

屈折率分布測定による透明樹脂製品の品質評価

光科 中野雅晴 太田幸宏

Quality evaluation for transparent plastics using the measurement of refractive index distribution

Masaharu NAKANO and Yukihiro OHTA

We have developed a quantitative evaluation system to measure refractive index distribution for transparent optical components of lighting. The refractive index was estimated from the wavefront of transmitted light through an object. Stitching measurement, in which all divided wavefronts by a sensor area were connected after measurement, made it possible to measure with high precision over a large area and large amount of phase distortion.

In this study, we evaluated the measurement precision of the developed system. In the stitching measurement, increased measuring point made precision better, but scanning process deteriorated precision because the temperature of the wavefront sensor changed during increased measuring time. The deterioration was improved by removing the wavefront component appeared the effect of temperature fluctuation from measured data. Wavefront measurement with an accuracy of 6nm was achieved. The refractive index distribution of a thick plastic lens was measured using the developed system. In this paper, we also introduce an application to the quality evaluation of laser welding for transparent plastics.

Keywords : refractive index distribution, wavefront measurement, stitching measurement, transparent plastics, plastic welding

キーワード：屈折率分布測定、波面計測、スティッチング計測、透明樹脂、樹脂溶着

1 はじめに

LED光源は熱線が少ないことから、ガラスに代わり樹脂が照明用光学部品に使われ始めている。樹脂は、軽量、安価で、デザイン自由度が高い特長を有する。しかし、成形加工時の熱変形が大きく、設計値どおりに製造することが難しいことが課題となっている。このため、部品の形状、内部で発生するひずみや屈折率分布を評価する技術が求められている。特に、屈折率分布測定は、製造条件の最適化や光学性能評価に必要となる。

本研究では、測定対象を透過した光の波面変化量を測定することで屈折率分布を定量測定するシステムを開発した。波面とは、電磁波である光の位相が同じ面である。また、測定領域を分割計測して、これらをつなぎ合わせるスティッチング計測を適用することにより、高精度な大面積測定と、屈折率分布の大きな乱れの測定を可能にした。本報告では、スティッチング計測が測定精度に与える影響を検討して、システムの精度を評価した結果と、厚肉樹脂レンズの屈折率分布を測定した事例について示す。

さらに、開発したシステムを透明樹脂のレーザー溶着の品質評価に応用した事例について報告する。樹脂部品の接合界面をレーザーにより溶融するレーザー樹脂溶着では、溶着強度、隙間や異物の有無といった溶着状態を検査する方法が求められている。これまでに、溶着中の温度計測により溶着状態を評価する方法が提案されている¹⁾。温度計測では、溶着中に物体が放出する赤外線強度を放射温度計で測定する。有色樹脂と透明樹脂といった吸収の分光特性が異なる樹脂間の溶着では、有色樹脂では吸収し、透明樹脂では透過する波長の赤外線を選択して測定することで、溶着界面での温度を推定できる。しかし、吸収の分光特性が同様な透明樹脂同士の溶着では、このような方法を用いて直接溶着界面の温度を測定することは困難である。そこで、レーザー溶着時に発生した溶着部の屈折率変化を測定することにより、溶着状態を評価する方法について検討した。

透明樹脂同士のレーザー溶着には、光吸収剤を接合部に塗布して界面のみを加熱して溶着する方法と、樹脂が吸収する波長のレーザーを用いて、光照射した

領域全体を加熱して溶着する方法がある²⁾。これまでに、光吸収剤による溶着方法について、溶着部の屈折率分布を測定することにより、溶着状態の均質性や溶着強度を非接触で評価できることを確認している³⁾。本報告では、透明樹脂に適度な吸収があるレーザーを用いた溶着における、溶着状態の評価について報告する。

2 方法

2.1 屈折率分布計測システム

図1に、システムの光学系を示す。測定対象を光が透過すると、内部の屈折率分布に比例して波面が変化する。よって、測定対象を透過する前後での波面変化量を測定すれば、屈折率分布を推定できる。波面の測定には、シャックハルトマン波面センサを用いた⁴⁾。また、レンズのように、空気との界面で光が屈折する測定対象では、その形状によっても波面が変化する。そこで、レンズの評価では、レンズと屈折率が同じマッチング液に浸して測定することで、形状による波面変化を抑制した。ステッチング計測では、測定対象をxy方向に走査して、測定領域を波面センサの受光部面積(6.9mm角)で分割計測した。

