

シュリンクフィッタを用いたポリゴンミラーの超精密接合* (接合面の真円度がミラー反射面に及ぼす影響)

新田 勇*¹, 菅野明宏*², 小俣公夫*³

Ultra-Precision Method of Joining a Polygon Mirror Using a Shrink Fitter (Effect of Out-of-Roundness of Joining Surfaces on the Flatness of Mirror Surfaces)

Isami NITTA, Akihiro KANNO and Kimio KOMATA

In a previous paper, a new simple and ultra-precision method of joining a polygon mirror onto a SiC self-acting air bearing has been developed by using a shrink fitter as a new machine element. In this new joining method, mirror surfaces were deformed beyond a desired flatness of 100 nm, because of contact pressure applied at inner surface of the polygon mirror. This distortion of the mirror surfaces is considerably affected by form errors or surface accuracy of the joining surfaces and sizes of the polygon mirror. Therefore a secondary cut after the joining is needed to finish the mirror surfaces to the desirable level. In order to dispense with the secondary cut, we must know how the form errors affect the deformation of the mirror surfaces. In this paper, we considered only an out-of-roundness as the form error. The effect of the out-of-roundness on the deformation of the mirror surfaces was examined theoretically and experimentally. The calculated profiles of the mirror surfaces were in agreement with the experimented ones. In addition, the range of the out-of-roundness, in which the mirror surfaces were not deformed seriously, was shown in a 3-dimensional diagram.

Key Words: Machine Element, Fixing Element, Shrink Fitter, Out-of-Roundness, Self-acting Air Bearing, Polygon Mirror

1. 緒 言

レーザースキャナーは、レーザービームを広範囲に走査させるために使われ、デジタル複写機やレーザービームプリンターの解像度を左右する超精密機器である。その構成は、大別すると超精密部品であるアルミポリゴンミラーと空気動圧軸受になる。前報⁽¹⁾ではSiC空気動圧軸受とアルミポリゴンミラーとの超精密接合にシュリンクフィッタを適用することで、ジッターと面倒れが大幅に改善できることを報告した(図1)。

従来光学部品に締りばめを適用することはタブーとされていたが、シュリンクフィッタを用いることでそれが可能になった。すなわち、本締結技術は従来技術のブレイクスルーでもある。締りばめは、機械工学の分野ではよく使われている信頼性のある接合技術であり、大量生産に適用できる他のどの方法より心出し精度がよい。そのため、高精度なレーザースキャナーを組み立てるのには最適な接合技術である⁽²⁾。

しかし、シュリンクフィッタを用いた接合方法では、接合後に各々のミラー反射面が異なった変形をして平面度が許容値を超える。したがって、接合後にミラー反射面を二次加工して100nm程度の平面度に仕上げる必要があった。この二次加工を接合前に行うことがで

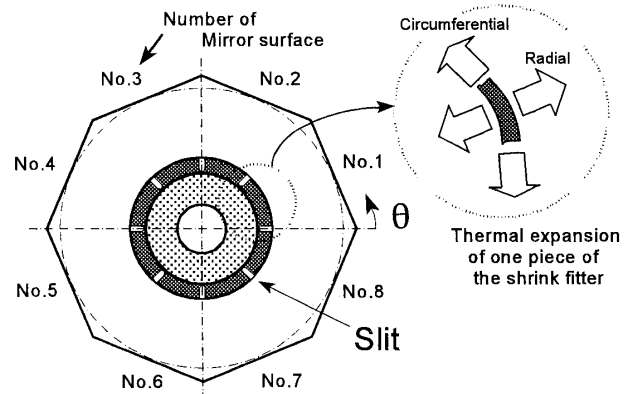


Fig.1 Principles of a shrink fitter

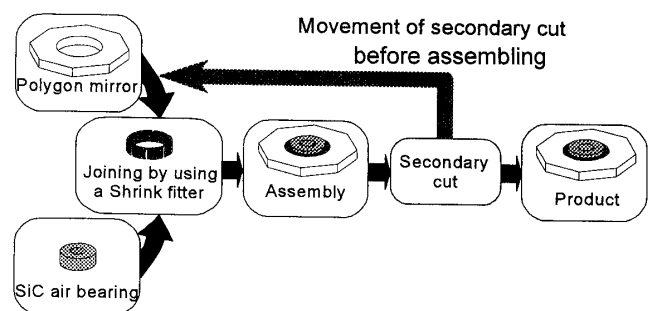


Fig.2 Procedure of an assembling and a secondary cut

* 原稿受付 1997年7月17日。

*¹ 正員, 新潟大学大学院自然科学研究科 (☎ 950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。

