

# 鏡面加工技術の開発

Development of a new method of cutting mirror surfaces.

伊藤豊次  
岩村義雄  
川田 直  
橋本隆美  
事務機器事業本部  
生産技術センター



## Abstract:

We developed a new method of cutting mirror surfaces by means of diamond turning, and have applied this method to the production of PPC drums and polygonal mirrors.

For PPC drums, we have developed a new type of diamond bit which dramatically reduces the time needed for bit-setting.

For polygonal mirrors, we studied the entire production process for mirror units, from blanking to final assembly, and have established a production line for mirrors, marked by high quality, reliability, and efficiency of production.

Ito, Toyotsugu  
Iwamura, Yoshio  
Kawada, Sunao  
Hashimoto, Takayoshi  
Production Engineering Center  
Business Machines Headquarters

# 1

## はじめに

ダイヤモンドバイトによる超精密加工は、近年特に発展を遂げ、感光体ドラム素管・ポリゴンミラー・プラスチックレンズ金型・ディスク板加工等広範囲にわたり量産に適用されるようになってきた。その中で、生産技術センターでは、特に感光体ドラム素管・ポリゴンミラー加工に重点を置き、鏡面加工技術の開発を行ってきた。

今回は、感光体ドラム素管加工においては、バイトのセッティング段取り作業時間を大幅に削減するダイヤモンドバイトの形状の決定に関して、ポリゴンミラー加工においては、すべての工程で、ムダなく、安定に、高精度の加工が行える加工プロセス構築に関して研究してきた内容を報告する。

本技術は、現在、U-Bix1012、DC-8010に各々主要パーツとして量産適用されている。

# 2

## 感光体ドラム素管加工

### 2.1 感光体ドラム素管加工技術概要

近年、複写機の高品質化、高速化に伴い感光体用ドラム素管（以下、素管と記す）の真円度、真直度、表面粗さ等の形状精度を更に高める必要性が生じた。しかし従来行われていた研磨による加工では、これらの精度の達成は難しく、さらに、仕上げ加工後、砥粒が表面に残るため多数の洗浄工程が必要になることが問題点であった。

このような背景のもと、従来の研磨にかわりダイヤモンドバイトによる旋削加工（DT加工）が提案され、ドラム加工の主流となりつつある。

### 2.2 DT加工の問題点

DT加工の導入により素管の高精度化及び工程の短縮が期待できる。しかし、同時に以下に示すような問題も存在する。

- ①鏡面を形成する加工メカニズムが不明。
- ②バイトの当り外れ（使えるバイトと使えないバイト）がある。
- ③バイトの慣らし加工が必要（段取り時間がかかる）。
- ④加工機精度と鏡面精度との因果関係が不明。

以上の問題は通常、作業者の技能によってカバーされているが、量産工程では非技能化、標準化が重要課題である。

特に、バイトの安定供給、段取り時間の短縮は、必須となる。

本論文では、バイト形状を最適化することで問題解決を図った検討内容について述べる。

### 2.3 加工メカニズムの推察

加工はFig.1に示すように、横切れ刃部及びR刃部によ

って構成される単結晶ダイヤモンドによって行われる。我々は、加工メカニズムに関して、従来の切削理論とは異なった仮説を立てた。すなわち、横切れ刃部により大部分を切削し、次にR刃部で微小切削を行うと同時に、パニッシング（表面を微小にこすり、鏡面にする現象）による鏡面形成を行うという、ひとつのバイトは、それぞれの切削メカニズムを持つ2つのエリアから構成されると考えた。

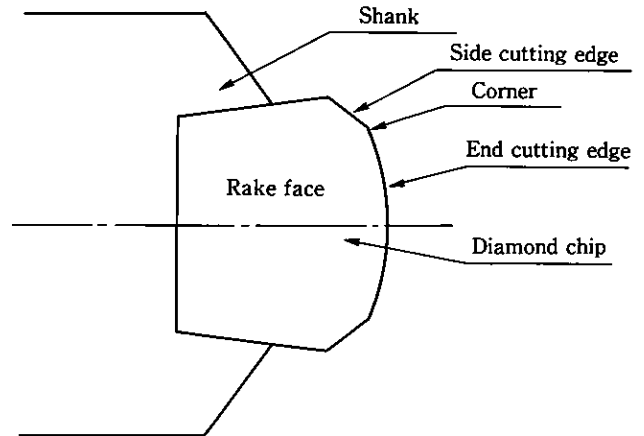


Fig.1 Configuration of diamond cutting tool (Top view)