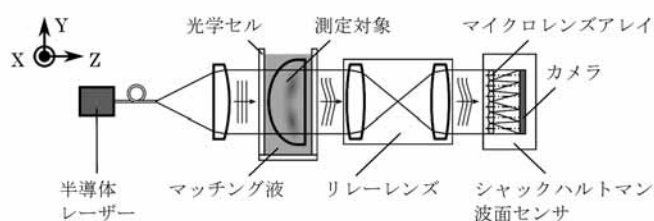


図1 屈折率分布計測システムの光学系

計測用光源として、波長444nm、光出力1mWのシングルモードファイバ出力の半導体レーザーを用いた。シャックハルトマン波面センサのxy面における空間分解能は0.15mmである。最大有効測定領域は6.9mm角であり、縦46×横46個のマイクロレンズで構成されている。

2.2 レーザー樹脂溶着の溶着状態評価方法

透明樹脂同士を溶着した試験片の作製方法について説明する。試験片は、図2に示す樹脂平板を重ね合わせ溶着ができるレーザー加工システムで作製した。平板間の隙間が溶着状態に影響するため、エアシリンダーで圧力を加えることで、重ねた平板同士の密着性を上げた。レーザーは平行光でスリット(2mm×22mm)を通し、図3のように重ね合わせた部分に照射した。透明なポリカーボネート平板(25mm×50mm、板厚3mm)を、適度な光吸収(吸収率23%⁵⁾)がある

波長1.94μmのファイバーレーザーTLR-120(IPG Photonics社製)で溶着した。

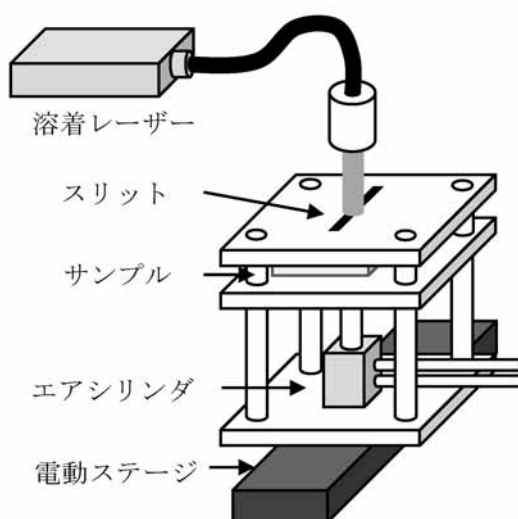


図2 レーザー加工システムの概略図

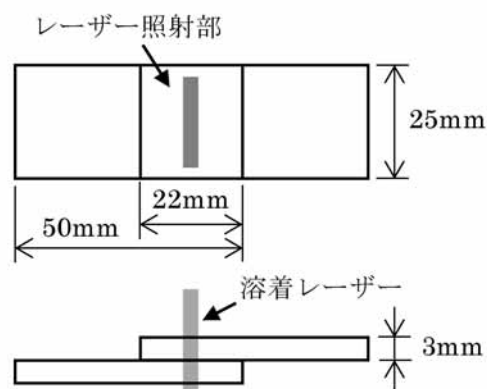


図3 作製した溶着試験片（ポリカーボネート）

作製した試験片に対して、透過光波面計測と引張試験を行い両者の関係性を評価した。はじめに、図1に示したシステムで溶着部の透過光波面を測定した。測定対象は平板であるため形状による波面変化量が小さいことから、マッチング液は使わなかった。次に、オートグラフAG-50kNIS(株島津製作所製)にて引張速度1mm/minで引張試験を行い、破断する試験力を測定した。引張試験では、図4に示すような、重ね合わせた樹脂の界面に対して平行方向に力が加わる治具を用いた。ネジの締結力を利用して、引張試験時の垂直方向に対する変形を抑制した。また、引張試験後に破断面をデジタルマイクロスコープVHX-1000(株キーエンス製)で観察して溶着面積を測定した。溶着強度は、測定した破断力を溶着面積で除算して求めた。