*² 学生員, 新潟大学大学院。

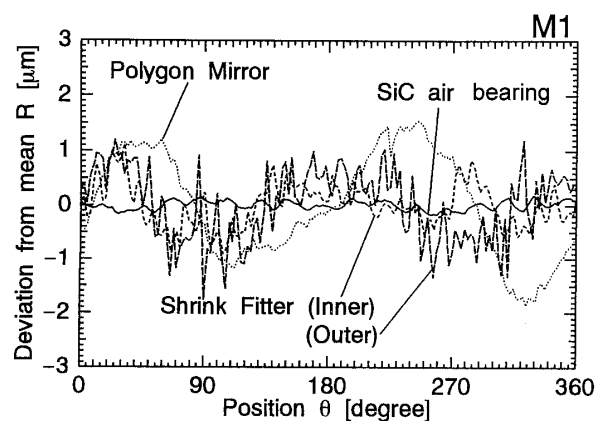
*³ 荏原総合研究所 (☎ 251-8502 藤沢市本藤沢4-2-1)。

きれば、接合工程をより簡略化することが可能になる(図2)。接合後に各々のミラー反射面が不均一に変形する原因としては、接合面の形状誤差(真円度や円筒度など)が考えられる。これまで用いられた接合方法であるばね止やねじ止ではポリゴンミラーの上下端面を用い

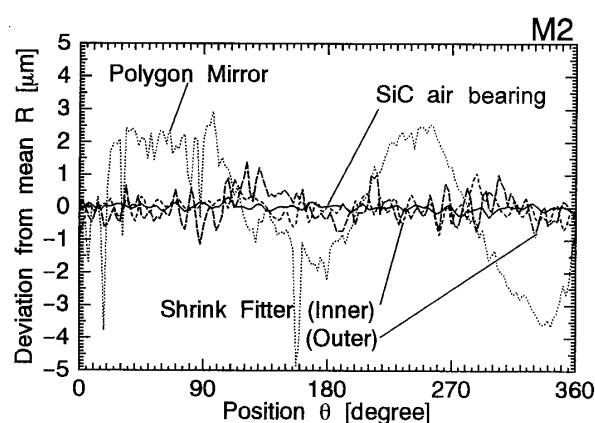
Table 1 Sizes [mm] and mechanical properties of each element

Element	Radius		Thickness	Young's modulus	Poisson's ratio	$\alpha(1/^{\circ}\text{C})$
	Inner	Outer				
SiC bearing	5.5	11	10	336GPa	0.2	3.8×10^{-6}
Shrink Fitter	11	14	5	2.40GPa	0.4	24×10^{-6}
Polygon Mirror	14	28	5	69.0GPa	0.34	56×10^{-6}

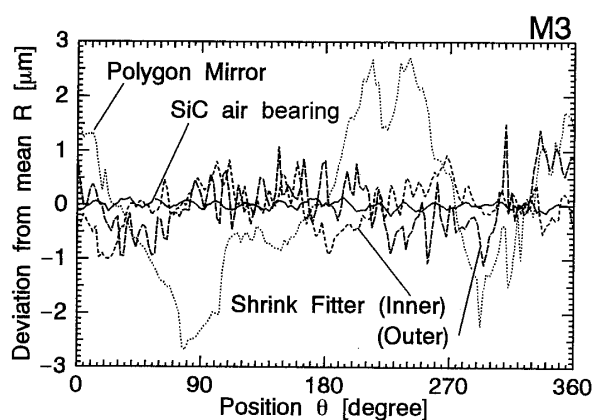
α : Coefficient of thermal expansion



(a) M1



(b) M2



(c) M3

Fig.3 Out-of-Roundness of each shrink fitted assembly

ていたため、ポリゴンミラーの内周面やSiC動圧軸受の外周面の形状誤差がミラー反射面に及ぼす影響についてはほとんど検討されていなかった。

そこで、本論文では形状誤差の中で真円度を取り上げ、接合面の真円度がミラー反射面の変形に及ぼす影響を実験と数値解析の両面より調べた。さらに、真円度を広範囲に変化させた場合についての数値解析を行い、真円度の影響を明らかにした。

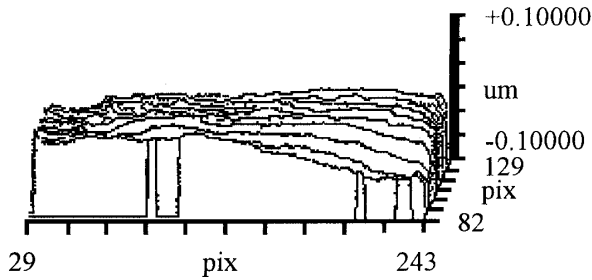
2. 実験

実験に用いたポリゴンミラーの面数は8である。各部材の寸法と機械的特性値を表1に示す。ポリゴンミラーの外半径28mmとは八角形の内接円半径のことである。材質等は前報⁽¹⁾のもと同じである。後の数値解析のために、SiC空気動圧軸受、シュリンクフィッタ(ポリイミドTI-3000)、ポリゴンミラー(アルミ合金)各々6個の試料について接合面の真円度を測定した。そして測定した記録紙上の真円度データをディジタイザを用いて数値データに変換した。真円度の測定箇所は、各部材とも軸方向の真中とした。

