

# レーザー誘起熱変形によるプラスチック・マイクロレンズの作製\*

山田 啓司\*\* Hery Mochtady\*\*\* 平出 寛明† 細川 晃\*\* 上田 隆司\*\*

Fabrication of Plastic Microlens by Thermal Deformation Induced with Laser

Keiji YAMADA, Hery Mochtady, Hiroaki HIRAIDE, Akira HOSOKAWA and Takashi UEDA

Microlens is a key component in the fields of optical communication, data storage and digital display. Integration of microlenses and optical devices is also required for weight saving, reduction in assembly cost and higher accurate alignment. This paper deals with the development of a novel method to fabricate spherical microlenses and microlens arrays. In this method, microlenses are formed on the surface of acrylate resin which is used as sealing material for the optical devices such as photodetectors, laser diodes, CCD image sensors and so on. Microlenses are fabricated under several conditions, and the influences of process parameters on the dimension of microlenses are investigated. The fabricated microlens and microlens array have the appropriate shape, surface finish and alignment so as to condense light.

**Key words :** microlens, microlens array, Er:YAG laser, thermal deformation

## 1. 緒 言

マイクロレンズは、デジタルカメラ用CCD固体撮像素子や液晶プロジェクタ用透過液晶パネルに組み込まれて実効的な開口率を向上させたり、光通信用ファイバレイの接続に用いられる。図1のように、これら光学デバイスとマイクロレンズを集積化してモノリシック素子として製造すれば、組立・実装工程が省略でき、製造コストを抑制できる<sup>1)</sup>。

光学デバイスと集積化したマイクロレンズを作製する優れた方法にはレジストリフロー法<sup>2)</sup>があるが、加熱溶融させたレジスト材の表面張力によりレンズを形成するため、開口径や焦点距離に制約を受けてしまう。一方、エッチング技術によってマイクロレンズ用の微小型を作製する方法<sup>3)</sup>では、成形の際に各種の光学デバイスとレンズを正確に位置決めして集積化することは困難である。

そこで本研究では、光学デバイスをプラスチック樹脂で封入した後にレンズを設けることを目的とし、多品種少量生産に対

応可能な、金型を使用しないレンズ成形方法を開発する。軽量で耐衝撃性や透光性に優れたプラスチックに対してレーザー光を照射することで局所的な熱変形を引き起こし、表面にマイクロレンズを作製し、加工条件とレンズ形状との関係について調べ、製作されたレンズの集光性を確認している。

## 2. 実験方法

実験条件を表1に、実験装置の概略を図2に示す。プラスチック基板に上方鉛直方向からレーザー光を照射しており、照射部は熱膨張が周囲材料から制限されることで隆起し、照射面に微小な凸型レンズが作製される。実験には波長 2940nm の Er:YAG レーザを用い、焦点距離100mmの集光レンズを用いて集光している。加工材料を移動させて照射表面とレーザー光焦点位置との

