

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* (回転時のミラー反射面の平面度のための最適形状)

新田 勇^{*1}, 浅井 広志^{*2}
小俣 公夫^{*3}, 紺野 大介^{*4}

Ultra-Precision Method of Joining a Polygon Mirror Using a Shrink Fitter (Optimum Shape for Flatness of the Mirror Surface in Rotation)

Isami NITTA, Hiroshi ASAI, Kimio KOMATA and Daisuke KONNO

In a previous paper, we have developed a ultra-precision method of joining an aluminum polygon mirror and a SiC self-acting air bearing using a shrink fitter. However, after the joining, the mirror surfaces need to be refinished by an ultra-precision lathe to the flatness of under 100nm, because the flatness of the mirror surfaces will deteriorate beyond the allowable level. In this paper, we tried to maintain the allowable flatness of the mirror surfaces even after the joining by changing the shape of the polygon mirror. Optimum shapes were theoretically sought by 2-dimensional FEM analysis through trial and error. After some 23 shapes were examined, we succeeded in finding the optimum shape that maintain the flatness below 146 nm at a rotational speed of 30,000 rpm. The optimum shape obtained by the 2D-FEM analysis was examined by the 3D-FEM analysis.

Key Words: Machine Element, Fixing Element, Shrink Fitter, Polygon Mirror, Optimum Shape

1. 緒 言

著者らは、シュリンクフィッタを用いることで、ポリゴンミラーとSiC空気動圧軸受を超精密に接合できることを示した¹⁾。従来より用いられているネジ止やばね止では、セラミックスと金属の熱膨張差に起因するミラー反射面の形状変化に悩まされていたが、その問題も解決できた(図1)。

シュリンクフィッタを用いて締めると、ポリゴンミラー内面が接触圧力を受けて外側に弾性変形する。これにより、ミラー反射面も数 μm 程度半径方向に変形し、ミラー反射面の平面度が許容値を越える結果になっていた。そのため、接合後ミラー反射面を二次加工して許容平面度に戻す必要があった。シュリンクフィッタを用いた接合は、ネジ穴の加工がいらないなど、従来のネジ止に比べて接合の工程が少ない。しかし、さらに接合工程を簡素化するためには、接合後の二次加工を省略することを検討しなければならない。

前報²⁾では、接合後のミラー反射面の平面度に及ぼす接合面の真円度の影響を理論と実験の両面より検討し明らかにした。これも、二次加工を省略する研究の一環である。しかし、シメシロが大きくなると例え接合

面が真円であったとしても、ミラー反射面の平面度は許容値を超えるので二次加工をしなければならない。これより、シメシロが大きい場合は仮に接合面の形状誤差をゼロにすることができたとしても、二次加工を省略することは不可能で別の工夫が必要であることが

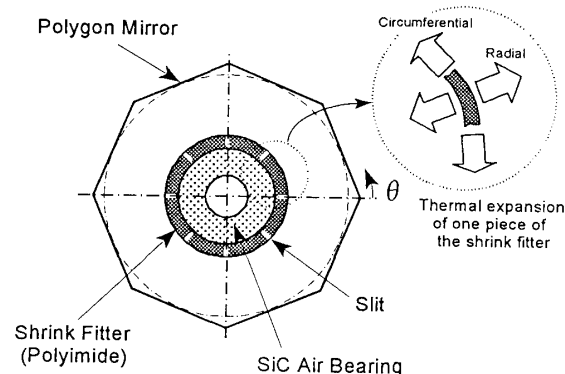


Fig.1 Principles of a shrink fitter

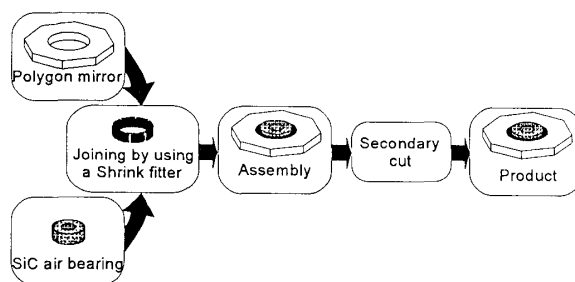


Fig.2 Flowchart of the assembling

* 原稿受付 1998年1月5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 正員, (株)不二越(〒930-0965 富山市不二越1-1-1)。

*³ SII(〒275-0004 習志野市屋敷4-3-1)。

*⁴ 正員, SII(〒261-8507 千葉市美浜区中瀬1-8)。

分かる。

本論文では、ポリゴンミラーの形状を変えることで、回転中にその平面度を許容値以内に保つことができるかを数値計算により理論的に検討した。図2は、現在の接合工程における二次加工の位置付けを表している。

2. 解析方法および手順

解析方法として影響係数法であるポイントマッチング法を使用した。解析方法の詳細は、既報³⁾に示してあるので、ここでは概略を述べるにとどめる。変形の対称性を考慮して、図3に示す接合体の1/16を解析対象とした。図中、各要素の縮尺は同一ではない。表1,2に解析に使用した各部材の寸法と材料特性値を示す。

