



シュリンクフィッタを用いた高精度光学系による レーザ微細加工装置の開発*

野中 敏** 新田 勇*** 菅野明宏† 西村方壺†† 芳賀亮介†† 土田恵一†††

Study of a Laser Material Processing System with a Fine Optical Setup using a Shrink Fitter

Satoshi NONAKA, Isami NITTA, Akihiro KANNO, Masakazu NISHIMURA, Ryosuke HAGA and Keiichi TUCHIDA

In order to realize fine processing with a high precision optical system, we have developed a laser processing system with galvanometer scanners and optical lenses using a shrink fitter. The shrink fitter prevents the misalignment of the lenses at the elevated temperature. Therefore fine laser spots can be obtained over the quite wider scanning width, even at elevated temperatures. We examined the possibility of application to laser processing of this lens system using the shrink fitter.

Diameters of the lenses used in this study were 160 mm so that the laser spots could be scanned over the width of 100 mm, in both directions of the X-axis and Y-axis. There was large distortion of the laser beam which was inherent to each lenses and can not be removed by mechanical adjustment. So we introduced the formula to correct the beam path using the least square method. Finally, we developed the fine laser processing system using shrink fitter.

Key words: shrink fitter, laser, fine processing, optical system

1. 結 言

従来、レーザ加工は炭酸ガスレーザ、YAGレーザなどによる穴あけ、切断そして溶接など、熱加工による比較的精度を要求されない金属部品等の加工に用いられることが多かった。しかし、高周波Qスイッチの利用、あるいはレンズを含めた光学系の高精度化により、50 μ m以下のスポット径を用いた精細なレーザ加工も行われている。さらにフェムト秒レーザ発振器の出現により、従来問題となっていた加工部の熱影響による品質低下も改善され、より微細かつ高品質な加工を要求する工程へのレーザ利用の試みがなされている。特に微細レーザ加工の応用としては、多層プリント基板の穴あけ、電子実装部品のトリミング（抵抗調整など）のほか、シリコンウエハや化合物ウエハのスクライビング、ダイシングなども実用化され、ウエハの切断品質に関する研究¹⁾や熱応力解析などの研究²⁾もなされている。

これらトリミングやダイシングに用いられるレーザ加工機には、加工物へのレーザ照射位置決め方法がX、Yテーブルによるものと、ガルバノミラーによるものの2つの方式がある。X、Yテーブルを用いた研究³⁾では加工形状精度 $\pm 2\mu$ mを達成しているものの、10mm/sと加工速度は低い。最近のもっとも速い加工機でも50mm/s程度である。一方、ガルバノミラーによるものは加工速度を一桁以上速く設定できる。しかし、この方式では位置決め精度に課題があり、また加工範囲がレンズの大きさなどで制約される。ガルバノミラーを用いた現在もっとも高性能なレーザトリマーの場合、加工範囲80mm \times 80mm、位置精度 $\pm 25\mu$ m、加工速度500mm/sである⁴⁾。さらに大きな面積を加工できるレーザーマ

ーナーの場合では、最大加工範囲170mm \times 170mmを得られるものの、レーザの最少スポット径も0.2mmと大きくなっている⁵⁾。

レーザーダイシングの加工物であるウエハの大きさは、5インチ、8インチと大きくなる一方であり、それに伴いダイサーには広い範囲を速く加工する能力が要求されている。前述のように加工速度においては、ガルバノミラーによるスキャン方式は優位性を持つが、広範囲な面積を微細に加工するためには、収差の少ないレンズ設計を行うとともに、大きなレンズを高精度に加工し、これら構成レンズの光軸調整を厳密に行う必要がある。レンズの光軸調整は熟練を要するうえ、完全な光軸の一致は困難なため、レンズ外周部付近（レーザ走査の端）を通ったレーザ光のビームの品質低下は避けられない。

このことから、今回の報告では、広い面積を微細なビームで、高速かつ高精度に加工を行うことを目的に、レンズの鏡筒への締結にシュリンクフィッタ法を用い、ガルバノ方式と大口径レンズを組み合わせたレーザ加工機を試作した。シュリンクフィッタ法は複数枚のレンズを鏡筒に組み付ける際に、各レンズの光軸を容易に一致させることを可能とする締結法で、高いビーム品質をレンズ全面にわたって得ることができるばかりか、広い温度範囲にわたって光軸のずれを防止することができる⁶⁻⁸⁾。

