OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	超精密研磨技術とその光学素子への応用に関する研究
Author(s)	大谷, 和男
Citation	大阪大学, 2001, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3184342
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

超精密研磨技術とその光学素子への応用に関する研究

2000

大谷　和男

目次

第1章　序章　1

第2章　面積法によるシュミットカメラ望遠鏡用非球面加工　3
2.1　緒言　3
2.2　シュミットカメラの原理と特性　4
2.3　シュミット補正板の製作　6
2.3.1　補正板の形状測定　7
2.3.2　面積法による補正板の研磨　9
2.3.3　製作した補正板の形状　15
2.4　星像の撮影による精度解析　16
2.4.1　光学系の調整　17
2.4.2　ハルトマンテスト　19
2.5　星野の観測　21
2.6　結言　22

第3章　スモール・ツール法による数値制御非球面加工　24
3.1 緒言　24
3.2 数値制御非球面研磨機の開発　25
3.3 スモール・ツールによる研磨加工　27
3.3.1 スモール・ツールによる加工原理　27
3.3.2 3軸双子型スモール・ツール　29
3.3.3 2軸偏心量可変型スモール・ツール　33
3.4 スモール・ツールによる研磨過程の
コンピュータシミュレーション　35
3.4.1 曲面創成のための計算プログラム　35
3.4.2 シュミット補正板の創成シミュレーション　38

3.5 非球面の研磨加工 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 41
3.5.1 輪帯研磨での研磨特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 41
3.5.2 放物面鏡の研磨 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 42
3.6 結言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 45

第4章 ＥＥＭ加工法による超精密数値制御非球面加工 47
4.1 緒言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 47
4.2 数値制御ＥＥＭ加工 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 47
4.2.1 ＥＥＭ加工の原理 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 47
4.2.2 数値制御ＥＥＭ加工装置 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 48
4.2.3 加工特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 50
4.2.4 加工方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 53
4.3 数値制御ＥＥＭによる超精密光学素子の加工 ・・・・・・・・ 54
4.3.1 合成石英ガラスの非球面加工 ・・・・・・・・・・・・・・・ 54
4.3.2 $Bi_{12}SiO_{20}$結晶の極薄板平面加工 ・・・・・・・・・・・・・ 57
4.3.3 Ｘ線用積層型ゾーンプレートの平面加工 ・・・・・・・・・ 61
4.3.3.1 ゾーンプレートの原理 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 62
4.3.3.2 ゾーンプレートの作製 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 63
4.3.3.3 ゾーンプレートの評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 67
4.3.4 ＣＶＤ－ＳｉＣミラーの非球面加工 ・・・・・・・・・・・ 68
4.3.5 Ｓｉ基板の平滑加工 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 72
4.4 今後の課題 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 72
4.5 結言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 73

第5章 総括 75

参考文献 79

謝辞 82

第１章　序章

オプトエレクトロニクスの発展に伴い、ビデオカメラ・ＣＤプレーヤなどの家電製品やレーザビームプリンタ・複写機に代表されるような各種ＯＡ機器などにおいて、多くの光学部品が使用されるようになってきた。しかも、その光学部品の非球面化が急速に進んでいる。光学系に組み込まれた光学部品を、従来の球面レンズに換えて非球面化するということは、光学設計からみた場合、レンズ枚数を減少できることを意味する。すなわち、１）光学系が軽量、コンパクトになる２）光学系の組み付け調整が容易になるなどのメリットが生じることになる。また、非球面レンズを用いると、像の歪みを小さくするという光学性能面のメリットも生じるため、結果として最終製品の性能を飛躍的に向上させることができる。そこで、本研究は、非球面の製作技術を確立し、その応用の拡大を図るために、非球面創成に関する問題点を解決することを目的とするものである。

本論文は、（１）非球面を用いた代表的な天体望遠鏡であるシュミットカメラの製作、（２）数値制御非球面レンズ研磨機の開発、（３）加工単位を原子単位に近づけることによって物性的にもすぐれた表面の創成を可能にするＥＥＭ(Elastic Emission Machining)法を用いた光学素子表面創成装置の開発について、その成果を述べたものである。

第２章においては、京都大学理学部大宇陀観測所に設置されたシュミットカメラ光学系の製作について述べている。光学系は補正板口径400mm、主鏡700mm、焦点距離1200mm、F/3で視野角7°と決定した。この補正板を研磨するために面積法（shaped pitch-lap method）を採用し、400mmの補正板を研磨した。この補正板の形状測定は触針式形状測定機により行い、最終段階で星像によるハルトマンテストを行って、望遠鏡としての光学性能が満足すべきものであることを確かめた。

第３章においては、数値制御非球面研磨機の開発について述べている。第２章で述べた面積法は、経験や名人芸を要する研磨法である。非球面の利用を拡げるには、熟練やノウ・ハウを可能な限り排除した製作法の確立が不可欠であるとの

観点から、数値制御非球面研磨機の開発を行ったものである。最初に試作したものは研削を主体としたもので、ダイヤモンド・ターニング法と同じくツールの先端の位置の超精密制御を狙ったものであったが、位置制御精度を実現することはできなかった。そこで、第２段階としてR.A.Jonesが提唱したスモール・ツール研磨法[1)]を適用し、好結果が得られたので、非球面創成方式を研削から研磨に転換した。そして、R.A.Jonesの３軸双子型スモール・ツールに改良を加えて、２軸偏心量可変型スモール・ツール及び研磨加工用のソフト・ウェアを独自に開発し、非球面研磨実験によってこの方式の有用性を確かめた。

第４章においては、非球面レンズ製作のため、球面あるいは平面を精度良く前加工しておき、残るわずかな非球面量だけを加工する考え方を採用し、より高精度な非球面加工を目指し、ＥＥＭ(Elastic Emission Machining)法を用いて、以下の特徴をもつ光学素子表面創成装置を試作した。

本装置の特徴は

１）加工物をインプロセスで形状測定できるように高精度な万能表面形状測定器（小坂研究所　触針型測定機　3E-3C型）を加工機本体に取り付けた。

２）光学系に数多く用いられる軸対称の球面、非球面加工に適したＸ－Ｃ軸加工方式を採用し、これを具現化した。

本加工システムによって、非球面形状加工を行った結果、±0.015μm以内の精度で形状加工が行えることを実証した。

また、ＢＳＯ結晶の極薄板平面加工及びＸ線光学素子（積層型ゾーンプレート、ＣＶＤ－ＳｉＣミラー）加工、Ｓｉ基板の加工を行い、超平滑研磨が可能であることを実証した。

第５章は本論文の総括である。

第２章　面積法によるシュミットカメラ望遠鏡用非球面加工

2.1　緒言

大型の天体望遠鏡の光学系の製作技術の開発を目的として主鏡口径が700mm、補正板口径が400mmで焦点距離1200mmのシュミットカメラの主鏡と補正板の製作実験を行った。

表2.1 世界における主なシュミット望遠鏡

天　文　台	建設年	D/R/f(mm)	F	視野（度）
タウテンベルヒ（独）	1960	1370/2030/4100	3.0	4.6
パ　ロ　マ　ー（米）	1948	1220/1830/3070	2.5	5.7
サイディング　スプリング（豪）	1973	1200/1800/3000	2.5	5.7
木　曽（日）	1974	1050/1500/3300	3.1	3.9
ビューラカン（ロ）	1961	1000/1320/2130	2.1	4.3
堂　平（日）	1964	500/650/1000	2.0	4.3
京　大（日）	1972	400/700/1200	3.0	7.0

備考：Dは補正板口径、Rは主鏡口径、fは焦点距離

わが国の現状を見ると、放物面望遠鏡については、1960年東京天文台岡山観測所に設置された1880mm反射望遠鏡を筆頭に、大小かなりの数が各種観測に活躍しているが、シュミット望遠鏡については、1964年に設置された東京天文台堂平観測

所の望遠鏡、続いて、1972年に設置された京都大学理学部大宇陀観測所の望遠鏡、最後に1974年に作られた東京天文台木曽観測所の３台にすぎない。表2.1に世界における主なシュミット望遠鏡を掲げる。

本章ではシュミットカメラの原理と特性及びシュミット補正板の製作・測定を中心として、星像の撮影による精度解析及び星野の観測等を述べる。

2.2 シュミットカメラの原理と特性

普通の反射望遠鏡は主鏡が放物面である。従って、光軸に平行な光線は、完全にその焦点に集まり、焦点面に乾板を置いて写真を撮れば収差の無い星像が得られる。ところが、光軸に対してある角度をもって入射する平行光線すなわち斜光線は、放物面がその主光線に対して対称でないために、完全な円像にならない。その結果、写真乾板に撮った星を見ると、中心付近では無収差の円像であるが、中心から離れるにしたがって、すい星の尾のようなコマができて星像が悪くなる。ほんとに良い星像が得られるのは、中心付近のたかだか、角度の数分から数十分ぐらいにすぎない。

そこで、主鏡の放物面の代わりに球面を使い、球面の曲率中心の位置に適当な絞りを置いてみる。そうすると、絞りを通る光線は、それが光軸に平行な光線であっても、斜光線であっても、主光線に対しては、球面は対称であるから、原理的には非対称収差は起こらないことになる。

ところが、球面の場合には放物面と違って、光軸に遠い光線はより近い所に集まる結果、乾板に写った星像は、中心でもぼやけた円像になってしまう。これが球面収差である。そこで、この球面収差を何らかの方法で除去することができれば、かなり広い写野（または視界）にわたって、収差のない良い星像が得られるはずである。この一つとして開発されたのがシュミット望遠鏡[2~3]で、1930年ハンブルグ天文台のシュミットによって考案されたものである。

それは、図2.1に示すように球面の曲率中心の位置の絞りの代わりに、シュミット補正板という薄いレンズを置いたものである。補正板は、片面が平面、他面が４次の非球面で、中央は凸レンズ、周辺では凹レンズの作用をするようになっていて、光軸に近い光線は収斂し、遠い光線は発散して、球面収差がうまく除かれるようにしたものである。ただ、この光学系の性質として、光軸に平行な光線による焦点と、斜光線による焦点とが、同一平面上にのらないで、焦点面は焦点距離（曲率半径の1/2）を半径とする球面になる。そのため写真乾板を、圧曲して使用しなければならないという不便がある。

シュミット望遠鏡のいま一つの特徴は、口径比（その逆数が、いわゆるFナンバーである）が明るいことである。従って、同じ天体を撮影しても普通の放物面望遠鏡に比べて、露出時間がはるかに短くてすむ。

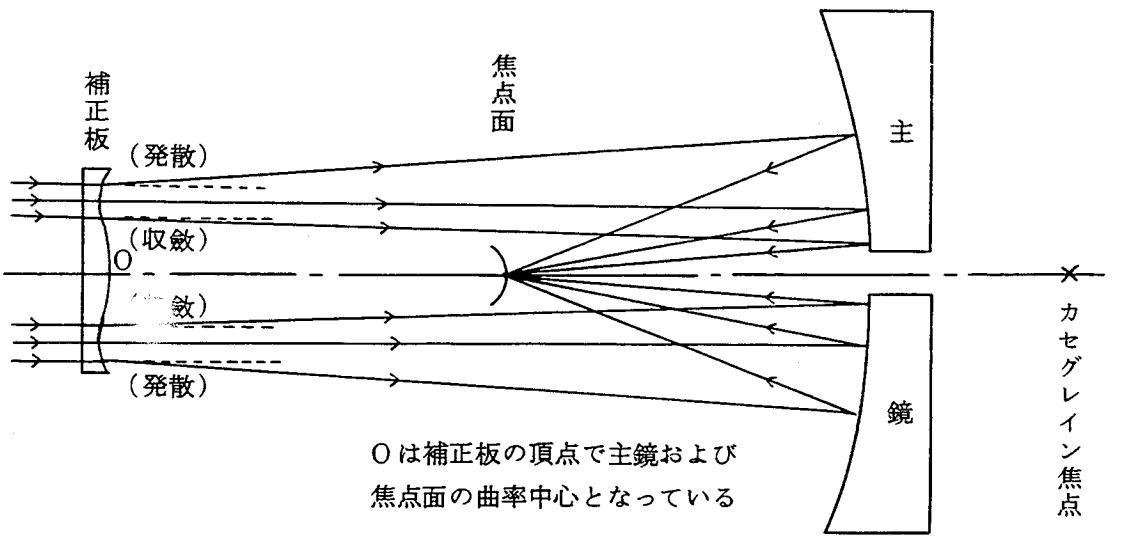


図2.1　シュミット望遠鏡の光学系配置図

前述したシュミット望遠鏡の特徴を、普通の放物面望遠鏡のそれと、比較してみると表2.2のようになる。

表2.2 シュミット望遠鏡と放物面望遠鏡の特性比較

	シュミット望遠鏡	放物面望遠鏡
F	小さい、普通3以下	大きい、5以上
焦点距離	短い、普通4m以下	長い、数m以上
有効写野	広い、数度	狭い、数分から十数分

これらの特徴から、放物面望遠鏡が、個々の星の精密な測光や分光観測、星雲・銀河などの微細構造の観測など、天体物理学的研究を目標とするのに対し、シュミット望遠鏡は、天球上の広域かつ長時間にわたる掃天またはパトロール観測

や星団・銀河団などの広域天体の観測的研究などに用いられる。従って、これら二つの望遠鏡はともに、天文学の観測には欠かせないもので、いわば車の両輪ともいうことができよう。

京都大学大宇陀観測所に設置されたシュミットカメラ望遠鏡の外観を図2.2に示す。その光学系は、工業技術院・大阪工業技術研究所、その機械系はユーハン工業㈱の製作によるものである。

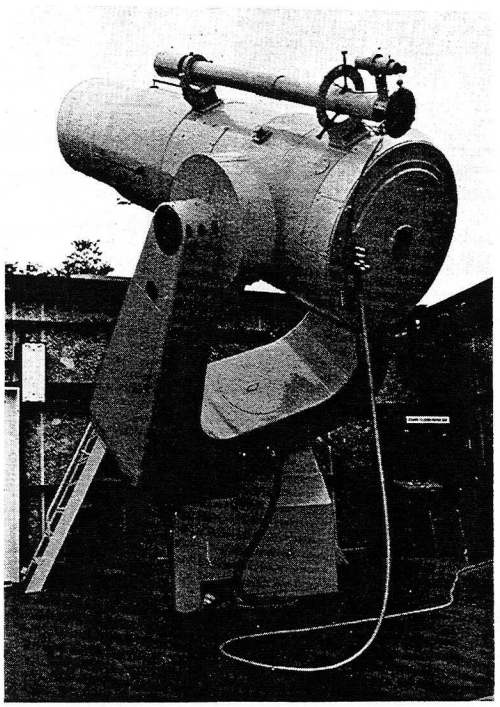


図2.2　京都大学大宇陀観測所のシュミットカメラ望遠鏡

2.3　シュミット補正板の製作

製作したシュミットカメラの光学系を図2.3に示す。その主たる性能と仕様は表2.3で与えられている。この光学系の中で主要部をなすシュミット補正板を製作した。その方法と結果について以下に述べる。

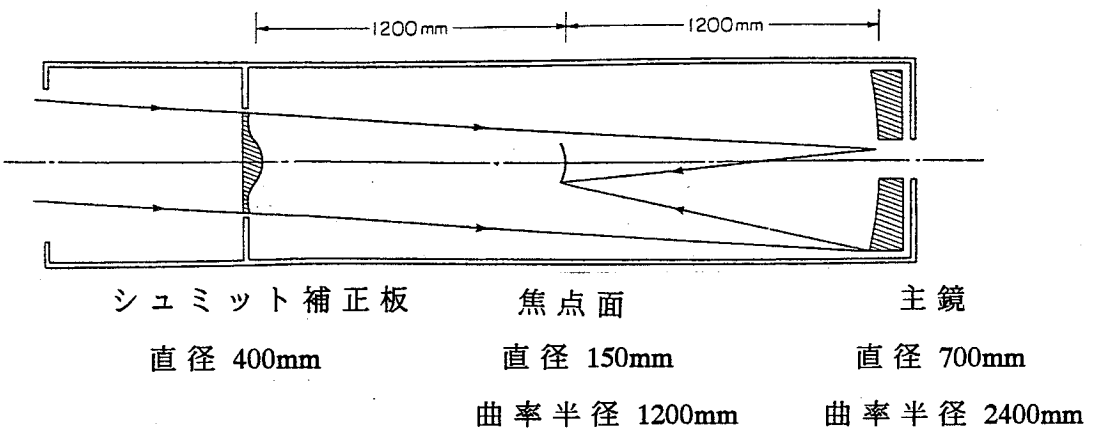


図2.3　京都大学大宇陀観測所のシュミットカメラの光学系

表2.3　京都大学大宇陀観測所のシュミットカメラ望遠鏡の性能と仕様

主要性能	有効径	400mm	焦点距離	1200mm
	口径比	F/3	有効視野	7°
	収差像の大きさ	波長350～850nmで20μm以下		
主　　鏡	材料	パイレックスガラス		
	直　径	700mm	曲率半径	2400mm
	中心厚	90mm	重さ	77.5kg
補正板	材料	BK7		
	直　径	400mm		
	中心厚	18mm	重さ	7kg

2.3.1　補正板の形状測定

光学面の形状を測定するには、被検面と平面原器（オプチカルフラット）とを重ね合わせて干渉縞をみるのが、もっとも一般的な方法である。このためには、有効径400mm以上の原器が必要であり、重ね合わせのための支持具、照明系につい

ても相当な配慮を要する。また、この補正板のように被検面と原器との光路差が大きい場合、干渉縞の間隔が狭くなりすぎて測定が困難となる。これらの理由から、120mmモデルで予備実験[4]を行った触針方式の測定法を採用することにした。

形状測定には、第3章で述べる数値制御非球面レンズ研磨機を利用した。図2.4は形状測定中の写真である。ターンテーブルに補正板をセットし、測定機を水平に送ると、その下端にあるダイヤモンド触針は被検面の起伏に応じて上下に動く。この移動量を差動変圧器によって変換、拡大して記録すれば、送りの直線を基準として被検面の形状が得られる。

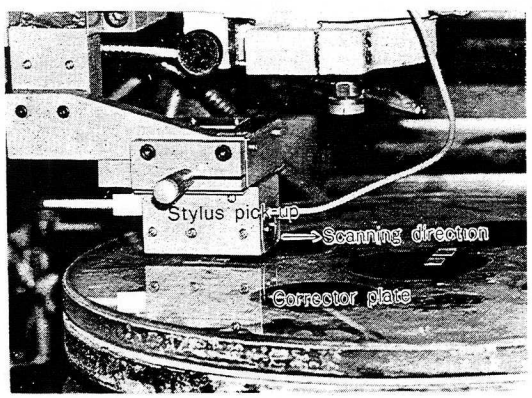


図2.4　形状測定機

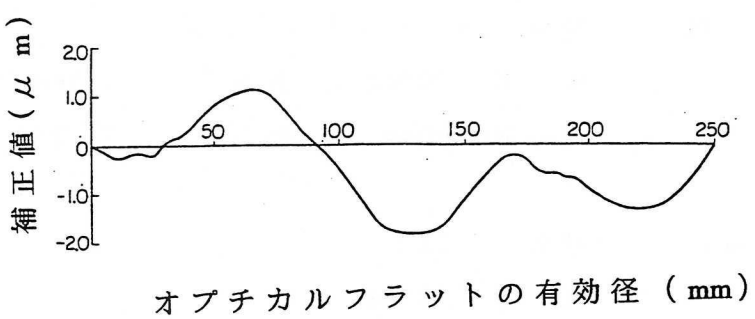


図2.5　送り基準線の真直度

この数値制御非球面レンズ研磨機の水平送りの構造は、金属製すべり案内面と精密ローラーベアリングとを組み合わせたもので、その真直度は案内面の真直度とベアリングや組み込みの精度によって定まる。従って、数値制御非球面レンズ研磨機のターンテーブルに、直径320mmのパイレックス製平面原器（平面度λ/2以内）を置き、数値制御非球面レンズ研磨機の上下軸に取り付けた触針型の測定機

を水平方向に5mmづつ動かし、その値を読み取り、数値制御非球面レンズ研磨機本体の送り基準線の真直度を求め、この値を補正値として被検面の実際の形状を測定した。図2.5は、上述の方法で求めた数値制御非球面レンズ研磨機本体の送り基準線の真直度を示す。

2.3.2 面積法による補正板の研磨

補正板の形状は、図2.3でわかるように普通のレンズとはかなり異なり、いわゆる非球面である。製作した補正板の形状は(2.1)式で表される。

$$x = \frac{y^4 - 1.5H^2y^2}{4(n-1)R^3} \qquad (2.1)$$

ここで、xは非球面量（球面からの偏差μm）、yは補正板の中心からの距離(mm)、Hは補正板の半径(200mm)、Rは主鏡の曲率半径(2400mm)、nは屈折率(1.51825)である。

図2.6はこの形状を示したものであるが、平面とこの曲面との差は僅か30μm程度と小さく、近似球面との差はさらに微小で最大15μmほどである。従って、このような形の非球面をつくるには、まず平面なり近似球面なりを研磨し、それを極わずか修正（非球面化）すればよい。

非球面化のために用いた創成方法は、面積法（shaped pitch-lap method）[5]である。この方法の有用性は、すでに直径120mmの補正板1/3モデルの試作成功によって確かめられている[6]。

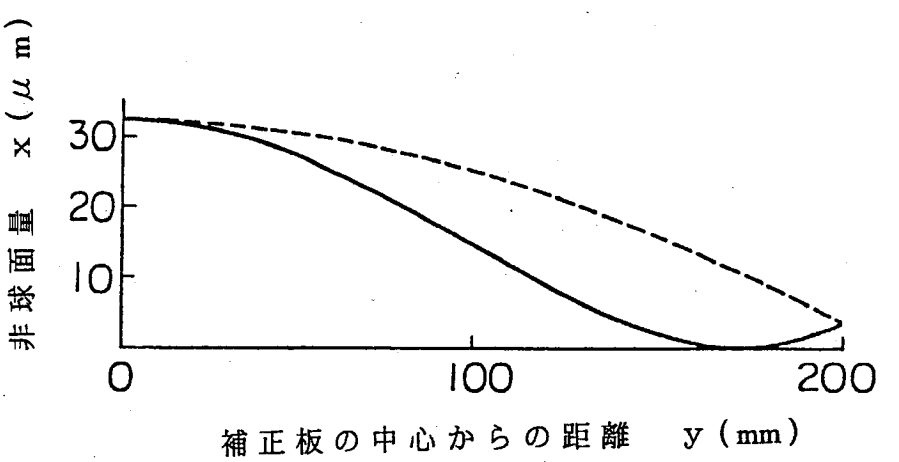


図2.6 補正板の形状

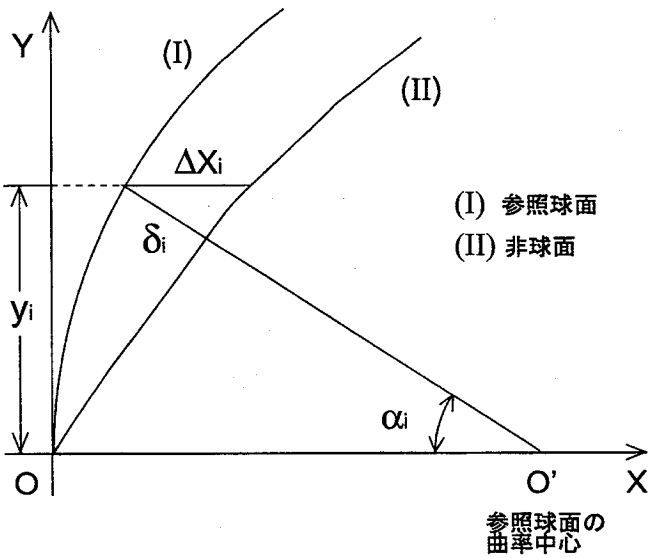


図2.7　球面から非球面の偏差を計算するための図形

一般の球面研磨の場合、ピッチみがきによってつや出しされた面は、フーコーテストによって形状を検査され、その結果によって部分的に修正される。そのための研磨の方法、とりわけピッチ盤の製作についてはまったく経験的である。この欠点を補い、球面非球面を含めてより広範囲に、より定量的に対処しうるのが面積法である。これは簡単に言えば、現在の形状と理想面との差を測定し、その差に基づいて数値計算された面積分布を持つピッチ盤によって研磨を進める方法である。

