

# CO<sub>2</sub> レーザーを用いたマイクロレンズ作製と 形成メカニズムの検討

中本健二郎\*1・福本秀夫\*2・室谷裕志\*3・若木守明\*4

## Fabrication of microlens using CO<sub>2</sub> laser and characterization of formation process

by

**Kenjiro Nakamoto, Hideo Fukumoto, Hiroshi Murotani and Moriaki Wakaki**

(Received on Sep. 30, 2004 & accepted on Dec. 22, 2004)

### Abstract

Microlenses were formed directly on the surface of a glass plate by using a CO<sub>2</sub> laser. This method has the merit of enabling completely dry processing and presents a simple means of microlens fabrication. We discuss the formation process and mechanism on the basis of the characterization of irradiation parameters and the glass composition. When the surface of a glass plate is heated locally to the working point of the glass material with a focused CO<sub>2</sub> laser beam, a microlens is formed owing to surface tension. It was found to be possible to fabricate microlenses easily by controlling the laser power and irradiation time. The shape of the fabricated microlenses was found to be dependent on laser irradiation energy (laser power x irradiation time) and irradiated position. When a Corning 7059 glass plate was used, a convex microlens was obtained at an energy density less than approximately 100 ( $\mu\text{J}/\mu\text{m}^2$ ). The dynamical stress change of the microlenses was measured in situ by T-FDP (four detectors polarimeter of transmission type) type ellipsometry analysis to elucidate their formation process.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> laser, microlens, focused laser beam, surface tension, glass plate, ellipsometry

## 1. 緒言

近年、光エレクトロニクスの分野は私達の生活の中において大変重要な役割を果たしている。なかでも光通信や光情報処理の分野は、光エレクトロニクス技術の伸展に伴いシステムを構成する光学部品や光センサの小型化、集積化が重要な課題の一つになっている。それらシステムを構成している要素はマイクロレンズをはじめとする微小光学素子であり、種々の機能（集光、コリメーション、結合、分岐等）を高性能に実現し、光エレクトロニクスの発展を支えている。

マイクロレンズ作製法については、イオン交換法、機械加工法、レジストリフロー法など様々な作製法がある。しかし、ど

れも煩雑なプロセスや装置を必要とする。我々は、CO<sub>2</sub> レーザーを用いたマイクロレンズを始めとする微小光学素子の作製法について研究を行ってきた。この手法を用いることによりマイクロレンズを完全なドライプロセスで容易に作製する事が可能である。また、CO<sub>2</sub> レーザーの照射エネルギーやレーザービーム径などの変化により、種々の形状のマイクロレンズが作製可能である。以上の事から、本手法の特徴をまとめると、

- A) ドライプロセスで作製可能
- B) マイクロレンズの形状自由度が大きい
- C) マスクレスでマイクロレンズの作製が可能
- D) 使用する装置構成が簡単

などの優れた特徴を有している。

現在までの研究結果より、本手法によるマイクロレンズ形成過程はFig.1の様と考えられる。CO<sub>2</sub> レーザー光がガラス基板に照射されると (a)、ガラス基板表面はレーザー光の熱で融解し (b)、表面張力によって球面形状に変形する (c)。その結果、レーザー光が照射された箇所にマイクロレンズが形成される (d)。

\*1 工学研究科光工学専攻博士課程前期

\*2 岡本硝子(株)

\*3 応用理学科光工学専攻講師

\*4 応用理学科光工学専攻教授

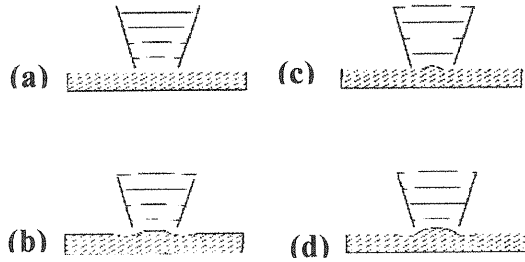
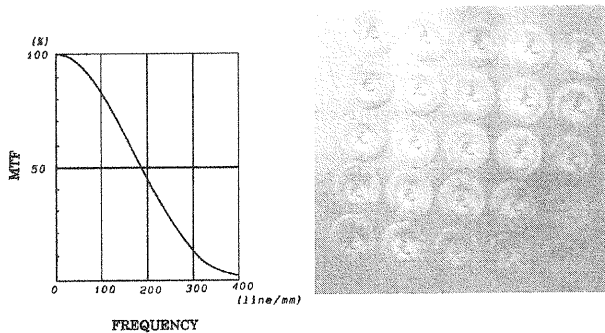


Fig.1 Conceptual schematic diagram to show the physical process used to form a microlens on a glass plate by the absorption of a CO<sub>2</sub> laser beam.



