

超精密加工と高性能加速管への応用(3)

小泉 晋*

Ultra-precision Machining and its Application to Advanced Accelerators (3)

Susumu KOIZUMI*

第3章 超精密加工機の出現

1. 超精密加工機の歴史

超精密加工用の主軸, 工具, 被削材を得て, 超精密加工業界は一気に加速されることになるが, そのあたりを超精密加工機の歴史のページをめくりながら, 振り返ってみよう。

ダイヤモンドで加工しようとする試みは, かなり古い文献に見られるが, 鏡面加工用の技術として成熟してきたのは, たかだか4~50年ほど前にすぎないのである。以上まで述べてきた様な精度の超精密加工機を自社で開発製作し, 工具にダイヤモンド工具を使用して, 世界で初めて鏡面加工に成功したのは, ダイヤモンド工具メーカーのオランダのフィリップス社と云うことになっている。昭和15年(1940)のことである。

以下, 続々と超精密加工機が開発製作されて, 鏡面加工に成功する企業が現れてくるのであるが, 鏡面加工に成功した順番をあげるとすれば, いろいろ異論もあろうが, 下記の通り¹⁾である。

Philips (オランダ, '40), Bryan Simons (英, '43), Union Carbide (米, '62), Bell Howell (米, '63), Lawrence Livermore National Laboratory (米, '67), Moore Special Tool (米, '68), G. Boley (独, '68), Perkinson Elmer (米, '70), 豊田工機 (日, '72), Ex-cell-O (米, '72), Rank Taylor Hobson (英, '72), Pneumo Precision (米, '74), Rockwell International (米, '76), Carlhamb (英, '76), 東芝 (日, '77), Polaroid (米, '78), Battelle Northwest Laboratory (米, '78), 日立精工 (日, '79), 東芝機械 (日, '80), Kollmorgen (米, '82), シャープ (日, '82),

不二越 (日, '83)

これらの他に,

Applied Optics Center, Rank Optics, Honeywell, DuPont, Bendex, Carl Zeiss, Heald, Cranfield 大学 (CUPE), 埼玉大学, 大阪大学, 宇都宮大学, 機械技術研究所, 電子総合技術研究所, NHK などがある。

日本では, 東芝の後に東芝機械が, 昭和53年(1978)に, 前述した東芝の球面軸受の技術供与を受け, 昭和55年(1980), 工作機械見本市に, 顕微鏡用資料の表面を鏡面加工する鏡面加工機を出品した。

東芝機械が, 鏡面加工機を完成するまでの期間が短かったのは, どの程度の加工機械で, どの程度に加工した部品を使用すれば鏡面加工機になるかと云う, いわばノウハウの供与を受けたからである。

昭和57年(1982)になると, 東芝機械は, レーザプリンタの心臓部にあたるスキャナ用ポリゴンミラを加工するポリゴンミラ加工機 (図16) を開発し, 第11回大阪国際工作機械見本市に出品して話題を呼んだ。もうこの頃の主軸精度は, $0.02 \mu\text{m}$ 以下が狙えるほどの精度向上に成功していたのである。

ポリゴンミラは, 従来, 回転テーブルなどの分割精度を測定するための角度基準として使用されてきて, 非常に高価なものである。しかしながら, 世の中が情報化時代となるにしたがって, 超精密加工を用いた安価なポリゴンミラが出現してきて, レーザ光線などの光線を走査させるスキャナ用としての回転多面鏡として主に使われるようになってきている。

スキャナとしての用途には, コンピュータのデータ処理用としてのレーザプリンタ, 圧延鋼板, フィルム等の表面欠陥検査, 部品などの識別, POS システ

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK
High Energy Accelerator Research Organization