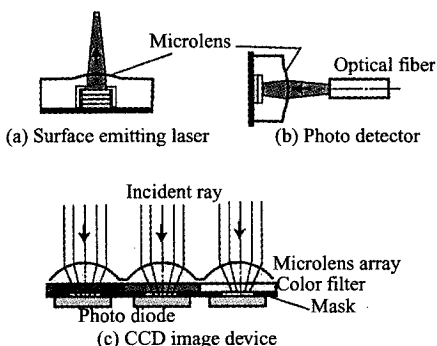


Fig.1 Monolithic opto-electronic devices integrated with microlenses

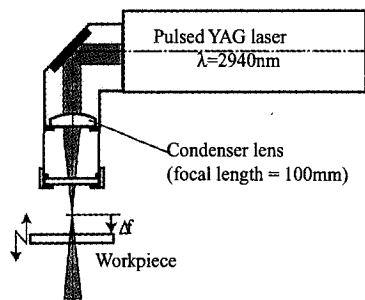


Fig.2 Experimental set-up for fabrication of plastic microlens

Table 1 Experimental conditions in fabrication of plastic microlens

| Laser            |                        | Er:YAG  |
|------------------|------------------------|---------|
| Wave length      | $\lambda$ [nm]         | 2940    |
| Spot diameter    | $2a$ [ $\mu\text{m}$ ] | 200     |
| (at focal point) |                        |         |
| Energy           | $E$ [mJ/pulse]         | 19 - 42 |
| Pulse duration   | $\tau$ [ms]            | 0.2     |
| Frequency        | $f$ [Hz]               | 2 - 20  |
| Number of pulses | $N$                    | 480     |

\* 原稿受付 平成15年2月17日  
 \*\* 正会員 金沢大学工学部 (金沢市小立野2-40-20)  
 \*\*\* 学生員 金沢大学大学院 (金沢市小立野2-40-20)  
 † 金沢大学大学院 (金沢市小立野2-40-20)

距離  $\Delta f$  を調整しており、図示した方向に  $\Delta f$  を定義し、焦点が材料内部 5mm にある場合を  $\Delta f = -5\text{mm}$  と表記する。マイクロレンズ作製実験においては、パルス周波数  $f$ 、レーザ出力  $E$  および  $\Delta f$  を変化させ、加工条件がレンズ作製に及ぼす影響について調べる。

図 3 は、焦点から 11.3mm の位置におけるエネルギー分布を測定した結果<sup>4)</sup>であり、中心部の高いガウス分布と近似できる。

$$p(r) = (P/\pi a^2) \exp(-r^2/a^2) \quad (1)$$

式(1)を用いてレーザスポット径を定義すると、測定結果から焦点位置におけるスポット半径は  $a=100\mu\text{m}$  である。

図 4(a) に示すように、試料表面で反射させたレーザ光を赤外線検出素子 PbSe で検出して、パルス幅  $\tau$  を調べた。PbSe 素子(浜松ホトニクス, P791-02) は、反応速度  $1 \sim 3\mu\text{s}$  と十分に速く、積分球は Er:YAG レーザ光に対して 97.1% と高い反射率を有する <sup>63</sup>Cu を用いて作製し、反射光を素子に導いている。図 4(b) に示す測定波形から半値幅を読み取ると、 $\tau \approx 0.2\text{ms}$  であった。

加工材料には、可視光透過率 92%、屈折率 1.49 を有するアクリル樹脂(メタクリル酸メチル/アクリル酸エステル共重合体、厚さ:10mm) を選択し、上方鉛直方向よりレーザ光を照射した。材料物性値を表 2 に示す。

波長  $2.5 \sim 25\mu\text{m}$  の範囲にわたって加工材料の赤外線透過率を測定した結果を図 5 に示す。測定に用いた試料は厚さ 0.44mm であり、Er:YAG レーザの波長 2940nm における透過率は約 27% であった。試料厚さが 0.95mm と大きい場合には、透過率は 13%

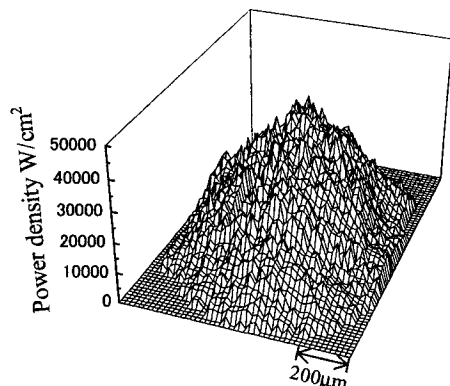
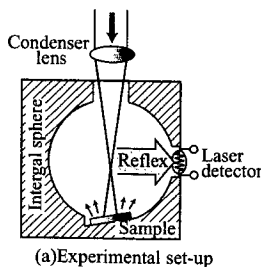
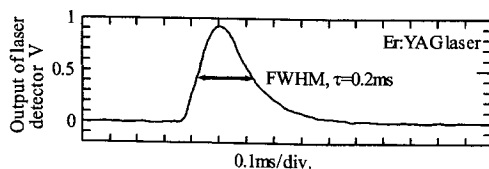