そこで第一に、鏡面を形成するパニッシングポイントを求めるために、パニッシング量に大きく影響するワークのスプリングバック量を測定した。Fig.2にスプリングバック量の実測データを示す。この値とバイトのセッティングの幾何的位置からバイト刃先上のパニッシングポイントを求めた。Fig.2に示すように変曲点よりR刃部側へ800~1000 $\mu\text{m}$ の位置であることがわかり、ここを鏡面を形成するための重要なポイントとして着目した。

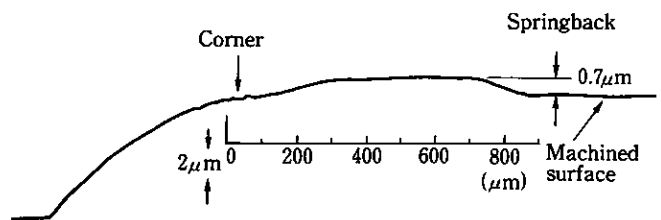


Fig.2 Springback properties

刃先のこの部分にチッピングと呼ばれる微細なキズなどがあると、加工面上にスクラッチと呼ばれるスリキズが発生する。また、刃先先端形状（刃先の丸み半径、滑らかさ等）が適切でないと、正常な切削及びパニッシングが行われず、鏡面の加工不良が生じる。以上のように加工面上の不良の発生原因を推定した。

この考えをもとに、バイトの最適形状を探索した。

## 2.4 バイト形状の走査型電子顕微鏡(SEM)観察

横切れ刃部で切削し、R刃部でバニッシングをすることで加工メカニズムを基に刃先の概略形状は定まる。すなわち、横切れ刃部は鋭く、R刃部はバニッシングに適するやや丸みのある形状であれば良い。

しかし、さらに刃先の微小な形状を解明し確認するため、慣らし加工の前後での、刃先先端形状をSEM観察し比較した。このSEM装置は、断面形状をアウトプットできるタイプで、この装置の導入により、定量的にバイト刃先形状を検討することが可能になった。