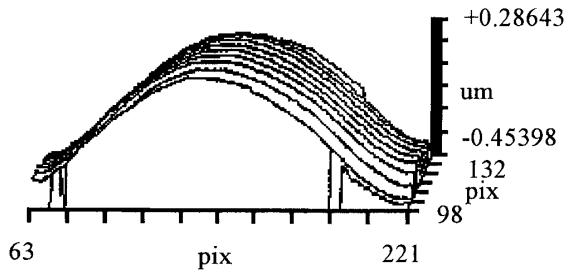
その後締め付け接合を行った。接合の手順は以下の通りである。始めに、エンドミルにて外周面よりシュリンクフィッタに幅約1mmのU字のスリットを入れた。スリット数はポリゴンミラーのミラー反射面数と同じ8とした。シュリンクフィッタを加熱して、SiC動圧軸受に締め付けした。次に、SiC動圧軸受とシュリンクフィッタの接合体に加熱したポリゴンミラーを締め付けした。このとき、ポリゴンミラーの頂点部はシュリンクフィッタのスリット部に合うようにした(図1参照)。シメシロは直径差で約72 μm とした。最後に、シュリンクフィッタのU字形スリットの底部を細い金ノコで完全に切断した。接合の際、加熱が不十分だと最後は圧入で押し込む必要がある。その場合接合体は軸方向の摩擦力を受けることになり、摩擦力の影響を考慮していない数値解析との比較ができなくなる。このほかにもスリット位置とポリゴンミラー頂点部がずれたものもあり、6個の接合体中3個が接合不良すなわち数値解析との比較が不可能となった。

接合が成功した3個の接合体を便宜上M1, M2,

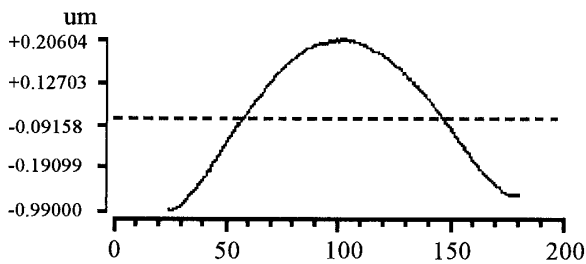
M3と呼ぶ。M1～M3の各部材の真円度の測定結果を図3(a)～(c)に示す。横軸は円周上の位置を表わし、0～45°まではミラー反射面1(図1参照)であり、そこから45°おきにミラー反射面2～8となる。各部材の真円度は平均半径からのずれとして表されている。SiC動圧軸受の真円度は約0.3 μm である。シュリンクフィッタ内外周面の形状は、表面あらさの影響を受けてSiC動圧軸受より大きな凹凸となった。その真円度はおよそ2～3 μm である。ポリゴンミラーの内周面形状は低周波で変化しており、波数2の正弦関数と見ることができる。その真円度はおよそ4～8 μm である。特に接合体M2のポリゴンミラーは深い加工傷等があり、そのために真円度の値が大きくなっている。全体的にポリゴンミラーの内面形状は、他の2つのものより低周波の変化を示しているが、加工の際のチャッキングが影響を及ぼしているためと考えられる。



(a) before the assembling, the PV value 82 nm (Phase map)



(b) after the assembling, the PV value 740 nm (Phase map)

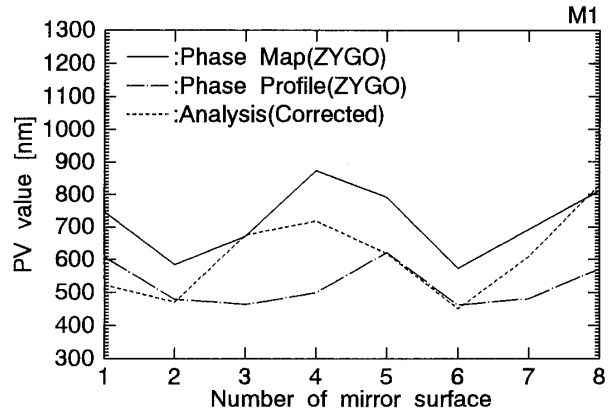


(c) after the assembling, the PV value 636 nm (Phase profile)