Fig.3 Energy distribution of laser beam (defocus=11.3mm, P=160W)



(a) Experimental set-up



(b) Output of laser detector

Fig.4 Measurement of laser pulse width

に低下しており、次式 Lambert-Beer の法則<sup>6)</sup>によって材料内での吸収係数は、 $\beta=1.43\text{mm}^{-1}$  と得られる。

$$p_z = p \exp(-\beta z) \quad (2)$$

式(2)にしたがって、材料内でのレーザエネルギーの減衰特性を計算した結果を図 6 に示す。照射面から入射したレーザ光は、深さ 0.5mm においても約 50% のエネルギーが透過しており、2mm において 10% 以下となる。したがってレーザ光照射による熱変形は、加工材料の表層から内部にわたって発生するといえる。

### 3. マイクロレンズアレイの特性

#### 3.1 レンズ形状

前章で述べた実験方法で作製したマイクロレンズの例を図 7 に示す。加工材料を走査することでレンズを 0.5mm 間隔で格子状に配列したマイクロレンズアレイを作製しており、上方鉛直方向から照明光を照射し、 $45^\circ$  方向から観察を行った。作製されたレンズの表面にはリング状の照明光が反射しており、レンズ表面が滑らかであることがわかる。

作製したマイクロレンズのひとつについて、触針式 3 次元あらし測定機(触針  $R=2\mu\text{m}$ 、分解能 16nm、走査範囲  $0.5 \times 0.5\text{mm}$ ) によって表面形状を測定した結果を図 8 に示す。俯瞰図(a)から、隣接するレンズによる影響を受けることなく、対称性に優れたレンズが作製されていることがわかる。

図 8(b) に示すレンズ断面形状から、レンズ表面のあらしが十分に小さいことがわかる。また同図から、レンズ直径  $D$  および

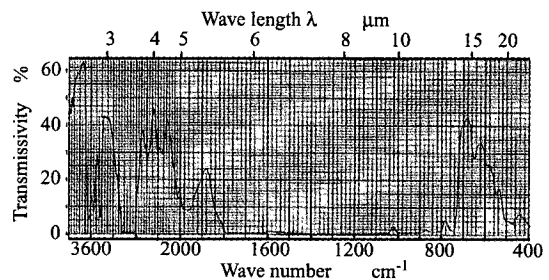


Fig.5 Transmissivity of work material (thickness : 0.44mm)

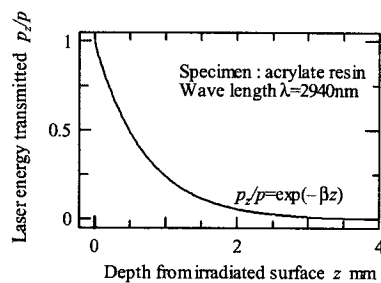


Fig.6 Laser energy distribution in-depth

Table 2 Properties of work material

|  |   |
|--|---|
| Transmissivity for visible light (JIS R3106, $\tau=3\text{mm}$ ) | 92%   |
| Refractive index (JIS K7105)                                     | 1.49  |
| Pulling strength (JIS K7113)                                     | 74MPa   |
| Bending strength (JIS K7203)                                     | 120MPa  |
| Deflection temperature under load (JIS K7207, A)                 | 90 °C   |
| Expansion coefficient (JIS K7197)                                | $7 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ |

サグ (レンズ高さ)  $S$  を評価できる. 図示した例では, 直径  $D$  = 約  $400\mu\text{m}$ , サグ  $S$  = 約  $50\mu\text{m}$  である. 次章においては,  $D$ ,  $S$  を評価項目として加工条件とレンズ形状の関係について論ずる.

