The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	屈折率分布型平凸単レンズに関する研究
Author(s)	西, 壽巳
Citation	大阪大学, 1990, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2113
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

屈折率分布型平凸単レンズに関する研究

平成元年７月

西　　壽　　巳

内 容 梗 概

本論文は、著者が日本板硝子㈱中央研究所において行なった”屈折率分布型平凸単レンズに関する研究”をまとめたものであり、6章から構成されている。以下、各章ごとにその内容の概要を述べる。

第1章　緒　　論

本章では、光ディスクとくにコンパクトディスクシステムにおけるマイクロレンズの重要性と要求される光学性能について概説する。次に、著者が研究を行なった屈折率分布型平凸単レンズと、従来の組合せレンズ、ガラス非球面レンズ、プラスチック非球面レンズ、グレーティングレンズとの比較を行い、本研究の目的と意義を明かにする。

第2章　コンパクトディスク用屈折率分布型対物単レンズの設計

本章では、設計に先立ち本研究で開発した屈折率分布型媒質を取り扱えるレンズ設計プログラム"GILDS"の概要を述べる。第2章、第3章では、この"GILDS"を用いて設計、解析を行なう。次に、屈折率分布型媒質として屈折率が半径方向に漸次減少するいわゆる”セルフォック”タイプの媒質を用いたコンパクトディスク用対物単レンズの設計について述べる。3種類のレンズ形状について球面収差とコマ収差を同時に補正出来るかどうかを考察し、コマ収差を補正するには少なくとも1面の球面が必要であることを明かにする。そして、3種類のレンズ形状を比較し、第1面を球面、第2面を平面とした平凸形状の設計が最も優れていることを明らかにする。

第3章　波面収差にもとづく公差解析

本章では、第2章で採用した第1面を球面とする平凸単レンズの波面収差を計算し収差成分の分解を行なう。これによりコンパクトディスク用対物レンズとして要求仕様を満足することを確認した。つぎに波面収差にもとづいて屈折率分布やレンズ形状の公差計算を行い、試作にあたって必要となる屈折率分布の測定精度と許容される製作誤差を数値化した。さらに、レンズ研磨時に発生する偏心公差についても計算し、研磨後レンズを傾けて金枠に装着することにより面の偏心公差が大きくとれることを見いだした。

第４章　半径方向屈折率分布の測定法

回折限界系レンズの開発には高精度の屈折率分布測定装置が不可欠である。本章では、屈折率分布を高精度かつ迅速に求める新しい方法の提案とその説明を行う。まず、屈折率分布型媒質の中心軸上の屈折率を全反射法により求める新しい測定法の測定原理と測定精度について述べる。次は、レーザビームを複数本屈折率分布型ガラスロッドに入射しその出射ビーム位置から球面収差を算定し、その球面収差から屈折率分布の２次以上の項を光線追跡して逆算する新しい屈折率分布係数の測定法 ”光線追跡法” について述べる。さらに、半導体レーザと He-Neレーザの２波長で測定可能なコンピュータ制御された屈折率分布係数自動測定装置について述べる。

第５章　コンパクトディスク用屈折率分布型平凸単レンズの試作

本章では、イオン交換法により作製した屈折率分布型ガラス媒質の屈折率分布係数を第４章で述べた自動測定装置で測定し、第２章で述べたレンズ設計プログラム"GILDS"を用いて最終レンズ形状を決定する過程を述べる。次に、新しく考案した光軸を出した球面研磨法を用いて球面を創成する方法を述べる。そして、試作レンズの光学性能測定として、フィゾウ型干渉計による波面収差測定、顕微鏡による集光スポットの点像測定を行い、コンパクトディスクシステム用の対物レンズとして十分使用出来る性能を有することを確認する。最後に市販のコンパクトディスクプレーヤに搭載し問題なく音楽が再生されるのを実証する。

第６章　結　論

本研究で得られた成果を総括する。

屈折率分布型平凸単レンズに関する研究

目　次

第１章　緒　　論 …… 1

1.1　研究の背景 …… 1

1.2　従来のレンズと本論文で取り扱うレンズとの比較 …… 1

1.3　屈折率分布型レンズ …… 2

1.4　従来の研究と本論文との関係 …… 4

1.5　本論文の構成 …… 5

第２章　コンパクトディスク用屈折率分布型対物単レンズの設計[18-21] …… 7

2.1　緒　言 …… 7

2.2　レンズ設計プログラムの作成 …… 7

2.3　設計仕様 …… 13

2.4　両面を平面とした単レンズの設計 …… 17

2.5　第１面を球面とした平凸単レンズの設計 …… 21

2.6　第２面を球面とした平凸単レンズの設計 …… 26

2.7　基本形状決定 …… 29

2.8　結　言 …… 30

第３章　波面収差にもとづく公差解析[18,20,21] …… 31

3.1　緒　言 …… 31

3.2　波面収差の計算 …… 31

3.3　形状の公差解析 …… 36

3.4　屈折率分布の公差解析 …… 38

3.5　偏心の公差解析 …… 40

3.6　結　言 …… 44

第４章　半径方向屈折率分布の測定法[28-30,32,33] …… 45

4.1　緒　言 …… 45

4.2　全反射法により軸上の屈折率を求める測定法 …… 45

4.3　光線追跡法により球面収差を求める測定法 …… 49

4.4　球面収差測定精度と屈折率分布係数g, h_4～h_8の計算 …… 52

4.5　コンピュータ制御による自動屈折率分布係数測定装置 …… 55

4.6　結　言 …… 58

第５章　コンパクトディスク用屈折率分布型
平凸単レンズの試作[18,20,21,34,35,37,38] …… 59

5.1　緒　言 …… 59

5.2　レンズ形状の決定 …… 59

5.3　球面と媒質との光軸を出した球面研磨法 …… 61

5.4　波面収差測定 …… 64

5.5　集光特性測定 …… 68

5.6　コンパクトディスクシステムへの実装テスト …… 69

5.7　結　言 …… 72

第６章　結　論 …… 73

謝　辞 …… 75

参考文献 …… 76

著者関連文献 …… 80

第1章 緒　論

1.1 研究の背景

近年、エレクトロニクスの情報記録再生の分野においては、古くからある磁気記録に対して、光を情報の書き込みないし読み出し手段に利用した光ディスクシステム[1)]が提案され一部実用化されている。読みだし専用の光ディスクシステムの代表例として”コンパクトディスクシステム”[2)]（Compact Disk System 略して CD と呼ばれる）がある。このシステムは、光ビームにより非接触で音声信号を読みだす新しい方式であり、従来の機械式触針法にとって代わるものである。PCM 技術を用いたディジタル記録の採用によりディスクに記録された信号の記録密度は非常に高く、トラック間隔は1.6μmの幅しかない。この微小なトラックに記録された信号を光学的に読みだすには、光ビームを1μm程度のスポット径に絞って用いなくてはならない。光源として用いられる半導体レーザの放射光を高効率かつ微小に絞るためには、高い開口数(NA:Numerical Aperture)と諸収差を補正した回折限界系の対物レンズが必要不可欠である。さらに、ディスクの振れに対して応答性よく追従させるためには、小型軽量であることが要求される。民生用の装置であるため低コストであることも重要である。

顕微鏡対物レンズなみの光学性能を満たさねばならないため、初期の段階では通常の均質ガラス媒質と球面を用いた2群3枚構成のレンズ[3)]が実用化されていた。顕微鏡対物レンズに比べてかなり小型軽量化がはかられてはいるが、最低3枚のレンズを使うため軽量化や小型化、レンズ組立調心コストの低減に限界があり、さらに小型軽量かつ低コストの対物レンズが強く望まれていた。

3枚のレンズを1枚にした単レンズが実用化できれば、小型軽量化の要求を満せレンズ間の調整工程も減るため低コスト化も期待できる。単レンズ化するには、(1)非球面レンズ、(2)屈折率分布型レンズ、(3)グレーティングレンズという3とおりのアプローチがある。

1.2 従来のレンズと本論文で取り扱うレンズとの比較

均質非球面レンズは従来の機械式研磨法で量産出来ないため、高温で軟化させたガラスないしプラスチックを金属性の金型を用いて成形するモールド法で製作される。材質がプラスチックの場合[4,5)]には量産時に最も安価なコストが期待できるが、プラスチック固有の耐環境性に問題があり、使用温度の制限や吸湿による変形からくる光学性能の劣化とい

ったところに問題を残している。そこで、材質をガラス[6,7]にすれば耐環境性能は飛躍的に改善されるが、金形精度の安定性や寿命に問題があり、量産化や低コスト化が困難なため試作されてはいるが実用化されてはいなかった。一方、グレーティングレンズ[8]は従来より盛んに研究されていたが、開口数を仕様どおりの大きさにしたり回折効率を通常の屈折型レンズなみにするには困難なところがあり実用化されてはいない。

屈折率分布型レンズは、その屈折率分布を化学的プロセスで大量かつ安定的に同一のものが形成できれば、あとは通常の球平面を合計2面だけ従来の研磨方法で機械研磨すればよく、ガラスに非球面をモールド法で成形するよりも低コストでプラスチックより格段に耐環境性の優れたレンズが実現できる可能性がある。表1.1では発表された順に、小型、軽量、耐環境性、低コストの観点から個々のレンズの特徴を比較した。この表から、本研究で扱う屈折率分布型ガラス平凸単レンズが最も小型軽量で耐環境性に優れ、比較的低コストであることがわかる。

1.3 屈折率分布型レンズ

屈折率分布型レンズは、その名のとおり屈折率が規則的に変化する媒質を用いたレンズである。最大の特徴は、（屈折率分布型媒質＋球面）という組合せによって（均質媒質＋非球面）と同じ効果を出せるところ[9,10]にある。この種のレンズが古くから提案されているのは非球面の量産研磨が大変困難であったからである。屈折率分布型媒質は屈折率の変化する方向で分けて3種類に類別できる。

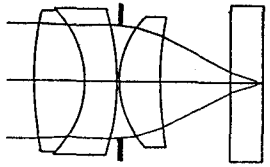
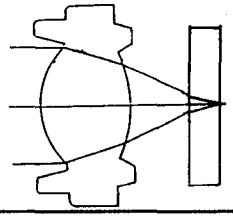
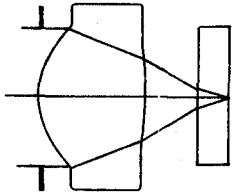
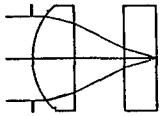
(1)　半径方向屈折率分布型媒質[11]、

(2)　軸方向屈折率分布型媒質[12]、

(3)　球状屈折率分布型媒質[13]、

の3つである。(1) 半径方向屈折率分布型媒質は、セシウム、リチウム、そしてタリウム等の1価の金属イオンを含む多成分系ガラスを硝酸カリウムなどの高温の溶融塩でイオン交換して屈折率分布をつける方法が、日本板硝子㈱により実用化[11]されている。半径方向屈折率分布型媒質は媒質自体がレンズ作用を持つという他の屈折率分布型媒質に無い特長を持ち、量産品としての実績[14]もあるためCD用単レンズの素材として有望なものであった。(2)(3)の分布形状を持つ媒質は筆者が研究を始めた当初はまだ実用化されていなかった。よって本論文では(1)の半径方向屈折率分布型ガラスを使用した。

表1.1　各種コンパクトディスク用対物レンズの比較

レンズ名称 （研究機関） 参考文献	レンズ形状	材質 面構成（面）	長所	欠点
①ガラス球面３枚組レンズ （オリンパス光学工業㈱） 3)		均質ガラス 球面（６）	従来技術で生産できる 硝材を選べる	重い(0.44g)、大きい 組み立てのコストが高い 大量生産に向かない
②プラスチック非球面単レンズ （ KONICA ） 4,5)		均質樹脂 非球面（２）	小型、軽量(0.12g) 組み立て不用 最も低コスト レンズマウント不用 大量生産向き	耐環境性能が悪い 高価な金形が必要 小量生産ではコスト高になる
③ガラス非球面単レンズ （ HOYA ） 6)		均質ガラス 非球面（２）	小型 組み立て不用 耐環境性能が良好 硝材を選べる	低コスト化が困難 高価な金形が必要
④屈折率分布型ガラス単レンズ （　日本板硝子㈱　） 18-21) 本研究で扱うレンズ		不均質ガラス 球面（１） 平面（１）	小型,最軽量(0.05g),薄型(1.4mm) 耐環境性能が良好 金形不用で中小量生産時でも安価 従来の機械研磨法で生産できる ガラスレンズでは最も低コスト	プラスチック非球面レンズ よりコストが高い 硝材が選べない

半径方向屈折率分布型媒質でCD用対物レンズを開発するには以下の項目が明確にならなければならない。

(1) 球面収差とコマ収差を同時に補正出来るレンズ形状の解析。

(2) 製造時の許容誤差つまり公差の詳細な計算。

(3) 屈折率分布の精密な制御技術の開発。

(4) 屈折率分布の精密な測定法の開発。

(5) 屈折率分布型ロッドの軸と球面の球心がずれないレンズ研磨方法の開発。

1.4 従来の研究と本論文との関係

前節で挙げた項目毎に従来の研究をまとめると以下のとおりになる。

(1) 球面収差とコマ収差を同時に補正出来るレンズ形状の解析には、レンズ設計プログラムが必要不可欠である。通常のカメラレンズをはじめとする複雑なレンズやコンパクトディスク用対物レンズのような回折限界系のレンズでは、汎用の自動設計プログラムが用いられる。屈折率分布型媒質を取り扱えるレンズ設計ソフトは、米国ＯＲＡ社の Code-V[15] が有名である。しかし、この種の市販ソフトはソースコードが公開されていないため、機能が不十分な場合はユーザで拡張を行なうことが出来ない。本研究を始めるにあたっては、屈折率分布型媒質を取り扱えるレンズ設計プログラム"GILDS"の開発を行なった。

屈折率分布型媒質を用いたCD用対物レンズの設計は過去にもいくつか報告されている。しかし、球面収差しか補正されておらずコマ収差の補正がなされていなかったり[16]、球面を２面必要とし屈折率差が大きすぎて現状のイオン交換法で実現困難な設計になっていたり[17]と実現可能な設計は過去に存在しなかった。

第２章では、球面を１面だけ導入することにより球面収差とコマ収差が同時に補正出来ることをレンズ設計ソフトウエアの解析から見いだした。[18-21] 現存のガラス媒質を使用し、第１面を球面とする直径4mm の平凸形状が最適であり従来のどのレンズより小型軽量の設計になっている。

(2)製造時の許容誤差つまり公差はレンズが安定に生産できるかどうかを判断するのに最も重要な項目である。菊池による設計[16]では公差の計算を実施しているが、回折限界系のレンズであるにもかかわらず波動光学的な評価である波面収差を用いて公差を出していないため、公差で決まる限界値が物理的にどういう意味を持つか不明確であった。また、他の設計例では公差についての計算が行なわれていない。

第３章では、射出瞳上の波面収差の自乗平均値を評価関数として用いて、厳密に公差を求めた。各公差は現状のレベルで十分満たせることを明らかにした。

(3)屈折率分布の精密な制御技術は本レンズの開発には重要な項目である。しかし、この内容については著者が行なった研究の範囲外のため本論文では言及しない。

(4)屈折率分布の精密測定技術の開発は(3)屈折率分布の精密制御を行なう上で必要不可欠な項目である。半径方向に屈折率が変化するセルフォック型媒質の屈折率分布測定法は各種の方法が提案されている。代表的な測定法として横方向微分干渉法[22]がある。非破壊測定に特長があるが、測定時間が長いのと屈折率差の大きい媒質の測定精度が良くないのが欠点である。他に、断面の反射率を測定して屈折率を求める方法[23]や、光軸方向にレーザビームを入射しその出射角から屈折率を求める方法[24]、波面収差から求める方法[25]、歪曲像から求める方法[26]等が提案されている。測定時間は短いが測定精度がよくない点に問題があった。

第４章で提案する”全反射法”[27]と”光線追跡法”[28-32]という新しい測定法は第３章の公差計算から要求される測定精度を十分満たしている。　”光線追跡法”の自動測定装置[33]は１０分間以内で測定が可能になった。

(5)CD用対物レンズが試作されたという報告は無い。従来の研究は、球面収差が多少減少しただけであったり[34]、球面収差は十分補正されたがコマ収差の補正ができていなくて作動距離が短かすぎる[35]などの不十分なものであった。仕様を満たしたレンズの試作例はかって無かった。試作において最も重要な項目は半径方向屈折率分布型ガラスの軸と球面の球心を一致させて球面を創成するところにある。これが達成されないとコマ収差を発生してしまう。従来、このような軸を出す研磨方法についての報告はない。

第５章では、球面創成時にレンズ媒質を同径の棒に貼り軸をだして研磨する方法[36]を考案した。この方式でレンズを試作したところ、設計値どおりの光学性能を有するCD用屈折率分布型対物単レンズ[18-21,37,38]が初めて実現できた。

1.5　本論文の構成

本論文の構成を図1.1に示す。第２章では、屈折率分布形媒質を取り扱えるレンズ設計プログラムを開発したのでその概要を述べる。次に、３種類のレンズについて球面収差とコマ収差を同時に補正出来るかどうかを解析し、第１面を球面とする平凸形状のものが最も優れていることを明かにする。第３章では、第２章で決定した形状のレンズについて、収

差や製造時の公差を波面収差に基づいて詳しく解析する。第4章では、屈折率分布係数の新しい測定法を提案しその原理や測定精度を述べる。そして、コンピュータ制御の自動化された測定装置の概要を述べる。第5章では、設計結果に基づいて試作したレンズの製作過程と、その性能測定結果について言及する。第6章では、本研究で得られた成果を総括する。

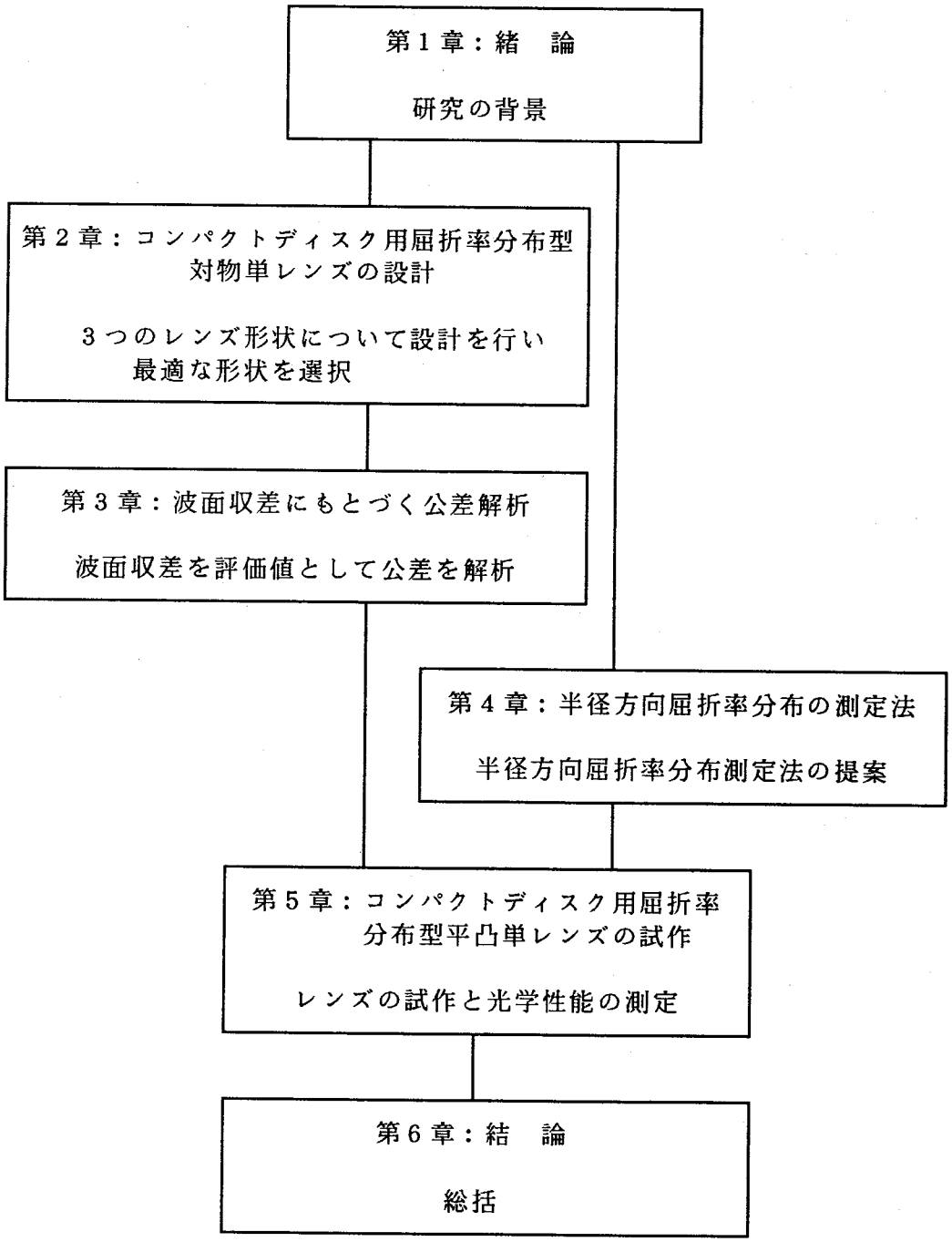


図1.1 本論文の構成

第2章 コンパクトディスク用屈折率分布型対物レンズの設計[18-21)]

2.1 緒 言

本章では、半径方向屈折率分布型媒質を用いて設計を行い、過去のどの設計よりも小型で軽量なCD用対物単レンズの形状を決定した。

2.2では本研究で開発した屈折率分布型媒質を取り扱えるレンズ設計プログラム"GILDS"の概要を、**2.3**ではコンパクトディスクシステム用対物レンズの仕様について述べ、必要とされるNAの根拠や補正すべき収差について言及する。1枚の半径方向屈折率分布型媒質を用いて設計を行なう場合、最大1枚の球面を導入すると3種類のレンズ形状が考えられる。**2.4**では両面を平面とする場合の設計例を述べ、**2.5**では第1面を球面とした設計例、**2.6**では第2面を球面とする設計例について述べる。**2.7**では第1面を球面とするものが優れていることを明かにし、この形状を最終形状とした理由を示す。

2.2 レンズ設計プログラムの作成

図2.1は本論文で扱うレンズ系の座標を説明する図である。像面(Image Plane)はx'-y'平面、子午面(Meridional Plane)をy-z平面、球欠面(Sagittal Plane)をx-z平面にとる。光軸は z軸方向、像高(Image Height)はy'軸上の高さY'であらわす。

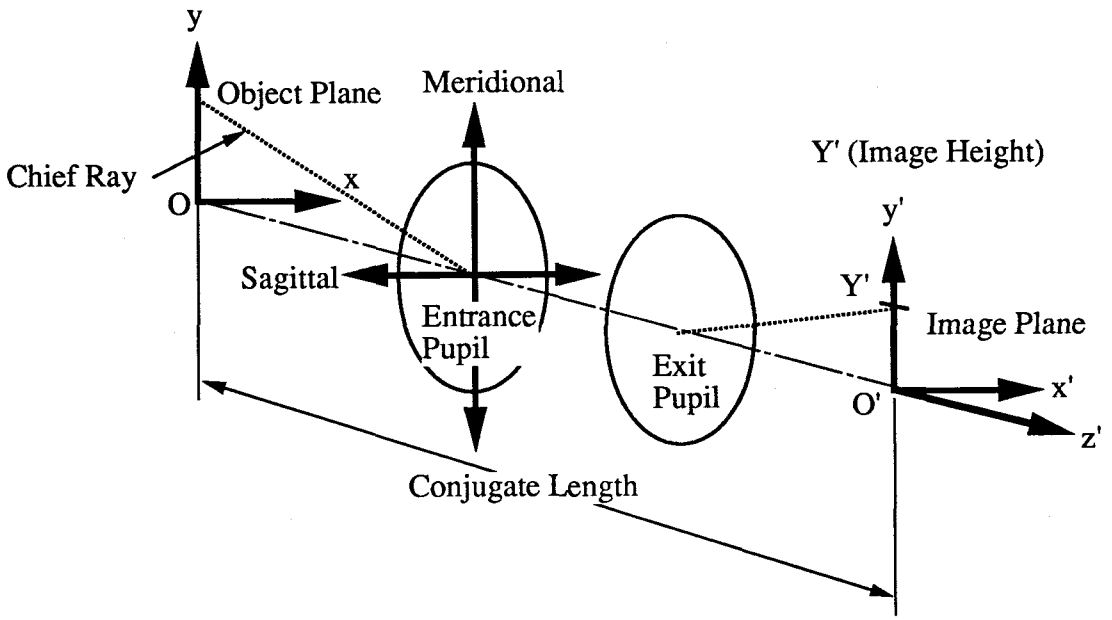


図2.1 本論文における座標系

本研究で開発したレンズ設計プログラムはミニコンピュータHP9000/520上で稼働し、使用言語はHP-BASICと呼ばれるコンパイラ型の構造化 BASIC言語で記述した。 そして GILDS (Gradient-index Interactive Lens Design Software)と名づけた。図 2.2に GILDSの持つ機能をブロックダイアグラムでしめす。主な仕様は以下のとおりである。

(1) 最大20面までの共軸レンズ系の設計が可能。

(2) 微分可能な関数で表現できる任意の屈折率分布型媒質を取り扱える。

(3) 1変数の簡易最適化機能をもつ。

(4) 波面収差の解析ができる。

(5) 会話形のプログラムである。

基本的には従来のレンズ設計プログラムと大きく変わるところはないが、屈折率分布型媒質の追跡サブルーチンは従来のものに無い部分である。

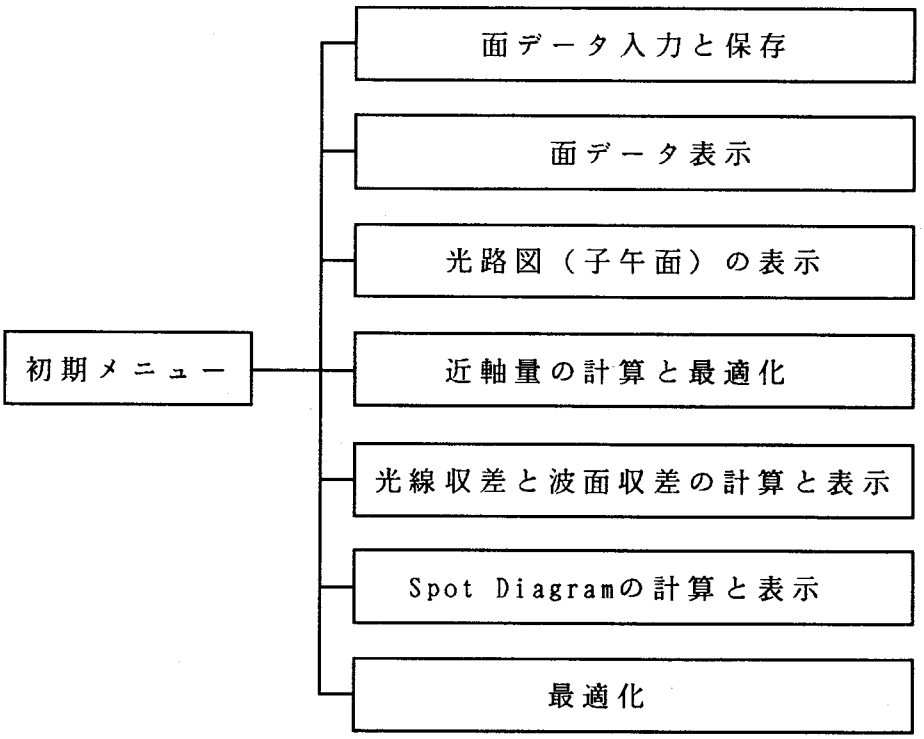


図2.2 GILDSの機能を示すブロックダイアグラム

屈折率分布型媒質中の面間転送部分は微分方程式(2.1)で表わされる光線方程式を数値的に解くことにより、光線位置と光路長が求まる。[39)]

$$d/ds[\ n(\mathbf{r})d\mathbf{r}/ds\ ] = \nabla n(\mathbf{r}) \tag{2.1}$$

ただし　$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$,　$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1$