( a ) MTF of microlens. ( b ) Images of a character formed with a microlens array.

Fig.2 MTF of microlens and images of a character formed with a microlens array<sup>1)</sup>.

この様な過程で作製されたマイクロレンズやマイクロレンズアレイの MTF (Modulation Transfer Function) による光学的評価は良好な結果を得ている (Fig.2)<sup>1)</sup>.

マイクロレンズ形状の変化についても、基板組成の違いにより、断面形状が凸型や凹型に形成させることが観察されている。また、マイクロレンズの形状が CO<sub>2</sub> レーザーの照射条件(照射時間、照射パワー、ビーム径)に依存することを確認した。しかし、形状と種々の照射条件との関係において未だ不明確な部分が存在する。そこで本研究においては、本手法におけるマイクロレンズの形成メカニズムについて検討を行った。

今回の実験パラメータは CO<sub>2</sub> レーザーの照射時間、照射パワー、ZnSe レンズから基板までの距離とした。これらを変化させマイクロレンズを作製する。作製したマイクロレンズの径や形状の変化、ガラスの組成成分の変化を解析することによりマイクロレンズがどのように形成されていくのかと言う形成プロセスの検討を行った。また偏光解析を用いて、マイクロレンズの変形(形成)の始まる初期過程の観察を試みた。

## 2. 実験方法

マイクロレンズ作製用基板にコーニング社製の 7059 ガラスを用いた。7059 ガラスの組成および特性を Table1 に示す。そして、今回使用した CO<sub>2</sub> レーザーのビームモードは、TEM<sub>00</sub>モードである。これは感熱紙に CO<sub>2</sub> レーザーを照射した際のバー

パターンから確認することができる (Fig.3)。照射条件として照射時間、照射パワー、照射位置をそれぞれ変化させ実験を行った。ここで言う照射位置の変化とは、CO<sub>2</sub> レーザーの光軸方向と同一方向へ移動させる位置のことである。よって照射位置 ±0mm は ZnSe レンズの焦点位置となる。つまり、照射位置の変化は CO<sub>2</sub> レーザーのビーム径の変化に対応する。このビーム径の測定には、ナイフエッジ法を用いた。ナイフエッジ法とはナイフの刃をレーザービームの進行方向に対してビームを切断する方向へ移動させ、ビームを遮りながらビーム強度を測定する方法である。これより、ナイフの移動量に対するビームの強度変化からビーム径を測定するナイフエッジ法の概念図を Fig.4 に示す。この方法より求めた各照射位置におけるレーザービーム径の結果を Table2 に示す。

Table1 Typical parameters of Corning 7059 glass.

Corning 7059 Glass		
Composition [wt %]	SiO <sub>2</sub>	49
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10
	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15
	BaO	25
Coefficient of thermal expansion	0~300 °C	46.0 × 10 <sup>-7</sup> /°C
	25°C~Setting Temperature	50.1 × 10 <sup>-7</sup> /°C
Strain point	593 °C	
Annealing point	639 °C	
Softening point	844 °C	
Working point	1160 °C	
Density	2.76 g/cm <sup>3</sup>	
Young modulus	67,500 Mpa	
Poisson's ratio	0.28	
Refractive index	1.5333 (589.3 nm)	

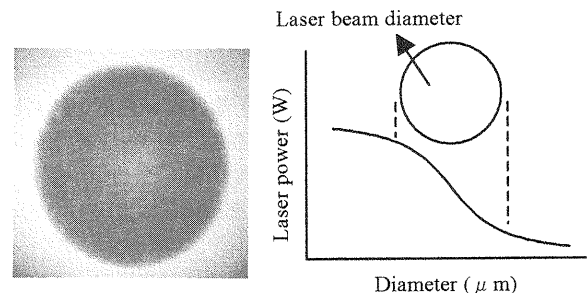


Fig.3 Beam mode. (TEM<sub>00</sub>)

Fig.4 Schematic diagram to show the knife edge method.

