



# シュリンクフィッタを用いたレンズの超精密接合法の 光学シミュレーションによる理論的検討\*

菅野明宏\*\* 新田 勇\*\*\* 小俣公夫†

Optical Simulation on Ultra-Precision Method of Joining Lenses Using a Shrink Fitter

Akihiro KANNO, Isami NITTA and Kimio KOMATA

The  $f\theta$  lens unit used in this simulation was consisted of four spherical lenses which were fixed into a housing by a shrink fitter. The shrink fitter is a cylinder-shaped machine element which is made of plastic material. The  $f\theta$  lens unit with the shrink fitter could converge the laser beam over a wide scanning width of 80mm. However the lager interference of shrinkage fit caused the lens deformations, much greater than the conventional limitation of surface irregularity of  $\lambda/2$ . These lens deformations will deteriorate the laser beam spots. In addition to the effect of the interference, the beam spots will be very sensitive to lens decenters and the lens tilts. Thus we theoretically examined the effects of the lens deformations and the lens alignment on the laser beam spots of the  $f\theta$  lens unit fixed by the shrink fitter. The limitation of the interferences and the lens misalignment were discussed.

Key words: laser scanner, shrink fitter, surface irregularity, lens deformation, decenter, tilt

## 1. 結 言

レーザスキャナは、レーザ顕微鏡やレーザ加工機、そしてプリント基板の回路パターンの直接描画装置など様々な光学機器においてレーザ光を走査するために使用されている。近年、それらの機器での観察対象や加工パターンはますます微細化の傾向が強まると共に、プロセススピードの向上が求められている。従って、レーザスキャナ光学系に対しては、微細なビームスポットを広い領域に対して高速で走査したいという要求が高まっている。

一般的に高速な走査を目的としたレーザスキャナ光学系は、ポリゴンミラーやガルバノミラーのような光偏向器と  $f\theta$  レンズで構成される<sup>1)</sup>。  $f\theta$  レンズは複数枚のレンズから成り、偏向されて入射したレーザ光をある範囲の像面上に結像させる。その  $f\theta$  レンズでは、それぞれのレンズが偏心すると光軸から離れた結像位置でのビーム径が大きくなってしまふ。その結果、微細なスポット径を達成できる走査幅が狭くなる。すなわち複数枚のレンズの高精度な心出し技術が、レーザスキャナの広視野高解像度化における重要なキーテクノロジーであると言える。

前報<sup>2)</sup>ではレンズと鏡筒との接合にシュリンクフィッタを適用することで各レンズ間の心だしを行い、広い走査幅にわたって微細なスポット径を結像できることを実験により報告した。シュリンクフィッタとは樹脂製の円筒形状の機械要素であり、レンズと鏡筒の間に挿入して締めこめて使用する。図1にシュリンクフィッタの原理図を示す。樹脂はレンズと鏡筒材料に比べて大幅に熱膨張係数が大きいので、シュリンクフィッタの半径方向にスリット(切込み)を入れることで、

半径方向の厚み分の熱膨張量が、温度変化によるレンズと鏡筒の間のすきまの発生を防止する<sup>2)~8)</sup>。すなわち、温度変化があっても一定の力でレンズを心出ししたまま保持することが可能であり、結像性能が変化しないという接合技術である。

しかし、シュリンクフィッタを用いた接合方法では、シメシロに応じた締め付け力が加わりレンズの球面が変形する。その変形量が過度に大きければレンズの光学性能が悪化する。前報<sup>2)</sup>では、使用したレンズの研磨面精度の許容値である  $\lambda/2$  から類推して、締めこめによるレンズ球面変形も  $\lambda/2$  以下になるようなシメシロで締め付けた。ここで  $\lambda$  は、レンズ面精度を測定するためのレーザ干渉計で使用するレーザの波長であり、一般的には He-Ne レーザの波長 ( $\lambda=632.8\text{nm}$ ) である。この場合、締め付けによる光学性能の悪化はほとんどないことが実験で明らかになった。しかし、レンズの形状によっては数ミクロンのシメシロでも球面変形量は  $\lambda/2$  を超えてしまうため、シュリンクフィッタの内外径は高精度に加工しなければならない。ところがシュリンクフィッタは樹脂製で寸法安定性が悪いため、高精度に加工する