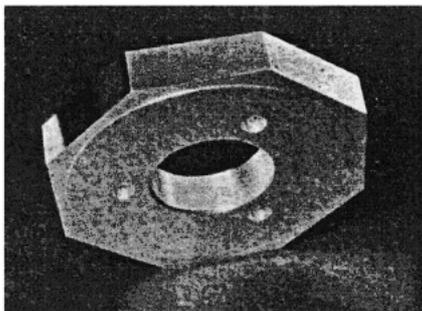


図16 ポリゴンミラ加工機とポリゴンミラ²⁾

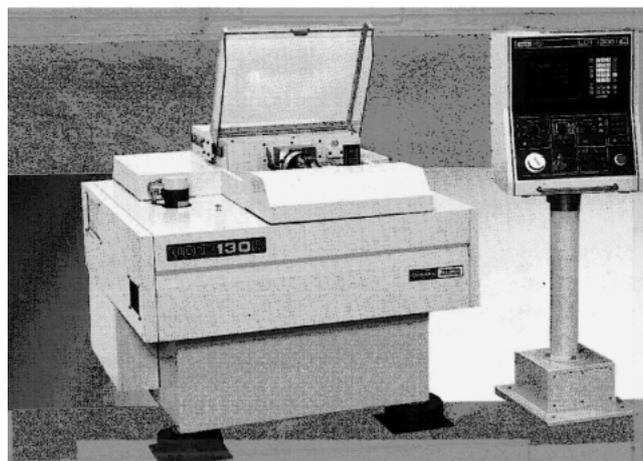
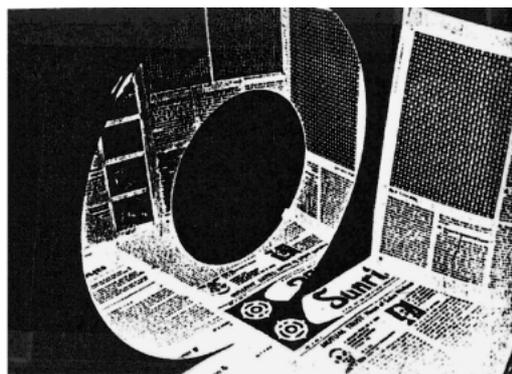


図17 ディスク旋盤とディスク³⁾

ム^{*1}などのバーコード読みとり、炭酸ガスレーザによる溶接・焼入れ用スキャン装置などに使われている。とくに、レーザプリンタは、振動・騒音がない上に、高速、高鮮明度が可能であり、脚光を浴びたのである。

従来の光学的研磨方式の、いわば手作りの段階では数万円から数十万円していたポリゴンミラも、超精密工作機械を用いた切削方式を採用することによって、製作時間は1/10以下に、コストは1/10から1/100にも低減できる上、大量生産も可能となった。安価になったことで、パソコンのページプリンタには当たり前の様にどんどん使用されているし、スーパーのレジはPOSシステムが当たり前となった。

昭和59(1985)年になると、東芝機械は、磁気ディスクを加工する超精密ディスク旋盤(図17)の開発に成功して、秋の第12回東京国際工作機械見本市へ出品して話題をさらった。

磁気ディスクは、ドーナツ型の高純度アルミニウム

合金の基板を研削、ラッピング、ポリシングなどの加工を行い、その上に磁性膜をコーティングしたものであって、表面粗さは磁気ヘッド浮上高さ(例えば0.3 μm)の5% (0.015 μm)が要求される。

鏡面加工は、かつては遊離砥粒とラップの組合せの圧力転写の原理に基づいた古典的な手法で行われていたのであるが、超精密加工機の出現によって機械の母性原理に従った運動転写の原理で加工出来るようになったのである。ここにおいても、超精密加工によるコストダウンで、パソコンにも、ハードディスクが付いているのが当たり前となってしまっている。

昭和57(1982)年の第11回大阪国際工作機械見本市の時期を称して、超精密加工機の商品モデル元年と云う人もいるほど、豊田工機と日立精工はディスク旋盤、不二越はポリゴンミラ加工機と、争うように実用化された超精密加工機が出品されて世界の注目を集めたのである。丁度この頃の我が国は、重厚長大から軽薄短小の情報産業への転換期を迎えており、超精密加工へのニーズが高まっていたために急速に受け入れられたと云う好運にも恵まれて、たちまち普及してしまったのである。

*1 POSシステムとは、point of sales system(販売時点情報管理)の略。店頭のバーコード端末で読み取られたデータを中央コンピュータで処理し、販売動向から在庫管理、製品計画、供給計画などを総合的に管理するシステム。

超精密加工は、米国の研究では、軍事、宇宙、原子力（エネルギー）などの国策事業からの強い要請が、非常に大きな活力となって研究が大いに進展し、軍需光学用品の加工に用いられたのと対照的に、我が国では専ら民需用品の加工に適用された。

すなわち、コンピュータ用磁気ドラム、複写機用ドラム、複写機用ポリゴンミラ、バーコード読み取りボス用ポリゴンミラ、記録用ディスク、CD用対物レンズ用型、コンタクトレンズ、フレネルレンズなどはその代表例で、最近では磁気ヘッドの溝加工までの多岐多様な分野に及んでいる。

特に、大量に必要となったCD用の対物レンズや磁気ヘッドの様な需要が、光・電子機器産業の急成長と共に超精密加工機の市場を急速に進展させて、世界の市場占有率を拡大しながら現在に至っているのである。