Table2 Laser beam diameter.

Irradiated point (mm)	+8	+4	0	-4	-8
Laser beam diameter (μm)	643	326	151	456	760

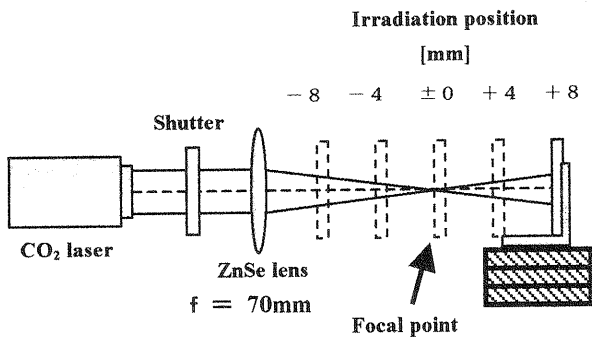


Fig.5 Optical system for fabricated microlens.

### 2. 1 実験装置

本実験装置は、マイクロレンズ作製用光学系 (Fig.5) と偏光解析用光学系で構成される (Fig.6)。マイクロレンズ作製用光学系では、CO<sub>2</sub> レーザーから出射されたレーザー光は、ZnSe レンズ (焦点距離  $f = 70 \text{ mm}$ ) によりガラス基板表面に集光する。ここでCO<sub>2</sub> レーザーと ZnSe レンズの間にシャッターを置いて、レーザーの照射時間を調整した。偏光解析用光学系では、CO<sub>2</sub> レーザーと He-Ne レーザーから照射されたレーザー光が、ガラス基板表面で重なるよう調整を行った。これより、CO<sub>2</sub> レーザー照射時にガラス基板で起こる応力変化を He-Ne レーザー光の偏光状態と透過光強度の変化として透過型の FDP (Four Detectors Polarimeter) で検出した。

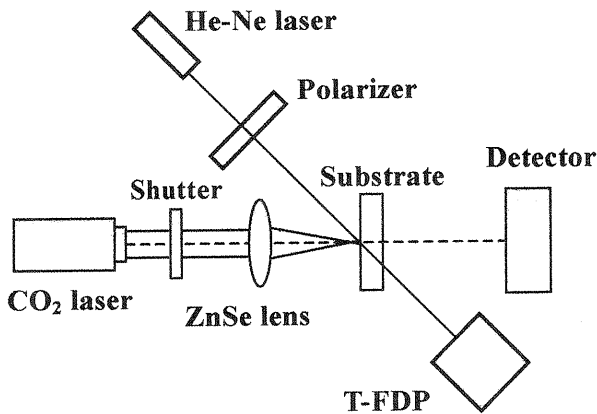


Fig.6 Optical system for the T-FDP type ellipsometry measurement.

### 2. 2 照射条件

マイクロレンズ作製の照射条件として、CO<sub>2</sub> レーザーの照射パワーを 1, 2, 3 W, 照射時間を 0.01, 0.03, 0.06, 0.13, 0.25, 0.50, 1.00sec と変化させ実験を行った。その際、CO<sub>2</sub> レーザーを照射する基板の位置を ZnSe レンズの焦点位置に設定した。次にガラス基板上に集光する CO<sub>2</sub> レーザーの照射位置を ZnSe レンズの焦点位置から  $\pm 4 \text{ mm}$ ,  $\pm 8 \text{ mm}$  とそれぞれ変化させ実験を行った。

偏光解析では照射条件として、CO<sub>2</sub> レーザーパワーを 1 W, 照射時間を 5.00sec に設定し、照射位置を照射位置  $\pm 0 \text{ mm}$ ,  $\pm 4 \text{ mm}$  と変化させ測定を行った。