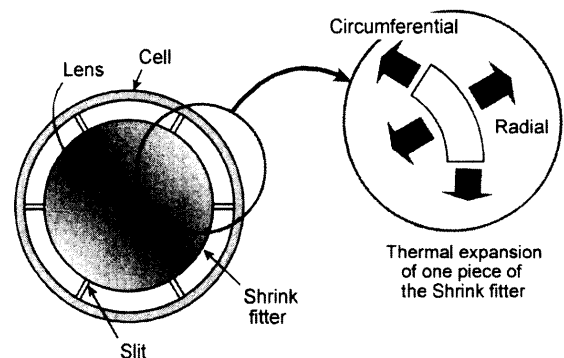


Fig.1 Principle of a shrink fitter

\* 原稿受付 平成 16 年 7 月 8 日

\*\* 学生会員 新潟大学大学院自然科学研究科 (新潟市五十嵐 2 の町 8050)

\*\*\* 正会員 新潟大学大学院自然科学研究科

† (株)オプセル (川口市上青木 3-12-18 埼玉県産業技術総合センター 507)

ことは非常に難しく手間とコストがかかるといった問題がある<sup>2)</sup>。

また、本法では締めばめのため理論的にレンズの外径に対して偏心と傾きが無くなる。さらに温度変化があってもその量は変化しない。従って、レンズの口径のほぼ全域を使用でき、従来法<sup>9)</sup>に対して広い走査幅を実現できる。しかしながら言い換えれば、従来法に比べて走査幅が広がったかわりにレンズ単体に存在する偏心や傾きに対する要求精度が一段と厳しくなったと言える。ところがこれまでのところ、それらの影響を調べた例はあまり見当たらない。従って、本法の有効性を理論的に検討するためには、広い走査幅に対して各レンズの偏心や傾きがスポット径に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

そこで本論文では、締めばめによるレンズの球面変形が光学性能に及ぼす影響を数値解析により調べた。さらに、広い走査幅にわたってレーザを走査する場合のレンズ偏心と傾きの影響についても数値解析を行い理論的に検討した。

## 2. レーザスキャナの概要

図2に本研究で開発したレーザスキャナの概略図を示す。前報で開発したレーザスキャナの走査幅は30mmである<sup>2)</sup>。本研究では、実用化へ向けてさらに広い走査幅を目指して80mmにわたって $12 \pm 5 \mu\text{m} (1/e^2)$ のスポット径になるようにレンズ系を再設計した。走査レンズは球面レンズが4枚(L1~L4)とシリンダリカルレンズが2枚(CY1, CY2)の構成となっている。球面レンズの外径はL1がφ44mm, L2とL3がφ56mm, そしてL4がφ70mmである。それら4枚の球面レンズをシュリンクフィッタで鏡筒に接合した。また、L4とCY2の

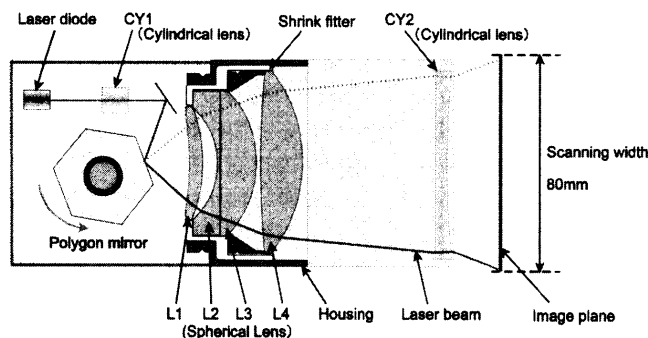


Fig.2 Schematic diagram of the laser scanner

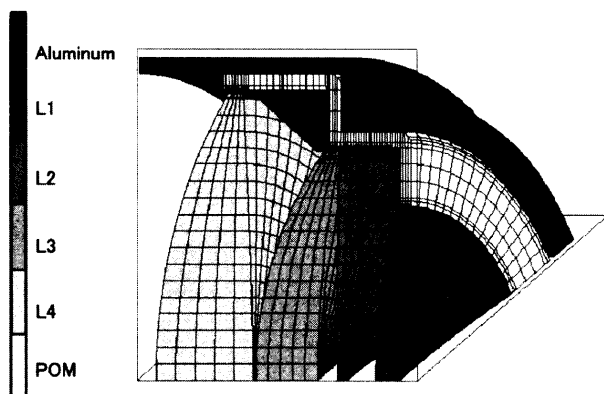


Fig.3 FEM mesh of assembly

Table1 Mechanical and thermal properties of the components

	Materials	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	$\alpha$ [ $1/^\circ\text{C}$ ]
L1	BAL35 (※)	83.0	0.253	$5.8 \times 10^{-6}$
L2	PBM28 (※)	55.2	0.231	$8.6 \times 10^{-6}$
L3	LAL14 (※)	111.8	0.284	$5.7 \times 10^{-6}$
L4	BSM81 (※)	106.1	0.280	$5.9 \times 10^{-6}$
Shrink fitter	POM	2.8	0.475	$100 \times 10^{-6}$
Housing	Al (A5056B)	69.0	0.34	$24 \times 10^{-6}$