2. 超精密加工機による超精密加工

ここで、第2章の2で述べた超精密鏡面除去加工領域に使用されている超精密加工機とその加工品などについて機種毎に簡単に説明しておく。

(1) 超精密ドラム加工機

豊田工機は、フランスのジャンドロロン社から技術導入した円筒研削盤の主軸に使用されていた流体軸受からヒントを得て高精度の静圧油軸受を独自に開発して、当時、ポーレ（西ドイツ）やシモンズ（米国）などの精密旋盤でしか加工できなかったコンピュータ用の磁気ドラムの加工機に挑戦し、昭和47年（1972）見事に成功、これが国産の超精密加工機の第1号機となったことは前述した。

この加工機は、豊田工機の円筒研削盤と同様の形をしており、油圧シリンダで駆動されるV—平静圧油案内のテーブルを採用し、そのテーブル上面に静圧油軸受で支えられた被切削物の磁気ドラムを載せている。

すなわち、我国で初めての超精密加工機は、今に云う超精密ドラム旋盤であった。ドラム旋盤は、後にコンピュータ用の需要が無くなり、印刷ロール（版胴）加工用となり、さらに現在では、間接式複写機（PPC）の普及に伴って、感光ドラム加工用が主たる用途となっている。

感光ドラムは、消耗品として扱われており、メンテナンスのサービス員が、感光膜が摩滅する前にドラムごと定期的に取り替えているので、我々は何も不自由を感じていないのであるが、最近では、複写機の使用頻度が増大して、メンテナンスが間に合わない状況に

あり、ドラム表面に硬いアモルファス膜を形成して長寿命化をはかる動きが出てきている。

そうになると、アモルファス膜は、数 μm と薄いので、表面の加工精度が画質に直接影響することとなり、益々厳しい加工精度が要求されることになるのである。

(2) 超精密ディスク加工機

昭和59（1984）年以前は10%以下と云う世界占有率であった磁気ディスク装置は、昭和59年初頭から一斉にサブストレート部門に新規参入したアルミ業界によって目ざましい発展を遂げた。

磁気ディスク基板は、米国のAlcoa社が一手に供給していたのであるが、昭和59（1984）年には、日本の神戸製鋼、古河アルミニウム、住友軽金属、スカイアルミニウムが世界市場の約75%を占有してしまったことは前述した。

現在のコンピュータ社会においては、この磁気ディスク装置の果たす役割は限りなく大きい。磁気ディスク装置は、記録密度の向上と信頼度の確保で評価され、記録密度（面記録密度=ビット密度×トラック密度）は3年で4倍と急激な進展・向上を見せているし、信頼度はビットエラーで、万が一（ 10^{-4} ）にも万が一のエラー（ 10^{-8} ）が起こらぬよう保証した上で、エラー修正コードによりそれを補正し、エラーレートを 10^{-12} にしていると云う⁴⁾。

記録密度を向上させるためには、ディスク表面と磁気ヘッドとの間隔を詰めればよいので、ディスクの表面精度を上げて、磁気ヘッドをディスク面にどんどん近づける努力をする必要がある。

図18は、ビット密度と磁気ヘッドの浮上量の関係を示した図表⁴⁾である。

これによると、最近の磁気ディスク装置においては、磁気ヘッドの浮上高さは $0.3\mu\text{m}$ 以下にしなければならないために、磁気ディスク基板の表面精度は、表面粗さであらわすとすれば、仕様上 $0.018\mu\text{mRa}^{*2}$ 以下の精度（実際には、 $0.01\mu\text{mRa}$ 以下の精度で運用されている）が要求されていることになるのである。

磁気ディスク基板は、ドーナツ状の高純度アルミニウム合金のサブストレートと呼ばれる円板に磁性膜を着けたものであり、各種の形状があるが、全て薄板であり平面度を確保することが非常に難しい。

^{*2} 粗さの表し方の一種で平均線粗さを云う。これは、基準長内の粗さ曲線と平均線との間に囲まれた面積の和を基準長で割った平均値で、磁気ディスクの規格では、この粗さ表示が使用されている。

平面度の測定には、RVA計と呼ばれる測定器が使用され、磁気ディスク装置と同じ回転数(3,600 rpm)での振れ(変位)と、その振れを微分した速度、それをさらに微分した加速度を求めて、特に、その加速度が規格値に入るかどうかを調べることにしている。

加速度を重視している理由は、加速度が回転中に空気の動圧で浮上しているヘッドの安定性に最も影響を及ぼす要因であるからである。もしも、加速度の値が大きい場合には、磁気ヘッドと磁気ディスクとの間のギャップが一定に保てなくなり、つまり、追従出来なくなり、互いが衝突・接触事故を起こしてしまうことになるのである。

超精密ディスク旋盤の開発について、興味深い報告がある。すなわち、開発当初の昭和48年(1973)頃は、表面粗さ $0.04\mu\text{mRa}$ 程度の精度であったものが、主轴を静圧空気軸受化し、テーブル案内も静圧空