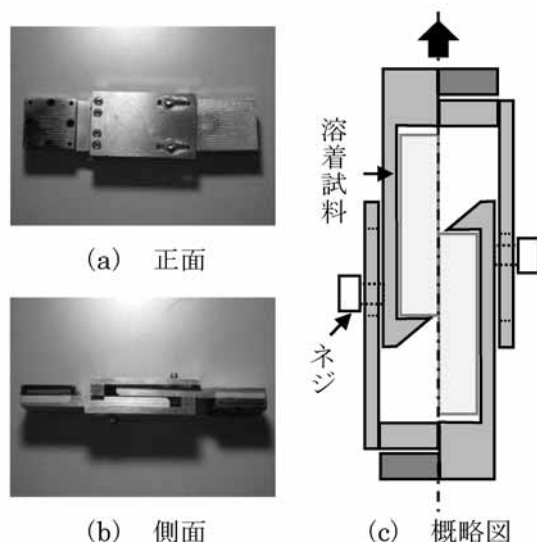


図4 製作した引張試験用治具

3 結果および考察

3.1 システムの精度評価

波面センサより大きな測定対象の評価は、センサ面積に波面を縮小して一括計測する方法でも可能である。しかし、ステッチング計測の方が、測定点数が増加するため、測定精度を向上させることができる。そこで、図5に示すように、測定点数と波面の測定精度との関係を数値解析により評価した。評価した波面は、一般的なレンズで評価される3次収差までの波面歪みを含むと仮定した。波面センサでは、波面の傾き量を検出するので、直接波面を測定することができない。傾き量から波面を復元する演算法として、Southwellが提案する方法（以下、Southwell法）⁶⁾と、Zernike多項式近似法（以下、Zernike法）を用いた。Southwell法では、局所的に変化する波面を復元できる点で有利であるが、演算精度が劣るという特徴がある。一方、Zernike法は、波面をZernike多項式で近似するので、多項式で表現できない波面の復元は苦手だが、レンズ収差など多項式で表現できる波面を復元する場合は演算精度が高い。測定精度は、波面センサを用いて測定点数で分割計測したことを想定して復元した波面と、分割前の評価

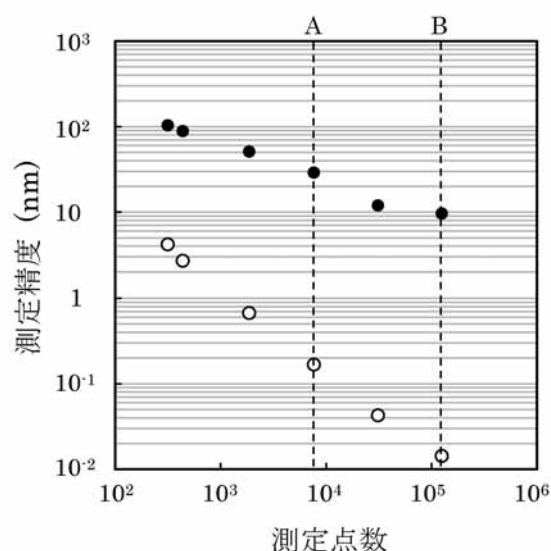


図5 波面計測における測定点数と測定精度との関係

●：Southwell法、○：Zernike法。Aは一括計測の測定点数7,660点、Bはステッチング計測の測定点数125,028点である。

波面との差分における標準偏差とした。図5から確認できるように、測定点数が増加すると測定精度が改善する。レンズの直径を60mmと仮定すると、測定点数は、1/6に縮小した波面を波面センサで一括計測した場合にはAの7,660点となり、等倍でステッチング計測した場合にはBの125,028点となる。AとBの測定精度を比較すると、ステッチング計測の方が、Southwell法では3倍、Zernike法では12倍精度が高い。

一方、ステッチング計測では測定対象を走査する工程が測定精度を悪化させる。その要因は、測定中の温度変化と、走査機構の位置決め誤差にある。我々のシステムでは、温度変化により波面センサ内部の光学部品が僅かに位置ずれすることが、測定精度を悪化させる主要因であった。この対策として、測定波面から温度変化の影響が現れる波面成分を抽出して取り除いた。これにより、測定精度と再現性を改善させ、5 nmのステッチング計測精度を実現した⁷⁾。

以上の検討結果から見積もったシステムの測定精度を表1に示す。波面センサの精度は、干渉計との測

表1 屈折率分布計測システムの測定精度

総合測定精度 (nm)	ステッチング計測		一括計測	
	15	6	30	1
位相復元演算 (nm)	Southwell 法 9.65	Zernike 法 0.01	Southwell 法 28.99	Zernike 法 0.17
ステッチング (nm)	5		—	
波面センサ (nm)	0.6		0.6	