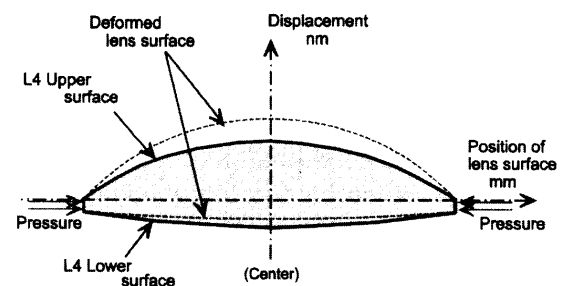
(※)CHARA Inc.,  $\alpha$ : coefficient of thermal expansion

間隔は微調整ができる。光源には波長650nmの半導体レーザを用いた。このようなレンズ系では、光学性能に影響を及ぼす公差パラメータの数が多く、さらにその影響度の非線形性が極めて強いため、すべての条件について一般的に結論づけることは困難である。従って、本論文ではこのレンズ系に限定して、レンズの球面変形と偏心および傾きがスポット径に及ぼす影響について議論を行なう。

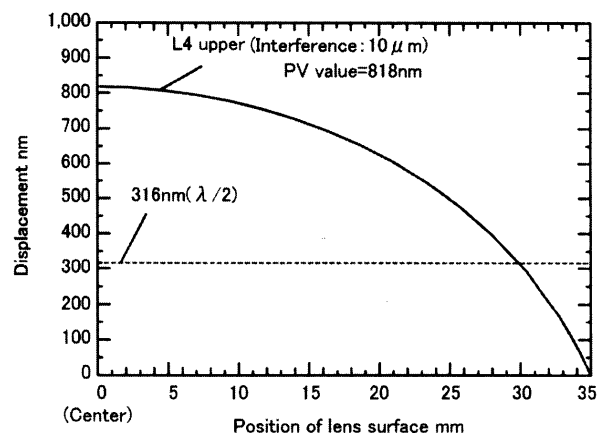
## 3. 数値解析

### 3.1 レンズの球面変形による影響

レンズ外周の締め付け圧力による球面変形量を求めるために、FEM解析プログラム(MARC)により接合体の構造解析を行った。図3に本解析で用いた接合体のFEM要素分割の一例を示す。また、解析で用いた各部材の機械的特性を表



(a) Scheme of the lens deformation



(b) Profile of the deformed lens surface

Fig.4 Deformation of the lens(L4) surface simulated by FEM

1に示す。

解析は軸対称問題として取扱い、全体の1/4を解析対象とした。解析結果の一例として、図4に締めばめ後のレンズ球面形状を示す。図4(a)は締めばめによるレンズ変形の模式図である。図4(b)の縦軸の変形量はレンズ表面の変形後の形状から変形前の形状を引いたものである。レンズ外周の締め付け力により、レンズの中央部分が大きく変形していることがわかる。表2の上段にレンズの球面変形が $\lambda/2$ になるシメシロの値を示す。ここで示したシメシロは、シュリンクフィッタとレンズ、およびシュリンクフィッタと鏡筒での接触面におけるシメシロの直径差の合計値である。L1からL4まで全てのレンズにおいて数 $\mu\text{m}$ のシメシロで球面変形量が $\lambda/2$ になることがわかる。特にL2に関しては $0.7\mu\text{m}$ といった非常に小さなシメシロで球面変形量が $\lambda/2$ に達する。