式 (2.1)の $\mathbf{r}(x,y,z)$ は光線の位置ベクトルを表わし、$n(\mathbf{r})$は光線位置 $\mathbf{r}$での屈折率を表わす。 $\mathbf{i},\mathbf{j},\mathbf{k}$ は x,y,z 各方向の基本ベクトル、$\cos\alpha,\cos\beta,\cos\gamma$ は光線の方向余弦である。dsは光線に沿う線素である。これらの関係を図2.3 に示す。

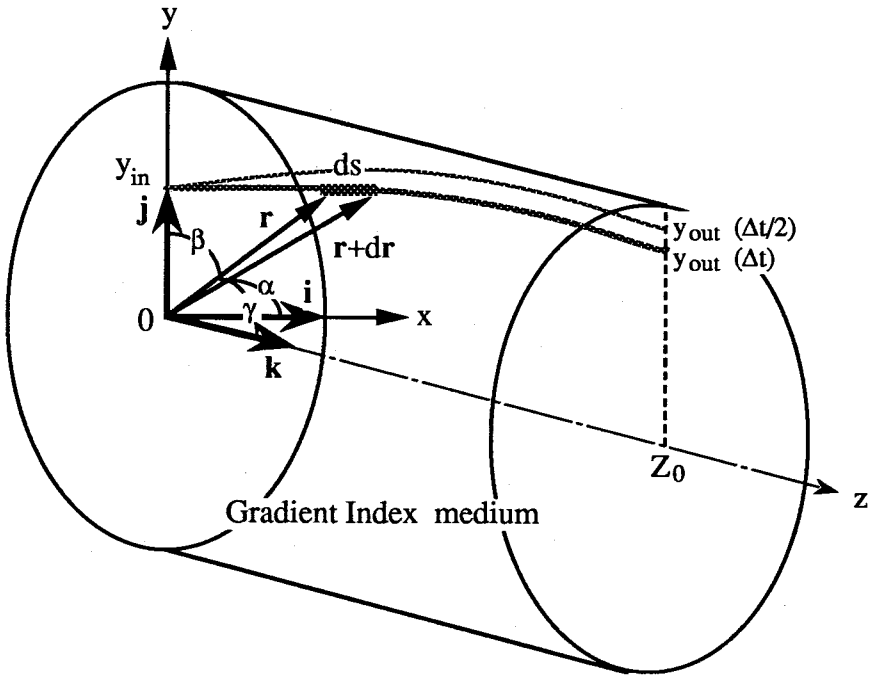


図2.3 屈折率分布型媒質中の光線座標

式(2.1)は

$$dt \equiv ds/n \tag{2.2}$$

なる変換を行なうと、

$$d^2\mathbf{r}/dt^2 = 1/2\cdot\nabla n^2(\mathbf{r}) \tag{2.3}$$

と書き直せる。次に、

$$\mathbf{T} \equiv d\mathbf{r}/dt \tag{2.4}$$

なる変換を行なうと、

$$d\mathbf{T}/dt = 1/2\cdot\nabla n^2(\mathbf{r}) \tag{2.5}$$

が得られる。ここで、**T**は式 (2.6)で表わすこともできる。

$$\mathbf{T} = \mathbf{i}\cdot n(\mathbf{r})\cdot\cos\alpha + \mathbf{j}\cdot n(\mathbf{r})\cdot\cos\beta + \mathbf{k}\cdot n(\mathbf{r})\cdot\cos\gamma \tag{2.6}$$

Tは屈折率に方向余弦を掛けたものになる。任意の光線位置 **r** は、式 (2.4)(2.5) で表わされる連立一階の常微分方程式を初期値 $\mathbf{r}_0$, $\mathbf{T}_0$ のもとに解くと求まる。

常微分方程式を数値的に解くのにルンゲクッタ法[40]を用いた。この方法は打ち切り誤差が分割値の５乗のオーダになるため、必要とされる精度の範囲で分割値が大きくとれ高速な追跡が可能になる。x, y, z 各方向について屈折率の偏微分が与えられれば任意の屈折率分布について追跡が可能である。追跡は一定長さの線素に沿って分割して行なわれる。分割ステップΔtは式(2.2)より

$$\Delta t = ds/n \tag{2.7}$$

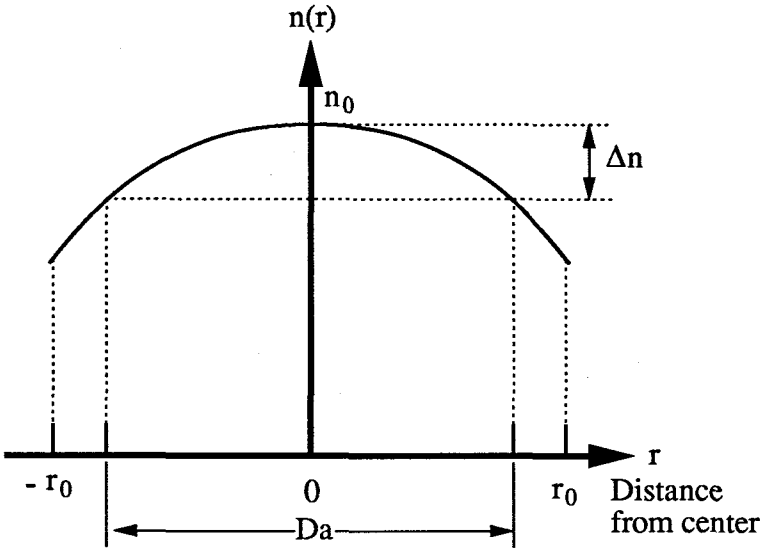
で与えられる。

本研究で扱う半径方向屈折率分布型媒質の屈折率分布 n(r)は、対称軸（Ｚ軸）と直角な半径方向をｒ（ $r^2=x^2+y^2$ ）とすると、次式で表わされる。

$$n^2(r) = n_0^2[1-(gr)^2+h_4(gr)^4+h_6(gr)^6+h_8(gr)^8 \cdots\cdot] \tag{2.8}$$

ただし、n_0 ： 対称軸上の屈折率

この屈折率分布形状を図2.4に表わした。



$$\Delta = \frac{\Delta n}{n_0} \times 100\ (\%)$$

図2.4 半径方向屈折率分布

図2.5 は、分割ステップΔ t を変化させて式(2.8)の半径方向屈折率分布型媒質中を光線追跡した時の追跡誤差を示す。なお、追跡誤差 Trace errorは図2.3において、あるΔ tで長さ Z_0追跡した後の y 座標 $y_{out}(\Delta t)$と、Δ t/2で追跡した後の y 座標 $y_{out}(\Delta t/2)$を用いて

$$\text{Trace error} = \left| \ y_{out}(\Delta t) - y_{out}(\Delta t/2) \ \right| \qquad (2.9)$$

と定義した。 Z_0=4.50mm, g = 0.300mm^{-1}, y_{in}=1.0mm, Δ t = 0.2mmという条件下での追跡誤差は10^{-6}mm程度となり、波長オーダの光路差が問題となる回折限界系のレンズの設計には十分な精度であることが確認できた。追跡精度と時間はトレードオフの関係が成立し、適当なところで妥協する必要がある。本研究においてはレンズ厚が数mm以下であるため分割ステップΔ t は 0.2mm とした。

光路長(OPL:Optical Path Length)は

$$OPL = \int n\,dS = \int n^2 dt \tag{2.10}$$

で与えられるため、屈折率を3次の項までテーラ展開したものを台形公式で積分して求めた。[41]

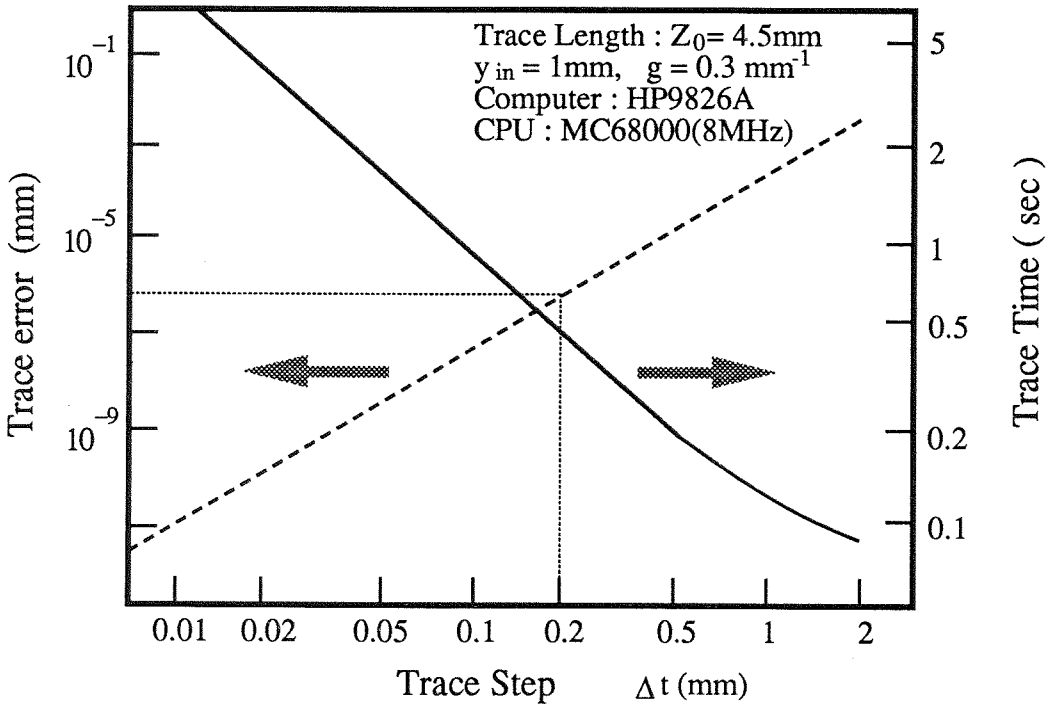


図2.5 光線追跡の精度と計算時間の一例

最適化は多変数関数の最適化を行なうことになり解析解が得られないのが通常であるため、評価関数を定義しその評価値(Merit Value)が最小値を持つよう減衰最小自乗法（DLS法）[42]で求めるのが一般的である。本研究においてはレンズ枚数が1枚と少ないことから簡単な一次逆補間法[43]を最適化の手法に用いた。この方法は、ある2点を通る直線で次の変数値を求める方法である。収束は遅いがプログラムが簡単になるため採用した。図2.6に示すように、初期値の選び方によりローカルミニマムに陥るため異なる解が得られる。図2.6で初期値Aでは解A'が得られ、初期値Bでは解B'が得られる。初期値は希望する形状からさほど大きくない値を用いなくてはいけない。本研究では試行錯誤的に初期値を決めた。

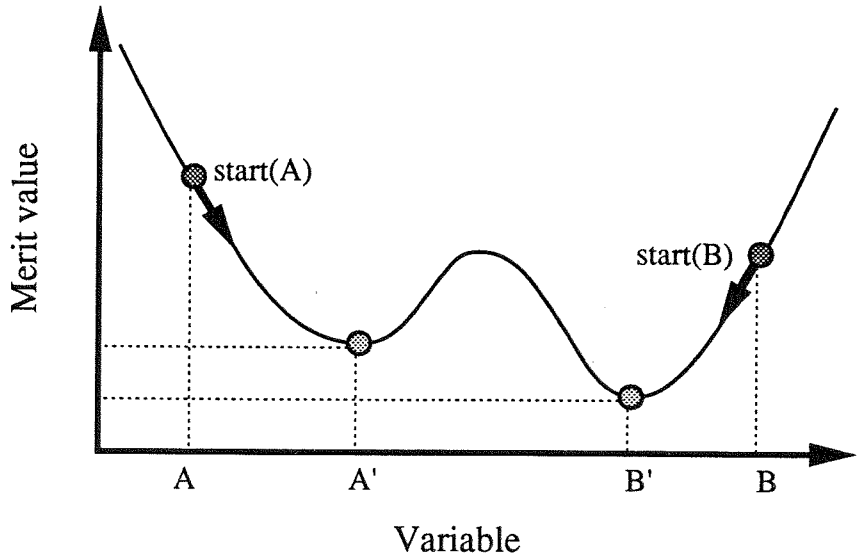


図2.6 評価関数とローカルミニマム

2.3 設計仕様

CD用対物レンズの仕様はいろいろなものがあるが、表2.1 は均質3枚組レンズ(OLMPUS AV4647-3)[3]の仕様である。この仕様を参考にして本章における設計仕様値を定めた。

表2.1　3枚組合せレンズ[3]の仕様

使用波長	: λ = 780 nm	開口数	: NA = 0.47
焦点距離	: f = 4.57mm	視野直径	: 0.15mm
物像間距離	: ∞	長さ x 直径	: 4.94 x 7.6 mm
作動距離	: WD = 2.0 mm	重量	: 0.44 g

【1】図2.7 において、作動距離(WD:Working Distance) はレンズ最終面とコンパクトディスクとのクリアランスのことである。WDは一定距離をとっておかないと、フォーカスサーボがはずれた場合にレンズとコンパクトディスクの接触を生じる危険性がある。規格ではコンパクトディスクの面ぶれは0.5mm 以内となっている。WDは1mm以上が必要である。

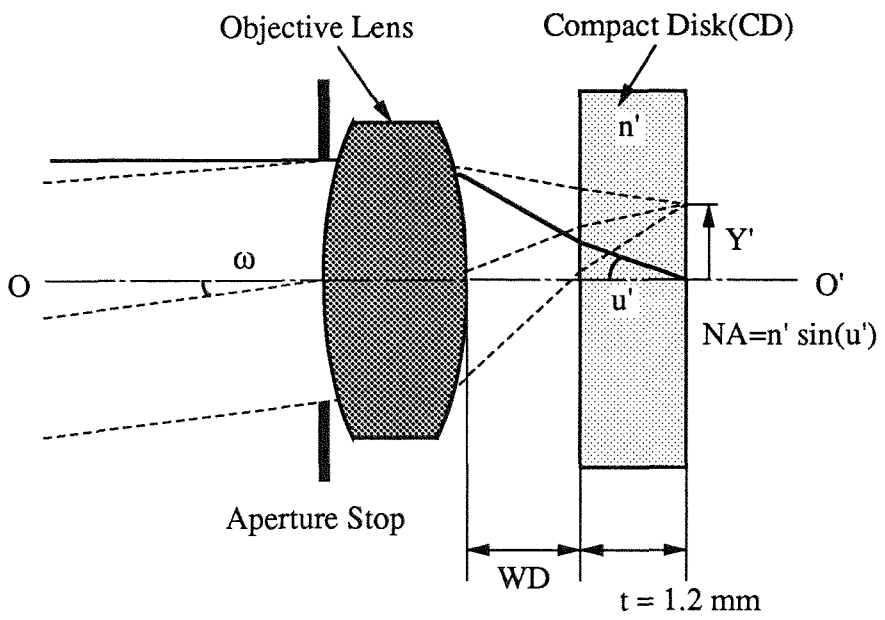


図2.7 対物レンズの諸寸法

【２】開口数（NA）は重要な項目である。コンパクトディスクのトラックピッチは1.6μm と微小なため、集光スポットはそれ以下に絞られている必要がある。図2.8 に示すように、波長λの一様強度の平面波がレンズに入射した場合の$1/e^2$ スポット直径Wは

$$W = 0.82\lambda/NA \tag{2.11}$$

で与えられる。[44] 開口数(NA:Numerical Aperture)の定義は

$$NA = n' \cdot \sin(u') \tag{2.12}$$

である。式(2.11)おける係数0.82は、エアリー像の中心からｒの位置における規格化強度分布が次式で与えられることから、$2eJ_1(R) = R$より $R = 0.82\pi$ が決まる。

$$I(R) = (2 \cdot J_1(R) / R)^2 \tag{2.13}$$

ただし　$R = (2\pi/\lambda) \cdot NA \cdot r$, $J_1(R)$は１次の第１種ベッセル関数

例えば、波長λ= 780nm、NA=0.45とすると、W=1.42μmのスポット直径が得られる。ただし、これは残存収差が零の場合である。CD用対物レンズではスポット径 Wのかわりに NAが仕様として指定されている。

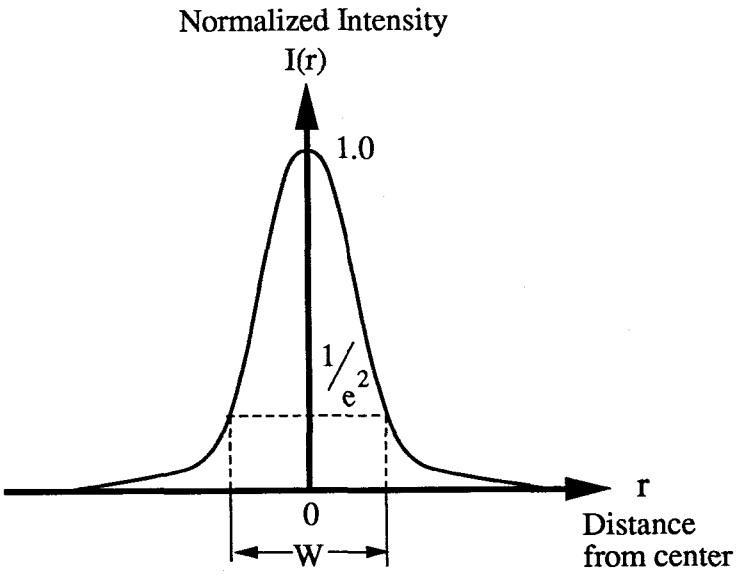


図2.8 集光スポット径の定義

【3】収差量は波面収差(OPD:Optical Path Difference)で表現され、その値は射出瞳上の自乗平均値(rms:root mean square)を用いる。

$$OPDrms < 0.07\lambda \tag{2.14}$$

が満たされれば、それは回折限界系のレンズと呼ばれる。OPDrms = 0.07λをMaréchal の Criterion[45]と呼んでいる。本論文においては OPDrms値をレンズの光学性能の評価値とする。波面収差については **3.2** で詳しく説明する。

【4】視野直径はレンズ設計上重要な項目である。コンパクトディスクシステムではトラッキング信号を得る一つの手段として、光軸上のメインスポットからわずかに離れた所にサブスポットを結んでいる。また、実装時にレンズが若干傾くことも避けられない。そのため、ある程度視野を確保する必要がある。視野直径はOPDrmsが0.07λ以内になる範囲によって定義される。図2.7では、f = 4.5mm の場合、視野 Y'=0.05mmは入射光がω= 0.64°

傾いて入射することになる。

【5】収差理論によると、Seidel収差は瞳の極座標を(ρ, θ)、入射主光線の光軸となす角をωとしたとき以下の式で与えられる。[46]

$$\text{球面収差}: \quad \phi = -(1/4)\cdot B\cdot \rho^4 \tag{2.15}$$

$$\text{コマ収差}: \quad \phi = F\cdot \omega\cdot \rho^3 \cos\theta \tag{2.16}$$

$$\text{非点収差}: \quad \phi = -C\cdot \omega^2 \rho^2 \cos^2\theta \tag{2.17}$$

なお、B,F,C は3次の収差係数である。ωが小さい場合、軸外入射時に最初に現われるコマ収差と、ωに無関係に現われる球面収差を同時に補正する必要がある。非点収差はωの2乗で作用するためωが小さい場合影響は少ない。補正する収差を増やすと、自由度が余分に必要となりレンズ枚数の増加を招く。従来の均質組合せレンズにおいても非点収差の補正は行なわれていない。[3] よって、本論文においては球面収差とコマ収差の2つを補正するレンズの設計を行なうこととした。なお、コンパクトディスクは直径12cm、内部記録面から表面までの厚さtは1.2mmで材質はポリカーボネイド(PC)が使用される。コンパクトディスクの内部で集光スポットを結ぶため、厚さt=1.2mm のPCもレンズ系を構成する1枚のレンズとして収差を考慮しなくてならない。

以上の考察と従来レンズとの一部互換性も含めて、本研究で設計するレンズの仕様を表2.2のとおりとした。

表2.2 本研究での設計仕様

使用波長	: λ = 780nm
物像間距離	: ∞
作動距離	: WD = 2.0mm以上
開口数	: NA = 0.45
視野直径[注]	: 0.1mm以上
補正収差	: 球面収差、コマ収差

[注] OPDrms < 0.07λで規定する

レンズ形状は、小型軽量化を目的の一つとするため１枚のレンズで構成することにした。球面収差とコマ収差の２つを補正するため、自由度は最低２つ必要となる。平面２面で構成されるレンズが最も簡単な構造であるが、自由度追加のため[9]１面のみ球面とした平凸レンズ形状も検討することとした。図2.9に３つの形状をしめす。次節ではこれらの形状のレンズの具体的な設計をおこなう。

なお、もう１面球面を追加して２面の球面をもつメニスカス形状や両凸形状も考えられる。この形状だと設計の自由度がさらに追加されるが、媒質軸に対して２つの球面の球心を出して面を創成するのが非常に困難であるのと、球面１面のみでコマ収差を補正する自由度が得られるためこの形状は検討対象からはずした。

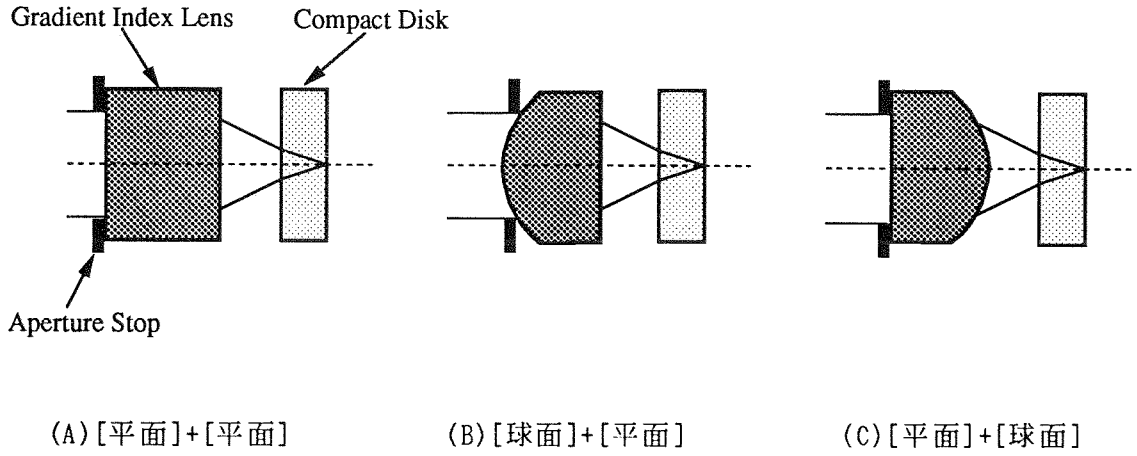


図2.9 本研究で検討する３種類のレンズ形状

2.4 両面を平面とした単レンズの設計

レンズの研磨はレンズコストを決定する大きな要因となる。一般的には、球面より平面の方が研磨コストが安い。図2.9(A) のように２面とも平面で対物レンズが設計できるのが望ましい。媒質には屈折率が式(2.8)で表わされる半径方向屈折率分布型媒質を用いる。レンズ設計手順を図2.10 に示す。

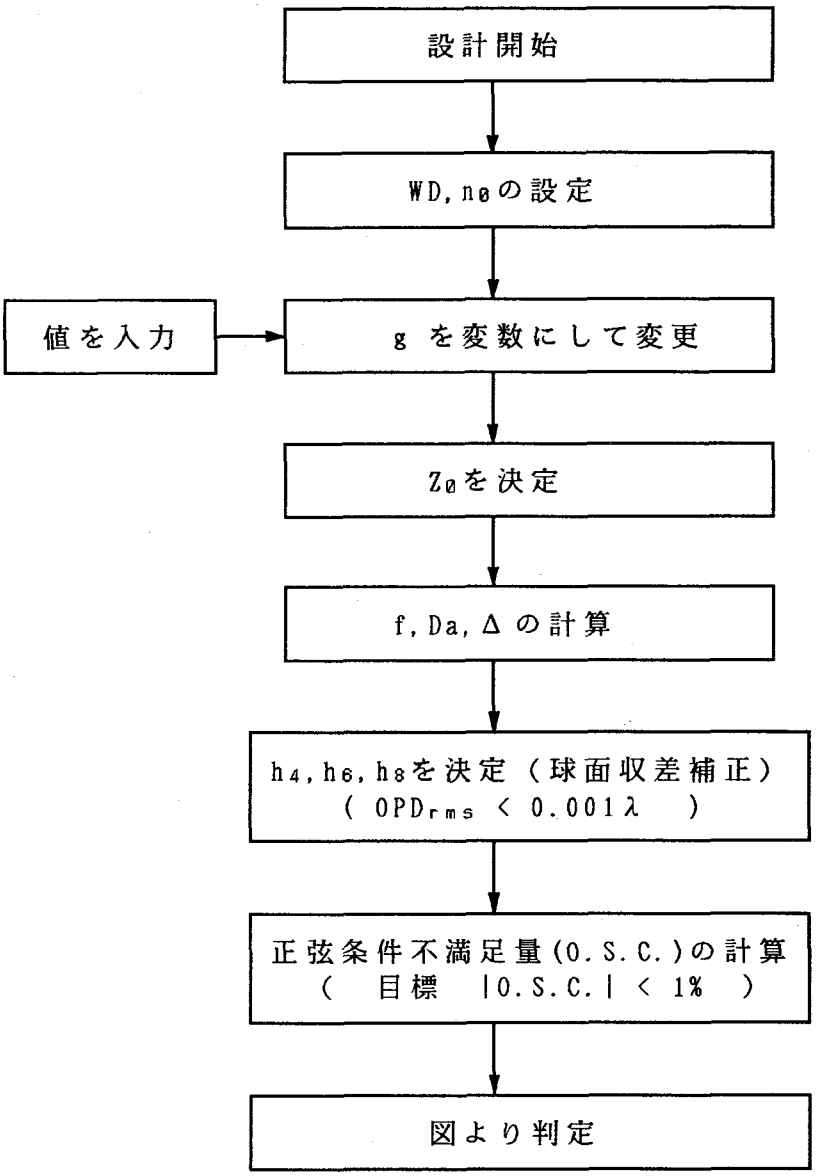


図2.10 両面を平面とするタイプの設計手順

設計の初期段階で1次量（焦点距離、作動距離など）の決定を行なう。光ディスクの屈折率n_{disk}は一定値であり、PC の場合は n_{disk} = 1.57 (λ=780nm)である。n_0は1.6前後であまり大きく変えられず WDは仕様で決められているので、変数は"g" だけとなる。n_0,WDをある値に設定すると、