ピッチ盤の形状を求める計算式を導く。いま、図2.7に示す（Ⅰ）の断面をもつ球面を研磨して、（Ⅱ）の断面をもつ非球面をつくる場合を考える。球面上にある点を仮定すると研磨はその点における法線の方向に行われるので、中心からy_iの距離にある輪帯を考えると、この点で必要な研磨量δ_iは次式で与えられる。

$$\delta_i = \Delta x_i \cos\alpha_i \qquad (2.2)$$

また、研磨量はその点における荷重の法線成分（P_i）、研磨法線速度（V_i）、ピッチ盤の接触面積（S_i）および研磨時間（T）に比例するので

$$\delta_i = kP_iV_iS_iT \qquad (2.3)$$

と書くことができる。ここで、kは比例定数である。(2.2)、(2.3)式より接触面積 S_iは

$$S_i = \frac{\Delta x_i \cos\alpha_i}{k P_i V_i T} \qquad (2.4)$$

で与えられる。

この輪帯に対応するピッチ面の円弧が中心に対して張る角を φ_i、比例定数を k_1 とすると

$$\varphi_i = k_1 S_i \qquad (2.5)$$

であるから、S_iの最大値を S_{max}、これに対応する φ_iを φ_{max}とすれば、

$$k_1 = \varphi_{max} / S_{max} \qquad (2.6)$$

となる。従って、張る角 φ_iは

$$\varphi_i = \frac{\varphi_{max}}{S_{max}} S_i \qquad (2.7)$$

で与えられる。

いま、ピッチ盤の平均荷重をPとすると

$$P_i = P\cos\alpha_i \qquad (2.8)$$

の関係があり、また、ピッチ盤とガラス材との相対的な回転角速度を ω（両者は互いに反対方向に回転させる）とすると、$y=y_i$の輪帯での研磨線速度V_iは次式で与えられる。

$$V_i = \omega y_i \qquad (2.9)$$

これらの値を（2.4）式に代入すれば、

$$S_i = \frac{1}{kP\omega T}\left(\frac{\Delta x_i}{y_i}\right) \qquad (2.10)$$

となるので、最大接触面積(S_{max})は

$$S_{max} = \frac{1}{kP\omega T}\left(\frac{\Delta x_i}{y_i}\right)_{max} \qquad (2.11)$$

で表される。(2.10)、(2.11)式を(2.7)式に代入すれば

$$\varphi_i = \varphi_{max}\left\{\left(\frac{\Delta x_i}{y_i}\right)\Big/\left(\frac{\Delta x_i}{y_i}\right)_{max}\right\} \qquad (2.12)$$

を得る。従って、レンズの形状測定結果からのピッチ盤の面積分布（ピッチラップの形）を決めるための計算式は、$\triangle x_i = \triangle$、$y_i = X$と置き換えて

$$\varphi = \varphi_{max}\left\{\left(\frac{\Delta}{X}\right)\Big/\left(\frac{\Delta}{X}\right)_{max}\right\} \qquad (2.13)$$

で与えられる。ここで、Xはレンズ中心（ピッチ盤中心）からの距離、△は削りとるべき深さ、φはピッチラップに対する中心角である。φmaxはピッチ盤の分割のしかたによって変わるが、製作の便宜上110°を採った。

図2.8は補正板研磨中の除去加工量の一例を図示したものである。これを求めるための形状測定には、前節で述べたように数値制御非球面レンズ研磨機を利用した。ターンテーブル上に研磨した直径400mm補正板をセットし、触針型の測定機を水平方向に5mmづつ動かし、その値を読み取り、図2.5の値を補正して被検面の実際の形状を求めた。

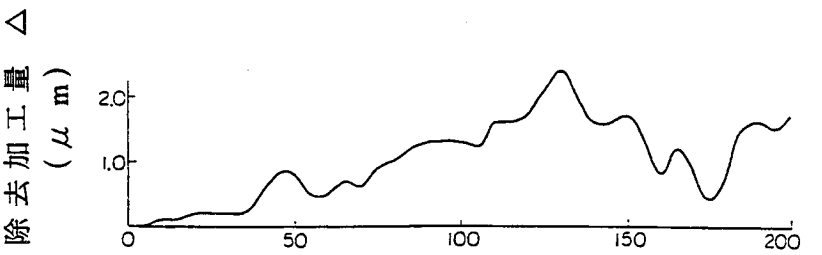


図2.8　形状測定データ

図2.8の結果から(2.13)式を用いてピッチ盤の面積分布を計算したのが表2.4である。レンズ中心からの距離Xに対する削りとるべき深さの△の値を5mm毎に表している。一番多く削りとる位置は、X＝130mm、△＝2.4μmの所である。その位置が最大中心角φmax＝110°となっている。ピッチ盤の形状は中心から5mmの間隔で中心に張る角度の値φとして計算されている。ただし、ピッチ面は全体を3等分し、それぞれの間に10°の間隔を設けて研磨液の通路とした。それ故、最大中心角は110°となっている。これに基づくピッチラップの形を図2.9に示す。

前述したピッチラップを使用した補正板の研磨手順を述べる[7]。図2.10に、補正板を研磨する研磨装置の構成を示す。ターンテーブルに補正板を上向きに載せ、これにピッチ盤をかぶせて強制回転を与える。

研磨条件は次のとおりで、研磨荷重は全面に対して8.7kgf、補正板を載せたターンテーブルの回転数は1.5rpm、ピッチ盤の回転数は44rpm及び±10mm程度往復運動を行う。これは中心部分の研磨を進行させるためと研磨面が階段状になるのを防ぐためである。補正板の材質はBK7、最終的な寸法は直径414mm（有効径400mm）、厚さ18mmで、片面は平面仕上げである。研磨材には酸化ジルコニウム系のロックサイトを用いた。面積法では、ピッチ盤の形は補正板の形状によって定まる。補正板の形状は研磨中刻々変化するから、厳密に言えば必要とするピッチ盤の形もどんどん変わっていくはずである。従って、一つのピッチ盤で長時間研磨を続けてはならない。実際問題としては、修正すべき量（広さと深さ）に対して最適な研磨時間を見積もることが一番重要なことになる。一般に研磨時間と研磨量との間には比例関係がある。

また、研磨の最終段階のように、狭い領域をごく浅く落とす場合は、研磨機に取り付ける際の補正板の偏心や傾き、ピッチ盤の偏心・偏心荷重・往復運動の過

大過小などについても厳重に注意しなければならない。著者の場合、最終段階での1回の研磨時間が5分を越えることはなかったが、それでも修正過剰といった試行錯誤は避けられず、研磨の総時間数の大部分はこの工程で費やされている。

表2.4　ピッチ盤の計算データ

X(mm)	△(μm)	△/X	(△/X)／(△/X)max	φ(°)
0	0	0	0	0
5	0	0	0	0
10	0.1	0.0100	0.541	59.5
15	0.1	0.0067	0.362	39.8
20	0.2	0.0100	0.541	59.5
25	0.2	0.0080	0.432	47.6
30	0.2	0.0067	0.362	39.8
35	0.2	0.0057	0.308	33.9
40	0.5	0.0125	0.676	74.3
45	0.8	0.0178	0.962	105.8
50	0.8	0.0160	0.865	95.1
55	0.5	0.0091	0.492	54.1
60	0.5	0.0083	0.449	49.4
65	0.7	0.0108	0.584	64.2
70	0.6	0.0086	0.465	51.1
75	0.9	0.0120	0.649	71.4
80	1.0	0.0125	0.676	74.3
85	1.2	0.0141	0.762	83.8
90	1.3	0.0144	0.778	85.6
95	1.3	0.0137	0.741	81.5
100	1.3	0.0130	0.703	77.3
105	1.2	0.0114	0.616	67.8
110	1.6	0.0145	0.784	86.2
115	1.6	0.0139	0.751	82.6
120	1.7	0.0142	0.768	84.4
125	2.1	0.0168	0.908	99.9
130	2.4	0.0185	1.000	110.0
135	2.0	0.0148	0.800	88.0
140	1.6	0.0144	0.616	67.8
145	1.6	0.0110	0.595	65.4
150	1.7	0.0113	0.611	67.2
155	1.3	0.0084	0.454	50.0
160	0.8	0.0050	0.270	29.7
165	1.2	0.0073	0.395	43.4
170	0.8	0.0047	0.254	27.9
175	0.4	0.0023	0.124	13.7
180	0.8	0.0044	0.238	26.2
185	1.5	0.0081	0.438	48.2
190	1.6	0.0084	0.454	50.0
195	1.5	0.0077	0.416	45.8
200	1.7	0.0085	0.459	50.5

□=(△/X)max　φmax=110°

図2.9　ピッチラップの形

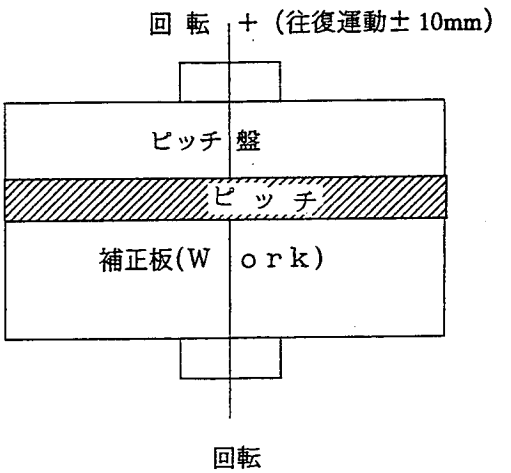


図2.10　研磨装置の構成

2.3.3 製作した補正板の形状

最終的な補正板の形状測定の結果を表2.5に示す。この測定値を見ると、形状誤差は、±0.1μm以内に加工されている。用いた測定機の測定範囲は±200、±50、±5μmの3段階、分解能はそれぞれ1、0.1、0.01μmである。触針先端の曲率半径は10μmと250μmの2種がある。測定出力の安定度は0.1μm/hrの程度である。なお、形状測定機による5回の読み取り値の標準偏差は、±0.1μm以下なので、総合的測定精度は±0.2μmと推定される。

表2.5　400mm補正板の形状測定値

X (中心からの距離)	補正値 (μm)	測定値 (μm)	補正板の形状測定値 (μm)	補正板の理想値 (μm)	誤差 (μm)
200	0	-27.4	-27.4	-27.4	0
195	-0.1	-28.6	-28.7	-28.7	0
190	-0.3	-29.2	-29.5	-29.6	0.1
185	-0.2	-30.1	-30.3	-30.3	0
180	-0.1	-30.6	-30.7	-30.7	0
175	-0.2	-30.7	-30.9	-30.9	0
170	0.1	-31.0	-30.9	-30.8	-0.1
165	0.1	-30.7	-30.6	-30.6	0
160	0.3	-30.5	-30.2	-30.2	0
155	0.6	-30.3	-29.7	-29.7	0
150	0.8	-29.8	-29.0	-29.0	0
145	0.9	-29.0	-28.1	-28.1	0
140	1.1	-28.3	-27.2	-27.2	0
135	1.1	-27.2	-26.1	-26.1	0
130	1.1	-26.0	-24.9	-25.0	0.1
125	0.9	-24.6	-23.7	-23.8	0.1
120	0.6	-23.1	-22.5	-22.5	0
115	0.3	-21.5	-21.2	-21.2	0
110	0	-19.9	-19.9	-19.9	0
105	-0.2	-18.3	-18.5	-18.5	0
100	-0.4	-16.6	-17.0	-17.1	0.1
95	-0.8	-14.9	-15.7	-15.8	0.1
90	-1.2	-13.2	-14.4	-14.4	0
85	-1.6	-11.5	-13.1	-13.1	0
80	-1.7	-10.0	-11.7	-11.7	0
75	-1.8	-8.7	-10.5	-10.5	0
70	-1.8	-7.4	-9.2	-9.2	0
65	-1.8	-6.3	-8.1	-8.0	-0.1
60	-1.7	-5.2	-6.9	-6.9	0
55	-1.4	-4.5	-5.9	-5.9	0
50	-1.1	-3.8	-4.9	-4.9	0
45	-0.8	-3.2	-4.0	-4.0	0
40	-0.5	-2.7	-3.2	-3.2	0
35	-0.3	-2.0	-2.3	-2.4	0.1
30	-0.2	-1.6	-1.8	-1.8	0
25	-0.3	-0.9	-1.2	-1.2	0
20	-0.5	-0.3	-0.8	-0.8	0
15	-0.6	0	-0.6	-0.5	-0.1
10	-0.7	0.5	-0.2	-0.2	0
5	-0.7	0.6	-0.1	-0.1	0
0	-0.9	0.9	0	0	0

2.4　星像の撮影による精度解析

光学系が計算どおり理想的に研磨されていたとしても、主鏡・補正板・焦点面の相対位置に誤差があると像の錯乱の原因になる。このことは実際に光学系を配置製作するときの精度に直接つながる重要な問題である。従って、実際に主鏡と補正板を鏡筒に装着して星像を撮影し、その精度解析を行うために、光学系の調

整、ハルトマンテストを行ったので、その結果について述べる。

2.4.1 光学系の調整

図2.11に示す光学系について各部の調整を次の手順で行った。

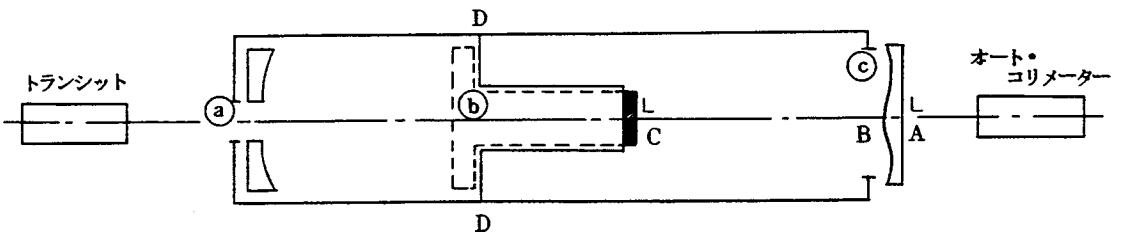


図2.11 光学系の配置図

[1] 機械軸の決定

1) 乾板ホルダー保持装置およびその焦点調節機構（図2.11の点線で囲んだ部分）を取り外す。

2) トランシット（望遠鏡視野測量用機器）を覗き、ⓐ主鏡セルのカセグレイン穴、ⓑ焦点調節機能ガイド装置の穴、ⓒ補正板取り付け枠の穴、が同心円に見えるようにトランシットをセットし固定する。

3) オート・コリメーターとそのターゲット像がトランシットの十字線に一致するようにセットし固定する。これによって、オート・コリメーターの光軸と望遠鏡の機械軸は一致する。

4) 乾板ホルダー保持装置およびその焦点調節機構を取り付ける。

5) 焦点調節機構の補正板側に平面鏡（図2.11のC）を取り付ける。この場合、オート・コリメーターを覗き、そのターゲット像と、この平面鏡による反射像とが一致するように平面鏡を取り付ける。これにより、平面鏡は望遠鏡の機械軸に直角になる。この平面鏡は、今後の光軸調整のための基準鏡になるものである。

[2] 補正板の調整

1) 傾きの調整：補正板の平面を基準にして、平面とオート・コリメーターの光軸すなわち望遠鏡の機械軸が直角になるよう調節する。

2) 光軸の調整：A点（平面側）とB点（非球面側頂点・ここには合わせマークがしてある）からのターゲット反射像を一致させるよう調整する。

［3］主鏡の調整

オート・コリメーターを平行移動し（すでに調整してある補正板を基準にしてコリメーターを逆に調整すればよい）、乾板ホルダーの中心に、コリメーターのターゲット像を結ぶように、主鏡の傾きを調整する。

［4］補正板の再調整

1）B点の合わせマークと、その主鏡からの反射像とを一致させるよう補正板を調節する。これによりB点と主鏡の曲率中心の位置とを一致させる。これは目の位置を前後左右に振ることで確かめる。

2）次に再びオート・コリメーターを光軸上にセットして、ターゲット像のA，B，Cからの反射像を一致させるよう補正板を調節する。

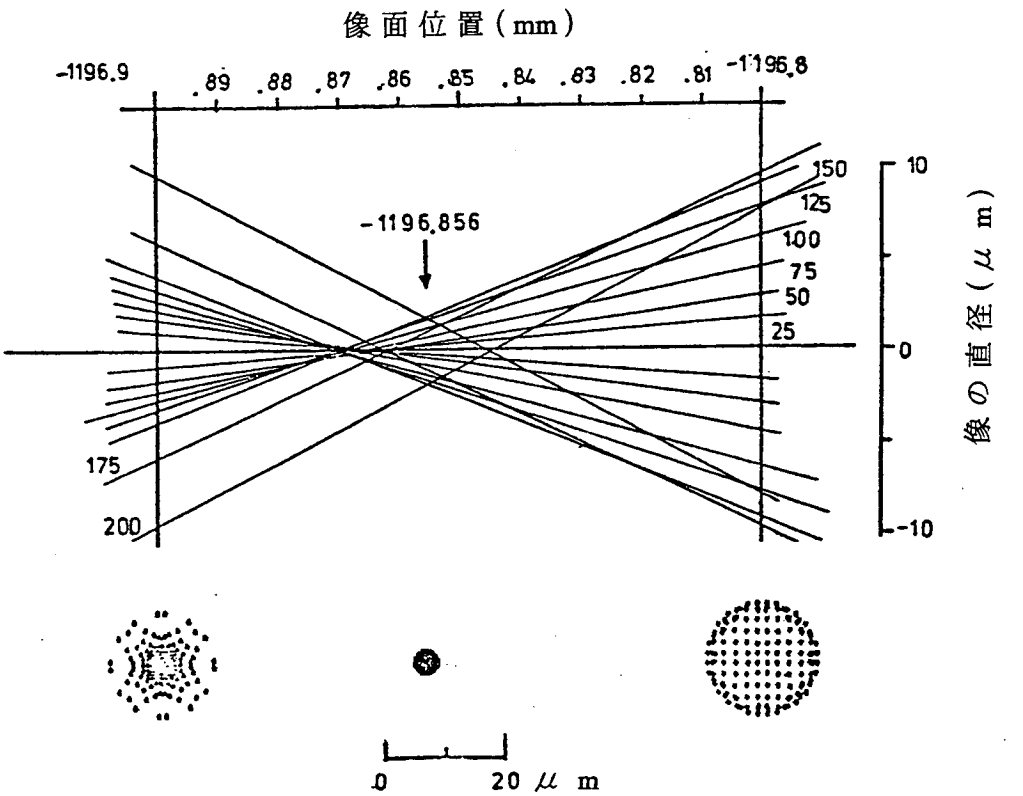


図2.12　焦点付近の光束

［5］焦点の調整

このシュミットカメラの明るさはF/3であるので、光線の収束角が大きく焦点深度が極めて浅い。図2.12に、最良像面の近傍における軸上子午線の収束の状態と、像面の頂点の位置が、-1196.9mm,-1196.856mm（最良像面位置），-1196.8mmの3ケ所における点像のスポット・ダイヤグラムを示す。このスポット・ダイヤグラムは、計算機を使用して斜光線（skew ray）の追跡計算を行い、スポット・ダイヤ

グラムを作製して光学系の評価を行う。すなわち、スポット・ダイヤグラムは、補正板の開口に対応する半径の円の中の格子点が光線追跡のサンプル点になる。各サンプル点を通った光線は、主鏡に反射し像面にスポットを作る。これらの集まりが作る図形がスポット・ダイヤグラムで、これにより光学系の持つ収差を視覚的に判断する。

図2.12からわかるように、最良像面を中心として、ほぼ±50μmの像面の位置誤差により、像の直径は約20μmに拡がる。このことにより、焦点面の位置の調整は、少なくとも10μmステップで行えるようにすることが望ましい。

2.4.2 ハルトマンテスト

前述した数値制御非球面レンズ研磨機の水平方向キャリッジに電気マイクロメーターを取り付けて、その先端プローブを研磨面に接触させ、これを数値制御の指令で直径方向に動かし、各点の測定点を求め、これにキャリッジの垂直度誤差を補正して形状を測定するという、機械的な方法を採用した。その結果、総合的測定精度は、±0.2μmと推定された。その後、測定はハルトマンテストにより定量的に収差を求めた。

ハルトマンテストは、実際の観測に近い状態で比較的簡単にできて、しかもかなり精密に各種の収差が定量的に求められるので、光学的テストとして最もよく用いられる方法である[8~9]。原理は焦点付近における光線追跡に外ならないが、シュミット望遠鏡の場合は、主鏡と補正板の合成系であるから、主鏡の面精度が他のテストで保証されていれば、補正板の良否を判別できる。

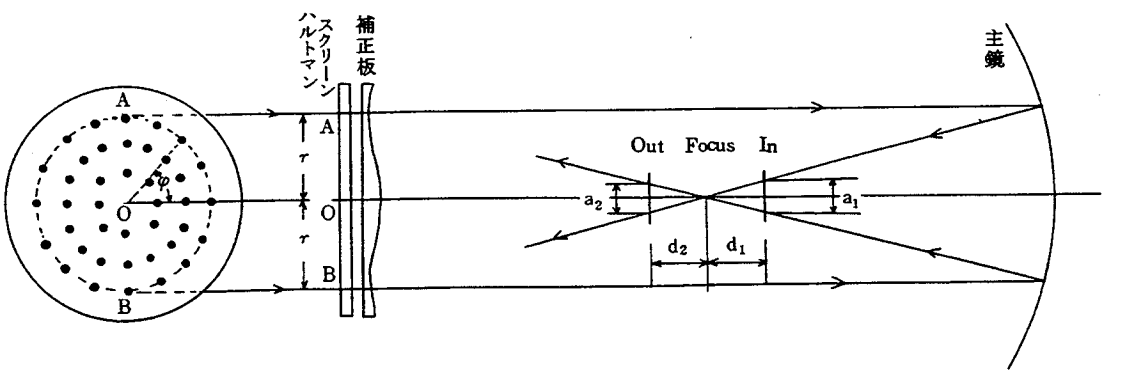


図2.13 ハルトマンの方法

図2.13のように、補正板の直前に、多数の円孔を穿った円板（ハルトマンスクリーン）を光軸に直角に、かつ板の中心と補正板の頂点とを合わせて置く。円孔は多くの直径（φ_i）上に均等角に分割された位置に開けられており、中心Oより等距離（r_i）の2個で1対をなすよう配列されている。円孔の直径は光の干渉を起こさない程度に焦点距離の1/200～1/300ぐらい、その数は孔の像の重なり合わない程度にできるだけ多くする。図2.14は、ハルトマン板の写真である。

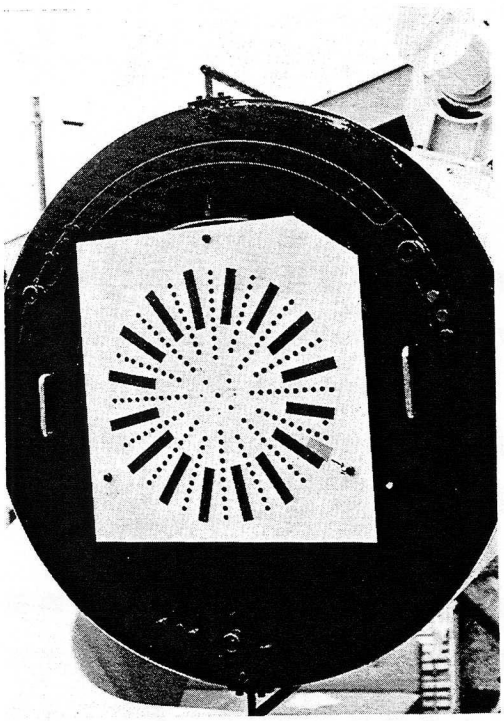


図2.14　ハルトマン板

望遠鏡を星に向け、各孔を通過した光束が、焦点の内と外とで光軸に垂直な面を切る位置（図中InとOut）にカメラを置いてハルトマン像を撮影する。図2.13は光軸上の星からの光路を示したものである。ハルトマンスクリーン上の1対の円孔AとBとの距離2rは、ハルトマン像では、Inでa_1,Outでa_2となる。a_1,a_2をコンパレーターで測定する。InとOutとの距離d_1+d_2は予めわかっている。従って

$$d_1 = \frac{a_1(d_1+d_2)}{a_1+a_2} \qquad (2.14)$$

により、d_1すなわち焦点距離が計算される。d_1はr_iおよびφ_iで異なるのが普通である。一致すれば理想的な光学系である。r_iによる変化が輪帯収差であり、φ_iに

よる変化が非点収差である。

図2.15は補正板の輪帯収差を示す。この図から、補正板中心からr＝90mmおよびr＝165mmあたりの焦点距離がほかに比べて長いことがわかる。この部分をピッチ盤を用いて、形状修正研磨を行い観測用望遠鏡としての性能を十分に備えていることを実証した。なお、我々の用いたハルトマンスクリーンの円孔の直径は4mm，直径方向の間隔は15mm，φは22.5°である。

ハルトマンテストによる測定は、シュミット補正板に実用上、有効であるという結論が得られた。

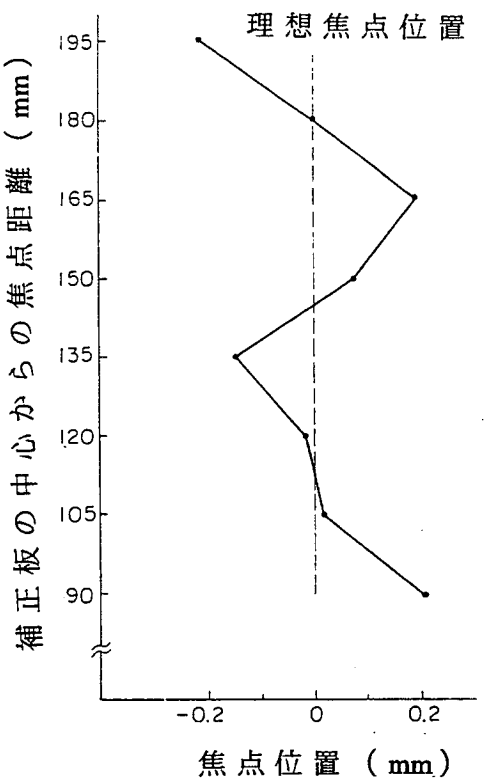


図2.15　補正板の輪帯収差

2.5　星野の観測

この望遠鏡は、口径400mm、明るさF/3、視野7°という特徴を生かしたものである。本望遠鏡は大きさの点からいえば中型の部に属する。しかしながら、当初から恒星や銀河の観測を目的として作られた本邦最初のものである。