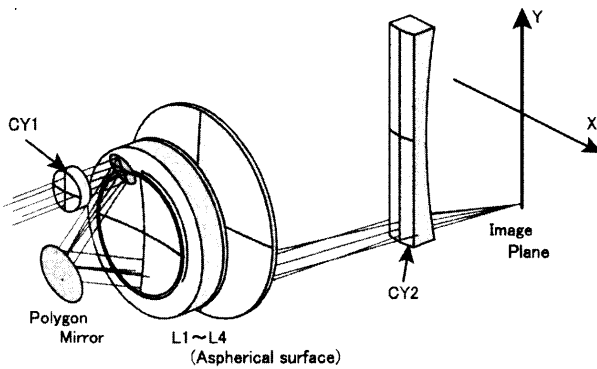
次に締めばめ状態にあるレンズ群のビームの結像性能を調べるために、構造解析で求めたレンズ球面形状を円錐曲面を基準とした高次回転非球面に近似した<sup>10)11)</sup>。ここでは10次までの偶数次の項を持つ高次多項式に対して非線形最小自乗近似を行い、円錐定数と各項の係数を求めた。そして求めた円錐定数と各項の係数を光学解析ソフト(CODEV)のレンズ面データに代入して、レンズ球面が締め

Table2 Limited interferences of each lens simulated by FEM and CODEV

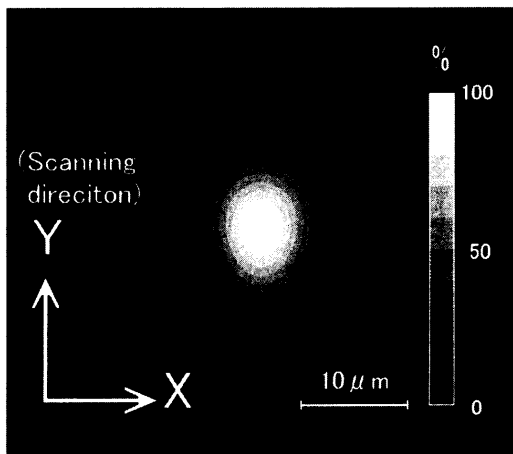
Lens No.	$\mu\text{m}$			
	L1	L2	L3	L4
$\lambda/2$ of lens deformation	1.6	0.7	2.3	3.9
allowable value	>200	18	64	>200

ばめにより変形した状態でのスポット径を解析した。図5(a)に解析で用いた光路図を、図5(b)に点像強度関数で求めたビームスポット形状の一例を示す。ここで、Y方向が主走査方向である。図5(b)より、副走査方向に比べて主走査方向のスポット径が大きくなることがわかる。すなわち、ビームスポット形状の悪化は主走査方向のスポット径を調べれば良い。

図6に、各走査位置での主走査方向のビームスポット径の解析結果を示す。本レーザスキャナのように、レーザ走査にポリゴンミラーを使用する場合は、走査中心に対してスポット径は対称にはならない。それは、ミラー反射面上にミラーの回転中心がないため、幾何学的に走査幅両端での光路が対称にならないからである。また前述したように実際の装置ではL4とCY2の間隔を微調整する機構があるため、