FEMを使用して、シュリンクフィッタの内側接触面および外側接触面の各節点に単位接触荷重を与えたときの影響係数を求めた。同様に、SiC空気動圧軸受とポリゴンミラーの影響係数も求めた。シュリンクフィッタの半径方向の剛体変位を考慮し、かつシュリンクフィッタに作用する半径方向の力の釣合いを付帯条件として、影響係数を基に変位に関する多元連立一次方程式を作成した。シメシロベクトルを与え、この方程式を解くことにより接触面の各節点の半径方向の接触荷重(接触圧力)を求めた。この接触荷重がポリゴンミラーに作用するものとして、再度FEM解析を行い、

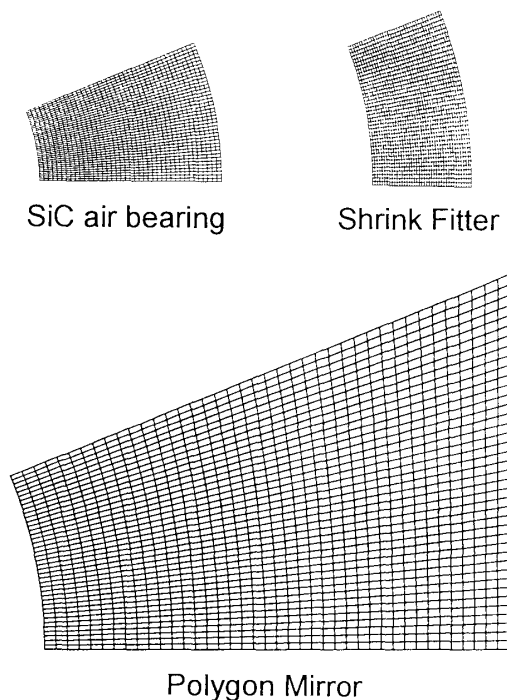


Fig.3 Meshes of each element for 2-D FEM

Table1 Sizes of each element

Elements	Radii(mm)		Thickness(mm)
	Inner	Outer	
SiC Bearing	5.5	11	10
Shrink Fitter	11	14	5
Polygon Mirror	14	28*	5

*: radius of the inscribed circle

Table 2 Mechanical properties of each material

Materials	Young's modulus(GPa)	Poisson's ratio	Coeff.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}

縮りばめ後のミラー反射面の変位を求めた。以上の解析においては接合面に摩擦は働かないものとした。

ポリゴンミラーの回転数は30,000rpmとした。回転中のミラー反射面の変位は、遠心力による体積力を考慮することで求めた。その際ポリゴンミラーに作用する遠心力だけを考慮し、シュリンクフィッタに作用するものは無視した。シュリンクフィッタ材であるポリイミドの比重は 1.41g/cm^3 であり、一方ポリゴンミラー材のアルミ合金の比重は 2.69g/cm^3 である。この値を用いてシュリンクフィッタに発生する遠心力を評価したところ、縮りばめによる接触力の約2.4%であった。したがって、シュリンクフィッタに作用する遠心力を無視しても、ミラー反射面の平面度の評価には大きな影響を与えない。

また、回転中は遠心力によりポリゴンミラーの内面が半径方向に変位することによりシメシロが変化する。例えば、後に示す図4では30,000rpm回転時にポリゴンミラーの内半径は約 $4\mu\text{m}$ 大きくなり、結果的にはシメシロが直径差で $8\mu\text{m}$ 少なくなる。シュリンクフィッタは約 $0.28\mu\text{m}$ 半径方向に寸法が減少し、SiC動圧軸受は外半径が約 $0.05\mu\text{m}$ 伸びる。これら2つの要素の寸法変化は小さいので無視できる。また、シメシロの減少割合はポリゴンミラーの形状によっても変化する。本研究では、広範囲な形状の中でポリゴンミラーの最適形状を探るために、その寸法を少しずつ変えて繰り返し計算を行っているので、計算量が膨大となる。そこで計算手順を簡単にするために、回転時にシメシロが変化することは考慮しなかった。しかし、このことは最適形状を探る上で問題にはならない。なぜなら、回転中に減少する分を見込んで初期のシメシロを設定すれば、本計算の結果が適用可能であるからである。

シメシロは、内側接触面と外側接触面共に半径差で $20\mu\text{m}$ 、すなわち直径差の合計で $80\mu\text{m}$ とした。

3. 計算結果および考察

3.1 締りばめ後のミラー反射面の形状 図4に締りばめ後および回転中のミラー反射面の形状を示す。縦軸は、締りばめ前のミラー反射面に垂直な方向のミラー反射面の変位を表す。横軸は、図1で示すポリゴンミラー頂点からの円周方向の角度 θ を表す。締りばめ後はポリゴンミラーの8つの頂点よりもミラー反射面の中央部が大きく変形するため、ミラー反射面は凸形になることが分かる。この形状は以前に測定した実測値とほぼ同じであった¹⁾。30,000rpmで回転中のミラー反射面の形状は遠心力が作用してさらに凸形になる。このときのPV値は1,012nmとなった。

これらのことから、締りばめ後および回転中のミラー反射面の平面度を許容値内に保つには、ポリゴンミラーの頂点に対応する部分をもっと変形させなければならぬことが分かる。

