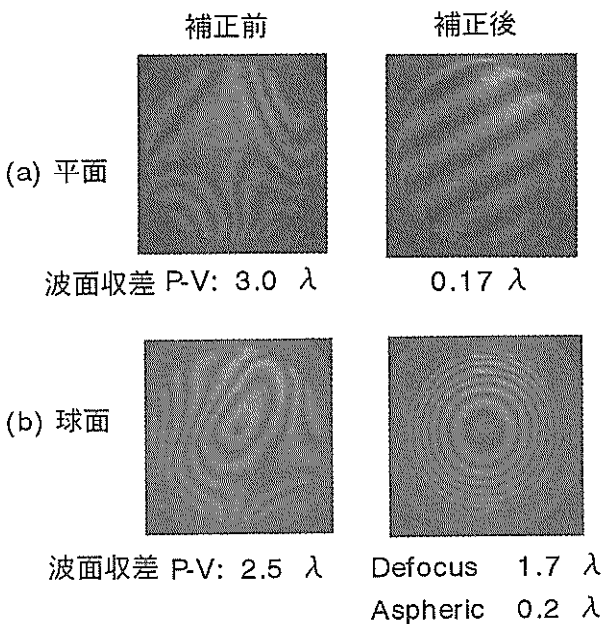


図2 光学素子の透過波面制御の例  
基板サイズは直径50mm

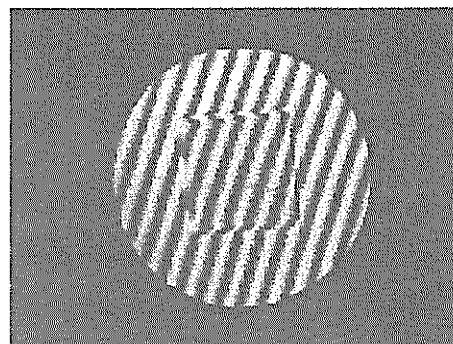


図3 ガラス基板の加工例  
加工サイズは10×10mm

すように、干渉計で波面がきれいに読めるような加工が可能となった<sup>5)</sup>。しかし、この場合には加工部分の表面がスリガラス状になり、透明にするには軽い研磨が必要であった。この表面荒れの原因は、除去された物質が周辺に降り積もり、次のショットで表面に凹凸を焼き付けたためと考えられる。そこでより波長の短いF<sub>2</sub>レーザー(158nm)と石英基板を使用してみたが、結果的には同じ状況であった。プラスチック材料では分解生成物が空气中で酸化されてしまうために、周辺には付着せずにきれいな加工ができたのだが、酸化物であるガラス/石英では、除去されたものが周辺に堆積することは避けられないと考えられる。このため、この方法は最終加工ではなく、その前工程として使用するのが望ましい。

#### 4. 半導体レーザー用コリメートレンズの波面補正

上に述べた状況から、この手法をより小型のプラスチック素子に適用し、単一モードのLDの出力光の波面を補正して微細に集光することにより高い輝度と照射密度を得ることを目指した。一般的なLDは集光性能が悪く、短いレンズで絞っても100kW/cm<sup>2</sup>を超えることがなかった。この理由は以下の2つであると考えられる。

- (1) 一般的な高出力LDは高い出力を出すため、活性層の幅を200μm程度のワイドストライプと呼ばれる構造としているため、横方向に空間多モード発振をしているので、基本的に絞れない。(縦方向は通常1μm以下の厚みであるため、単一モード発振をしている。)
- (2) 活性層の幅を5μm以下とした単一モードLDでは、縦横共に単一モード発振をしているが、活性層の幅の違いにより、LD結晶の端面から出たレーザー光は縦と横方向で異なった発散角を持っている。また、半導体そのものの屈折率が大きく、半導体の表面を出る時に屈折により大きな収差を含んでしまう。そこで単純な軸対称の光学系では波面が乱れ、集光しても輝度が上がらない。

以上のような理由により、従来はLD光を通常のレーザー加工に必要な1MW/cm<sup>2</sup>Sr以上に集光することは困難であった。このため、これまでは集光スポットが大きいことを前提として、多数のLDを集めて全体の出力を上げ、集光密度を稼ぐ方法が取られてきた。しかし、この方向では微細な集光は不可

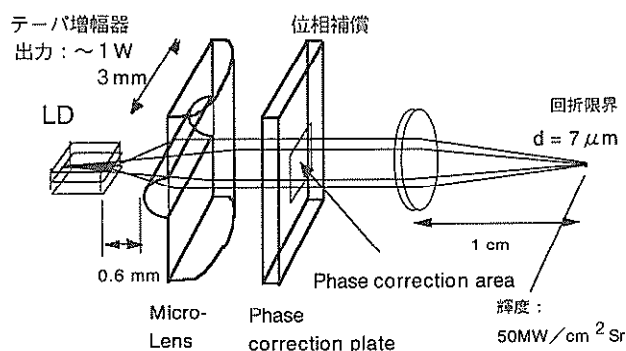


図4 高輝度半導体レーザーの構成

能で、多数のLDによる力任せの加工となり、また装置全体が大変高価なものとなっていたため、広く普及するには至っていない。また、一方では単一モードのLDでワイドストライプのまま空間モードを向上させる試みもいくつか行われているが、LDの構造に起因する寿命の問題や、LDを出た後の光学素子の精度が上がらない事あって、高い輝度は得られていない。