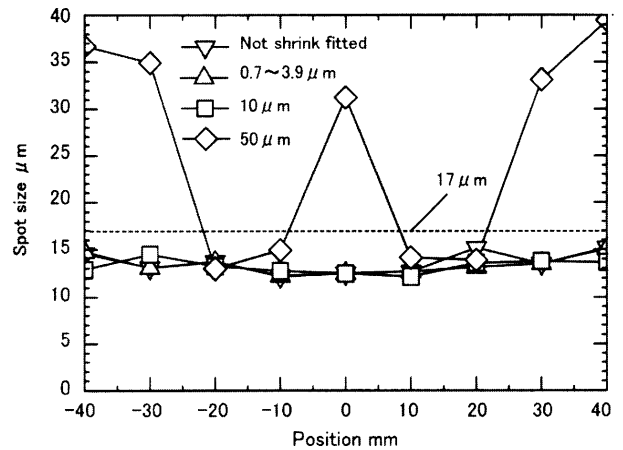


(a) Optical path

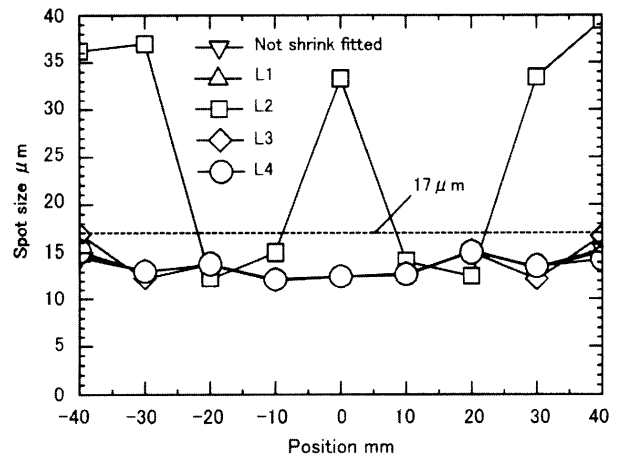


(b) Beam profile

Fig.5 Example of the optical analysis



(a) All lenses are shrink fitted at the same time



(b) Each lens is shrink fitted individually

Fig.6 Deterioration in spot sizes caused by the shrinkage fit

解析でもL4とCY2の間隔を最適化して、最もスポット径が小さくなる条件を求めつつスポット径の解析を行った。図6(a)はL1~L4全ての面変形が $\lambda/2$ になるシメシロ(0.7~3.9  $\mu\text{m}$ )で締付けた場合と、全てのレンズをシメシロ10  $\mu\text{m}$ と50  $\mu\text{m}$ で締付けた場合のスポット径の解析結果である。面変形が $\lambda/2$ になるシメシロと10  $\mu\text{m}$ の場合では、スポット径の値は許容値である17  $\mu\text{m}$ より小さかった。しかし、シメシロ50  $\mu\text{m}$ の場合には、走査中央付近と走査幅の端でスポット径が大きく悪化する結果となった。また、図6(b)はそれぞれのレンズを個別に50  $\mu\text{m}$ 締付けた場合のスポット径の解析結果である。L1とL3およびL4を締付けた場合は、許容値の17  $\mu\text{m}$ を超えることはなかった。しかしL2を締付けた場合は、図6(a)に示したL1~L4まで全てを同時に50  $\mu\text{m}$ のシメシロで締付けた場合とほぼ同じ結果となった。すなわち、L2の変形がスポット径の悪化に大きく影響していることがわかった。

そこで、それぞれのレンズについて、シメシロを1  $\mu\text{m}$ 刻みで最大200  $\mu\text{m}$ まで締付けた場合の各走査位置でのスポット径を解析した。そして、スポット径が17  $\mu\text{m}$ を超える直前のシメシロを各レンズの許容シメシロと定義した。表2の下段にそれぞれのレンズの許容シメシロを示す。L1とL4は200  $\mu\text{m}$ もの非常に大きなシメシロを与えてもスポット径は

Table3 Limited decenters and tilts of each lens simulated by CODEV

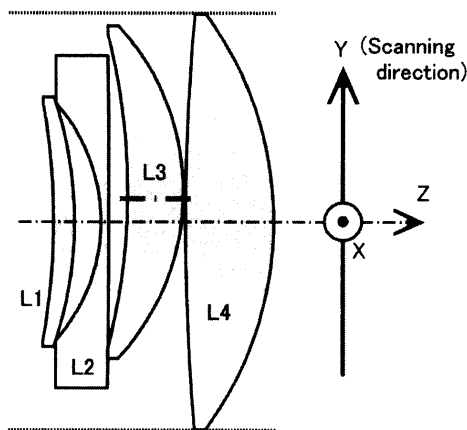
Lens No.		L1	L2	L3	L4
decenter [ $\mu\text{m}$ ]	+Y direction	511	15	12	4
	-Y direction	546	10	7	6
	total	1,057	25	19	10
tilt ["]	+ $\theta$ (X axis)	620	10	40	400
	- $\theta$ (X axis)	870	20	20	320
	total	1,490	30	60	720

許容値を超えて悪化することは無かった。また、L2とL3についても、球面変形が $\lambda/2$ になるシメシロに対して約26~28倍のシメシロを与えた場合によく許容値を超えてスポット径が悪化することがわかった。