具体的な観測テーマの中、主なものを拾いあげてみる。

1）星間物質：広域星間雲、星間吸収法則の吟味

2）銀河団：銀河の光度関数、光度分布

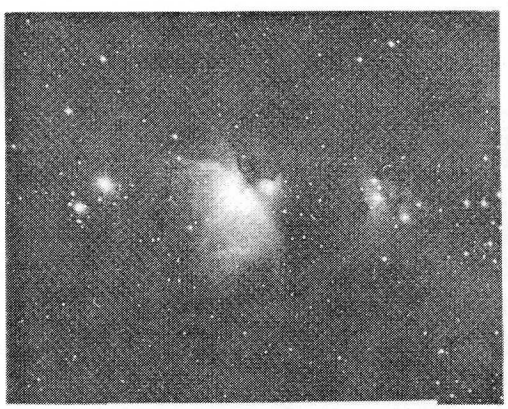
3）星団ハローの測光

4）赤外線の掃索・発見

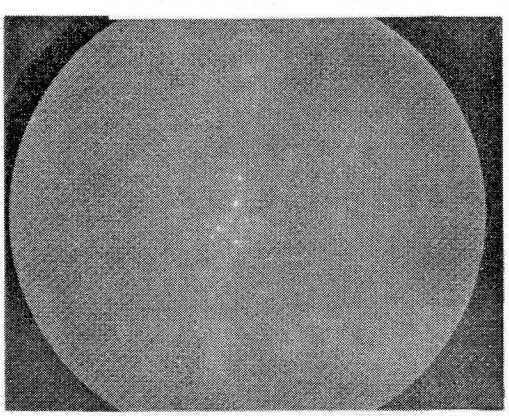
5）すい星の測光

以上の観測が、現在も行われている。

テスト観測として撮影した星野写真を図2.16に示す。a）はオリオン星雲付近、b）はプレアデス星団である。



a）オリオン星雲



b）プレアデス星団

図2.16　星野写真

2.6　結言

中型の天体望遠鏡の光学系の製作技術の開発を目的として、京都大学理学部大宇陀観測所のシュミットカメラ光学系の製作を行った。光学系は補正板（非球面形状、直径400mm）、主鏡（直径700mm、焦点距離1200mm、視野角7°）である。もっとも製作が困難な補正板を研磨するために面積法（shaped pitch-lap method）

を採用し、400mmの補正板を研磨した。この補正板の形状測定は触針で行い、最終段階で星像によるテストを行って、望遠鏡としての光学性能が満足すべきものであることを確かめた。この望遠鏡は、恒星や銀河の観測を目的として作られた本邦最初のものである。この望遠鏡は東京大学木曽観測所の我が国最初の大型シュミットカメラ望遠鏡による観測に対する予備的観測が行われた。現在も各種の観測に利用され、宇宙の成り立ちを探るために貢献している。

結論として、面積法は、良好なピッチ盤の作製、研磨時のピッチの様子と変化の具合、ピッチ面の当たり具合の判断、研磨スピード、研磨圧力、研磨剤の濃度等、経験や名人芸を要する研磨法である。実際に研磨加工をしている時には、ガラス面を削っているよりも自分の命を削っているような気がする時がある。

非球面の利用を拡げるには、熟練やノウ・ハウを可能な限り排除した非球面の製作法の確立が不可欠であるとの観点から、次章では、数値制御非球面研磨機の開発を行った。

第３章　スモール・ツール法による数値制御非球面加工

3.1　緒言

光学研磨面を創成する場合の最大の問題点は、屈折面でλ/4、反射面でλ/8といわれる高い形状精度が要求されることである。最近コンピュータ制御の加工機械で人間の労力を置き換えることができる分野が多くなっているが、光学面の加工工程は、その高い形状精度を保証するために、熟練した技術者の技能と経験が要求される数少ない例の一つとして現在に至っている。しかし、このような熟練度に頼る研磨方法を改革し、自動制御システムを導入して高精度の研磨面を創成しようとする研究が続けられてきた[10~12]。これら一連の研究の成果は、ハード・ウェア面ではR.A.Jonesの提唱したスモール・ツールによる研磨法[1]であり、ソフト・ウェア面ではガラス研磨の過程の数学的モデル化の試みである[1]。

著者は、非球面創成の自動化という問題に取り組んでおり、その一環として数値制御（NC:Numerical Control）を取り入れた研削機を試作した。この研削機は、研削により可能な限り精度良く加工面を形成し、その面の形状を損なうことなくつや出しを行うことにより、高精度の非球面を創成するという考えで設計したが、実際にこの研削機でガラス面を加工した場合、ツールの摩耗、加工時の研削圧の変動などの要因のために予測をはるかに下回る低い精度の加工しかできなかった。この結果から、研削により高精度の光学面を形成するという方針を変更して、最初から研磨により光学面を創成することとし[13]、数値制御が可能なスモール・ツールを設計・試作した。これを上記研削機の加工ヘッドに取り付けることによって研磨機を構成した。

本章では、非球面実用化へのアプローチとして行った３軸双子型スモール・ツールの数値制御非球面研磨機の開発について、スモール・ツールの原理、スモール・ツールによる研磨過程のコンピュータシミュレーション及び新機軸（２軸偏

心量可変型スモール・ツール）の数値制御非球面研磨機の原理、構成、機能等を述べ、それらを使って行った研磨実験の結果を報告する。

3.2 数値制御非球面研磨機の開発

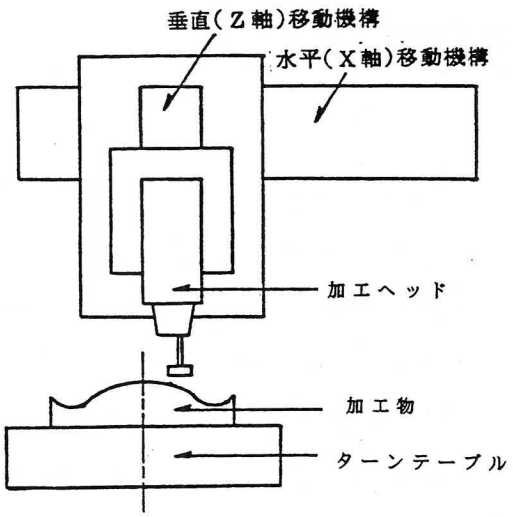
レンズ等の光学部品の素材としては、昔から光学ガラス、最近ではプラスチック材料も使われるが、要求される形状精度は用途に応じてさまざまである。

これらの光学面の創成には、素材、精度によって切削、研削、研磨、成形などの加工法[14]～[16]が使い分けられるが、天体望遠鏡用のレンズや鏡のように滑らかで光の波長の数分の1という高い面精度を必要とする場合には、研磨皿と呼ばれる手法が用いられている。

研磨皿は、研削によってあらかじめ前加工されたガラス素材と、鉄皿あるいはその上に貼ったピッチやウレタンシートとを擦り合わせ、間に含ませた遊離砥粒の作用によって皿の曲率を正確に素材に写し取る作業で、研磨機の構造も簡単である。しかし、擦り合わせという加工では、原理上、非球面のように場所によって曲率の異なる面を造ることはできない。実際には、球面との差の少ない非球面はこの方法で名人芸を駆使して磨くことができる[17]が、このような技能に頼るのみでは多様で高度な非球面への期待にこたえることは不可能である。

このような観点から、精密加工機と数値制御装置を結合させた数値制御非球面研磨機の開発[18]～[19]を行った。

この研磨機の構造を図3.1に示す。本体は縦旋盤型で、加工ヘッド、水平・垂直スライド、ターンテーブル等から成る。加工ヘッドを装着したキャリッジのスライド機構は、水平（レンズの径方向）に走る上下2本のX軸スライドに上下（レンズの光軸方向）用のZ軸スライドを載せた形で、ニードルローラベアリングを使っており、ボールねじを介して電気油圧パルスモータによって駆動される。移動ストロークは、X、Zそれぞれ300mm,30mm,1パルスあたりの移動量は1μm、1/6μmである。ターンテーブルはしゅう動式で直径600mm、ＶＳモータで駆動され回転数は7～70rpmである。加工ヘッドにはR.A.Jones[1]が行ったように研磨ヘッドとしてのスモール・ツールを装着する。



X軸ストローク	300㎜
Z軸ストローク	30㎜
X軸移動分解能	1μm／パルス
Z軸移動分解能	1／6μm／パルス
ターンテーブル直径	600㎜
本体寸法　幅	1,800㎜
高さ	2,400㎜
奥行	2,400㎜

図3.1　数値制御非球面加工機の構造

図3.2は試作した数値制御非球面研磨機の全景である。図3.3は研磨機のシステムを示す。このシステムは大型コンピュータ（MELCOM-COSMO　700）と数値制御装置（FANUC240A）とのオンライン結合による研磨加工・形状測定の自動化及びフィードバック補正回路の付加による数値制御精度の向上などを施し、非球面を創成するものである。

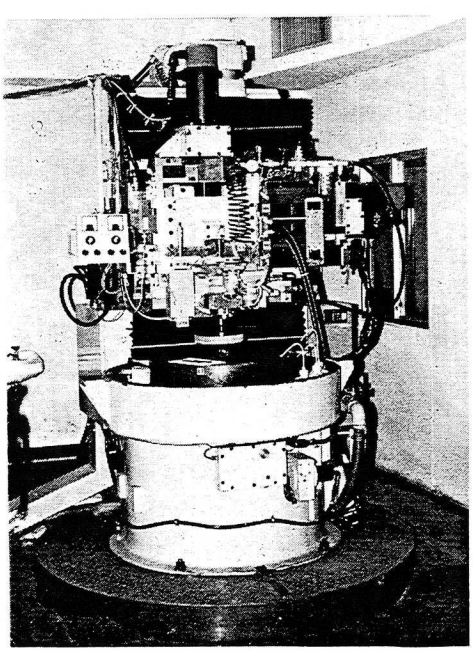


図3.2　数値制御非球面加工機

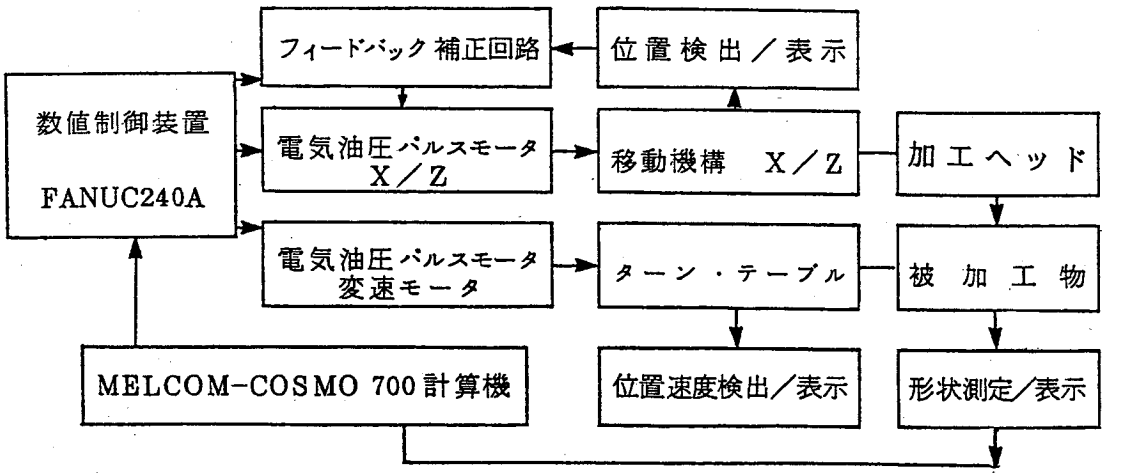


図3.3　数値制御非球面研磨機のシステム

3.3　スモール・ツールによる研磨加工

3.3.1　スモール・ツールによる加工原理

スモール・ツールは、局所的な研磨量の積み重ねによって、任意の断面形状を持つ光学面を創成しようという考えから生まれた小さな研磨ヘッドである。このツールによる研磨は、図3.4に示すように、ツールの移動径路（R,θ）と滞留時間とを精密に制御することにより行われる。

スモール・ツールによる研磨法は、ある研磨特性を持つ小工具を対象物の上をどれだけの時間、どのような径路をたどって移動させて行けば、どのような表面形状がえられるかということを数学的に計算し、それを加工指令として研磨機を動かし、所望のレンズ面を製作する方法である。従って、この方法を採るにあたって解決すべき最大かつ基本的な問題は、第一に安定した研磨特性を持つスモール・ツールを造ること、第二に研磨の径路を求めることの二つである。移動径路と滞留時間の設定はツールの送りとレンズを載せたテーブルの回転角(θ)の制御によって行われる。ここで、Rは加工物中心からの距離である。制御のためのシステムの概略を描けば図3.5のようになる。

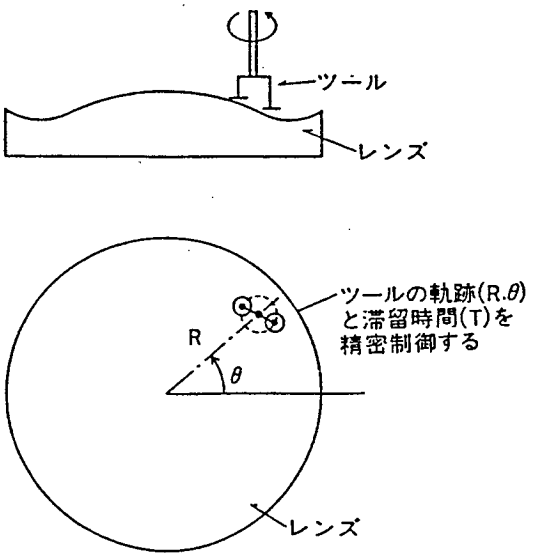


図3.4　スモール・ツールの研磨方法

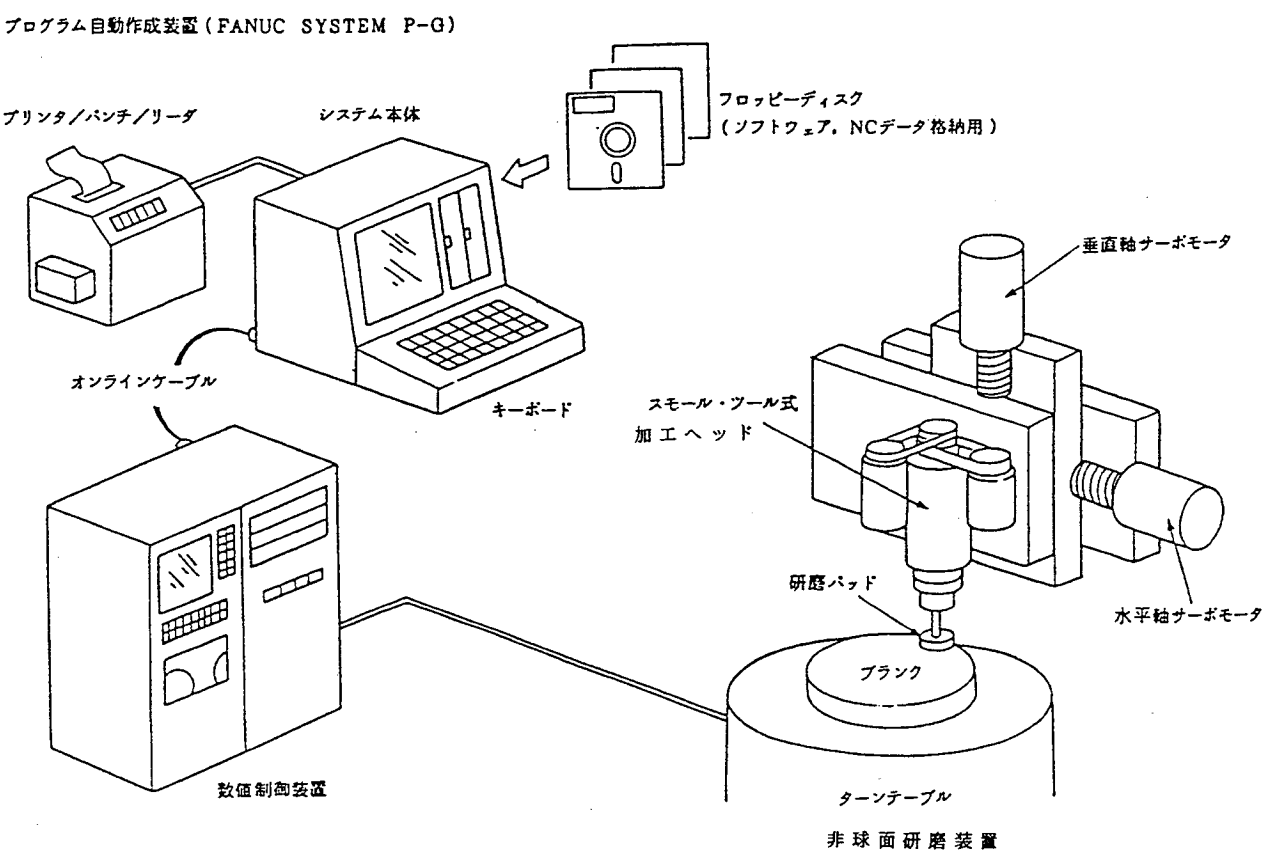


図3.5　スモール・ツールを用いた研磨システム

3.3.2　3軸双子型スモール・ツール

ツールをワーク上の一点で一定時間滞留させるとそこに円形のくぼみができるが、その深さ分布がツールの研磨特性である。従来の部分研磨でもっとも大きな欠点とされる段差を生じさせないためには、研磨特性は非常になだらかな形でなくてはならない。第二の点に関しては、ツールの複雑な加工制御のできる高性能コントローラが必要となる。

これらの要求を基に、新方式研磨ヘッドの試作、R及びZ軸やテーブルまわり、制御系の大幅な改装を行い、3軸双子型スモール・ツールを開発した[18~19]。このツールは図3.6のように研削砥石の代わりに研磨専用の双子のパッドを持ち、パッドの自転、相互回転、公転の三つの回転軸を有し、各軸の回転数、回転方向、軸間距離は一定である。ウレタンシートを貼るパッド金具は直径25mmで、7mm昇降できるパッド回転軸に自在接手で接続され、ワークの傾きや高さの変化があっても常に空気圧で与えられる一定研磨圧力を保って研磨を行うようになっている。3軸双子型スモール・ツールの外観を図3.7にに示す。

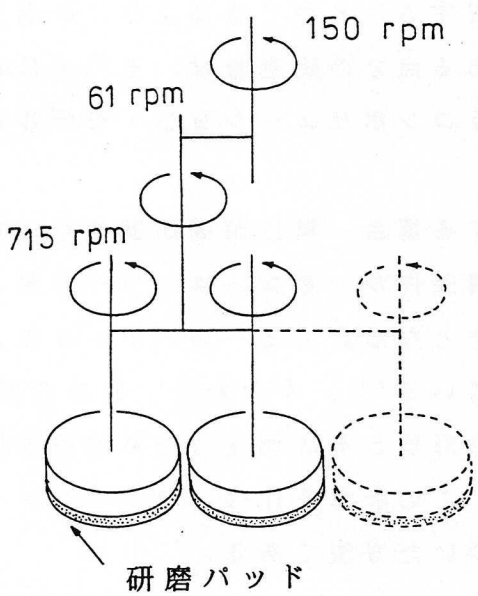


図3.6　3軸双子型スモール・ツールの構成

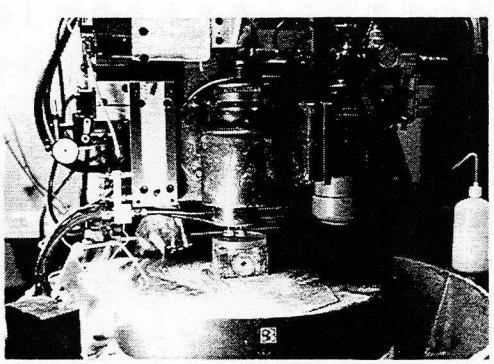


図3.7　3軸双子型スモール・ツールの外観

図3.8はＢＫ７ガラスに対する研磨特性を示すもので、形状はなだらかであり、

研磨量の時間比例性も良好である。パッド材質はウレタンシート1mm厚、研磨圧0.5kg/cm²、研磨砥粒としてはロックサイト（ジルコニア系光学研磨材）を用いた。

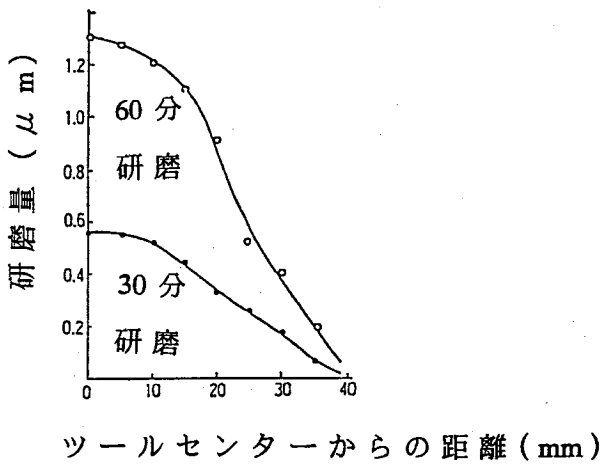


図3.8　スモール・ツールの研磨特性

数値制御で研磨をするには、ツールの径路、径路上の各点でのツールの滞留時間を計算で求め、それに基づいてＮＣ指令を作成することができるように研磨過程を数学的にモデル化しなければならない。「ある点での研磨量は、その点に寄与する研磨量の重ね合わせで求められる」というコンボリューション・モデルを使って予備的な研磨実験を行った。

コンボリューション・モデルで研磨量を算出する場合、単位時間研磨を行った時の研磨量の分布を表す曲面（研磨特性）が研磨条件が一定ならば、ツールをどこに移動しても変わらないということが前提条件となる。スモール・ツールによる研磨では、この条件が成り立つことが示されている[20]。すなわち、加工前形状を測定し、目標除去形状を定める。この目的除去形状と予め測定した単位除去形状から、一定の条件下で滞留時間分布を求める。この計算操作は、コンボリューションと呼ばれ、除去のシミュレーションに基づいた方法である。

図3.9はワーク・ピースとしてＢＫ７を使った時のスモール・ツールの研磨特性の子午断面図で、ツールの中心軸に対して回転対称で、また、ツール中心で研磨量が最大になるようなほぼ逆円錐形に近い特性を持つように設計されている。

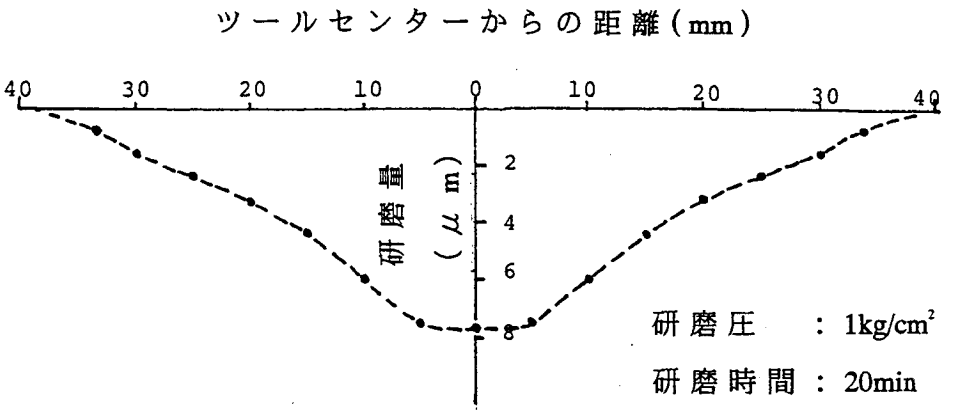


図3.9　3軸双子型スモール・ツールの研磨特性

前述の図3.8はこの研磨特性の時間依存性を示したもので、研磨圧が一定の時、研磨量は研磨時間に比例することが分かる。この結果は後述するが、研磨面を創成する場合のコンボリューション演算を簡略化してくれる。

今、研磨量をR(x,y)、研磨特性をF(x,y)、そしてツールの滞留時間関数をT(x,y)とすれば、

$$R(x,y)=\iint_{path}F(u,v)\cdot T(x-u,y-v)dudv \qquad (3.1)$$

が成り立つ。これがコンボリューション・モデルの基本となる式である。

研磨時間を制御するにはR(x,y)、F(x,y)を与えてT(x,y)を求めるデコンボリューション演算となり、数値計算で解を求めるのが一般である。しかし、数値解を求める場合でも二次元演算の場合は計算が複雑となりコンピュータに頼らなければならない。このモデル化の有用性を確かめる意味で、最初、コンボリューション演算が一次元で済む簡単なモデルで近似した。

前述の研磨機では、スモール・ツールは水平軸上を250mm移動することができる。今、ターン・テーブルを固定し、ツールを水平軸に沿って移動させて研磨をすると、ワーク・ピース上でツールの研磨特性の広がりに等しい幅をもった帯状の部分が研磨される。この面をツール中心の軌跡を含む垂直面で切断した場合の断面形状をコンボリューション・モデルを使って創成した。この場合、ツールは一方向にしか移動できないのでツールの位置を表す座標は一次元となり、研磨特性と

ツールの滞留時間のコンボリューション演算は一次元となる。すなわち研磨量は、

$$R(x)=\int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}}F(u)\cdot T(x-u)du \qquad (3.2)$$

