

シュリンクフィッターを用いたポリゴンミラーの超精密接合* (接合体の静的・動的特性と寸法が平面度に及ぼす影響)

新田 勇^{*1}, 古川 英男^{*2}
小俣 公夫^{*3}, 紺野 大介^{*4}

New Method of Joining a Polygon Mirror Using a Shrink Fitter (Static and Dynamic Properties of Assemblies and Effect of Size on the Flatness of End Surfaces)

Isami NITTA, Hideo FURUKAWA,
Kimio KOMATA and Daisuke KONNO

A conventionally shrink fitted assembly of an aluminum polygon mirror and a SiC self acting air bearing becomes loosened at temperatures as low as 60°C because of the great difference in the thermal expansions of these two components, although it exhibits sufficient strength at room temperature. Temperature rise and centrifugal force in operation deform the mirror end surfaces by the order of hundreds of nano Meters or more. The distorted mirror end surfaces adversely affect the quality of devices such as photocopiers and laser printers. This problem has been solved by using a shrink fitter, which is a new machine element developed in previous work. The shrink fitter is ring-shaped and has several slits in the radial direction. Its material needs to have a higher coefficient of thermal expansion than aluminum. Thus, polyimide was used for the material of the shrink fitter. Dynamic properties, such as jitter and tracking accuracy, of the assembly fabricated using the shrink fitter were one-fifth to one-tenth of those of the conventional assembly. This new joining method eliminates the need for maintenance. The shrink fitter made it easier to attach the polygon mirror to the air bearing. The omission of final cutting of the polygon mirror after fabrication was discussed.

Key Words: Machine Element, Fixing Element, Shrink Fitter, Self acting Air Bearing, Aluminum Polygon Mirror

1. 緒 言

コピー機やレーザービームプリンターは、OA機器としてさらなる小型化と高速化および高解像度化が望まれている。レーザービームプリンターによる印字方法の概略を図1に示す¹⁾。ここで、簡単のためレーザービームの経路上に配置されたレンズは省略した。半導体より発射されたレーザービームはポリゴンミラー(すなわちスキャナー)により走査されて、感光ドラムの母線上を移動する。感光ドラム自身も回転しているため、レーザースポットにより任意の文字や絵が描ける。

ポリゴンミラーの反射面に要求される平面度と表面あらさは、それぞれ約100nmと10~20nm(最大高さRmax)である。すなわち、ポリゴンミラーは超精密な機械部品である。