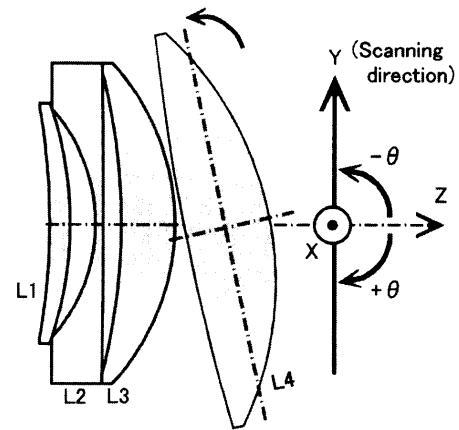
### 3.2 レンズの偏心および傾きによる影響

#### 3.2.1 レンズの偏心

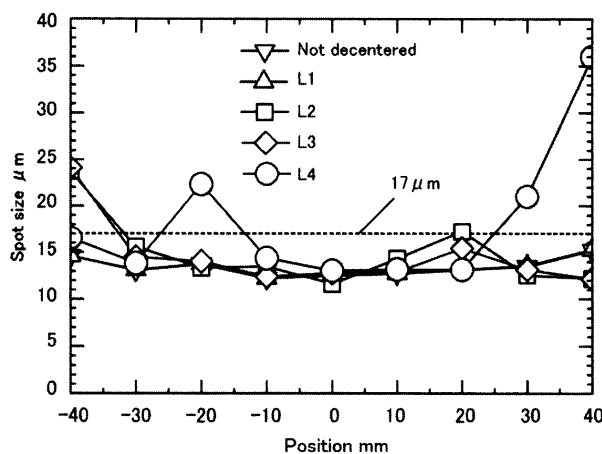
図7(a)にレンズ偏心の模式図を示す。本解析では、各レンズが、それぞれ1枚ずつ主走査方向( $\pm Y$ 方向)および副走査方向( $\pm X$ 方向)に1  $\mu\text{m}$ 刻みで偏心した場合について求めた。図7(b)は、各レンズを+Y方向に50  $\mu\text{m}$ 偏心させた場合の主走査方向のスポット径の解析結果である。L4の偏心が最もビームを悪化させ、ついでL2、L3の順に偏心がスポット径の悪化に与える影響が大きかった。L1の偏心では



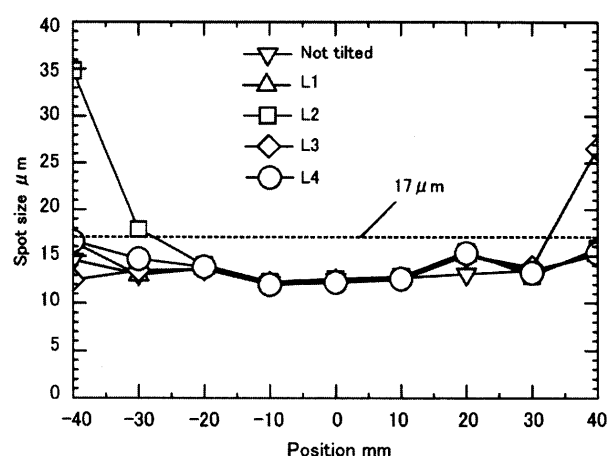
(a) Scheme of the lens decenter (L3)



(a) Scheme of the lens tilt (L4)



(b) Deterioration in the spot sizes caused by the lens decenter (+50  $\mu\text{m}$  decenter : Y direction)



(b) Deterioration in the spot sizes caused by the lens tilt (-3' tilt : X axis)

Fig.7 Effect of the lens decenter on the beam spots

Fig.8 Effect of the lens tilt on the beam spots

ビーム径がほとんど悪化しないことがわかった。またL4では偏心した方向の走査端位置でのスポット径が悪くなり、L2とL3では反対側のスポット径が悪くなるようになった。

紙面の都合上、他の結果は割愛するがX方向の偏心については偏心量 $50\mu\text{m}$ までは、全ての場合においてスポット径が許容値以内となり、偏心の影響はあまりなかった。また、XとYのどちらに偏心しても副走査方向(X方向)のスポット径はあまり変化しなかった。表3の上段に求めた各レンズの偏心の許容量を示す。

### 3.2.2 レンズの傾き

図8(a)にレンズ傾きの模式図を示す。X軸とY軸を中心に時計回り(+ $\theta$ 方向)と反時計回り(- $\theta$ 方向)に、それぞれ傾いた場合について解析した。

図8(b)は、各レンズがX軸を中心に反時計回りで $3'$ 傾いた場合の主走査方向のスポット径の解析結果である。L2の傾きが最もスポット径を悪化させ、ついでL3の傾きによる悪化が大きかった。そしてL1とL4の傾きではスポット径がほとんど悪化しないことがわかった。また、L2は傾いた方向と反対側の走査端位置でのスポット径が悪くなり、L3は傾いた側のスポット径が悪化することが明らかになった。表3の下段に求めた各レンズの傾きの許容量を示す。また、偏心の場合と同様にどちらに傾いてもX方向のスポット径はあまり変化がなかった。