また、レンズ固有のディストーションと呼ばれる収差を補正式によって改善し、シュリンクフィッタ法と併せ高精度レンズの性能を十分に発揮できる光学系を開発したので報告する。

2. 実験装置および実験方法

試作した装置の外観を図1に示す。装置の天板上にレーザ発振器、ビームエキスパンダー、ガルバノミラーを設置し、天板下に吊り下げのように大口径 θ レンズを設置した。レーザビームは発振器から出た後、ミラーで照射方向を180度曲げられ、ビームエキスパンダーに入る。ここで集光性を上げるためビーム径が拡大され、ガルバノメータ（ガルバノミラー）ユニットに入射する。ガルバノメータユニット内で、レーザビームはミラーによりX、Y方向に走査され、 θ レンズに入射する。 θ レンズを通ったビーム

* 原稿受付 平成17年6月24日

** 正会員 新潟大学大学院生（現、新潟県工業技術総合研究所；新潟市鏡西1-11-1）

*** 正会員 新潟大学（新潟市五十嵐2の町8050）

† 正会員 新潟大学大学院生（現、(株)オブセル新潟研究所；新潟市五十嵐2の町8050）

†† 新潟大学大学院生（新潟市五十嵐2の町8050）

††† 長岡工業高等専門学校（長岡市西片貝町888）

シュリンクフィッタを用いた高精度光学系によるレーザー微細加工装置の開発

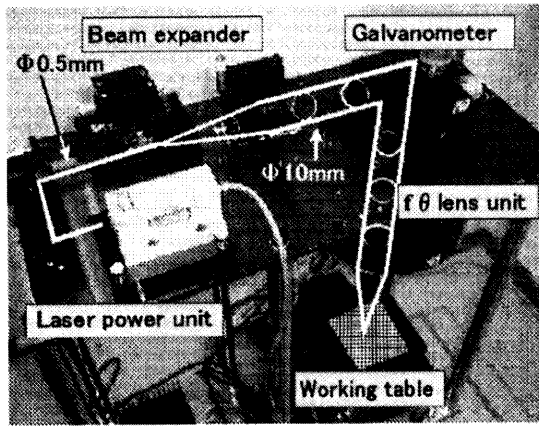


Fig.1 Developed laser processing system

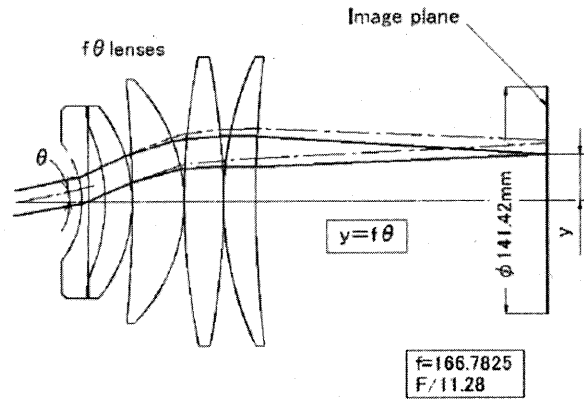


Fig.2 Construction of fθ lenses

Table 1 Specification of laser

Power range	Wave length	frequency	Beam diameter	Beam divergence
200 mW	1064 nm	CW	0.5 mm	4 mrad

はその下にあるワーキングテーブル上に集光する。

なお、本装置では基本スペックを下記のとおり設定した。本装置は、さらにビームエキスパンダーを制御することにより将来的に3次元加工が可能な微細 YAG レーザ加工装置を開発することが目標である。

- 加工範囲：X, Y軸方向とも100mm
- スポット径：φ20μm
- 位置決め精度：±10μm

2.1 レーザ発振器

化合物ウエハ等のダイシング加工や、金属製品への微細マーキング加工など広範な加工を目的に、レーザー光源にはYAG基本波(波長1064nm)を用いることとした。

なお今回は、ビーム径、スポット位置精度だけを評価する目的で、下記の出力の小さなELFORLIGHT社製のレーザー発振器14-200を用いた。ガルバノミラー入射前にビームエキスパンダーにより、ビーム径をφ10mmの平行光に拡大している。