メカニカルな観点からすると、最高印字速度を決めるのはポリゴンミラーの回転速度である。普及機用のポリゴンミラーの支持軸受としては玉軸受が用いられ

るが、高回転域で振動が発生するという問題があり、せいぜい10,000rpmが使用限界である²⁾。空気動圧軸受

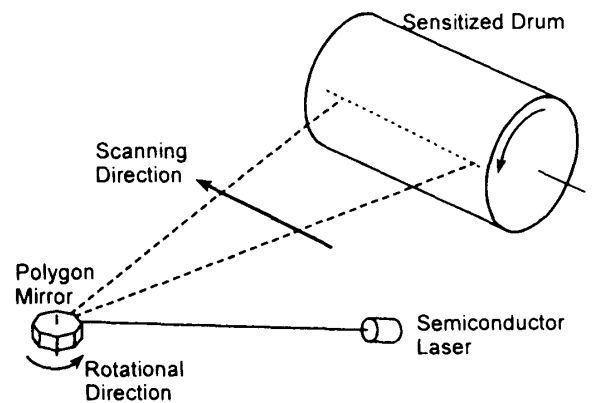


Fig.1 Schematic of a laser beam printer

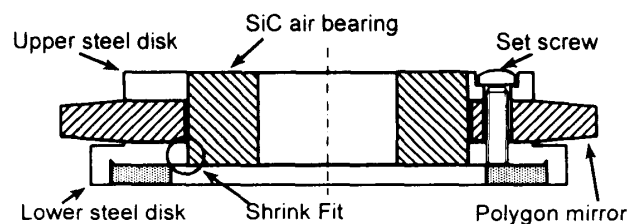


Fig.2 Conventional method of joining a polygon mirror

* 原稿受付 1995年10月11日。

^{*1} 正員, 新潟大学工学部 (〒950 21 新潟市五十嵐2の町8050)。

^{*2} 佐原製作所 (〒250 藤沢市本藤沢4 2 1)。

^{*3} 佐原総合研究所 (〒250 藤沢市本藤沢4 2 1)。

^{*4} 正員, 佐原総合研究所。

には振動といった問題がなく³⁾、高速回転になる程空気膜剛性が増加するので事実上50,000rpmといった高速回転も可能である。さらに、空気軸受では潤滑油を使用しないのでポリゴンミラーを汚染する心配もない。このため、高級機用としてポリゴンミラーの支持には空気軸受が使用される。コンタクトスタート・ストップ(CSS)時の耐摩耗性すなわちトライボロジー特性が問題となっていたが、SiCを用いることで解決できた。したがって、ポリゴンミラーを高速で回転させることについては問題がなくなった^{4),5)}。

しかし、アルミポリゴンミラーとSiC空気軸受は熱膨張係数が大幅に異なるために、別の問題が発生した。

図2は、現在用いられている接合法の概略を示したものである。鋼はアルミよりも熱膨張係数が小さいために、まず下部鋼ディスクがSiC空気軸受に締められる。ポリゴンミラーは、上部と下部の鋼ディスクで挟み、ネジ止め或いはバネ止めすることによって固定される。その際、接触面全面の摩擦係数が一定になることを期待して、ポリゴンミラーとディスクの接触面は高精度にポリシングされる。ネジ止めの際には、トルク管理が厳重に行われる。しかし、どのような注意を払ってもこの種の接合方法では、ミラー反射面が変形することは避けられない。最悪の場合、ミクロンオーダーの変形となる。しかし、ネジ止めやバネ止めでは接合後にミラー反射面の再仕上げ加工は行えないので、スキャナーの歩どまりが悪くなる。

最も重要な問題はメンテナンスである。スキャナー稼働中にはモーターから発生する熱により接合体の温度は20°Cから約60°Cになる。そのため、各要素が自身の熱膨張係数に従い膨張し、結果としてネジとディスクおよびポリゴンミラーとディスクの間で微小なすべりが生じる。これによりミラー反射面が歪む。回転中の遠心力も徐々にミラー反射面を歪める。そのため、場合によってはスキャナーの組み立て直し等のメンテ

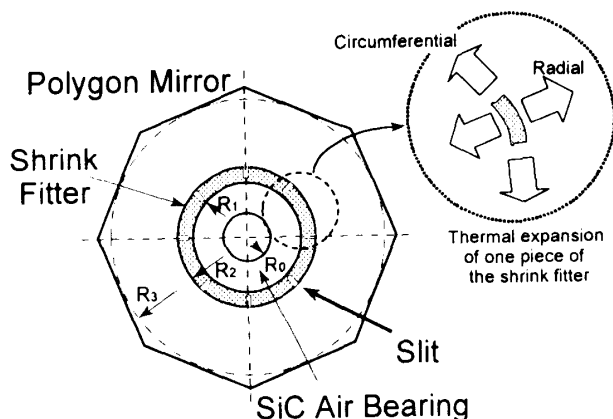


Fig.3 Principles of a shrink fitter

メンテナンスが必要となる。

以上のことは、超精密部品であるポリゴンミラーと空気軸受を使用し既存の接合技術を用いただけでは、超精密なレーザースキャナーは作れないことを意味している。熱膨張差の問題を解決する超精密接合法が開発されなければならない。

締めばめは、今まで述べてきた欠点はあるが、他の接合方法に比べ心出し精度が良いこと、さらに大量生産工程に組み入れ易いことが特長である。締めばめが上述のように複雑でコストのかかる接合方法になってしまった原因は、温度上昇に伴うシメシロの減少を防ぐ有効な手段がなかったからである。

そこで、シュリンクフィッターという新しい機械要素を用いた簡便な締めばめ方法^{6),9)}をこの問題に適用した。実験の結果、スキャナーのジッター特性や面倒れ特性の動的特性が飛躍的に改善されることが確認できた。さらに、この新しい接合法によりレーザースキャナーのメンテナンスフリー化が達成できた。最後に、接合後のポリゴンミラーの再仕上げ加工が省略できるか否かについても考察した。

2. シュリンクフィッターを用いた新しい接合法

高温下でのシメシロの減少を防ぐために、既報で新しい機械要素であるシュリンクフィッターが開発された^{6),7)}。シュリンクフィッターとは、その熱膨張係数がアウターリング（この場合は、ポリゴンミラー）よりも高い円筒形状の機械要素である(図3)。これを締めばめ界面に挿入する。重要なことは、シュリンクフィッターの半径方向の熱膨張だけを利用するために、図3に示すようなスリットを入れることである。その結果シュリンクフィッターの半径方向の厚み分の熱膨張量だけがシメシロの減少を防ぐように作用するようになる。