ところで、接合後ミラー反射面に二次加工を施してPV値を0とし30,000rpmで回転させたとしても、解析結果によれば回転中のミラー反射面のPV値は297nmとな

る(図4の破線)。通常この状態で使用されていることから、回転中のミラー反射面の許容平面度をPV値で約300nmとした。

3.2 ポリゴンミラーの最適形状探しの指針 既報⁴⁾で、締りばめ後および回転中のミラー反射面の平面度を許容値以内にするため、二次加工を省略する方法として、以下の2点を変化させることを検討した。

(1)シメシロ分布(円周位置によってシメシロを変える)

(2)ポリゴンミラーの反射面内接円半径

しかし、これらの方法ではミラー反射面の平面度を許容値以内にすることはできなかった¹⁾⁴⁾。そこで本論文では、ポリゴンミラーの形状に工夫を凝らすことを検討した。

図4に示したように、接合後および回転中のミラー反射面の形状は凸形になる。これは、ポリゴンミラーが多角形であるため、頂点部の形状の拘束によってこの部分が変形しにくいことが原因である。PV値を改善する方法として、以下の3つが考えられる。

(A)ポリゴンミラー頂点部を変形させる。

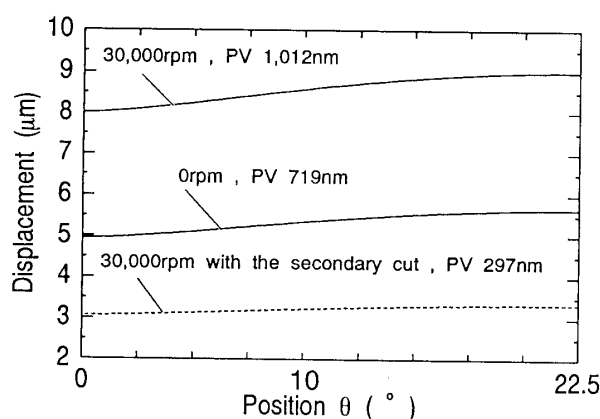


Fig.4 Deformation of the mirror surfaces of the conventional Polygon mirror

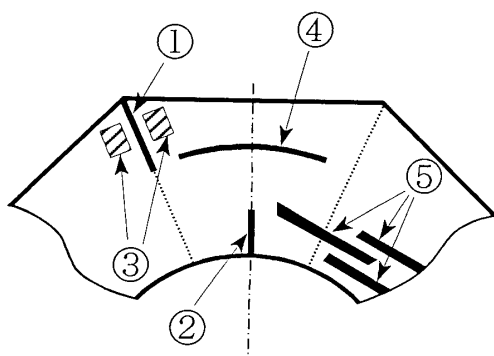
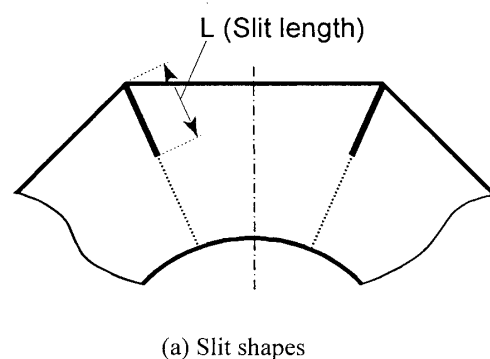
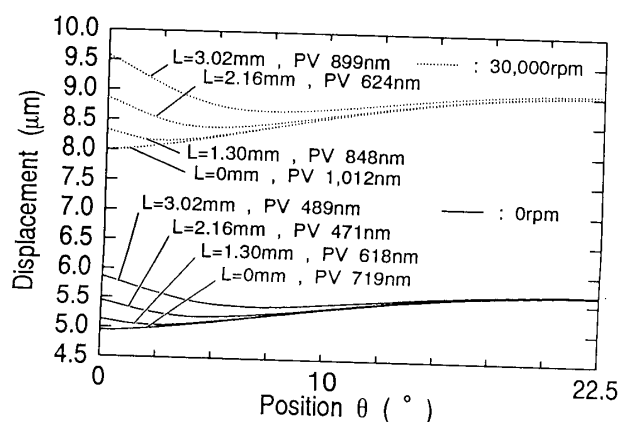


Fig.5 Various slits improving the flatness of the mirror surface



(a) Slit shapes



(b) Profiles of mirror surfaces

Fig.6 Profiles of mirror surfaces for various slit length

(B)ポリゴンミラー頂点部以外を变形させない。

(C)ポリゴンミラー内径からミラー反射面までの間の剛性を下げミラー反射面全体を变形させない。

これらに沿ってポリゴンミラーの形状を変化させ、その有効性をFEM解析を用いて検討した。

回転数30,000rpmともなると遠心力による影響が大きいので、静止時と同じように許容平面度を100nmにすることは極めて難しい。そこで、前項で述べたように、回転中の許容平面度は300nmとした。

図5は、上記3つの考え方に沿った対策の概略を示したものである。

(A)に沿ったものとしては、図5の①と②に切り込み(スリット)を入れることが考えられる。①の部分にスリットを入れることで頂点部の拘束が弱められ、頂点部の変形を大きくすることができる。内周面にスリットを入れて、頂点部の変形を大きくするには、②の場所が最適であることが分かった。ただし、その効果は①にスリットを入れる場合に比べると少ない。また、③の部分に密度の高い材料に置き換えることにより、