我々はこれまでの方向とは異なり、LDを出た後に用いる光学素子の精度を上げることにより、小さな出力のLDを用いて高い集光輝度を得て、超微細加工を行うことを目指した。LDとコリメートレンズ、波面補正板と集光レンズの関係は図4に示す。原理的には1Wの単一モードLDの出力ビームを3mm程度の平行ビームとし、焦点距離が1cm程度のレンズで集光すると3MW/cm<sup>2</sup>の照射密度と50MW/cm<sup>2</sup>Srという驚異的に高い輝度が得られる。このような高い集光輝度が超小型のLDで得られれば、小型のステージと組み合わせてセンチメートルサイズの加工/マーキング装置ができると考えられ、非常に安い価格の小型の装置で微小部品へのマーキングなどが行える。これが可能となれば、たとえば微小レンズや電子部品などの各種の小型部品の製造現場で、生産工程の管理用のトレーサブルマーキングなどを行うことができるため、大きな需要が期待できる。

このような単一モードLDの微細集光を実現するために問題となるのが、LD光自身の波面収差と、用いるコリメートレンズの精度およびLDとコリメートレンズの相互位置誤差である。これらの問題は、出てきたLD光の波面を計測して位相補償板で補正すれば、部品の精度を上げることなく解決可能であり、収差の少ないビームを得ることができる。その予備実験として、平行なHe-Neレーザー光に長焦

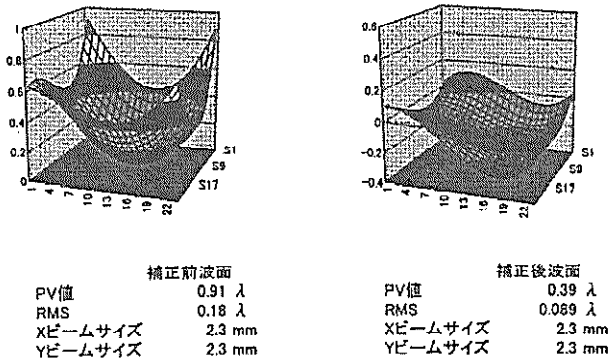


図5 微小素子における波面補正結果

点のレンズを挿入して波面収差を与え、その収差を位相補償板で補正する実験を行った。その結果を図5に示す。約0.9 $\lambda$ であった波面収差が0.4 $\lambda$ まで補正できた。ただし、実際のLD光を用いた実験では、コリメートレンズの収差が40 $\lambda$ 程度もあるために、良好な補正は出来ていない。今後はこのレンズの精度を上げて補正実験を行う予定である。

### 5. 光ファイバー通信への応用

前節で述べたLD光の高輝度集光は、そのまま単一モード光ファイバーへのLD光の結合に結びつくことから、同様の原理を用いて単一モード光ファイバー(以下ファイバーと略す)同志を小さな接続ロスで繋ぐ光コネクションに利用出来ると考えた。ここで少し従来の技術を説明すると、これまではファイバー同志を接続するためには、ファイバーのコアサイズが8 $\mu\text{m}$ 程度であったことから、ファイバー同志を互いにサブミクロンの精度で正確に突き合わせる必要があり、精度の高いジルコニアセラミックなどのフェルールと呼ばれる円筒の中央にファイバーを接着し、その端面を研磨して、割りスリーブと呼ばれる筒に押し込んで一定の応力で互いに押しつけることで接続されていた。このような方法でFCとかMUというような規格のコネクターが広く使用されている。しかし、各々の部品にサブミクロンの精度が必要であるため、価格を下げるのが難しく、各家庭などの末端までファイバーを敷設するファイバー・ツー・ザ・ホーム (FTTH) の普及の大きな障害となっていた。最近ITバブルの崩壊で部品が値崩れを起こし、以前に比べれば大幅に安くなっているが、それでもFTTHの普及にはまだ数倍程度の低価格化が求められている。このような状況から、末端系で

石英の単一モードファイバーを使用することをあきらめ、伝送距離が短い大口径のプラスチック多モードファイバーや石英多モードファイバーを使用する提案すら行われている。

このような光通信の現状を打破するため、従来とは異なる簡便な方法でファイバーを接続することを考えた。このため、ファイバー端面に紫外線硬化樹脂を盛り上げてレンズを作製し、ファイバーからの光を平行ビームとして送りだせるファイバー・コリメーターを考案した。最初はラフにレンズを形成して、ファイバーから光を出し、レンズではほぼ平行になったビームの波面を計って、その表面をレーザーアブレーションで整形することを目指した。ファイバーの端面にはほぼ屈折率の等しいUV樹脂でレンズを形成するため、従来の接続方法では必要であった研磨工程が不要となる。また、コリメートされたビームを扱うので、コネクターの位置にはサブミクロンの精度は不要となり、数十ミクロン程度の位置の誤差は許容される。そのため、コネクターのコストを桁違いに落とす事が可能となると考えられるので、FTTHのためのブレイクスルーにできる可能性がある。