詳しいことは割愛するが⁶⁾、シュリンクフィッター材の熱膨張係数としては、アルミニウムの2-3倍のものが望まれる^{6),7)}。機械的強度のことも勘案した結果、東レ(株)製のポリイミド(TI-3000)が相応しいことが分かった。その熱膨張係数は約 $56 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ である。

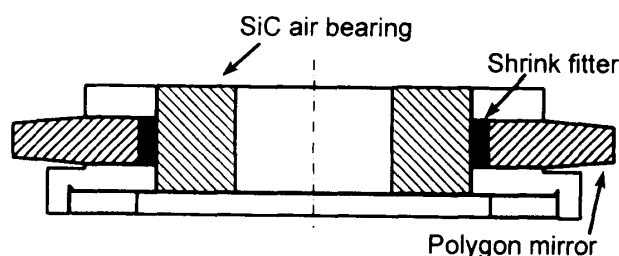


Fig.4 A shrink fitted assembly using the shrink fitter

Table 1 Sizes of each element (mm)

	R ₀	R ₁	R ₂	R ₃
Profile of Mirror End Surface and Jitter (8 Facets)	5.5	11	14	27
Tracking Accuracy (6 Facets)	5.5	11	17	39

Table 2 Thickness of each element (mm)

SiC Air Bearing	Shrink Fitter	Polygon Mirror
10	5	5

Table 3 Mechanical properties of each element

Materials	Young's Modulus(GPa)	Poisson's Ratio	Coefficient of Thermal Expansion(1/°C)
SiC	336	0.2	3.8×10^{-6}
Polyimide	2.40	0.4	56×10^{-6}
Aluminum	69.0	0.34	24×10^{-6}

3. 実験

3.1 試験片 各々の要素の寸法と機械的特性を表1、表2および表3に示す。静止状態の平面度測定とジッター特性を調べるために8面のポリゴンミラーを用いた。また、面倒れ特性を調べるために6面のポリゴンミラーを用いた。

3.2 接合方法 シュリンクフィッターのスリット

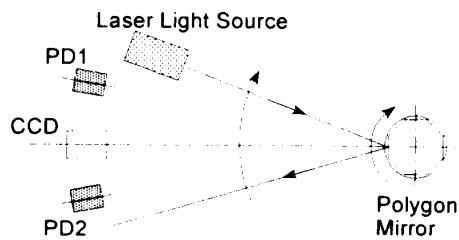
数は、ポリゴンミラーの反射面数と同じに6又は8とした。最初にシュリンクフィッターにU字形のスリットを入れた。そのシュリンクフィッターを加熱し、SiC空気軸受に締めばめした。次に、その接合体を液体窒素で冷却し加熱したポリゴンミラーを締めばめした。最後に、シュリンクフィッターのスリット部を完全に切断した。

図4は、シュリンクフィッターを用いた接合体の概略を示したものである。ネジ止めの為の穴あけは必要でないので、図2に示した接合体よりも構造が簡単であることが分かる。従来の接合方法ではポリゴンミラーの上下接触面は高精度にポリシングしなければならなかったが、これらの精密仕上はシュリンクフィッターと接触する内筒面を除いて省くことができた。構造上、遠心力によりミラー反射面が経時的に歪んでしまうことはないと考えられる。

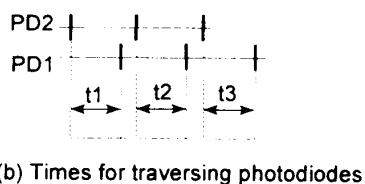
3.3 測定方法 図5は、ジッターと面倒れ特性の測定法の概略を示したものである¹⁰⁾。半導体から発射されたレーザー光はポリゴンミラーで走査され、フォトダーオードPD2とPD1を横切る。PD2からPD1に達するに要する時間を各ミラー反射面毎に順に測定し、それぞれ t_1, t_2, \dots, t_n とする(図5(b))。これより、各面のジッターは次式で計算される。

$$\frac{t_n - \text{mean}(t_1 \sim t_n)}{\text{mean}(t_1 \sim t_n)} \times 100 \quad (\% \text{ p-p}) \quad (1)$$