作動距離　：$WD = 1/[\ n_0 \cdot g \cdot \tan(g \cdot Z_0)\ ] - 1.2/n_{disk}$　(2.18)

よりg が与えられると Z_0が一意的に決まる。焦点距離 fや光線有効径 D_aなどの他の1次量は以下の式で表わされる。[47]

焦点距離　：$f = 1/[\ n_0 \cdot g \cdot \sin(g \cdot Z_0)\ ]$　(2.19)

有効径　：$D_a = 2 \cdot NA \cdot f = 0.90 \cdot f$　(2.20)

さらに、現状のイオン交換法で実現できる屈折率差には上限があるため、比屈折率差についても検討しておく必要がある。比屈折率差Δは図2.4において

比屈折率差　：$\Delta = \Delta n / n_0 \times 100$　(%)　(2.21)

と定義できる。このΔは図2.4 で示すように最大の屈折率差を%で表示したものである。Δの大きいセルフォックレンズ(商品名"SLW")では、Δ= 4.5% 程度であるのでこの値を上限値の目安とした。

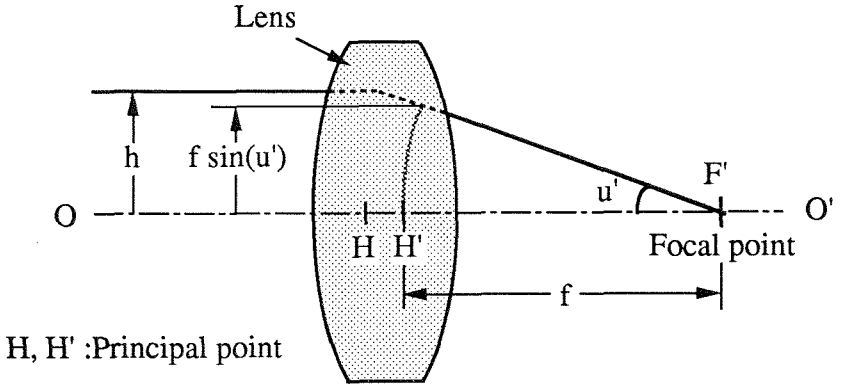
球面収差補正は、4次以上の分布係数h_4, h_6, h_8・・・・を最適化して補正可能である。[9] OPDrms値が 0.001λ以下になるように一次逆補間法で最適化した。コマ収差補正は、1次量に自由度があれば、WD や f を一定に保ったまま面や媒質の屈折力(Refractive Power)の相互バランスを変えることで実現できる。[9] これはベンディング(Bending)と呼ばれる。本形状では、媒質が一つあるだけだからベンディングの自由度がない。一応、"g" 値を変化させた時のコマ収差の補正状態をしらべた。

コマ収差の表わし方は、計算時間が短いことから正弦条件不満足量(O.S.C. : Offence against Sine Condition)[48]を用いた。 O.S.C. は図2.11 より、次式で与えられる。

$O.S.C. = [\ h/(f \cdot \sin u')\ - 1\ ] \times 100$ (%)　(2.22)

ただし、h ： 入射瞳での光線高さ

O.S.C. = 0 ならコマ収差は発生しない。O.S.C.の許容値については**3.2**で議論することにして、ここでは|O.S.C.| < 1.0% をコマ補正の目安としておく。



$$O.S.C. = \left(\frac{h}{f\sin(u')} - 1 \right) \times 100(\%)$$

図2.11 正弦条件不満足量の定義

そこで、WD=2.0mm, n_{disk}=1.57, n_0=1.65の条件で、"g" 値を0.10～0.25mm^{-1}まで変化させてみたときの各定数の変化を調べた。レンズ設計ソフト" GILDS"を用いると図2.9の設計手順が自動的に実行される。球面収差は屈折率分布係数h_4, h_6, h_8を変数として最適化することにより解が見つかった。その結果を表2.3 と図2.12に示す。

表2.3 両面を平面とするレンズの設計結果

g(mm^{-1})	f(mm)	Z_0(mm)	Da(mm)	Δ (%)	h_4	O.S.C.(%)
0.10	6.661	11.429	6.20	4.8	0.7908	5.38
0.15	4.896	6.472	4.80	6.5	0.7358	7.58
0.20	4.102	4.156	4.10	8.4	0.6548	9.08
0.25	3.677	2.880	3.70	10.7	0.5765	10.05

n_0=1.6500 , WD=2.0mm , NA=0.45 , t=1.2mm , n_{disk}=1.57

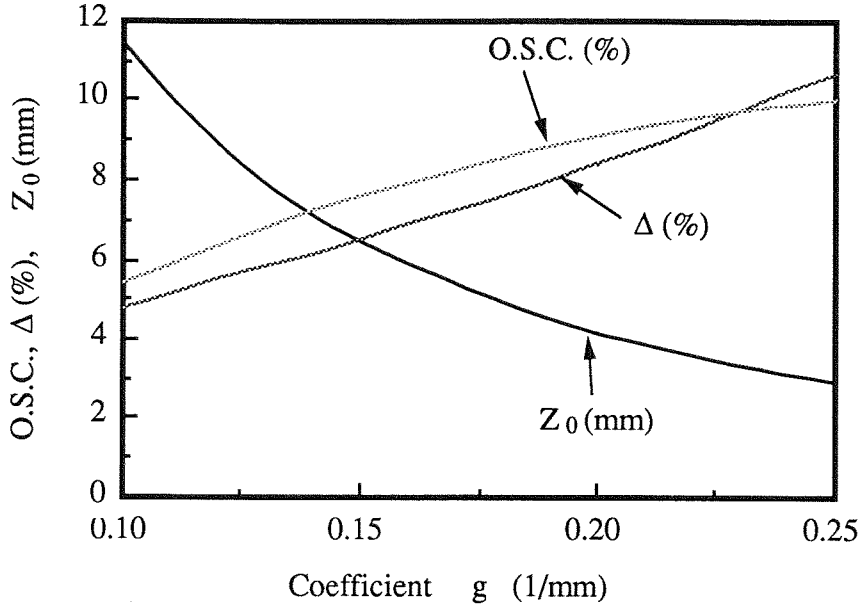


図2.12 両面を平面とするレンズの設計結果

g = 0.10～0.25(mm^{-1})の範囲では、|O.S.C.| < 1% とする解は見つからなかった。g が大きくなるとレンズ形状は小さくなり小型化には好ましいが、Δが大きくなりすぎ10% を越えている。現状のイオン交換法で生産できるΔは4.5%程度であるため非現実的な数値である。また、g が増えると O.S.C.も単調に増加してしまう。一方、g が小さいと Δ 及び O.S.C.とも単調に減少して期待がもてるが、レンズ厚Z_0が急速に長くなる。g = 0.10mm^{-1}では、Z_0 = 11.429mm, Da = 6.20mm とレンズが大型化し、本研究の目的の一つである小型軽量化と相反する。同時に、レンズの大口径化はイオン交換時間がレンズ径の自乗に比例するという製造上の現実からしてコストアップを招く。

以上の考察から、両面を平面とするCD用対物レンズは実用上 |O.S.C.| < 1%を満足する解が存在しないと判断される。よって、以後の検討からはこの形状を考慮しないことにする。

2.5 第1面を球面とした平凸単レンズの設計

2.4 の両面を平面とする単レンズでは、ベンディングを行える自由度がなかった。球面を1面加えると、図2.13 に示すように半径方向屈折率分布型媒質自体(Radial Gradient

Index Medium)が屈折力ϕ_Gを持つため、第２面が平面でも均質媒質を用いた両凸レンズと等価な屈折力配置を持つ。球面と半径方向屈折率分布型媒質の各屈折力ϕ_R、ϕ_Gは

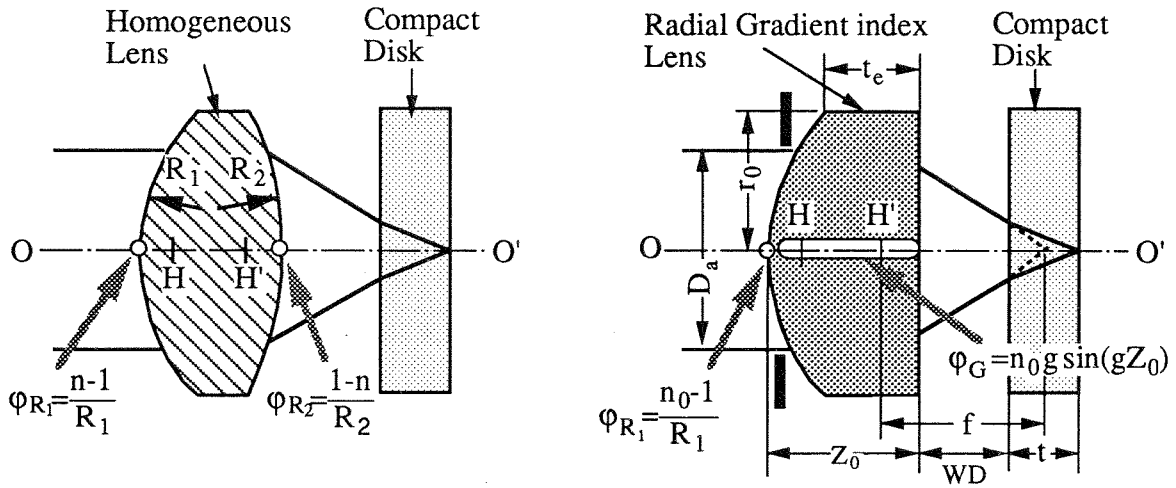
$$\text{球面の屈折力}\ :\ \phi_R = (n_0 - 1)/R_1 \tag{2.23}$$

$$\text{媒質の屈折力}\ :\ \phi_G = n_0 \cdot g \cdot \sin(g \cdot Z_0) \tag{2.24}$$

で表わされる。

ϕ_Rは球面の曲率半径 R_1を、ϕ_Gは媒質の分布定数 g ないしレンズ厚Z_0を変えれば独立に動かすことが出来る。そこで、ベンディングはϕ_Rとϕ_G のバランスを変えることで行なった。なお、通常のベンディングは焦点距離を一定にして行なわれるが、本研究では焦点距離より重要な作動距離 WD を一定とするよう行なった。

実際のレンズ設計を行なう前に、使用する屈折率分布型ガラス素材の特定をおこなった。硝材として用いることの出来るものは"Snz-26"という名称のガラスしか選択の余地はなかった。



(A)均質両凸非球面レンズ　　(B)屈折率分布型平凸レンズ

図2.13 均質両凸非球面レンズと屈折率分布型平凸レンズのパワ配置

この硝材は屈折率分布のコントロールが可能で、耐候性が良好、かつ直径 3.0mmという大口径で大量に生産されているという実績[14]があった。他の硝材は屈折率コントロールが可能になっていなかった。Snz-26の分布定数は、波長780nm で n_0=1.633, $g \cdot r_0$=0.3というものである。ここで、r_0は媒質の半径である。レンズ外径に関係なく比屈折率差Δが一定であるため、レンズ径を変えてg 値を変更することが可能である。コマ収差が補正された状態ではレンズ有効径Daを外径の80%に選ぶと、式(2.20)からレンズ外径$2r_0$は

$$2r_0 = D_a/0.8 = 2\ NA \cdot f/0.8 = 1.125 \cdot f \qquad (2.25)$$

なる条件を満たす必要がある。図2.13 より像側主点位置H'がレンズの第２面より内側にあるため、

$$f > WD + t/n_{disk} = 3.308\ mm \qquad (2.26)$$

となる。よって、$2r_0$ > 3.722mmよりレンズ外径を$2r_0$=4.0mmに選んで設計を行なうことにした。つまり、g = 0.15 mm^{-1}である。以上の条件のもとで、硝材を"Snz-26"に特定して、R_1値を変えてベンディングをおこなった設計の手順を図2.14 に示す。

R_1が与えられると、レンズ中心厚Z_0はWDを一定に保つように一意的的に決定される。なお、Z_0の値は解析的に求めず一次逆補間法で数値的に求めた。その後、レンズ外周部の厚みであるコバ厚t_eが零以下にならないようにチェックを行う。

一方、球面収差は半径方向屈折率分布型媒質の２次以上の項 g, h_4, h_6, h_8, が均質非球面レンズの非球面項と等価な作用をするため、これらの項を最適化すれば必ず補正できるはずである。[9] g値は固定値のためh_4～h_8の値の最適化を行なった。コマ収差補正は正弦条件不満足量で評価する。これらは前節で述べた設計手順と同一である。

GILDS を用いた計算結果を図2.15に示す。図で横軸は第１面の曲率半径をとり、縦軸は正弦条件不満足量、レンズ中心厚、レンズ外周厚（コバ厚）を示す。この計算結果より以下のことが判明した。

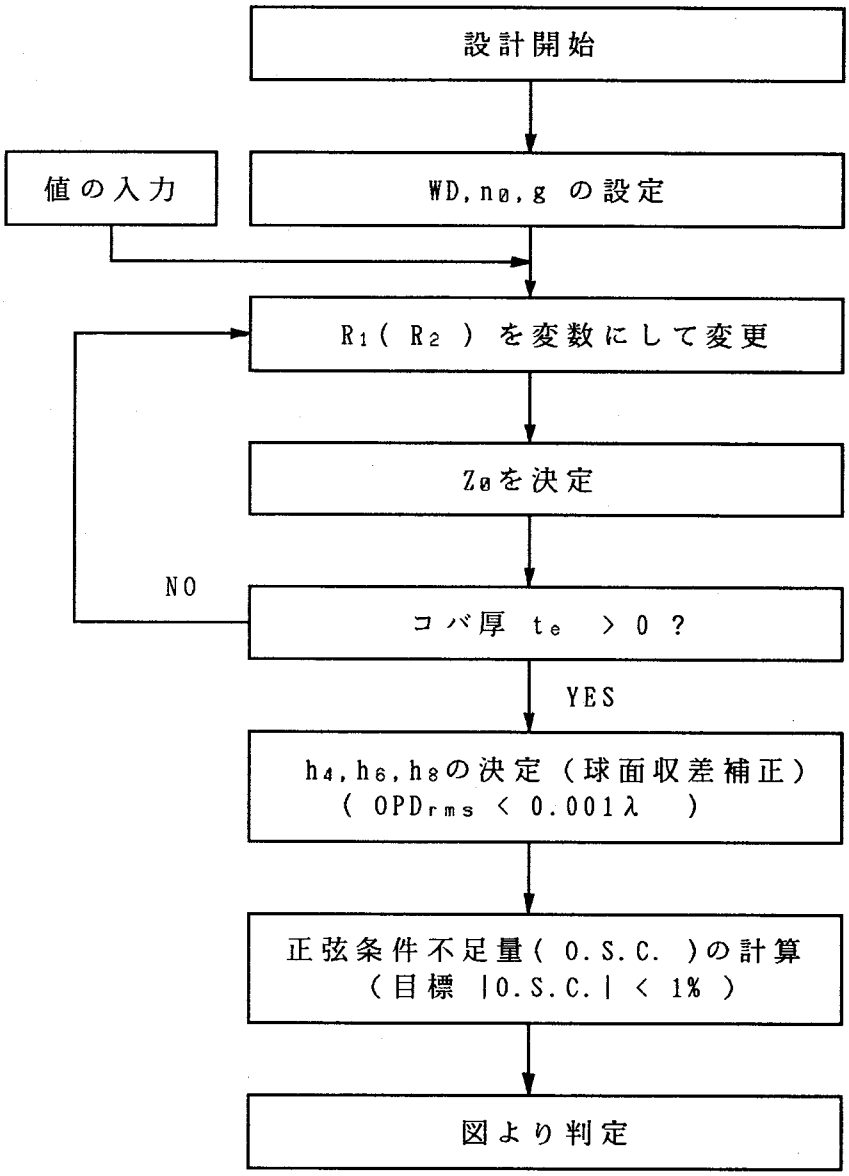


図2.14 第一面を球面とするレンズの設計手順

(1) O.S.C. = 0 となる解が存在する。

(2) R_1の下限はレンズの外周部の厚さであるコバ厚t_eの下限できまる。

(3) R_1を大きくとるとレンズ長Z_0が長くなりレンズが重くなる。

以上の制限からR_1=2.7mmを選んだ。R_1=2.70mm の時のレンズ定数を表2.4 にしめす。

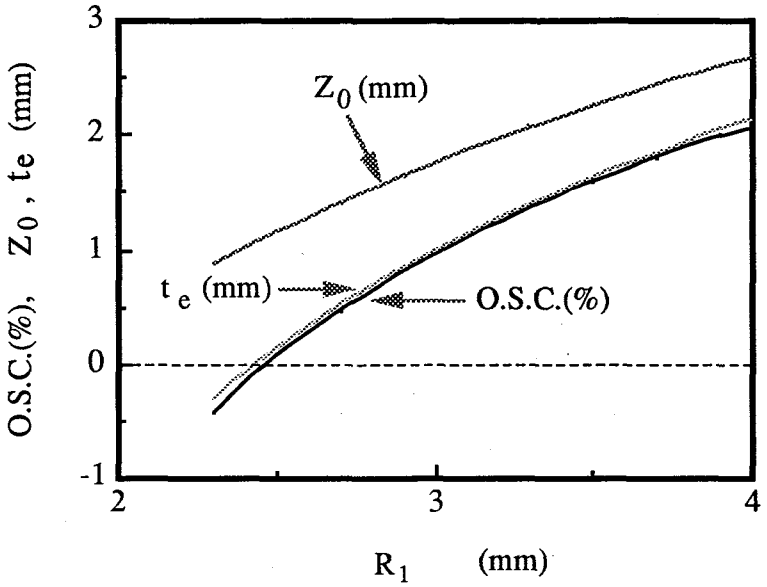


図2.15 R_1によるベンディングを行なった時の設計結果

表2.4 第1面を球面とするレンズの設計結果

波長	λ = 780 nm	媒質定数	n_0 = 1.633
焦点距離	f' = 3.562 mm		g = 0.150 mm^{-1}
開口数	NA = 0.45		h_4 = −0.492
光線有効径	D_a = 3.204 mm		h_6 = −0.105
作動距離	WD = 2.000 mm		h_8 = 1.0
中心厚	Z_0 = 1.414 mm		
球面曲率半径	R_1 = 2.700 mm		
ディスク厚	t = 1.200 mm		
ディスク屈折率	n_{disk} = 1.570		

非常に薄い、コンパクトなレンズなっている。

ところで、O.S.C.はいくらまで許せるかについては**3.2**で述べることにして、ここでは|O.S.C.| < 1.0% をコマ補正の目安としておく。

図2.16 は "GILDS" を用いて、最終設計時のレンズ形状と子午面内の光線軌跡をプロッ

トした図である。球面と媒質の屈折力の比は、ϕ_R : ϕ_G = 4.54 : 1 である。第1面の屈折力が大きく、光線はほとんど球面で曲げられている。

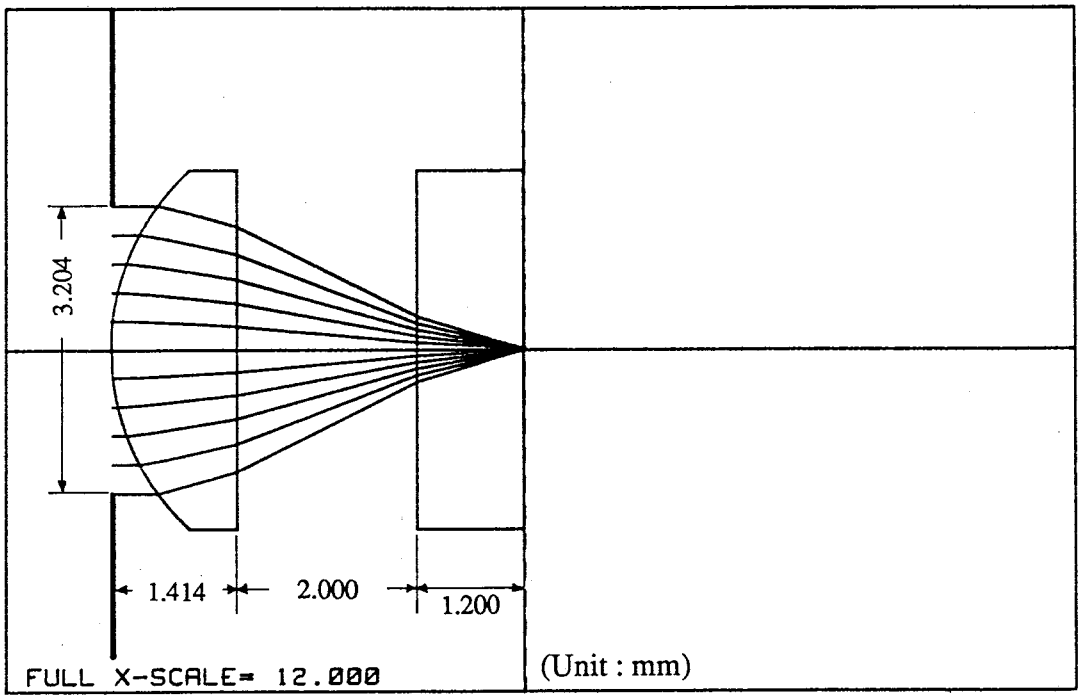


図2.16 第1面を球面とするレンズの最終設計形状と光線軌跡（子午断面）

2.6 第2面を球面とした平凸単レンズの設計

第1面を球面とした場合と同じように、第2面を球面としてもベンディングが行なえる。そこで、この形状においてもレンズ媒質を外径 $2r_0$ = 4.0mm の Snz-26 ガラスに特定して GILDS を用いて設計した。設計手順は前節で述べたものと同一である。 図2.17 に、第2面の曲率半径 R_2 を変数としたときの O.S.C.の変化を示す。この時のレンズ中心厚 Z_0 と R_2の関係を図2.18 示す。レンズ外径が 4.0mm であるため、R_2は $|R_2| < 2.0$mm でなくてはならない。ここで、符号は球心が球面の右にあれば（＋）、左にあれば（－）である。この場合、符号は（－）である。この計算結果より以下のことが判明した。

(1) 作動距離 WD = 2.0～1.5mm では、O.S.C. = 0 とする解は存在しない。

(2) WD = 1.0mm にすると、R_2 = －3.65mm のところで O.S.C. = 0 % の解が見つかった。

(3) WD が短いほどレンズ中心厚は厚くなる。

図2.19 は、図2.16 と同一縮尺で表わした WD = 1.0 mm, R_2 = －3.65mm の時のレンズである。Z_0 = 6.763 mm ときわめて厚いレンズになる。 屈折力の配置は ϕ_G : ϕ_R = 1 :

0.834 であり、媒質と球面の屈折力に大きな差がないのが特徴である。表2.5 に、そのレンズ定数をまとめた。このタイプのレンズについては、コマ収差を考慮せず球面収差の補正のみを目的とした研究も行なわれている。[35]

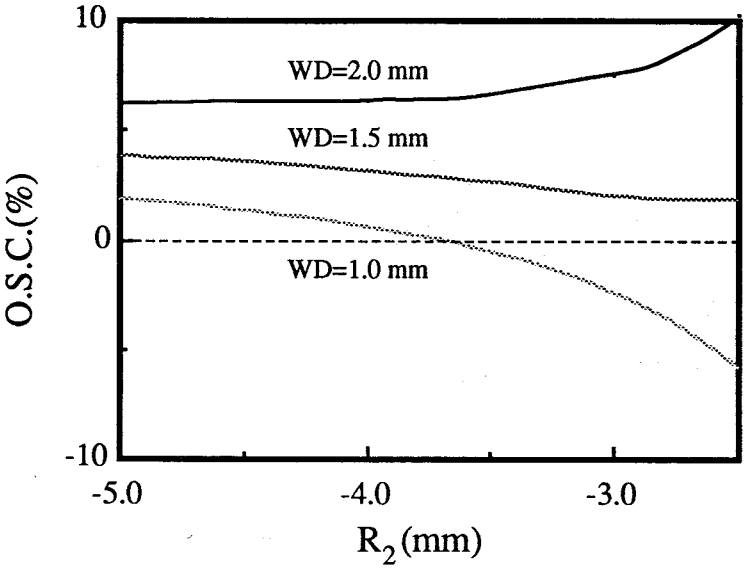


図2.17 R_2によるベンディングと O.S.C.

