



NC Elastic Emission Machining を利用した シンクロトロン放射光反射ミラーの加工システム

本郷 俊夫

高エネルギー物理学研究所 〒305 茨城県筑波郡大穂町上原 1-1

(1984年9月7日受理)

Fabrication of a Synchrotron Radiation Mirror by NC Elastic Emission Machining Method

Toshio HONGO

National Laboratory for High Energy Physics,
1-1, Uehara, Oho-machi, Tsukuba-gun, Ibaraki 305

1. はじめに

近年、高エネルギー物理学研究所では、シンクロトロン放射光（以下放射光と略称する）を利用した実験が固体物理学、微細加工技術等多くの分野で活発に行なわれている。放射光は、その偏光性や平行性に優れ、とくに非常に幅広い波長域（赤外線からX線まで）において従来にない高い強度をもっており、この利用によりすでに多くの注目すべき成果を上げつつある。しかし、さらに放射光を有効なものにし、より幅広い分野への貢献のためには、実験時におけるビームのエネルギー幅やビームサイズさらにはエネルギー密度等のパラメータを精確に、しかも任意に制御できることが重要かつ必要である。この技術には反射ミラーの利用が有効であるが、ミラーの形状も実験目的により複雑に変化し、また必要とされる形状精度、およびその表面粗さも、とくに短波長域光の場合、通常の加工技術ではとうてい達成できないほど厳しいものである。

放射光技術をさらに強力なものとし、より多くの分野でそれぞれの目的を十分に達成させるためには反射ミラーの作製技術の確立は急務であり、また従来にない新しい加工技術の導入が不可欠である。著者らはこの加工に、大阪大学においてすでに森らが開発した NC elastic emission machining (以下 NC EEM)¹⁻⁵⁾ を導入することを決定し現在その適用のための加工システムの開発

を行なっている。

NC EEM は EEM の原理を応用しそれを NC 化することによって任意の形状の加工を可能にしたものである。後項で詳しく原理およびその応用について記すことにするが簡単にその概略を述べると、EEM とは、0.1 μm 以下の微細粉末粒子を何らかの方法で加工対象となる材料表面に供給し、このときに相互に接触した非常に狭い（数十 \AA 程度の）領域で一種の原子間結合を発生させ、加工対象物表面の原子を除去していくものである。これより、加工に用いる微細粉末粒子はその材質が加工対象となる表面原子との反応性に富むものであり、しかも接触時に形成された界面が強固であり同時に加工対象物表面原子の母材側との結合の解放に対し促進的であるような物性をもつものが採用される。加工域は、粉末粒子と加工対象物表面の接触した非常に狭い領域中のさらに理想的に界面が形成された領域に限られることからその単位は原子のオーダーに近づき、それゆえ加工面の平坦性に関しても原子オーダーの精度（タリストップ等による測定によれば 5 \AA 以下）で加工を行なうことができる。NC 化への技術としては、粉末粒子の供給法を図 1 に示すように、微細粉末粒子を懸濁させた液中で低弾性体であるポリウレタンゴム球を回転させたときの流れによって行なうことにより達成している。これにより粉末粒子の供給を加工対象表面上で位置的に制限することが可能となり、加工対象域全域を各点で所定量（ミ

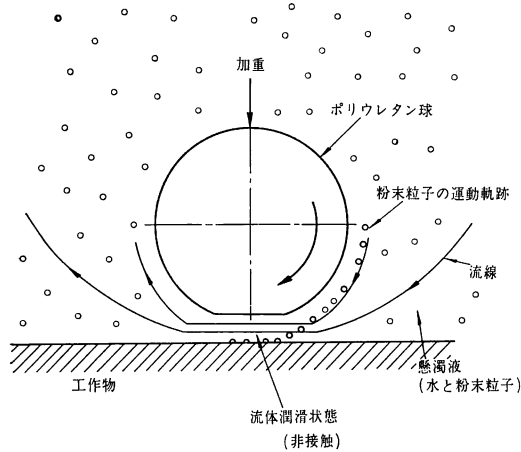


図1 EEM 加工の模式図

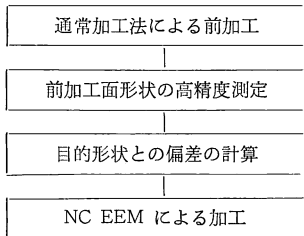


図2 NC EEM を利用した反射ミラー加工システムの構成

ラー加工の場合は前加工面形状と目的形状の偏差分の加工を行ないながら走査することにより任意形状の EEM 加工を可能にしている。

NC EEM を応用した放射光用反射ミラーの作製のための加工システムは図2に示すような構成となり、大きく分けると NC EEM により除去すべき加工量の決定のための前加工面の形状測定と NC EEM による実際の加工プロセスの二つに分けることができる。