### 3.2 集光特性

レンズ表面を球面と仮定し, 図8(c)のように曲率が一致する球面の半径  $R$  を求めると,  $R$  の値は約  $260\mu\text{m}$  である. このとき, 近似球面とレンズ表面がよく一致する範囲は, レンズ中心部の  $230\mu\text{m}$  であり, これを有効径  $D_e$  と定義する.

レンズ材質の屈折率を  $n$  で表せば, 球面レンズの焦点距離  $F$  ならびに  $F$  値  $F\#$  は, 次式によって求められる<sup>7)</sup>.

$$F = R / (n - 1) \tag{3}$$

$$F\# = F / D_e \tag{4}$$

熱変形による密度変化の影響については小さいと仮定し, 表2から常温時の屈折率  $n=1.49$ , 図8(c)より  $R=260\mu\text{m}$  と代入すれば,  $F=530\mu\text{m}$ ,  $F\#=2.31$  と得られ, 実用的なレンズが作製可能であるといえる.

可視光線の集光特性を調べるため, He-Ne レーザ光 (波長:  $\lambda=633\text{nm}$ ) を入射して観察を行った. 図9(a)に示すように, 集光していないHe-Neレーザ光を平面側から入射し, 凸面から射出した光をスクリーンに投影して顕微鏡にて観察した. 図9(b)に示した焦点位置における観察例から, 熱変形によって作製されたレンズが可視光を集光可能であることがわかる.

### 3.3 硬度

前述のように, Er:YAG レーザ光はアクリル樹脂内部にまで透過する. そこで, 微小硬度計によってレンズ内部の材料硬度を測定して, 熱変形の影響について調べた. 作製したレンズの断面にて, 膨張部の表面から内部にわたって硬度を測定した結果を図10に示す. 図から, 膨張部においても硬度の分布は一定で, 体積膨張による明確な硬度低下はみられなかった.

## 4. 加工条件の検討

### 4.1 レーザエネルギーの影響

1パルスあたりのレーザーエネルギー  $E$  を変化させてマイクロ

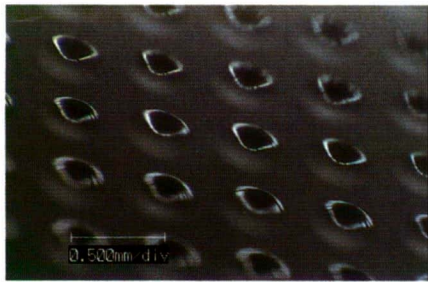
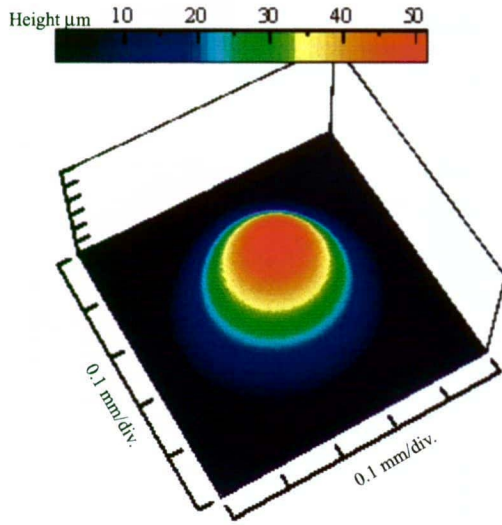
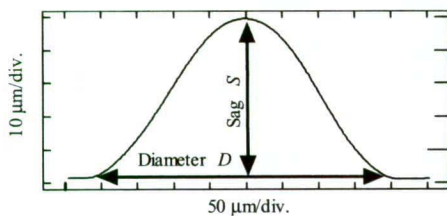