気案内化することなどによって、昭和55年(1980)には、表面粗さ $0.01\mu\text{mRa}$ 以下にする事が出来たと云う報告である。現在では当然と思われることも、当時としては、大変な苦勞を重ねて修得した事柄なのである。

(3) 超精密ポリゴンミラ加工機

ポリゴンミラ(多面鏡)は、従来、回転テーブルなどの分割精度を測定するための角度基準として使用されて来ていた。しかしながら、世の中が情報化時代となるにしたがって、レーザ光線などの光線を走査させるスキャナ用回転多面鏡としての用途に、主に使われるようになってきている。

スキャナとしての用途には、前述した様に、コンピュータのデータ処理出力用としてのレーザビームプリンタ、圧延鋼板・フィルムなどの表面欠陥検査、POSシステムなどのバーコード読取り、部品などの識別、炭酸ガスレーザによる溶接・焼入れを行うレーザ加工などがある。

とくに、レーザプリンタ(LBP)は、ラインプリンタ、ドットプリンタの様なインパクト部分がないために、振動・騒音が無いと云う大きな特長を有して、高鮮明度、高速化が可能であり、OA機器の出力印刷装置として脚光を浴びたのである。

図19は、レーザプリンタに使用されたポリゴンミラの代表的な使用例である⁵⁾。

ポリゴンミラは、精度の高い精密部品であるために、従来からの光学研磨方式による生産では、時間がかかって非常に高額なものとなり、とても世の中のニーズには答えられない。そこで、従来からの光学ガラスに代わって高純度アルミニウム合金を使用し、ラッピングやポリッシングに代わる超精密加工を行うことによって、高精度、低価格、高生産性のポリゴンミラの製品化に成功した結果、世の中のニーズに答える