定比較により求めた値である。レンズ収差の評価であればZernike法を適用できるので、スティッチング計測を用いたシステムの総合測定精度は6 nmとなる。これは、厚さ3 mm以上のレンズであれば 10^{-4} の屈折率差を測定できることに相当する。また、局所的な乱れがある波面を測定する場合に用いるSouthwell法では、一括計測に比べてスティッチング計測の方が15nm高い精度である。

3.2 厚肉樹脂レンズの屈折率分布測定

開発したシステムを用いて、厚肉樹脂レンズの屈折率分布を測定した。レンズ形状による屈折が大きいため、マッチング液に浸して透過光波面を測定した。理論上はマッチング液の温度を25℃に制御できれば、レンズとの屈折率差をなくすることができる。しかし、実際に測定したときのマッチング液温度は26.3℃であった。このため、レンズ形状による波面変化成分が、測定した透過光波面に含まれている。そこで、レンズ形状を測定⁸⁾することにより、26.3℃においてレンズ形状で発生した波面変化量を算出して、測定した波面から取り除いた。

図6に、波面計測と形状計測から推定した厚肉樹脂レンズの屈折率分布を示す。屈折率は、レンズ中心部が低く、外周部に向けて増加している。これは、成形加工における冷却速度の違いによって発生した密度分布むらに起因すると考える。

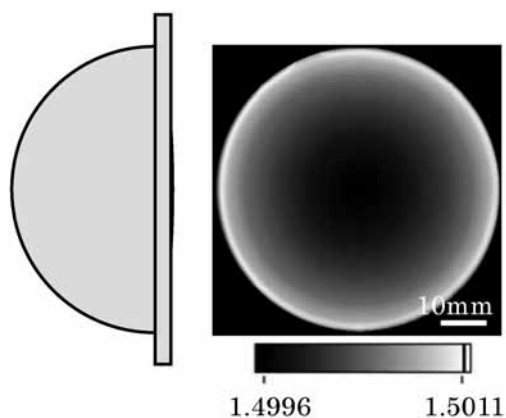


図6 厚肉樹脂レンズの屈折率分布

3.3 波面計測と引張試験による溶着状態評価

図7に、溶着レーザーエネルギー（＝レーザー光強度／溶着速度）に対する溶着強度を評価した結果を示す。溶着強度が突出して大きい点線丸で囲んだ2点は、引張試験の不具合に起因すると推察する。引張試験で用いた治具において、引張方向に対して垂直方向の動きを制限しているネジの締結力が強いと、

治具同士が干渉して破断力が大きくなることがあった。

一般に、溶着状態として3つの領域に分割することができる⁹⁾。1つ目は、入熱の増加に伴い、熔融面積が増加することで溶着強度が徐々に増加していく領域、2つ目は、レーザーを照射した面全体が熔融することで安定的な溶着強度が得られる領域、3つ目は、入熱が過大となり樹脂の分解、発泡などの熱劣化が始まることで溶着強度が低下していく領域である。図7も同様に領域分割するならば、レーザーエネルギーが11 J/mmと15 J/mm付近が領域の境界となる。