で与えられる。ここでDはワーク・ピースの直径である。実験は切断面が軽い凸面から出発して、それが平面に、次いで凹球面になるように研磨作業を進めた。必要な研磨量をツールの一回の滞留で除去するのは研磨の作業工程上無理があるので、何回かの滞留で必要量が除去されるよう工程を分割し、各工程に見合った研磨量が除去されのに必要なツールの水平軸上の各点での滞留時間を計算し、その結果に基づいてＮＣプログラムを作成、研磨を実行した。

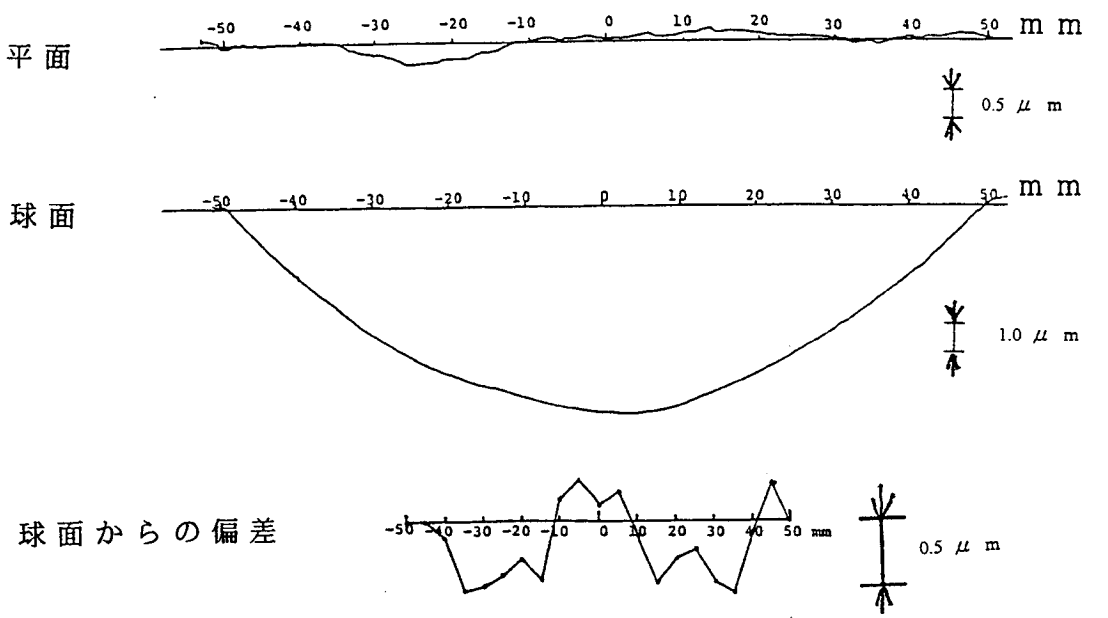


図3.10　スモール・ツールによる研磨面の断面形状

図3.10は粗さ計（小坂研究所　触針型測定機　３Ｅ型）で測定した研磨面の断面形状である。上図は平面の場合、理想面より偏りが最大0.2μｍ、下図の凹球面のそれは、誤差曲線に示されるように0.5μｍを越えない。

以上の結果は、帯状の研磨面の断面形状の創成に関しては（3.2）式による数学的モデル化が現実の研磨工程に適用可能であることを示している。

3.3.3 2軸偏心量可変型スモール・ツール

一般に良く用いられる直径20～100mmの大きさの非球面加工に対応するために、3軸双子型スモール・ツール法を用いた数値制御非球面研磨機のツールのコンパクト化を図った。試作したものは、2軸偏心量可変型スモール・ツールである。研磨領域は直径19.5mmの円型である。このスモール・ツールを用いた、非球面加工及び加工の進め方等について述べる。

スモール・ツールの小型化を図るには、各部品を小さく造るか構成を簡略にするしかないが、部品サイズを縮小することは機械的強度の点で心配されたので、研磨特性を劣化させないで軸数を少なくする方向でメカニズムの検討を行った。その結果試作されたものが図3.11、図3.12に示す2軸偏心量可変型スモール・ツール[19]である。

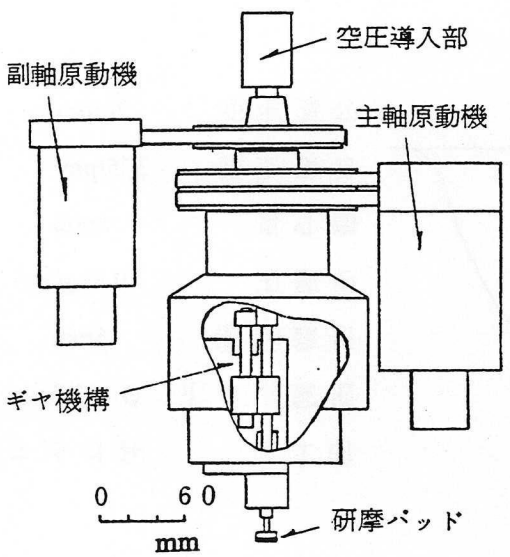


図3.11　2軸偏心量可変型スモール・ツールの構成

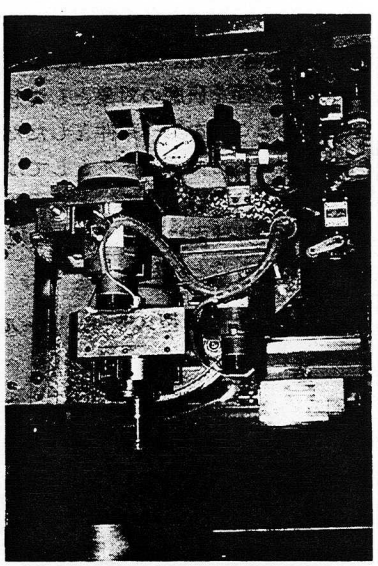


図3.12　2軸偏心量可変型スモール・ツールの外観

研磨パッドは自転しながら主軸の周りを公転し、自転数、公転数はそれぞれ0～1900rpm、0～300rpmの範囲で独立可変、自転軸と公転軸との間の距離すなわち偏心量は0～15mm調節できる。パッド軸は空気圧による一定の研磨圧を保ったまま15mm昇降でき、この軸にパッドを貼る金具が自在接手で接続されているので、ワークの曲率、据え付けの傾き等に起因する研磨面の上下や傾斜の変動に追従でき

る。また、パッド軸への脱着の容易な大小各種のパッド金具が用意されているので、偏心量との組み合わせによって任意の広さの研磨領域を得ることができる。3軸双子型に比べると構成が簡単化され、ツールが小型となって研磨対象物の寸法下限が広がり、操作性が向上した。

部分研磨に用いるツールの研磨特性は、隣り合った研磨領域の境目の滑らかさを保つために、その形は中央部で深く、外に向かって緩やかに浅くなり、周辺部でなだらかに裾野が消失するというタイプが望ましい。この研磨特性は、パッドの材質・形状、研磨材の種類・濃度・供給量、研磨圧、自転速度、公転速度、回転方向、偏心量、研磨時間、ワークの材質などの研磨条件によって大きく形を変えるので、それぞれの条件を変化させつつ上記の研磨特性への要請を満たす最適研磨条件を探る研磨実験を行った。

このようにして、実験的に求めた最適研磨条件による研磨特性曲線を図3.13に示す。

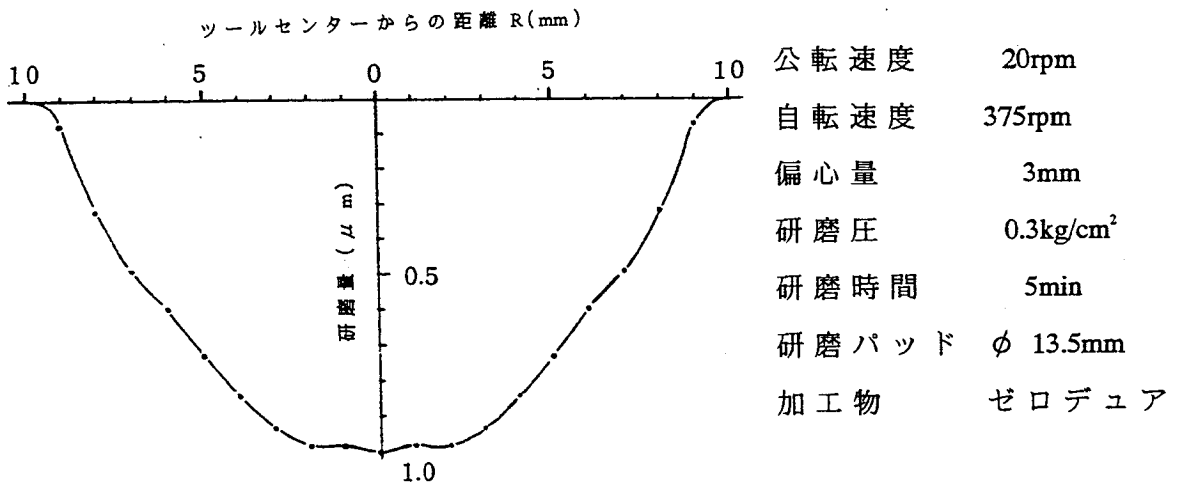


図3.13　2軸偏心量可変型スモール・ツールの
研磨特性曲線

縦軸の研磨深さの単位は研磨領域中央部の値を1として規格化したもので、実際の研磨量に換算すると0.21μmに相当する。この特性曲線は、R＝9mmのあたりから下がり、除々に傾斜を緩めつつR＝2mm付近で谷に達しほぼ平坦な底部を形成している。詳細に見れば6～7mmと1mmの辺で勾配の変化が認められるが、全体としてはなだらかなボウル状である。先に述べた理想的タイプと比較すれば、周辺での沈み込みが早く裾野の広がりに欠ける。このような研磨特性は研磨面に微小な凹

凸（リップル）を生じさせる原因となるが、平滑化によってこのリップルは除去が可能である。この実験に用いた研磨パッドは厚さ4mm、直径13.5mmの酸化セリウムペレットで、研磨領域は直径19.5mmの円型である。ワークの材質はゼロデュア（極低熱膨張率ガラスセラミック）で、研磨液として水を用いた。

3.4 スモール・ツールによる研磨過程のコンピュータシミュレーション

3.4.1 曲面創成のための計算プログラム

以上の結果から（3.1）式による数学的モデル化が一般の曲面の創成に適用可能であろうと予測される。任意の形状の曲面の創成へこのモデル化を拡張するためには、二次元のコンボリューション演算が必要となる。ここでは、演算をコンピュータ処理するディジタル・コンボリューションのプログラミングについて詳述する。

114mm×114mmのワーク・ピースを14mm×14mmの広がりを持つ研磨特性のスモール・ツールで加工するものとして、（3.1）式を使っての研磨過程のモデルにより研磨量を算出するプログラムを作成した。

コンピュータで演算処理するにはワーク・ピースの形状、研磨特性および滞留時間関数をディジタル化しなければならない。そこで、ワーク・ピースは115×115の、研磨特性は15×15のマトリックスで表示し、このマトリックスの各要素をワーク・ピースおよび研磨特性の各点の位置に対応させた。即ち、ワーク・ピースを表すマトリックスにおいて、第58行第58列の要素はワーク・ピースの中心位置を表し、各要素間の間隔は1mmに対応する。ワーク・ピースおよび研磨特性の形状を表すために、各々のマトリックス要素に各点の平面からの偏り量を0.1μmを単位にして代入した。

```
0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 2 3 3 3 2 1 0 0 0 0
0 0 0 2 3 4 4 5 4 4 3 2 0 0 0
0 0 2 3 5 5 6 6 6 5 5 3 2 0 0
0 1 3 5 6 6 7 7 7 6 6 5 3 1 0
0 2 4 5 6 7 8 8 8 7 6 5 4 2 0
0 3 4 6 7 8 8 8 8 8 7 6 4 3 0
1 3 5 6 7 8 8 8 8 8 7 6 5 3 1
0 3 4 6 7 8 8 8 8 8 7 6 4 3 0
0 2 4 5 6 7 8 8 8 7 6 5 4 2 0
0 1 3 5 6 6 7 7 7 6 6 5 3 1 0
0 0 2 3 5 5 6 6 6 5 5 3 2 0 0
0 0 0 2 3 4 4 5 4 4 3 2 0 0 0
0 0 0 0 1 2 3 3 3 2 1 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
```

図3.14 研磨特性のディジタル表示

図3.14はシュミット補正板を創成するための研磨特性で、スモール・ツールが単位時間（これは研磨条件により任意に設定できる）に、底面の直径が14mm、高さ0.8μmのほぼ逆円錐状の研磨を行うことを示している。

研磨量の計算は、ワーク・ピースおよび研磨特性を表す二つのディジタル・コンボリューション演算となり、その結果として101×101のマトリックスが得られる。これがワーク・ピースの形状の変化を示すマトリックスである。115の要素が101に減少しているが、これは現実の研磨作業においても研磨特性の広がり分だけは無駄なものとして、有効研磨面積が減少することに対応している。このワーク・ピースの形状の変化を示す101×101マトリックスを有効研磨面と名付けた。

この有効研磨面の形状を求める手続きは次に示すようなものである。今、平面から出発して、ある曲線を創成するものと仮定する。

1）有効研磨面が平面を表すよう101×101マトリックスのすべての要素を‘0’と置く。
2）研磨特性関数を決定し、それを15×15マトリックスで表示する（図3.14参照）。
3）ワーク・ピース上、すなわち115×115マトリックスにツールの経路、滞留時間を代入する。
4）ワーク・ピースと研磨特性のコンボリューション演算を行い、その結果を101×101マトリックスで表示する。
5）有効研磨面に4）の結果を加算すると研磨面の平面よりの形状変化がマトリックス要素で表示される。
6）5）の結果を図示する。

以上の仮定を第2回目からは3）→6）を繰り返すことにより、任意の曲面を創成して行く仮定を図示することができる。

この過程の問題点は、研磨量を算出するためのコンボリューション演算を実行するために、ワーク・ピース上にツールの径路、滞留時間をどのように表示すればよいかということである。

今、任意の位置（例えばワーク・ピースの中心、即ち115×115マトリックスの第58行第58列）にツールを持って行き、単位時間研磨をしたとしよう。その結果として、有効研磨面はその中心（即ち、第51行第51列）が研磨特性の中心に合致し、研磨特性に示された量だけ研磨された形状にならなければならない。形の上では有効研磨面を示す101×101マトリックスの第51行第51列を中心に研磨特性が移された形にならなければならない。この過程は、ワーク・ピースの中心、即ち第58行第58列の要素を‘1’と置き、他の要素を全部‘0’と置いたものと、研磨

特性のディジタル・コンボリューション演算を行うことにより実現される。図3.15はその過程を図示したものである。

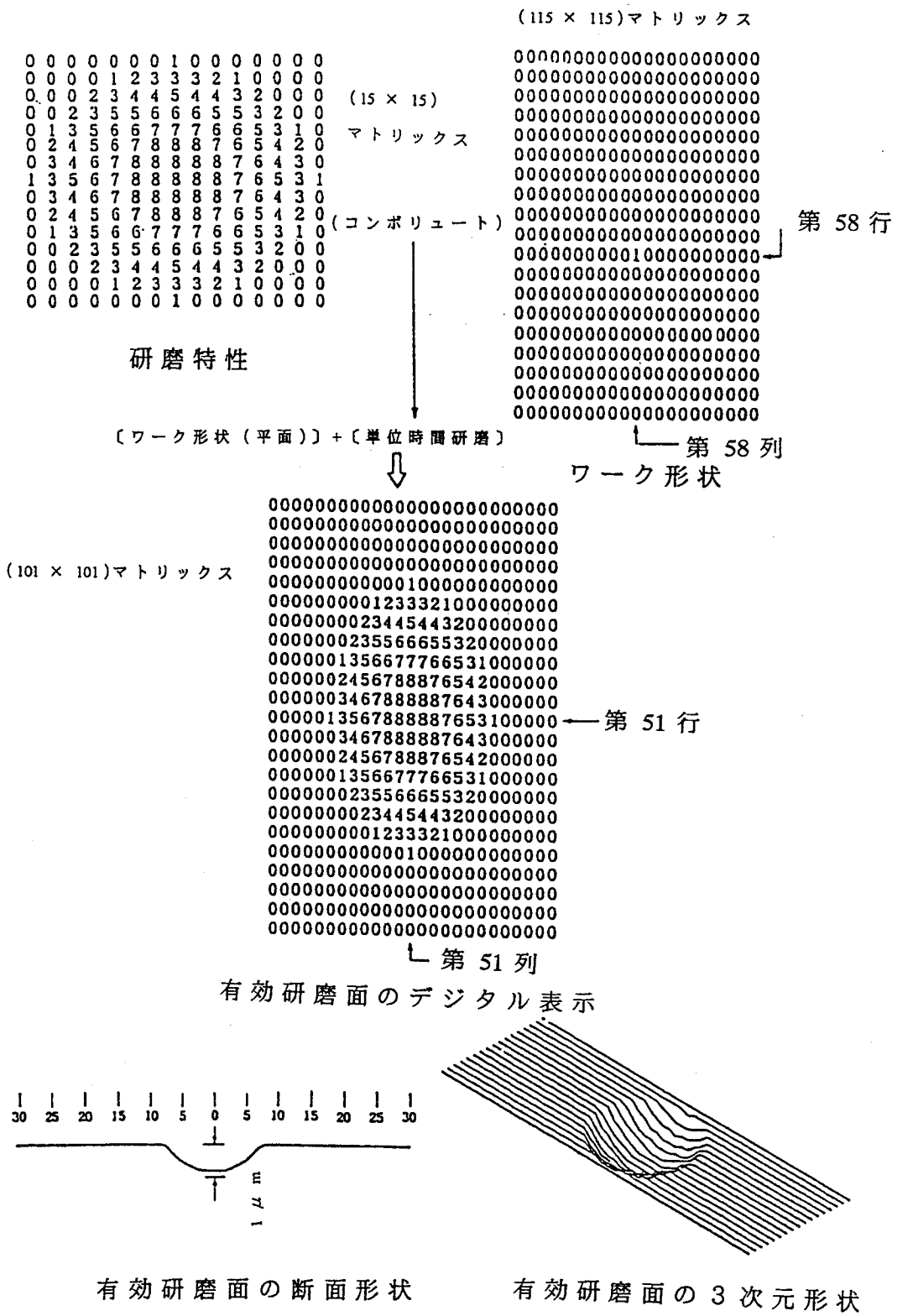


図3.15　研磨特性のディジタル・コンボリューション演算を行う過程

この演算よりツールの径路、滞留時間関数をどのように処理すればよいかということが導き出される。研磨量は滞留時間に比例するので、ある点での滞留時間が単位時間のｎ倍であったとすれば、その点に対応するマトリックス要素に‘ｎ’を代入すればよいことは容易に分かる。このことは、ディジタル・コンボリューション演算過程においては、マトリックス要素を‘1’と置いて得られた結果をｎ倍するということと同等である。このことから、ワーク・ピース上での径路に対応する要素には‘1’を代入し、その結果に滞留時間と単位時間との比を乗算すればよいということでプログラミングを行った。

3.4.2 シュミット補正板の創成シミュレーション

開発したプログラムを用いて

$$Z=A_2(X^2+Y^2)+A_4(X^2+Y^2)^2 \qquad (3.3)$$

で表される口径100mmのシュミット補正板の創成シミュレーションを行った。ここで、$A_2=-0.8\times10^{-5}$、$A_4=0.2\times10^{-8}$である。

開発した研磨機では、ワーク・ピースをターン・テーブル上で連続回転させることも可能である。今、ワーク・ピース上の任意の点にツールを持って行きターン・テーブルを回転させると、ツールは円形径路を通過する。回転対称面を創成するときは、ワーク・ピースをターン・テーブル上で回転させるという方法をとるのが一般的であるので、シミュレーションにおいても、一番単純な円形径路の組み合わせだけでシュミット補正板を創成することにした。

図3.16はツールをワーク・ピースの中心より20mmのところに単位時間の1/10の間滞留させた後の有効研磨面の形状を計算する過程および結果を図示したものである。

このような円形径路をいくつか想定し、滞留時間を適宜変更して研磨を実行した時、有効研磨面の子午断面が移り変わっていく様子を図3.17に示す。

この研磨では、直径100mmの平面を出発点として周辺部から研磨を開始し、プロセス1において中央部φ30mm程度までの成形を行い、プロセス2と3でφ70mm辺まで、プロセス4において残る周縁部を除去するという手順をとっている。最後の図はシュミット補正板の形状の計算値とシミュレーションによって得られた最終形状とを重ね合わせたものであるが、両曲線の差すなわち最終研磨面の形状誤差は最大0.2μmを超えていない。

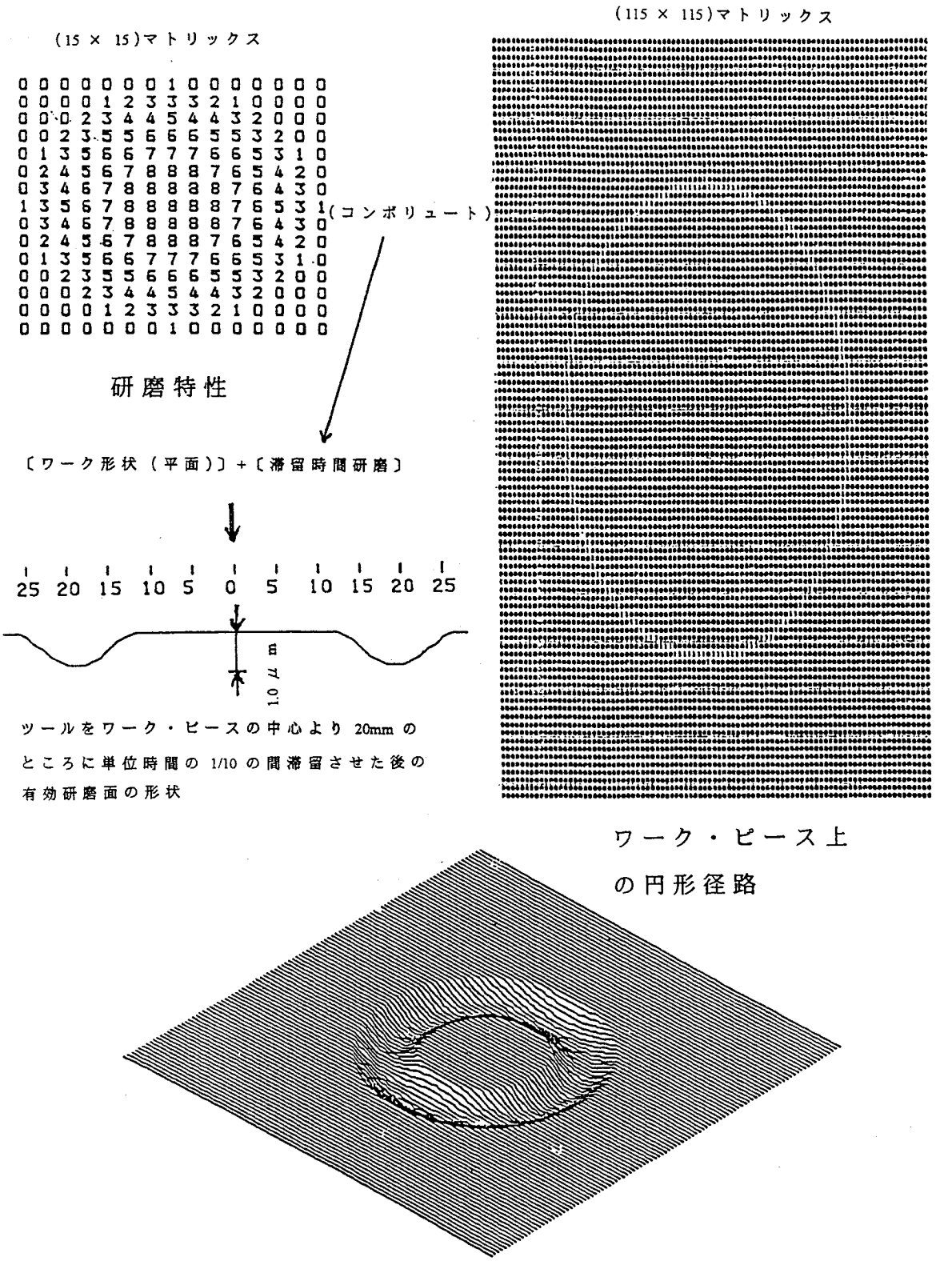


図3.16　有効研磨面の形状を計算する過程および結果
（溝状の部分は半径20mmの円型）

今の場合、ワーク・ピースを回転させながら研磨を行ったという想定であるので、一つの子午断面がすべての子午断面を代表している。即ち、図3.16に図示された子午断面の形状が研磨面全体の形状を表している。

この結果を見ると、面の形状は滑らかさという点でかけるが、理想面からの偏りは0.2μm程度である。面の滑らかさは、径路の取り方、滞留時間などをきめ細かく設定することにより改善することは可能と思われる。