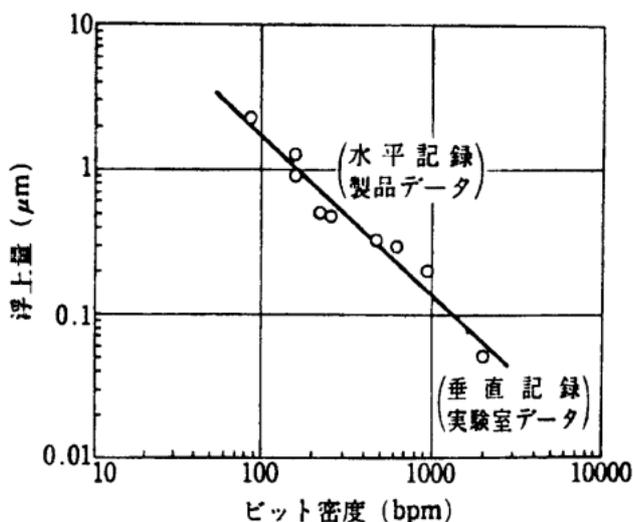


図18 浮上量とビット密度との関係

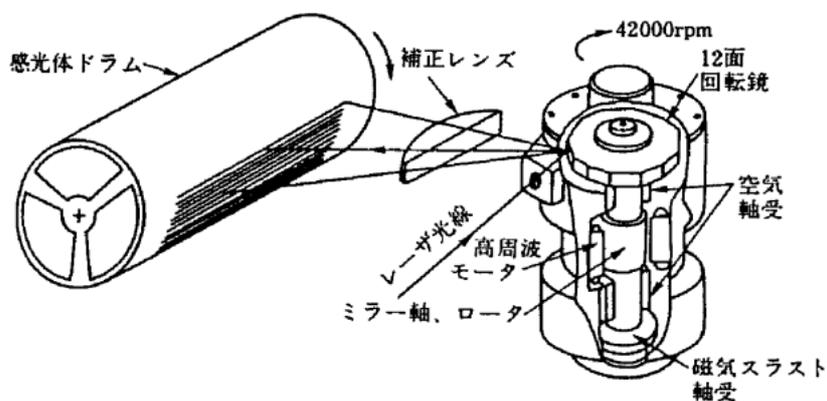


図19 レーザプリンタのスキヤニングユニット

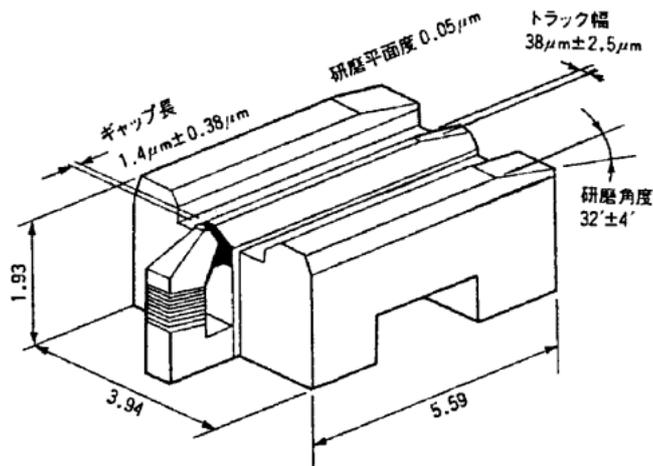


図20 磁気ディスクヘッド

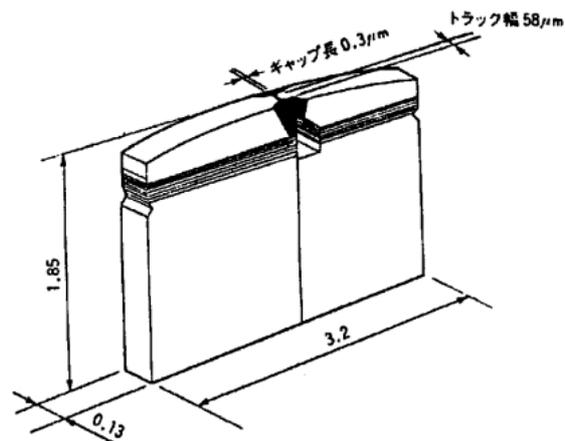


図21 ビデオヘッド

ことが出来るようになったのである。

光学研磨方式でポリゴンミラを製作していた頃は、1 個数万円から数十万円もした貴重品であったが、超精密加工で製作できる現在では、従来の1/10~1/100 以下のコストで大量生産が可能となっている。

その結果、前述した様に、高嶺の花であったパソコン用のレーザープリンタが安価に手に入るようになったし、スーパーのレジにも使われて大活躍するようになったのである。

(4) 超精密スライサ

従来の金属磁性材料に比して、酸化物磁性材料であるフェライトが、高周波特性および耐摩耗性において、格段に優れていることが分かり、昭和48(1973) 年以降に、パソコンを含めた電子計算機の記憶装置(磁気ドラム、磁気ハードディスク、フロッピー・ディスクなど)への書込み・読出し用の磁気ディスクヘッド(図20)、あるいは、急成長を遂げた家電業界におけるVTRの録画・再生用ビデオヘッド(図21)などの材料として急速に使われ始めてきた⁶⁾。

それに伴って、硬脆で加工しにくい磁性材料であるフェライトに対する超精密な加工の研究が行われ、加工に適した超精密加工機が次々と開発されるようになった。

一方、半導体技術の進歩により高密度化した超LSIの加工の必要からシリコンウエハへの溝入れ加工用の超精密加工機も現れてきた。

この両者は、切断・溝入れと云うその機能上ほとんど同じ形をしているが、一応、前者の磁気ヘッド用のものをスライサ、後者のシリコンウエハ切断用のものをダイサと呼んで区別しており、前者のスライサの方が厚板が切断出来る様に若干剛性も高く作られている

のが普通である。

磁気ヘッドの加工工程は、各社差はあるものの、単結晶インゴットの切断から始まり、60 工程ほどかかるのが普通である。最後の仕上げの数工程は、かなり精度の高い超精密のスライサが必要となり、静圧空気軸受のような振れと振動のない主軸を持たない加工機では、加工が困難である。かつて、最終工程の歩留りが60% 程度であったものが、静圧空気軸受の主軸と交換することによって98% 程度まで引き上げることが出来たと云う報告もある。

(5) 超精密非球面加工機

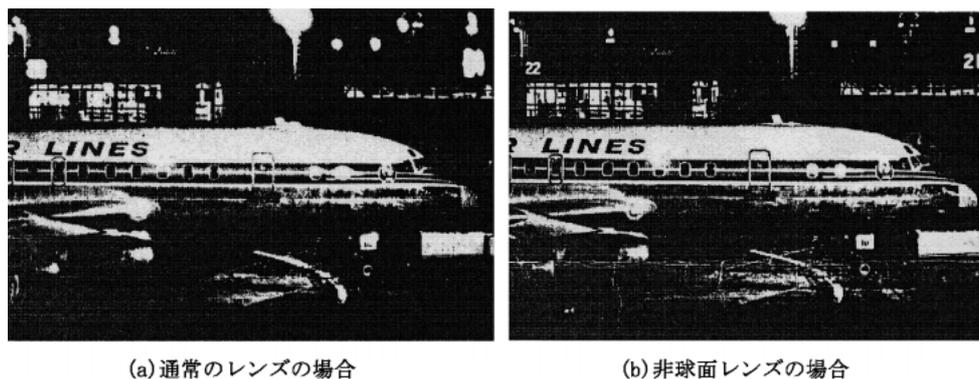
超精密加工機において、同時3 軸以上の制御が行えるとすれば、いろいろな曲面の加工が可能となる。その最も代表的なものが、同時3 軸制御で非球面レンズの加工などの加工を行う超精密非球面旋盤である。