また、バイトの当り外れの原因の一つであるマイクロチップングが発見でき、加工する前にチェックできるようになった。Fig.3にその写真を示す。

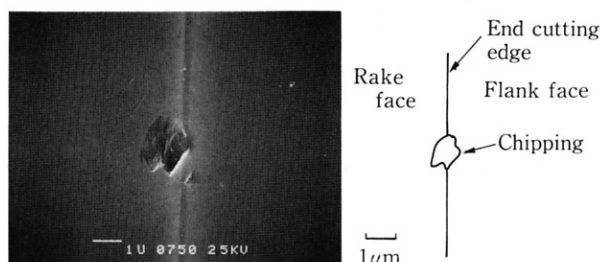


Fig.3 Electromicrograph of micro chipping

Fig.4(a)、4(b)は、慣らし加工前後の刃先写真である。変曲点部での摩耗が特に激しく、加工時に切削力が一番強くかかる部分であることが分かる。

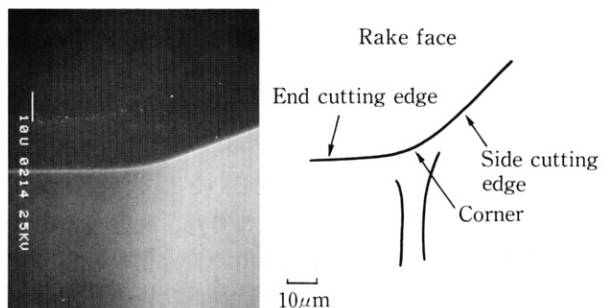


Fig.4 (a) Electromicrograph of cutting edge before preparatory cutting

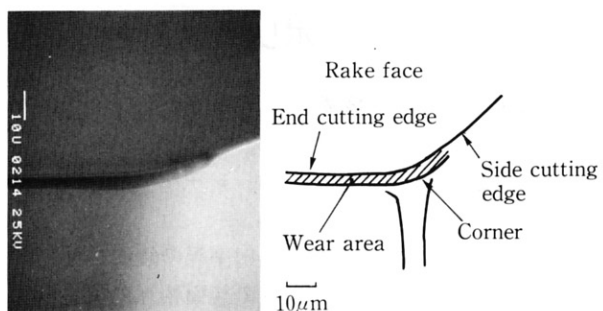


Fig.4 (b) Electromicrograph of cutting edge after preparatory cutting

Fig.5は、慣らし加工前後での各部分の刃先丸み半径である。刃先丸み半径を求めた例として、Fig.6に、バニッシングポイントでの断面形状チャートを示す。

このポイントでは、摩耗により丸み半径が $0.08\mu\text{m}$ から $0.8\mu\text{m}$ に大きく変化している。この丸み半径が鋭すぎるとバニッシングしきれず、スクラッチが発生しやすくなる。

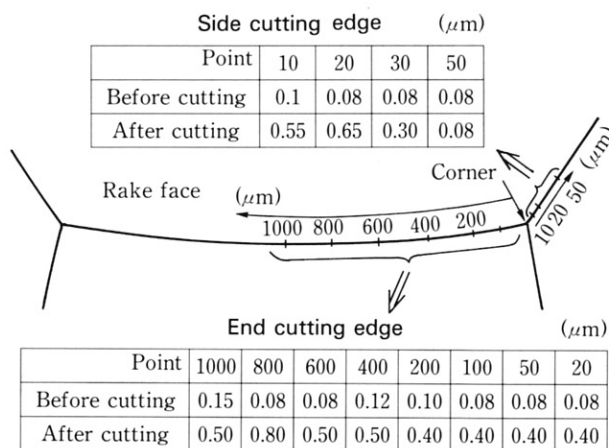


Fig.5 Edges's radiuses before and after preparatory cutting

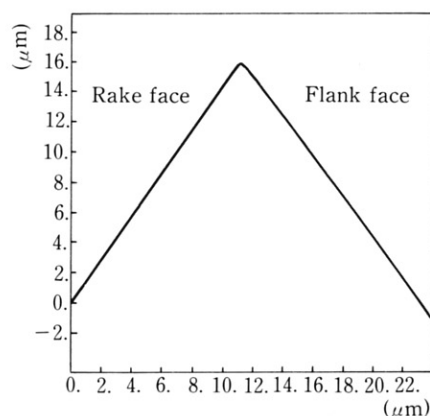


Fig.6 (a) Cross section of edge's radius before preparatory cutting

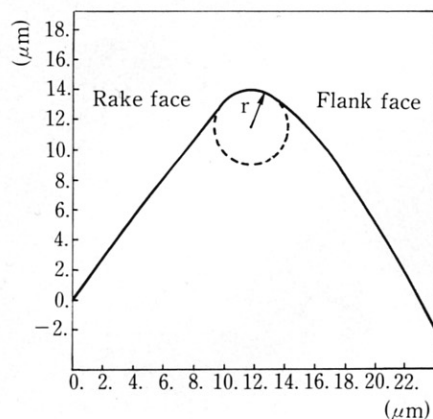


Fig.6 (b) Cross section of edge's radius after preparatory cutting

また、寿命になったバイトの観察では、横切れ刃部はこの丸み半径が大きくなっており、加工面に面の乱れを伴うスクラッチが発生する事が認められた。

Fig.7(a), (b), (c) は慣らし加工前後及び寿命後の加工面形状を表す。(a) では微細な凹凸、(c) では面の乱れが観察される。

Fig.8 は、加工面のスクラッチ発生部におけるSEM写真である。凹凸やむしれ跡が確認できる。

## 2.5 バイト形状の設定

以上の検討結果より、ひとつのバイトのなかでも、エリアにより各々異なる役割を持つことが分かり、我々は、各役割に適した機能分離型のバイト形状を設定することを提案した。