回転中のこの部分の遠心力を大きくすることも考えられる。結果的には、③の方法はうまくいかなかった。

(B)に沿ったものとしては、④の部分にスリットを入れることが考えられる。この部分にスリットを入れると、内周面より伝わるべき締めによる変位が伝わりにくくなり、結果的にミラー反射面中央部の変形が抑えられる。

(C)に沿ったものとしては、図5の⑤の部分(すなわち全周にわたって)にスリットを入れることが考えられる。

これらの考え方を基に試行錯誤的に約23通りの形状について検討した。以下では、回転中のミラー反射面の平面度を許容値程度に小さくすることができた形状について説明する。

3・3 2次元解析結果 図6(b)は、頂点部のスリット長さを変化させたときの回転中のミラー反射面の形状を示している。図6(a)に示すスリット長さを増やしていくとPV値は小さくなっていき、スリット長さ2.16mmのときにPV値は最小となる。しかし、それ以上にスリット長さが増加するとPV値は再び増加する。PV値が最小となるときミラー反射面の形状を見ると、 $\theta=5^\circ$ 付近で変形が最小となっている。この部分の変位を大きくできればPV値はさらに小さくできる。図7(a)に示すように、頂点のスリット(図中のLO)の下に別の第二のスリット(LI)を入れることにより、この部分の半径方向の変位を大きくし、PV値を小さくす

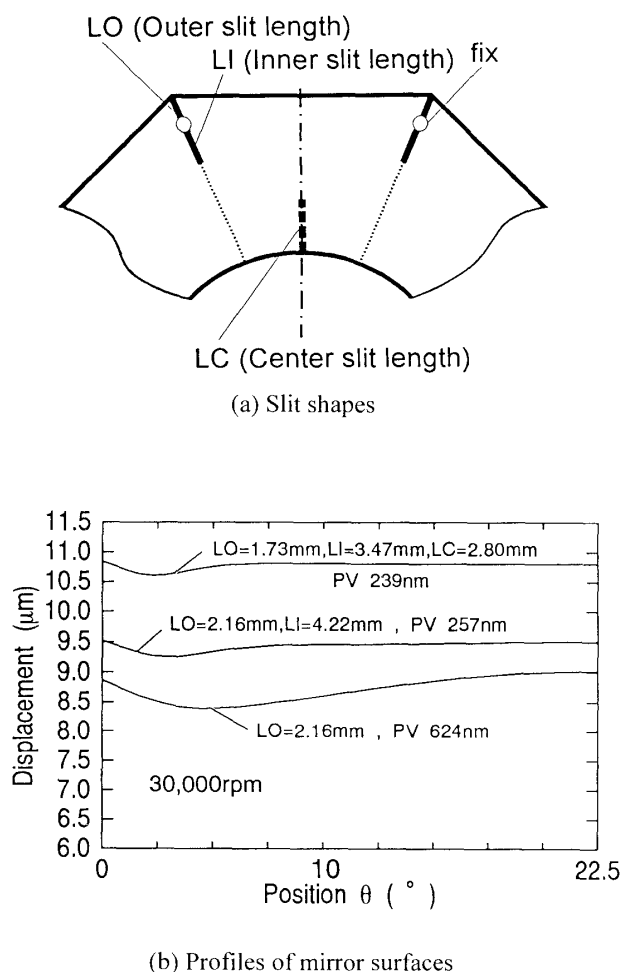


Fig.7 Profiles of mirror surfaces for various slits

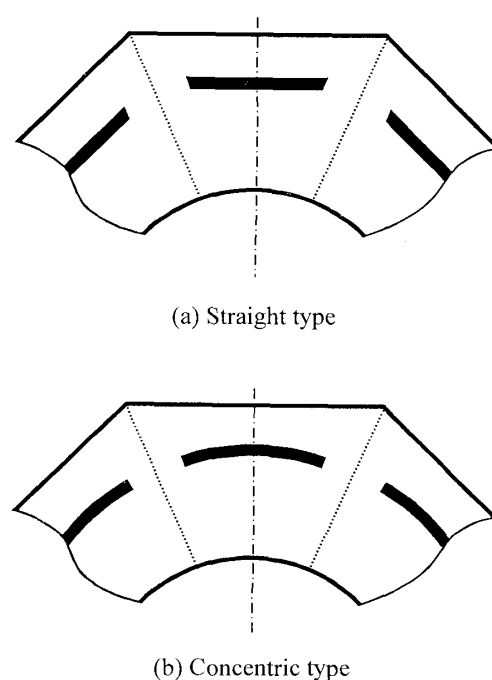


Fig.8 Two kinds of circumferential slits

ることができた(図7(b)). しかし, 第一の切り込みと第二の切り込みの間隔が約0.4mm以下でなければPVを値300nm以下にすることができなかった. 実際の加工ではこのような切り込みをいれるのは極めて困難である.

図7(a)に破線で示すように, さらにポリゴンミラーの内周面にスリットを入れると, PV値を多少改善する効果が得られた. しかし, ミラー反射面のPV値は先ほどのものより18nm良くなる程度である.