### 2. 3 測定方法

マイクロレンズの形状測定および形状観察は、光学顕微鏡と SEM (Scanning Electron Microscope : 日立製作所 S-3200N) を用いた。また、マイクロレンズ内での組成変化は、SEM に取り付けた EDX (Energy Dispersive Spectroscopy : HORIBA EMAX-5770W) により観察を行った。この時の観察面は、研磨したマイクロレンズの断面を用いた。

## 3. 実験結果及び考察

### 3. 1 表面観察

照射パワー 3W で作製した試料を光学顕微鏡により観察した (Fig.7)。照射位置  $\pm 0 \text{ mm}$  で作製した試料の中心部とその周辺が茶色に変色し、気泡も発生していることがわかる。この照射条件では、ガラス基板に対して照射するエネルギー密度が大きすぎるためである。よって、照射位置  $\pm 0 \text{ mm}$  では、照射時間、照射パワーの調整によって照射エネルギー密度をより小さくすることでこの問題を解決可能である。また、照射条件によって

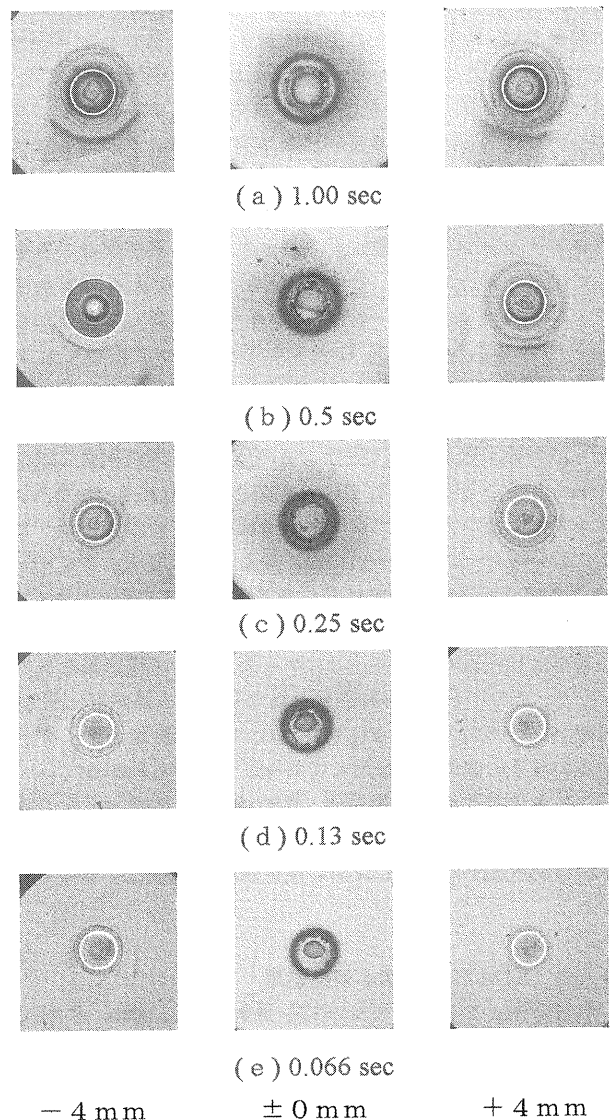


Fig.7 CO<sub>2</sub> laser irradiation region observed with optical microscope (Irradiation power 3W).

は、照射位置±0mm, ±4mmで作製した試料にクラックが発生している。これはアニーリング処理を行っていないために、応力が緩和されずクラックが発生したものと考えられる。しかし、クラックの問題もCO<sub>2</sub>レーザー照射後にアニーリング処理を行うことにより解決できる<sup>1)</sup>。今回の実験目的は、形成メカニズムの検討であるため、アニーリング処理を行っていない。アニーリング処理を行わなかった理由はCO<sub>2</sub>レーザー照射後のガラス組成成分の空間分布を観察するためである。アニーリング処理による熱は、ガラス組成成分を拡散させるため、レーザー照射後のガラス組成成分の空間分布観察に影響を与える可能性がある。よって、アニーリング処理を行わなかった。

照射位置±4mmでは、照射時間が0.13 sec以下で作製したレンズは良好なものが得られた。今回の照射条件で照射位置±8mmは、光学顕微鏡でマイクロレンズの形成を確認することができなかった。これは今回の照射条件では、照射エネルギーが低いとめと考えられる。