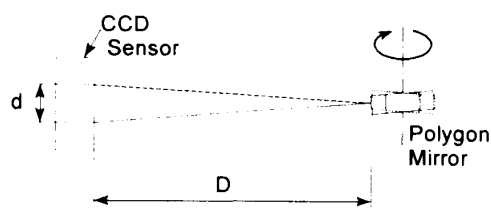
ここで、 t_n はn番目の測定時間である。



(a) Measurement of jitter



(b) Times for traversing photodiodes



(c) Measurement of tracking accuracy

Fig.5 Principles of measuring dynamic properties

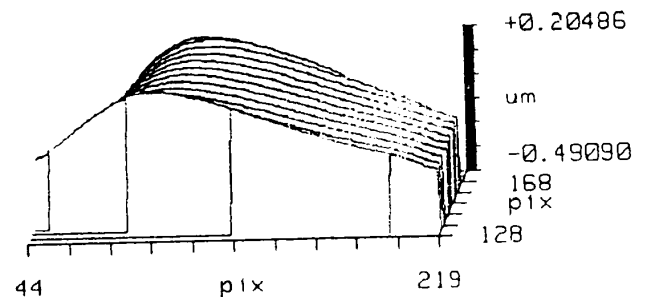


Fig.6 Profile of mirror end surface before assembling : PV 695nm

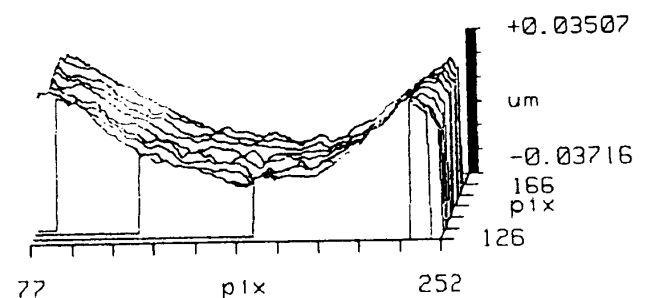


Fig.7 Profile of mirror end surface after a rotation test : PV 72nm

Table 4 Instrument and devices used for the measurement

Modulation Domain Analyzer(HP53310A, HP)
Semiconductor Laser (LT028PS×5mW, λ=780nm, Sharp)
Potodiode(photo IC S5049, Hamamatu Photoniques)

Table 5 Measuring conditions

	Rotational Speed (rpm)	Number of Facets	Dimensions of Each Element
Profile of Mirror End Surface	0	8	in Table 1, 2
Jitter	20,000	8	in Table 1, 2
Tracking Accuracy	9,000	6	in Table 1, 2

長周期ジッターは、ある総回転数中のジッター値の最大差である。ジッターの測定は20,000rpmの回転数で行われ、測定回数は125回であった。この測定に用いた主な測定装置等は表4に示す通りである。

さらに、短周期ジッターを次のように定義する。

$$\frac{\max(t_{n+1}-t_{n \cdot p}) - \min(t_{n+1}-t_{n \cdot p})}{\text{mean}(t_{n+1}-t_{n \cdot p})} \times 100 \quad (\% \text{ p-p}) \quad (2)$$

ここで、pはミラーの反射面数(この場合8)、m=kp (k:0-124)である。測定回数は125回である。

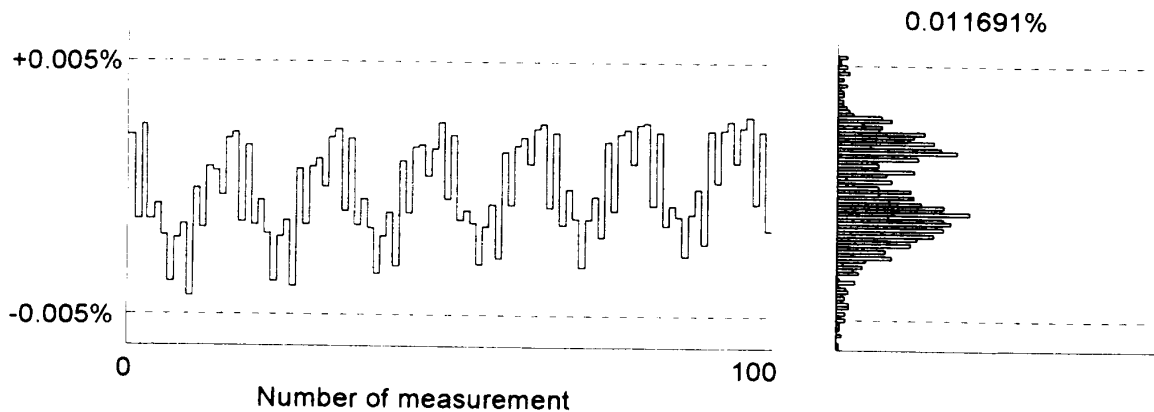
面倒れは図5(c)に示す通りポリゴンミラーの回転軸からの傾き角として定義され、次式で表される。

$$\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{d}{D} \right) \quad (\text{arcseconds}) \quad (3)$$