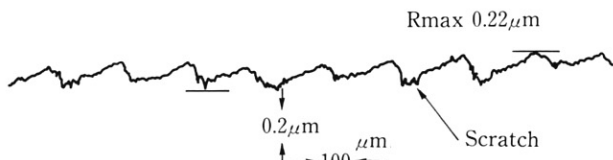


Fig.7 (a) Surface roughness before preparatory cutting

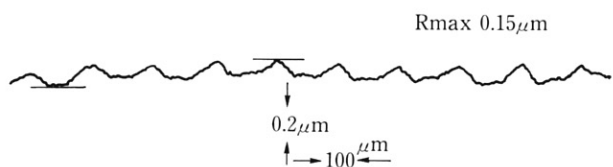


Fig.7 (b) Surface roughness after preparatory cutting

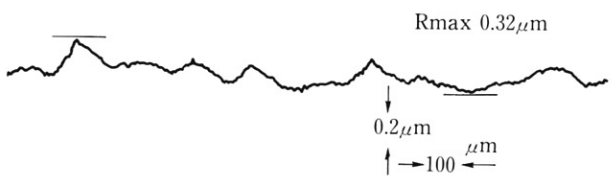


Fig.7 (c) Surface roughness at end of edge life

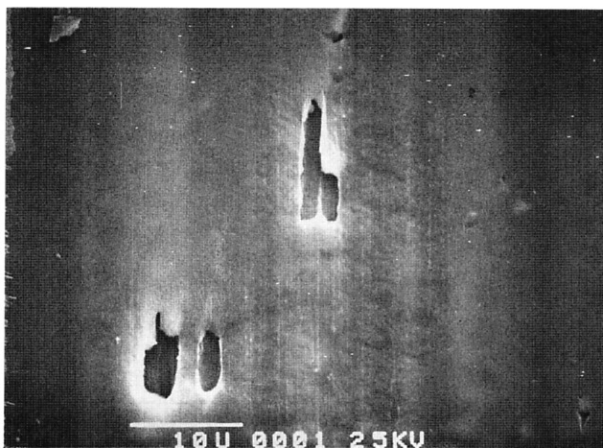


Fig.8 Electromicrograph of scratches on machined surface

U-Bix1012用素管加工用に、以下の三条件を満たすバイトを試作した。

- ① R刃部の刃先丸み半径は、 $0.8\mu\text{m}$ 以上 $1.0\mu\text{m}$ 以下とする。
- ②横切れ刃部の刃先丸み半径は $0.2\mu\text{m}$ 以下とする。
- ③刃先先端にマイクロチップがないこと。

Fig.9 に慣らし加工距離の形状設定の前と後での比較を示す。

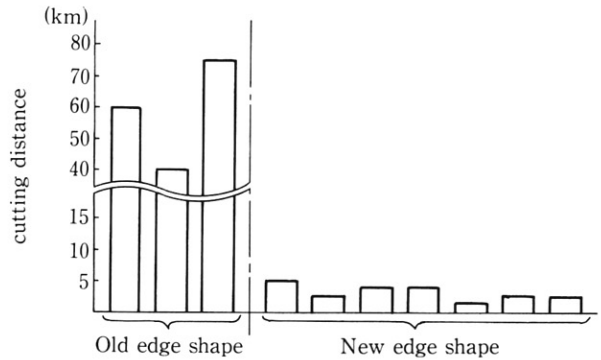


Fig.9 Preparatory cutting distance of old and new edge shapes

我々の提案した形状のバイトは、従来に比べ、飛躍的に慣らし加工距離、時間が減少し、数km (時間に換算して約10分以内) で鏡面が得られることが確認できた。

また、バイト毎のバラツキも少なく、刃先形状の設定が正しかったことを示している。さらに、従来バイトメーカーまかせであった刃先形状をコントロールできるようになった事の意義は大きい。

バイトの寿命も、慣らし加工を多く行っていたときよりも延びている。これは、慣らし加工がほぼ不要になり、横切れ刃部の摩耗が少ない状態から正規の加工が可能になった為と考えられる。

加工メカニズムの推論がほぼ正しいとして、ここから逆に、加工機に必要な精度が割り出され、旋盤の各エレメントの精度、加工条件、集塵装置の安定化などの見直しを同時に実施する事で、従来、突発的に発生していた加工不良も減少し、良品収率が向上し安定した生産が行えるようになった。