### 3.2 マイクロレンズの径

マイクロレンズの径は、断面観察結果からFig.8中の(a)から(b)までの距離と定義する。Fig.9は照射位置+4mmにおいて照射時間、照射パワーの変化に対するマイクロレンズの径の変化である。この結果から、0.06secより短い照射時間では、照射パワーに関係なく大きな変化が見られた。1Wの照射パワーについては0.06secより長い照射時間でのマイクロレンズ径の変化は小さい。しかし、2,3Wについては0.5sec程度までマイクロレンズの径の変化が見られた。このことはマイクロレンズが作製される上で、ある閾値以上のエネルギーが必要なことを示していると考えられる。つまり、照射パワー1Wの照射エネルギーでは入力エネルギー(照射エネルギー)に対して基板から放射されるエネルギー(損失エネルギー)が足りてしまい0.06secからはエネルギーを入力されてもマイクロレンズの形成に寄与していないと考えられる。また、マイクロレンズの大きさが照射エネルギーに依存するのは、ガラスが作業点以上に加熱されることに起因しているものと考えられる。つまり、エネルギー強度がガウシアンビーム形状をしているレーザービームにおいてビームパワーが大きくなることは同じエネルギーを示す領域がビーム径方向に広がることを意味する。よって、ある閾値エネルギー以上で作業点以上の温度になるような本実験の系ではビームパワーにより、マイクロレンズ径が異なることとなる。このことは、照射位置が異なりビーム径がほぼ同じで、照射パワーが同じ実験(Fig.10)において照射時間とマイクロレンズの径との関係がほぼ同じであることからわかる。

これらの結果から照射時間、照射パワー、スポット径の調整により、マイクロレンズの径を制御可能である。このことは本手法が簡単にマイクロレンズの径を制御できることを示すものである。

### 3.3 SEM,EDXによる観察結果

照射条件として照射パワー3W,照射時間1.00sec,照射位置が±0mm ±4mmの3箇所で作製した試料の断面形状と組成変化をSEM,EDXによって観察した(Fig.11)。

まず、照射位置±0mmで作製した試料の形状は強い照射エネルギーによりガラスが蒸発してクレーター状になっていることがわかる。そして、これは表面観察の結果から中心部分で茶色

に変色し気泡も発生している。このためレンズとしての特性を満たしていないので本研究ではマイクロレンズと考えない。EDXによる7059ガラスの主成分(Si,Al,Ba)のマッピング分析より、凹型の底部のSiO<sub>2</sub>が多く蒸発していることがわかる。この時Al,Baなどは蒸発して作られた凹型の底部に多く存在している。

次に照射位置±4mmで作製したマイクロレンズの形状は凸型となっていることがわかる。それぞれのEDXの結果から凸部を中心とした領域で組成変化が起こっていることがわかる。これはマイクロレンズ生成過程の模式図で示したように、CO<sub>2</sub>レーザー光の熱で融解し表面張力により球面形状に変形すると考えられる。また、照射位置-4mmで作製したマイクロレンズ

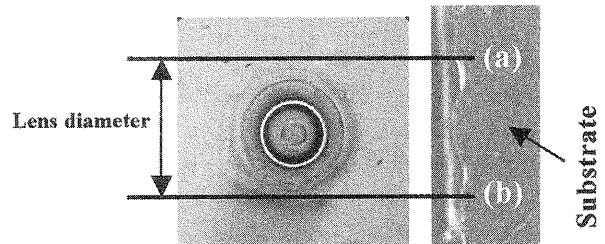


Fig.8 Definition of lens diameter.

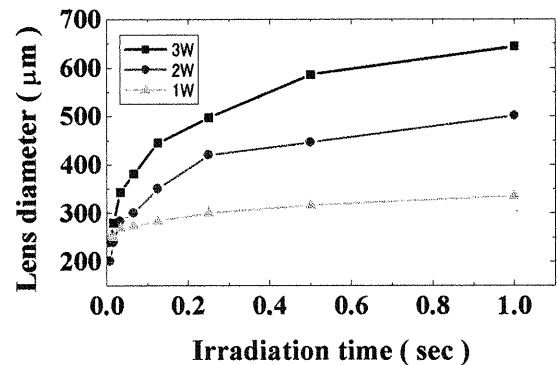


Fig.9 Laser irradiation time dependence of a microlens diameter (Irradiation position +4 mm).