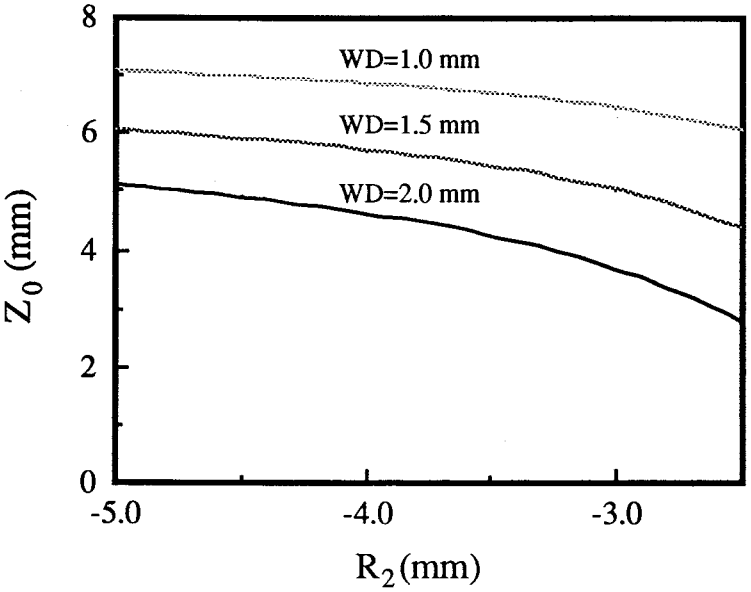


図2.18 R_2によるベンディングと Z_0

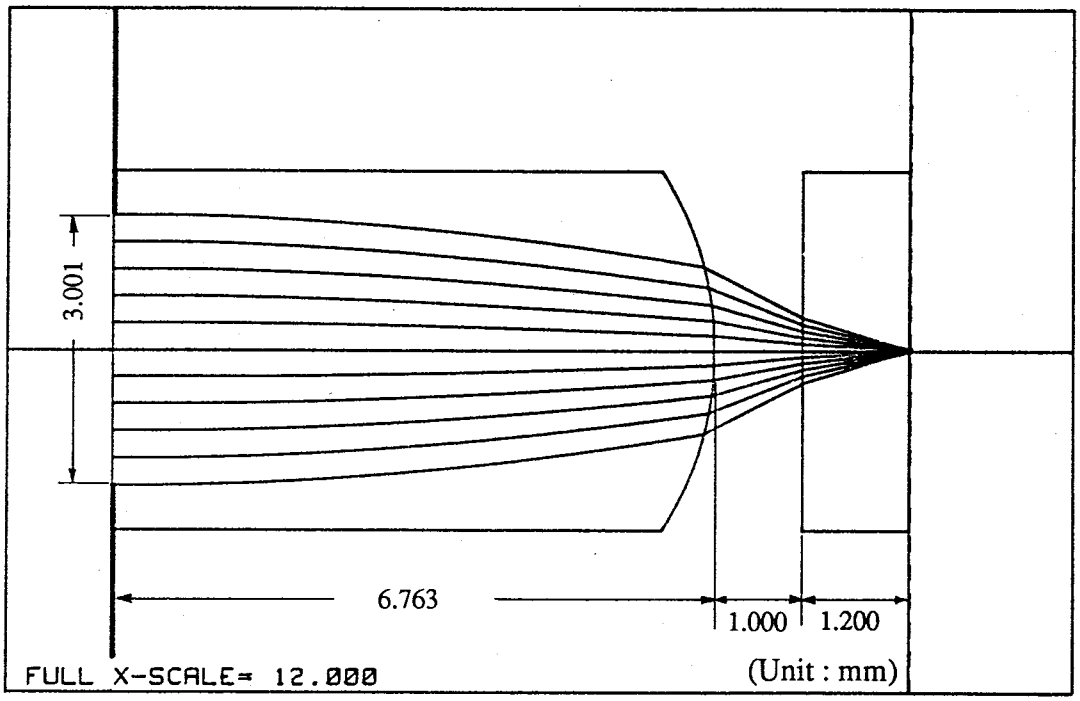


図2.19 第２面を球面とするレンズの最終設計形状と光線軌跡（子午断面）

表2.5 第２面を球面とするレンズの設計結果

波長	λ =	780 nm	媒質定数	n_0 =	1.633
焦点距離	f' =	3.341 mm		g =	0.150 mm^{-1}
開口数	NA =	0.45		h_4 =	1.964
光線有効径	D_a =	3.001 mm		h_6 =	2.949
作動距離	WD =	1.000 mm		h_8 =	26
中心厚	Z_0 =	6.763 mm			
球面曲率半径	R_2 =	−3.65 mm			
ディスク厚	t =	1.200 mm			
ディスク屈折率	n_{disk} =	1.570			

2.7 基本形状決定

2.4～2.6で3種類の形状について、コマ収差と球面収差が同時に補正（”アプラナート”と呼ばれる[49]）できるかどうかについて検討してきた。その結果を表2.6 に示す。

表2.6　3種類のレンズの比較

形状	球面収差補正	コマ収差補正	WD(mm)	Z_0(mm)	Δ(%)
	○	×	2.0	2.800	10.7
	○	○	2.0	1.414	4.5
	○	○	1.0	6.763	4.5

いずれの形状においても、球面収差は屈折率分布型媒質の分布係数 h_4, h_6, h_8を最適化することにより補正できた。しかし、コマ収差は必ずしも補正出来ず球面の付与が必要であった。そこで、以下の理由により、コンパクトディスクシステム用屈折率分布型対物単レンズの基本形状として”第1面を球面とする単レンズ”に決定した。

(1) 球面収差とコマ収差を同時に補正できる。

(2) 作動距離(WD)が 2.0mm確保できる。

(3) 薄くて小型である。

なお、レンズ外径 $2r_0$ をさらに大きくしても解が存在すると思われるが、レンズの径を大きくすると屈折率分布型ガラスの製造時にイオン交換時間が径の自乗に比例するため低コスト化と小型軽量化という目的に反する。逆に、小径化は作動距離が短縮し球面の研磨がより困難になり、やはりコストアップを招くと判断した。そこで、外径 $2r_0$ = 4.0 mm の設計を最終形状と決定した。以後、このレンズは "AG3645" と呼ぶことにする。命名の由

来は "Audio visual system lens by Gradient index glass, f=3.6mm , NA=0.45" からである。

2.8 結　言

本章では、屈折率分布型媒質を取り扱えるレンズ設計ソフト"GILDS"とコンパクトディスクシステム用対物レンズの設計仕様を述べ、"GILDS"を用いて3種類の形状の単レンズについて仕様を満たすレンズ設計を行なった。その結果以下のことが明らかとなった。

(1)　いずれの形状も球面収差は屈折率分布の最適化で補正できる。

(2)　両面を平面とする形状ではコマ収差を補正できない。

(3)　球面を1面加えるとコマ収差は補正できる。

(4)　球面を1面加えると既存のガラス媒質を用いることが可能である。

(5)　第1面を球面とする形状が最も小型軽量である。

(6)　第2面を球面とする形状では作動距離が長くとれない。

(7)　(1)～(6)の理由により第1面を球面とする形状を採用した。

ここで設計されたレンズ "AG3645" は過去のいずれの文献によるもの[16,17]より小型かつ薄型であり、初めて平凸形状で"アプラナート"を実現できたものである。

第3章　波面収差にもとづく公差解析[18,20,21)]

3.1 緒　言

第2章ではレンズ設計の結果、屈折率分布型対物レンズとして第1面を球面とする平凸形状のものが仕様を満たし最も小型軽量であることを明かにした。本章ではこの形状のレンズの波面収差にもとづく公差を詳しく検討する。**3.2**では波動光学的な表現である波面収差の計算値を求める。この計算よりコンパクトディスクシステム用対物レンズとしての仕様を完全に満たしていることを確認する。工業製品として実用化するには、”公差”つまり製造時の許容誤差を明かにしておくのが必要である。**3.3**では厚みや球面の曲率半径といった機械加工時に発生する誤差成分の公差、**3.4**では屈折率分布係数のように化学的プロセスで加工される時に発生する誤差の公差、そして**3.5**では面の偏心により発生する誤差についての公差を計算し、いずれも非現実的な数値では無いことを確認した。特に、偏心コマを相殺する方向にレンズ自体を傾けて金枠に装着することにより大幅に偏心公差が緩和されることを見いだした。

3.2 波面収差の計算

回折限界系のレンズの光学性能評価を厳密に行なうには、波面の位相を考慮した波動光学的表現である波面収差を必ず計算しておく必要がある。図3.1 において、射出瞳上での規格化極座標を（ρ、θ）とすると、波面収差ϕ（ρ、θ）は像点を球心とする参照球面(Reference Sphere)と実際の波面(Wavefront)との偏差である。図3.2 は2つの像高Y'= 0とY'=0.1mmについて"AG3645"の最良像点（OPDrms値の最小点）での波面収差を"GILDS"を用いて光線追跡で求めたものである。横軸は規格化した射出瞳半径ρ、縦軸は波面収差値(OPD)を表わす。軸外入射時(Y' = 0.1mm)では子午面(Meridional)と球欠面(Sagittal)での波面収差を示した。

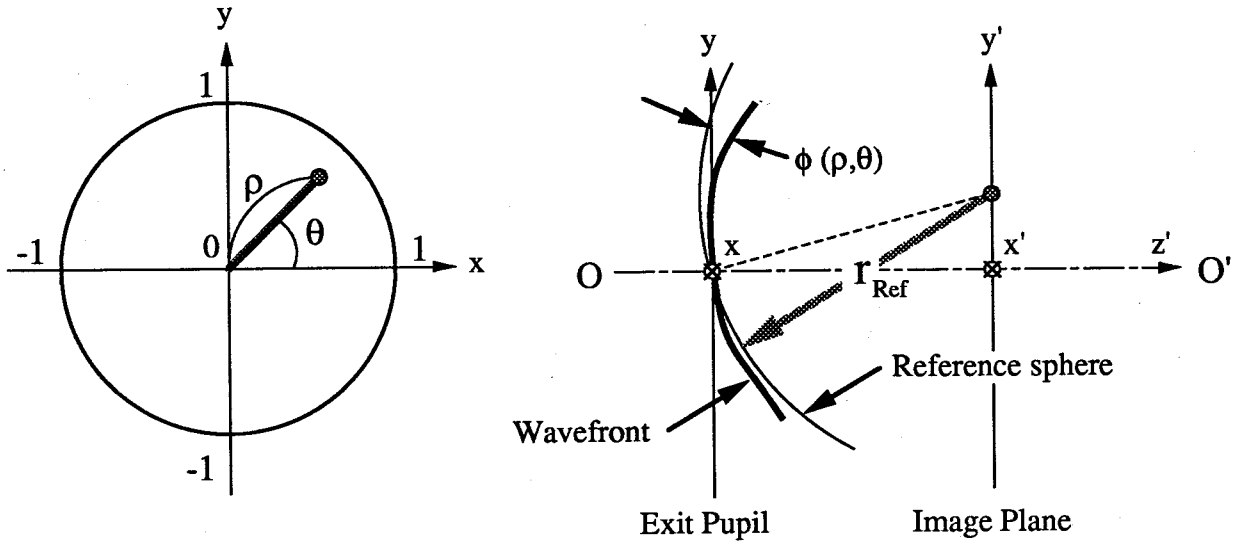
著者は、波面収差の解析法として波面収差を瞳上で直交展開したZernikeの多項式[51)]を用いた。Zernike多項式を用いる利点は、

(1)　各収差成分が分離できる、

(2)　最良像点が自動的に決まる、

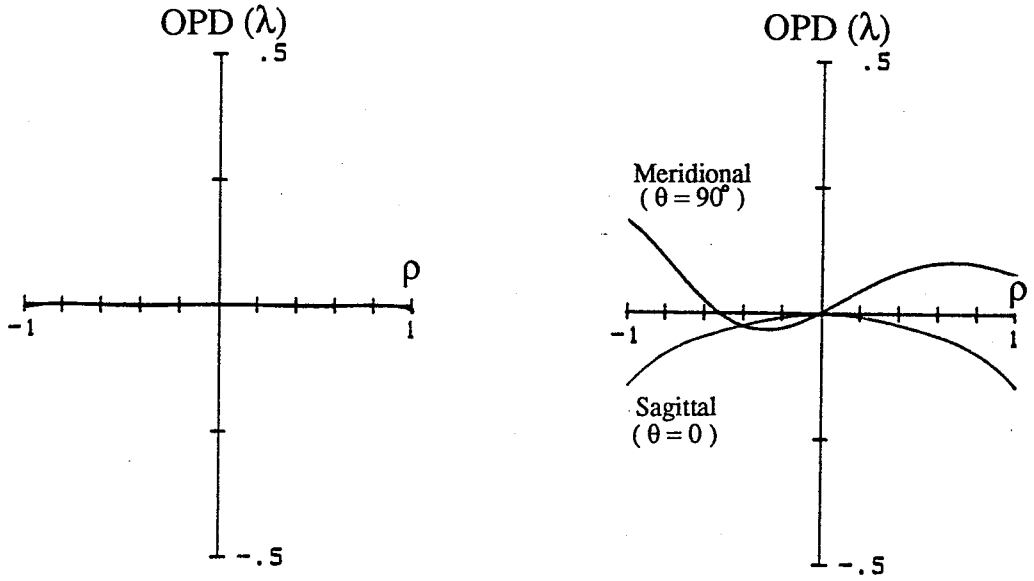
(3)　標準偏差(OPDrms)が簡単にもとまる、

などである。



(A)規格化射出瞳座標　　(B)波面収差の定義

図3.1 波面収差の定義



(A)像高 Y' = 0　　(B)像高 Y' = 0.1 mm

図3.2 "AG3645"の波面収差計算値（ GILDSによる）

波面収差係数が求まると波面収差に影響を及ぼす要因を容易に特定できるところに大きな魅力がある。本論文においては以後、収差と言えばこのZernike多項式に展開された収差係数をさすものとする。Zernikeの多項式は以下の式で表わされる。

$$\phi(\rho,\theta) = A_{00} + \frac{1}{\sqrt{2}}\sum_{n=2}^{\infty} A_{n0} R_n^0(\rho) + \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{n} A_{nm} R_n^m(\rho)\cos(m\theta) \tag{3.1}$$

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} (-1)^s \frac{(n-s)!\ \rho^{n-2s}}{s!\,(\frac{n+m}{2}-s)!\,(\frac{n-m}{2}-s)!} \tag{3.2}$$

ただし、n, m は正の整数、n-mは偶数、A_{nm}は収差係数。

直交関係より、平均値$\overline{\phi}$と自乗平均値$\overline{\phi^2}$は

$$\overline{\phi} = A_{00} \tag{3.3}$$

$$\overline{\phi^2} = A_{00}^2 + \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\frac{A_{nm}^2}{n+1} \tag{3.4}$$

となる。そこで、標準偏差OPDrmsは

$$\mathrm{OPDrms} = \sqrt{\overline{\phi^2} - (\overline{\phi})^2} = \sqrt{\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\frac{A_{nm}^2}{n+1}} \tag{3.5}$$

で求まる。一方、各収差は式(3.1)を具体的に記すと

球面収差：$\phi_{SA} = \sqrt{\frac{1}{2}}\ A_{40}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$ (3.6)

コマ収差：$\phi_{CM} = A_{31}(3\rho^3 - 2\rho)\cos\theta$ (3.7)

非点収差：$\phi_{AS} = A_{22}\rho^2\cos 2\theta$ (3.8)

のように示される。ただし、像面わん曲と歪曲収差は省いた。

そして、各収差が単独で存在しMaréchal Criterion(OPDrms=0.07λ)まで悪化を許した時

の許容値は、

$$|A_{40}| \leq 0.22\lambda \tag{3.9}$$

$$|A_{31}| \leq 0.20\lambda \tag{3.10}$$

$$|A_{22}| \leq 0.17\lambda \tag{3.11}$$

となる。

Zernikeの多項式への展開はレンズ設計ソフト"GILDS"に組み込まれており、８次の項(n=8)まで計算される。８次では２５の係数があるため、２５本の光線をレンズに通し最小自乗法で求めた。"AG3645"の波面収差の軸外特性を図3.3に示す（図中（Ｂ））。図では横軸に像高 Y'をとった。OPDrmsが0.07λに劣化する像高 Y'(Y'=f･tanω)は 0.11mmであり視野直径 0.1mm 以上という設計仕様（表2.2）を十分満たしている。そして、２群３枚構成の均質組合せ球面レンズ[3)]（図中（Ａ））より少ない残存収差となっている。

収差成分の解析を行なう場合、

$$A_{40}(Y') = \text{const.} \tag{3.12}$$

$$A_{31}(Y') \propto Y' \tag{3.13}$$

$$A_{22}(Y') \propto Y'^2 \tag{3.14}$$

という性質について留意する必要がある。"AG3645"は波面収差φが像高 Y'に対してほぼ２次関数的に増加しており、球面収差とコマ収差が補正され非点収差が支配的であることが定性的に推定できる。

図3.4は、各像高ごとの収差係数を示す。この図より、支配的な収差は非点収差A_{22}の項であることがわかる。ただし、O.S.C. = 0.5%と若干コマ収差補正しきれていないためA_{31}の項も幾分大きい。しかし、波面収差に影響する割合は像高Y'=0.1mmにおいて式(3.5)より、

$$\phi_{AS}^2 : \phi_{CM}^2 = (A_{22}^2/3) : (A_{31}^2/4) = 4.9 : 1 \tag{3.15}$$

となる。非点収差による影響ϕ_{22}が大部分であり、この程度のコマ収差の残存は実用上問題ないと判断される。

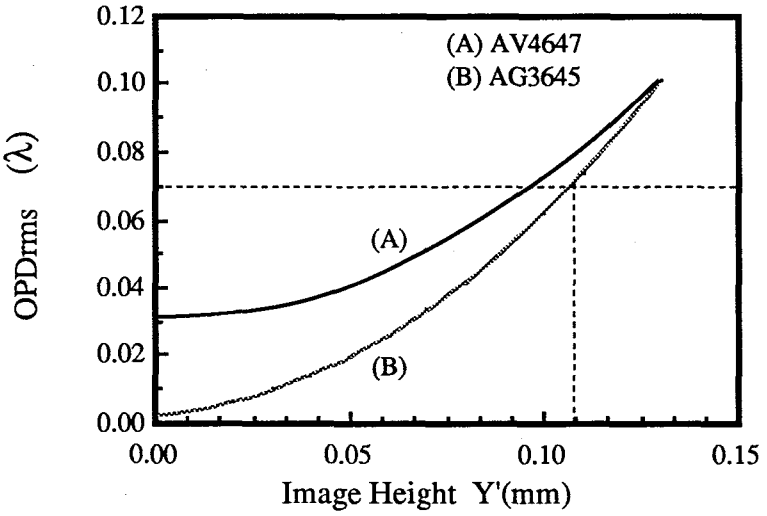


図3.3 波面収差の像高依存性の計算値

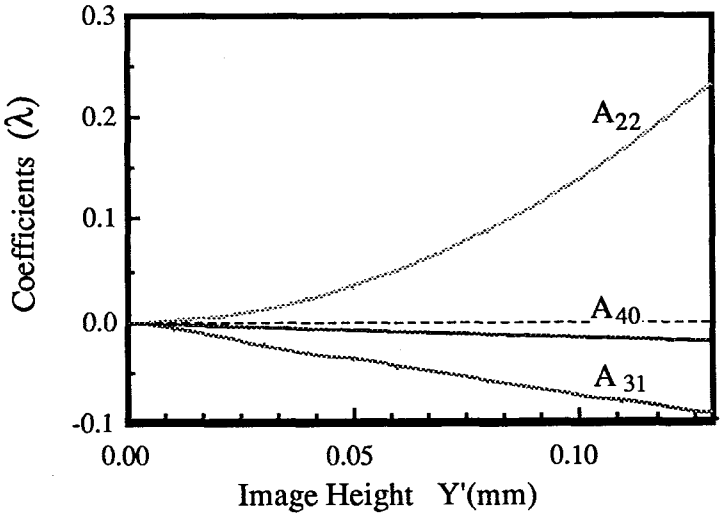


図3.4 収差係数の像高依存性計算値

3.3 形状の公差解析

レンズが実用化可能か否かは、各定数の許容誤差つまり”公差”が製造精度に比べて十分大きいかどうかで決まる。まず、図3.5 に示すように外形寸法の製作誤差に起因するもののうち、光軸O-O'に対称な公差を調べる。各成分を以下に示す。

(1) 球面の曲率半径　　:δR_1

(2) 平面の曲率　　:δC_2

(3) レンズ中心厚　　:δZ_0

(4) ディスク厚　　:δt

これらのうち、レンズに起因するものは(1)～(3)である。ここで、作動距離WDに対する公差がないのは、コンパクトディスクシステムのもつオートフォーカス機能により、絶えずディスクの信号記録面にスポットを結ぶようWDを調整しているからである。このことは、定数の変化に伴う1次量の変化をWDの変化で吸収していることと等価である。

公差量の評価値には波面収差を用いた。これは、OPDrmsを用いて容易に定量化出来るからである。通常、個々のレンズについてはm個の誤差成分により発生するm個の波面収差劣化成分$\delta\phi_n$が合成されて波面収差劣化量$\Delta\phi$は

$$\Delta\phi = \sum_{n=1}^{m} \delta\phi_n \tag{3.16}$$

となる。レンズを量産した時には、$\delta\phi_n$の符号は予測出来ないランダムな現象となり、ルジャンドルの原理を考えて統計的に

$$\Delta\phi = \sqrt{\sum_{n=1}^{m} (\delta\phi_n)^2} \tag{3.17}$$

のような関係式になる。[52] さて、軸対称な偏差で増加する波面収差成分であるが、これは軸に対称な収差である球面収差成分A_{40}, A_{60}, A_{80}……となる。

実際の公差計算は、"AG3645"のモデルに対して各偏差量を単独で与え、その時のOPDrms値の増加割合から求めた。例えば、球面の曲率半径R_1を設計値よりずらした時のOPDrmsの変化を図3.6 に示す。R_1の変化に対してほぼ1次関数的に増加する。本研究では経験上、OPDrmsを 0.03λ増加させる変化量として公差を定義した。GILDS を用いて計算した結果を表3.1 に示す。

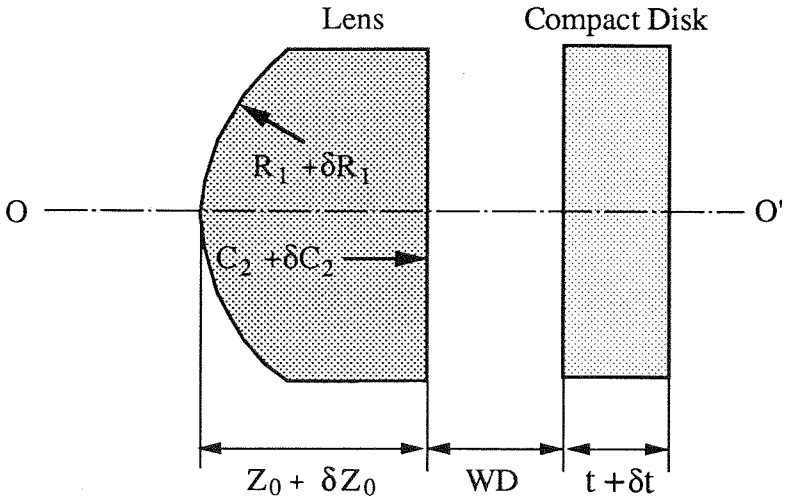


図3.5 形状誤差の説明図

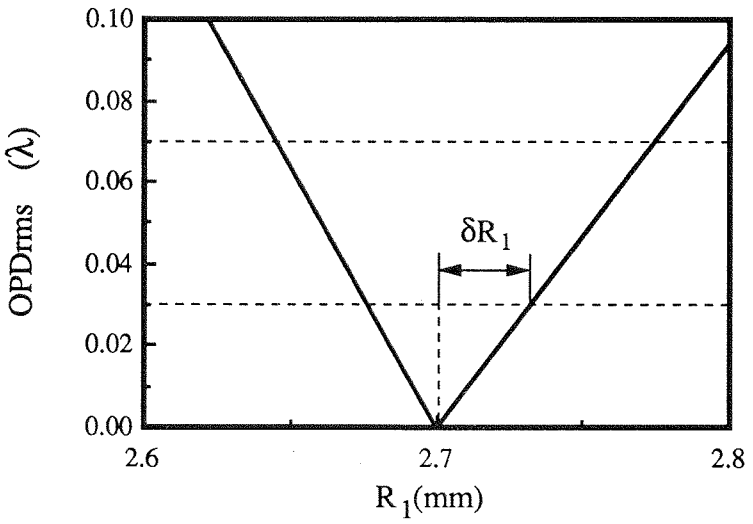


図3.6形状誤差（R_1）と波面収差量の関係

表3.1 形状誤差の公差（OPDrms<0.03λで定義）

	公差の計算値	量産時の実際値
球面曲率半径	$\delta R_1 = \pm 0.031$ mm （N33本）	N0～N3本
平面曲率	$\delta C_2 = \pm 0.005$ mm^{-1} （N34本）	N0～N1本
レンズ中心厚	$\delta Z_0 = \pm 0.10$ mm	± 0.05 mm

注）N33はニュートン縞33本の意味

これらの公差量が一般的な製造精度に対してどの程度の割合であるかを考察してみる。レンズ研磨時の面精度はニュートン法による測定法が用いられる。この測定法は正確な面精度を持つニュートン原器と被測定面を合わせ、隙間で生じる干渉縞より波長オーダで誤差を測定する方法である。球面の公差$\delta R_1=\pm 0.031$mm はニュートン縞で33本、平面の公差$\delta C_1=\pm 0.005$mm^{-1}はニュートン縞 34本に相当する。通常のレンズ研磨においては、容易にニュートン縞数本以内に研磨出来ることより面の公差は十分にあり、ここで生じる誤差はほぼ無視できる値とされる。

最後のレンズ厚公差は$\delta Z_0=\pm 0.10$mmであり、通常レンズの厚み精度が$\Delta Z_0=\pm 0.05$mm程度であることから十分留意すべき量である。

3.4 屈折率分布偏差の公差解析

ここでは、光軸O-O'に対称な誤差成分のうち残された媒質に関するものについて言及する。屈折率分布型媒質に関する成分は屈折率分布係数であり以下のものがある。

(1) 対称軸上屈折率　　：δn_0

(2) 2次の分布係数　　：δg

(3) 4次の分布係数　　：δh_4

(4) 6次の分布係数　　：δh_6

(5) 8次の分布係数　　：δh_8

媒質の対称軸に垂直な半径r における屈折率n(r)は、式(2.8)より以下のとおりである。

$$n^2(r) = n_0^2\ [1-(gr)^2+h_4(gr)^4+h_6(gr)^6+h_8(gr)^8\ \cdots\cdots] \qquad (2.8)$$

ここで、高次の項を８次までとしたのは、本論文で述べるレンズでは８次までとれば十分な精度で屈折率を近似出来るからである。この点については、**5.2**で述べる。

屈折率分布係数の公差計算もレンズ形状の場合と同じ方法で行なった。g ～h_8のいずれも OPDrmsは偏差量にたいして直線的に増加しているので、単独でOPDrmsを0.03λ劣化させる量で公差を定義した。軸対称な偏差であるため球面収差成分A_{40}, A_{60}, A_{80}・・・・が増加している。その結果を表3.2に示す。

表3.2 屈折率分布型媒質の屈折率公差（OPDrms<0.03λで定義）

中心屈折率	$\delta n_0 = \pm 0.0106$	$\delta n_r = \pm 0.01029$
２次の分布係数	$\delta g = \pm 0.0017\ mm^{-1}$	$\delta n_r = \pm 0.00115$
４次の分布係数	$\delta h_4 = \pm 0.222$	$\delta n_r = \pm 0.00063$
６次の分布係数	$\delta h_6 = \pm 2.28$	$\delta n_r = \pm 0.00037$
８次の分布係数	$\delta h_8 = \pm 36.6$	$\delta n_r = \pm 0.00035$

注）δn_rはr=1.6mmにおける屈折率偏差

この係数を単純に比較しても具体的なイメージがわいてこない。そこで、δg～δh_8を屈折率分布型媒質の屈折率偏差δnに換算して表わすと比較しやすい。表3.2のδn_rは、図3.7に示すように、δg～δh_8の偏差に対応するr=1.6mmにおける屈折率の偏差換算値である。r=1.6mmとしたのは、絞りの半径が1.6mmであり、最外周光入射位置に相当するところで最大の屈折率偏差を生じるからである。

屈折率分布係数の測定精度は次章で述べるが、製造時の制御精度より十分良くなくてはならない。そこで、表3.2の公差はイオン交換法で屈折率分布型ガラスを製造する時の制御精度の目安となる。この制御精度を緩和する方法については **5.2**で述べる。定性的には、４次以上の高次項のコントロールを非常に精密に行なう必要があることが推定できる。