カメラ、ビデオなどの民生機器から顕微鏡、投影機、レーザー応用機器など産業・学術研究用に至るまでの殆どの光学機器には、球面あるいは平面のレンズまたは鏡が用いられている。

球面や平面は、基準となるマスタが得易いために、古くから高精度のものが得られているが、球面の、いわゆるレンズには、原理的に5 種類の収差と呼ばれる誤差があり、そのままでは簡単に使用できないのである。

その収差を取り除く手段としては、かなり前からレンズの組み合わせで相殺する方法が考え出されている。そのため、いろいろなレンズを組み合わせを考え、苦心しながら、この収差を相殺させるための多大な努力を払ってきているのである。

光を一点に集められないと云う球面収差について



(a)通常のレンズの場合

(b)非球面レンズの場合

図22 非球面レンズの効果⁷⁾

は、放物面などの非球面光学素子にすれば現れないことを古くから経験で分かってはいたのであるが、当時の工業技術レベルでは、その形状に加工する方法が見つけ出すことが出来ずに現在に至っているのである。

最近になって、超精密加工を可能にした高精度の機械加工技術の進展と高精度の数値制御技術の発達によって、ようやく、機械加工でも、自由曲面が、光学的精度にまで出せる可能性が出てきたので、急速に、自由曲面、とくに非球面加工への期待が高まってきているのである。

非球面光学素子の最大の用途は、カメラ、ビデオ、コンパクトディスクなどの大衆消費財の分野である。

図22は、カメラのレンズに使用された例⁷⁾で、非球面レンズの使用によって、夜景の撮影においてフレアのない鮮明な画像が得られていることが分かる。

図23は、コンパクトカメラの先駆けとなったコダック社の超薄型コンパクトディスクカメラに使用された例⁸⁾で、非球面レンズを1枚使用しただけで、レンズ系の焦点距離を12.5mmまで縮めることが出来て、薄型化に成功している。

なお、この非球面レンズ(ガラス)は、超精密非球面旋盤で製作した型で超精密に成形すると云う超精密成形法に世界初めて成功したレンズなのである。

図24は、CDプレーヤーのピックアップレンズに使用された例⁹⁾であり、従来は、球面レンズを4~5枚組み合わせて使用していたのであるが、超精密ガラス成形技術によって作られた非球面レンズを採用することによって1枚で済むことになっており、ピックアップレンズに大きな革新をもたらしたのである。

また、CO₂レーザーの集光用には、赤外線吸収の少ないセレン化亜鉛あるいは塩化カルシウムの単結晶レンズを使用しているが、図25の様な99.999%モリブデンの軸外し放物面ミラを製作し集光している例¹⁰⁾

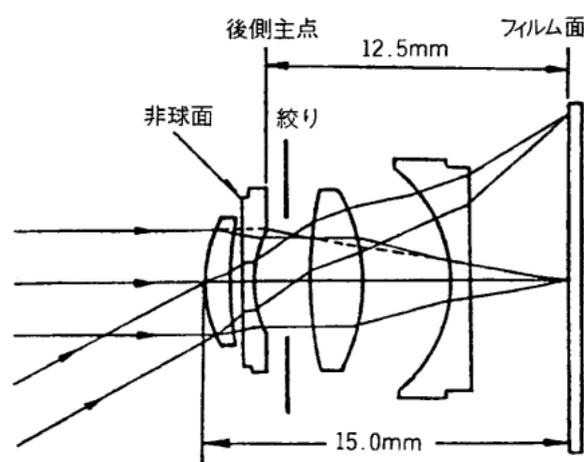
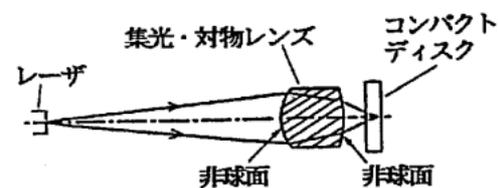


図23 ディスクカメラのレンズ構成



(a) 球面レンズの場合



(b) 非球面レンズの場合

図24 CDプレーヤーピックアップレンズへの利用

もある。この放物面ミラは、集光安定性に優れ、長寿命であると云う利点があり、特にCO₂レーザーでは、波長の10.6μmに対しては反射率が高いので、益々この様な場所に使用されるはずである。