ここでは、反射ミラー作製に応用した EEM についてその原理および技術的にほぼ完成されたその NC 化技術の紹介と、もう一つの重要なプロセスである形状測定に関しても、これも大阪大学と共同で開発した高精度形状測定機について、その原理と現状について紹介する。

2. EEM とその応用

2.1 EEM による超精密数値制御加工法

ここまで述べた EEM 加工を実現するためには、微細粉末粒子を加速して工作物表面にほぼ水平に作用させ

る必要がある。EEM を可能にした加工装置としては、大阪大学で開発された NC EEM⁶⁻⁸⁾ がその代表といえる。ここでは、数値制御により任意の形状に対し EEM 加工を可能にした NC EEM について簡単に紹介する。

NC EEM では、微細粉末粒子を一様に分散した懸濁液の中で、ポリウレタン球を回転し、それを工作物表面に近づけたときに生じる流体軸受的流れを用いて混合流中の微細粉末粒子を工作物表面の微小領域 ($\phi 1\sim 2\text{mm}$) に作用させ加工を行なうものである。

ポリウレタン球と工作物表面の隙間は、荷重と流体の動圧とのつりあいによって自動的に安定に保たれ、流れの状態と粉末粒子の分散状態が安定であれば、単位時間当たりの作用粉末数も安定となり、単位時間当たりの加工量も安定となる。それゆえ、任意の位置での加工量は、NC テーブルの送り速度または停止時間によって制御することができ、図3に示すように自由曲面の高精度な加工が可能となる。

換言すれば、各座標での加工量を自由に制御できるため図1に示す粉末加速法は NC EEM に最も適してい

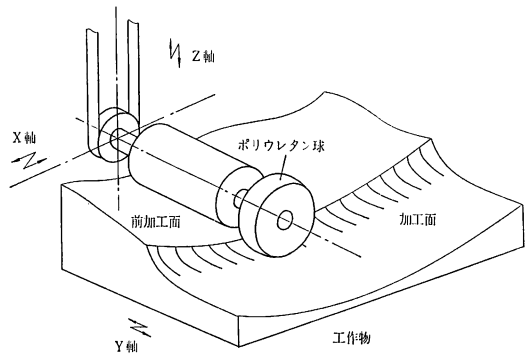


図3 NC EEM 加工模式図

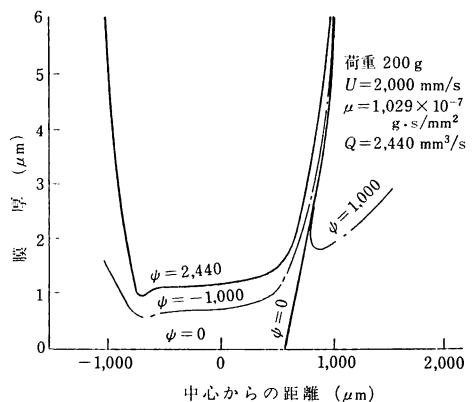


図4 ポリウレタン球と工作物間の流線の一例

るといえる。ただし、この加速法で前節で述べたような欠陥増殖を伴わない EEM が可能であるかどうかを知るために、弾性流体潤滑状態の流れの場の解析を行ない、その流れによって運動させられる粉末粒子の運動を知る必要がある。

弾性流体潤滑理論により数値解析したポリウレタン球の変形状態と流線を図 4 に示す。荷重 200 g, ポリウレタン球の周速度 2 m/s の場合で最小膜厚は $1 \mu\text{m}$ となり、粉末粒子径 (約 $0.1 \mu\text{m}$) より十分大きくなっている。また、粉末粒子の運動を計算した結果、工作物表面へ達したときの速度は水平方向に $1,500 \text{ mm/s}$, 垂直方向には 0.5 mm/s とほぼ水平に工作物表面に作用していることがわかる。

NC EEM は次の手順で行なう。まず前加工面の寸法形状を恒温室で精密測定し、それを計算機に入力する。これと所要の形状、寸法との差を各座標点での加工しとし、これに相当する加工時間の計算を行なう。それに

従って送り速度または停止時間で数値制御し、所要の形状、寸法を得ることができる。本加工は加工量の安定性に基づくものであるから、前加工の測定さえ精密に行なうことができればとくに高精度の機械を必要とせず、超精密加工が可能である。

図 6 はフロートガラスの A 部を B 部の高さに平面加工した例を示す。これにより $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 以上の精度で加工されていることがわかる。図 7 はパイレックスガラスを全領域にわたって同一加工量で加工した例を、図 8 は無酸素銅の平面加工例を示す。軟質材料であっても、EEM が可能であることを示す。

2.2 EEM 加工面の評価⁹⁻¹¹⁾

NC EEM によれば、寸法、形状のコントロールは先に述べたように高精度の加工が可能であり、さらに、図 9 に示すように加工面の表面粗さはタリステップの分解能 (5 \AA) 程度まで得られ、2 段レプリカによる電顕観察でも何も観察されず、幾何学的完全鏡面であるといえる。