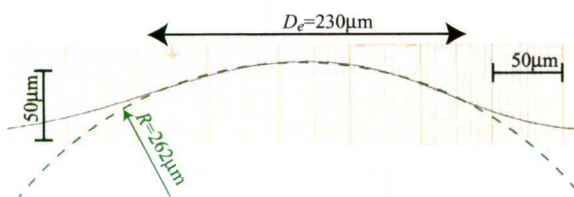
Fig.7 Photograph of microlens array developed (0.5 mm pitch)



(a) 3D-graphic of microlens developed

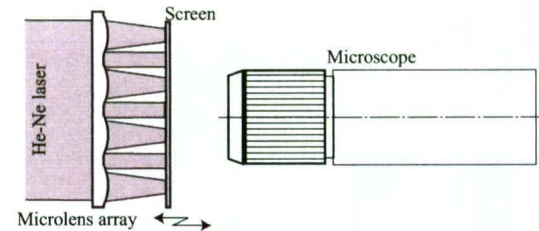


(b) Surface profile of microlens

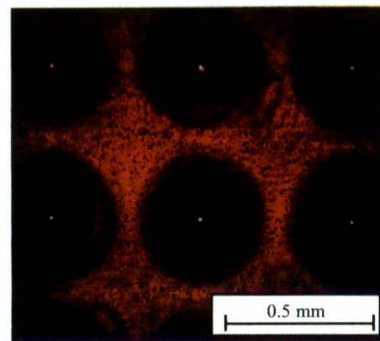


(c) Curvature of microlens

Fig.8 Shape of microlens developed



(a) Schematic illustration of optical observation



(b) Photograph of focused He-Ne laser beam with microlens array

Fig.9 Light focusing experiment with microlens array developed

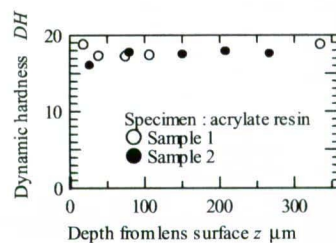


Fig.10 Hardness distribution below microlens developed

レンズを作製し、レンズ形状への影響について調べた。照射パルス数  $N=480$ 、パルス周波数  $f=4\text{Hz}$  は一定とし、レーザーの焦点が加工物裏面に位置するよう  $\Delta f=-10\text{mm}$  と設定した。マイクロレンズの直径  $D$ 、サグ  $S$  を測定した結果を図 11 に示す。  $E$  が上昇して照射部温度が高くなるにともない、  $D$  は直線的に増大している。  $S$  も同様の傾向が見られるが、  $E=35\text{mJ/pulse}$  付近で急激に  $S$  が増大していることがわかる。

図 12 (a) は、このときのレンズ表面を斜め上方  $45^\circ$  から撮影した例である。  $E$  が小さい場合は良好なレンズが形成されている。しかし、  $S$  が急激に増大する条件では、レンズ内部の隆起部分に空隙が生じてしまう。図 12 (b) は、同条件下でのレンズ表面形状を測定した結果である。  $E$  の上昇にともなって、  $D$ 、  $S$  ともに大きくなっているが、内部に空隙が生じている場合にはレンズ形状の対称性が損なわれてしまうことがわかる。これらの結果から、マイクロレンズを作製する際のレーザーエネルギー  $E$  は  $35\text{mJ/pulse}$  以下と設定し、内部空隙を生じない条件で加工