## 3

### ポリゴンミラー加工

#### 3.1 ポリゴンミラー概要

ポリゴンミラーは、レーザービームプリンター、デジタル複写機等の光学要素であり、レーザービームの走査に使用される。

ポリゴンミラーは、平面性、反射率等の鏡面自身の精度だけでなく、倒れ角、分割角等の鏡面相互の精度も要求されるいわば鏡面に付加価値をつけたものと言える。この付加価値を含めた精度をいかに安定して得るかとい

うことが生産上の重要問題となる。Fig.10に一般的なポリゴンミラーの精度の例を示す。

我々は、加工機を導入しポリゴンミラーの内作化の検討を進めてきたがここでは、ミラー精度の安定化、高精度化及び、トータルコストダウンを目標としたポリゴンミラー加工プロセス構築について述べる。

### 3.2 ブランク加工

Fig.11に素材から鏡面加工までの工程を示す。ポリゴンミラーの材質は高純度特殊アルミ合金が用いられる。

そのため、素材から製品になるまでの無駄になる部分(切粉等)を極力省き、無駄な工程を省くいわゆるニアネットシェイプ (near net shape) の実行がトータルコス

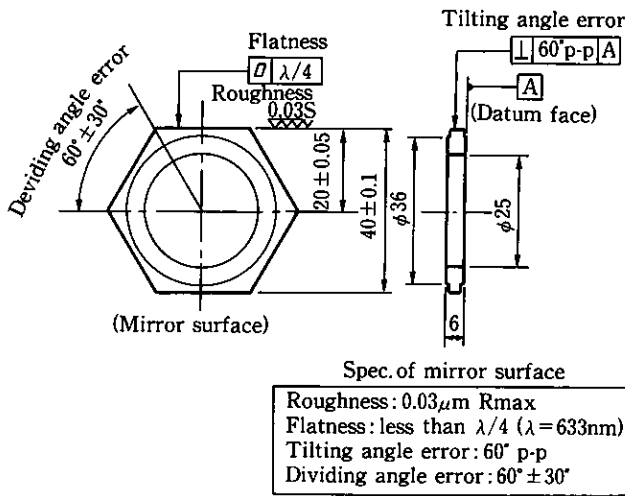


Fig. 10 Typical polygonal mirror

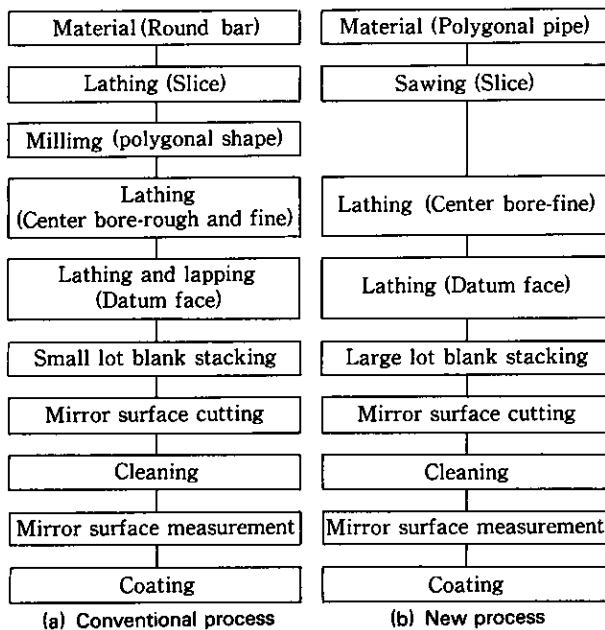


Fig. 11 Polygonal mirror production processes

トダウンを達成するうえで必要となる。例えば、従来の丸棒からフライス加工によりブランク取りをする工程では素材の無駄が多くかつ時間もかかる。そこで、素材として加工時の切削代をできるだけ少なくするために、アルミ棒材製造時の押し出し、引き抜き技術や、個別ブランク製造時の鋳造技術などを材料メーカー等と共同開発し採用した。また素材の切断にも同様に、無駄が少なくかつ安定した加工法を検討し採用している。

これらの工程により、素材の有効使用率(製品重量/素材重量)は格段に向上した。Table 1にその値を載せる。従来の工程に比べ、我々の採用した工程では素材の無駄が少なくなると同時に、加工工程、加工時間を大幅に減らすことができるようになった。