値dはCCDセンサーを用いて測定した。面倒れの測定は、6面のポリゴンミラーを用いて9,000rpmの回転数で行った。

ジッターと面倒れを測定するためのスキャナーアッセンブリーの寸法を表5に示す。

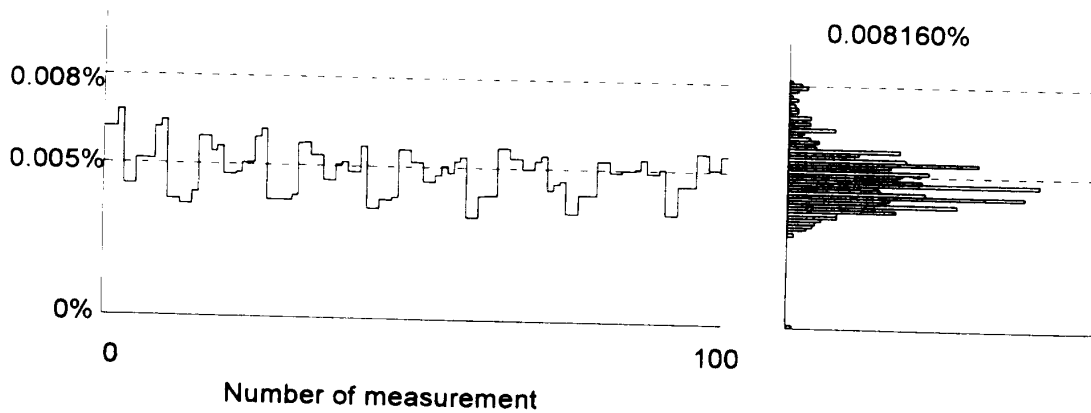
4. 実験結果



(a) Long term jitter

(b) Histogram

Fig.8 Long term jitter of the assembly joined by the conventional method



(a) Short term jitter

(b) Histogram

Fig.9 Short term jitter of the assembly joined by the conventional method

4.1 静的特性(静的平面度) 図6はシメシロを $80\mu\text{m}$ とし、シュリンクフィッターを用いて締めればめした直後のミラー反射面形状をレーザー干渉計ZYGOで測定したものである。ミラー反射面は凸形に変形しており、PV値は約 695nm であることが分かる。しかし、PV値の目標値は 100nm 程度であるので、超精密加工機で加工した再仕上げ加工の結果、約 140nm (平均値)程度のミラー反射面のPV値を得た。

図7は、 $30,000\text{rpm}$ で数時間回転させた後のミラー反射面形状である。回転後のPV値は 72nm と設定値 100nm 以内であることが分かる。表面形状は、モーターからの熱や遠心力でもまったくといっていいほど歪みを受けなかった。

4.2 動的特性 図8は、従来方式のネジ止めで接合したスキャナーのジッター値である。回転後、静止して得られたミラー反射面のPV値は、 $240\text{nm}\sim 700\text{nm}$ の範囲であった。図8(a)は式(1)で評価した100個の測定値を示している。図8(b)にそのヒストグラムを示す。

ヒストグラムは2つのピークを持ち広く分布していることが分かる。 $\pm 0.005\%$ のところの破線は、上下の限界値(許容値)を示している。式(2)より評価される長周期ジッターは、 0.011691% と許容値を僅かにオーバーした。

図9は、短周期ジッターの測定値である。一般に短周期ジッターの許容値 0.008% は、長周期ジッターのそれよりも厳しい。短周期ジッターも許容値をオーバーしていることが分かる。

図10と図11はシュリンクフィッターを用いた接合体のジッターの測定結果を示したものである。回転後、静止して得られたミラー反射面のPV値は、 70nm 程度である。図10(b)より分かるように、長周期ジッターの値は従来方式のものに比べて約 $1/5$ に低下した。図10(a)より、ジッター値は図9(a)で見られた明確な周期をもつことなく変動していることが分かる。短周期ジッターも同じように従来方式の約 $1/5$ に低下した。