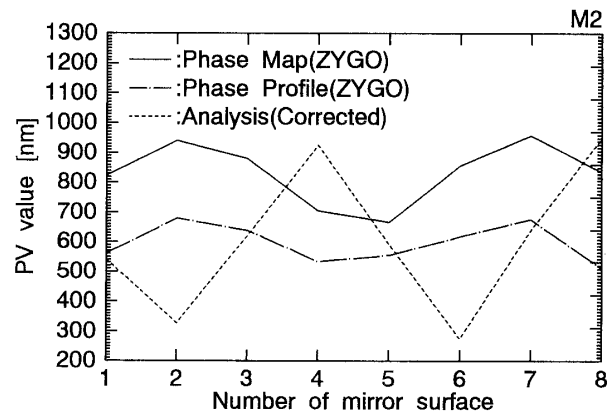
Fig.4 Profiles of mirror surfaces measured by ZYGO

接合不良となった3個の接合体の真円度においても同様の傾向が見られた。

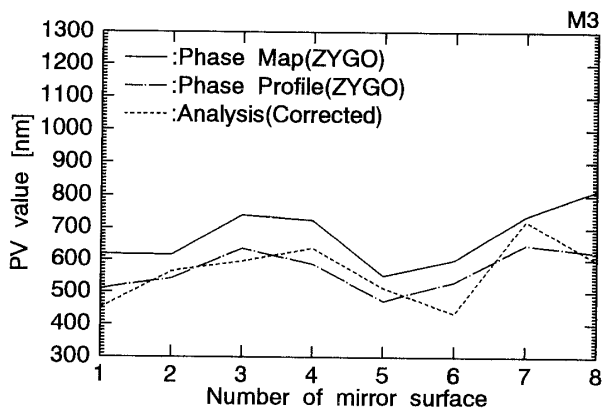
接合体M1～M3の各ミラー反射面形状をレーザ干渉計(ZYGO)で測定した。図4(a)は接合前のミラー反射面形状の一例である。図4(b),(c)は接合後の同じミラー反射面形状である。図4(b)のPhase mapはミラー反射



(a) M1



(b) M2



(c) M3

Fig.5 PV values of each mirror surface measured by ZYGO

面全体の測定結果である。すなわち、手前から順に奥に向って断面曲線をつないだものとなっている。これに対して図4(c)のPhase profileはphase mapのまん中の断

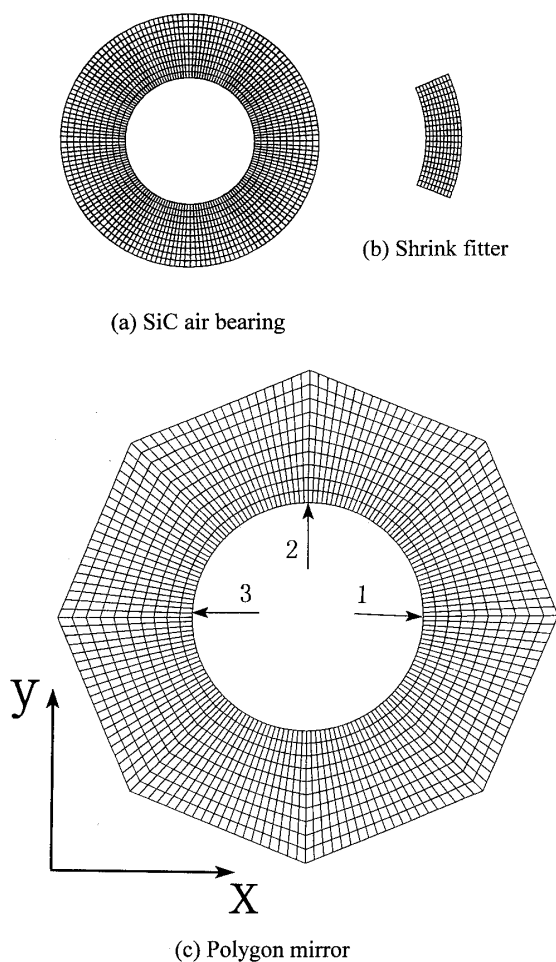


Fig.6 FEM mesh and boundary conditions

面曲線である。接合前に、各ミラー反射面はフライカットにより100nm前後の平面度に仕上げられた。この例では、シメシロ約72 μm (直径差)で締めこめされることにより、ミラー反射面の平面度はPV値(Peak to Valley)で約740nmとなった。

図5(a)~(c)に、ZYGOで測定した接合体M1~M3の各ミラー反射面のPV(Peak-to-Valley)値を示す。仮に真円度が0であれば、変形の対称性により各ミラー反射面は同一に変形し、ほぼ同じPV値を有するはずであるが、実際には各ミラー反射面のPV値は異なる。このように各ミラー反射面の変形にばらつきが生じているのは、接合面の形状誤差等の影響であると考えられる。