また、表面物性的鏡面であるかどうかという問題であるが、EEM 加工面は電子回折、X線回折 (ラング法) などの測定感度では完全な単結晶という結果しか得られ

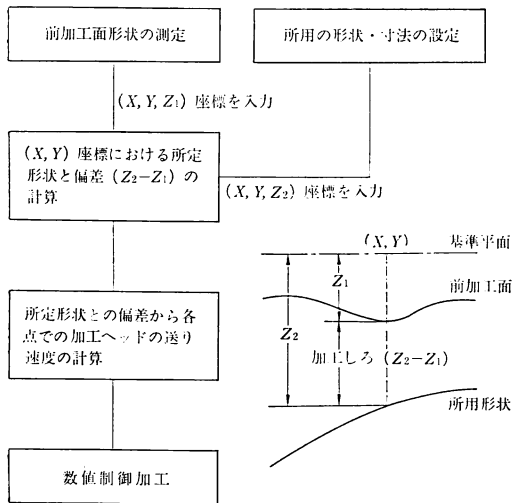
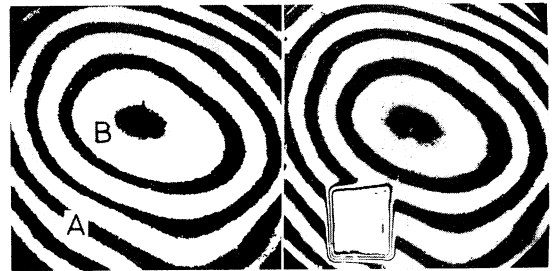


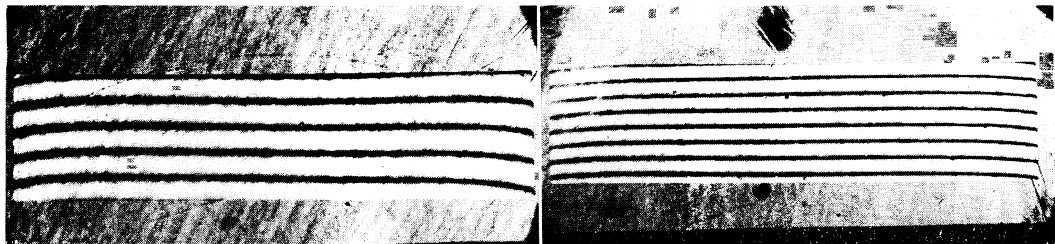
図 5 NC EEM による加工手順



(a) 前加工面 (b) 加工面

図 6 平面加工干渉縞 (A 部と B 部が同じ高さに加工されている)

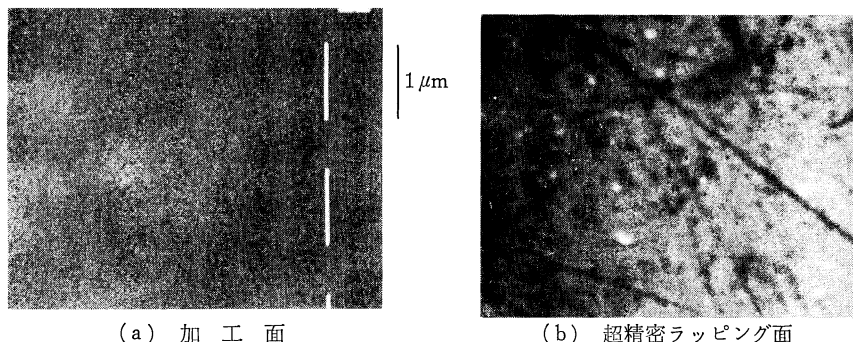
工作物: フロートガラス (60×60 mm), 1 フリンジ: $0.27 \mu\text{m}$.



(a) 前加工面 (b) 加工面

図 7 平面加工干渉縞 (加工領域 200 mm×50 mm)

工作物: パイレックスガラス, 1 フリンジ: $0.27 \mu\text{m}$.