このアイデアを科学技術振興事業団の権利化試験として応募したところ採択されたので平成13年度に開発研究を行った。まず液滴レンズの精度を上げるため、紫外線硬化樹脂を固める前に波面を測定し、硬化による屈折率変化を見越してある形状に持ち込んでから硬化させるという手順を開発した。この方法を図6に示す。液滴レンズは概ね数 $\lambda$ 程度の波面収差となったため、その形状をレーザーアブレーションで補正して $\lambda/4$ まで収差を下げることを目指したが、使用したビーム径が約0.5mmと小さく、補正

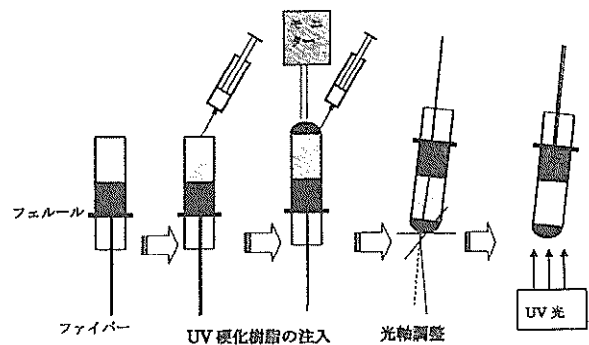


図6 液滴レンズによるコリメーターレンズの形成

用レーザーのスポット位置の誤差と推定される原因により、 $\lambda$ 程度までしか補正ができなかった<sup>6)</sup>。

そこで最初の液滴レンズの精度を上げることを試みたところ、条件によっては球面の収差がほとんど無くなり、主に傾き成分だけが残る状態が再現性よく得られたことから、液滴レンズの形成時に測定系も含めて傾斜させ、重力で液滴レンズを傾けることでこの誤差を補正することを試みた。その結果、図7に示すように、レーザーによる波面補正なしで波面収差 $\lambda/4$ を下回る $0.2\lambda$ が得られ、互いに向き合わせることで接続損失1dB以下が得られた。この値は末端系のファイバー接続としては十分と考えられるものであり、さらにレンズ表面に反射防止コートを行えば、損失が軽減できると考えられる。

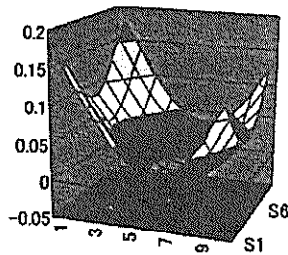


図7 液滴レンズの波面収差

この開発においては、結局レーザー修正を行わなくても簡便な方法で良好なレンズが形成できることが判明した。また、コネクタとしては、その方向を互いに向き合わせることで接続損失を小さくすることができるため、従来とは異なる簡便な構造を採用できるので、大幅なコストダウンを図ることが可能と考えられる。現在はまだ必要な接着工程も、部材を工夫することにより簡単な金属円筒にカシメるような工程で代替できる可能性もあり、従来の電線におけるモジュラージャックのような部品として使えるようにしたい。また、コネクタの間は平行ビームであるため、ミラーやフィルターなどを自由に装着できるので、大きな応用分野が期待できる。さらにこの先には集積回路(IC)同志を光で直接接続する光インターコネクションなどへの展開も考えられる。

## 6. おわりに

核融合用レーザーの光学素子を何とか簡便に成形したいとの願望から、レーザーによる光学素子成形という新しい手法が生まれた。結局この方法は大型の石英などにはすぐに使えるものではないが、LD用レンズなどの整形には役立つものと考えられる。また、同じ手法を単一モードファイバーの接続に拡張する研究では、レーザーを使わない方法で良好なレンズが整形できることが判明し、FTTHに向けた大きなブレークスルーになるかも知れない状況となってきた。このようにレーザー核融合の波及技術が世の中の役に立つ成果として活用されることは大変望ましいことである。最後にこの紙面をお借りして、この研究に当初から協力して頂いたナルックス株式会社の徳村啓雨研究員と北川清一郎社長に感謝申し上げる。また、2回に渡り研究テーマとして採択して頂いた科学技術振興事業団の支援にも感謝したい。事業団の支援がなければ、全くのアイデアからここまで技術が立ち上がることは非常に難しかったと考えられる。他の機関の公募プロジェクトとは異なり、開発リスクの大きい研究の推進を受け入れる事業団の姿勢を高く評価したい。

## 参考文献

- 1) S.R.Wilson et al., Proc. SPIE 1441, 82-86 (1990).
- 2) H.Takino et al., Appl. Opt. 37, 5198-5220 (1998).
- 3) A.B.Shorey et al., Appl. Opt. 40, 20-30 (2001).
- 4) T.Jitsuno et al., Appl. Opt. 38, 3338-3342 (1999).
- 5) T.Mikata et al., Proc. SPIE 3885, 401-408 (1999).
- 6) T.Jitsuno et al., *Optical Fiber Communications* (OSA: OFC 2001)MK-2, 19-22(2001).