既報において, 半径方向に薄いポリゴンミラーであれば, 頂点に対応する内周面に集中荷重を作用させると, ミラー反射面頂点部の変形を大きくすることができることを示した¹⁾⁴⁾. このことを参考に, 締めばめの接触圧力により頂点部だけをより大きく変形させるため図8(a),(b)のようにスリットを入れた. この場合, スリットの位置や長さを変化させることによりポリゴンミラーの剛性を広範囲に変えることができるので, 遠心力が平面度に及ぼす影響も微妙に調整することができる.

その結果, 図9(a)のようにスリットを傾斜させることにより, 回転中のミラー反射面の平面度がよくなっ

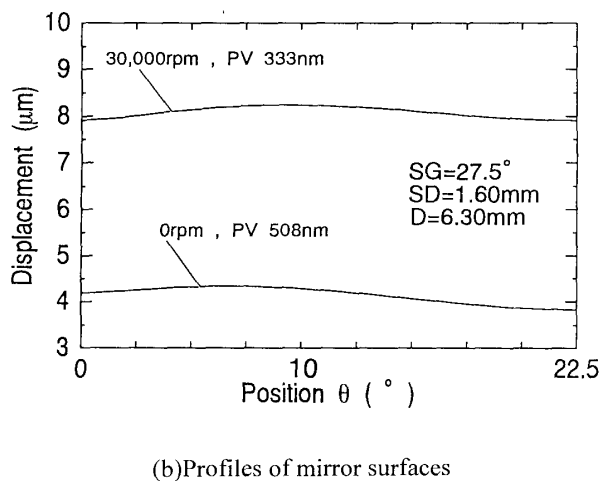
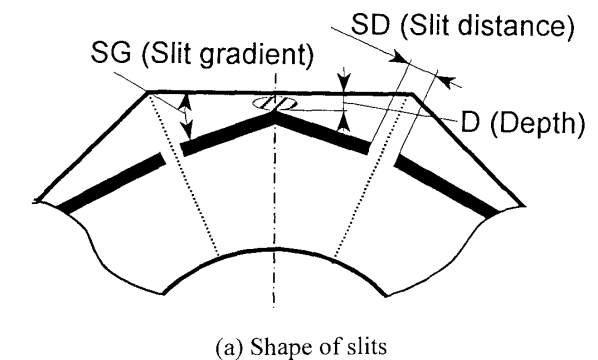


Fig.9 Profiles of mirror surfaces for tilted slits

た. 図9(b)は, PV値が最小となったときの回転中のミラー反射面の形状および静止時のものを表す. 回転中のポリゴンミラーの相当応力を計算したところ, 最大相当応力は図9(a)のハッチングで示したところで発生し92.7MPaであった. アルミニウム合金の降伏応力83.3MPaを越えており, 塑性変形が起きることを示唆している. この形状では, スリット端の間隔(図中のSD)が小さ過ぎることやミラー反射面中央部に応力集中が起こるなど問題がある. そこで, それらの部分を補強する目的で図10(a)のような形状を検討した.

スリットの位置や寸法を広範囲に変化させた結果, PV値が最小となったときの回転中のミラー反射面の形状を図10(b)に示す. 遠心力が加わることにより静止時の初期変形が改善されたことがわかる. 回転中の最大相当応力はハッチングで示したところに発生し, その値は77.9MPaと降伏応力を下回っている.

図11(a)の形状のスリットについてスリット幅(Slit width)を変化させた. スリット幅を調整することに

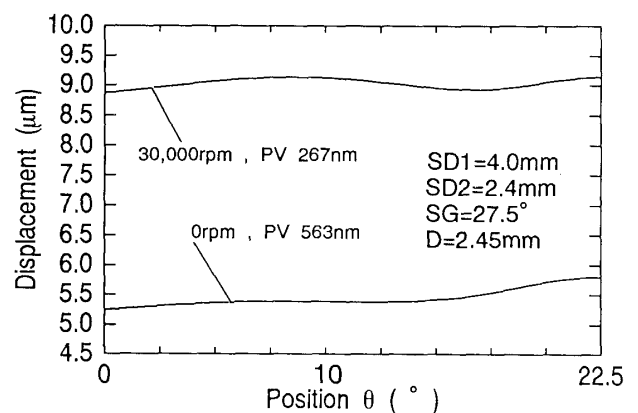
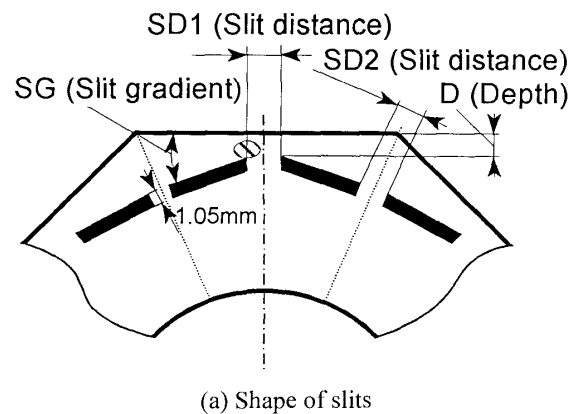
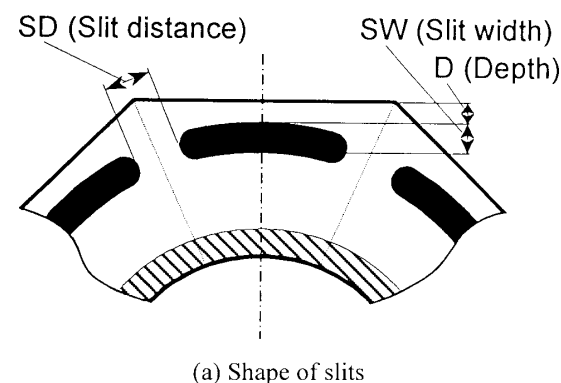