Table 1 Efficiency of material use: Production processes compared

Blank production processes	Efficiency of use *
Cutting and lathing (Plate)	45%
Lathing and milling (Round Bar)	53%
Sawing (Polygonal pipe)	84%

\*Efficiency of use = Product weight / Material weight

### 3.3 基準面加工

ミラーの上下端面に求められる精度は、平面度と平行度である。この端面は、モーターへの取り付けの基準、また、加工時の基準となるため基準面と呼ばれる。基準面精度が悪くなると後述する倒れ角精度に影響する。そのため、基準面切削後ラップ加工を行うこともあるが生産性が悪く、コストも高い。そこで基準面加工をCNC旋盤による旋削だけで行うこととした。加工工具には単結晶ダイヤモンドバイトを使用しかつ加工条件の最適化を図った。チャック方式には真空チャックを用いた。これは、爪チャック、コレットチャック等では横方向からの圧力によってブランクに歪を与え、基準面の平面度を悪くするからである。そしてチャック材質の検討も行い結果として、基準面の平面度0.1μm、平行度1μmを達成した。

### 3.4 鏡面加工

鏡面加工は、生産性向上のため、ブランクを多数枚積み重ねて同時加工を行っている。しかし、重ね同時加工では、ブランクそれぞれの平行度、加工治具の精度及び、ブランク間にはさまれたゴミ、バリ等が累積され倒れ角を悪くする原因となる。例えば、現在の系では1μmのゴミが挟まれると倒れ角誤差に換算して約13秒に値する。さらに、これらの誤差要因は確率的に発生し制御できない値である。そこで一般には、重ね加工では、あまり多数枚での加工は行われていなかった。この問題に対し、これらの確率的誤差要因を定量的に解明することにより、

重ね枚数の増加が可能になった。Fig.12に10枚重ね加工の倒れ角の実績を示す。

鏡面加工は、エアスピンドルにセットされた単結晶ダイヤモンド

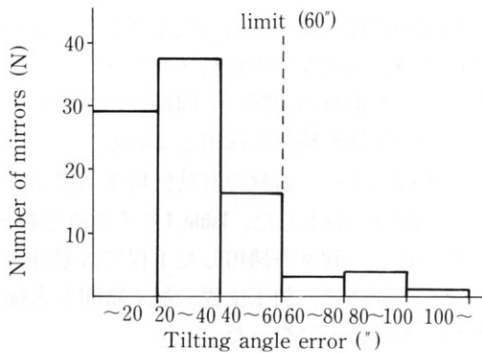


Fig. 12 Distribution of tilting angle error (Blanks stacked 10-high)

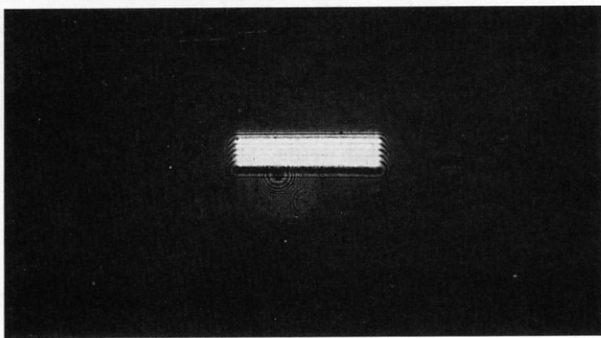
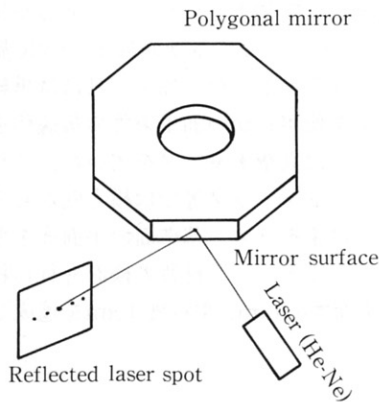


Fig. 13 Flatness of mirror surface



Bit setting	Reflected laser spot
Under Banishing	
Proper Banishing	
Over Banishing	