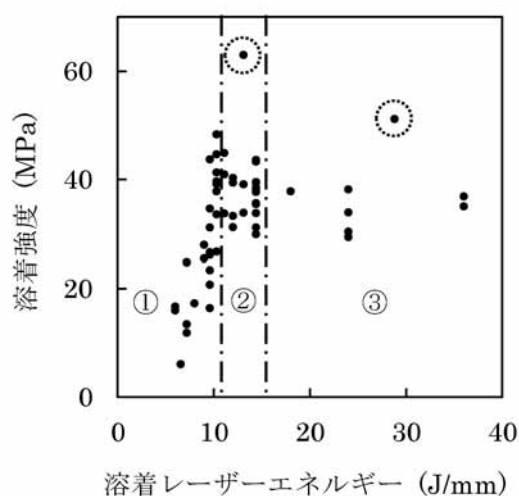


図7 溶着レーザーエネルギーと溶着強度との関係

①は溶着強度が増加する領域、②は安定的な溶着強度が得られる領域、③は入熱が過大となり溶着強度が低下する領域である。

そこで、レーザーエネルギーが7.2、12、18 J/mmの試験片について、溶着部を切断して観察した断面光学像と、透過光波面形状を比較した（図8）。レーザーエネルギー7.2 J/mmでは、光学像において、溶着レーザーを入射した側の樹脂にのみ入熱による変化を確認でき、波面形状はV字型となる。レーザーエネルギー12 J/mmでは、重ね合わせた樹脂界面を越えて楕円状に入熱した様子を光学像で確認でき、波面形状はW字型となる。レーザーエネルギー18 J/mmでは、光学像で表面付近まで入熱による変化を確認でき、波面形状はM字型になる。このことから、波面形状を測定することで3つの溶着状態を判別することが可能となる。

次に、引張試験で破断した試験力と、溶着部を透過した波面変化量との関係について評価した。レーザーエネルギーが増加すると、図8中段に示したように波面形状が複雑化することに着目して、波面形状を周波数解析した。溶着レーザーの走査幅において、波面

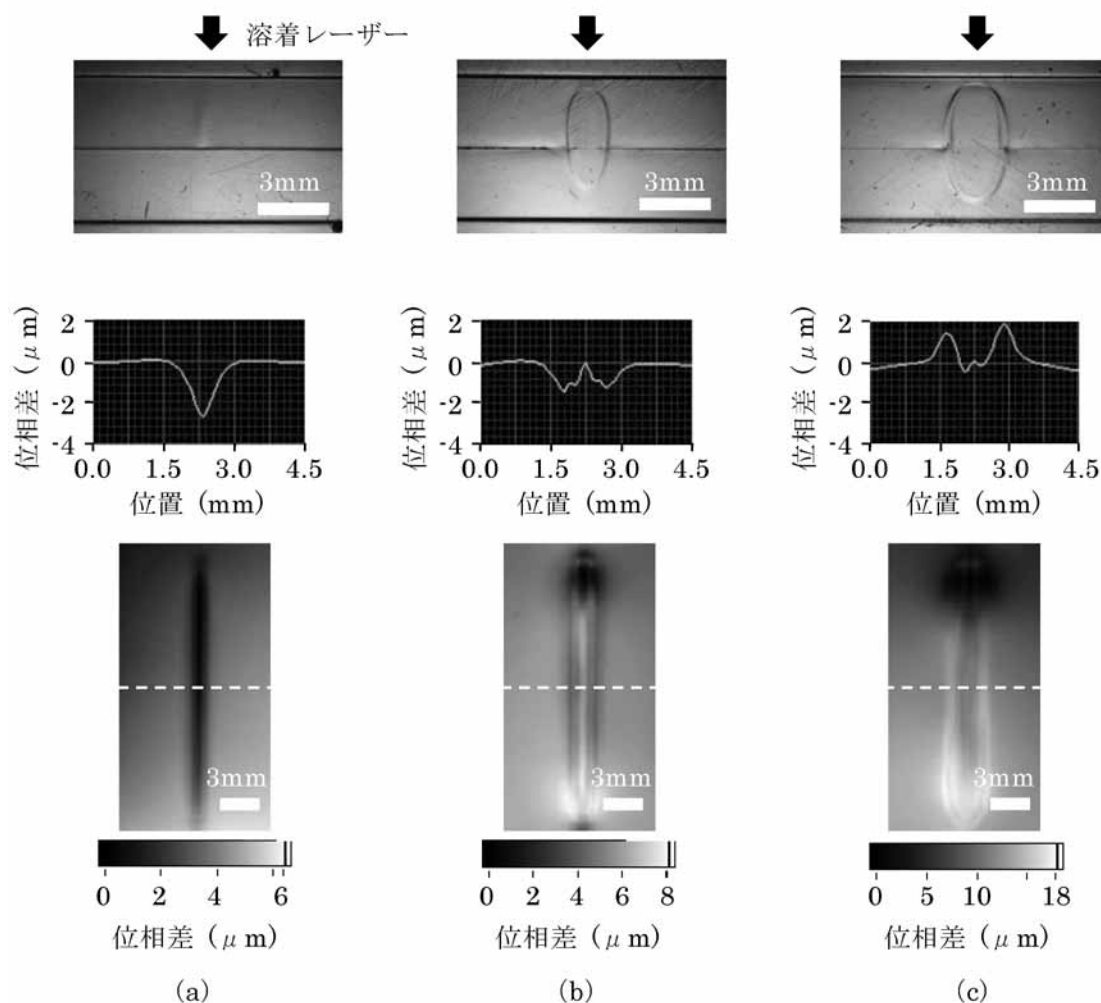


図8 各溶着エネルギーにおける溶着断面光学像（上段）と透過光波面（中段、下段）

波面計測では、溶着レーザーと同じ方向から光を入射させて溶着部を透過したときの波面変化量を測定した（下段）。中段は、下段の点線部における波面形状である。溶着レーザーエネルギーは、(a) 7.2 J/mm、(b) 12 J/mm、(c) 18 J/mmである。