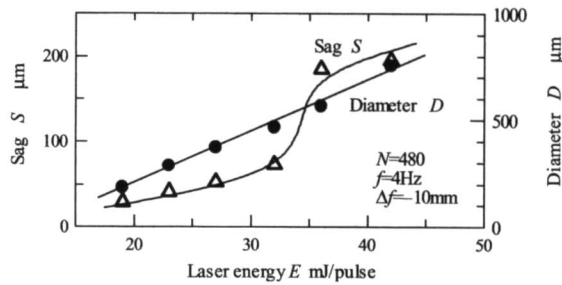
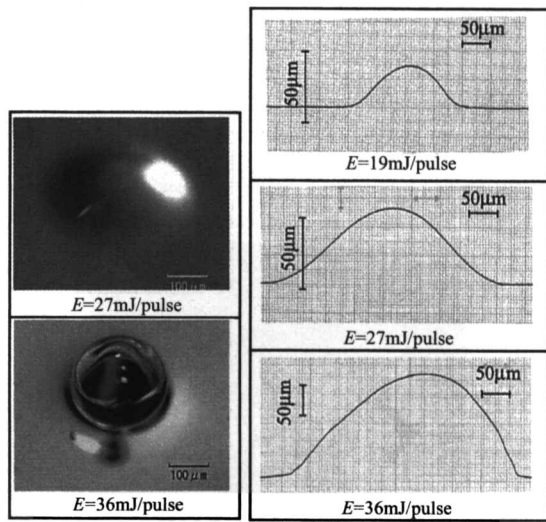


Fig.11 Relation between laser energy and dimension of microlens



(a) Photograph (b) Surface profile  
Fig.12 Influence of laser energy on shape of microlens ( $N=480, f=4\text{Hz}, \Delta f=-10\text{mm}$ )

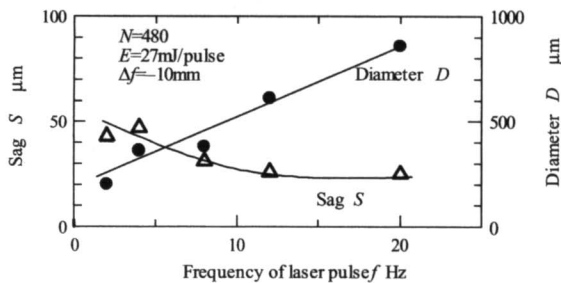


Fig.13 Relation between average power and dimension of microlens

すべきである。

#### 4.2 パルス周波数の影響

$N$ 、  $E$ 、  $\Delta f$  を一定とし、レーザーパルス周波数  $f$  を変化させることで、平均照射エネルギーを変化させ、作製されるマイクロレンズの形状について調べた。レンズの直径  $D$ 、サグ  $S$  の測定結果を図 13 に示す。

図 13 から、  $f$  が高くなるほど、  $D$  は増大するが、  $S$  はわずかに小さくなる傾向にある。これはレーザーパルスの照射間隔が短くなることで熱が周囲に拡散して変形部が広くなり、高さ方向への変形量が小さくなるためと考えられる。しかしながら、図 14 に示すレンズ表面のプロフィールから、いずれのパルス周波数においてもレンズの対称性は損なわれていない。また観察から、いずれのレンズにも内部空隙は生じておらず、有効なレンズが作製できたと考えられる。

そこで、前章と同様にレンズの焦点距離  $F$  と  $F$  値  $F\#$  を求めた結果を図 15 に示す。  $f$  が高くなるほど、レンズ表面の曲率半径  $R$  は大きくなり  $F$  は増大して、  $f=20\text{Hz}$  では  $F=7.5\text{mm}$  となっている。一方、  $f$  が上昇すると、  $F$  とともに  $F\#$  が大きくなっており、レンズは暗くなってしまった。したがって、長焦点レンズを作製する場合には、レンズ直径を増大する改良が必要である。