(a) 加工面 (b) 超精密ラッピング面

図8 平面加工面の SEM 写真 (ラッピング面との比較)

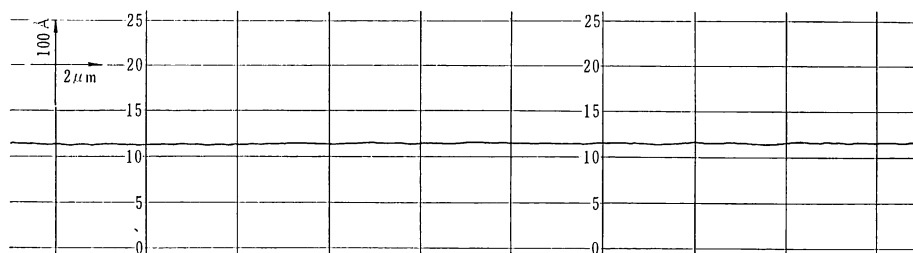


図9 NC EEM 加工面の表面粗さ曲線

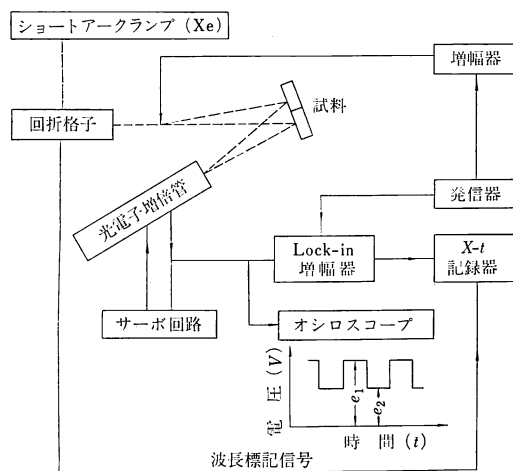


図10 反射率測定装置のブロック図

ず、MOS バラクタの C - V 特性より求めた表面単位密度においても化学研磨と変わらないという結果を得ている。さらに、フェライトなどの磁性材料の加工を行なった場合、加工面の磁気特性はヒステリシスの増加などの悪化をまったく生じないことも確認している。それゆえ、EEM 加工面の表面物性的評価は、もっと感度の高い測定法が必要になる。

そこで表面光反射率測定により表面残留欠陥の量の評価を行なった。測定は化学研磨面と加工面の反射率の差

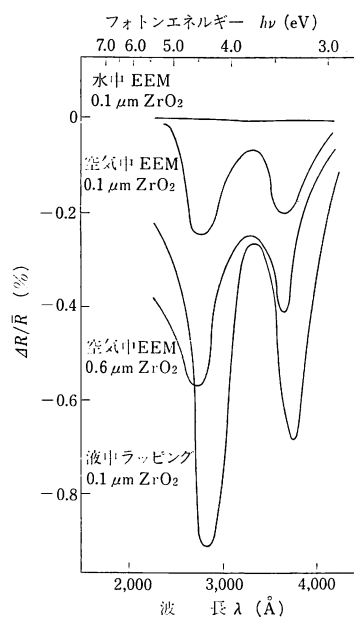


図11 各種加工面の反射率スペクトル

(比較反射率)を測定する方法をとった。Xe ランプを光源とし白色光を回折格子により単色光に分光し、試料に照射する。加工面と基準面となる化学研磨面を接近させて試料台にセットし振動させることにより、両方の試料面から反射光を交互に光電子増倍管で受け、交流信号を

ロックイン増幅器で振動周波数について増幅し、各波長での比較反射率を連続測定するものである (図 10)。

この方法により種々の加工面の比較反射率を測定した結果を図 11 に示す。液中ラッピングや空気 EEM の加工面は電子回折では完全な単結晶性を示していたが、比較反射率の測定では表面の結晶性の差が非常に高感度に検出されていることがわかる。ところで、水中 EEM (NC EEM) で加工した面は、あらゆる波長に対して反射率の低下は見られず、表面物性的完全鏡面であるといえることができる。

そのほかの高感度な評価としては、フォトルミネッセンス相対強度の測定による表面欠陥密度の推定がある。結晶内に不純物を混入すると禁止帯中にアクセプタ準位、ドナー準位のエネルギー準位を生ずる。そのため電子のとりうるエネルギーギャップは、充満帯と伝導帯のエネルギーギャップだけでなく、アクセプタ準位、ドナー準位が関与した種々のエネルギーギャップをとり、励起に用いた光のエネルギーより小さいエネルギーの光を発揮する。これがフォトルミネッセンススペクトルである。

GaAs (n形) のフォトルミネッセンススペクトルは、8540 Å, 8310 Å, 8190 Å の 3 種のピークが観察される。これは結晶中に存在する不純物 Si により生じたアクセプタ準位、ドナー準位に関係した発揮によるピークである。

ところが、これらのピーク強度は格子欠陥の分布密度により変化し、ピークの強度値より欠陥密度を推定することができる。

以上の原理に基づくフォトルミネッセンススペクトルの相対強度を各種加工面について測定した結果を図 12 に示す。0.1 μm ZrO₂ でのラッピング面は、化学研磨面の 1/100 以下のルミネッセンス強度に低下し、Ar イオンスパッタ面も 1/10 に低下しており、極表面層の結晶構造が乱れ、多量の空孔が発生していることを意味している。ところが、NC EEM 加工面のルミネッセンス強度の低下は見られず、フォトルミネッセンスの測定からも表面物性的鏡面であるといえる。