2.2 fθレンズの焦点距離

目標とする照射ビーム径dとレンズに入射するレーザー光のビーム径Dには、回折理論より次の関係がある。

$$d = 1.64 \frac{f\lambda}{D} \quad (1)$$

ここで、dの値を仮に30μmに、Dを10mmに設定すると、λ=1.06μmであるから、焦点距離fは172.5mmとなる。したがって、必要とするレンズの焦点距離は170mm以下とすることが望ましいことがわかる。

2.3 ガルバノミラーの分解能

ガルバノミラーは最大走査角が±30°、最大非直進性が0.1%(±20°)のGSLLumonics社製の型式M2STを、X, Y軸ともに用いた。

なお、前述のfθレンズにおいて、図2に示す入射角度θと結像面でのビームの位置yには、焦点距離fを介して次の関係がある。

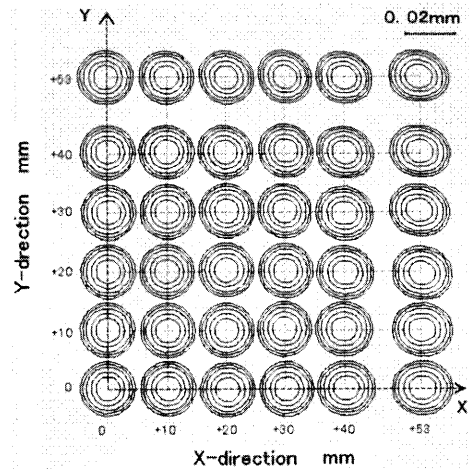


Fig.3 Profile of laser beam

$$y = f\theta \quad (2)$$

ここで、

D：入射径、d：照射径、f：焦点距離、λ：波長

100mm×100mm四方の範囲を加工できることを開発目標にしているので、y=±50mm、f=170mmとすると、θ=±16.9°となる。ガルバノミラーの分解能は、最大走査角±30°あたり±32768ステップとなっているので、上記の場合、1ステップあたりの結像面での位置制御分解能は2.76μmになる。したがって、目標とする10μmの位置精度を達成することが可能であることがわかる。

なお、この関係はシュリンクフィッタ法を用いたレンズ系のように光軸が一致している場合に成り立つが、シュリンクフィッタ等を用いずに組み立てたレンズ系では、レンズどうしの光軸が一致しないため図2の一点鎖線で示すように、焦点位置のずれなどが発生する。

2.4 fθレンズ構成

前述の開発目標を満足するレンズとするため、光学設計解析ソフトCODEVを用いて、入射光がφ15mmの時、φ20μmのスポット径が得られるレンズを設計した。Fig.2はその結果得られたレンズの構成である。5枚のレンズにより構成されている。レンズの直径は左の小さい方から120mm、152mm、180mmである。焦点距離は166.78mmとした。

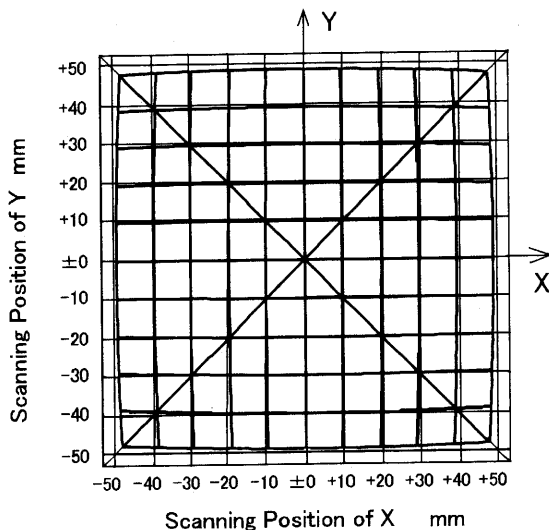


Fig.4 Calculated distortion

図3はこのレンズにおいて入射径を $\phi 15\text{mm}$ とした場合の、結像面でのビームプロファイル（ビーム強度分布を等高線表示で示したもの）を光学設計解析ソフトCODE Vで数値シミュレーションしたものである。紙面の都合で結像面を真上から見たときの第一象限のみを表示している。

X軸とY軸とも走査幅が30mm以内であれば、ビームプロファイルはほぼ真円にであるが、走査幅がそれ以上になるとわずかに真円からのずれが認められる。X方向に53mmまでビームを走査すると、ビーム形状にかなり歪みが見られるようになるが、それでもビーム径は $20\mu\text{m}$ に収まっていることが分かる。