3. 数値解析

3.1 解析方法 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。締めこめに及ぼす真円度の影響を考慮した研究はあるが、主に接合強度に着目したもの^{(3),(4)}がほとんどであり、外周面の数百nmレベルの変形に与える影響を調べた例は

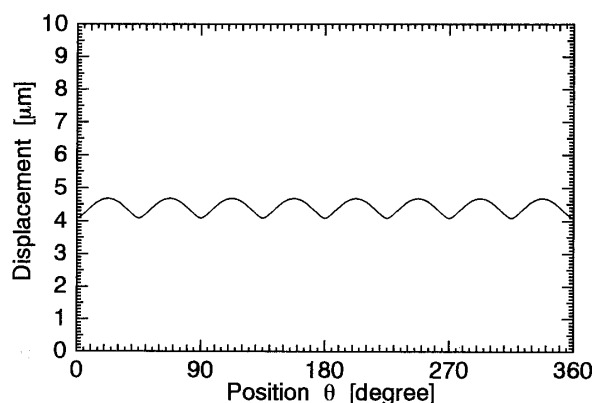


Fig.7 Profiles of the mirror surfaces, Out-of-Roundness=0 μm

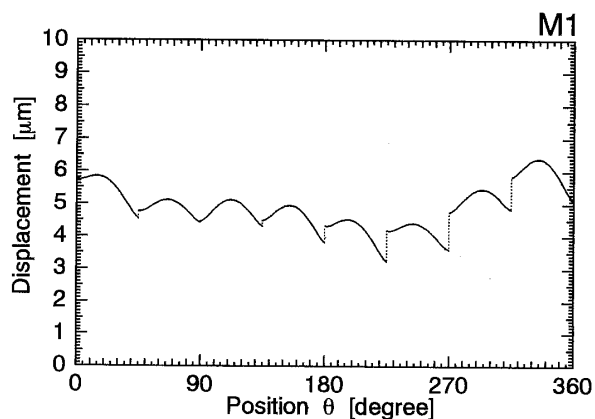


Fig.8(a) Profiles of the mirror surfaces of M1

ない。解析した各部材の寸法と機械的特性値は表1の値を用いた。各部材の要素分割方法を図6(a)~(c)に示す。SiC動圧軸受とポリゴンミラーの円周方向は160分割とした。シュリンクフィッタの円周方向は20分割にした。シュリンクフィッタのスリット幅は約1.0mmである。各部材とも半径方向は11分割にした。

接触面上の圧力分布はポイントマッチング法を用いて求めた⁽⁵⁾。はじめに、FEMを用いて各部材の接触面の影響係数を求めた。拘束条件としては各部材とも図6(d)のように、ある1つの節点をx,y方向に拘束し、その点にきわめて近いもう1点をy方向に拘束した。したがって、図6(a)~(c)で各部材は半径方向に10分割であるように見えるが、内側から6番目の要素のところを微小な幅で分割しているため、実際には先に述べた11分割である。

シメシロはSiC動圧軸受とシュリンクフィッタの接触面、シュリンクフィッタとポリゴンミラーの接触面ともに半径差で18 μm (直径差では全体で72 μm)として、

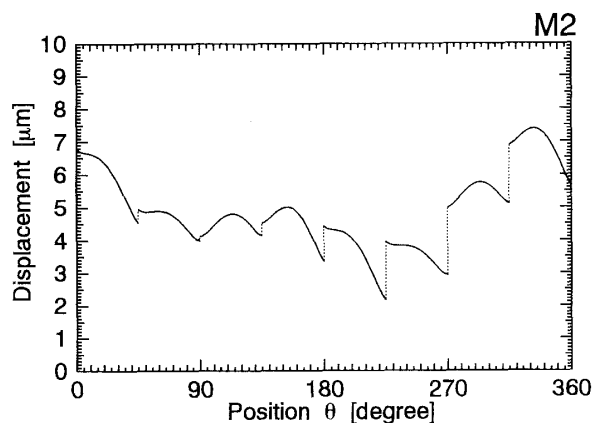


Fig.8(b) Profiles of the mirror surfaces of M2

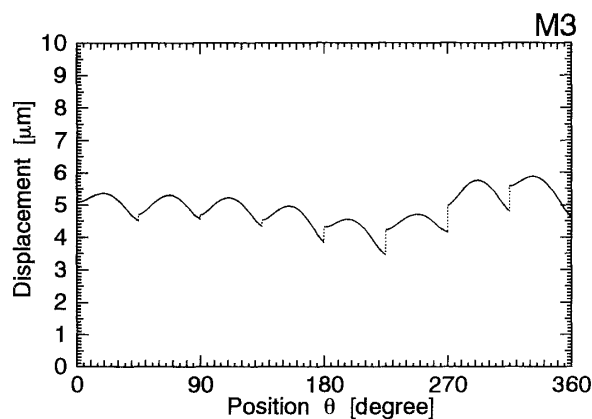


Fig.8(c) Profiles of the mirror surfaces of M3

それに測定された真円度データを加えることにした。ポイントマッチング法では、各部材の影響係数を求め接触面でのシメシロを与えれば、接触圧力を未知数とする多元連立一次方程式が得られるので、それを解くことにより、接触面の接触圧力が求められる。ここでは接触面で摩擦が存在しないと仮定した。