2.3 EEM のまとめ

加工の究極は、与えられた工作物材料の性質を損なわないまま、加工精度をその最小単位である原子の単位に近づけることである。言い換えれば、幾何学的、表面物性的鏡面を得ることである。ここでは、その 1 方法である EEM の加工現象が、異種材料同士の原子間相互作用力に基づく原子オーダーの極微量弾性破壊現象によるものであり、その加工によってできた表面にはほとんど格子欠陥が生じていないこと、また EEM を利用した超精密数値制御加工法により任意曲面を高精度に仕上げる事が可能であることを紹介した。

3. 放射光用ミラーの超精密形状測定装置

3.1 測定の基本原理^{12,13)}

すでに述べた NC EEM は加工物の各点での所要形状との偏差分だけを除去し、必要な形状を得る方法を用いており、前加工面形状が十分な精度で測定されているとすると、必要十分な精度のミラーを作製することができる。

開発した形状測定機は、光波干渉法のように基準面を使用することなく、光の直進性を利用し、被測定面上の

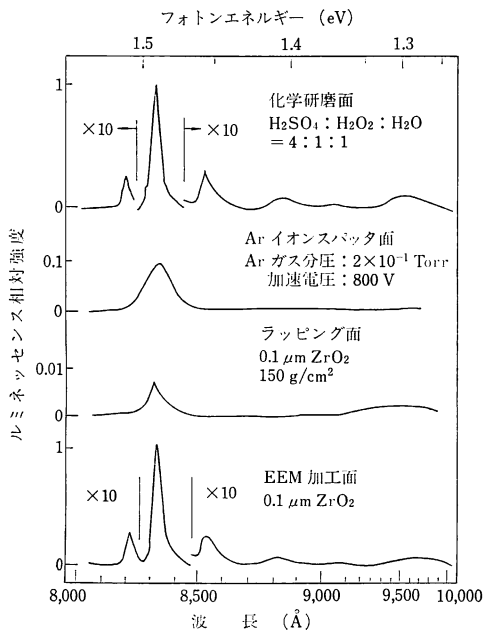


図 12 GaAs の各種加工面のルミネッセンススペクトル

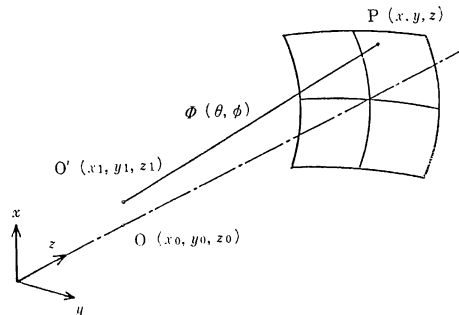


図 13 光反射を利用した形状測定法

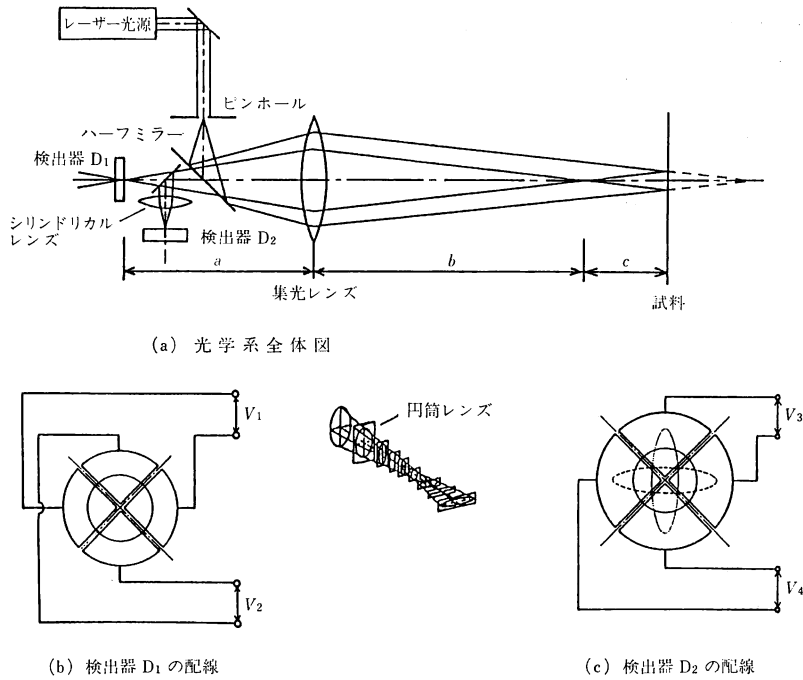


図 14 法線測定用光学系

各点の法線を測定し、面の傾きを求め、それを積分して面の形状を求める方法である。

測定方法は図 13 に示すように光源の位置、光線の方向を調整すると、その光源ベクトルが法線ベクトルとして求まる。法線ベクトルより、光の入射点の傾きが求まる。この操作を繰り返して、面上の各点の傾きを求める。この面の傾きは特定の点の傾きを計算できるようにし、傾きを数値積分することにより、面の形状を求める。