これらのレンズを鏡筒へ締結する際にはシュリンクフィッタを用いた。シュリンクフィッタの設計においては有限要素法を用いて、シメシロなどの寸法が最適となるように設計を行った。

2.5 ディストーション

レンズには球面収差などサイデルの5収差があり、その一つにディストーションと呼ばれる収差がある。本試作装置ではそれらの収差を軽減するため5枚のレンズを組み合わせることで θ レンズを構成することとした。しかし、ディストーションはレンズ固有の収差であり、設計によってある程度低減できるが完全に消去することはできない。図4はこのディストーションを結像面でシミュレーションしたものであるが、太い線で示されている様に、結像面位置が樽型に歪曲している。このことは、ガルバノミラーにレーザー照射のための目標位置を与えても、実際の照射位置はこのディストーションによって歪曲され、レーザースポットの位置ずれが生じることを意味するものである。したがって、ディストーションがあると加工精度は悪くなる。

シミュレーションでは、X,Y座標の $\pm 50\text{mm}$ 位置で最大3%ほどの位置ずれを生じている。本研究では目標とする位置決め精度を達成するため、ガルバノミラーへの指令値を補正する式を最小自乗法を用いて求めた。

それぞれのガルバノミラーに対する補正式は下記のとおり、X座標とY座標を変数とした多項式関数となっている。

$$\theta_x = f(x, y) \quad \theta_y = g(x, y) \quad (3)$$

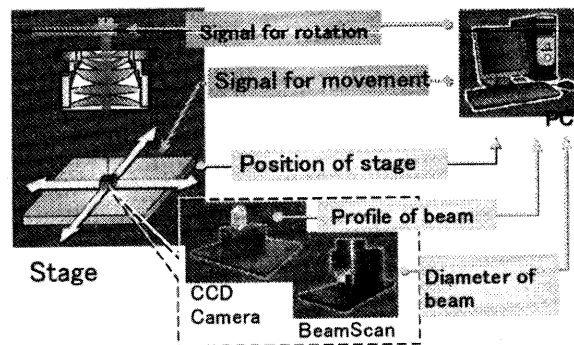


Fig.5 Measuring instrument

θ_x をm次の多項式で表すと次式のとおりである。

$$\theta_x = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5x^3 + a_6y^3 + \dots + a_nx^m + a_{n+1}y^m \quad (4)$$

θ_y についても同様である。補正に用いる補正式の次数mについては実験により最適な値を求める。

なお、今回は式(4)のような多項式を用いたが、今後はより効率的な形の補正式を検討しなければならないと考えている。

2.6 計測装置

加工ステージ上に集光したレーザービームのスポット径と照射位置を測定するため、加工テーブル上に基準ガラスチャートによって $1\mu\text{m}$ の精度が保障された高精度X,Yステージを設置した。スポット径を測定するときには、ステージの上にBeam Scan Model0180 (Photon社製)を設置した。また、スポット位置座標を測定するときには、ステージの上にCCDカメラを設置した(図5)。ガルバノミラーはPCにより制御した。測定データの処理もPCで行った。

また前述のディストーション量を実際に計測し、さらに実験によりディストーションを補正するための上記補正式の最適次数を決定した。そしてこの補正式を適用した場合の位置決め精度の測定を行った。

3. 実験結果および考察

前述の通り光学系の設計においては、入射ビーム径 $\phi 15\text{mm}$ としたが、実験ではガルバノミラーの大きさなどの制約から入射ビーム系は $\phi 10\text{mm}$ とした。この場合、得られるスポット径は $20\mu\text{m}$ ではなくて $30\mu\text{m}$ となる。装置は室温 $24^\circ\text{C} \pm 2^\circ$ 、湿度40%のクリーンルーム内に設置し、この環境中で実験を行った。

また、測定においてはガルバノミラーの駆動は、目標とする位置にビームが当たるように角度指令値をキーボードからパソコンに入力した。実際にレーザーが照射された位置は、高精度X,Yステージ上のCCDカメラで追うことにより、X,Yステージの移動量から求めた。同様に、スポット径を測定するときにはX,Yステージを動かし、スポット位置へBeam Scanを移動して計測した。