形状をフーリエ変換して求めた周波数帯域を波面変化量とした。図9に示すように、引張試験で破断したときの試験力と波面変化量との間には、スピアマンの順位相関係数 $r_s=0.80$ ($p<0.01$) の高い相関性が認められ、非破壊で破断力を推定できることを確認した。

4 まとめ

測定対象を透過した光の波面変化量を測定することにより、内部の屈折率分布を定量測定するシステムを開発した。

- (1) スティック計測を用いることにより、高精度な大面積測定と、大きな屈折率差の測定を可能にした。測定点数の増加による測定精度の改善と、走査工程における温度変化の影響を抑制することにより、6 nmの波面測定精度を実現した。

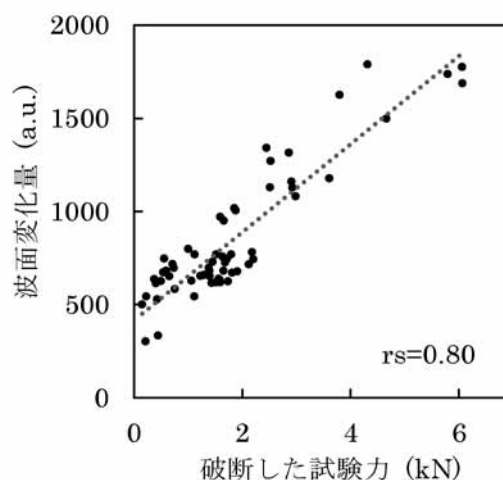


図9 波面計測による溶着部の破断力推定

r_s は、スピアマンの順位相関係数。

(2) 波面計測と形状計測を組み合わせて、厚肉樹脂レンズ内部の屈折率分布を評価した。

(3) 開発したシステムを、レーザー樹脂溶着の品質検査に応用した。溶着状態の均質性や、溶着強度を非破壊で推定できることを確認した。

このような屈折率分布の測定は、製造条件の最適化や光学特性評価に利用できる。また、開発したシステムは、光の位相変化量を測定できるので、微小な厚みむら、内部の欠陥や密度むらなどの目視では確認が困難な透明体の品質評価に有効である。

参考文献

- 1) 松本聡：プラスチックのレーザー溶着におけるインプロセスモニタリング，「高出力レーザーによる加工技術とインプロセスモニタリング・加工状態の評価」，第1版（㈱技術情報協会，東京），高薄一弘 発行，pp.323-338（2004）。
- 2) 山下清光：2 μ mレーザーによる透明プラスチックの溶着事例．静岡県工業技術研究所研究報告，第10号、69-71（2017）。
- 3) 中野雅晴 他：波面計測を用いた透明樹脂溶着の品質評価．静岡県工業技術研究所研究報告，第10号，67-68（2017）。
- 4) 中野雅晴 他：シャックハルトマン波面センサを用いた透明体の均質性評価．静岡県工業技術研究所研究報告，第8号，57-62（2016）。
- 5) 山下清光：透明プラスチックの光吸収率の測定．静岡県工業技術研究所研究報告，第8号、73-74（2016）。
- 6) Southwell W. H.: Wave-front estimation from wave-front slope measurements. Journal of the Optical Society of America, 70(8), 998-1006 (1980).
- 7) 中野雅晴：シャックハルトマンセンサを用いたステッチング波面計測の精度評価．静岡県工業技術研究所研究報告，第9号，89-90（2017）。
- 8) 船井孝：光学部品の高精度形状測定に向けた接触式三次元測定機の測定子径補正手法の検討．静岡県工業技術研究所研究報告，第6号，29-30（2014）。
- 9) 三瓶和久：レーザーによる樹脂の溶着技術．レーザー加工学会誌，14(4)，211-215（2007）。