3.2 被測定面上の点における法線の測定

法線の測定には図 14 に示す光学系を用いる。スリットの像は、対物レンズ、被測定面、対物レンズを通り、光検出器上 D₁ 上に結像される。D₁ は図 14 に示すような構造になっており、出力 (V₁, V₂) より像の x, y 方向の位置を知ることができる。また、半透鏡、円筒レンズ、光検出器 D₂ の系によって像の結像位置を知ることができる。この光学系において被測定面が θ 傾くと、D₁ 上の像は $l=2(ac/b)\theta$ 変位する。この変位測定の測定精度が角度 θ の測定精度を決める。一例として、半径 5,600 mm の凹面鏡を測定する場合、 $f=430$ mm, $a=474$ mm, $b=4,699$ mm, $c=427$ mm にした場合、像の変位測定精度が $0.01 \mu\text{m}$ のとき、 1.6×10^{-7} rad, $0.1 \mu\text{m}$ のとき 1.6×10^{-6} rad, $1.0 \mu\text{m}$ のとき 1.6×10^{-5} rad の角度測定精度となる。

この法線測定用光学系を、最初に被測定面の中心での

法線を z 軸移動方向と一致するように調整し、その点を基準点とする。次に、光学系を $\Phi(\theta, \phi)$ だけ傾け、x, y, z 軸方向に移動させることにより、光検出器の出力 (V₁, V₂, V₃, V₄) がゼロになるようにする。このときの $\Phi(\theta, \phi)$ と、x, y, z 軸方向の移動量 (A, B, C) とから測定点の座標、傾きを求める。図 15 に測定点の座標と傾きを示す。測定点の座標は、 $\Phi(\theta, \phi)$ が小さい範囲での測定であるから、 $z=Z_0$ の平面と法線との交点であるとして座標 (x, y) を求めると

$$\left(\frac{\sin(Z_0 - C)}{\cos \phi \cos \theta} + A, \frac{\sin \theta(Z_0 - C)}{\cos \theta} + B \right)$$

x 方向の傾き dz/dx , y 方向の傾き dz/dy は

$$\left(\frac{dz}{dx} = \frac{\sin \phi}{\cos \phi \cos \theta}, \frac{dz}{dy} = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \right)$$

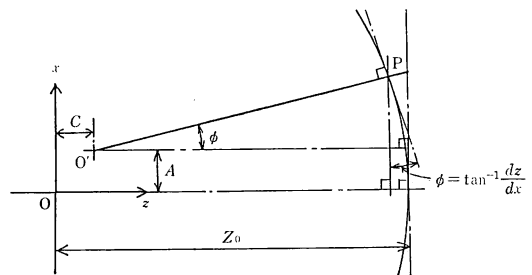


図 15 測定点の座標の傾き

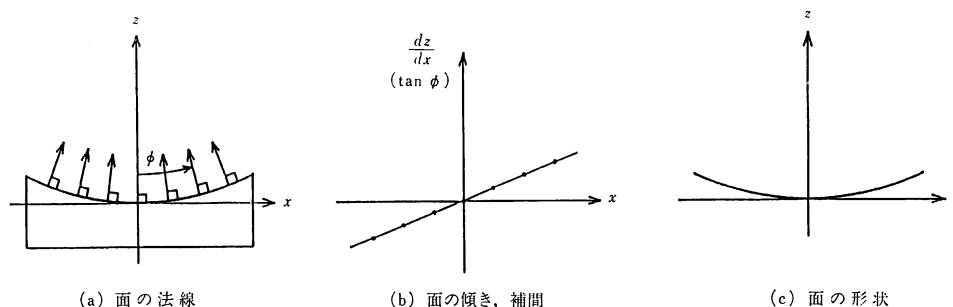


図 16 データ解析手順

となる。θ, φ, A, B, C にはそれぞれ測定誤差が含まれていることから、誤差の伝播を考える必要がある。そこで、二乗平均誤差を求めると、θ, φ が 0.1" の誤差, A, B, C が 1 μm の誤差をもつ場合、0.1" 以下の精度で測定面の傾きを測定できることがわかった。

3.3 データ解析方法

測定された傾きのデータは、被測定面上での特定の点での x 方向, y 方向の傾きである。図 16 (a)(b)においては、積分によって形状を求めるためには、測定データを補間し、任意の点での傾きを知る必要がある。図 16 (c)では、この補間の精度は形状の測定精度に直接影響する。本研究では、最小自乗法を用いたスプライン関数による補間を行なっている。補間されたデータを積分することにより形状を求めることができる。上記の補間方法で、曲率半径 5,600 mm の円の傾きを 5 mm 間隔で入力し、円の形状を計算したときの誤差は、 $1.0 \times 10^{-2} \text{ \AA}$ であり、非常に精度のよい補間が行なわれている。以上のように誤差伝播の解析結果より、0.01 μm/100 mm の精度で形状測定するためには、法線測定用光学系