Fig.10 Profiles of mirror surfaces for modified slits

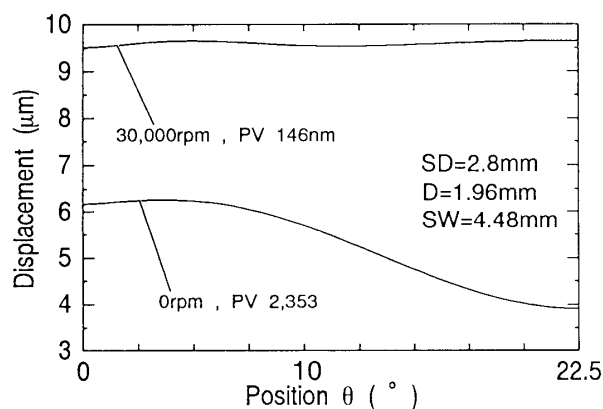
よって締めばめの接触圧力によるミラー反射面の変形を調整する。スリット端部の円形は応力の緩和を目的としている。

図11(b)は、PV値が最小となったときの回転中のミラー反射面の形状を表している。このようなスリット形状をもうけた場合は、ポリゴンミラーの剛性低下による締め付け圧力(接触圧力)の低下が予測される。そこで、両者を比較したところ、最小のPV値となる形状ではスリットがない標準のものに対して平均接触圧力は約5.4%低下した。スリット端間距離が短いため相当応力の検討も行った。その結果、回転中の最大相当応力は、72.3MPaとなり降伏応力83.3MPaを下回った。相当応力が最大となった場所は接触面近傍を含んだハッチングの部分である。30,000rpmにおいて、この形状のポリゴンミラーのPV値は、今回検討した形状のものなかで最小となった。

図12(a)のポリゴンミラーの形状は、ポリゴンミラー内径からミラー反射面までの間の剛性を下げミラー反射面全体を変形させないという考え方に基づいている。



(a) Shape of slits



(b) Profiles of mirror surfaces

Fig.11 Profiles of mirror surfaces for thick slits

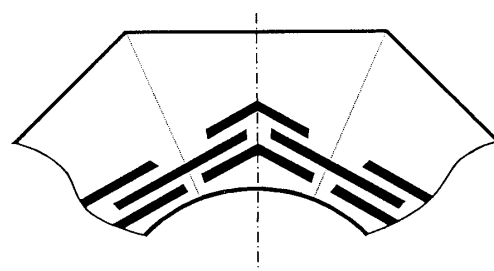
これにより、締めばめ後のミラー反射面のPV値は劇的に改善されている。また、遠心力を作用させても平面度は許容値内であった。図12(b)は、最小PV値となったときのミラー反射面の形状を表している。

相当応力分布を計算すると、接触面近傍で最大相当応力97.3MPaとなり、降伏応力83.3MPaを越えた。

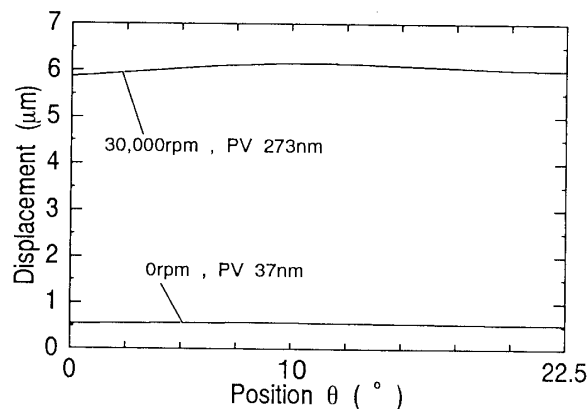
以上、30,000rpmにおけるポリゴンミラーの最適形状を検討した結果、図9(a),10(a),11(a)の形状が有望であるということが2次元FEM解析によって明らかになった。

3・4 3次元解析による検討 図13は、ポリゴンミラーの正面と断面を表している。ポリゴンミラーは通常、ミラー反射面周辺稜部の面取り(図13断面図の傾斜部)が施されている。

理論、計算手順、計算条件は2次元解析を行った場合と同じである。ただし、3次元解析場合、2次元解析ほどはメッシュを細かくできないので、厳密に言えばポリゴンミラーに入れるスリット形状が2次元解析のものとは若干異なる。対称性より解析部分は1つのミラー反射面の1/4に対応する部分とした(図14)。ここで、3次元解析で得られるミラー反射面のPV値はその