図12は、10回転当りの従来接合方式の面倒れ特性の測定結果を示したものである。面倒れの値は、 41.33 秒であった。

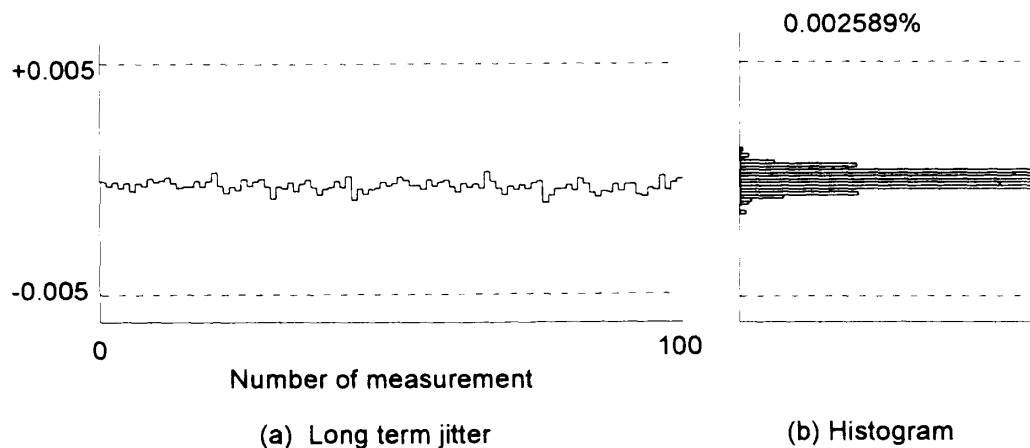


Fig.10 Long term jitter of the assembly using the shrink fitter

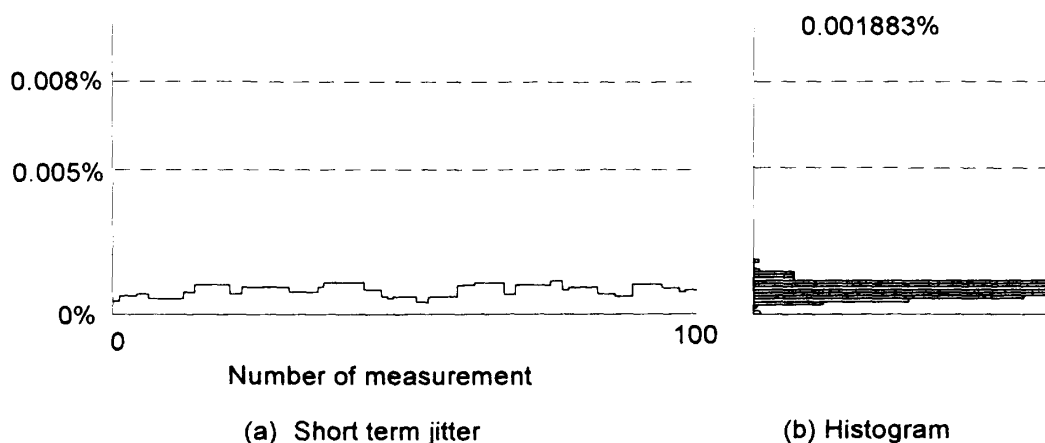


Fig.11 Short term jitter of the assembly using the shrink fitter

図13はシュリンクフィッターを用いた接合体の面倒れ特性の測定値である。その値は、5.41秒で従来方式の約13%であった。したがって、従来方式の約1/10に面倒れ特性を低下させることができたことになる。また、図12に見られるような明確な変動周期もなくなった。

シュリンクフィッターで接合された接合体は、現在のところ1年半の間連続運転を行っているがジッター値と面倒れ特性値の変化は観察されていない。このことは、従来必要であったメンテナンスを不要にすることを意味している。したがって、シュリンクフィッターはポリゴンミラーの接合を簡素化すると同時に、スキャナーの高精度化と高信頼化をもたらすものであるということがいえる。