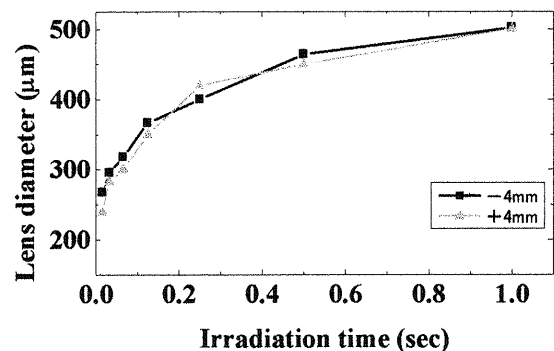


Fig.10 Laser irradiation position dependence of a microlens diameter (Irradiation power 3W).

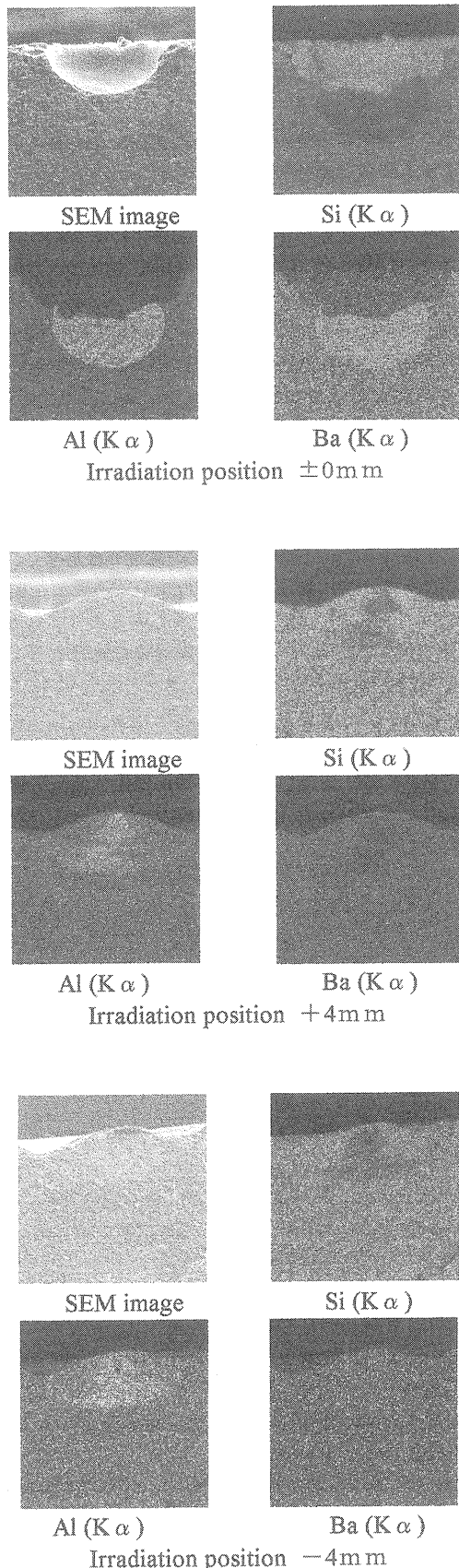


Fig.11 Distribution of principal component of Corning 7059 glass around evaporated region observed with SEM and EDX.(Irradiation power 3W, Irradiation time 1sec).

は、ガラス基板表面から突出していないが、照射位置+4mmではガラス基板表面から突出することが観察された。

これらの違いは、基板内でのレーザービームプロファイルの違いに起因すると考えられる。照射位置-4mmでは、レーザービームがガラス基板の表面よりも内部でより集光している。そのため、CO<sub>2</sub>レーザーが照射された時にガラス基板の内部は表面よりも高い温度になると考えられる。これより、ガラス基板の内部から融解が起こる。この時、ガラス基板の表面ではまだ融解が起きていないため、マイクロレンズは突出できなかったのである。照射位置+4mmでは、レーザービームがガラス基板内部よりもガラス基板表面でより集光している。そのため、CO<sub>2</sub>レーザーが照射された時にガラス基板表面から融解が起こり、マイクロレンズは突出すると考えられる。