3.1 スポット径の測定

図6,図7はスポット径の測定結果である。図4の座標で(50,50)から(-50,-50)および(50,-50)から(-50,50)へとそれぞれ対角線上に測定したものである。スポット径は光のエネルギー強度が $13.5\%(1/e^2)$ となる値をとっている。

シュリンクフィッタを用いた高精度光学系によるレーザー微細加工装置の開発

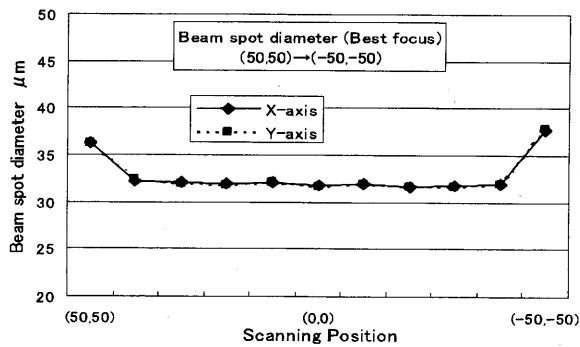


Fig.6 Diameter of laser beam at focal plane

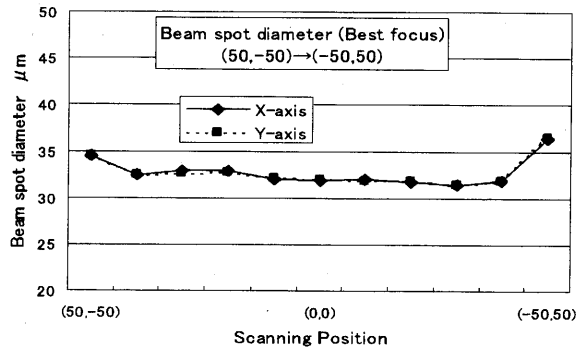


Fig.7 Diameter of laser beam at focal plane

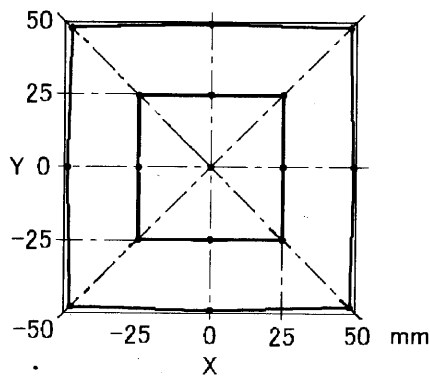


Fig.8 Measured distortion

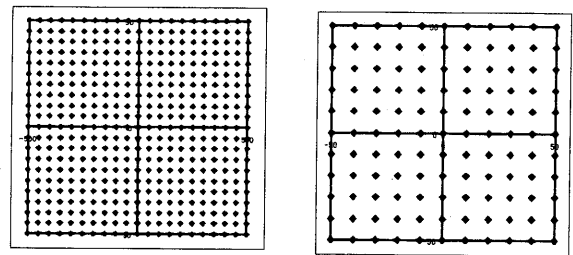
レンズにはサイデルの収差の一つである像面湾曲があり、結像面は単一平面ではなく、高さ方向に歪んでいる。したがって、スポット径の測定の際には、Z軸ステージを手動により操作することにより Beam Scan を最適な高さに調整し、スポット径が最小となったときの測定値を採用した。すなわち実際の結像高さでのスポット径を測定した。

それぞれ、走査幅の両端では $35\mu\text{m}$ を超えているものの、ほぼ全走査域で計算値に近い $30\mu\text{m}$ 程度の径が得られている。走査端近くにおいて、スポット径が大きくなっているのは、レンズの収差等が端にいくほど大きいことに加え、レンズ組み立ての調整精度が影響していると考えられる。