さらにまた、最先端技術分野のレーザ核融合にも、これに類似した集光ミラの存在は不可欠であり、非球面ミラ加工への要望は、益々高まっている。この様なレーザ用反射鏡の日本で初めての加工専用機（SPM-4）は、通産省工業技術院の大型プロジェクトである「超高性能レーザ応用複合生産システムの研究開発」において、東芝と東芝機械が共同開発した機械である。

非球面光学素子活用の次の重要な分野は、コンピュータ関連などの産業の分野である。コンピュータ技術の急速な進歩は、高集積度の超 LSI の次々の開発を促し、それが、非常に短い周波数光源を使用したりソグラフィ装置の必要性をもたらしている。今や、その装置に使用される光源は、X 線を利用するところまできており、従来の屈折を利用して集光するところの光学系（レンズ系）で対応することは到底不可能と

なってきた、シリンダリカルミラやトロイダルミラなどの傾入射光学素子を使用して X 線を集光する光学系を使用せざるを得ないところまできている⁹⁾。

この様な鏡による X 線の集光方法については、加速器と関係の深い放射光の集光光学系に使用されるので、ここで、少し詳細に述べておきたい。

集光ミラの加工方式は、大別すると、テーブル往復毎に微小角回転させた刃物台上に付けられた工具（バイト）で切削するプレーナ方式（図 26(a)）と、回転する円板に取り付けた 1 本バイトでフライス盤の様に加工するプラノミラ方式（図 26(b)）とがある。

プレーナ方式は、このままでは、加工面は円筒面であるが、テーブル移動中の各位置毎にバイトを上下方向に微小な出し入れの制御を行うことにより自由曲面を得ることが出来る。また、プラノミラ方式では、円板回転軸の傾き角を変えることで加工断面の曲率半径を変えることが出来ると共に、円板の回転角に同期させてバイトの微小な出し入れの制御を行うことにより自由曲面を得ることが出来るのである。

X 線ミラとして使用する場合には、限界角 5 度以下に傾けて使用するので、反射方向を横切る形の切削痕があると散乱現象を引き起こしかねないと考えられるため、高エネルギー物理学研究所では、前者の反射方向に平行に切削するプレーナ方式を採用し、加工機の試作¹¹⁾にも成功して、大型トロイダルミラの加工を行っている¹²⁾。