求めたシュリンクフィッタとポリゴンミラーの接触面の圧力をポリゴンミラーの内周面に作用させ、接合後のミラー反射面の変位をFEMを用いて求めた。この場合、図6(c)の矢印1,2,3の節点をそれぞれy,x,y方向に拘束した。求めた接触圧力が作用するとき3つの拘束節点に作用する反力はほとんど0となることを確認した。つまり、それらの節点を拘束したことが計算結果に及ぼす影響は無視できるほど小さい。

3.2 解析結果 最初に真円度が0の場合の解析を行った。解析結果を図7に示す。横軸は、図3と同じ意味を持つ。縦軸の変位とは各ミラー反射面の変形量を表わすが、実験値と比較を容易にするために、変形量を変形前のミラー反射面の法線方向成分と接線方向成分に分解し、その法線方向成分を表している。真円度が0であるので全てのミラー反射面が同一の形状になった。すなわち、ミラー反射面の頂点で約4.1 μm の変位、中央部で約4.7 μm の変位である。PV値は606nmであった。次に、接合体M1~M3の真円度データを考慮して解析を行った。解析結果を図8(a)~(c)に示す。実験結果と同様に、真円度の影響により各ミラー反射面の変形にばらつきが生じることがわかる。また、接合体M2のミラー反射面1などのように左右非対称の変形が著しく、ミラー反射面全体が右側に傾いているものもある。そこで、各ミラー反射面の傾きを補正してPV値を算出した。その結果を図5(a)~(c)の破

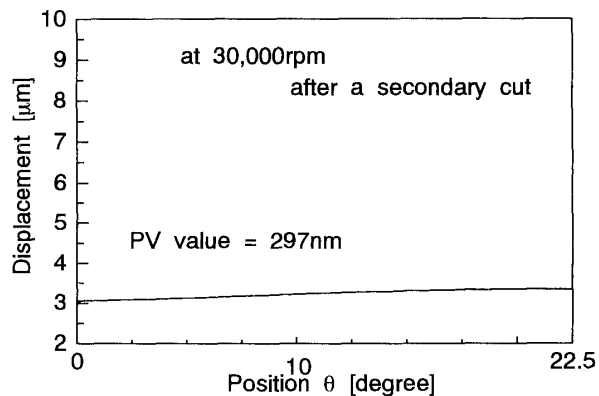


Fig.9 Profile of the mirror surface at a rotational speed of 30,000rpm, Out-of-Roundness=0 μm

線で示す。606nmからのずれが、各ミラー反射面が接合面の真円度から受けた影響である。

シュリンクフィッタを用いて接合されたポリゴンミラーは30,000rpmといった高回転域でも使用されている。また印刷品質に関しては、1,693dpi(リアル)といった優れた解像度を示している。ここで、回転中のミラー反射面のPV値について考えてみる。この接合体は、接合後の二次加工によりミラー反射面がPV値で100nm以下に仕上げられるが、回転中は遠心力が作用することによりミラー反射面はその分変形する。図9は停止時のミラー反射面の平面度を0nmと仮定して、30,000 rpm回転時のミラー反射面形状を2次元FEM解析した結果である。変形の対称性を考慮して全体の1/16を解析対象とした。すなわち、横軸の0°がポリゴンミラーの頂点部に、22.5°がミラー反射面中央部に対応する。ミラー反射面中央部の変位が大きく凸型型に変形していることが分かる。PV値は297nmであった。したがって、実際の運転状態ではミラー反射面は遠心力による変形分約300nmに、停止時の約100nm(工作機械の加工精度)をプラスした約400nmの平面度になっているものと推察される。図7の真円度を0と仮定した計算では、締めばめ接合しただけでPV値は606nmとなるので、真円