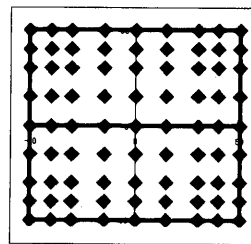
3.2 補正式の導入とスポット位置精度の測定

開発した装置のディストーション特性を実測した結果が、図 8 である。前述のシミュレーション結果の図 4 とほぼ一致した。

このことにより、設計通りにレンズの組み立てが行われていることが確認された。このディストーションを無くすため、式 (4)



a) Pattern1 441 measuring points
b) Pattern2 121 measuring points



c) Pattern3 90 measuring points

Fig.9 Patterns of measurement

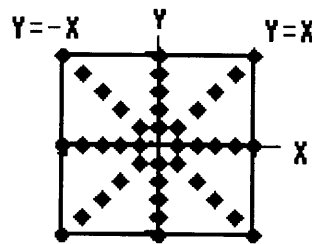


Fig.10 Pattern of measurement for evaluation

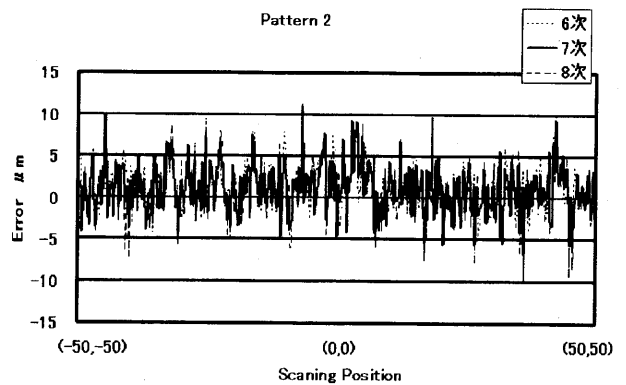


Fig.11 Effect of order of correction formula on positioning accuracy

の次数を決定することを試みた。まず、補正のための元データの最適取得数を決定するため、いくつかの測定パターンにより補正式の係数を決定し、補正を行った後のスポット位置精度を測定し比較検討を行った。なるべく少ない測定データで目標とする精度を達成できるデータ点数と測定パターンを見いだすため、図 9 の a), b), c) に示す 3 つの測定点パターンを用いて検討した。

図 9(a) の Pattern1 は 5mm の等間隔で 441 点を、図 9(b) の Pattern2 は少し粗い 10mm 間隔で 121 点を、図 9(c) の Pattern3 は外周部は細かく、中心部を粗くして 90 点を測定した。また、補正の次数についても次数を変化させもっとも効率的な次数を求めた。

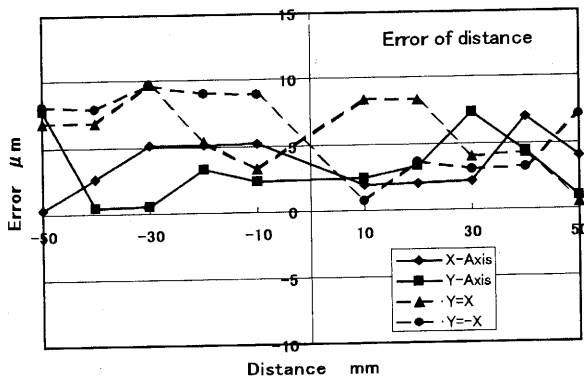


Fig.12 Error of distance after correction

補正の効果の確認には図10の評価用測定パターンを用い、あえて補正式を導くに用いた測定点とは異なる40点で評価した。上記の3つのパターンについて補正式の次数を変えて誤差がどの程度になるかをシミュレーションしたものが、図11である。Pattern2に対する結果を示している。検討の結果、Pattern1およびPattern2では7次まで、Pattern3では5次まで次数を大きく取ることにより目標精度10 μm に収まる補正式が得られることがわかった。これらパターンの中では、測定点数および計算時間からはPattern3がもっとも効率的である。しかし、計測が手動であるため、元データの取得の容易さを考慮すると、一定間隔で計測を行うPattern2用い、次数7次で補正することが今回はもっとも効率的であると判断した。

図12はこれにより補正したレーザー加工機の位置決め精度をFig.10の評価パターンで計測したものである。実線はそれぞれX軸とY軸上の測定値であり、破線は対角線上の測定値である。縦軸の誤差とは目標の位置からの距離を示している。いずれの場合も目標精度の10 μm 以内に収まっており、補正がうまく行われることが分かった。

3.3 温度変化を与えたスポット位置精度の測定

次に、シュリンクフィッタ法の特徴である温度変化に対して、光軸の安定度を調べた。鏡筒にヒータを巻き付け、加熱しながら結像面でのビームの照射位置の変化量を測定した。図13に座標(0,0)の原点位置にスポットを照射し、温度変化によりその位置変化を測定した結果を示す。それぞれ、シュリンクフィッタを用いて組み立てた $f\theta$ レンズと、用いないで組み立てたものを比較した。温度の測定は鏡筒外周表面に設置した熱電対で測定している。