これらの結果より、照射されたガラス基板領域が融点に達するために必要な閾値エネルギーを熱力学の式(1)を用いてモデル計算した。

$$Q = mcT \text{ [cal]} \quad (1)$$

ここで照射されたガラス基板領域とは、直径が照射位置±4mmでのレーザービーム径であり、深さはSEMで観察した結果から300μmの半球体積を用いた(Fig.12)。Tは半球体積の温度(°C)、mは半球体積の質量(g)、cは比熱(c=0.2 cal/g・°C)である。半球体積の温度は、7059ガラスの作業点1160°Cから2000°Cまでの領域と仮定した。この2000°Cという値は、照射位置±0mmでのEDX結果より、7059ガラスの組成で沸点がもっとも高い成分であるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が蒸発した温度から仮定したものである。これより、照射エネルギーの閾値は約60~100(μJ/μm<sup>2</sup>)と見積もることができる。これは低エネルギー密度でマイクロレンズ作製が可能であることを示す。

### 3. 4 偏光解析

偏光解析ではマイクロレンズ形成の初期過程をその場観察により解析することを目的とした。偏光解析ではCO<sub>2</sub>レーザー照射時にガラス基板で起こる応力変化をHe-Neレーザーの透過光強度と偏光角の変化として測定する。ここでCO<sub>2</sub>レーザーの照射条件は照射パワー1W、照射時間5.00sec、照射位置±0mm、±4mmで行った。ここで照射パワーを低く設定したのは、マイクロレンズ形成の初期過程の観察を行うことが目的であるため、照射パワーを高く設定するとそれに伴い、マイクロレンズ形成過程時間も短くなり、偏光測定が困難となるためである。また照射パワーを高く設定すると作製されるマイクロレンズの径の変化も大きくなってしまふ。そのため、ガラス基板の熔融した範囲が広くなり形状変化が大きくなる。これは、He-Neレーザービームの散乱や進行方向の変化が大きくなり、偏光測定に影響を与えると考えられる。よって小さいパワーで長時間照射することは、応力変化の観察を行いやすくするためである。

Fig.13では透過光強度の結果を示し、Fig.14では偏光状態の変化を示す偏光角の結果を示した。これらの結果からCO<sub>2</sub>レーザー照射中においては、He-Neレーザーの透過光強度と偏光角の値は急速に低下することがわかる。これはCO<sub>2</sub>レーザー照射中に照射位置±0mmではガラス基板が蒸発し、照射位置±4mmではガラス基板が熔融していると考えられる。そのためHe-Neレーザー光が散乱され偏光状態に変化を引き起こしたものと考える。次にCO<sub>2</sub>レーザーの照射後、He-Neレーザーの透過

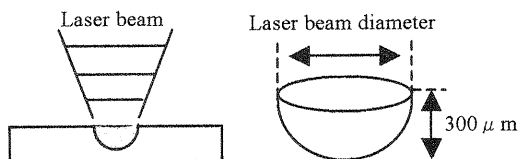


Fig.12 Volume of model to used calculation.

#### 4. 結言

CO<sub>2</sub>レーザーの照射条件を変化させて作製した試料を観察し、以下の結果が得られた。

- 1) マイクロレンズの径は、照射するエネルギーとスポット径によって制御可能である。
- 2) 照射位置±0mmで作製した試料の形状は、ガラスが蒸発しクレーター形状となっていることがわかる。また、7059 ガラスの主成分の内 SiO<sub>2</sub> が多く蒸発していることが観察された。
- 3) 照射位置±4mmでは、マイクロレンズの形状が凸型となっていた。照射位置-4mmで作製したマイクロレンズは、ガラス基板表面から突出していないが、照射位置+4mmではガラス基板表面から突出することが観察された。これらの違いは、基板内でのレーザービームプロファイルの違いに起因すると考えられる。
- 4) He-Ne レーザーの透過光強度と偏光角の変化からマイクロレンズはCO<sub>2</sub>レーザー照射中にガラスが熔融し、表面張力によって凸型に形成され、CO<sub>2</sub>レーザー照射後に熔融したガラスが数十秒ほどで安定するものと考えられる。偏光解析はマイクロレンズ形状の初期過程を解明することに有用な方法である。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり T-FDP の機材提供と偏光解析実験にご協力いただきました、東京工芸大学、川畑州一教授に御礼申し上げます。