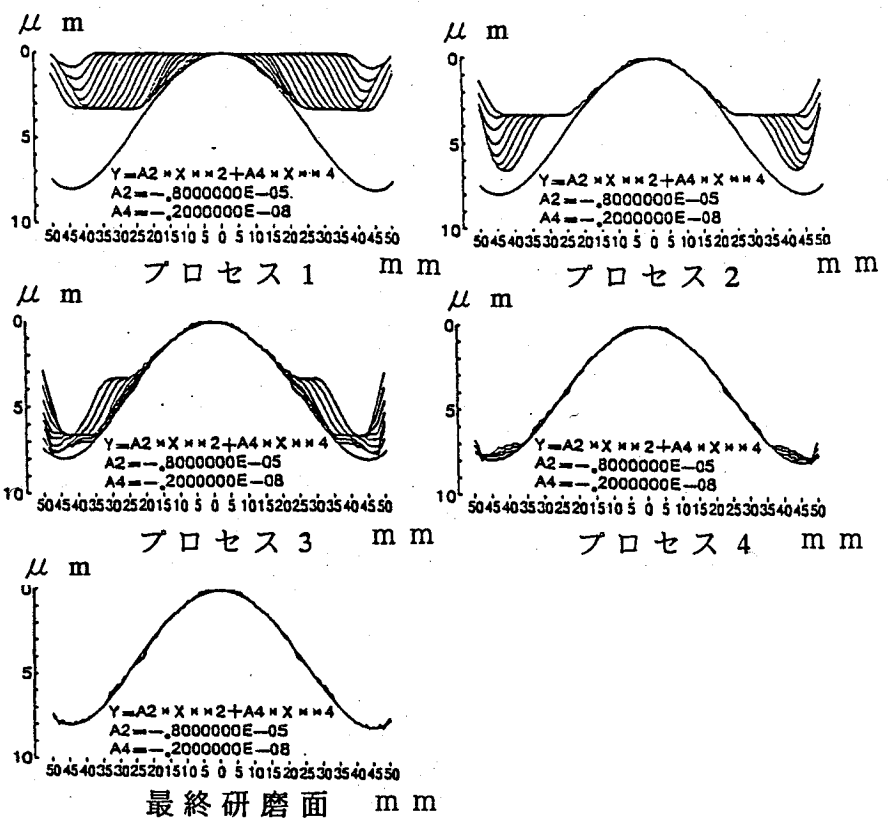


図3.17 シュミット補正板の研磨過程シミュレーション

今回のシミュレーションから、研磨過程を（3.1）式に従って数学的にモデル化することは理論的には正しいと結論できる。

「ある点での研磨量は、その点に寄与する研磨量の重ね合わせで求められる」というコンボリューション・モデルを使って研磨過程のコンピュータシミュレーションを行った。研磨特性は研磨時間に比例する。すなわち、研磨圧が一定の時、研磨量は研磨時間に比例することが分かった。3.3.2の3軸双子型スモール・ツールの場合にはコンボリューション演算が一次元で済む簡単なモデルに対応する実験を行い、平面加工では形状精度0.2μm、凹球面加工では形状精度0.5μm以内で

加工できた。この実験を基にし、3.3.3の2軸偏心量可変型スモール・ツールに対応して二次元の曲面創成のための計算機シミュレーションを行った。実際には、口径100mmのシュミット補正板を対象としてシミュレーションを行い、加工径路として円形径路をいくつか想定し滞留時間を適宜変更して研磨を実行した結果、最終研磨面の形状精度は0.2μm以内で加工できることが判かった。

3.5 非球面の研磨加工

3.5.1 輪帯研磨での研磨特性

シュミットレンズのように光軸に対して回転対称な非球面の場合、非球面化のために除去すべき深さはレンズ中心からの距離のみによって定まるので、ワークをいくつかの輪帯に分割し、輪帯ごとに必要な時間だけツールを滞留させ、輪帯研磨を行えばよい。この方法の計算機シミュレーション結果は前節において示した。

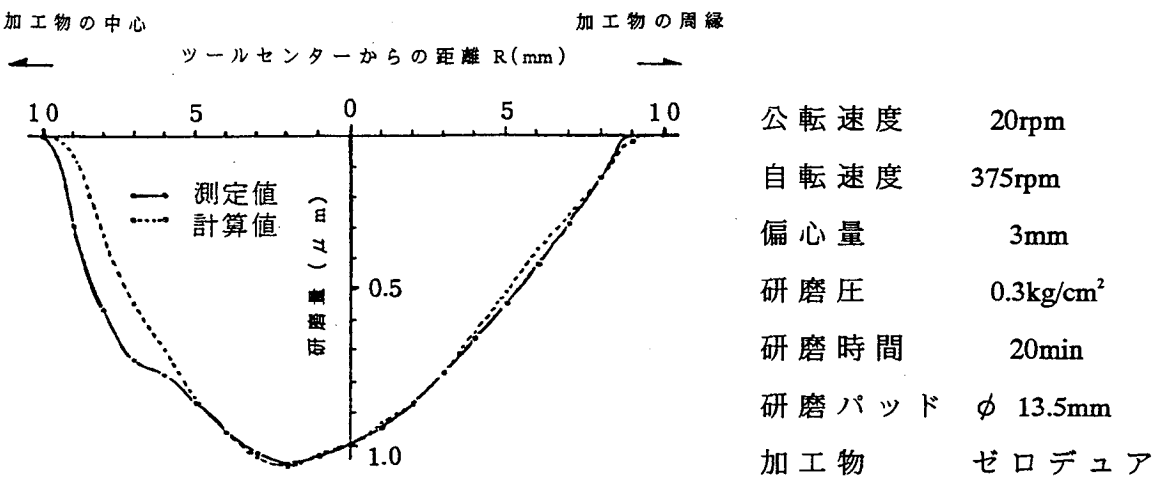


図3.18 輪帯研磨の研磨特性

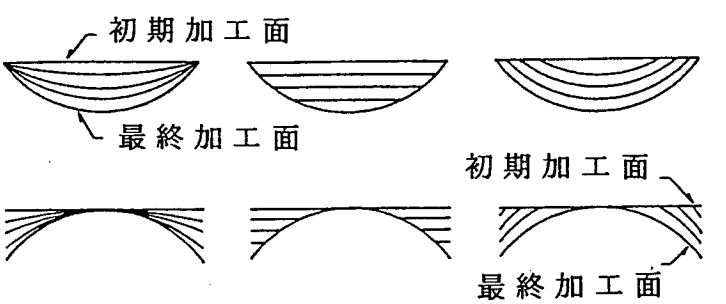
そこで、非球面研磨の基礎実験として輪帯研磨特性の測定を行った。これは、2軸偏心量可変型スモール・ツールを用いて、研磨領域直径19.5mmのツールをワーク中心から20mmの点に滞留させ、ワークをゆっくり回転させて内径20.5mm、外径59.5mmの輪帯を研磨するもので、図3.18にその研磨特性を示す。この特性曲線

は輪帯をワークの直径に沿って切ったときの断面形状を表している。

輪帯研磨の場合は、内周が外周より短く単位面積あたりの滞留時間が内側ほど長くなるため、ワークの中心寄りの部分ほど研磨量が多く、曲線の形が左右対称とならないでワークの内側寄りにひずむ。また、ツールの研磨領域が円形のため、輪帯に沿ってツールが移動する際、単位面積あたりの滞留時間がツール中心ほど長くなり、研磨特性はツール中心ほど深くなる。図3.18の点線は、一点滞留時の研磨特性（図3.13）にこれら二つの効果の補正を施したもので、曲線の傾向は一部分を除いて実線で表した測定値とよく合致する。

3.5.2 放物面鏡の研磨

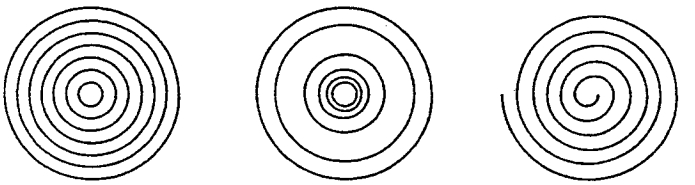
次に非球面研磨の検証として、直径200mm、曲率半径1200mmのゼロデュア製凹球面を放物面に加工する実験を行った。研磨のための数値制御プログラムを作成するに際して、加工の進め方を断面的に示せば図3.19の３タイプに大別される。



(a)比例配分研磨 (b)等深研磨 (c)等厚研磨

図3.19 加工の進め方のパターン

（ａ）は必要研磨量を複数のプロセスに比例配分したもので、各プロセスの最大研磨深さに応じて滞留時間に比例係数がかかることを除けば、全プロセスを通じてプログラムは同一である。（ｂ）は初期面から全面を同じ深さずつ除去して最終面に至るもので、加工範囲は除々に狭くなるが同じプログラムパターンである。（ｃ）は最終面に対して等厚で除去するもので、加工範囲は除々に広くなる。



(a)等分割径路(b)円軌道径路(c)らせん径路

図3.20　ツールの径路

ツールの径路については、ワーク全面を適当な幅の輪帯に分割し、輪帯ごとに単位面積あたりの滞留時間が所要の長さとなるように設定すればよいが、これには図3.20のようなとり方がある。（ａ）は輪帯を等分割し輪帯ごとにテーブル総回転数を変えることにより滞留時間を制御するもので、（ｂ）は総回転数を一定にして輪帯の幅を変えるもので、いずれも径路は円軌道である。（ｃ）はテーブル回転中にＲ軸（レンズの径方向）送りをかけ、その送り速度を変えることによって滞留時間を制御するもので、径路は螺旋形となる。

この実験では、研磨パッドとして主に直径13.5mmの酸化セリウムペレットを用い、局部的な修正には小径のペレットやウレタンシートを、リップルの平滑化には大径のピッチディスクを用いた。

この放物面の加工における必要研磨量（放物面と初期球面との差）は最大7.2μmであるが、研磨途中での形状測定は、初期には研磨ヘッドの横に装着した触針式測定器による断面走査によって行い、終期非球面に近付いてからは逆ロンキーテスト[21]による全面観察によって行った。

ロンキーテストとは、点光源より発して収束光学系により反射（または屈折）された光束を、その収束点の近傍で10 line/mm程度の直線格子で切り、その格子を通して研磨面上に見られる白黒の縞模様（ロンキー縞）を解析して研磨面の形状を調べる検査方法である。図3.21はその原理を図示したものである。

この方法は凹球面鏡を研磨するときには、点光源を球の曲率中心に置いて直線格子をはさみ、ロンキー縞が直線になるように研磨を進めて行けば良いという点でゼロテストといえるが、鏡が反射放物面の場合は、そうはならない。点光源を参照球面の曲率中心に置く時は、格子をどの位置に置いても直線縞は得られず、例えば、典型的な例として図3.22に示したような縞が見られる。これは、放物面鏡の場合、各輪帯毎に光の収束点が異なり、外側の輪帯に行くほど収束点が後方に移動することに起因する。この縦の収差は輪帯の半径ｒの２乗に比例し、参照

球面の曲率半径をRとすればr²／Rで示される。図3.23はその様子を示したものである。

これを利用して、輪帯マスクで鏡面を覆い各輪帯の光の収束点の位置をフーコーテストで求め、それとr²／Rを比較して面の放物面化の状態を知ることができる。

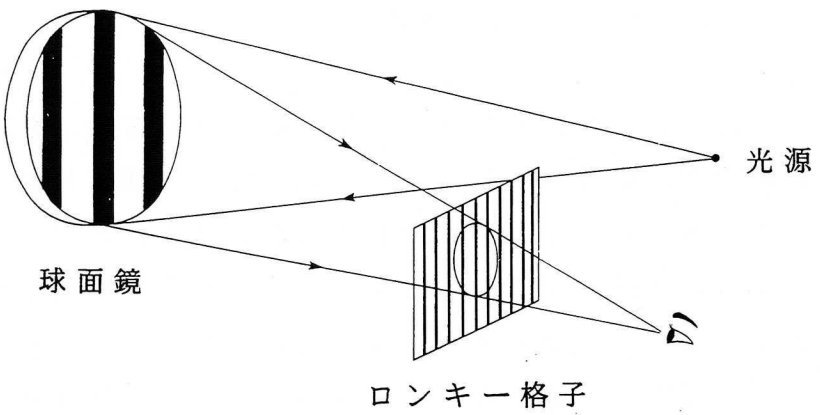


図3.21　ロンキーテストの原理

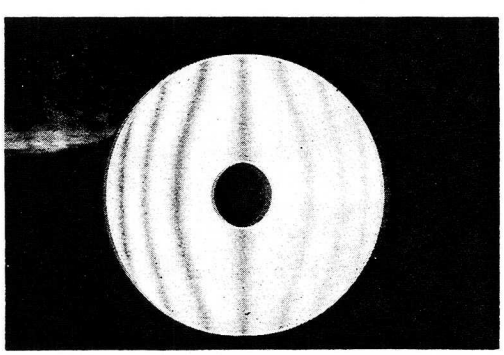


図3.22 ロンキー格子（7 line/mm）を用いた放物凹面鏡のロンキーパターン

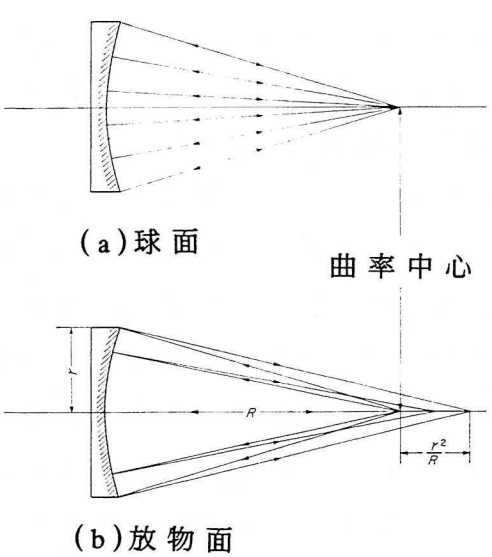
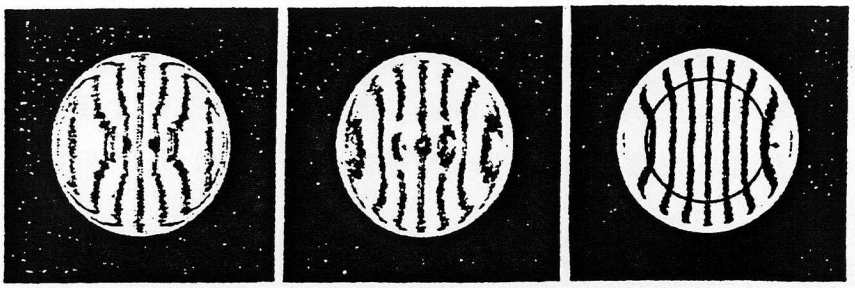


図3.23　放物凹面鏡の縦収差



(a)初期加工面 (b)中間加工面 (c)最終加工面

図3.24 放物面化のロンキーパターン

図3.24はこの放物面化の過程におけるロンキーパターンを示したものである。（ａ）では７本の縞模様のうち左右両端の２本と残り５本の縞の上下の端の部分は直線であるが中央部は糸巻型に曲がっており、球面の外周部分のみが放物面化された状態である。（ｂ）では逆に中央部が直線化されており、この部分の放物面化が進んでいる。中心に見られる二重縞や大小の凹凸は、面に不規則なリップルが多いことを示す。（ｃ）は最終的に得られた放物面のロンキーパターンで、丸で囲んだ部分では、縞がほぼ直線状となっており、この領域内では放物面化が達成されている。また（ａ）、（ｂ）に比べて縞の太さもそろい凹凸も少ないのでリップルも平滑化されている。

3.6 結言

非球面の利用を拡げるには、熟練やノウ・ハウを可能な限り排除した製作法の確立が不可欠であるとの観点から、数値制御非球面研磨機の開発を行った。最初に試作したものは研削を主体としたもので、ダイヤモンド・ターニング法と同じくツールの先端の位置の超精密制御を狙ったものであったが、位置制御精度を実現することができなかった。

そこで、第２段階としてR.A.Jonesが提唱したスモール・ツール研磨法を適用し、好結果が得られたので、非球面創成方式を研削から研磨に転換した。最初にR.A.Jonesの３軸双子型スモール・ツール法を用いた数値制御非球面研磨機を試作し、コンボリューション・モデルを使って研磨実験および研磨過程のコンピュータシミュレーションを行った。

まず、コンボリューション演算が一次元で済む簡単なモデルに対応する実験を行い、平面加工では形状精度0.2μm、凹球面加工の形状精度は0.5μm以内で加工できた。しかし、単一加工痕形状の広がりが大きいため、大面積の加工には適しているが、一般に良く用いられる直径20～100mmの大きさの非球面加工に対応するため、単一加工痕形状の広がりが直径20mm程度になるような2軸偏心量可変型スモール・ツール法を用いた数値制御非球面研磨機を試作した。研磨領域は直径19.5mmの円型である。

この実験を基にし、二次元の曲面創成のためのコンピュータシミュレーションを行った。実際には、口径100mmのシュミット補正板を対象として創成シミュレーションを行い、加工径路として円形径路をいくつか想定し滞留時間を適宜変更して研磨を実行した結果、最終研磨面の形状精度は0.2μm以内で加工できることが判った。

開発した2軸偏心量可変型スモール・ツールを用いて、非球面加工を行った。まず、加工の進め方のパターンを明らかにするとともに、具体的には放物面鏡の研磨加工行った。その結果、形状精度0.2μm以下の最終面が得られた。特に、この2軸偏心量可変型スモール・ツール法を用いた数値制御非球面研磨機は、研磨作業用のソフト・ウェアを独自に開発し、非球面研磨実験によってこの方式の有用性を確かめた。

この技術は我が国の宇宙開発にも応用され、資源探査用観測システムの高性能光学センサの創成技術として貢献した。

第４章　ＥＥＭ加工法による超精密数値制御非球面加工

4.1　緒言

今日、精密機械、エレクトロニクスを始めとして多くの先端科学分野において、超精密加工技術が、設計思想を具体化するための重要な基本技術の一つとして、位置づけられている。このため、形状精度の向上を図り、また表面物性にも欠陥のない表面を創り出す事を目指した研究開発が盛んに行われている。従来、切削、研削、研磨などの機械加工は高い精度が得られる加工方法であり、多くの精密部品が機械加工により製造されてきた。レンズやミラー、Ｘ線反射鏡といった光学部品、半導体ウェハなど、数え上げればきりがない。こうした精密部品の多くが、応用製品の高付加価値化に伴って、年々より高い精度が要求されて来ている。これに応えるため、加工単位を原子単位に近づけ、しかも物性的にも優れた表面の創成を可能にする加工法として森らによって開発されたＥＥＭ（Elastic Emission Machining）[22]を用いた光学素子表面創成装置を試作した。これは前加工された球面あるいは平面を初期の面形状として理想形状からのずれ量を高精度で除去加工することによって理想面を創成する装置である。

試作装置を用いて（１）合成石英の非球面レンズ[23~24]、（２）ＢＳＯ結晶の極薄平面板[25]、（３）Ａｇ，Ｃからなる X 線用積層型ゾーンプレート[26]、（４）ＣＶＤ－ＳｉＣのＸ線用非球面ミラー[27]、（５）赤外レーザ用ミラーのＳｉ基板の加工を行い、その形状精度について検討した。

4.2　数値制御ＥＥＭ加工

4.2.1　ＥＥＭ加工の原理

図4.1にＥＥＭ加工法の原理を示す。ＥＥＭ加工とは微細粉末粒子を用いた懸濁液中のポリウレタン回転球と加工物表面との間に生じる流体潤滑現象を利用する加工法であり、粉末粒子を加工物表面に供給し、このときに相互に接触した狭い領域で一種の原子間結合を発生させ、この結果、原子単位で加工物表面を除去する。粉末粒子の供給法は、微細粉末粒子を懸濁させた液中でポリウレタン球を回転させたときの流れによって行う。この方法では加工対象表面上で加工位置を非常に狭い領域に制限することが可能となる。加工に用いる微細粉末粒子は加工性能を向上させるために、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での原子間結合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。

また、ポリウレタン球と加工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、単位時間当りの作用粉末数も安定となり、単位時間当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ポリウレタン球の加工物表面での滞留時間またはテーブルの送り速度によって制御することができる。この制御を行いながら、ポリウレタン球で加工対象物全域を走査することにより任意曲面の高精度な創成が可能となる。

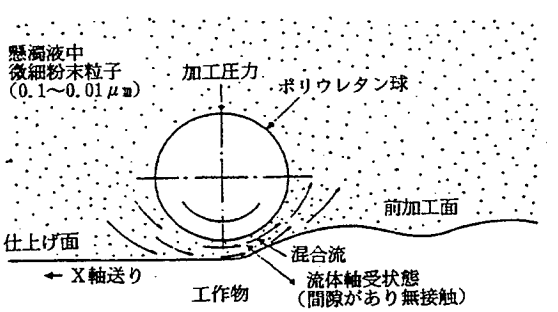


図4.1 ＥＥＭ法の原理

4.2.2 数値制御ＥＥＭ加工装置

試作した装置は、図4.2に示すように3軸数値制御光学素子表面創成装置である。3軸の構成を図4.3に示す。Ｘ、Ｚ軸はフラットローラベアリングで支持された直線移動部を高精度ボールスクリューに連結されたＤＣサーボモータで駆動を行う構造である。ボールスクリューとＤＣサーボモータとの連結部にはハーモニック

ドライブ減速機を使用している。C軸はX軸上に取り付けられており、エアベアリングで支持された回転部をDCサーボモータで駆動する構造である。DCサーボモータ側にハーモニックドライブ減速機を取り付け、エアベアリングとの間はバネ式カップリングで連結し、モータ振動の吸収機構を用いている。ポリウレタン球の回転用に無段変速モータ（0～4000rpm）を用い、加工荷重及び回転球は任意のものを使用できる。加工荷重は鉛材をシリコンオイル中に入れてダンパー作用で一定荷重に保たれている。また、加工現象の安定性が重要であるため、懸濁液を一定条件に保つように、加工槽には恒温装置及び循環ポンプが取り付けられている。

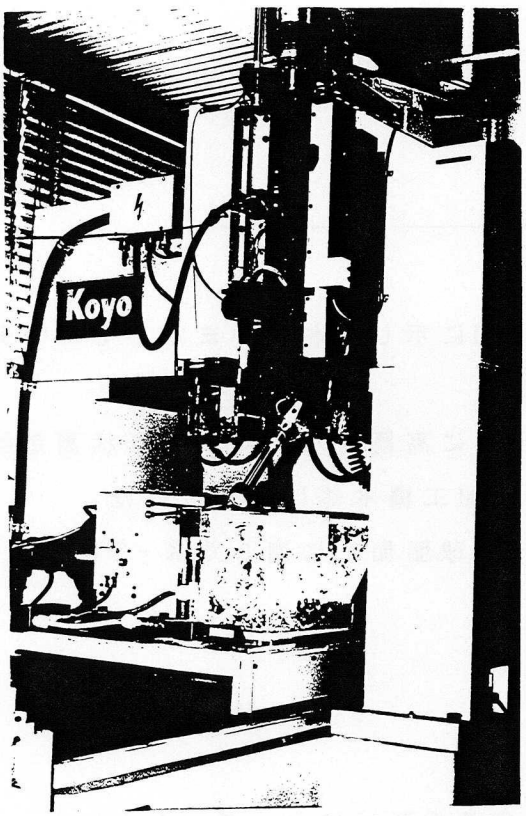


図4.2　数値制御光学素子
表面創成装置

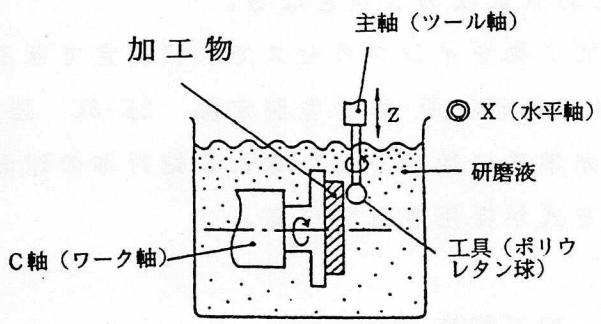


図4.3　制御軸構成

表4.1　数値制御光学素子表面創成装置の仕様

項　目	仕　　様
制御軸数	3軸[X軸,Z軸,C軸(回転軸)]
制御方式	ハイブリッド方式
最大加工範囲	X,Z軸 200mm,C軸 φ200mm
有効移動範囲	X軸 470mm,Z軸 200mm,C軸 360°
送り速度範囲	X,Z軸 0.01mm/min～120mm/min
	C軸 0.0005rpm～12rpm
最小送り設定単位	X,Z軸 0.1μm,C軸 0.00018°
主軸スピンドル回転速度	0～4000rpm

制御3軸の特性も含めて、本装置の仕様を表4.1に示しておく。また、その特徴をまとめれば次の2点となる。

(1) 加工物をインプロセスで形状測定できるように高精度な万能表面形状測定器(小坂研究所 触針型測定機 3E-3C 型)を加工機本体に取り付けた。

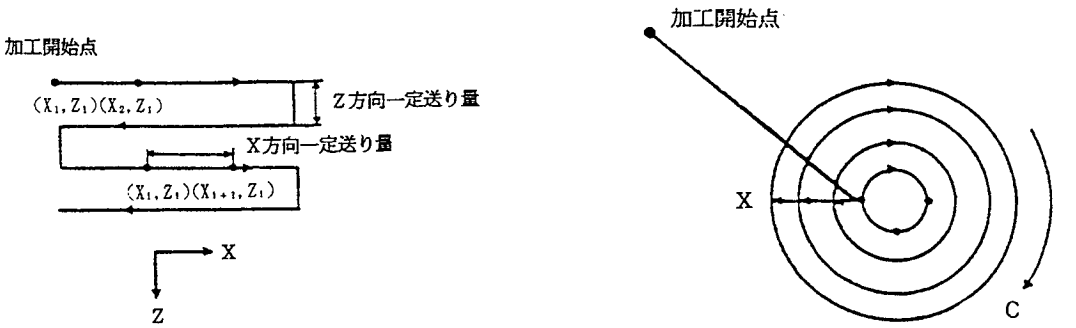
(2) 光学系に数多く用いられる軸対称の球面、非球面加工に適したX-C軸加工方式が採用されている。