(a) Shape of slits



(b) Profiles of mirror surfaces

Fig.12 Profiles of mirror surfaces for multi-slits

鏡面有効範囲内での高低差と定義した。本解析では、ミラー反射面内の中央の幅2.5mm(図14に示す有効幅は1.25mm)の帯状の部分である。

図9(a),10(a),11(a)の形状の最小PV値となったときと同寸法の場合を計算した。

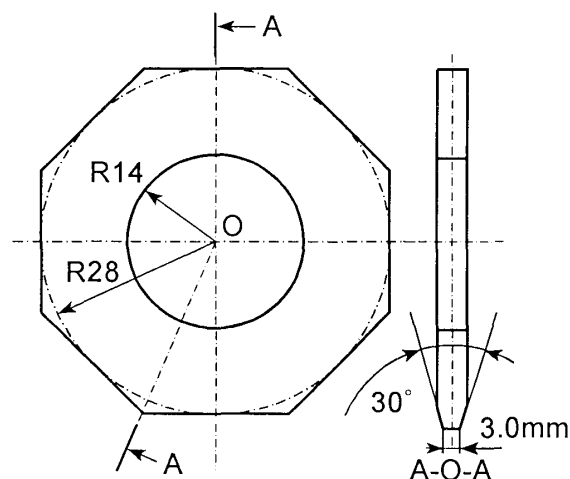


Fig.13 3-D shape of the polygon mirror

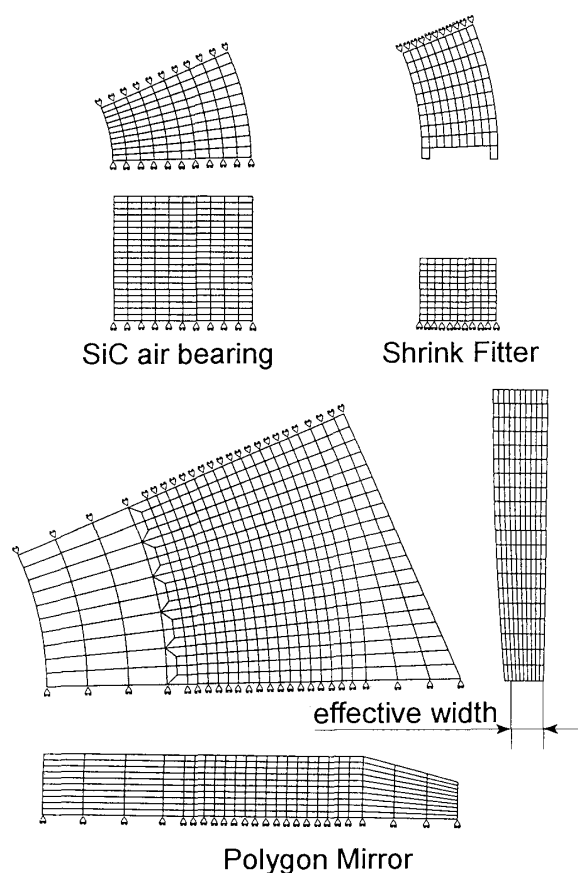


Fig.14 FEM meshes for 3-D analysis

図15は、図9(a)の形状における締りばめ後及び回転中のミラー反射面の形状を表している。PV値はそれぞれ468nm, 311nmとなり、3次元形状を考慮しても2次元解析のPV値とほぼ同程度になった。

図16は、図10(a)の形状における締りばめ後及び回転中のミラー反射面の形状を表している。PV値はそれぞれ554nm, 291nmとなった。この形状でも、PV値、ミラー反射面の形状共に2次元解析のものとほぼ同じになった。

図17は、図11(a)の形状における締りばめ後及び回転中のミラー反射面の形状を表している。PV値はそれぞれ2,187nm, 193nmとなり、2次元解析で得られた値とほぼ同じになった。ミラー反射面の形状も同様であった。

以上の結果より、反射面周辺稜部の面取りが施されていることはあまり影響しないことがわかった。

本解析では、ポリゴンミラーの大きさを固定して解析した。実際には、用途に応じた種々の寸法や形状をしたポリゴンミラーが存在する。ここで解析した結果が、それらに適用できるわけではない。寸法や形状に

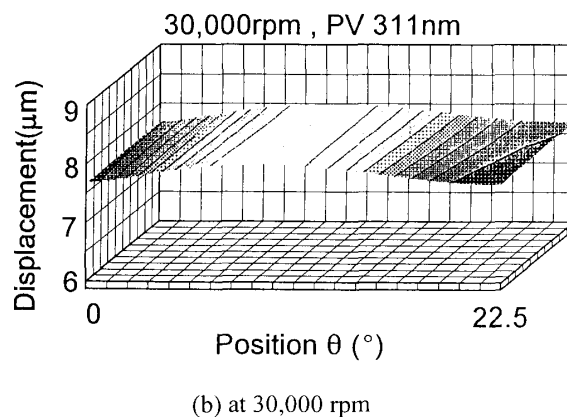
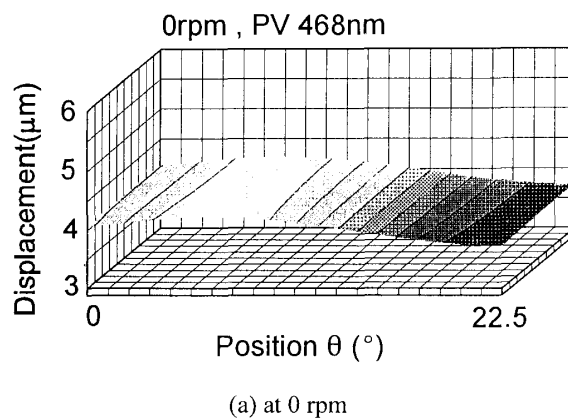