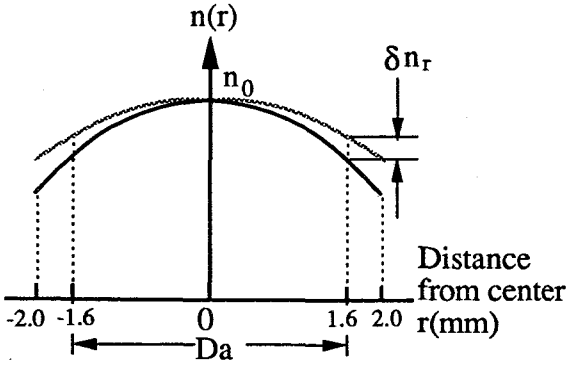


図3.7 有効径位置における屈折率偏差

3.5 偏心の公差解析

偏心とは光軸に対し面が傾いたことを言う。通常、均質の単レンズでは媒質自体が軸を持たないため、両面を研磨後に機械的に両面から円筒でクランプして心取りを行なうことにより心出しが可能である。ところが、屈折率が半径方向に変化するセルフォック型の不均質媒質では媒質自体が対称軸をもつため、単レンズであっても研磨後に機械的に心出しを行えない。そこで、レンズ研磨時には偏心に十分留意して研磨を行なう必要がある。本節では、この公差について言及する。偏心成分は図3.8 に示すように、

(1)球面の偏心（光軸0-0'と球心と面頂点を結ぶ線分とのなす角α_1）、

(2)屈折率分布型媒質の偏心（光軸0-0'と媒質対称軸P-P'のなす角α_2）、

(3)平面の偏心（光軸0-0'と平面の法線のなす角α_3）、

(4)ディスクの傾き（光軸0-0'とディスクの法線のなす角α_4）、

の４つである。これらのうちα_1～α_3はレンズ研磨時に発生し、α_4はレンズを装置に取り付ける際に発生するものであるから両者は区別して考慮する必要がある。

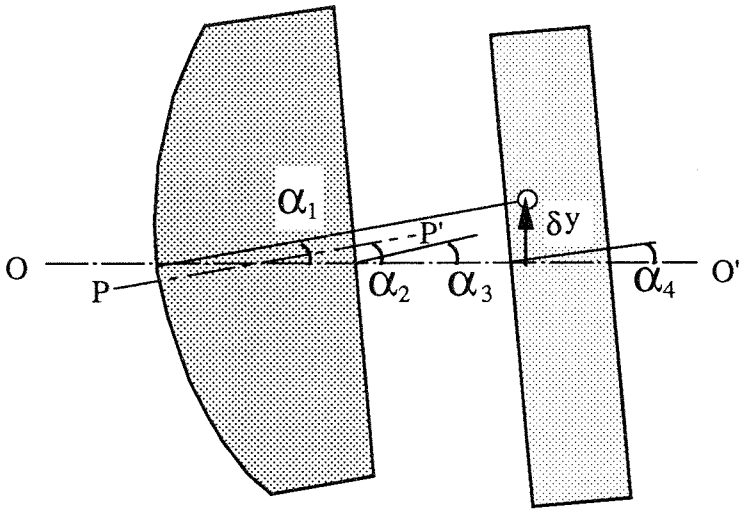


図3.8 面および媒質の偏心の説明図

偏心は光軸に対称な現象でないため非対称収差を発生する。偏心量が大きくない時は面の偏心に対して偏心コマと呼ばれるコマ収差が軸上で発生する。[53]そして、偏心角をαとすると、

$$\phi_c \propto \alpha \tag{3.18}$$

のように偏心コマ収差量ϕ_cは偏心角のαに比例する。つまり、面の偏心量 α に対してOPDrmsは直線的に増加することになる。図3.9には、α_1、α_3、α_4とOPDrmsの関係を示す。直線的にOPDrmsは増加しており、公差量もこの変化率で定義できる。**3.4**と同様に、公差量はOPDrmsを0.03λ増加させる量と定義した。表3.3は、各面の傾き公差を示す。

媒質の傾きα_2は、図3.10に示すように傾きにはたいへん鈍感であり、OPDrmsはα_2のほぼ２乗に比例して増加している。これは、偏心に伴い非点収差が発生しているからである。偏心に伴う非点収差の現れ方はコマに比べて遅いため、偏心公差$\delta\alpha_2$は約2.4°とたいへん緩い。

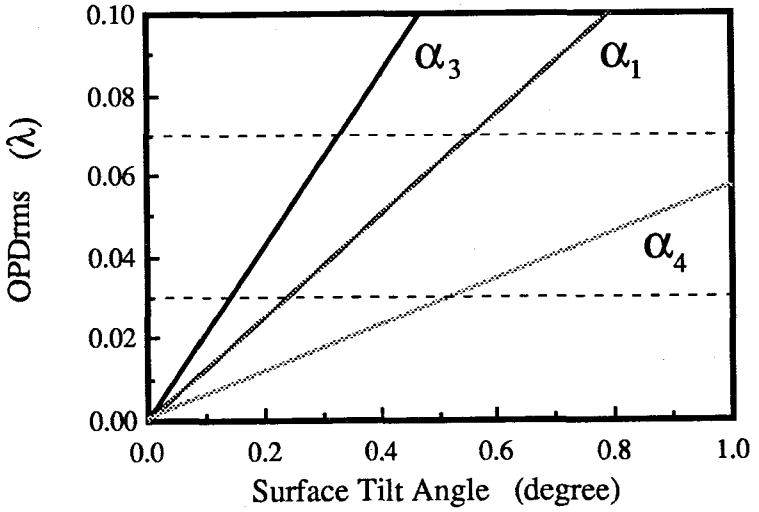


図3.9 面の偏心量と波面収差の関係（GILDSによる計算値）

表3.3 面の偏心公差（OPDrms<0.03λで定義）

球面	$\delta\alpha_1$ = 0.24 °
屈折率分布型媒質	$\delta\alpha_2$ = 2.40 °
平面	$\delta\alpha_3$ = 0.14 °
ディスク	$\delta\alpha_4$ = 0.50 °

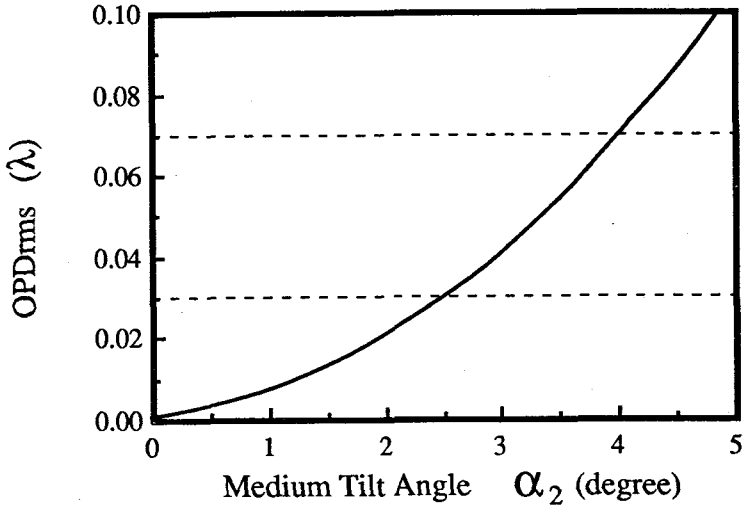


図3.10 媒質の偏心量と波面収差の関係（GILDSによる計算値）

ディスクの偏心公差は、レンズに起因する問題ではなく装置への装着時に生じる不良であるため、以後の議論では考慮する必要はない。面の偏心公差として$\delta\alpha_1$と$\delta\alpha_3$がかなり厳しい値である。具体的には、α_1は球心と光軸とのずれδy（図3.8）は

$$\delta y = R_1 \cdot \sin(\alpha_1) = 2.70 \cdot \sin(0.24^\circ) = 0.011 \text{ mm} \tag{3.19}$$

で与えられる。これより、球面を創成する際、高精度な心だし装置を付加したカーブジェネレータが必要となる。

さて、偏心のない面を持つレンズそのものを光軸0-0'に対して傾けた場合の波面収差増加量を図3.11に示す。図より、例えばレンズが0.37°傾くとOPDrmsは0.03λ増加する。この増加は傾き量にたいして直線的であり、偏心コマ収差が発生している。この結果を利用すると、もし球面がα_1傾いても、そこで発生するコマ収差を打ち消す方向にレンズ全体を$0.37/0.34\alpha_1$傾ければ、偏心コマは補正されることになる。図3.12にレンズ全体を傾ける心だし工程（Centering）を行なった時と、行なわない時の面の偏心量とOPDrmsの変化を示す。これより、レンズを固定枠に装着するとき心だし工程を追加すれば、面の偏心の

心の公差は約３～４倍と大幅に緩和されることになる。ただし、この心だし工程を追加することはレンズの組み立てコストを上げる大きな要因になるため、著者はこの工程を必要としない新しいレンズ研磨法を開発した。詳しくは、**5.3**で述べる。

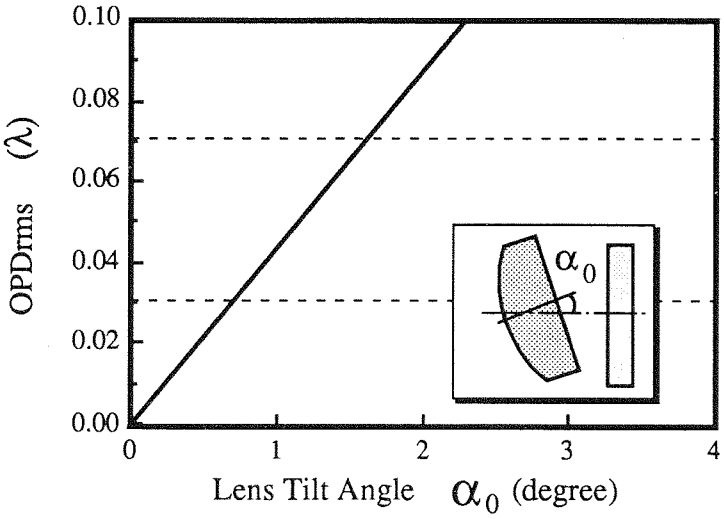


図3.11 レンズの傾きと波面収差の関係（ GILDSによる計算値）

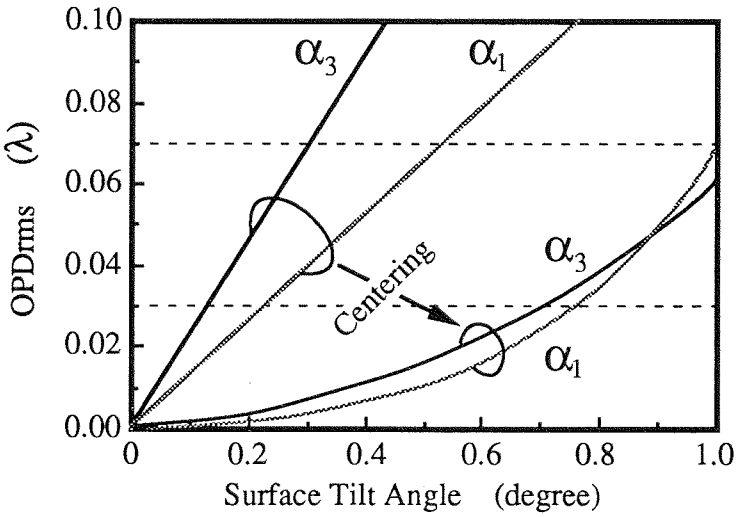


図3.12 レンズ調心前後の波面収差量（ GILDSによる計算値）

3.6 結　言

本章ではレンズ設計ソフト"GILDS"を用いて"AG3645"の詳しい光学性能評価を行い、本レンズがCD用対物レンズの仕様を十分満たすことを確認した。　波面収差の解析法としてZernike多項式を導入し、各収差成分の意味を調べた。

(1)　形状誤差ではレンズ中心厚Z_0の公差が最も厳しく、球面収差の増加を招く。

(2)　屈折率分布の偏差は球面収差の増加となることが判明し、屈折率分布測定時の要求される測定精度を明らかにできた。

(3)　面の偏心はコマ収差の増加を招き、球面と平面の倒れ公差$\delta\alpha_1$, $\delta\alpha_3$が厳しく、偏心のないレンズ研磨法の開発が不可欠であることが判明した。

第４章 半径方向屈折率分布の測定法[28-30,32,33)]

4.1 緒　言

3.4 の表3.2で示すように、屈折率分布係数 $g, h_4 \sim h_8$の測定精度は10^{-5}オーダが要求されている。本章において、**4.2** では全反射法をもちいて媒質の中心軸上の屈折率を測定する方法を提案し、**4.3** では媒質の球面収差を測定する光線追跡法の原理を述べ、**4.4** では球面収差測定精度と球面収差から屈折率分布の２次以上の項を逆算する方法を述べる。**4.5** では **4.3** で述べた光線追跡法によるコンピュータ制御の自動測定装置の説明を行う。

4.2 全反射法により軸上の屈折率を求める方法

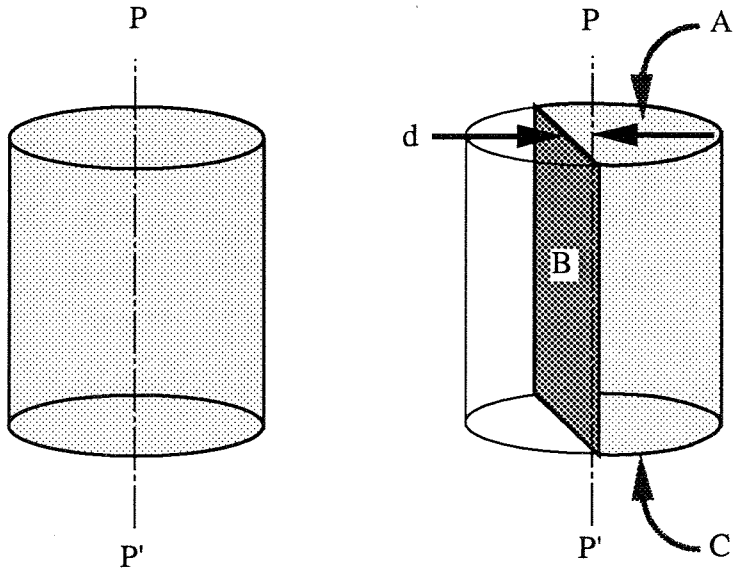
半径方向屈折率分布型媒質の対称軸上の屈折率n_0は、イオン交換時間の経過とともに変化する。ところが、従来はイオン交換前の均質母材の屈折率と同一という仮定がおこなわれていた。光を適当に集める程度の使用法においては大きな誤差とはならないが、本研究のように回折限界系のレンズの場合には正確に求める必要がある。n_0を測定する方法は過去に報告されていない。本節においては、著者が新しく考案した n_0を10^{-4}の精度で迅速に測定する方法[27)]を述べる。要求される測定精度であるが、**3.4** の表3.2において n_0の公差は10^{-2}であった。測定精度として公差の100 分の1 あれば十分である。なお、表3.2で n_0の公差が $g, h_4 \sim h_8$の公差に比べて格段に緩いのは、屈折率分布の形状変化を伴わない変化（ n_0の変化は屈折率カーブが上下にシフトすることに対応する）には鈍感だが、屈折率分布の形状変化に対しては敏感であることを示している。

測定のための試料は、図4.1 のように長さ約5mm のレンズ媒質を光軸を含む平面で縦割り状に切断研磨する。試料は平面研削盤で半割り状に削った後、ウレタンパッドやピッチ皿を用い酸化セリウムの研磨液で光学研磨をおこなった。通常、数分間の研磨でニュートンリング２本以内の面精度をもつ面が容易にえられる。ここで注意すべきことは、媒質の対称軸 P-P' が半割り面Ｂに平行でかつ十分に近いことである。図4.1 において、対称軸 P-P' とＢ面が距離d だけ離れていると、式(2.8)より近似的に光軸上の屈折率 n_0に対して

$$\delta n \fallingdotseq 1/2 \cdot n_0 \cdot (g \cdot d)^2 \qquad (4.1)$$

だけずれることが容易に導かれる。そこで、"AG3645"の $g=0.15\mathrm{mm}^{-1}, n_0=1.6330$ を代入し、

$\delta n=10^{-4}$とすると$d=\pm 0.074$mmとなる。この精度で研磨すれば十分な測定精度が得られる。



(A) 研磨加工前　　(B) 研磨加工後

図4.1 媒質の中心屈折率 n_0 測定用試料の研磨形状

測定法は図4.2 に示すように、全反射角から屈折率を求めるプルフリッヒの測定法[54]と基本的に同一である。しかし、試料の研磨形状と置き方に新規性がある。試料をマッチングオイルを介して主プリズムに密着させ、その全反射角から試料の屈折率が求まる。試料の屈折率をn_s、主プリズムの屈折率をn_pとすると全反射角ϕは次式で与えられる。

$$\sin\phi = n_s / n_p \qquad (4.2)$$

ただし、$n_s < n_p$

以上は試料の屈折率が一様な場合であるが、図4.3 に示すように半割り状の屈折率分布型媒質の対称軸P-P'が照明光と平行になるよう置くと屈折率の最も高い部分からの全反射角ϕ_0 が最大の角度を持つ。今回用いたセルフォック型媒質では対称軸上の屈折率 n_0が最大であるから、最大の全反射角ϕ_0 がこの部分に相当する。$n_0=n_p\cdot\sin\phi_0$ より n_0が求まる。今回使用したプルフリッヒの屈折率計は測定分解能が10^{-4}である。

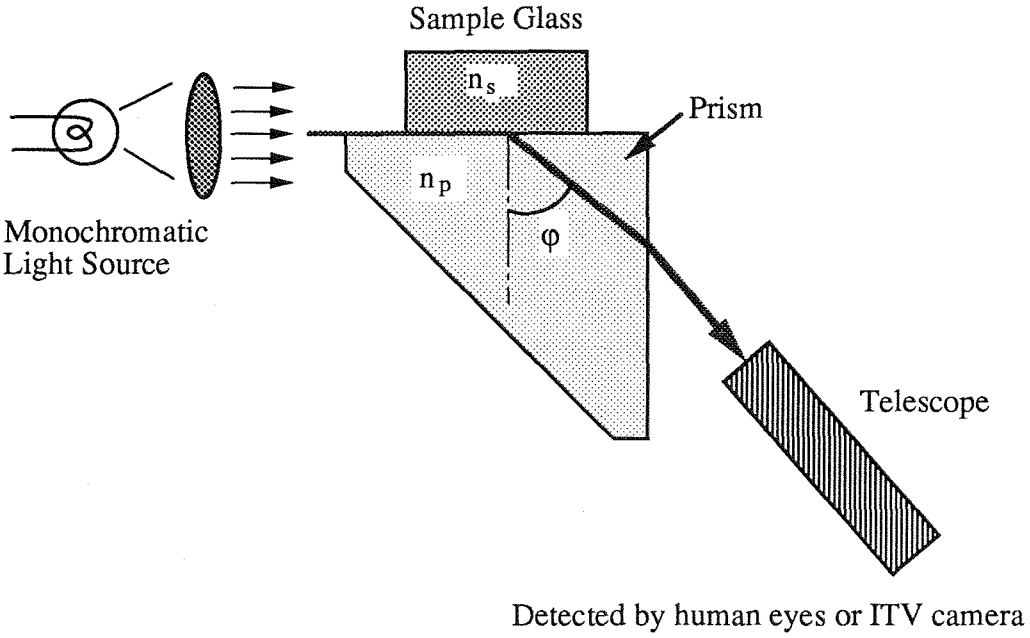


図4.2 プルフリッヒの屈折率計原理図

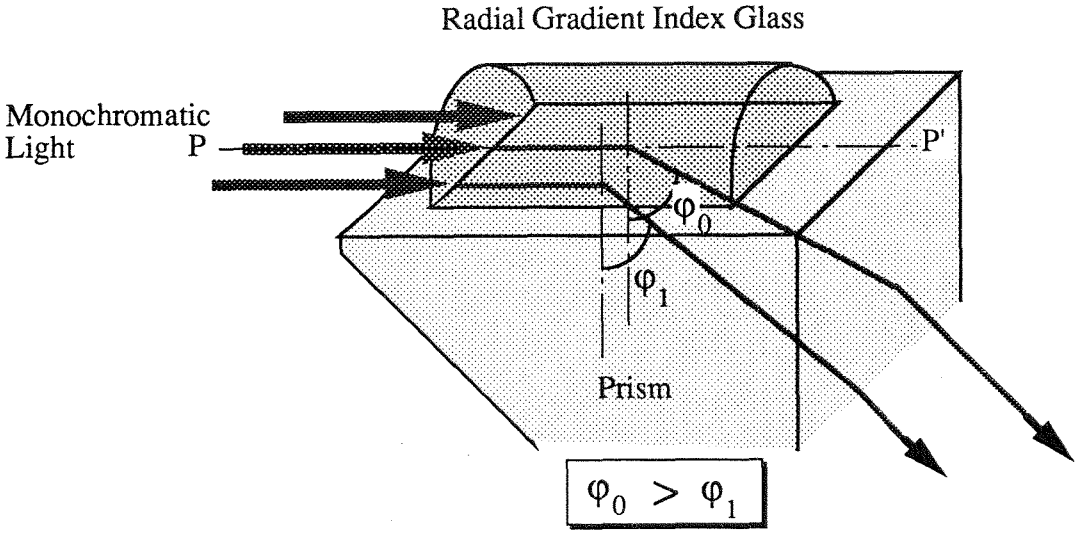


図4.3 本研究における n_θ測定原理図

表3.2 の結果より、n_0の測定には十分な精度を持つが、g, h_4～h_8の測定には10^{-5}程度の精度が要求され精度不足である。g, h_4～h_8の測定は次節で述べる別の方法で実施する。なお、本方法では対称軸以外の部分では連続的に全反射角ϕが変化するため光線が重なり、どの部分からの全反射光か特定出来ない。つまり、この方法はn_0のみの測定しかできない。測定はツアイス社製のプルフリッヒ屈折率計を用い、照明はハロゲンランプの光をモノクロメータで分光して使用した。屈折率計の主プリズムは液体循環式の恒温装置で25° Cに保ち、試料と主プリズムとの隙間を充たす中間液にはαモノブロムナフタレン(n_d=1.6584)を使用した。全反射角ϕは屈折率計内蔵の望遠鏡で角度を読み取った。可視光は眼視により観測し、赤外光はSiビジコンカメラで撮影して間接的に観察した。 波長 λ= 400nm ～1000nmの範囲で測定可能である。測定は6波長以上の複数の波長について屈折率を測定し、次式で与えられるCauchyの分散式[55]に最小自乗法を用いてフィッティングした。

$$n(\lambda)=C_0+C_1\lambda^{2}+C_2\lambda^{-2}+C_3\lambda^{-4}+C_4\lambda^{-6}+C_5\lambda^{-8} \qquad (4.3)$$

ただし、λ：波長(nm)

その結果、材料固有の値である波長分散定数C_0～C_5が求まる。

波長分散定数が解れば測定点以外の屈折率が計算出来る。測定精度の検定は屈折率既知の試料として HOYA 製 BSC7とLAC14Aの2種類の均質ガラスを用いた。表4.1 は、精度検定用ガラスと屈折率分布型媒質 "Snz-26" の n_0のd 線(λ=587.6nm) での測定値を示す。

表4.1 プルフリッヒ屈折率計による測定値 (λ= 587.6nm)

硝材名	測定値	公称値
HOYA BSC7(BK7)	1.5166	1.51665
HOYA LAC14A	1.6966	1.69650
NSG Snz-26[注]	1.6357	なし
NSG Snz-26-n_0	1.6498	なし

[注]イオン交換前の屈折率

屈折率既知のガラスで10^{-4}の偏差である。屈折率分布型媒質のn_0については、過去に測定が不可能であったので検定のしようがない。イオン交換前の母材屈折率より0.0141だけ屈

折率が上昇しているという興味深い結果が得られた。

さて、プルフリッヒの屈折率計の場合、試料があまり小さいと全反射光の光量が少なくなりすぎ測定が困難になる。今回測定した試料は屈折率が10^{-4}だけ変化する範囲が媒質の対称軸にたいして幅0.148mm しかない。照明光の光量を十分強くすることで全反射光を眼視確認できた。

本測定法の開発により従来測定が不可能であったn_0の測定が10^{-4}の精度で可能になり、レンズ研磨時間を除くと1波長あたり約1分間で測定終了する。CD用のレンズでは、干渉計の波長λ=633nmと実際の使用波長λ=780nmの2波長で測定すれば十分である。

4.3 光線追跡法により球面収差を求める方法[28-32]

図4.4 において、適当な長さZ_1を持つ屈折率分布型媒質に対して光軸O-O'に平行に高さhで光線を入射すると、レンズ内で余弦カーブを描き第2面より出射する。光軸に垂直なA-A'面とB-B'面の2面で出射光線位置を測定すると、光線の出射位置h'と角度u'そして光軸を横切る位置Sが一意的に求まる。入射高さhを変化させ何本かの光線を入射させると球面収差が測定できる。光線追跡そのものをシュミレートするため”光線追跡法”と名づけた。レンズの球面収差を測定する古典的手法としてハルトマンテストがある。[56]この測定法ではレンズ前面に複数の穴の開いた遮光板を配置しこれを照明し、A-A'とB-B'の2面に写真乾板を2枚交互に置き露光することにより球面収差を測定する。写真乾板の代わりに1次元イメージセンサを用いた報告もある[57]が、直径4mm 程度の小口径レンズ媒質にたいしてはイメージセンサのカバーガラスの屈折の影響もあり正確な測定が困難である。

図4.5 に示すように集光レンズで

$$W=\sqrt{\frac{2\lambda}{\pi n_0 g}} \tag{4.4}$$

で与えられる固有スポットサイズ W（直径）に絞ったレーザビームを入射すると、媒質内でこのビーム径を保ったまま伝搬する。[58] ここで、n_0, gは推定値を用いる。例えば、波長λ=633nm, g=0.15, n_0=1.633とすると W=0.041mmのビーム径となる。レンズの外径4mm に対して十分細い光線が伝搬するとみなせる。なお、この固有スポットサイズからずれたビーム径でレーザ光を入射すると、媒質中でビーム径が周期的に変動して進み、測定精度低下の原因となる。

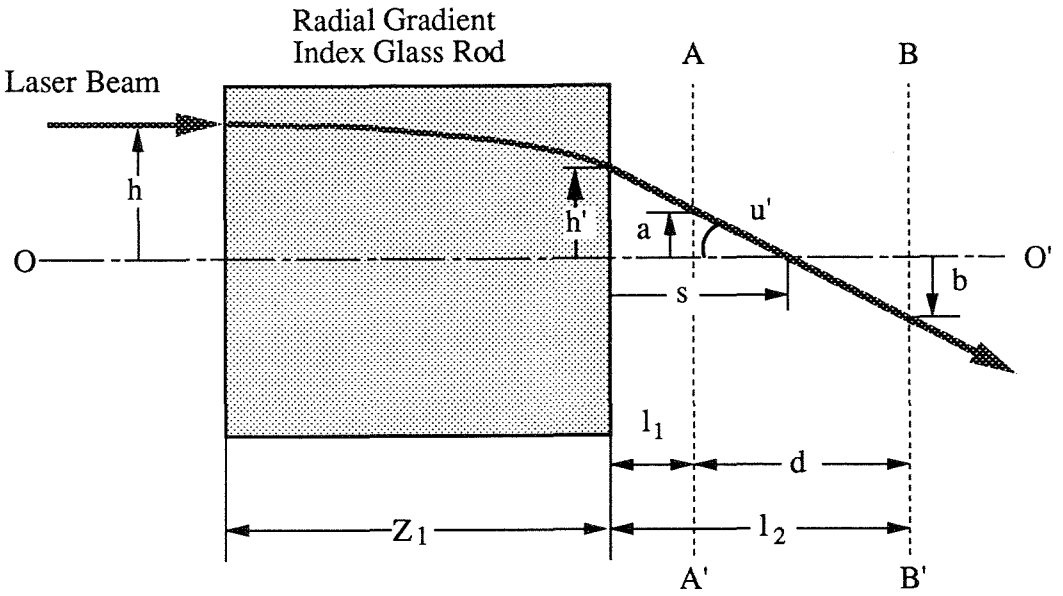


図4.4 光線追跡法による球面収差測定原理図（子午断面内）

次に光線出射位置h'は、A-A'面とB-B'面の２面を図4.5 で示すような微小幅を持つスリットでスキャンし、スリットを透過する光線の光量が最大の位置を光線通過位置とする。本研究においては、スリット幅を10μm にしガラス乾板の表面に写真縮小法で作成した。スリット面をレンズ媒質側にしてあるため乾板ガラスの屈折の影響は受けない。入射高さh と-hの２本の光線の交点とレンズ媒質出射面との距離Sを求める。入射高さh をいろいろ変えて測定すれば球面収差が得られる。レンズ媒質は両面とも平面研磨の状態で測定し長さは適当な長さでよい。レンズ媒質の長さが変化すると球面収差も変化するが、光線追跡により屈折率分布係数g, h_4～h_8をフィッティングして求めるとレンズ長に依存しない普遍的な量が得られる。