4.2.3 加工特性

3軸の駆動機構を用いて、本装置では対象物の表面形状によって図4.4(a)、(b)に示す二種の加工径路を選択することができる。(a)のX-Z軸加工は、C軸を停止した状態で加工ヘッドに取り付けたポリウレタン球を加工開始点から+X方向に順次△x／stepずつ送りを与え、さらにZ方向に△z／strokeの送りを与えた後、－X方向に順次△x／stepずつ送りを与える。この動作を順次繰り返して全面を加工する方法である。

(b)のX-C軸加工は、ポリウレタン球を加工開始点に持って行き、回転ホルダーの回転軸(C軸)を等速度回転させながら、円周上を1回転させる。Xを一定送り量移動させて、次の円周上を1回転させる。この動作を順次繰り返して全

面を走査する方法である。この径路は軸対称な曲面、非球面の加工に適している。



(a) X-Z 軸加工　　(b) X-C 軸加工

図4.4　加工径路

まず、本装置の加工特性を調べるために、合成石英材料を加工物として要因別の加工面粗さ向上実験を行った。その結果、以下の結論を得た。

(1) rms（自乗平均平方根粗さ）0.1nmの良好な表面粗さが得られるのは、粉末粒子が平均粒径0.1μm以下の場合である。粉末粒子としてSiO_2,ZrO_2,Al_2O_3のいずれを用いた場合でも、同様な傾向を示す。

(2) 懸濁液濃度は液濃度が低いほど、加工面表面粗さは良好となる。

(3) ポリウレタン球の表面粗さが小さいほど、良好な加工面粗さが得られる。

(4) その他の要因で、ポリウレタン球の回転速度、荷重については加工面粗さとの明確な相関関係は見られない。

これら結果をまとめると表4.2のようになる。

表4.2　加工表面粗さの要因と加工結果

（→の方向に粗さが良い）

要因		範囲	結果
工具	表面粗さ	20→1μm　Rmax	小さい程良い
粒子	平均粒子	1→(0.2～0.02)μm	0.08μmまで良好
	種類	SiO_2, ZrO_2, Al_2O_3	差は小
	濃度	0.3→0.005%	低い程良い
運動	回転数	100～2000rpm	差は小
	荷重	50～600gf	差は小

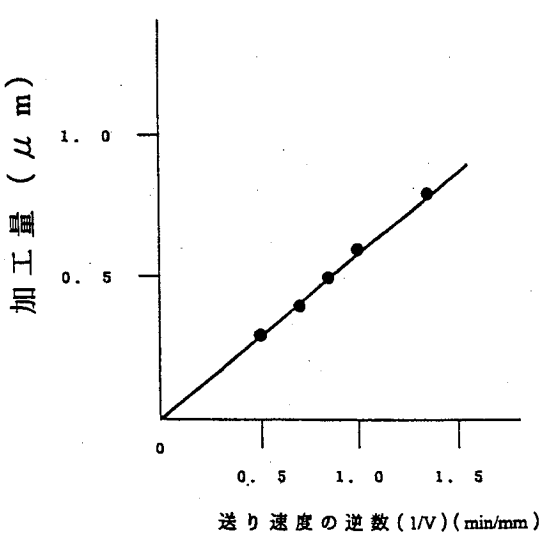


図4.5　加工量と送り速度の関係

表4.3　加工条件

加工物	合成石英
粉末粒子	SiO_2 0.08μm
液濃度	0.1%
荷重	100gf
工具回転数	900rpm
工具直径	58mm
液濃度	20℃

図4.5は、本試作装置の加工特性（加工量と送り速度との関係）である。その時の加工条件を表4.3に示す。加工量が送り速度の逆数に極めて正確に比例していることが分る。また、この特性は時間的にも安定している。この加工特性を用いて各点ごとの加工量に応じてポリウレタン球の送り速度を制御しながら、加工対象全域を走査することにより自由曲面の高精度な加工が可能となる。

4.2.4 加工方法

実際の加工は、図4.6に示す加工手順に従って行われる。まず加工特性データを計算機に入力し、前加工面の形状を装置本体に取り付けた形状測定器で測定し、それを計算機に入力する。これと目標形状との差を各点での加工量とし、これに相当する送り速度を計算する。その結果に基づいて数値制御加工を行い、目標形状を得る。

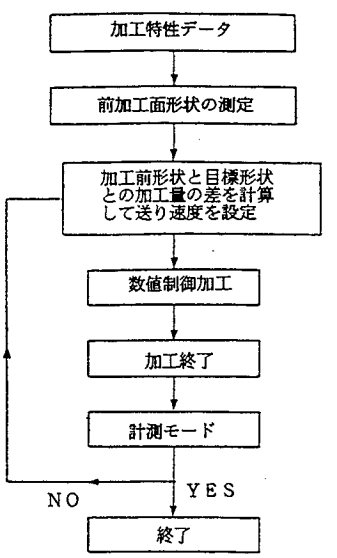


図4.6 加工手順

上述した加工手順を具体的に説明すると、ＥＥＭにおける加工量は、加工条件が一定のとき、加工ヘッドが加工点に滞在する時間に比例することが分かっている。このため、各点での必要加工量に応じた走査速度（送り速度）で加工ヘッドを走査することにより、任意の目的形状の加工を行うことができる。開発した制御システムでは、図4.7に示すように、前加工面と所定の目的形状を制御用のパーソナルコンピューターに入力することにより、自動的に各点での必要加工量が計

算され、加工ヘッドの送り速度データに変換される。このデータに基づき、各軸の駆動用サーボモーターを制御し、数値制御による形状修正加工が実行できる。

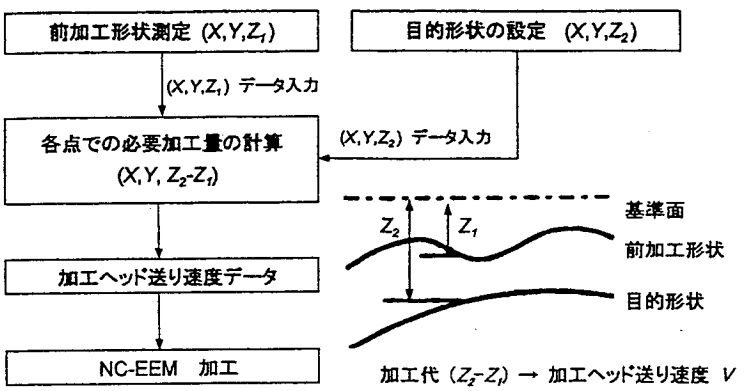


図4.7 数値制御ＥＥＭ加工の概念図

4.3 数値制御ＥＥＭによる超精密光学素子の加工

試作装置を用いて実際に行った数値制御ＥＥＭによる超精密光学素子の加工例について以下に述べる。

4.3.1 合成石英ガラスの非球面加工

マルチメディアや光通信の進展は著しく、ビデオムービー、プロジェクションＴＶ等の結像光学応用製品、あるいはＣＤプレーヤー、レーザビームプリンター等のレーザ応用製品、光通信の光源となるＬＤ（レーザダイオード）モジュールなどには、非球面レンズまたは非球面ミラーが広く用いられている。

レンズの材料には、ガラス、結晶、プラスチック、金属が主に用いられるが、その中でも用途に応じて材質が選定されている。オプトエレクトロニクス用パーツに用いられる金属材料には、アルミニウム、銅などの軟質金属や無電解ニッケルメッキ材など、短波長の露光装置には、合成石英、蛍石などがある。

非球面の形状精度は図4.8に示すような指標で表現されている。f(figure)は各点の測定点から最小二乗近似で求めた誤差近似非球面と設計非球面との差、a(accuracy)は加工形状の各点の誤差近似非球面との差、α(smoothness)は加工形状の各点の誤差近似非球面に対する傾きの誤差を表す。これらの指標に従って、一般の非球面レンズの形状精度は、f＝±1μm、a＝±0.1μm、α＝1/5000rad、そ

して表面粗さはRmax＝0.01μmが要求されている。ただし、半導体の露光に用いられる非球面レンズでは、a＝±0.01μmと表面粗さ程度の形状精度が要求される。

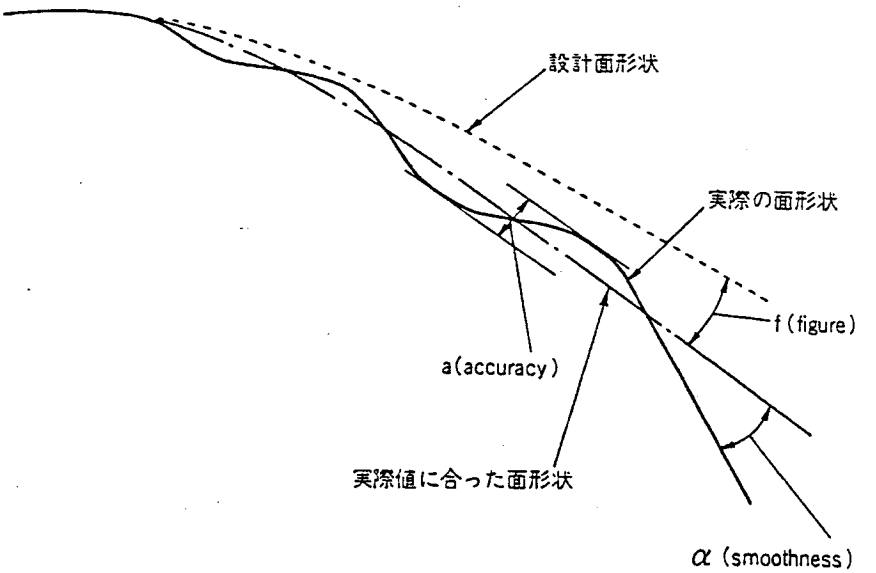


図4.8　非球面形状の表示法

非球面レンズの一般的な加工工程は、研削加工と研磨加工の組み合わせである。最近は、高精度のオンマシン形状計測を付加したCNC加工システムが開発・採用されている。研削・研磨加工では、ダイヤモンド砥石による数値制御研削加工により、所定の非球面形状を形成した後、形状計測を行い各部位の必要な研磨量を求め、形状修正を兼ねた鏡面研磨仕上げ加工が行われる。仕上げ面の形状計測により、基準値に到達してなければ、再度必要量の研磨を実行する。

一般によく用いられている非球面レンズとは、軸対称自由曲面を有するレンズのことである。光学系にこれを採用すれば、系の収差補正の自由度が大きくなり、光学系レンズの枚数の削減、高性能化、小型・軽量化を同時に達成することができる[28]。しかし、非球面研磨は非常に難しく、長年にわたり積み上げられた高度の技能に依存しているのが実状であり、その技術の確立が望まれている。

これに応えるために、目的とする非球面に近似した球面あるいは平面を精度良く前加工しておき、ＥＥＭを用いて残るわずかな非球面量だけを加工する考え方を採用し、合成石英ガラス材料の非球面加工を行った。合成石英ガラス材料に対

する加工特性は、すでに4.2.3節で与えており、今回も加工条件は同じである。

実験した非球面加工は、軸対称のため、加工径路として、図4.4（b）に示したX-C軸加工を採用した。まず、ポリウレタン球を加工開始点に持って行き、回転ホルダーの回転軸（C軸）を等速度回転させながら、円周上を1回転させる。X＝500μmを一定送り量移動させて、次の円周上を1回転させる。この動作を順次繰り返して全面を走査した。

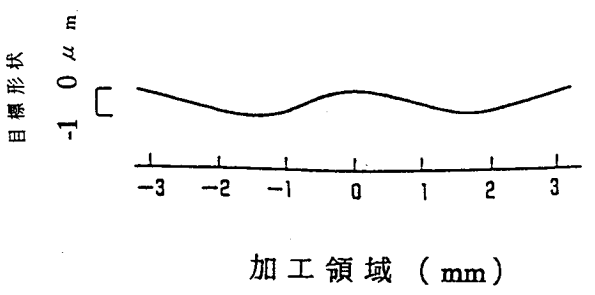


図4.9　非球面の理想断面形状

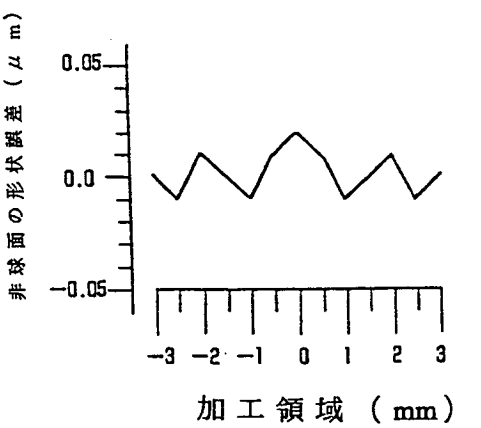


図4.10　非球面の形状誤差

コンパクトディスク用非球面コリメーターレンズに用いられる非球面の形状を目的とした非球面の理想断面形状を図4.9に示す。前加工面はオプティカルフラットを用いた。X-C軸加工法で加工した非球面の形状誤差を図4.10に示す。触針式（フォームタリサーフ）により測定した形状精度は、±0.015μm以内の精度で加工されている。この測定結果は、スキャン走査を10回行い、その平均値を一次元で表した断面形状を示す。

測定物を非接触で、かつ傷をつけることなく高速で表面粗さ0.1nm以下の表面粗さの測定できる三次元微小表面形状測定機（WYKO位相干渉計）で測定した表面粗さは、図4.11に示すように0.26nmである。

本加工システムによって、非球面形状加工を行った結果、従来の機械式研磨技術では実現不可能な高い加工精度が得られた。

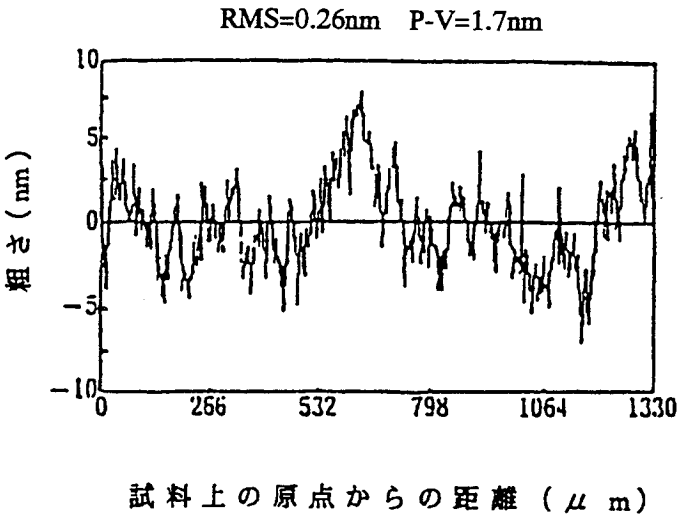


図4.11　表面粗さ測定値

4.3.2　ＢＳＯ結晶の極薄板平面加工

酸化ケイ素ビスマス$Bi_{12}SiO_{20}$（以下ＢＳＯと略す）結晶はすぐれた光学特性をもち、これからの光機能素子材料として期待されている。ＢＳＯ結晶の利用、用途は光情報処理における空間光変調素子、ホログラム記録素子などの多岐にわたり、一部は実用に供されている[29]。

この中で空間光変調素子とは入射した光の振幅あるいは位相を空間的にかつ実時間的に変調する素子であり、図形やデータパターンのような１次元、２次元情報を空間的に表示し、処理する素子である。そのため、空間光変調素子は、”光の弁”という意味でライトバルブ（Light Valve）とも呼ばれている。空間光変調素子は光情報処理、ディスプレイ、プリンタなどの分野に応用されている。

空間光変調素子の基本性能を図4.12に示す。光学的あるいは電気的入力情報を空間光変調素子に与えると、空間光変調素子を透過もしくは反射する光はその入力情報によって変調を受け、２次元画像、データパターンあるいは処理画像となって出力される。

空間光変調素子はＢＳＯ等の光伝導性強誘電体結晶の薄片を図4.13のように絶縁層で包み、両端に透明電極をつけた素子である。空間光変調素子は青色光で書き込み、書き込んだ画像を赤色光で非破壊的に読み出すことができる。透明電極間に電圧（～1KV）を印加して、書き込み光を入射すると結晶の光伝導性によって入射する光の強度に応じて発生した電子が結晶表面に移動し、結晶に加わる電圧

が空間的に変化する。読み出し光を入射すると、電圧分布によってポッケルス効果が生じ、光の偏光面が回転して取り出され、書き込み画像が得られる。

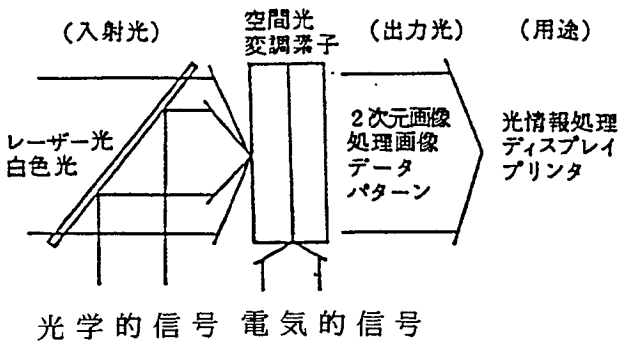


図4.12　空間光変調素子の基本性能[29)]

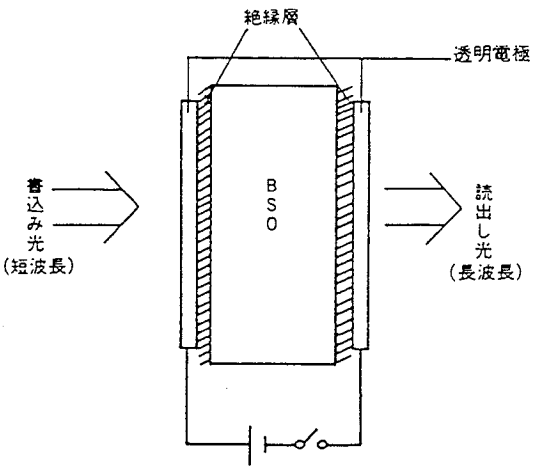


図4.13　空間光変調素子の構造

書き込み感度は～25erg/cm^{2}と高く、空間光変調素子の解像度（lines/mm）は書き込み光の波長とＢＳＯ結晶板の厚さに依存する[30)]。素子の解像度は画像書き込みの過程でキャリアがＢＳＯ結晶板内に結晶板の厚さ方向（縦方向：外部印可電界の方向）とそれに垂直な方向（横方向：板面に沿った方向）の両方向へ動くことを考慮した解析が行われ、MTF(Modulation Transfer Function：空間変調伝達関数)が解明された[31)]。それを図4.14に示す。

空間光変調素子の解像度を向上させる有効な方法は薄いＢＳＯ結晶板を用いることである。現在、ＢＳＯ結晶板の厚さ300μmで、コントラストは10^3程度が得られ、応答速度も早いが解像度は15 lines/mmであり、かなり悪い。従って、ＢＳＯ結晶を用いた空間光変調素子の解像度の向上を図るために、（1）結晶の厚さを薄くする、（2）表面（界面）をクリーン研磨することが必要となる[31)]。結晶の厚さが厚ければ、それだけ表面電荷の電圧分布が背面でぼけ、分解能が悪くなる。薄くすれば、表面と背面の分布がぼけないので分解能が向上する。図4.15にＢＳＯ結晶の厚さと解像度の関係を示す。

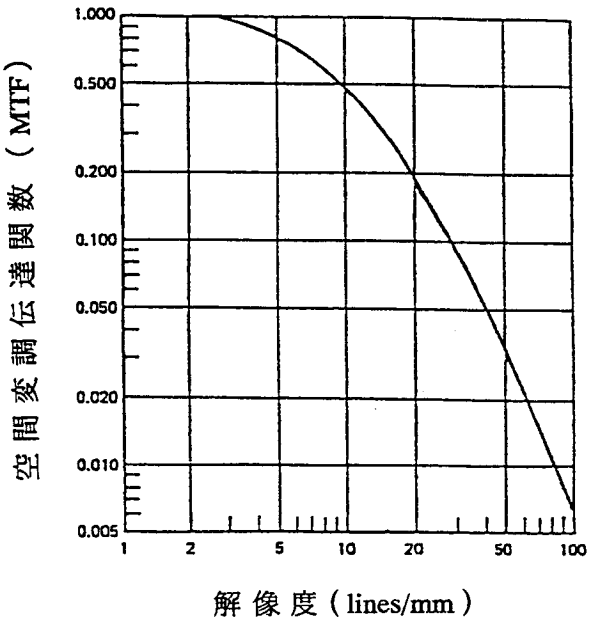


図4.14　空間光変調素子の空間変調伝達関数(MTF)[31]
(BSO結晶板の厚さ800μm、絶縁層の厚さ6μm)

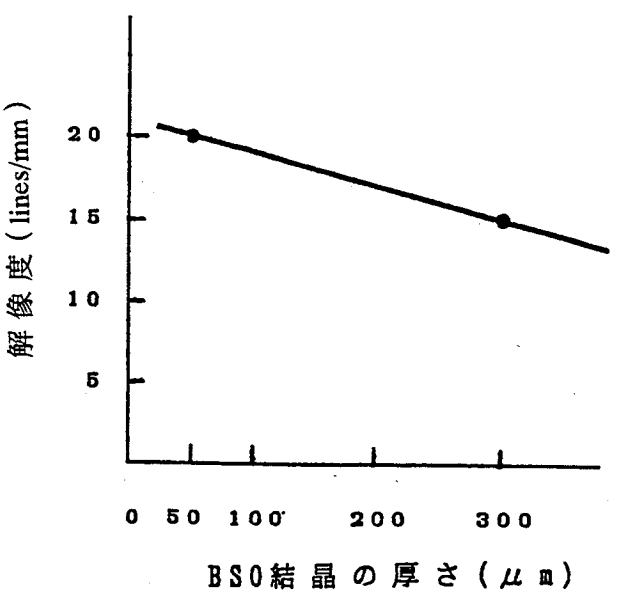


図4.15　ＢＳＯ結晶の厚さと解像度の関係

市販されている厚さ300μmのＢＳＯ結晶板を機械式の研磨機で厚さ58μmまで、前処理研磨を行った後、さらに、ＥＥＭ加工法を用いて厚さ50μmまで、薄くする

平面加工を試みた。

本実験で用いたＢＳＯ結晶基板は(100)面である。ＥＥＭ加工には、大きさ8mm×8mmのＢＳＯ結晶基板を用い、BK7ガラスプレートに接着固定して、両面平面加工を行った。加工条件は、研磨粒子SiO_2（粒子直径0.08μm）、液濃度0.5％、荷重100gf、工具回転数900rpm、工具直径58mm、液濃度20℃である。その時の加工特性は、研磨量が送り速度の逆数に極めて正確に比例していた。また、この特性は時間的にも安定していた。

加工径路は図4.4（a）に示すＸ-Ｚ軸加工方式を用いた。まず、Ｃ軸を停止した状態で加工ヘッドに取り付けたポリウレタン球を加工開始点から＋Ｘ方向に順次△ｘ／step＝500μmずつ送りを与え、さらにＺ方向に△ｚ／stroke＝500μmの送りを与え、－Ｘ方向に順次△ｘ／step＝500μmずつ送りを与える。この動作を順次繰り返して全面を加工した。