Fig.15 3D-profiles of mirror surfaces

よっては、最適形状が存在しない場合もあることも認識すべきと考える

4. 結 言

ポリゴンミラーを最適形状にすることによって、30,000 rpm 回転時に二次加工を施さなくてもミラー反射面の平面度が許容値におさまるかを調べた。本研究で得られた結論は以下の通りである。

ミラー反射面の中央部の変形を抑えるために同心円状のスリット(本文中のFig. 11(b))を入れることにより平面度を許容値以内にすることができた。

高速回転時に許容値が保てなくなるのは、遠心力によりミラー反射面の中央部の変形が著しく大きくなるためである。スリットを入れる効果は、静止時にミラー反射面の形状を内側に変形させることと、反射面の剛性を下げることである。これにより回転時には、

反射面が適度に外側に変形するために平面度が改善できる。

ただし、ミラー反射面の平面度は、スリット形状やスリット位置に非常に敏感である。

謝 辞

計算に際して協力頂いた菅野明宏君(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.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)新田・菅野・小俣,機論,64-620,C(1998),1390.
- (3)新田・原,機論,55-520,C(1989),3062.
- (4)新田・浅井・紺野,機講論,No.957-1(1995),87.

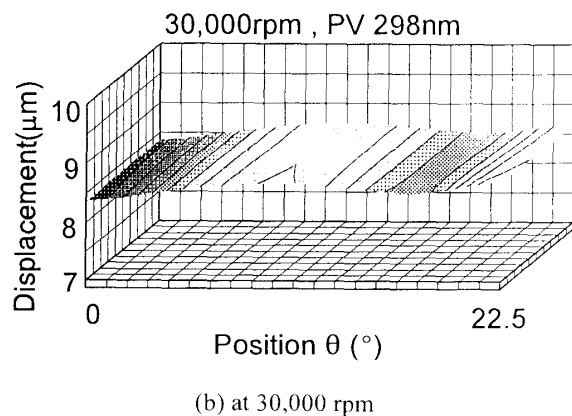
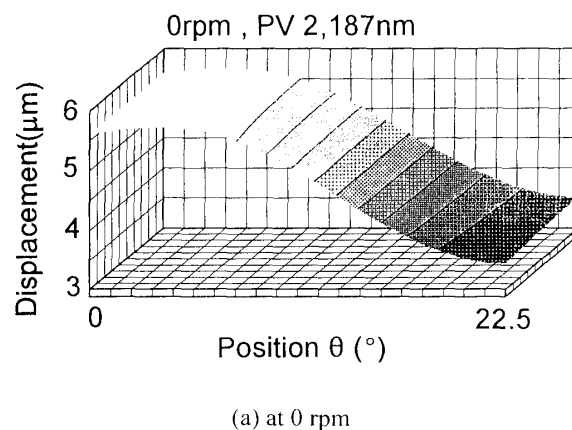
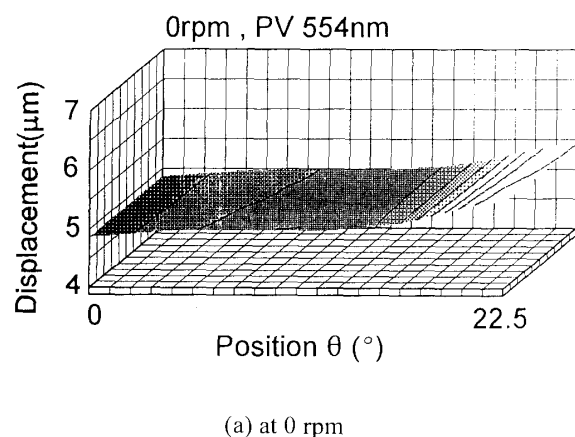


Fig.16 3D-profiles of mirror surfaces

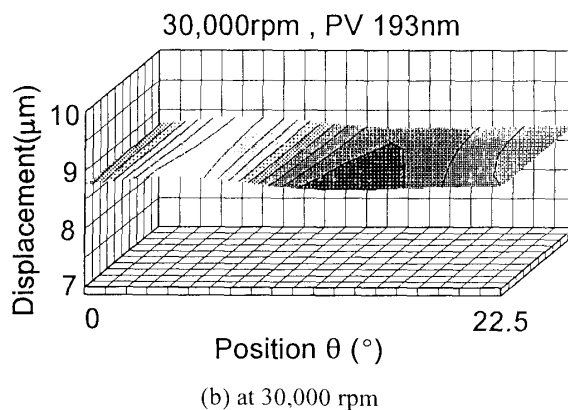


Fig.17 3D-profiles of mirror surfaces