5. 考 察

シュリンクフィッターを用いた接合法は、接合工程を簡素化しミラー反射面の動的特性をかなり改善する

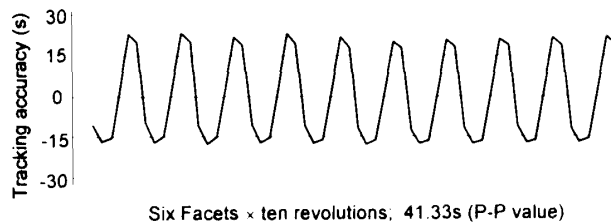


Fig.12 Tracking accuracy of the conventional assembly : 41.33s

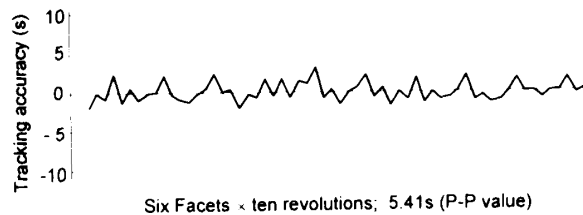


Fig.13 Tracking accuracy of the assembly using the shrink fitter : 5.41s

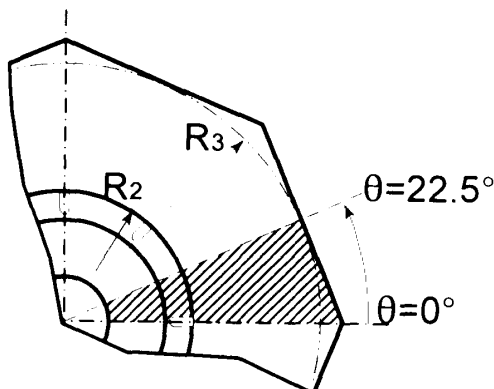


Fig.14 2-dimensional FEM model of the assembly

とはいえ、接合後のミラー反射面の再仕上げ加工が必要である。接合後もミラー反射面のPV値が許容値におさまるようであれば、再仕上げ加工が省略でき接合工程のさらなる簡略化が可能となる。以下ではそのことについて考察する。ここで強調しておきたいのは、従来の接合法では同一条件で接合しても、ミラー反射面形状が接合体ごとにまちまちになってしまうために、そもそもこのような考察を行うことは不可能であった。

接合体の変形を解析するために、平面応力問題として2次元FEM解析を行った^{7),9),11)}。解析対象は表1の8面のポリゴンミラーを用いた接合体で、80 μ mの均一シメシロで接合されているものとした。さらに、接合前のミラー反射面の平面度は0nmであり、接触面には摩擦が作用しないものと仮定した。図14に示すように変形の対称性より全円周の1/16を解析対象とした。

その計算結果を図15に実線で示す。計算されたPV値719nmは実験値の695nm(図6)に近いことが分かる。ミ

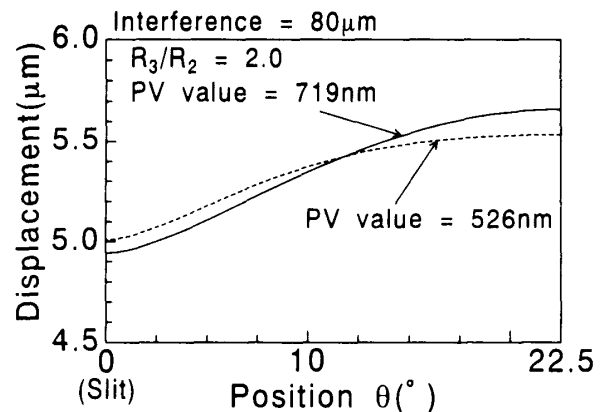


Fig.15 Profile of the mirror end surface ($R_3/R_2=2.0$)