形状測定器（フォームタリサーフ）で測定したＢＳＯ結晶の前加工面を図4.16に示す。さらに、平面加工を行った後の表面形状を図4.17に示す。

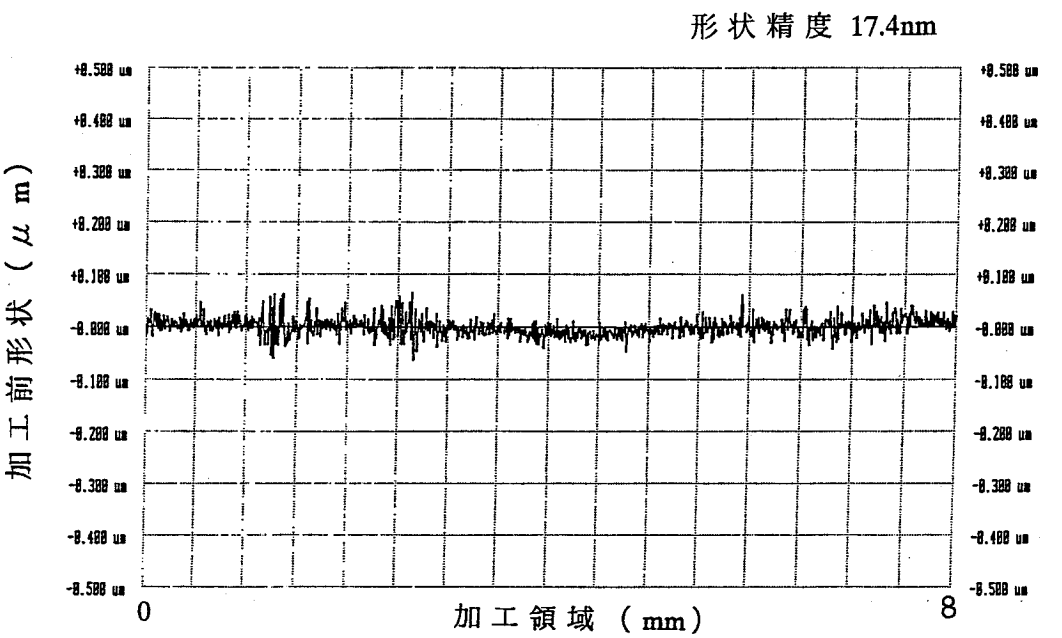


図4.16　ＢＳＯ結晶の加工前形状

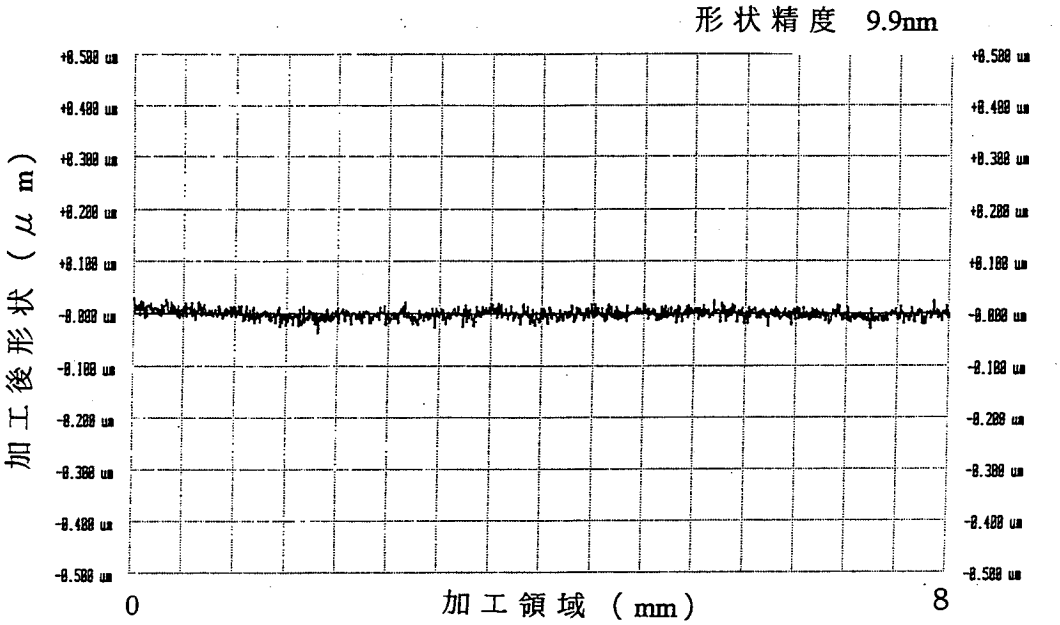


図4.17 ＢＳＯ結晶の加工後形状

本加工システムによって、ＢＳＯ結晶の極薄平面形状加工を行った結果、9.9nm以内の精度で形状加工が行えることを実証した。

4.3.3 Ｘ線用積層型ゾーンプレートの平面加工

シンクロトロン放射光（ＳＲ光）の開発に伴い、硬Ｘ線から軟Ｘ線に至る広範囲なＸ線を利用するための光学系、光学素子の研究が注目されている。なかでも、波長が数Åの硬Ｘ線領域の光は物質の結晶解析、欠陥分析、生体試料の観察、各種の分析などの広範囲な分野で利用されており、これをさらにマイクロビーム化できれば、これらの分野に大きな貢献ができると考えられる。

Ｘ線領域では、物質の屈折率が１に近いため、可視域で使用されている屈折型レンズの作製は困難である。そのため、ゾーンプレート（以下ではＺＰと記述する）、直入射多層膜反射鏡、斜入射反射鏡などの光学素子を使用することによってＸ線マイクロビームが形成されている。中でも、ＺＰは現在のところ最も微小なビーム（0.1μm以下）の実現が可能であることから特に注目されており、軟Ｘ線領域用のものが数多く作製され、Ｘ線顕微鏡に幅広く応用されている[32~34]。一方、硬Ｘ線領域においては作製技術の困難さの理由により1μm以下に集光できる光学素子は開発されておらず、その高性能化が急務である。以下にゾーンプレ

ートの原理と積層型ゾーンプレートの作製とその表面のＥＥＭ研磨及び評価について述べる。

4.3.3.1 ゾーンプレートの原理

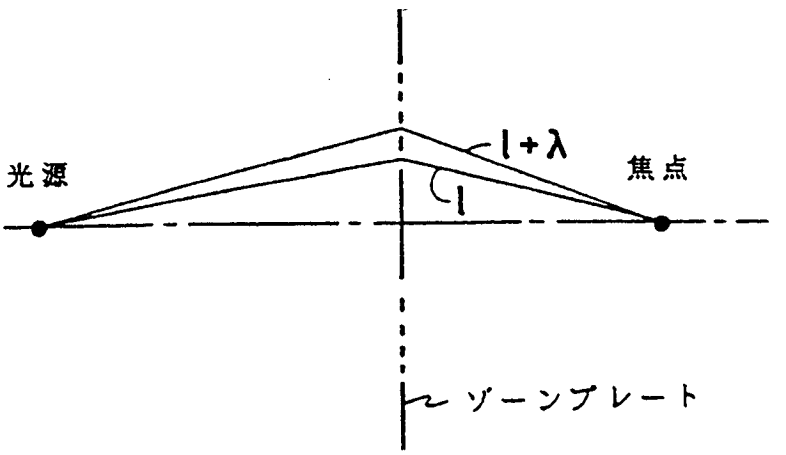


図4.18 ゾーンプレートのＸ線集光原理

Ｘ線の領域では、可視光領域で用いるような媒質（空気）と物質（ガラス等）の屈折率差を利用したレンズの作製が困難であるが、回折現象を利用すればＸ線を集光させることが可能である。それがＺＰであり[35~36]、その集光原理を図4.18に示す。

光源から放出されたＸ線はＺＰを通過後焦点に集光される。ここで、焦点から見て同位相の部分だけＸ線が通過するようにパターンを作製してある。すなわち、隣り合う隙間を通る際の光路にはλの差がつけられており、この部分を透過したＸ線は回折後に互いに強め合い、焦点の部分が最大強度を持つＸ線強度分布が得られる。ＺＰのパターンは図4.19のように、外側に行くにつれて幅が狭くなっている。積層型ＺＰのように中心に半径r_0の芯線がある場合、n番目の境界の半径（r_n）と焦点距離（f）、Ｘ線の波長（λ）の関係は

$$r_n = \left(r_0^2 + nf\lambda\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (4.1)$$

で表わせる。

ＺＰは入射光に対して透明、不透明の同心円の輪帯を交互に繰り返した板であり、回折によりＸ線を集光する。黒い層はＸ線遮断層を、白い層はＸ線透過層を表す。

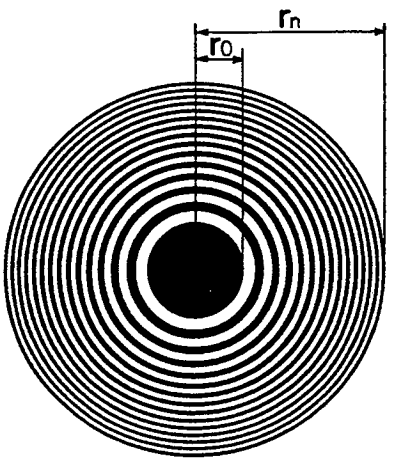


図4.19　ゾーンプレートパターンの模式図

4.3.3.2　ゾーンプレートの作製

多層薄膜作成技術を利用したＺＰは図4.20に示されるように、「成膜」、「切断」、「研磨による薄片化」、「ＥＥＭ研磨」の手順で作製した。成膜した細線状素子は低融点合金中に埋め込んで固定し、切断した[37]。

成膜はＤＣスパッタ法で作製した。装置の構成を図4.21に示し、外観を図4.22に示す。

基板には金ワイヤー（50μmφ,15rpmで回転）を使用し46～50層（23～25対）成膜した。成膜速度はＣについては4Å／ｓ、Ａｇについては10Å／ｓとした。Ａｒガス圧は0.67Ｐａとした。膜間の固相拡散を防ぐために基板加熱は行わなかった。各層膜厚は図4.19から、Ｘ線の波長(λ)を1.54Å、r_0＝25μm、r_n＝40μm、n＝50層で(4. 1)式から焦点距離(f)を123mmとした。膜厚は水晶式膜厚センサーにより制御した。膜厚は基板から数えて第１層目（Ｃ）が約0.40μm、最終層（Ａｇ）が約0.25μmで、その外側に強度を保持するためのオーバーコート層[37]（Ａｇ）を約3μm蒸着した。この試料を回転軸に対して垂直に切断し、両断面を機械的に研磨して、最終的にＥＥＭ加工を行った[38]。

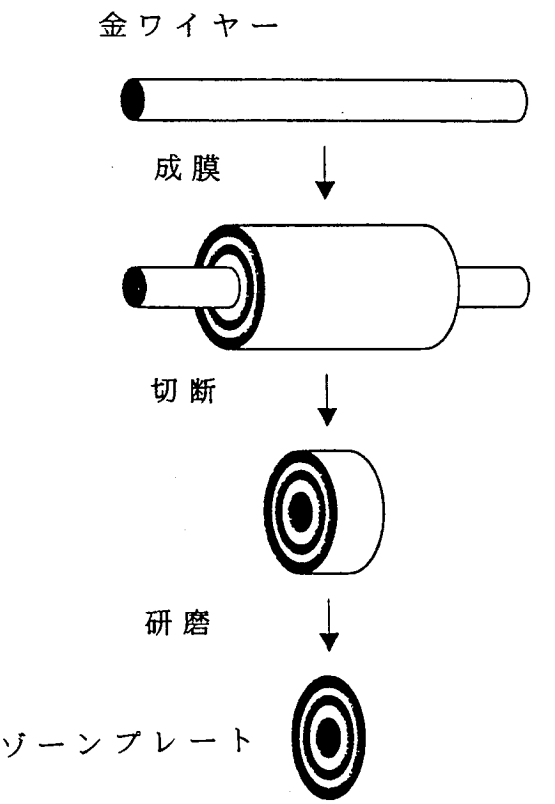


図4.20　積層型ゾーンプレートの作製過程

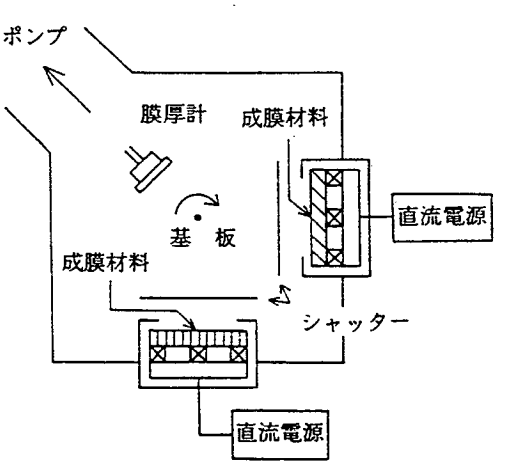


図4.21　ＤＣスパッタ装置の構成（上から見た図）

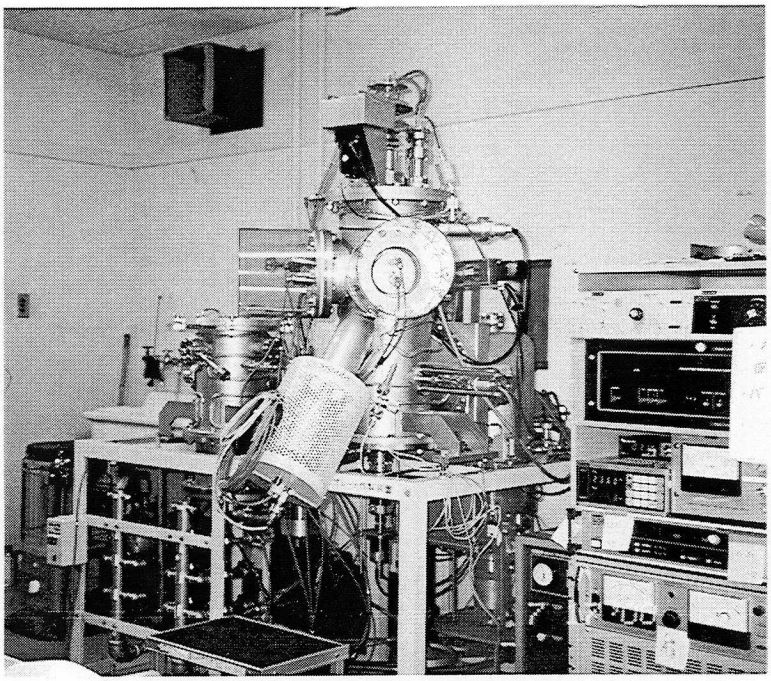
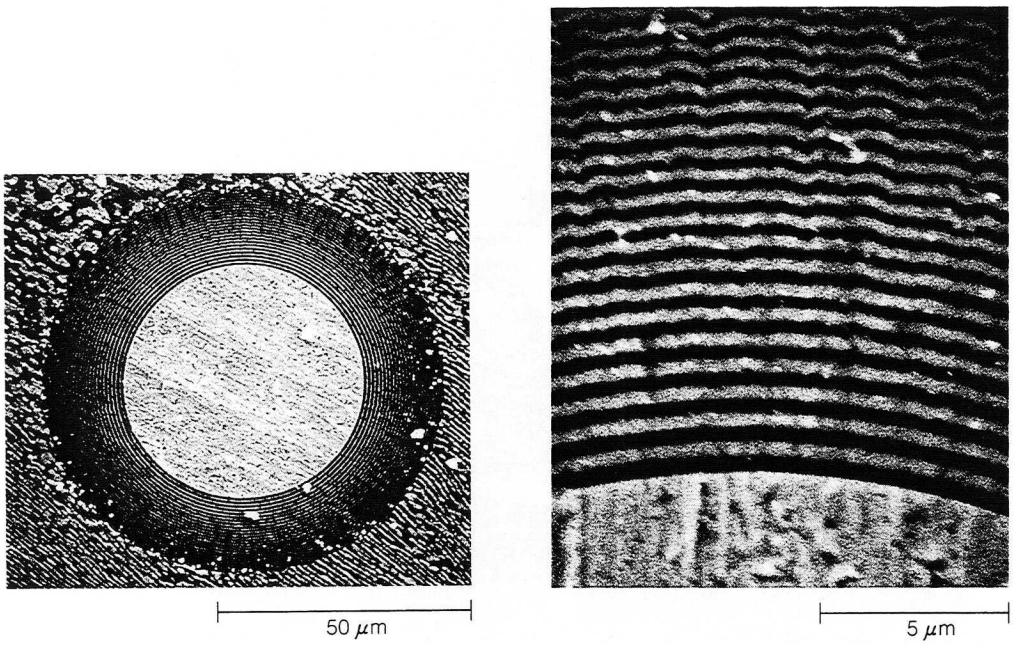


図4.22 ＤＣスパッタ装置

ＥＥＭ加工の加工条件は、粉末粒子SiO_2（粒子直径0.08μｍ）、液濃度0.3％、荷重100gf、工具回転数900rpm、工具直径58mm、液濃度20℃である。その時の加工特性は、加工量が送り速度の逆数に極めて正確に比例していた。また、この特性は時間的にも安定していた。

加工経路は図4.4（a）に示すＸ-Ｚ軸加工方式を用いた。まず、Ｃ軸を停止した状態で加工ヘッドに取り付けたポリウレタン球を加工開始点から＋Ｘ方向に順次△ｘ／step＝50μｍずつ送りを与え、さらにＺ方向に△ｚ／stroke＝50μｍの送りを与え、－Ｘ方向に順次△ｘ／step＝50μｍずつ送りを与える。この動作を順次繰り返して全面を加工した。

ＥＥＭ加工後、Ａｇ／Ｃ同心円多層膜のＳＥＭ像（全体像及び部分像）を図4.23に示す。明瞭な同心円のパターン像が得られた。同心円多層膜の中心を通る線上に沿った部分の形状精度をレーザー顕微鏡(オリンパス　OLS-1000)により測定した。図4.24に形状精度を表す。加工前形状精度は1.3μｍでＥＥＭ加工後、形状精度は0.3μｍであり、形状精度は向上した。ただ、形状精度0.3μｍはＥＥＭ加工法にとっては少し劣る形状精度であるが、これはＡｇとＣが交互に積層した板であるのが原因である。しかし、ＡｇとＣの表面は平行平滑に研磨されており、この同心円多層膜はＸ線顕微鏡の集光素子として十分活用できる。従って、ＥＥＭ加工法はＺＰの精密研磨にも適用できる。



（ａ）全体像　　（ｂ）部分像

図4.23　Ａｇ／Ｃ同心円多層膜（50層）のＳＥＭ像
黒層：Ｃ　白層：Ａｇ

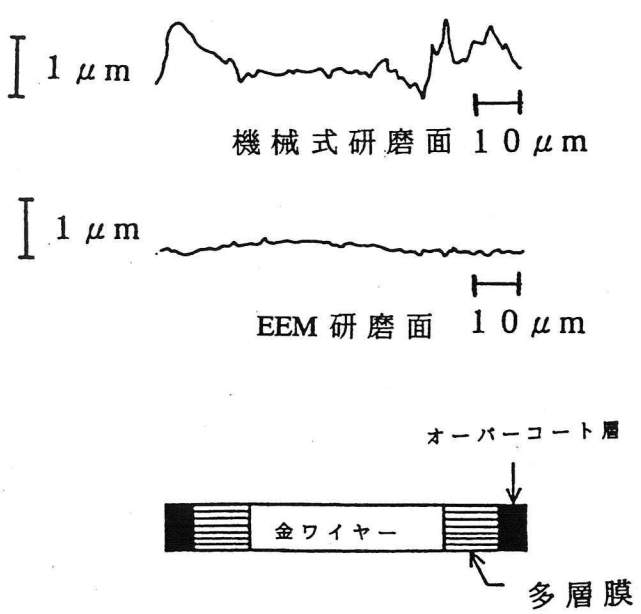


図　4.24　Ａｇ／Ｃ同心円多層膜（50層）ゾーンプレートの形状精度

4.3.3.3 ゾーンプレートの評価

図4.23のＡｇ／Ｃ同心円多層膜（50層）のＳＥＭ像を見ると基板側から数えて１０層目あたりまでは平滑な多層膜が得られているが、そこを境にして界面が乱れ始め、外周部へ向かうほど乱れが増幅されている。従って、界面の乱れを極力抑制することが積層型ＺＰの高性能化には必要不可欠である。

膜の界面の乱れの原因としては以下のことが考えられる。

①基板に微小な欠陥（凹凸）があり、その形状が１０層目あたりから増幅される。

②成膜中に付着した不純物が核となり、そこから層構造が急激に乱れる[39]。

③スパッタ膜に固有の柱状構造[40]が膜表面の平滑性を乱す。

④膜の応力の存在[41]、すなわち、多層膜の平滑性を乱すことによって応力の緩和がなされる。

ＺＰの性能は多層膜の作製技術の改善によってさらに向上するものと考えられる。特に膜の応力と柱状構造が影響していると考えられ、これらの影響を抑制するためには、成膜条件について検討する必要がある。

Ａｇ／Ｃ同心円多層膜（50層、最外層膜厚0.25μｍ）の集光効果の評価は、高エネルギー物理学研究所BL-8C実験ステーションで行った（課題番号：93G273）。図4.25に放射光施設における評価装置の概略図を示す。

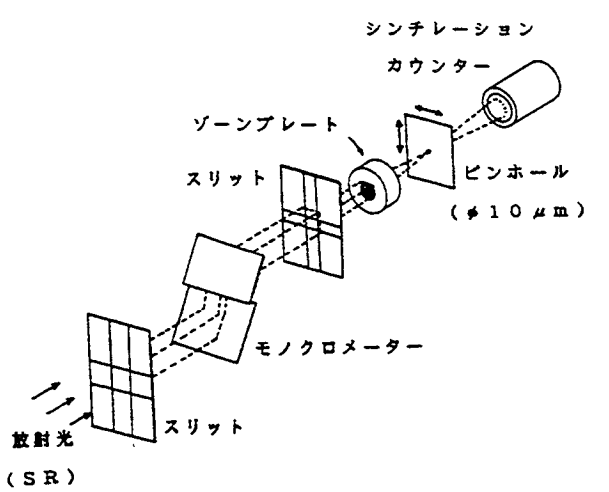


図4.25　評価装置の構成

8KeVのＸ線をモノクロメーターで分光しＺＰに照射した。ＺＰの後方には、透過したＸ線による回折のパターンができる。その測定には、ピンホール（直径10

μm）を透過したX線の強度をシンチレーションカウンターで計測し、ピンホールを2軸方向に移動させることによってX線強度分布を得た。その結果、図4.26に示すようにFWHM(Full Width Half-Maximum)値でφ1.5μm[42]である。

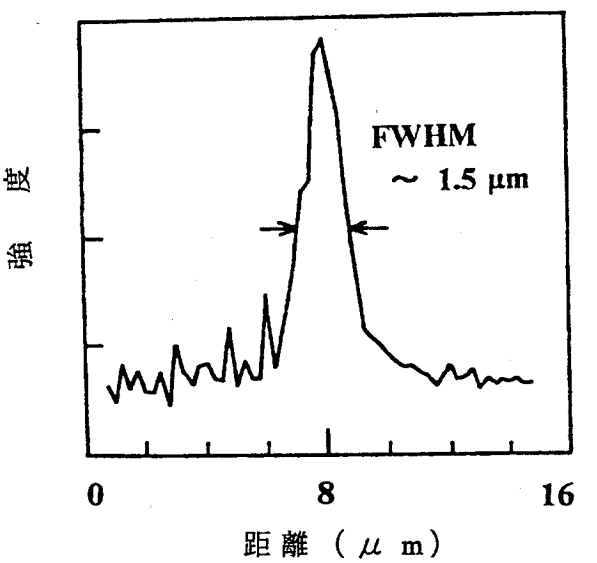


図4.26　X線の強度分布

また、ZPの性能を評価するために集光効率を測定した。集光効率は透過層と遮断層に入射する全X線に対して直径10μmのピンホールに集光されたX線の割合として求めた。その結果、集光効率6%のX線マイクロビームが得られた[42]。この集光素子はX線顕微鏡を構築する上で必要不可欠な部品になる。

4.3.4　CVD－SiCミラーの非球面加工

X線領域で使用されるミラーの用途は、放射光（SOR）の入射光学系、X線顕微鏡・宇宙望遠鏡の結像光学系、LSI用縮小投影リソグラフィの光学素子など様々であり、その使用条件により、形状・要求精度が異なる。X線に対する物質の屈折率はほぼ1に近く、透過力が極めて強い反面、通常の条件では反射も屈折もしない。このため、X線を集光・結像させるためにはこれまで反射光学ミラーに対して、様々の工夫が成されてきた。

X線ミラーは大きく分けて以下の2種類に分類される。

①斜入射全反射ミラー；これは物質の屈折率がX線領域において、わずかに1より小さいことを利用し、全反射条件のもとでミラーを用いようとするものであ

る。放射光の入射光学系（照明系）、Ｘ線顕微鏡や宇宙望遠鏡の結像光学系などに広い波長域で使われる。軸外の非球面が主体である。

②直入射多層膜ミラー；これは、わずかに屈折率の異なる２物質を交互に積み重ね、直入射方向における反射率を大きくとれる様に工夫されたもので、軟Ｘ線領域で実用化されつつある。縮小投影リソグラフィ用の光学素子として注目されており、平面、球面、軸対称非球面がある。

表4.4は、Ｘ線光学系に用いられる光学素子の特徴と精度を設計例からまとめたものである[43]。

表4.4　Ｘ線光学系の光学素子の特徴[43]

光学系の種類	口径 (mm)	非球面量 (μm)	非球面形状	素子の品質	
Ｘ線顕微鏡	φ5～φ36 ×～90	–	軸対称 双曲面＋楕円面	f a α 解像力	：±2μ ：0.15μm ：2.2×10^{-6}rad ：4μm
Ｘ線望遠鏡	φ420×φ410 ×1,000～835	–	楕円面＋双曲面 放物面 円錐面	f a α r	：±1μm ：0.04～0.2μm ：2.5×10^{-6}rad ：0.4nm
SOR用ミラー	φ40～φ1,000 ×30～300	–	非軸対称 シリンドリカル トロイダル	f a	：曲率半径×0.01％ ：0.16μm
Ｘ線 リソグラフィ	φ25～φ250	～10	軸対称 楕円面	f a r	：0.03～0.3μm ：1nm ：0.2nm

f（figure）……形状の各点の測定値から最小二乗近似で求めた誤差近似非球面と設計非球面の差
a（accuracy）……各点と誤差近似非球面との差
α（smoothness）……各点の誤差近似非球面に対する傾きの誤差

Ｘ線反射光学素子には、

（１）光学性能の劣化が生じない非球面・自由曲面（任意曲面）形状

（２）加工表面の凹凸が小さく形状精度が高いこと

（３）１ｍサイズの大口径化

（４）加工変質層のないこと

等が要求されており、加工変質層の生じないＥＥＭの研磨法が有効と思われる。

材料として、熱伝導率（Ｋ）と線膨張係数（α）によるＫ／α指数が大きくかつＫ値も大きいことが必要であり、大きなＫ／α指数、Ｋ値を示すＳｉＣが多用されている。Ｘ線用ミラー材料として使われているＳｉＣは、基材に焼結ＳｉＣなどを用い、基板表面に数百μｍ程度の厚さに化学蒸着（Chemical Vapor Deposition）させたＣＶＤ－ＳｉＣである。形状精度、表面粗さは斜入射光学系では、表面うねりによるスロープエラーがあると反射光の拡散や結像面上での像のぼけが生じるので、放射光用の偏向・集光ミラーでは、スロープエラー１秒以下が望ましい。