一方、日立製作所中央研究所では、後者のプラノミラ方式の方が精度が出し易いと考えて後者の方式を採用して加工機を試作している¹³⁾。

この日立製作所中央研究所で試作した加工機で、高エネルギー物理学研究所のフォトンファクトリ BL 8C の集光光学系に使用された楕円筒ミラを加工した

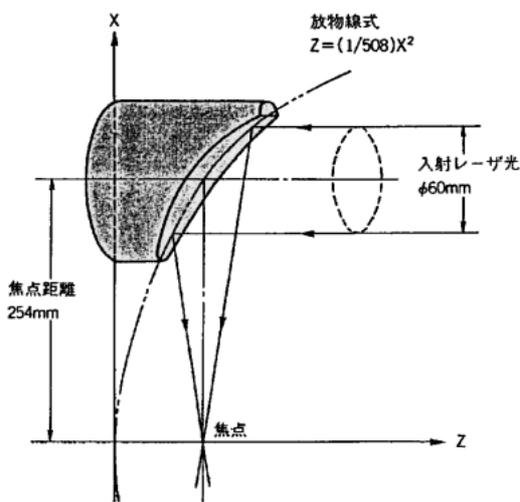


図25 放物面ミラの例

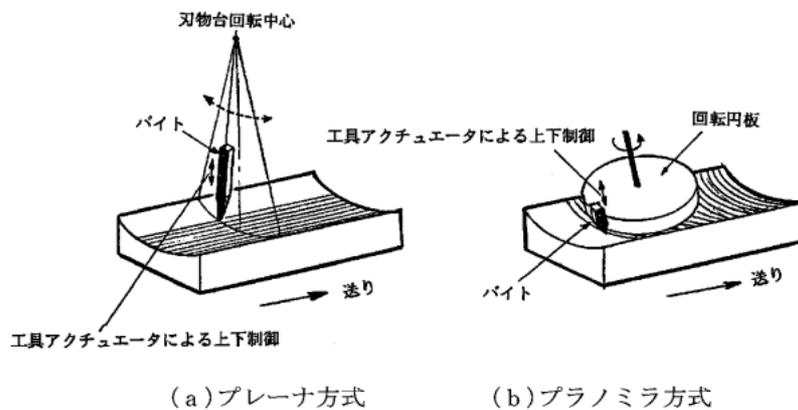
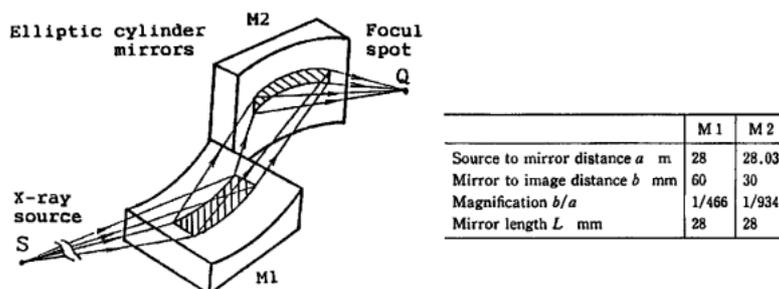
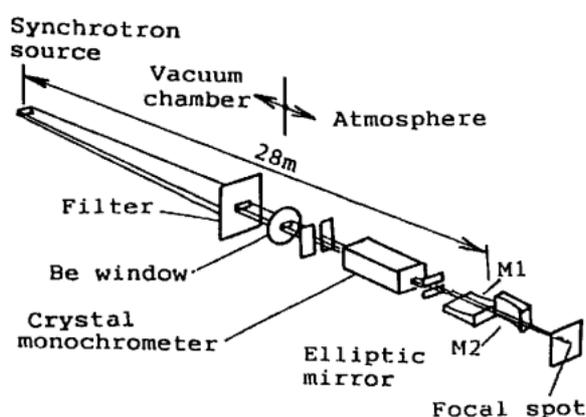


図26 集光ミラの加工方式

図27 集光ミラ光学系¹³⁾図28 集光実験装置の構成¹³⁾

例を以下に示しておく。

加工されたミラは、図27に示す様なM1とM2の2枚の無酸素銅製のミラで構成されている。M1とM2の曲率は、それぞれ40.8mと19.6mであり、計算上要求される精度は、形状誤差 $0.1\mu\text{m}$ 以下、表面粗さ $0.001\mu\text{m}$ ($=10\text{\AA}$)以下である。

実際に加工された製品の精度は、十分に要求される精度を満足するものであったと報告¹³⁾されている。

確かに、精密な表面粗さ計で測定してみると、切削方向(切削するバイトが回転しているので、送り方向に対して直角方向)の表面粗さに比べ、切削直角方向の表面粗さは8倍ほど粗くなるので、図27に示す様に、光の入射方向が切削方向となる様な光学系を採用している。

このミラの集光実験は、高エネルギー物理学研究所のフォトンファクトリBL8Cにおいて、図28に示す様な実験装置を構成して行われて、シンクロトロン放

射光光源から出たX線の白色光から波長 $1.3\sim 2.3\text{\AA}$ に単色化して実験した結果、希望する集光結果が得られたと報告¹³⁾されている。

参考文献

- 1) 江田 弘, 貴志浩三: 超精密加工技術の進展性を探る, M & E, 昭60(1985)1月, 84
- 2) 東芝機械: 超精密ポリゴンミラ加工機, カタログ
- 3) 東芝機械: 超精密ディスク旋盤, カタログ
- 4) 藤野 稔, 田中敏雄: 超磁気ディスク装置, 精密工学会誌, 51[昭60(1985)]1号, 113
- 5) 職業訓練研究センター編: [超精密加工シリーズ3] ポリゴンミラの超精密加工, [平成(1989)], 職業訓練研究センター
- 6) 原 章, 池田 修: 磁気ヘッド用精密研削加工機, National Technical Report Vol. 31[昭60(1985)] No. 5, 718
- 7) 春本 功, 渡部国男: 非球面レンズの製造技術, 機械の研究, 28[昭51(1976)]9号, 1071
- 8) 鈴木 弘: 非球面の超精密加工, '87超精密加工ハンドブック, 機械技術臨時増刊, Vol. 35[昭62(1987)] No. 9, 47
- 9) 応用機械工学編集部: 両面非球面ガラスレンズの超精密成形技術の確立, 26[昭60(1985)]12号, 101
- 10) 馬場三知夫, 上田勝宣: モリブデン放物面ミラーの高精度切削加工, 応用機械工学, 30[平成(1989)]3号, 116
- 11) 東 保男, 小池重明, 高富俊和, 小泉 晋: X線集光用非軸対称非球面ミラーの加工装置の開発, 精密工学会秋季大会学術講演会論文集, [平4(1992)] A02-1
- 12) 小池重明, 東 保男, 高富俊和, 小泉 晋, 山元進一: X線集光用ミラーの加工の研究, 精密工学会秋季大会学術講演会論文集, [平6(1994)] E62-803
- 13) 内田史彦, 森山茂夫, 鈴木芳生: 硬X線集光用非球面反射鏡の加工に関する研究, 精密工学会誌, 57[平3(1989)]2号, 348