#### 参考文献

1. M. Wakaki, Y Komachi and G. Kanai: Appl. Opt., **37** (1998) 627.
2. N. F. Borrelli and D. L. Morse: Appl. Opt., **27** (1988) 476.
3. K. Suzuki, T. Taniyama and T. Matsutani: Rev. Laser Eng., **14** (1986) 880.
4. K. Suzuki, T. Taniyama, J. Nakata and T. Matsutani: Rev. Laser Eng., **15** (1987) 113.
5. U. C. Paek and A.L. Weaver: Appl. Opt., **14** (1975) 294.
6. H. M. Presby and A. F. Benner: Appl. Opt., **29**(1990) 2692.
7. V. P. Veiko, E. B. Yakovlev, V. V. Frolov, V. A. Chujko, A. K. Kromin, M. O. Abbakumov, A. T. Shakola and P.A. Fomichov: Proc. SPIE 1544 (1991) 152.
8. V. P. Veiko, A. K. Kromin and E. B. Yakovlev: Proc. SPIE 1992 (1993) 159.
9. M.Oikawa, K. Iga, T. Sunada, N. Yamamoto and K. Nishizawa: Jpn. I Appl. Phys., **20** (1981) L291.
10. H.Murotani, K. Nakamoto, H.Fukumoto, and M.Wakaki: The 5th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, Technical Digest(2004) 97.

光強度と偏光角の値は、大きな揺らぎを示した。これは熔融したガラスが固化していく際に発生した残留応力の影響と考えられる。これより He-Ne レーザーの透過光強度と偏光角の変化からマイクロレンズは CO<sub>2</sub>レーザー照射中にガラスが熔融し、表面張力によって凸型に形成され、CO<sub>2</sub>レーザー照射後に熔融したガラスが数十秒ほどで安定するものと考えられる。この様に偏光解析はマイクロレンズ形状の初期過程を解明することに有用な方法であると考えられる。

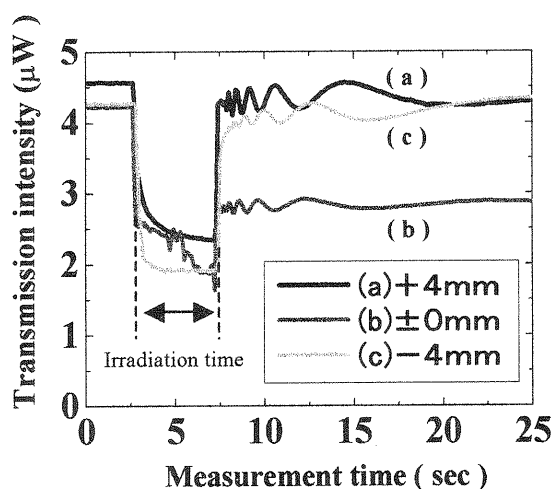


Fig.10 Dynamical behavior of He-Ne laser beam transmission intensity through the glass substrate induced by the microlens formation using CO<sub>2</sub> laser.

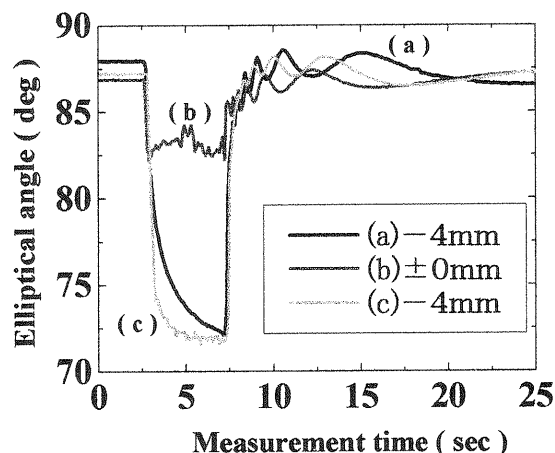


Fig.11 Dynamical behavior of the elliptical angle of He-Ne laser beam induced by the micro lens formation.