Fig. 14 Sample of reflected laser spot onto mirror surface

イヤモンドバイトによりフライカットする事で行う。このエアスピンドルへの供給圧、機械振動などを管理することで鏡面の平面性が維持され、現在約 $\lambda/4$ 以下の平面性を保っている。Fig.13にその一例を示す。また、Fig.14に、鏡面にレーザ光を照射した時の反射散乱光の例を示す。このパターンにより、表面粗さ、バイト寿命、バイトセット状態等がチェックできる。

### 3.5 測定

以上に述べたようにポリゴンミラーにはミクロン以下の精度を要求される部分が多い。そのため測定においてもミクロン以下の信頼性が必要であり、通常では無視できるような要因、例えば温度のわずかな変化や床の振動、微小なゴミなどの影響についても考慮しなければならない。測定誤差を極力排除し、測定が正しく行われて初めて安定した製品を作ることができると言える。測定系そのものの精度を上げるために我々が考案した一例として、倒れ角測定系システムを Fig.15 に示す。この系により倒れ角測定時に誤差要因となる系の平行度の影響を排除することができ、再現性のよい、正確な測定ができるようになった。

### 3.6 実加工例

以上の工程で加工したDC-8010用ポリゴンミラー加工の実績として Fig.16 に平面性、表面粗さ、分割角および倒れ角精度を示す。この後、鏡面に保護膜をコートしたミラーとモーターとを組み立て、動バランス、動倒れ角、回転ムラ（ジッター）を調整、チェックしてポリゴンミラーユニットとして完成する。Fig.17 にユニットの写真を、ユニット精度の実績を、 Fig.18 に示す。

## 4

## おすび

以上のように、感光体用素管加工においては、加工メカニズムそのものを解明することにより、機能分離型の新しいダイヤモンドバイトを開発し、これによるバイト慣らし加工の大幅な軽減が図られた。又、ポリゴンミラー加工においては、素材から製品に到るまでそれぞれの工程を見直し、最適化を図った加工プロセス構築により

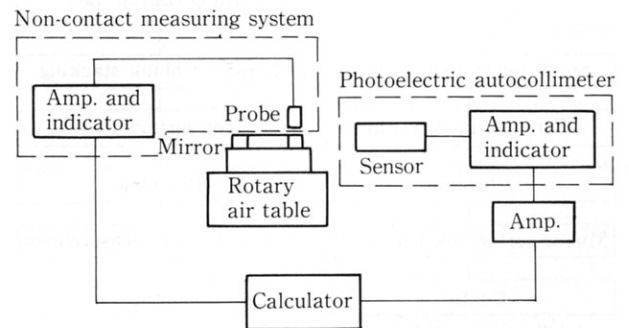
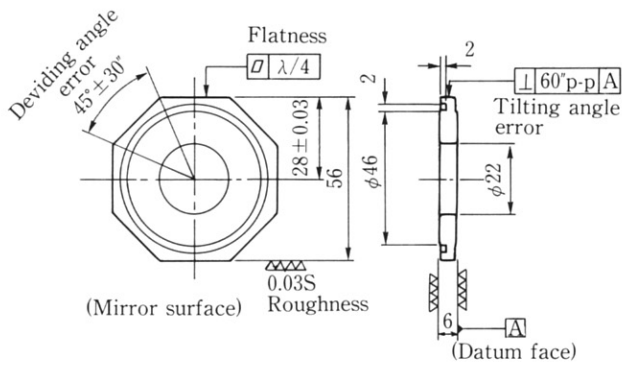


Fig. 15 Measuring system for tilting angle error



Contents	Specifications	Results
Tilting angle error for datum face	60° p-p	productive rate 92%
Flatness of mirror surface	less than $\lambda / 4$ ( $\lambda = 633 \mu\text{m}$ )	$\lambda / 4 \sim \lambda / 8$
Roughness of mirror surface	0.03 $\mu\text{m}$ Rmax	0.02 ~ 0.03 $\mu\text{m}$ Rmax
Deviding angle error of mirror surface	45° ± 30°	45° ± 15°