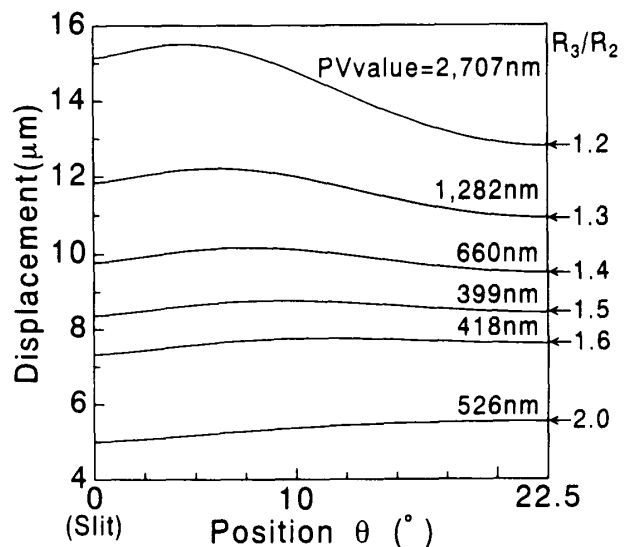


Fig.16 Profile of the mirror end surface for various radius ratios

ラー反射面中央部($\theta=22.5^\circ$)が頂点部分($\theta=0^\circ$)に比較してより多く変形している。そこで、頂点に対応する内面の節点に集中荷重を加えることにした。加える荷重の合計は先の均一シメシロの計算と同じ値とした。結果を図15の破線で示す。PV値は改善されたがサンブナンの原理が働くために依然としてミラー反射面中央部の変形が大きくなる。そこで、ポリゴンミラーの半径方向の厚みを小さくした。これは、荷重作用点であるポリゴンミラーの内径(図3, R_2)とミラー反射面を近づけることにより、頂点の変形がミラー反射面の中央部より大きくなることが考えられるからである。

ポリゴンミラーの内径を固定し、内接円の寸法(図3, R_3)を変えることで、半径比を R_3/R_2 を1.2-2.0の範囲で変化させた。それぞれに均一なシメシロ $80\mu\text{m}$ を与えたときには、全てミラー反射面は凸型になった。次に頂点の内面に集中荷重を作用させた。集中荷重の合計は、それぞれの半径において計算された均一シメシロのときの接触力の和と同じ値にした。計算結果を図16に示す。ポリゴンミラーの外径を小さくすることで頂点の変位が大きくなり、結果としてPV値が低下した。半径比で $R_3/R_2=1.5$ でPV値は最小となり 399nm となった。しかし、それ以上の半径比では頂点の変位が最小となってしまった。よって、半径比 R_3/R_2 が1.2-1.4の範囲にあるときを考える。

図16から、ポリゴンミラーの頂点の変位を減少させ、ミラー反射面の中央部の変位を増加させれば、さらなるPV値の減少ができる。そこで、頂点とミラー反射面の中央部に対応する内面にそれぞれ集中荷重を作用させた。両集中荷重の合計は均一シメシロ $80\mu\text{m}$ のときの接触力の和と同じである。結果は、半径比 $R_3/R_2=1.2$ のとき、集中荷重を頂点：中央=7:2の割合で作用させた場合のPV値が 399nm と最小であった。

以上のことより、ポリゴンミラーを半径方向に薄くして、かつシメシロの分布を調整することで、接合後のミラー反射面の平面度を許容値の 100nm に保つことができないということが分かった。

6. 結 言

現在用いられているポリゴンミラー接合法のネジ止めは複雑でコストが高い上に使用中のミラー反射面の平面度を保証するものではなかった。これらの問題点は、シュリンクフィッターという最近開発された新しい機械要素を用いることですべて解決できた。

シュリンクフィッターを用いた接合体のジッターや面倒れの動的特性は大きく改善された。ジッターと面倒れは、それぞれ従来方式の約1/5と約1/10の値となった。さらに、従来必要とされていたメンテナンスフリー化を達成した。

一方、ミラーの再仕上げ加工省略の可否について、計算機シミュレーションを行い考察したが、ポリゴンミラーを半径方向に薄くして、かつシメシロの分布を調整することでは、接合後のミラー反射面の平面度を許容値の 100nm に保つことができないことが分かった。

謝 辞

計算に際して協力頂いた浅井広志君(本学, 大学院生)に感謝申し上げます。本研究の一部は、文部省科学研究補助金No. 06750143によることを付記する。

文 献

- (1)田中,機械の研究,40-9,(1988),997-1001.
- (2)小野,JSME Int. Journal,Ⅲ,32-4,(1989),511-524.
- (3)市原,トライボロジスト,36-9,(1991),665-671.
- (4)早瀬・磯部・小俣・紺野,機論,60-576,C(1994),2679-2683.
- (5)紺野,第30回レザ-熱加工研究会論文集,(1993),221-234.
- (6)新田・木越・加藤,機論,55-510,C(1989),417-423.
- (7)新田・原,機論,55-520,C(1989),3062-3068.
- (8)新田・草間・原,機論,58-555,C(1992),3326-3333.
- (9)新田・堀内,機論,61-584,C(1995),1640-1645.
- (10)浦川・河崎・幸野・吉嗣・三谷・山本,National Tech. Rep.,33-5,(1987),564-573.
- (11)新田・紺野,Int. Tribology Conf., AUSTRIB94,(1994),685-690.