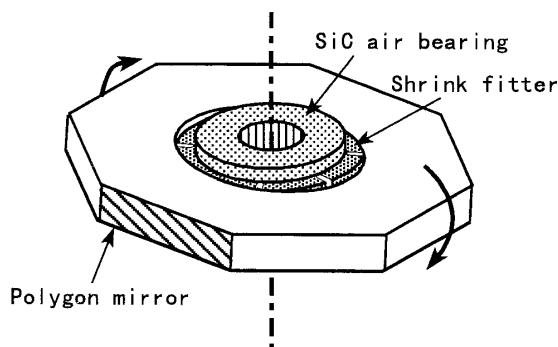


Fig.10(a) Exaggerated diagram of assembly M2

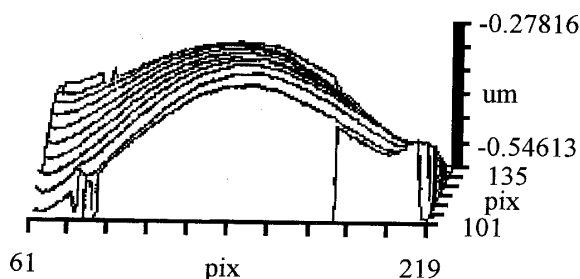


Fig.10(b) Profile of the mirror surface of M2

Table 2 Effect of Out-of-Roundness on the Flatness of Mirror Surfaces [nm]

	M1	M2	M3	average
SiC bearing	3.9	2.3	2.0	2.7
Shrink Fitter	43.9	17.6	62.8	41.4
Polygon Mirror	119.8	137.4	106.4	121.2

度を0としただけでは接合後のミラー反射面の二次加工を省略することができないことが分かる。

4. 実験結果と数値解析結果の比較

図5に示した実験結果と数値解析結果の比較を行う。解析は2次元なので、3次元的な誤差(円筒度など)の影響が比較的少ないと思われるPhase profileとの比較を行う。接合体M2を除けば、実験結果と数値解析結果は比較的良好に一致している。しかしながら、M1の解析結果は実験結果と比べて平均で115nm程度大きくなっている。また、M3については平均で50nm程度のずれが生じている。この原因としては、接合前のミラー反射面の平面度が解析上は0nmであるのに対し、実際には80~90nm程度の平面度が存在すること等が考えられる。加えて、解析では全く考慮していない円筒度の影響がある。

接合体M2については実験結果と数値解析結果が大きく異なった。図10(b)にM2のミラー反射面のZYGOによる測定の例を示す。ミラー反射面がねじられたように歪んでいることが分かる。したがって、実験結果と解析結果の差は、図10(a)にかなり誇張して示すようにポリゴンミラーの回転軸とSiC動圧軸受の回転軸が傾いたように取り付けられたためと考えられる。図10(b)は、斜線で示したミラー反射面の測定結果である。

上述の回転軸の傾きは、すべての接合体に存在する

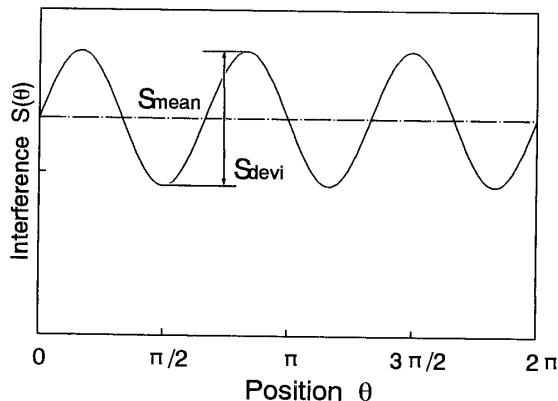


Fig.11 Interference as a function of circumferential position

が、他のものはその量が小さいためにミラー反射面に形状にあまり影響を与えなかったと考えられる。

以上の比較より、接合面における真円度を考慮した数値解析は、実際のミラー反射面形状を約115nmの誤差範囲でシミュレーションできると考えられる。

実験に用いた各部材の加工は特別の注意を払って行ったわけではなく、生産ラインで通常行われている加工精度で加工した。その結果、接合体M1, M3では真円度による平面度の悪化は、最大で約270nmとなった。したがって、この数値は形状誤差が平面度に与える影響の大きさの一応の目安となると考えられる。

5. 考 察

実験結果との比較により、本研究で用いた解析手法がある程度実験結果をシミュレートできることが確認されたので、種々の真円度に対して平面度がどのように影響を受けるか調べた。

最初に、SiC動圧軸受の外周面の真円度、シュリンクフィッタの内外周面の真円度およびポリゴンミラー内面の真円度がそれぞれ単独ではどれほどミラー反射面のPV値を変化させるか調べた。表2に結果を示す。図3の真円度の測定結果より予測されるようにポリゴンミラーの真円度の影響が一番大きいことが分かる。

そこで、以下ではポリゴンミラーの真円度のみを変化させることにした。先に述べたように、ポリゴンミラー内周面の真円度は波数2の正弦関数に近似できる。また、SiC動圧軸受とシュリンクフィッタの真円度はポリゴンミラーのものに比べて値が小さくかつ変動周期が小さいので、ミラー反射面の変形に及ぼす影響は相対的に小さい。