の位置誤差 2 μm 以内, 角度誤差 0.2" 以内にする必要があることが明らかとなった。

4. 製作した測定装置とその性能^{13,14)}

4.1 測定手順

図 17, 図 18 は原理および測定手順を簡単に示したものである。

基本原理は、ある点から光を試料上に入射し、入射光と反射光の光軸が一致するように各ステージを移動させる。そして、そのときの光軸の方程式を各エンゴダの読みから計算して任意の点での法線ベクトルを得るものである。さらに、法線ベクトルは補間積分処理の後、試料の形状データに変換される。このときの誤差伝播は 5 項で述べたとおりである。今回試作した装置は、図 19 に示すもので、各ステージのガイドはダブルV溝とし、また、ゴニオテーブルは 0.1" の回転を容易に与えられるように弾性変形を利用した回転機構を付加している。これにより各テーブルはピッチング, ヨーイングともに

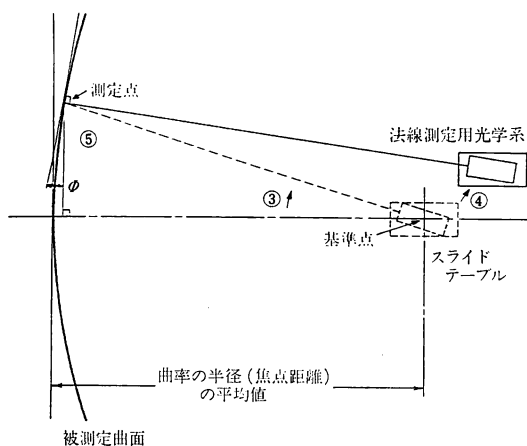


図 17 測定手順 (図中の番号は図 18 に対応する)

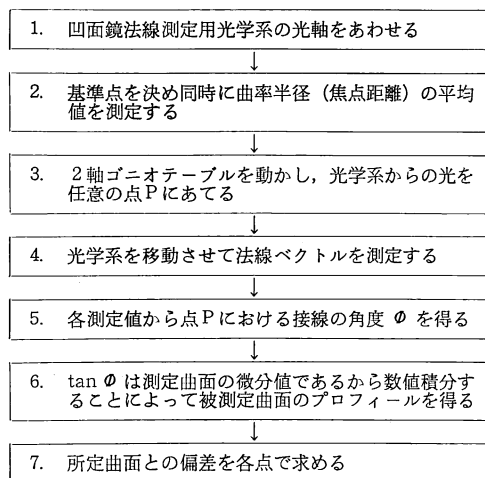


図 18 測定手順フローチャート

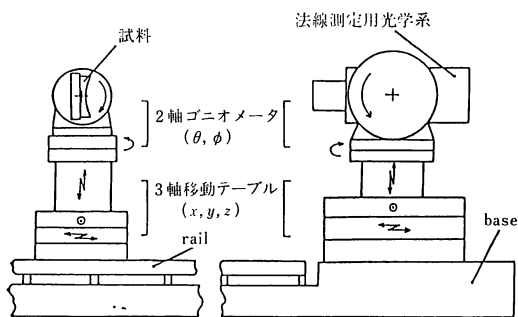
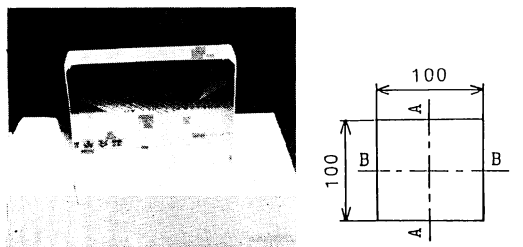


図19 測定装置の配置図



(a) 測定試料 (b) 測定試料の形状
図20 測定試料の形状

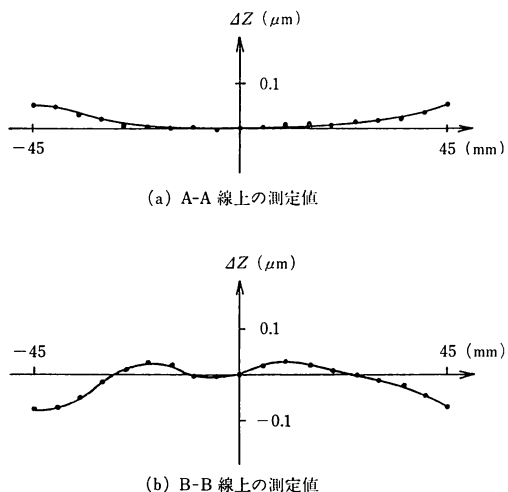


図21 測定結果 ($R=5,555$ mm の球面との差)