図4.6 は測定装置の概略をあらわす。光源は波長λ=633nmのHe-Ne レーザないし波長λ= 780nmのコリメートされた半導体レーザ光である。レーザ光を顕微鏡対物レンズを用いて式 (4.4)で与えられるスポットサイズに絞り、入射高さh を変えてレンズ媒質に入射する。出射光線位置はスリットをスキャンし透過光強度が最大のときのダイヤルゲージ１の読みを記録する。

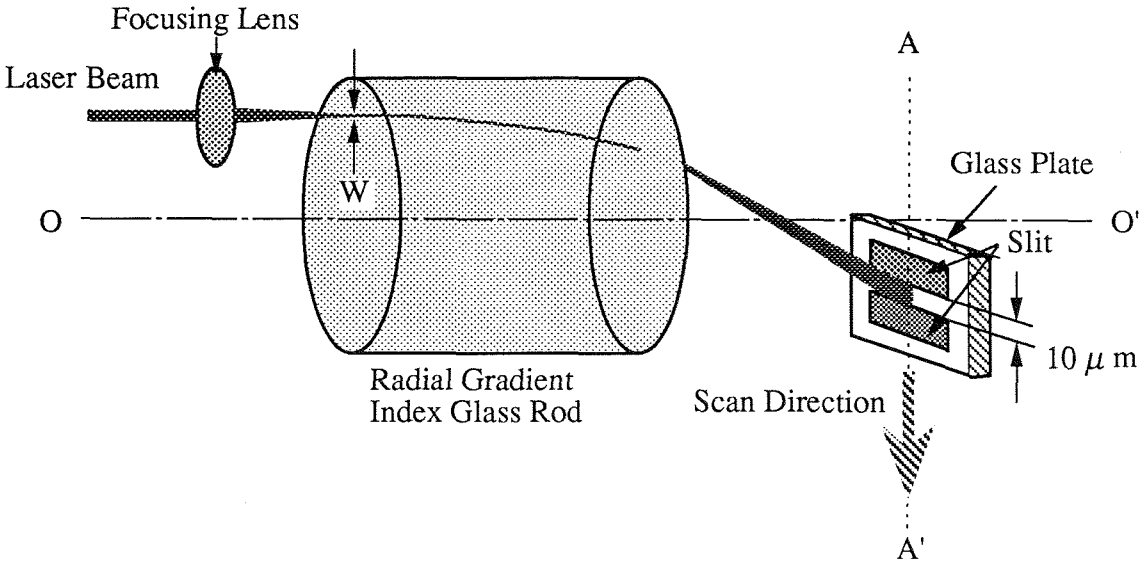


図4.5 媒質へのビーム入射と出射光線位置の検出

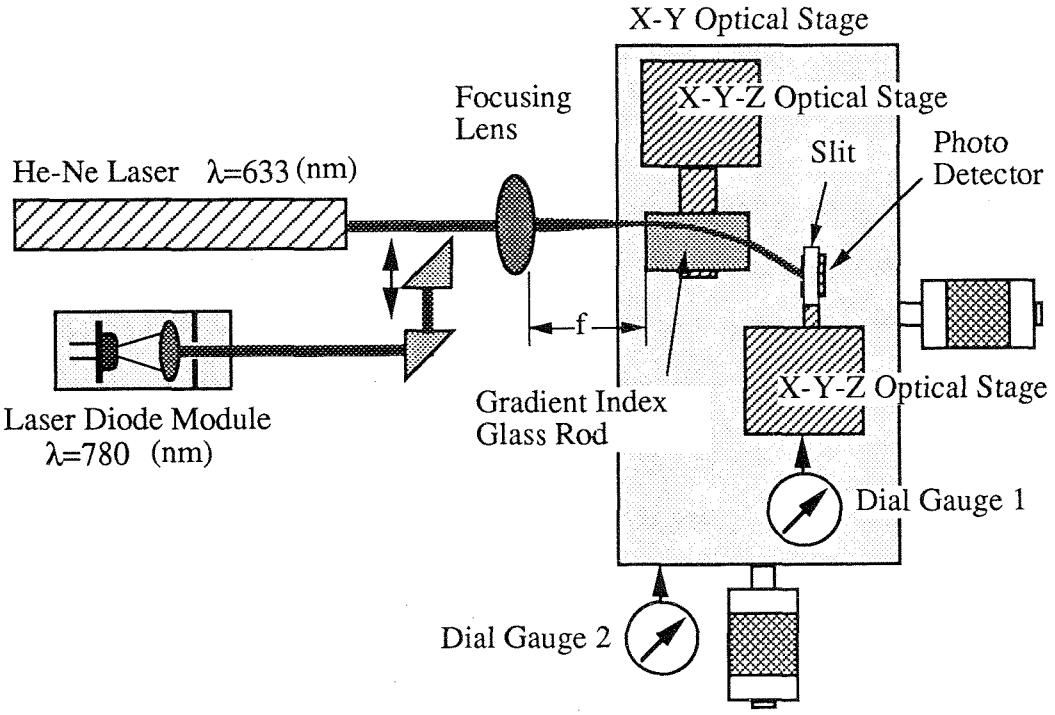


図4.6 光線追跡法による球面収差測定装置の構成図

最終的に図4.7 のような球面収差カーブが得られる。測定波長はλ = 633nm であり、縦軸は NA = n'・sin u'、横軸はレンズ媒質の出射面からの距離 S をμm単位で表示したものである。

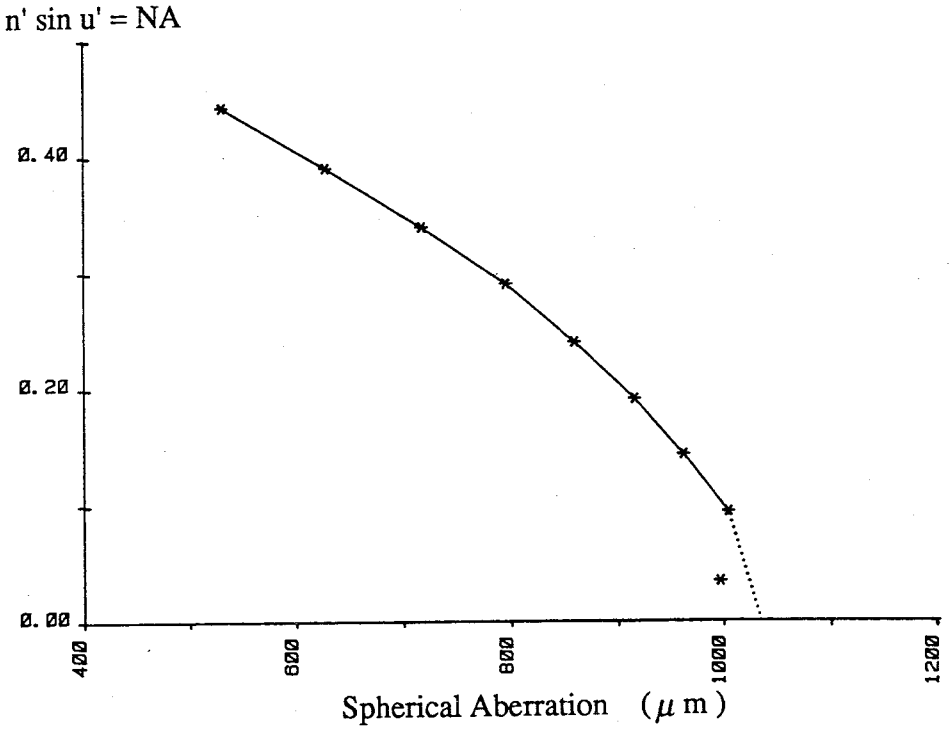


図4.7 球面収差測定例（ レンズ長 Z_1=9.003mm, 外径 $2r_0$ = 4.0mm, 測定波長λ = 633nm）

4.4 測定精度と屈折率分布係数g, h_4～h_8の計算

本測定法固有の測定精度は、２本の光線の交点を求める精度で決まる。図4.8において A-A'面とB-B'面の間に交点がある場合（A）と外にある場合（B）の交点の位置精度δSは、光線の検出精度δaと光軸0-0'のなす角u'を用いて以下の式で与えられる。

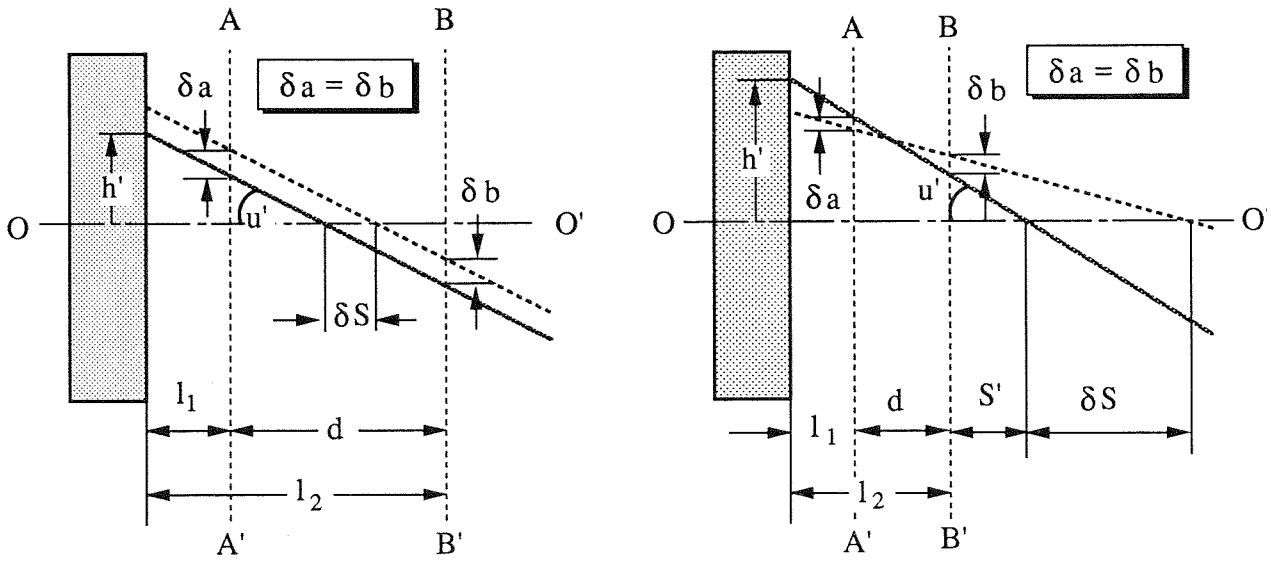
$$(A) : \delta S = \delta a / \tan(u') \tag{4.5}$$

$$(B) : \delta S = [\delta a / \tan(u')] \cdot [(S'+d/2) / (d/2)] \tag{4.6}$$

ただし、$d = l_2 - l_1$, $S' = S - l_2$

この関係より、交点を測定面 A-A'と B-B'の間にもってくるように A-A'面と B-B'面の位

置l_1, l_2を決めておくと最小の誤差で測定できる。そのためには、推定される n_0, g値をもちいて適切なレンズ媒質長Z_1を決める必要がある。



(A) A-A', B-B'面内で光軸と交わる場合　　(B) A-A', B-B'面外で光軸と交わる場合

図4.8 光線位置検出精度を説明する図

さて、式(4.5)の誤差が本測定装置固有の測定誤差である。δaはダイヤルゲージの分解能で決まり本測定装置では1μmのものを使用した。光線のビーム径は約40～50μmと大きいが、10μmのスリットを透過する光量の最大位置は1μm程度の分解能で安定的に確定できた。つまり、ビームの中心位置を測定して光線位置とした。式(4.5)の結果より光線の交角 2u'が大きな光線ほど位置誤差δSが小さく、交角の小さな光線は誤差が大きいと言う三角測量の測定精度と同じ結果になる。$g=0.15\mathrm{mm}^{-1}$, $h=2.0\mathrm{mm}$, $Z_1=0.9\pi/(2g)$の定数で与えられる光線は、$\tan(u')\fallingdotseq 0.5$であり$\delta S\fallingdotseq 2\mu m$の精度を持つ。

屈折率分布型係数g, h_4～h_8を計算するには、測定に用いたレンズの長さ Z_1の媒質中を**2.2**で述べた光線追跡法で光線の軌跡を追跡し、測定で得られた球面収差をもつよう順次g, h_4～h_8を変化させて求める。n_0は**4.2**で測定した値を使用する。g, h_4～h_8は解析的に求まらないため一次逆補間法[43]で求めた。球面収差カーブが光軸と交わる位置で近軸量が確定するため、この精度がg の精度を決める。表3.2よりgの公差は$\delta g = 0.0017\mathrm{mm}^{-1}$であるが、これは近軸焦点位置の移動$\delta S = \pm 0.076\mathrm{mm}$に相当する。測定の結果、これの5分の1程度

の精度で近軸焦点位置が決まった。図4.9は直径4mm, Z_1=9.003mmの"Snz-26"ガラスの球面収差測定値をエラーバーを用いて表示したものと、フィッティングされた球面収差カーブを示す。

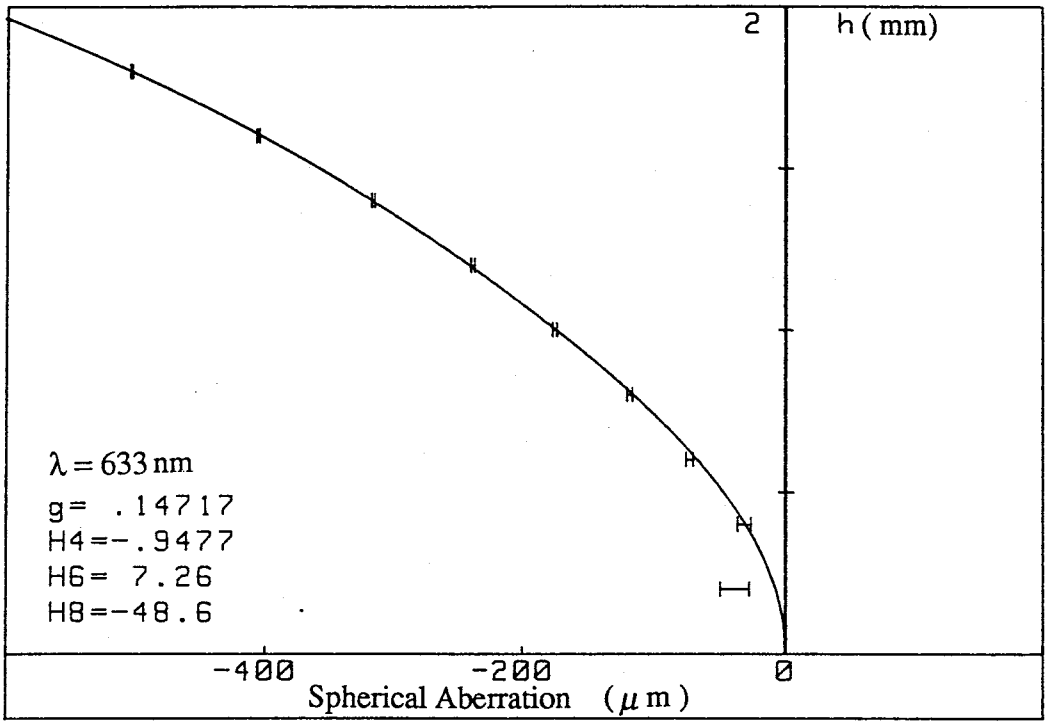


図4.9 球面収差の測定値とフィティングカーブの計算例（図4.7と同一媒質）

なお、光軸に最も近い光線がフィッティングカーブからはずれているが、これはこのレンズ媒質の光軸に近い部分の屈折率分布形状が式(2.8)で与えられる自乗分布と異なるためである。

横軸の原点は近軸焦点位置に変更されている。表4.2は、**3.4** で得られた屈折率分布の公差（表3.2）の値をh=1.6mmの位置での球面収差(Z_1=9mm)に換算した時の偏差量である。

これより、h_4, h_6, h_8はZ_1=9mmの球面収差に換算して±40μmの精度で測定できれば、最終形状のレンズになったときOPDrmsは0.03λ以下に抑えられる。 本測定法では、球面収差で±2.0μm程度(h=1.6mm)は十分分解可能であり、コンパクトディスクシステム用対物レンズの屈折率分布係数測定にはほぼ満足のいく測定精度をもつと判断される。

表4.2　屈折率公差と球面収差への換算値

係数の公差	球面収差への換算値(mm)
$\delta h_4 = \pm\ 0.222$	$\delta SA = \pm\ 0.062$
$\delta h_6 = \pm\ 2.28$	$\delta SA = \pm\ 0.043$
$\delta h_8 = \pm\ 36.6$	$\delta SA = \pm\ 0.043$

測定条件：　Z_0=9.0mm, R_1=R_2=∞

4.5 球面収差自動測定装置

4.3 で述べた球面収差は、片側 h=1～9 と９点の測定を行なうと、全部で36回の光線位置検出を行なう必要がある。手動測定で行なうと３０分間以上も時間がかかるためコンピュータ制御による自動測定装置[33]を開発した。図4.10に装置の概略を示す。光源はHe-Neレーザ（λ=633nm）と半導体レーザ（λ=780nm）の２波長を使用した。レンズ媒質への入射高さh の設定と出射ビーム位置の検出のためのスリット移動はステッピングモータで駆動し、位置の検出はリニアゲージセンサで行なった。ビーム位置の検出は、スリットを一方向にスキャンしスリットを透過する光量が最大となる時のリニアゲージセンサの指示を保持することにより行なわれる。位置制御とリニアゲージセンサの指示の読出はGP-IB インタフェースを経由して制御用コンピュータHP9825で処理される。処理言語はHPL というリアルタイム処理の可能なインタープリタ型言語をもちいた。初期設定とスリットスキャン位置 l_1, l_2 の設定を手動で行なう以外は全自動で測定される。測定時間は初期設定に要する時間も含めて１サンプルあたり約１０分間以内で終了する。測定と同時に球面収差も計算されプリントアウトされる。測定の自動化によるメリットは以下のとおりである。

(1) 測定時間の短縮（30分間→10分間)。

(2) 読取りミスがない。

(3) 測定値に個人差が出ない。

本自動測定装置の光線位置検出精度は、同一サンプルを繰り返し測定した場合、標準偏差で約１μm であった。リニアスケールの分解能が１μm であるからほぼ妥当な精度がえられた。図4.11に装置の外観を示す。(A)は測定部、(B)は制御部の写真である。

図4.12は波長λ=633nmとλ=780nmの２波長について球面収差を測定した結果を示す。球面収差カーブはほぼ相似形であるがカーブが左右にシフトしており、１次の量つまりg 値の

波長分散が大きいことを示している。

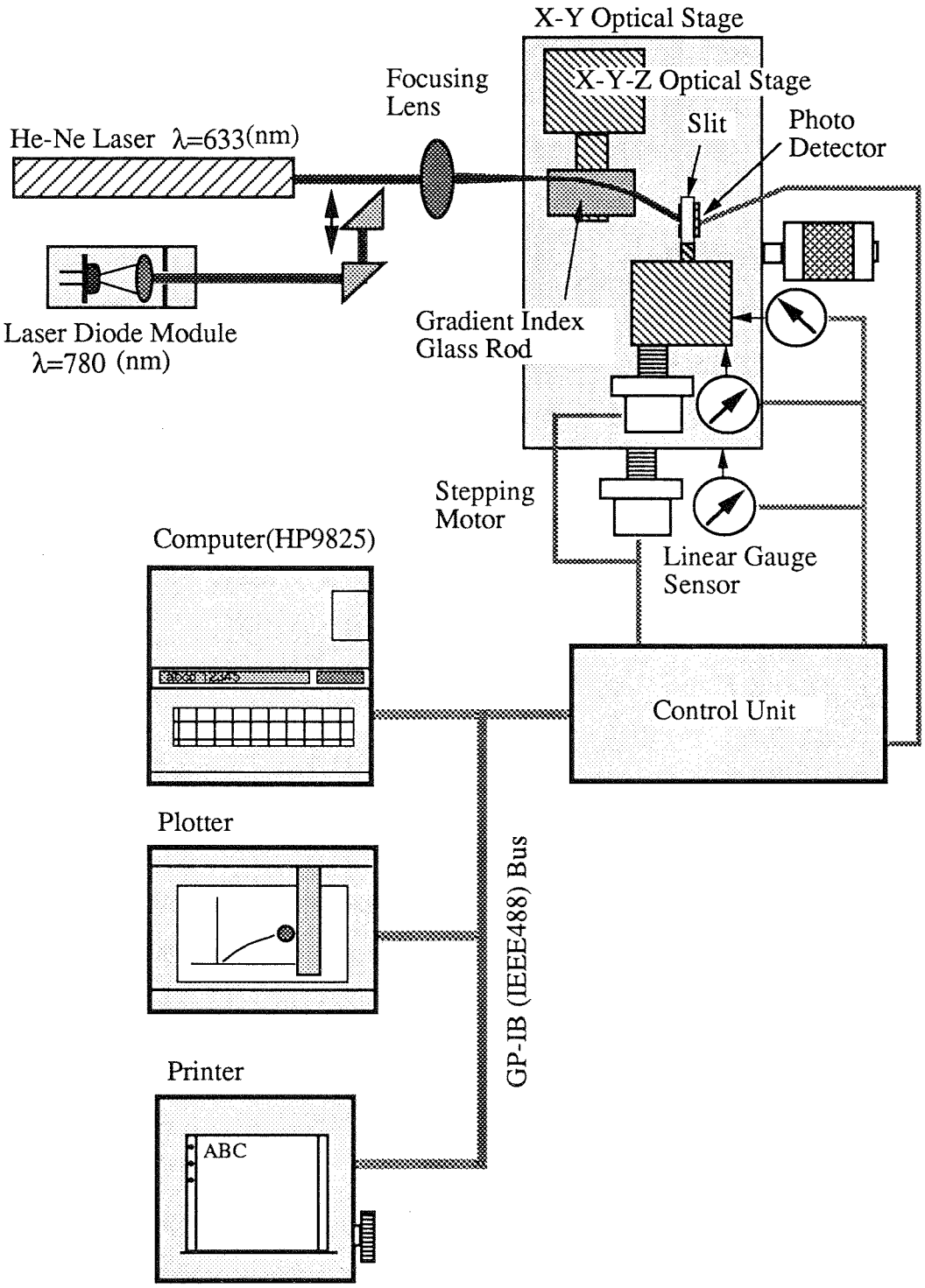
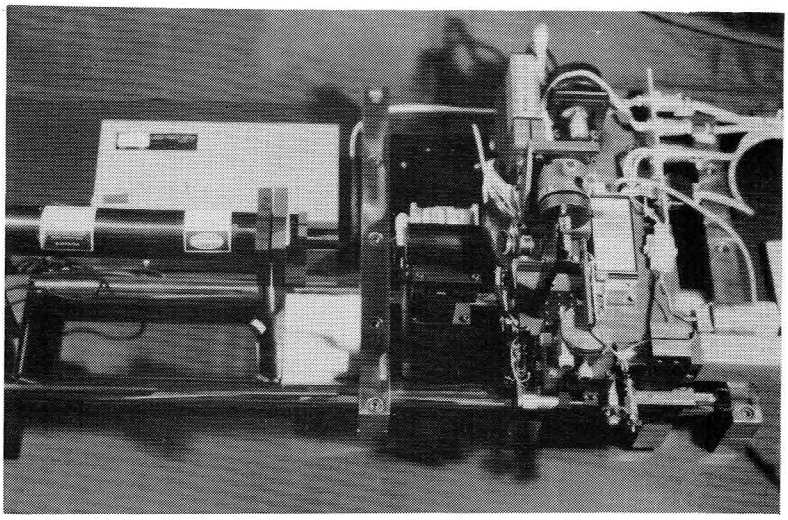


図4.10 球面収差自動測定装置の構成図



(A)測定部（光学系）

(B)制御部

図4.11 製作した球面収差自動測定装置

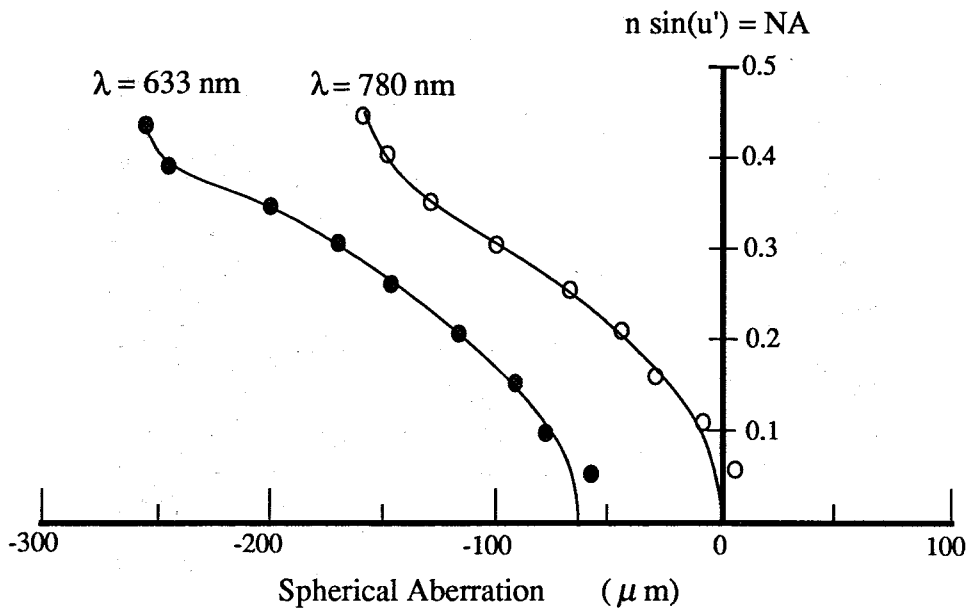


図4.12 2波長による同一媒質の球面収差（色収差）測定例

4.6 結　言

半径方向屈折率分布型媒質の屈折率分布型係数n_0, g, h_4, h_6, h_8 を測定する新しい測定法を提案した。n_0は試料の研磨形状を工夫することでプルフリッヒの屈折率計で測定が可能であり、10^{-4}の精度で測定できることを明らかにした。

g, h_4, h_6、h_8については、”光線追跡法”という光線追跡をシュミレートする形のまったく新しい測定法を提案し、コンピュータ制御された自動測定装置を開発した。本測定法の特長をまとめると以下のようになる。