Fig. 16 Results of polygonal mirror unit for DC-8010

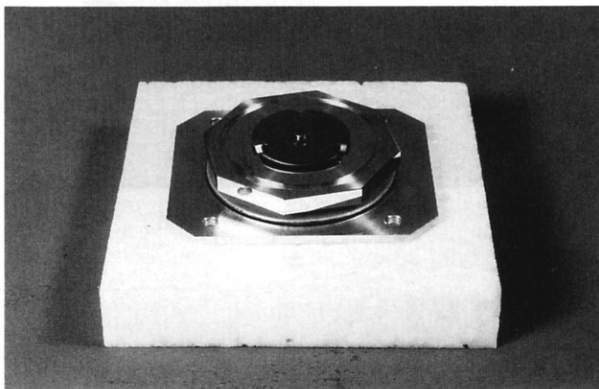


Fig. 17 Polygonal mirror unit for DC-8010

安定してポリゴンミラーを内作することが可能となった。

ダイヤモンドバイトによる鏡面加工技術は、今後さらに新たな方面での展開が期待され新しい付加価値を生み出す技術として期待されている。しかし、まだ不明確、未知な点も多く、量産性、コスト性などさらに検討する課題も多い。今後は、このような課題を解決するようさらに研究を進めて行きたいと思う。

#### ●参考文献

- 1) 井川直哉、島田尚一、「超精密ダイヤモンド切削とその問題点」、日本機械学会誌、Vol.87、No.791(1984)
- 2) 「工作機械'84、超精密加工」工作機械技術研究会編、大河出版刊、(1984)
- 3) 「機械技術'87、加工事例：ポリゴンミラーの超精度加工」日刊工業新聞社刊、Vol.35、No.9(1987)

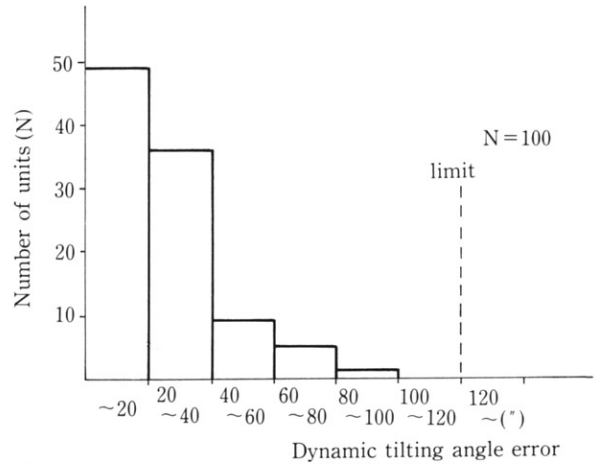


Fig. 18 (a) Results for DC-8010 polygonal mirror unit: Dynamic tilting angle error

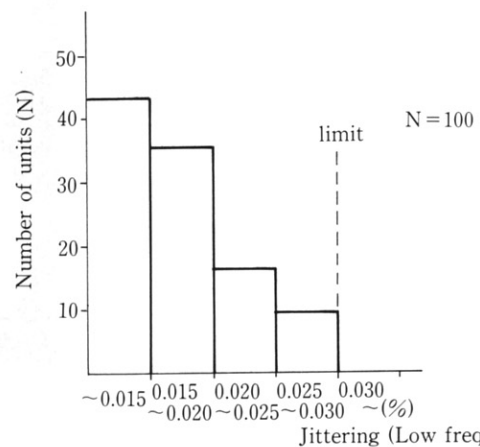


Fig. 18 (b) Results for DC-8010 polygonal mirror unit: Jittering (Low frequency)

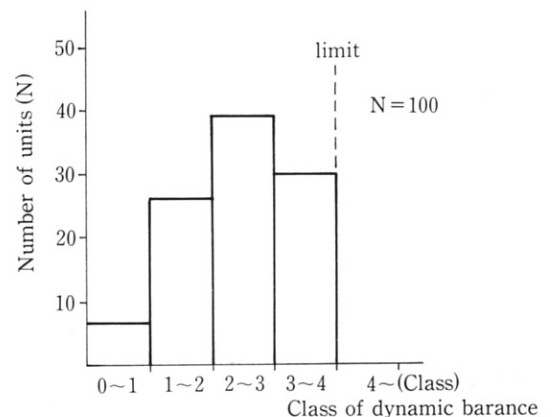


Fig. 18 (c) Results for DC-8010 polygonal mirror unit: Class of dynamic balance