したがって、SiC動圧軸受とシュリンクフィッタの真円度を無視して、ポリゴンミラーの内面形状を波数2の正弦関数としても、現在用いられている接合体の接合

面における形状誤差をある程度モデル化できると考えられる。そこで、真円度の変化によるミラー反射面形状の傾向を調べるために、その正弦関数の波数と振幅を変化させることにした。

シメシロは、SiC空気動圧軸受とシュリンクフィッタの接触面では半径差で20 μm 、シュリンクフィッタとポリゴンミラーの接触面では次式に従って変化すると仮定した。

$$S(\theta) = S_{\text{mean}} + (S_{\text{devi}}/2)\sin(N\theta) \quad (1)$$

ここで、

$S(\theta)$: θ の位置のシメシロ (図12参照)

S_{mean} : シメシロの平均値 (20 μm)

S_{devi} : 半径法による真円度

N : 波数

である。

図11に、 $N=3$ におけるシメシロの変化の様子を示す。図12に、その場合のポリゴンミラーの内面形状を誇張して示す。 N を1~5まで、また S_{devi} を1~10 μm まで変化させて数値解析を行い、ミラー反射面の形状変化を調べた。

解析結果を図13に示す。横軸は真円度の波数 N で、奥行き方向の軸は S_{devi} を表している。縦軸は、各々の真円度に対応する8つのミラー反射面の最大PV値から、接合面が全て真円である場合の673nmを引いた値である。すなわち、真円度の影響でミラー反射面のPV値がどれだけ悪化したかを表している。 $N=1$ の形状は、ポリゴンミラーの内周面が真円を保ったまま偏心している場合であるので、ミラー反射面の変形への影響はなかった。

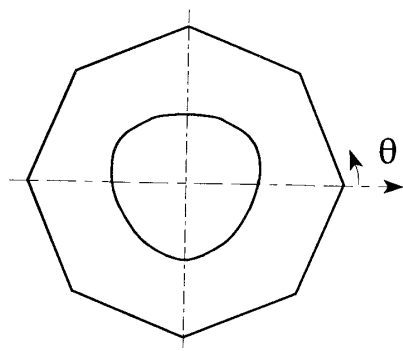


Fig.12 Exaggerated inner surface profile of the polygon mirror

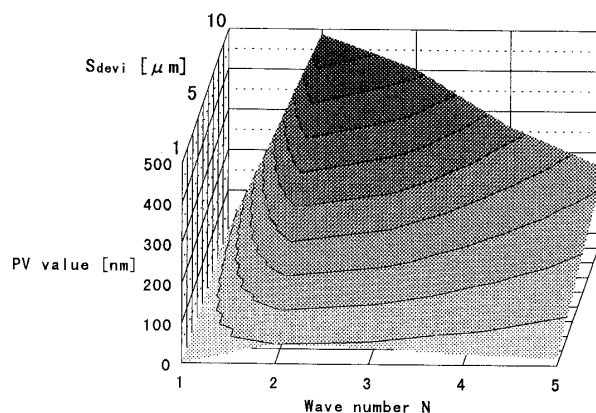


Fig.13 3-dimensional diagram of the effect of the Out-of-Roundness on the flatness of the mirror surfaces

S_{devi} を同一として波数 N のPV値に及ぼす影響を見ると、 $N=5,4,3,2$ の順に影響が小さくなることが分かる。また、 $N=1$ 以外では、 S_{devi} が大きくなるほどミラー反射面の変形への影響が大きくなった。

6. 結 言

現在、シュリンクフィッタを用いてポリゴンミラーをSiC動圧軸受に接合する場合、接合後にミラー反射面の二次加工が必要である。本論文では、この接合後の二次加工を省略する研究の一環として、接合面の真円度がミラー反射面の変形に及ぼす影響を実験により調べた。

また、実験を模擬した数値シミュレーションを真円度のみを考慮して行ったところ、比較的良好に実験結果と一致した。

本解析手法を用いて、ポリゴンミラーの内周面形状が正弦関数的に変化すると仮定して、広い範囲の真円

度に対してミラー反射面の平面度を求め、真円度の影響を数値的に明らかにした。

謝 辞

本研究の一部は、文部省科学研究補助金 No.08650168によることを付記する。

文 献

- (1)新田・古川・小俣・紺野,機論,62-599,C(1996),2785.
- (2)高島・小俣・藤井,光学,25-12,(1996),724.
- (3)久門・三好,機論,39-320,第3部,(1973),1342.
- (4)新田・下田・石橋・加藤,機論,54-503,C(1988),1564.
- (5)新田・原,機論,55-520,C(1989),3062.