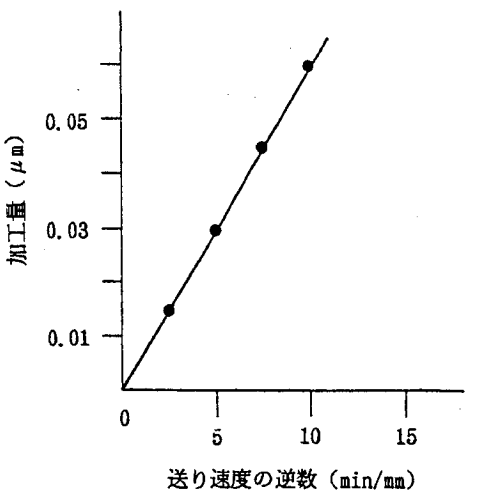


図4.27　加工量と送り速度の関係

表4.5　加工条件

加工物	CVD-SiC
粉末粒子	SiO_2 0.08μm
液濃度	1.0%
荷重	100gf
工具回転数	900rpm
工具直径	58mm
液濃度	20℃

現在の最も一般的な加工法は、研削加工により外形を粗成形し、形状を精密に計測した後、形状の調整と表面粗さの低減のための研磨加工を行う工程が採用されている。

形状精度、表面粗さの向上を図るために、ＥＥＭ加工法を用いて、ＣＶＤ－ＳｉＣ材料の非球面加工を行った。

加工は（1）研削による基材の形状加工（2）ＣＶＤ－ＳｉＣ層の化学蒸着（3）研削による表面の形状加工（4）ＥＥＭを用いた形状創成加工を行った。

図4.27に試作装置を用いて得られたＣＶＤ－ＳｉＣ材料のの加工特性を示しその時の加工条件を表4.5に示す。

得られた加工特性から加工量が送り速度の逆数に極めて正確に比例していることが分かる。また、加工特性も安定していた。この加工特性を用いて各点ごとの加工量に応じてポリウレタン球の送り速度を制御しながら、加工対象全域を走査することにより自由曲面の高精度な加工が可能となる。実際の加工は、図4.6に示す加工手順に従って行われる。まず加工特性データを計算機に入力し、前加工面の形状を装置本体に取り付けた形状測定器で測定しそれを計算機に入力する。これと目標形状との差を各点での加工量とし、これに相当する送り速度を計算し、そ

れを数値制御し、目標形状を得ることができる。

今回、実験した非球面加工は、軸対称のため、加工経路として、図4.4（b）のX-C軸加工を採用した。まず、ポリウレタン球を加工開始点に持って行き、回転ホルダーの回転軸（C軸）を等速度回転させながら、円周上を1回転させる。X＝500μmを一定送り量移動させて、次の円周上を1回転させる。この動作を順次繰り返して全面を走査した。

目的の非球面の形状は、X線反射鏡に用いられるトロイダルの非軸対称形状を創成することであるが、今回は、4.3.1節で述べた合成石英ガラス材料の非球面形状と同じである。前加工面は平面である。目的とした非球面の理想断面形状は図4.9に示してある。

X-C軸加工法で加工した非球面の形状誤差を図4.28に示す。触針式（フォームタリサーフ）により測定した形状精度は、±0.035μm以内の精度で加工されている。この測定結果は、スキャン走査を10回行い、その平均値を一次元で表した断面形状を示す。

測定物を非接触で、かつ傷をつけることなく高速で表面粗さ0.1nm以下の表面粗さの測定できる三次元微小表面形状測定機（WYKO位相干渉計）で測定した表面粗さは、図4.29に示すようにRMS値で0.16nm、P-V値で0.87nm[44]である。

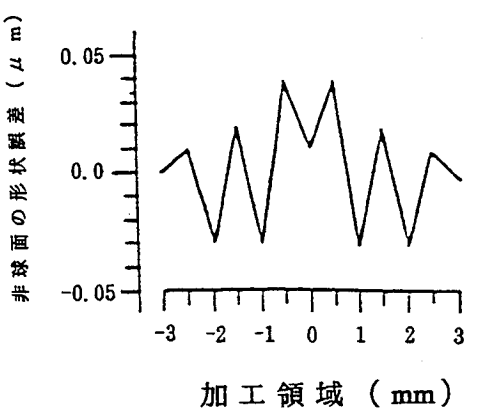


図4.28　非球面の形状誤差

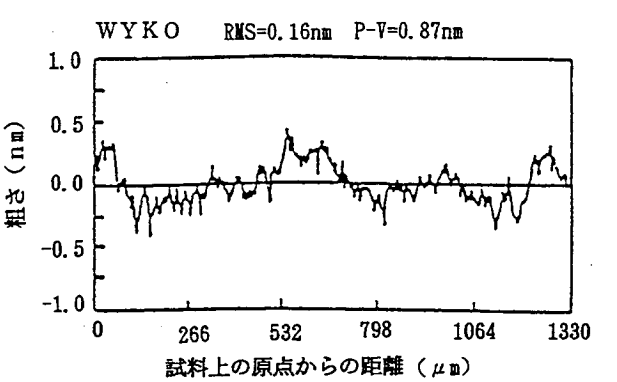


図4.29　表面粗さ測定値

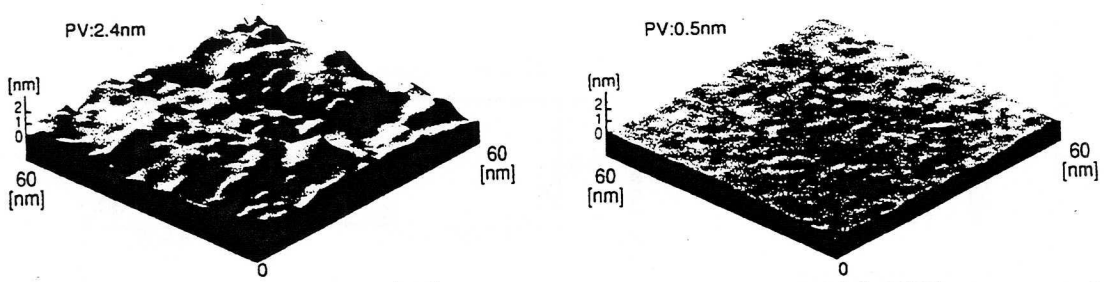
本実験の結果より、形状精度、表面粗さとも極めて精度の高い非球面形状創成が可能であることが実証できたものと言える。

4.3.5 Ｓｉ基板の平滑加工

ＥＥＭの応用加工として、赤外域レーザミラーの基板研磨がある。赤外域レーザミラーは、その使用される環境および条件、レーザ出力や動作条件によって基板材料の最適化が必要になる。レーザミラー基板材料は、Ｓｉ，Ｃｕ，Ｗ，Ｍｏ等が使われている。

基板は、どんな方法で研磨しても基板材料と研磨の不完全さのために微視的なクラック、スクラッチなどが残存している。このような基板面上に誘電体多層膜をコートして部分反射ミラーを製作した場合、これらの表面欠陥部分では局所的に電界強度が増強されるため、ミラーのレーザ耐力は低下する。ミラー基板の表面粗さがミラーのレーザ耐力に影響を与える理由は次のようになる。すなわち、基板の表面粗さが大きくなると、コーティング膜の表面粗さも大きくなる。このため膜厚の均質性が悪くなり、膜厚が設計値よりずれてくる。すると、膜厚の設計値からのずれに応じ、ミラーを構成する膜内の電界強度が大きくなることから、ミラーのレーザ耐力が低下するのである[45]。

ＥＥＭを用いてＳｉ基板の研磨を行った結果、図4.30に示す通り原子的に平坦な表面が得られた。



(a)超LSI用のSiウエハ表面　　(b) EEM加工面

図4.30　超LSI用のSi(001)ウエハ表面およびEEM加工面の
STM(Scanning Tunneling Microscopy)観察像の比較

4.4 今後の課題

加工精度の高精度化、高能率化について考えてみると、最近開発された高精度、

高効率の加工としてプラズマを用いたプラズマＣＶＭ（Chemical Vaporization Machining）[46]では表面粗さR_{max}0.01μmの性能をすでに得ており、研磨などの仕上げ加工を省略できる用途も多いことを示唆している。さらに、原子単位の精度での仕上げ加工を要求される場合は、プラズマＣＶＭによる高精度、高効率の加工とＥＥＭによる原子オーダーの加工とを連携、結合させることにより、効果的な加工プロセスを実現できるものと期待される。

４．５　結言

非球面レンズ製作のため、球面あるいは平面を精度良く前加工しておき、残るわずかな非球面量だけを加工する考え方を採用し、より高精度な非球面加工を目指し、ＥＥＭ加工法を用いて、以下の特徴をもつ光学素子表面創成装置を試作した。

本装置の特徴は

（1）加工物をインプロセスで形状測定できるように高精度な万能表面形状測定器（小坂研究所　触針型測定機　3E-3C型）を加工機本体に取り付けた。

（2）光学系に数多く用いられる軸対称の球面、非球面加工に適したＸ-Ｃ軸加工方式を採用し、これを具現化した。

本加工システムによって、種々の光学素子を対象とした加工を行い、次の結果を得た。

（1）コンパクトディスク用非球面コリメーターレンズに用いられる非球面形状加工を行った結果、形状精度は±0.015μm以内の精度で加工でき、表面粗さはRMS値で0.26nmで行えることを実証した。

（2）空間光変調素子の解像度を向上させる有効な方法は薄いＢＳＯ結晶板を用いることである。本加工システムによって、ＢＳＯ結晶の極薄平面形状加工を行った結果、9.9nm以内の精度で形状加工が行えることを実証した。

（3）Ａｇ／Ｃ同心円多層膜（50層、最外層膜厚0.25μm）のＥＥＭ加工を行い、明瞭な同心円のパターン像が得られた。また、形状精度をレーザー顕微鏡(オリンパス　OLS-1000)により測定した結果、形状精度は向上した。ＡｇとＣの表面は平行平滑に研磨されており、この同心円多層膜はＸ線顕微鏡の集光素子として十分活用できることが判った。

多層膜の集光効果の評価は、高エネルギー物理学研究所BL-8C実験ステーションで行い、FWHM(Full Width Half-Maximum)値でϕ1.5μmであった。また、ＺＰの集光効率は6％で効率のよいＸ線マイクロビームが得られた。

(4) ＣＶＤ－ＳｉＣ（Ｘ線光学素子）のＥＥＭ加工を行い、形状精度は、±0.035μｍ以内の精度で加工でき、表面粗さはRMS値で0.16nm、P-V値で0.87nmであった。この結果、極めて精度の高い非球面形状創成が可能であることが実証できた。

(5) ＥＥＭ加工を用いて赤外域レーザ用多層膜ミラーの基板材料としてＳｉ単結晶の研磨を行い、原子的に平坦な表面が得られた。

第５章　総括

オプトエレクトロニクスの発展に伴い、ビデオカメラ・ＣＤプレーヤなどの家電製品やレーザビームプリンタ・複写機に代表されるような各種ＯＡ機器などにおいて、多くの光学部品が使用されるようになってきた。しかも、その光学部品の非球面化が急速に進んでいる。光学系に組み込まれた光学部品を、従来の球面レンズに換えて非球面化するということは、光学設計からみた場合、レンズ枚数を減少できることを意味する。すなわち、１）光学系が軽量、コンパクトになる２）光学系の組み付け調整が容易になるなどのメリットが生じることになる。また、非球面レンズを用いると、像の歪みを小さくするという光学性能面のメリットも生じるため、結果として最終製品の性能を飛躍的に向上させることができる。そこで、本研究は、非球面の製作技術を確立し、その応用の拡大を図るために、非球面創成に関する問題点を解決することを目的とするものである。

第２章においては、京都大学理学部大宇陀観測所のシュミットカメラ光学系の製作について述べている。

光学系は補正板（非球面形状、直径400mm）、主鏡（直径700mm、焦点距離1200mm、F／3で視野角7°）である。もっとも製作が困難な補正板を研磨するために面積法（shaped pitch-lap method）を採用し、400mmの補正板を研磨した。この補正板の測定は触針式の形状測定器で行った。すなわち、数値制御非球面研磨機の水平軸の真直度を精度よく測定し、これを補正値として、数値制御非球面研磨機の水平軸に取り付けられた触針式の形状測定器の値を補正することにより形状測定を行うシステムを開発した。このシステムの測定精度はrmsで±0.2μmである。これでは、光学面の測定精度としては不十分なので、最終的には星像によるハルトマンテストにより形状誤差を求め、補正板を修正し、望遠鏡としての光学性能が満足すべきものであることを確かめた。

この京都大学理学部大宇陀観測所のシュミットカメラ望遠鏡は、恒星や銀河の観測を目的として作られたものである。現在も各種の観測に利用され、宇宙の成

り立ちを探るために貢献している。

第３章においては、数値制御非球面研磨機の開発について述べている。第２章で述べた面積法は、経験や名人芸を要する研磨法である。非球面の利用を拡げるには、熟練やノウ・ハウを可能な限り排除した製作法の確立が不可欠であるとの観点から、数値制御非球面研磨機の開発を行った。最初に試作したものは研削を主体としたもので、ダイヤモンド・ターニング法と同じくツールの先端の位置の超精密制御を狙ったものであったが、位置制御精度を実現することができなかった。

そこで、第２段階としてR.A.Jonesが提唱したスモール・ツール研磨法を適用し好結果が得られたので、非球面創成方式を研削から研磨に転換した。

最初にR.A.Jonesの３軸双子型スモール・ツール法を用いた数値制御非球面研磨機を試作し、コンボリューション・モデルを使って研磨実験および研磨過程のコンピュータシミュレーションを行った。

まず、コンボリューション演算が一次元で済む簡単なモデルに対応する実験を行い、平面加工の場合は形状精度0.2μm、凹球面加工の形状精度は0.5μm以内で加工できた。

しかし、単一加工痕形状の広がりが大きいため、大面積の加工には適しているが、一般に良く用いられる直径20～100mmの大きさの非球面加工に対応するため、単一加工痕形状の広がりが直径20mm程度になるような２軸偏心量可変型スモール・ツール法を用いた数値制御非球面研磨機を試作した。研磨領域は直径19.5mmの円型である。

この実験を基にし、二次元の曲面創成のためのコンピュータシミュレーションを行った。実際には、口径100mmのシュミット補正板を対象として創成シミュレーションを行い、加工径路として円形径路をいくつか想定し滞留時間を適宜変更して研磨を実行した結果、最終研磨面の形状精度は0.2μm以内で加工できることが判った。

開発した２軸偏心量可変型スモール・ツールを用いて、非球面加工を行った。まず、加工の進め方のパターンを明らかにするとともに、具体的には放物面鏡の研磨加工を行った。その結果、形状精度0.2μm以下の最終面が得られた。特に、この２軸偏心量可変型スモール・ツール法を用いた数値制御非球面研磨機は、研磨加工用のソフト・ウェアを独自に開発し、非球面研磨実験によってこの方式の有用性を確かめた。

この技術は我が国の宇宙開発にも応用され、資源探査用観測システムの高性能光学センサの創成技術として貢献した。

第４章においては、精密光学素子の多くが、応用製品の高付加価値化に伴って、年々より高い形状精度と表面粗さが要求されて来ている。これに応えるため、加工単位を原子単位に近づけしかも物性的にも優れた表面の創成を可能にする加工法としてＥＥＭ（Elastic Emission Machining）を用いた光学素子表面創成装置を試作した。

この装置の加工の方法は、球面あるいは平面を精度良く前加工しておき、残るわずかな非球面量だけを加工する考え方を採用し、より高精度な非球面加工を目指し、ＥＥＭ加工法を用いて、以下の特徴をもつ光学素子表面創成装置を試作した。

本装置の特徴は

（1）加工物をインプロセスで形状測定できるように高精度な万能表面形状測定器（小坂研究所　触針型測定機　3E-3C型）を加工機本体に取り付けた。

（2）光学系に数多く用いられる軸対称の球面、非球面加工に適したＸ-Ｃ軸加工方式を採用し、これを具現化した。

本加工システムによって、種々の光学素子を対象とした加工を行い、次の結果を得た。

（1）コンパクトディスク用非球面コリメーターレンズに用いられる非球面形状加工を行った結果、形状精度は±0.015μm以内の精度で加工でき、表面粗さはRMS値で0.26nmで行えることを実証した。

（2）空間光変調素子の解像度を向上させる有効な方法は薄いＢＳＯ結晶板を用いることである。本加工システムによって、ＢＳＯ結晶の極薄平面形状加工を行った結果、9.9nm以内の精度で形状加工が行えることを実証した。

（3）Ａｇ／Ｃ同心円多層膜（50層、最外層膜厚0.25μm）のＥＥＭ加工を行い、明瞭な同心円のパターン像が得られた。また、形状精度をレーザー顕微鏡(オリンパス　OLS-1000)により測定した結果、形状精度は向上した。ＡｇとＣの表面は平行平滑に研磨されており、この同心円多層膜はＸ線顕微鏡の集光素子として十分活用できることが判った。

多層膜の集光効果の評価は、高エネルギー物理学研究所BL-8C実験ステーションで行い、FWHM(Full Width Half-Maximum)値でφ1.5μmであった。また、ＺＰの集光効率は6％で効率のよいＸ線マイクロビームが得られた。

（4）ＣＶＤ－ＳｉＣ（Ｘ線光学素子）のＥＥＭ加工を行い、形状精度は、±0.035μm以内の精度で加工でき、表面粗さはRMS値で0.16nm、P-V値で0.87nmであった。この結果、極めて精度の高い非球面形状創成が可能であることが実証できた。

(5) ＥＥＭ加工を用いて赤外域レーザ用多層膜ミラーの基板材料としてＳｉ単結晶の研磨を行い、原子的に平坦な表面が得られた。

参考文献

1) R.A.Jones; Optimization of Computer Controlled Polishing, Appl.Opt., 16(1977)218.

2) 今川文彦、辻村民之；シュミット望遠鏡、京都大学理学部宇宙物理学教室技術報告、1(1977)1.

3) 高瀬文志郎；シュミット望遠鏡による観測、天文月報、63(1970)226.

4) 大谷和男、川井誠一、山崎恭弘、牧野善衛；光学研磨面の形状測定、大工試季報、23(1972)1.

5) M.N.Golovanona,S.S.Kachkin,Ye.I.Krylova,L.S.Tsesnek and L.I.Shevel, kova ; Soviet J.Opt.Tech.,35(1968)254.

6) 牧野善衛、川井誠一、山崎恭弘、大谷和男；非球面光学系の研磨方法、大工試季報、22(1971)299.

7) 大谷和男、川井誠一、山崎恭弘、牧野善衛；400mmシュミット補正板の研磨、大工試季報、26(1975)176.

8) 今川文彦、辻村民之；40/70/1200cmシュミット望遠鏡、京都大学理学部宇宙物理学教室技術報告、1(1976)1.

9) F.Imagawa and S.Kawai ; The 40/70/120cm Schmidt Camera, Mem.Fac.Sci. Kyoto Univ,Ser.A.,35(1977)185.

10) A.Cox and M.A.Rayton; The Manufacuture of Precision Aspheric Surface, Proc.Conf.Opt.Instr.and Tech.,(1961)330.

11) T.Nakano; Optical Instruments and Techniques(1969),ed.J.H.Dickson (Oriel Press,New Castle,1970),p302.

12) R.Aspden; Computer Assisted Optical Surfacting, Appl.Opt.,11(1972) 2739.

13) 山崎恭弘、川井誠一；非球面研磨とＮＣ装置、光学、6(1977)237.

14) 春本功、渡部国男；非球面レンズの製造技術、機械の研究、28(1976)1071.

15) 谷田部善雄；非球面レンズの加工、光学技術コンタクト、15(1977)2.

16) 中田邦夫；研削だけで非球面ガラスレンズ量産、日経メカニカル、1.28 (1985)104.

17) 木辺成麿；非球面の製作、光学技術コンタクト、8(1970)6.

18) 川井誠一、大谷和男；スモール・ツールによる研磨過程のコンピュータ・シミュレーション、光学、10(1981)270.

19) 山崎恭弘、川井誠一、大谷和男、牧野善衛；非球面研磨用スモール・ツールの開発、大工試季報、33(1982)345.
20) R.A.Jones；Final Figuring of a Lightweighted Beryllium Mirror, SPIE, 65(1975)48.
21) 牧野善衛、川井誠一；非球面凹面鏡のロンキー・ゼロテスト法について、大工試季報、26(1975)184.
22) 森勇蔵；Elastic Emission Machiningとその表面、精密機械、46(1980)5.
23) 大谷和男、奥山博信、森勇蔵、松岡克典、山崎恭弘；EEMによる非球面レンズの加工、精密工学会誌、57(1991)85.
24) 大谷和男；Elastic Emission Machiningによる石英の非球面加工、真空、40(1977)583.
25) K.Ohtani H.Okuyama K.Matsuoka Y.Yamasaki and Y.Mori; Plane Fabrication of BSO Single Crystal Plate by EEM, Bull.Japan Soc.of Prec. Eng.,24(1990)225.
26) 大谷和男；EEMによる応用の実際、機械と工具、37(1993)100.
27) 大谷和男；表面粗さ1.6Åの超平滑な炭化ケイ素表面創成技術開発、ニューセラミックス誌、10(1997)7.
28) 菅哲生、本多利正；非球面レンズの超精密加工、機械技術、35(1987)62.
29) T.Minemoto H.Yoshimura Y.Suemoto and S.Fujita; Incoherent-to-Coherent Optical Image Converter of Transmission Type Using $Bi_{12}SiO_{20}$ Single Crystals, Jpn.J.Appl.Phys.,18(1979)1727.
30) R.A.Sprague; Effect of bulk carriers on PROM sensitivity, J.Appl. Phys.,46(1975)1673.
31) 峯本工；ＢＳＯ単結晶の特性とその応用、オプトロニクス、4(1985)55.
32) D.Sayer,M.Howells,J.Kirz and H.Rarback; X-ray Microscopy Ⅱ, (Springer-Verlag,New York,1987)
33) AG.Michette,G.R.Morrison and C.J.Buckley; X-ray Microscopy Ⅲ, (Springer-Verlag,Berlin,1992)
34) 青木貞雄；軟Ｘ線顕微鏡、光技術コンタクト、31(1993)734.
35) A.G.Michette; Optical Systems for Soft X-Rays,(Plenum Press,New York, 1986),p165.
36) 有留宏明、難波進；Ｘ線顕微鏡、0 plus E、88(1987)81.
37) 田村繁治，大谷和男，上條長生；積層型ゾーンプレートの作製に関する考察、真空、36(1993)292.

38) 大谷和男、田村繁治、藤田和宏、上條長生；積層型ゾーンプレートのEEM超精密研磨、第42回応用物理学関係連合講演会、(1995)

39) R.M.Bionta,E.Ables,K.J.Cook,O.D.Edwards,P.C.Gabriere,A.F.Jankowski, D.M.Makowiecki,L.L.Ott and N.Thomas; Sputtered-sliced Multilayers: Zone Plates and Transmission Greatings for 8KeV X Rays.,Proc.SPIE, 984(1988)247.

40) J.A.Thornton; Influence of Apparatus Geometry and Deposition Conditions on the Structure and Topography of Thick Sputtered Coatings, J.Vac.Sci.Technol.,11(1974)666.

41) R.M.Bionta,E.Ables,O.Clamp,O.D.Edwards,P.C.Gabriere,K.Miller,L.L. Ott,K.M.Skulina,R.Tilley and T.Viada; Tabletop X-Ray Microscope Using 8KeV Zone Plates, Opt.Eng.,29(1990)576.

42) N.Kamijo,Y.Suzuki,S.Tamura,K.Handa,A.Takeuchi,S.Yamamoto,M.Ando,K. Osumi and H.Kihara; Fabrication of Hard X-Ray Sputtered Sliced Fresnel Phase Zone Plate, Rev.Sci.Instrum.,68(1997)14.

43) 山本碩徳；超精密ポリシング、X線ミラーの超精密加工、日本学術振興会合同研究会資料、(1991)14.

44) K.Ohtani S.Tamura N.Kamijo and H.Okuyama; Fabrication of SiC Aspherical Mirror by EEM, Int.J.JSPE.,30(1996)235.

45) 吉田國雄；次世代の超精密加工技術（上巻）(産業技術サービスセンター、日本工業技術振興協会、1993)p96.

46) 森勇蔵；プラズマを用いた化学的気化加工法、（ＣＶＭ）による超精密加工技術、新技術事業団技術説明会資料、(1990).

謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始ご指導、ご助言を賜りました大阪大学森勇藏教授、片岡俊彦教授に深甚の謝意を表します。また、本研究の遂行ならびに本論文をまとめるにあたり、有益なご教示を賜わりました大阪大学山内和人助教授、遠藤勝義助教授に厚く感謝します。また、本論文をまとめるにあたっては、その内容についてご検討いただき、懇篤なるご校閲ならびに適切なるご教示を賜わりました、大阪工業技術研究所光機能材料部長奥山博信博士および和歌山県工業技術センター所長竹中啓恭博士に心から感謝の意を表します。また、数値制御EEM加工装置の開発にあたっては、株式会社光洋精工の協力があったことを記し、謝意を表します。　特に、本論文作成にあたっては、大阪工業技術研究所光機能材料部情報光学研究室長松岡克典博士を始めとする、同研究室の諸氏のご協力いただいたことを記し、感謝致します。また、ゾーンプレートの作製・実験等に、ご協力いただいた大阪工業技術研究所材料物理部田村繁治博士に感謝致します。