(1) イオン交換等の化学的侵食を受ける媒質側面の影響を受けない。

(2) 波面収差測定では、球面収差が大きくなりすぎると干渉縞が多くなりすぎ測定困難になるが、本測定法は球面収差の大小に精度が依存しない。

(3) ある特定の屈折率分布からの偏差量を測るため、直接屈折率分布を測る方法より高精度である。

(4) 測定系のもつ光学系の収差の影響がない。

(5) 測定時間が短い（自動測定装置で約１０分間）。

これらの特長から過去のどの測定装置より実用的なものであり、ＣＤ用対物レンズのような回折限界系のレンズ媒質の屈折率分布測定には十分な精度をもつことを明らかにした。

第5章 コンパクトディスク用屈折率分布型平凸単レンズの試作 [18,20,21,34,35,37,38]

5.1 緒　言

本章では、前章までの設計結果と屈折率分布測定法の開発により実現が可能になったCD用屈折率分布型レンズの試作とその光学性能測定結果を述べる。

5.2 ではイオン交換法にて試作した屈折率分布型ガラスの屈折率分布を測定し、最終レンズ形状を決定する過程を述べ、**5.3** では球面の偏心をおさえた球面研磨法について述べ、**5.4** ではフィゾウ型干渉計をもちいた波面収差の測定結果を述べる。**5.5** では集光スポットの測定をおこない、**5.6** では最も実際的な測定法であるコンパクトディスクプレイヤへの実装テストを行い、問題なく音楽が再生されるのを確認して本レンズが実用に耐えることを実証した。

5.2 レンズ形状の決定

2.7 で決定した形状のレンズ"AG3645"を試作するにあたり、現実的な観点から以下の手順に従い製作した。

(1) イオン交換法により屈折率分布型ガラス媒質を製作開始する。

(2) 球面収差自動測定装置を用いて屈折率分布をモニタし所望の屈折率分布が得られたところでイオン交換を終了する。

(3) 屈折率分布を再度精密に測定する。

(4) 微小な範囲で球面の曲率半径とレンズ中心厚を変化させOPDrmsが最も少なくなるレンズ形状を決定する。

(5) レンズの平面研磨に続き、球面研磨を行なう。

(6) 光学性能の測定を行なう。

イオン交換法は、従来のセルフォックレンズを製作する方法とほぼ同じ方法を用いた。使用ガラスは"Snz-26"という型番のもので、"SLW" という品番で市販されているものより化学的耐久性が改善されたものである。従来のものと異なる点はレンズ外径が4mm と大きいことである。イオン交換時間はレンズ外径の自乗にほぼ比例するため大口径化で作製時間は増大したが、屈折率分布の変化は緩慢になり、**4.5** で述べた球面収差自動測定装置を用いて精密に屈折率分布制御が可能になった。

最初からレンズ形状を決めてしまうと屈折率分布制御は非常に厳しい制御を要求される。

そこで、**3.3,3.4** の考察より屈折率分布型媒質の屈折率偏差と形状誤差による偏差は同じ球面収差の変化となるため、公差をこえた屈折率分布となってもある程度球面の曲率半径やレンズ中心厚の調整でOPDrmsを仕様値以内に抑えることができる。むろん、イオン交換の同一ロットでは屈折率分布は同じであるため形状は一定である。

図5.1 には、試作に用いた屈折率分布型媒質（媒質長 Z_1=8.948mm)の球面収差測定値9点をエラーバーを用いてプロットしたものと、フィッティングして求めた球面収差カーブと屈折率分布係数 g, h_4, h_6, h_8 の値を示す。h_8までで十分フィットするためh_{10} 以上の項は必要なかった。ただし、光軸に最も近い光線は **4.4** で述べた理由によりフィッティングカーブにうまく乗らない。

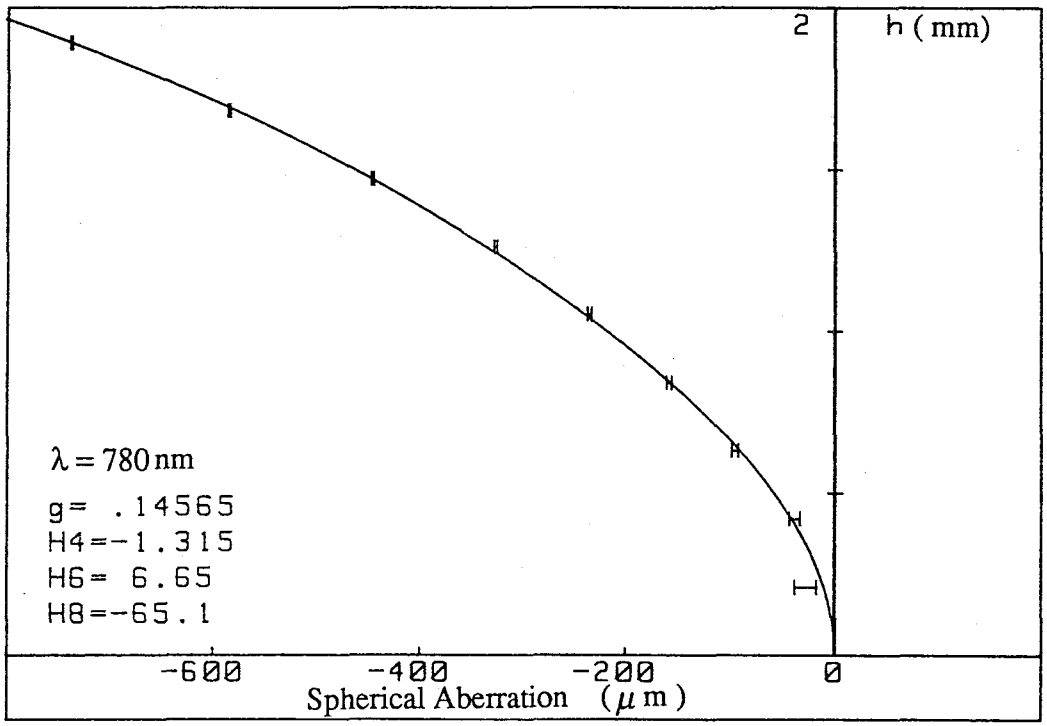
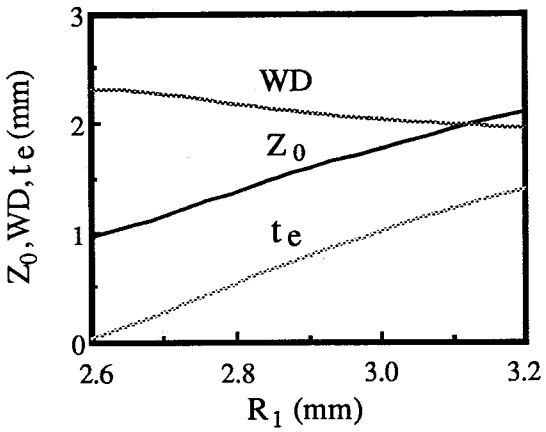


図5.1 レンズ試作に用いた媒質の球面収差とフィッティングカーブ（波長λ=780nm）

図5.2 は、レンズ最終形状を決めるため第1面の曲率半径R_1をパラメータとしてOPDrmsを計算したものである。OPDrmsを最小にするようにレンズ中心厚Z_0を最適な値に選んだ。R_1とZ_0の変化に伴い若干焦点距離が変動するが大きな変化ではない。図5.2 の結果よりR_1の変化にたいしてOPDrmsの変化は緩慢である。R_1が小さすぎるとコバ厚t_eが薄くなりすぎ、R_1が大きいと図2.15よりコマ収差が増加しレンズが厚くなる。t_eがあまり薄すぎない R_1=

2.80mmをレンズの最終形状とした。表5.1 は試作したレンズの最終形状と屈折率分布係数を示す。設計上、OPDrms＝0.0145λのレンズができるはずである。



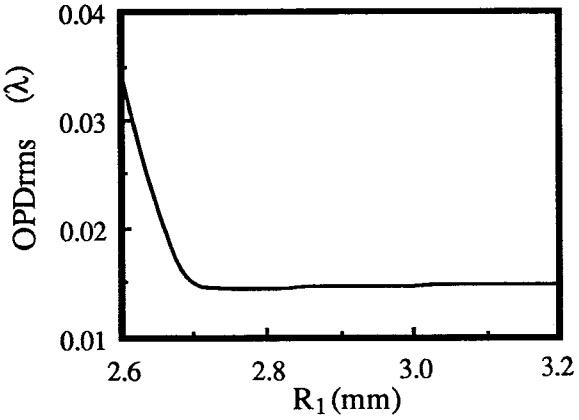


図5.2 R_1を変化させた時の各定数の変化（GILDSによる計算値）

表5.1　レンズの最終形状

外形形状	屈折率分布(λ=780nm)
R_1 = 2.800 mm	n_0 = 1.63362
Z_0 = 1.376 mm	g = 0.14565 mm^{-1}
WD = 2.175 mm	h_4 = -1.3147
Da = 1.680 mm	h_6 = 6.65
f = 3.716 mm	h_8 = -65.1

注）Da:第１面での光線有効系

5.3　球面と媒質との軸を出した球面研磨法

式(3.19)より媒質軸と球面の球心とのずれδy は 0.011mm 程度の公差しかなかった。通常レンズの球面研磨は、カーブジェネレータ[59]（Curve Generator ：以後略してCG）を用いて行なう。これは、カップ状の研削砥石を回転させ斜めに配置して球面を削るものである。均質ガラスの場合、媒質が軸を持たないため、球面を両面に付けた後にベルクランプ法などの心取り工程により外周部を削って心取りが行なえる。屈折率分布型媒質自体は軸をもつため、CGにかける時に心だしを行なう必要がある。通常のCGは心だし機構がないためδY=0.011mm 以内の偏心に抑えるのは困難であった。

本研究においては、図5.3，5.4 に示す工程を経て製作した。イオン交換の終了したガラスロッドを半導体ウエハを切断するのに用いられる内周刃切断機により精度よく輪切りにした後、ガラスロッドと同径の金属ロッドにバルサムを用いて貼りつける方法を考案した。[36] 金属ロッドは貼りつけ面の直角度の良いものを用い、バルサムで貼りつけ後はVブロックに載せ金属ロッドとガラスロッドの偏心を取り除いた。バルサムが固化したのち、調心機構を取り付けCGのチャックに金属ロッドを挿み球面を付けた。CGの調心機構はあらかじめ心だしをおこなっておりおよそ数μm 程度の偏心量に抑えることできた。

平面は切断後、酸化セリウムを研磨液としてピッチ皿による倣い研磨で仕上げた。球面は CGで球面を作製したのち、ダイアモンドペレットによるスムージングを経てピッチ皿による研磨仕上げをおこなった。

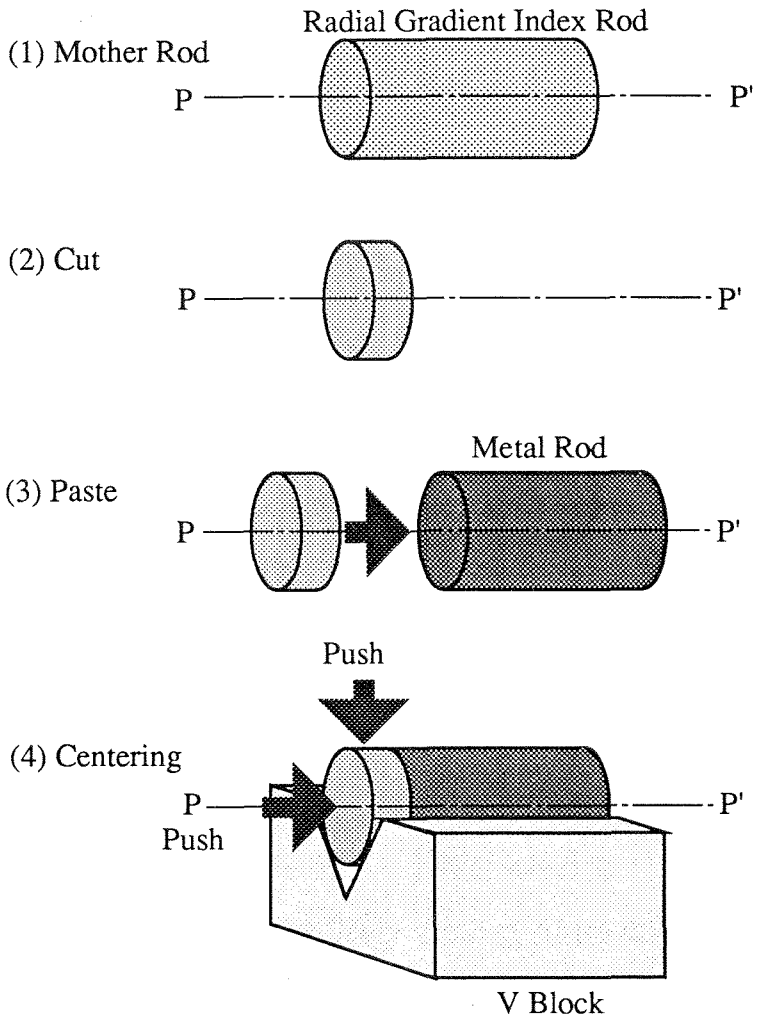


図5.3 レンズ媒質と同径金属ロッド棒との貼合わせ工程

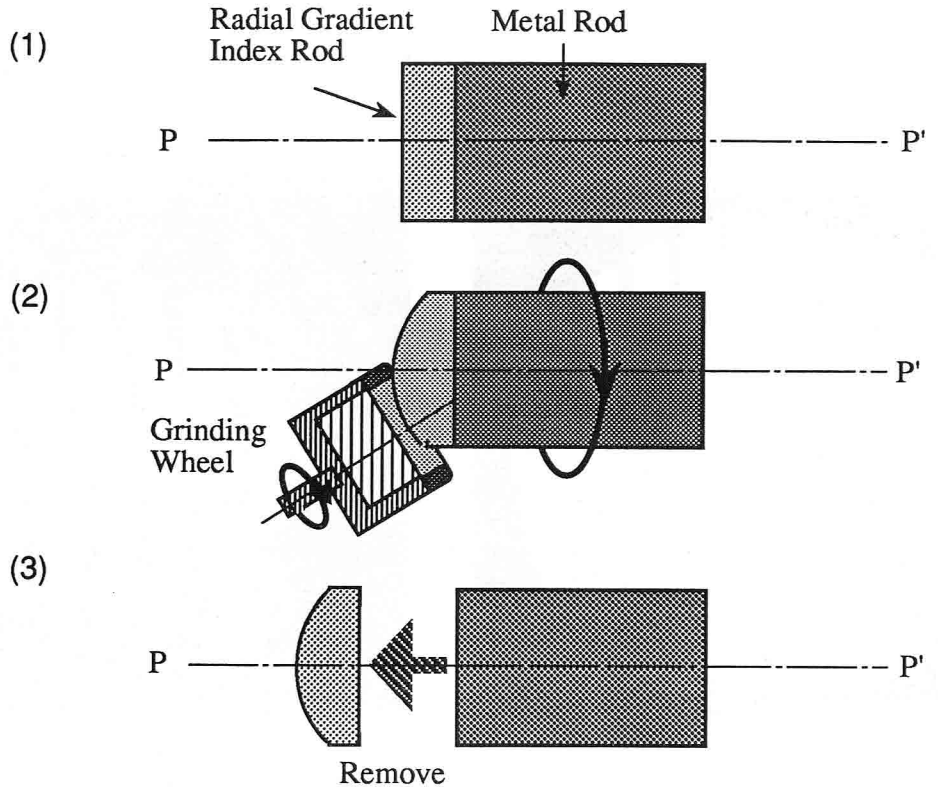


図5.4 カーブジェネレータ（CG）による球面の創成工程

図5.5は試作レンズの側面からの写真である。鉛筆の先に接着してある。

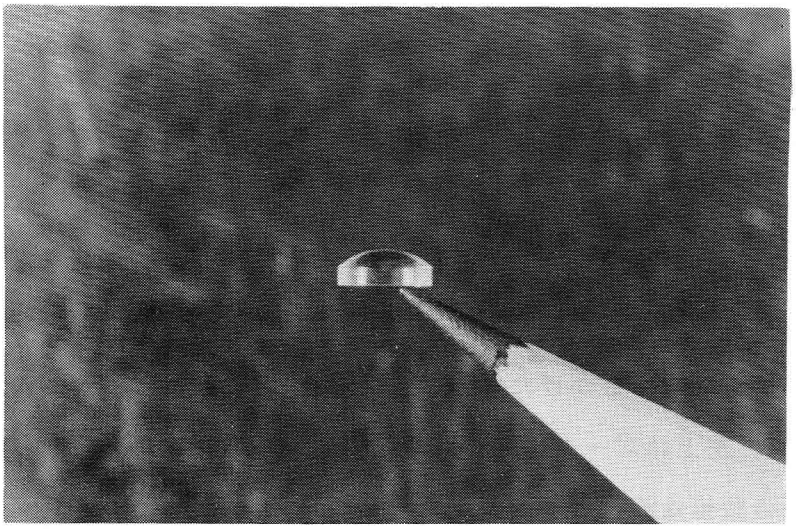
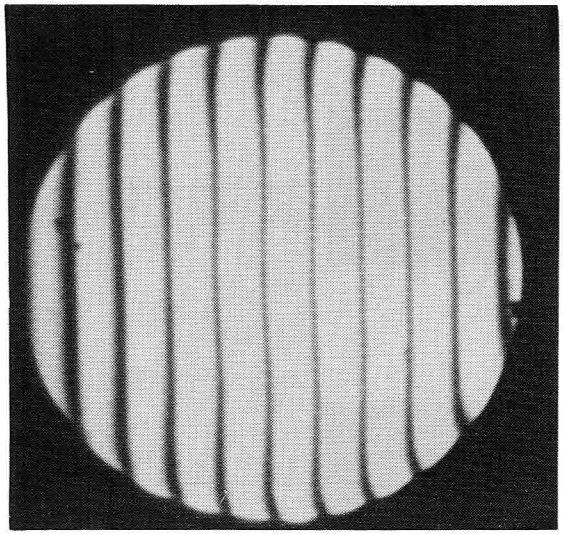
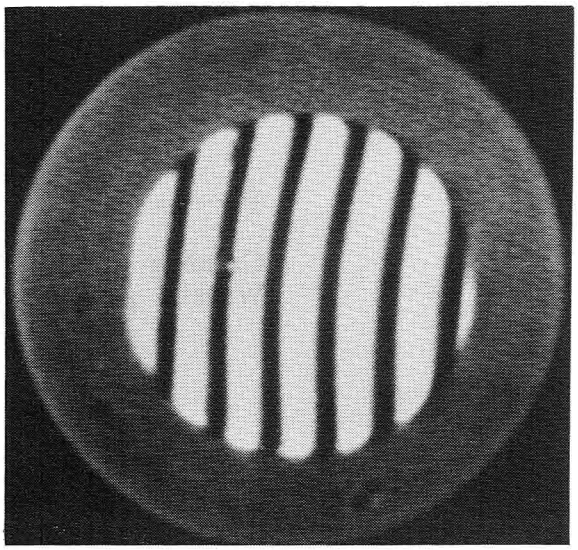


図5.5 試作レンズ（鉛筆の先に固定している。）

図5.6 は作製した平面(Plano surface)と球面(Spherical surface)の面精度をフィゾウ型干渉計で測定したものである。干渉縞1本は317nm のずれに相当する。きれいな面が仕上がっているのがわかる。



(A) 球面の面精度



(B)平面の面精度

図5.6 研磨後の面精度を測定した干渉縞（ZYGO MK-Ⅲ干渉計による）

5.4 波面収差測定

レンズの光学性能測定として図5.7に示すように、フィゾウ型干渉計を用いて波面収差測定を行なった。干渉計はZYGO社の"ZYGO-MKⅢ"を使用し、測定波長はλ=633nmである。参照球面レンズ（ Reference Sphere Lens ）は ZYGO社の NA=0.6 のものを使用した。CDの代わりに厚さt=1.2mmの光学ガラス板（材質はBK7、図中 Dummy Disk）を用いた。Da=3.3mmの絞りが入れてある。

図5.8は、3つの像高について測定した干渉縞の写真である。フィゾウ型干渉計は往復で使用されるダブルパスタイプの干渉計であるため、干渉縞1本はλ/2の位相シフトに相当する。写真の中心にティルトをかけた干渉縞を、右上には自乗平均値 OPDrms（写真上では、"RMS-PWR"の表示）、左上はピーク値 OPD_{P-P}（写真上ではPV-PWR）が波長単位で表示されている。真ん中下の数値は波面収差を計測する時の有効測定点数である。左下の表示は今回は無視してもよい値である。像高が高くなると計算上非点収差成分が大きくなるが、測

定値においても干渉縞が樽型[60]に膨らんでおり、非点収差が存在していることが確認できた。なお、中心部の小さな干渉縞の膨らみは、**4.4** で述べたように中心部の屈折率分布が式(2.8)で表わされる２乗分布からはずれているためである。

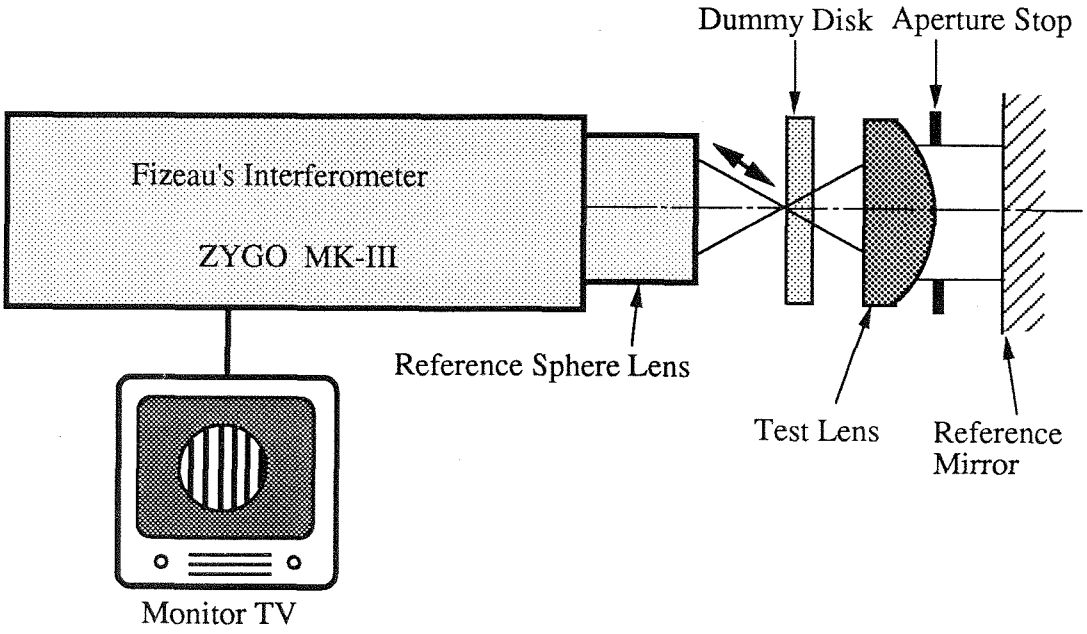
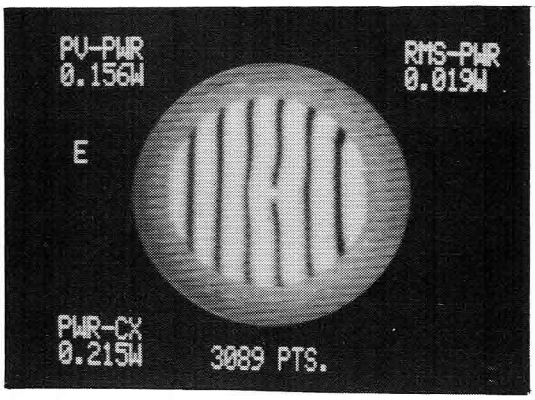


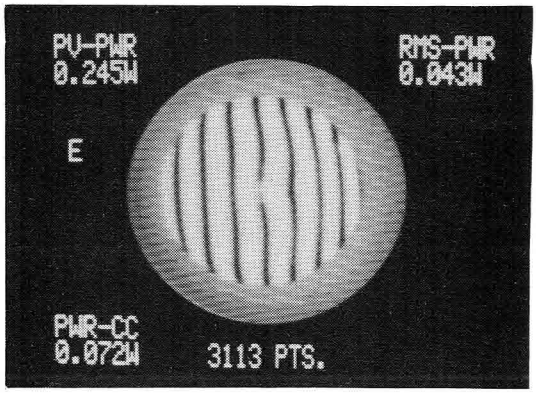
図5.7 波面収差測定の光学系構成図

図5.9はOPDrmsと像高 Y'についての関係を測定したものである。測定は干渉計の制約よりλ=633nmでしか出来ない。計算値はλ=633,780nm の２波長について記入している。計算値とほぼ一致した測定値がえられている。軸上ではOPDrms <0.02λとなっており回折限界系の光学性能である。なお、レンズ形状はλ=780nmで球面収差が最小になるよう最適化されている。λ=780nmでの視野直径は約 0.2mm ほど得られている。波面収差の測定結果より、ほぼ計算どおりのレンズが試作できたことを確認した。表5.2は本研究における設計仕様（表2.2）と試作レンズの仕様との対比表である。これより、設計仕様をすべて満たしていることを確認できる。