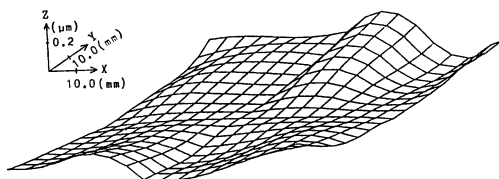


図22 各点の理想球面 ($R=5,555$ mm) からの偏差

0.1" 以内を 80 mm にわたって保証している。

4.2 測定結果

実際に測定した試料の形状は図20に示すような 100 × 100 mm の広さで、その曲率半径が 5,550 mm 前後であることを知っている凹面ミラーである。

測定はミラー全域で法線を測定し、それを積分することによって全域にわたって形状を求めた。さらに、これによって求めた形状に最もフィットする理想球の曲率半径を平均的な曲率半径とした場合 $R=5,555$ mm であることがわかった。また図21は全域で求めた形状データから A-A 線および B-B 線上での形状を示したものである。

ここで横軸は距離で縦軸は、中心をゼロとしたときの $R=5,555$ mm の理想球面からの偏差である。図22は各点の理想球面からの偏差を示したものである。また、測定データの信頼性について検討した結果、法線ベクトルの測定値のばらつきは約 0.2" 程度で、この点からも測定は 0.01 μm/100 mm の精度で行なうことができると思われる。

5. む す び

EEM は基礎研究の段階は、ほぼ終りに近づいているといえる。現段階は、EEM の利用技術を積み重ねているのが現状である。つまり、EEM を利用した超精密加工方法は、いろいろ考えられ、本稿で解説したポリウレタン球を使用した加工は代表的な方法であるが、同原理を応用した方法が開発^{15,16)}されている。したがって放射光用ミラーのための EEM の利用方法を開発していけば、精度の高いミラーを作製することができるものと期待される。そのためには、ミラーの形状をどこまで高精度に測定できるかが重要であり、EEM の利用技術を高めるとともに、超精密な形状測定機の開発も期待される。

終りに、本稿は共同研究者の大阪大学、森 勇蔵教授、杉山和久、山内和人の各氏との日ごろの討論に負うところが多く、また NC EEM に関しては、とくにご教示いただいていることを記して感謝の意を表する次第である。

文 献

- 1) 森 勇蔵: 精密機械, 46 (1980) 659.
- 2) 森 勇蔵, 津和秀夫, 杉山和久: 精密機械, 43 (1977) 542.
- 3) Y. Mori, N. Ikawa and K. Sugiyama: Technol. Rep. Osaka Univ., 26 (1976) 557.
- 4) Y. Mori, N. Ikawa and K. Sugiyama: Technol. Rep. Osaka Univ., 28 (1978) 525.

- 5) 森 勇蔵, 井川直哉, 杉山和久, 山内和人: 昭和 58 年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1983) p. 125.
- 6) 森 勇蔵, 井川直哉, 杉山和久, 奥田 徹: 昭和 54 年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1974) p. 193.
- 7) H. Tsuwa, N. Ikawa, Y. Mori and K. Sugiyama: *Ann. CIRP*, **28** (1979) 193.
- 8) 森 勇蔵, 井川直哉, 奥田 徹, 杉山和久, 山内和人: *精密機械*, **49** (1983) 1540.
- 9) 明田勇蔵, 猪原章夫, 杉山和久: 昭和 48 年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1973) p. 275.
- 10) 森 勇蔵, 井川直哉, 杉山和久, 森 康修, 中川正弘: 昭和 52 年度精機学会春季大会学術講演会前刷 (1977) p. 501.
- 11) 森 勇蔵, 井川直哉, 杉山和久, 中川正弘: 昭和 54 年度精機学会春季大会学術講演会前刷 (1979) p. 269.
- 12) 森 勇蔵, 杉山和久, 山内和人, 西川和仁, 酒井啓至, 本郷俊夫, 東 保男: 昭和 59 年度精機学会春季大会学術講演会前刷 (1984) p. 718.
- 13) T. Hongo, Y. Mori, Y. Higashi, K. Sugiyama, K. Yamauchi, K. Nishikawa and K. Sakai: *International Symposium on Metrology for Quality Control in Production*, Tokyo (1984) p. 152.
- 14) 本郷俊夫, 東 保男, 森 勇蔵, 杉山和久, 山内和人, 西川和仁, 酒井啓至: 昭和 59 年度精機学会春季大会学術講演会前刷 (1984) p. 716.
- 15) 渡辺純二: 日本学術振興会第 145 委員会資料 2-29(1978).
- 16) Y. Namba and H. Tsuwa: *Proceeding of 4th International Conference for Production Engineering*, Tokyo (1980) p. 1017.