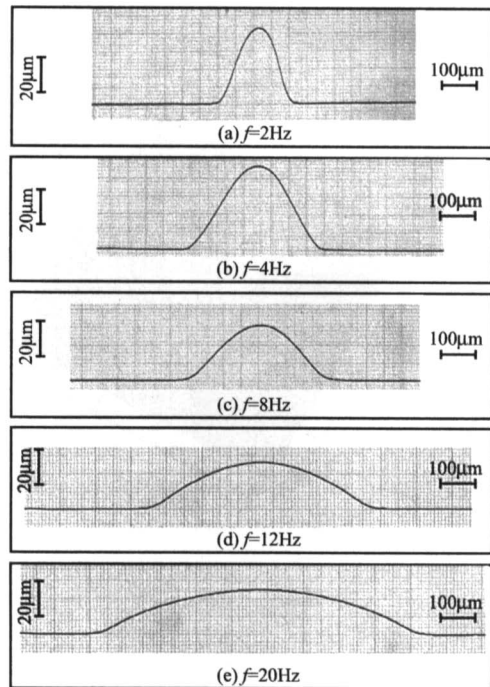


Fig.14 Influence of pulse frequency on shape of microlens ( $N=480, E=27\text{mJ/pulse}, \Delta f=-10\text{mm}$ )

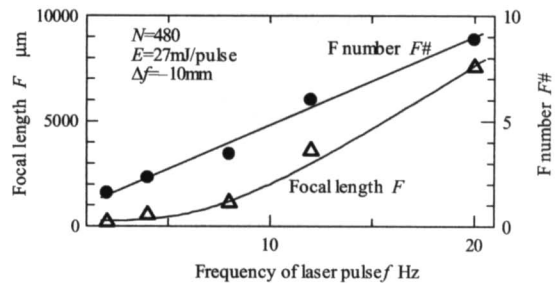


Fig.15 Relation between defocus length and shape of microlens

### 4.3 レーザ光焦点位置の影響

加工材料表面とレーザ光焦点位置との距離 $\Delta f$ を変化させて作製したマイクロレンズ形状について調べた。レンズ直径 $D$ 、サグ $S$ の測定結果を図16に、レンズ表面のプロフィールおよび観察写真を図17に示す。

図16から、 $\Delta f$ を変化させてもマイクロレンズの直径 $D$ は大きく変動していない。しかし、レーザ焦点が照射面に近づき、照射部のフルエンスが上昇するにしたがって、サグ $S$ は増大することがわかる。

図17(b)から、レーザ焦点が加工材料内部から照射表面に近づくと、レンズの内部に空隙が生じてレンズの対称性も失われている。さらに、 $\Delta f > 0$ と焦点が材料外部へ移動すると、レンズ表面の形状に凹部が見られ、 $\Delta f = +14\text{mm}$ ではレンズ周囲部が陥没してしまう。

## 5. 結 言

本論文では、アクリル樹脂表面にEr:YAGレーザ光をパルス照射することで、マイクロレンズおよびマイクロレンズアレイを作製する方法を開発した。アクリル樹脂のレーザ光吸収特性について調べ、作製したマイクロレンズアレイの集光性を確認した。また、マイクロレンズ作製法の基本的条件を明らかにするため、作製されるマイクロレンズ形状と加工条件との関係について調べた。本論文で得られた結果を以下に要約する。

- (1) レンズ製作に用いたアクリル樹脂のEr:YAGレーザに対する吸収係数は $1.43\text{mm}^{-1}$ であり、表層から内部にわたって加熱されることで十分な変形を得られ、直径数百 $\mu\text{m}$ 、サグ数十 $\mu\text{m}$ のプラスチック・マイクロレンズを作製することが可能である。