## 4. 考 察

### 4.1 絞りばめによるレンズ球面変形の考え方

解析結果からもわかるように、許容シメシロが最も小さいL2に $18\mu\text{m}$ のシメシロを与えてもビームスポット径は許容値以内に収まる。これは、従来のレンズ形状精度の指標として用いられる研磨面精度の許容値である $\lambda/2$ の球面変形が生じるシメシロの25倍以上のシメシロである。したがってレンズの球面変形は $8\mu\text{m}$ 近くにもなる。このような大きな面変形が生じるにもかかわらず、スポット径が許容値以内に収まるのは、その面変形の形態にあると考えられる。

本法のようにレンズ外周を均一の力で締付けるような場

合には、レンズ面のプロファイルが緩やかに変化することが今回の解析でわかった。それは、レンズ面が設計曲率半径から少しずれたような状態とほぼ等しいと考えられる。その場合には、レンズ面のうねりや粗さの許容値である研磨面精度の $\lambda/2$ に対して、一桁以上大きな値でのレンズ球面変形が許容されるということがわかった。

なお、本法ではレンズに締めばめによる応力が発生しているため、光弾性効果による屈折率の変化や複屈折がスポット径の悪化に影響を及ぼす可能性もある。本解析では、これらの影響を考慮していないが、実験との比較も含めてその影響について検討することが今後の課題である。

### 4.2 シュリンクフィッタ法による広走査幅化と偏心及び傾きの許容値の関係

本研究で用いたようなレンズ系で、従来法の嵌合による組込みにおけるレンズと鏡筒のすきまは $20\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ 程度が一般的である。前出の図7(b)は偏心 $50\mu\text{m}$ の場合の光学解析結果であるので、従来法でレンズを組込んだ場合の平均的なビーム結像性能を示している。ここでは、 $\pm 20\text{mm}$ の走査位置で既に許容ビームスポット径を超えている。すなわち、従来法のレンズでは $\pm 10\text{mm}$ 程度の走査幅でしか使用できないことがわかる。それに対してシュリンクフィッタ法では、理論的に各レンズは外周基準でそれぞれの心が一致する。従って本法では、仮にレンズ単体での偏心成分が0であれば、レンズ系の収差補正範囲の $80\text{mm}$ にわたってレーザ走査が可能である。言い換えれば、表3に示した数値解析結果は、本法で使用するレンズ単体に要求される偏心の許容値である。

また、レンズの傾きについては、最も影響が強いL2を基に考察を行う。従来法の平均的なすきま約 $50\mu\text{m}$ の場合は、L2のコバ厚(8.6mm)から単純な幾何学計算で推察すると、その傾きは $0.33^\circ$ である。図9に、L2がX軸周りに $0.33^\circ$ 傾いた場合の主走査方向のスポット径の解析結果を示す。この傾きで使用できる走査幅はわずか $10\text{mm}$ 程度になることがわかる。これに対して本法では、複数枚のレンズの幾何学的な中心軸間の傾きは理論的に0である。従って、レンズ単体において外径に対する幾何学的な中心軸と光学的な軸との間に傾きが無ければ、従来法に比べて約8倍の走査幅が実現できる。言い換えれば、表3の値は本法で使用する各レンズ単体の外径加工時における光軸の傾きの許容値である。

このように、本研究で影響を明らかにした各レンズの偏心と傾きは、シュリンクフィッタ法により広走査幅化の可能性が示されたことによって生じた新たな許容値であると言える。しかしながら、従来の接合法では、スペーサーでレンズ球面を光軸方向に押えることで固定しており<sup>9)</sup>、レンズの外径を基準に精密な位置決めを行うという概念がない。従って、現在の単レンズの外径加工(心取り加工)は、本法で要求する表3に示すような精度を目標にした加工が行なわれていない。本法の安定した実用化のためには、外径基準で固定することを前提にした高精度な心取り加工を行い、各レンズ単体の偏心及び傾き成分を減少させることが求められると考えている。