シュリンクフィッタを用いないレンズユニットは約6 $^{\circ}\text{C}$ (加熱開始4分後)の温度上昇により、目標精度の10 μm を超える誤差を生じた。一方、シュリンクフィッタを用いたレンズユニットでは約11 $^{\circ}\text{C}$ (加熱開始13分後)まで目標精度の10 μm 以内であった。これにより、シュリンクフィッタが温度変化に対して、光軸を一定に保つ働きをしていることが確認できた。

4. 結 言

本研究は、すでに小径レンズにおいて組み立て精度の向上、温度変化に対するレンズ精度の安定性などが確認されていたシュリ

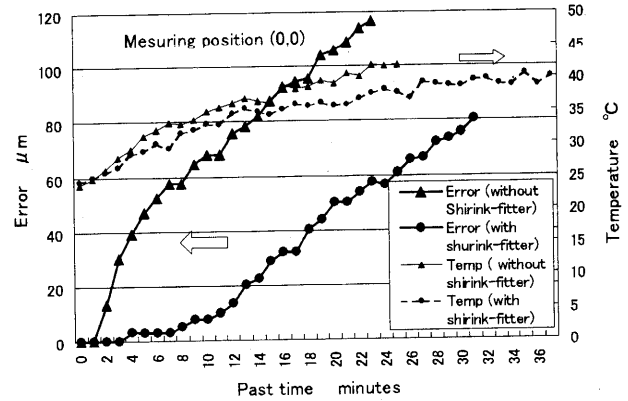


Fig.13 Error of distance under heating

nkフィッタ法を、大口径レンズへ適用し、広範囲で微細な加工が可能となる微細レーザー加工機を開発することを目標とした光学設計の後、実際に装置を組み立てて結像面でのレーザースポット径と位置を測定した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 100mm \times 100mmの範囲にわたって、ほぼ30 μm の微細なスポット径が得られる光学系が開発できた。
- (2) 補正式を導入することにより、ディストーションと呼ばれる歪曲を効果的に補正し、100mm \times 100mmの範囲にわたって位置決め精度10 μm を確保できた。
- (3) 大口径レンズについても、温度変化に対してシュリンクフィッタが光軸を一定に保つ効果が確認できた。

以上のことより、従来より50%以上広い走査面上を、30 μm という微細なレーザースポットで走査させることが可能となった。しかも、レーザースポットの位置精度はこれまでの2倍以上である。

今後は、当初の目標である20 μm のスポット径を全走査域で得ることを可能とするため、ガルバノミラー系的大型化などの改良を行うとともに、スポット径が中心付近に比べレンズ両端付近で大きくなってしまふことを解決することが課題である。

参 考 文 献

- 1) 二宮, 沢田, 川原, 横谷, 黒澤: フェムト秒レーザーを用いた薄厚シリコンウエハのダイシング加工, 精密工学会誌, 70, 12(2004), 1554.
- 2) 山田, 西岡, 細川, 上田: パルスYAGレーザーによる脆性材料の割断加工, 精密工学会誌, 69, 1(2003), 120.
- 3) 牧野, 杉峰, 富田: 高精度レーザー加工システム用XYステージの開発, 精密工学会誌, 67, 1(2001), 65.
- 4) レーザフロントテクノロジー(株) レーザトリマーSL432HW: <http://www.laserfront.com/sehin/sl432hw/gaiyo.html>
- 5) シグマ光機(株) LYCM-LD20: <http://www.sigma-koki.com/A/LaserMarkingSystem/marker.html>
- 6) 新田, 菅野, 刈田, 小俣, 白井: シュリンクフィッタを用いた光学レンズの超精密接合, 精密工学会誌, 67, 10(2001), 1615.
- 7) Nitta, Kanno, Komata, Iguchi: New joining method for laser scanner lenses by using shrink fitter, 2001/6/19 5th International conference on computation methods in contact mechanics, Seville (Spain), (2001), 31.
- 8) Nonaka, Nitta, Kanno, Nishimura: Study of a Laser Material Processing System with Fine Optical Setup Using a Shrink fitter, 2003/11/3-6 2nd International Conference Leading Edge Manufacturing in 21st Century. Niigata (Japan), (2003), 8