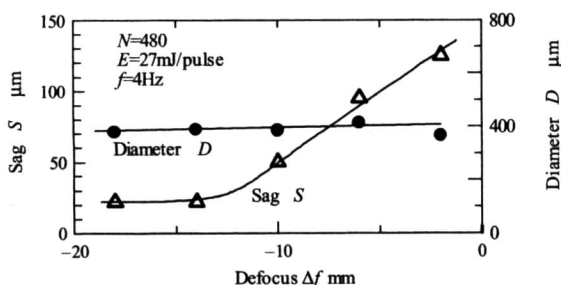
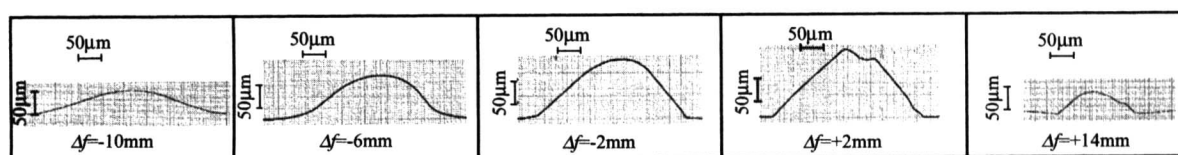
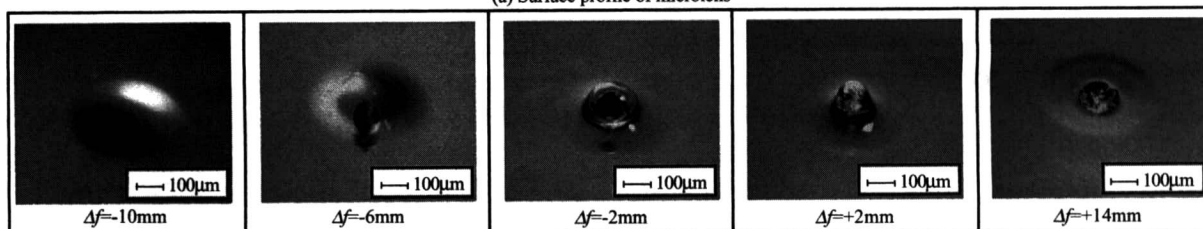


Fig.16 Relation between defocus length and shape of microlens



(a) Surface profile of microlens



(b) Photograph of microlens

Fig.17 Influence of defocus length on shape of microlens ( $N=480$ ,  $E=27\text{mJ/pulse}$ ,  $f=4\text{Hz}$ )

- (2) 作製されたマイクロレンズアレイは、滑らかな表面を持ち、可視光を集光することが可能であった。目的とした光通信デバイスへの一体化に十分な性能を備えているといえる。
- (3) 照射するEr:YAGレーザの1パルスあたりのエネルギーが上昇すると、マイクロレンズの直径は直線的に増大する。サグも同様の傾向を示すが、内部に空隙欠陥が生ずるとともに急激な増大を示す。
- (4) レーザパルス周波数が高くなると、照射部周囲への熱拡散が顕著となり、マイクロレンズの直径は大きくなり、サグは小さくなる。このとき、レンズ形状の対称性は失われず、レンズの焦点距離は増大した。
- (5) 照射レーザ光の焦点位置は加工材料内部から照射表面に近づけると、表層におけるフルエンスが高くなり、マイクロレンズ内部に空隙欠陥が生じ、さらにレンズ表面の凹部や周囲の陥没などの欠陥が生じた。

## 謝 辞

本研究で行った測定に協力していただいた石川県工業試験場 舟田義則氏、古本達明氏に深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) 石井雄三, 小池真司, 新井芳光, 安東泰博: マイクロレンズアレイとその応用, 光技術コンタクト, **38**, 5(2000)305.
- 2) Z. D. Popovic, R. A. Sprague, G. A. Connell: Technique for Monolithic Fabrication of Microlens Arrays, Applied Optics, **27**, 7 (1988)1281.
- 3) S. Moon, S. Kang, J. Bu: Fabrication of Polymeric Microlens of Hemispherical Shape Using Micromolding, Optical Engineering, **41**, 9 (2002)2267.
- 4) 上田隆司, 山田啓司, 篠崎道, 細川晃: YAGレーザによる歯科治療に関する研究(第2報), 精密工学会誌, **68**, 12 (2002)1580.
- 5) Edward W. Washburn et al.: Int. Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology Volume V, McGraw-Hill(1929)254.
- 6) レーザー学会編: レーザープロセッシング, 日経技術図書(1990) 21.
- 7) 谷田員豊彦: 応用光学—光計測入門—, 丸善(1988) 17, 29.