また、実際にはレンズの偏心と傾き、及び前節で述べた締めばめによる球面変形が複合して存在する。従って、これらの要因が複合した場合についても検討する必要がある。

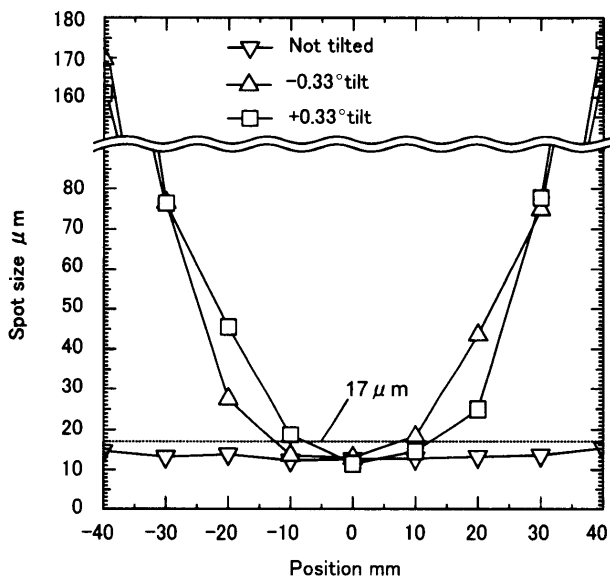


Fig.9 Deterioration in the spot sizes caused by the lens L2 tilt (X axis)

シュリンクフィッタを用いたレンズの超精密接合法の光学シミュレーションによる理論的検討

しかし全ての場合を調べるためには、解析のパラメータが非常に多く問題が複雑になるため、実験により偏心や傾きの発生頻度の高いレンズやその量を調べて、その実験結果と数値解析を組み合わせて検討を行なうことも課題の一つであると考えている。

## 5. 結 言

シュリンクフィッタは複数枚のレンズを高精度に心だし接合する新しい機械要素である。さらに、環境温度の変化が生じてその心だし性能は変化しないという優れた特徴を有する。しかし、全く新しい手法であるため、絞りばめによるレンズの球面変形や、偏心と傾きによる影響が理論的に検討されておらず、要求精度が不明瞭であった。

本論文では、レンズの絞りばめによるレンズ球面変形がスポット径に及ぼす影響を明らかにした。さらに、本法のような走査幅が非常に広い $f\theta$ レンズにおけるレンズの偏心と傾きによる影響も明らかにすることで、本法におけるシメシロとレンズ偏心、および傾きの許容値について理論的に示した。さらに、本法の有効性を理論的に検討した。

以下に、得られた主な結論を示す。

- (1) 絞りばめによるレンズの球面は、レンズの研磨面精度の許容値である $\lambda/2$ に対して一桁以上大きな値で変形しても良いことがわかった。
- (2) 本接合方法のような広い走査幅を実現する $f\theta$ レンズについて、レンズの偏心と傾きの影響を数値解析により明らかにし、それらの許容値を示した。
- (3) 本レンズ系にシュリンクフィッタ法を用いることで実現可能な走査幅は、従来のレンズ接合方法に比べて比べて8倍程度広くなることを示した。

今後の課題として各レンズの高精度な心取り加工を行い、レンズ単体の偏心及び傾き成分を減少させることが要求されると考えている。

## 謝 辞

本研究の一部は、科学技術振興事業団(現 科学技術振興機構)の平成11年度採択新規事業志向型研究開発成果展開事業(プレ・ベンチャー事業)および、文部科学省科学研究補助金No.12650138によるものである。また、FEM計算に際しては西村方孝君(本学大学院生)にご協力いただいた。ここに深く感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 桜井健二郎: 実用レーザー技術, コロナ社, 東京, (1983) 36.
- 2) 新田 勇, 菅野明宏, 刈田伸樹, 小俣公夫, 白井健司: 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.
- 3) I. Nitta, A. Kanno, K. Komata and S. Iguchi: New joining method or laser scanner lenses by using a shrink fitter, Proc. 5th Int. Conf. on computational methods in contact mechanics V, WIT Press, Seville, (2001) 31.
- 4) 新田 勇, 菅野明宏: シュリンクフィッタを用いた光学レンズの組込み法, 光アライアンス, 13 (2002) 32.
- 5) 新田 勇, 木越健二, 加藤康司: インサートリングを用いたセラミックスと金属の絞りばめの高温結合強度に関する研究, 日本機械学会論文集C編, 55, 510 (1989) 417.
- 6) 新田 勇: シュリンクフィッタ, トライボロジスト, 48, 5(2003)325.
- 7) 菅野明宏, 小俣公夫, 新田 勇: 感光材料評価用レーザー走査装置, 光アライアンス, 13(2002) 47.
- 8) 新田 勇: 光学技術と半導体レーザー制御技術, 化学工業, 8(2003)585.
- 9) Aness Ahmad: "HANDBOOK of OPTMECHANICAL ENGINEERING, CRC Press, Canada, (1997) 152.
- 10) 草川 徹: レンズ光学, 東海大学出版会, 東京, (1988)97.
- 11) 中川治平: レンズ設計工学, 東海大学出版会, 東京, (1986)181.