(A) Y'=0



(B) Y'=0.07mm



(C) Y'=0.10mm

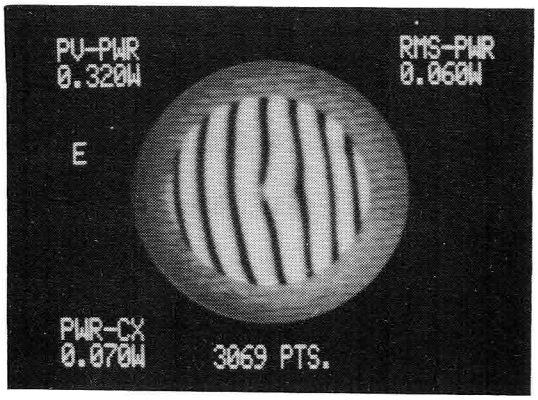


図5.8 試作レンズの波面収差測定結果（干渉縞と波面収差値）

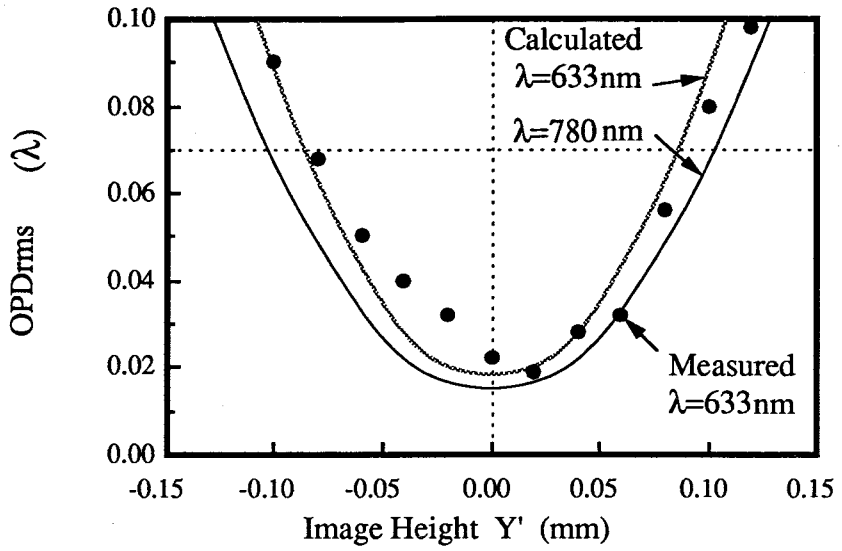


図5.9 波面収差の計算値と実測値との対比

表5.2 設計仕様と試作レンズ仕様との対比

項目	設計仕様	試作レンズ
使用波長(λ)	780nm	780nm
共役長（物像間距離）	∞	∞
作動距離(WD)	2.0mm以上	2.175mm
開口数(NA)	0.45	0.45
視野直径[注]	0.1mm以上	0.2mm
球面収差	補正	補正
コマ収差	補正	補正

[注] OPDrms < 0.07λで規定する

5.5 集光特性の測定

波面収差の測定より、より実際的の評価法として集光スポット測定がある。測定は、図5.10に示すように光源としてλ=633nmのHe-Neレーザを使用し、ビームイクスパンダでビーム径を拡大しレンズに一様な強度を持つ平面波が入射するように設定した。CDは波面収差測定時と同様にガラス板で代用し、集光スポットは金属顕微鏡で拡大した後、ITVカメラで観察した。顕微鏡の対物レンズは NA=0.6のものを使用し、総合倍率は520倍である。ITVカメラは計測用のニュービコンシステム（浜松フォトニクス社製）を使用した。ITVカメラコントローラはGP-IBインタフェースを経由して光強度分布をコンピュータに送り、$1/e^2$スポットサイズが計算される。

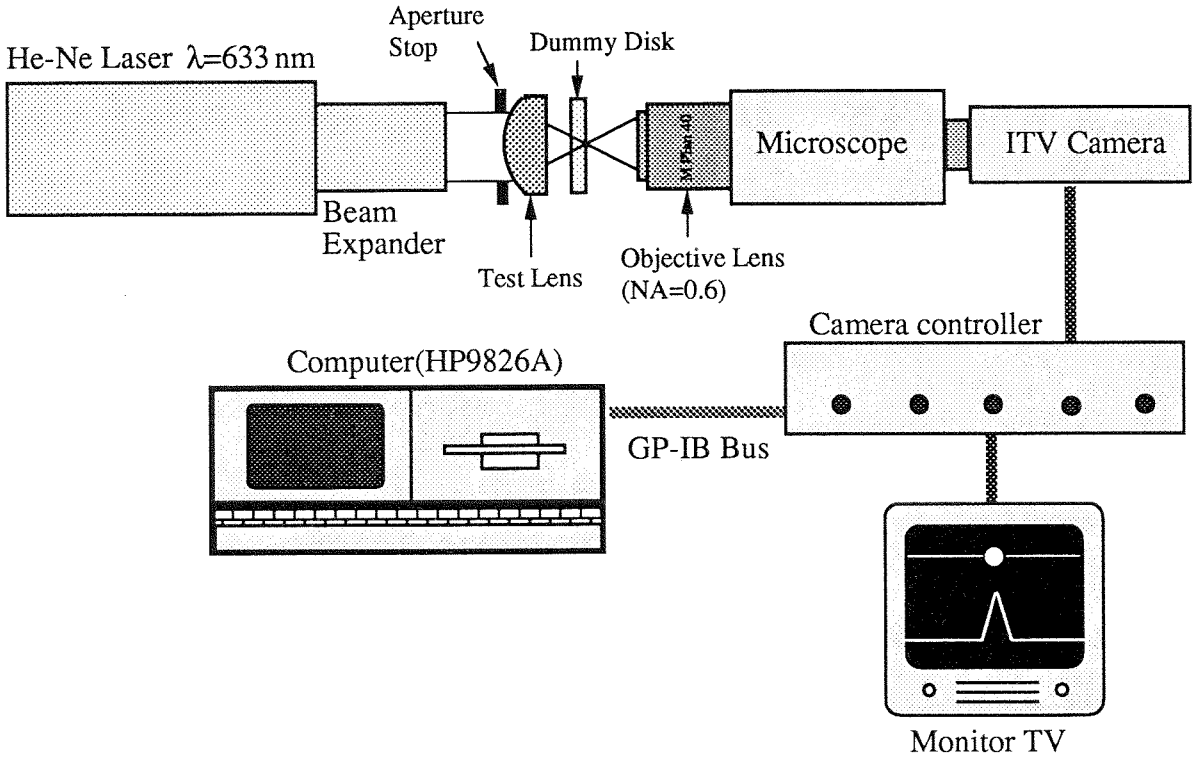


図5.10 集光スポット径測定装置の構成図

図5.11は、ITVカメラで拡大撮影した軸上入射時（Y'=0）の集光スポット像をモニターTV上で観察した写真である。図の上部の白丸がスポット像、それを横切る水平線は強度分布を表示する位置を示すマーカライン、下部は上部マーカライン上の強度分布である。図中に1μmのスケールを表示している。

ぼぼ円対称なきれいなスポット像となっている。コンピュータで測定したスポットサイズはW=1.26μm（$1/e^2$直径）であった。収差が無いときの計算値は式(2.11)より

$$W = 0.82\lambda/NA \tag{2.11}$$

となる。λ=633nm, NA=0.45を代入すると W=1.15μmとなり、実測値が約10%ほど大きめなスポットになっている。測定値のばらつきが約 0.1μm程度あることや、顕微鏡自体の残存収差も加わることから、ほぼ回折限界値まで絞れていると判断される。メインローブに対してサイドローブの高さは十分抑圧されている。

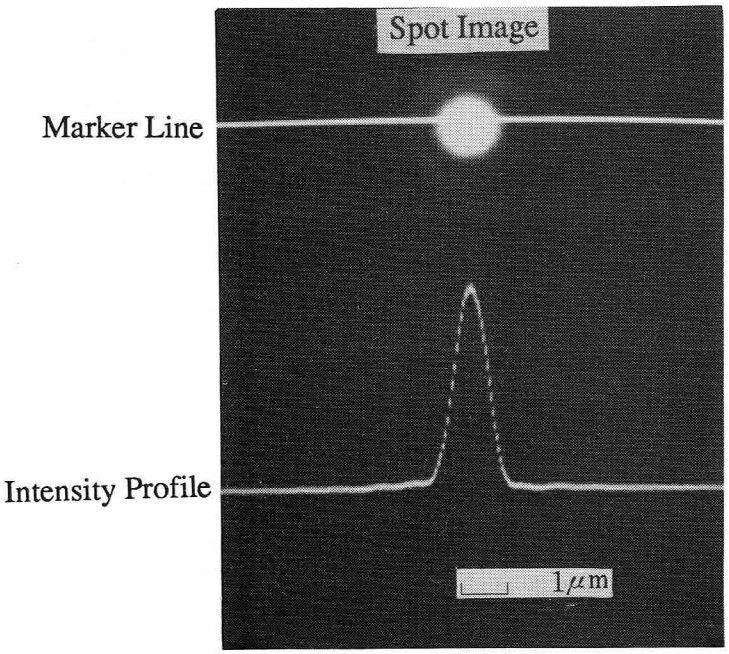


図5.11 集光スポット像と強度分布

5.6 コンパクトディスクシステムへの実装テスト

5.4, 5.5では、レンズ単体の光学性能を測定したにすぎなかった。最も実際的な評価として、市販のCDプレイヤに搭載し音楽再生が可能であることを確認した。

市販のCDプレイヤの光ピックアップ部分を分解し、最初から搭載されていた2群3枚構成の均質組合わせ球面レンズを取り外し、アルミ製マウントに納められた"AG3645"を取り付けた。均質レンズに比べて焦点距離が20%短く、ビーム径も細いため、検波出力信号の強度調整として感度設定用のトリマを調整することにより再生音楽信号が得られた。図5.12

は"AG3645"を搭載した光ピックアップの拡大写真、図5.13は"アイパターン"[61]と呼ばれる再生信号波形である。アイがよく開いた良好な SN比の信号が得られている。

図5.14は従来の3枚組均質レンズと本レンズの大きさを比較したものである。左より3枚組球面レンズを2つに切断したもの、3枚組球面レンズ、本レンズ単体、本レンズを金枠に組み込んだものである。寸法や重量の比較を表5.3に示す。本レンズが最も小型で軽量であることがわかる。

表5.3 各種レンズの形状比較

レンズ形状	型番	長さ(mm)	直径(mm)	重量(g)
屈折率分布型ガラスレンズ	AG3645	1.38	4.0	0.05
屈折率分布型ガラスレンズ[注]	AG3645-1	2.00	7.0	0.11
均質ガラス3枚組レンズ	AV4647	4.94	7.6	0.44
プラスチック非球面レンズ	AP4545	3.55	7.4	0.12

[注] アルミ製金枠に装着した場合。金枠がなくてもかまわない。

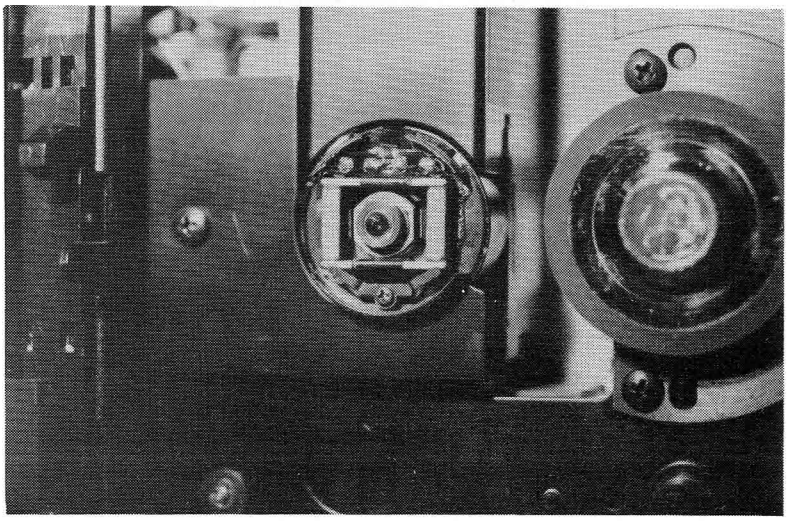


図5.12 市販のコンパクトディスクプレイヤに組み込んだ試作レンズ（ピックアップ部）

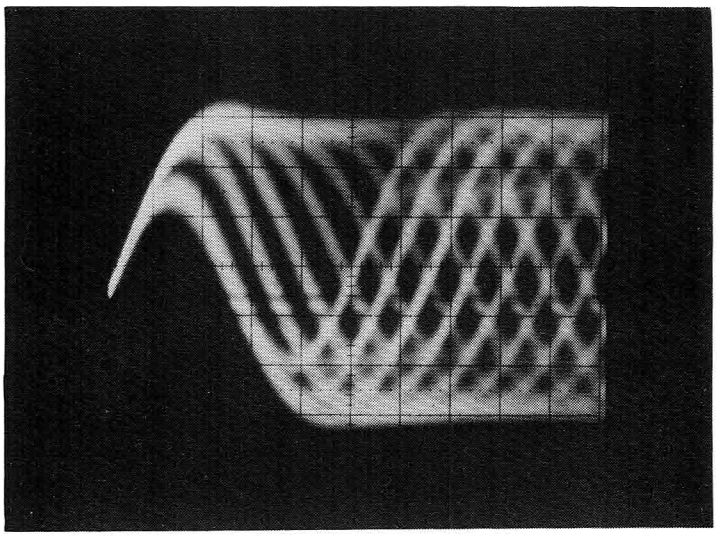


図5.13 再生信号のアイパターン

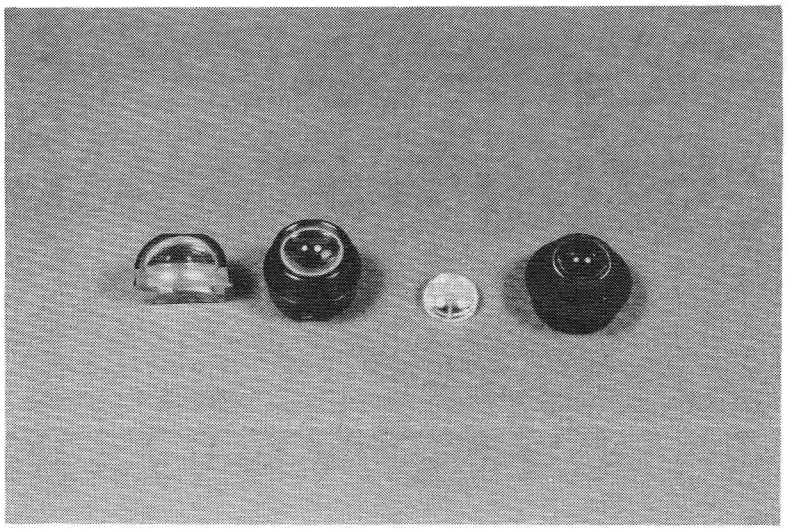


図5.14 従来の均質3枚組レンズ（左側）と本試作レンズ（右側）

5.7 結　言

半径方向屈折率分布型ガラスを用いてCD用対物レンズを試作し、その光学性能を測定しほぼ設計どおりのものが出来ていることを確認した。まず、イオン交換法で作製した屈折率分布型ガラスロッドの屈折率分布係数を4章で述べたプルフリッヒ屈折率計と自動球面収差測定装置により測定した。コンピュータを用いた光線追跡でレンズの曲率半径R_1とレンズ中心厚Z_0を変化させ、最もOPDrmsが小さくなる形状を決定した。そして、屈折率分布型ガラスロッドを同径の金属棒に貼付け偏心を無くした研磨法を開発した。その後、試作したレンズの光学性能を測定した。そして、以下の結果を得た。

(1) 波面収差をフィゾウ型干渉計で測定したところ、軸上で OPDrms = 0.019λとなり設計値の 0.017λ(λ=633nm)とほぼ一致する回折限界系の光学性能を示した。

(2) 軸外の波面収差特性もほぼ設計値どおりであった。

(3) 集光スポット径は$1/e^2$直径で1.26μmがえられ、無収差時の1.15μmとよく一致した。

(4) スポット像も円対称でサイドローブの抑圧されたものであった。

(5) 実際的なテストとして市販のCDプレイヤに"AG3645"に装着し音楽を再生することができた。

(6) 試作レンズは他のどの種のレンズと比べても最も小型で軽量なものであった。

以上の測定より、世界で初めて試作に成功した屈折率分布型CD用対物レンズの実用性が確認できた。

第6章 結　論

本研究において、半径方向屈折率分布型ガラス媒質を用いたコンパクトディスクシステム用対物単レンズの設計、試作と光学性能測定を行い、いくつかの重要な結果を得た。以下では、本研究で得られた結果を要約して本論文の結論とする。

第2章では、3種類のCD用屈折率分布型対物単レンズについてレンズ設計を行い光学性能を比較した。得られた結果を以下に示す。

(1) いずれの形状も球面収差は屈折率分布の最適化で補正できる。

(2) 両面を平面とする形状ではコマ収差を補正できない。

(3) 球面を1面加えるとコマ収差は補正できる。

(4) 第1面を球面とする形状が作動距離も大きく小型軽量である。

(5) 第1面を球面とする平凸形状をレンズ形状に決定した。

(6) 既存のガラス媒質を用いることが可能である。

第3章では、第2章で決定した形状のレンズ"AG3645"についての収差と公差を計算した。波面収差計算の結果、コンパクトディスク用対物レンズの仕様を満たすことを確認し、さらに公差の計算を行なった。得られた結果を以下に示す。

(1) 形状誤差ではレンズ中心厚Z_0の公差が最も厳しく、球面収差の増加を招く。

(2) 屈折率分布の偏差は球面収差の増加となることが判明し、屈折率分布測定時の要求される測定精度を明らかにできた。

(3) 面の偏心はコマ収差の増加を招き球面と平面の倒れ公差が厳しく、偏心のないレンズ研磨法の開発が不可欠であることが判明した。

第4章では、半径方向屈折率分布型媒質の屈折率分布を測定する方法を新しく提案し、その測定精度とレンズの公差との比較を行なった。得られた結果を以下に述べる。

(1) レンズ中心軸上の屈折率n_0は、プルフリッヒの屈折率計を用いた"全反射法"で10^{-4}の精度が得られる。

(2) 2次以上の項 g, h_4, h_6, h_8については、"光線追跡法"を用いて公差以内の精度で測定が可能である。

(3) "光線追跡法"の自動測定装置を製作し、10分間で測定ができた。

第5章では、設計されたレンズを実際に試作し光学性能を測定した結果を述べる。得られた結果を以下に示す。

(1) 軸を出す球面研磨法を開発し、数μm以下の偏心量で研磨できた。

(2) λ=633nmにおいてOPDrms=0.019λの波面収差（軸上）が得られた。

(3) 軸外の波面収差の測定値も計算値とほぼ一致し、視野直径は約 0.2mm あり設計仕様を満たした。

(4) 集光スポットサイズはW=1.26μm であり、無収差時の値W=1.15μm より 10% 大きい程度であった。

(5) 市販のコンパクトディスクプレーヤに搭載してCDを再生することができた。

(6) 最も小型で軽量なレンズが実現出来た。

最後に表6.1に設計仕様とガラス３枚組球面レンズと本研究で試作した屈折率分布型ガラス単レンズの仕様を比較する。

表6.1 設計仕様、試作レンズ、従来レンズとの対比

項目	設計仕様	試作レンズ	ガラス３枚組球面レンズ
使用波長(λ)	780nm	780nm	780nm
共役長（物像間距離）	∞	∞	∞
作動距離(WD)	2.0mm以上	2.175mm	2.0mm
開口数(NA)	0.45	0.45	0.47
視野直径[注]	0.1mm以上	0.2mm	0.15mm
球面収差	補正	補正	補正
コマ収差	補正	補正	補正
長さｘ直径	-	1.37x4.0mm	4.94x7.6mm
重量	-	0.05g	0.44g

[注] OPDrms < 0.07λで規定する

以上の研究成果により、世界で初めて設計仕様をすべて満たす屈折率分布型ガラスを用いた小型軽量(重さ 0.05g)のCD用対物単レンズの設計試作に成功し、NA=0.45 と言う非常に明るいレンズでありながら回折限界系の光学性能が得られ実用に耐えうることを実証した。さらに、屈折率分布を高精度に測定する”全反射法”と”光線追跡法”も考案した。ちなみに、現在、市販のCDプレーヤ用の対物レンズとして量産されている。

謝　辞

本研究をまとめるにあたり終始御懇切なる御指導と御鞭撻を賜った大阪大学工学部電子工学科西原浩教授、裏克己教授、応用物理学科一岡芳樹教授に衷心より御礼のことばを申し上げます。

また、本論文の作成にあたり懇篤なる御指導を戴くとともに種々の御高配を賜った大阪大学工学部電子工学科濱口智尋教授、吉野勝美教授に深謝の意を表します。

筆者が大阪大学在学中から、つねづね御指導、御教示を戴いている元大阪大学工学部電子工学科小山次郎教授（現在芝浦工業大学）、尾崎弘教授（現在関西大学）、故中井順吉教授、塙輝雄教授（現在大阪工業大学）、寺田浩詔教授（現在情報システム工学科）、ならびに、現電子工学科児玉慎三教授、白川功教授、春名正光助教授、栖原敏明助手に深謝の意を表します。

本研究の遂行にあたり、終始御懇切なる御教示と御鞭撻を賜り、また研究の機会を与えてくださった日本板硝子株式会社中央研究所元常務取締役所長新木信夫博士（現顧問）、大里信義所長、元技師長北野一郎博士（現常勤顧問）、遠山実主席研究員に厚く御礼申し上げます。

また、屈折率分布型ガラスの試作をして戴いた、光事業部赤沢旭主席技師、小林勝主任技師に心より感謝します。

本研究の期間中各過程において協力して戴いた、中央研究所上野裕司研究員、市川裕之研究員、山根剛研究員、北野雅巳氏、田中俊明氏に心から感謝します。

末筆ながら、本研究の期間中終始有益なる討論と協力をいただいた、日本板硝子株式会社中央研究所、光事業部の各位に心から感謝いたします。

参 考 文 献

1) G.Bouwhuis and P.Burgstede :"The optical scanning system of the Philips 'VLP' record player" , Philips Tech. Rev.,33, pp.186-189 (1973).

2) M.G.Carasso, J.B.H.Peek and J.P.Sinjou:"The Compact Disc Digtal Audio system" ,Philips Tech. Rev.40, 6, pp.151-155 (1982).

3) 後藤：" ビデオディスク用集光レンズ" ,特開昭55-4068.

4) K.Shintani and S.Kubota : "Evaluation of a diffraction-limited plastic bi-aspheric objective lens",CLEO'84 Tech.Digest,WB2 (1984).

5) T.Kiriki, N.Izumiya, K.Sakurai and T,Kojima : "Plastic aspheric lens for the Compact Disc System",CLEO'84 Tech. Digest,WB3 (1984).

6) 泉谷、石灰、広田；" 非球面レンズの高精度プレス" ,Micro Optics News,3,pp.42-45 (1985).

7) R.O.Maschmeyer, R.M.Hujar, L.L.Carpenter, B.W.Nicholson and E.F.Vozenilek : "Optical performance of a diffraction-limited molded-glass biaspheric lens", Appl.Opt.,22,pp.2413-2415 (1983).

8) 裏、栖原、西原、小山：" 光ディスクピックアップの光集積回路化" 、電子通信学会論文誌(C),J69-C,5,pp.609-615 (1986).

9) D.T.Moore:"Design of Singlets with Continiously Varying Indices of Refraction ",J.O.S.A.,61,pp.886-894 (1971).

10) D.T.Moore and P.J.Sand:"Optical system comprising a single element having a continiously varying index of refraction",U.S.Patent No.3729253 (1973).

11) 松下、小泉、都甲、木村：" 光伝送体" 、特公昭47-10455.

12) P.O.McLaughlin, M.Toyama and I.Kitano : "Axial gradient index singlet collimator lens for the compact disk system",Proceedings SPIE,695,pp.194-198 (1986).

13) 小池、大塚：" 分布屈折率ポリマーレンズと光導波路" ,応用物理,11,pp.1447-1452 (1987).

14) 西、上野、遠山、北野：" 球面収差を補正した屈折率分布型コリメータレンズ" 、昭和59年秋季応用物理学会全国大会予稿集,14p-L-10 (1984).

15) Code-V Designer's Reference Mannual, Optical Research Associates, 550 N.Rosemead Blvd. Pasadena CA 91107 USA.

16) 菊池："屈折率分布型レンズの光ディスク用光ピックアップへの応用"，光学，10，pp. 118-127 (1981).

17) 青野："屈折率分布型レンズを用いた光ディスク用光ピックアップの設計"，Micro Optics News，1，pp.126-130 (1983).

18) 西、市川、遠山："光ディスク用屈折率分布型対物レンズ"，光学，15，pp.303-308 (1986).

19) H.Nishi and M.Toyama : "Design of an Aplanatic GRIN Singlet for the Compact Disk"，Tech. Digest，International Lens Design Conference (1985)，paper TuB5.

20) H.Nishi and M.Toyama :" Design of an aplanatic GRIN singlet for the compact disk system"，Proc. SPIE，554，pp.301-305 (1985).

21) H.Nishi，H.Ichikawa，M.Toyama and I.Kitano:"Gradient-index objective lens for the compact disk system"，Appl.Opt.，25，pp.3340-3344(1986).

22) K.Iga and Y.Kokubun:"Formula for calculating the refractive index profile of optical fibers from their transverse interference"，Appl.Opt. 17，pp.1972-1974 (1978).

23) M.Ikeda, M.Tateda and H.Yoshikiyo : "Refractive Index Profile of a Gradient Index Fiber:Measurement by a Reflection Method", Appl.Opt., 14, pp.814-815, (1975).

24) T.Kitano, H.Mastumaura, M.Furukawa and I.Kitano :"Measurement of Forth-order Aberration in a Lens-Like medium", IEEE J.Quant.Electro., QE-9 pp.967-971 (1973).

25) E.Rawson and R.Murry : "Interferometric Measurement of SELFOC Dielectric Constant Coefficients to Sixth Order" , IEEE J.Quant.Electro.，QE-9, pp.1114-1118 (1973).

26) 西、山本、遠山："セルフォックレンズの歪曲像評価法"、昭和57年秋季応用物理学会全国大会予稿集、28p-I-5 (1982).

27) 西："屈折率分布媒質の屈折率測定方法"、特開昭60-170739.

28) I.Kitano, M.Toyama and H.Nishi: "Spherical aberration of gradient-index rod lenses",Appl.Opt.,22,pp.396-399 (1983).

29) 西、遠山："セルフォックマイクロレンズの球面収差測定と屈折率分布定数の算出"、電子通信学会光・電波部門全国大会 p439 (1982).

30) 遠山、西："屈折率分布型レンズの収差測定と解析"、第7回光学シンポジウム、pp.5-6 (1982).

31) 西："屈折率分布レンズの収差測定方法"、特開昭58-223033.

32) 遠山、西："屈折率分布型レンズの収差測定と解析"、光学,11,pp.546-552 (1982).

33) 西、遠山： "セルフォックレンズの球面収差自動測定と屈折率分布定数の算出"、昭和60年春季応用物理学会全国大会予稿集,29a-ZD-2 (1985).

34) N.Yamamoto, H.Nishi, K.Nishizawa and I.Kitano : "Selfoc micro-lens with a spherical surface",Appl. Opt.,21,pp.1021-1023 (1982).

35) H.Nishi, M.Toyama, T.Yamagishi, K.Fujii and H.Ueno : "Plano-convex Gradient-Index Singlet",Topical Meeting on Gradientindex Optical Imaging System Tech. Digest,C2 (1983).

36) 山根、遠山、西、北野、田中："ワーク貼付け装置"、特開昭62-127374.

37) 西、遠山："屈折率分布型レンズを用いた光ディスク用対物レンズ"、昭和60年春季応用物理学会全国大会予稿集 29a-ZD-3 (1985).

38) 西："ガラス製屈折率分布型レンズ"、応用物理,57,pp.757-758 (1988).

39) A.Sharma,D.V.Kumar and A.K.Ghatak:"Tracingrays through gradient-index media: a new method",Appl.Opt.,21,6,pp.984-987 (1982).

40) J.B.Scarborough : "Numerical Mathmatical Analysis" (Johns Hopkins U.P., Baltimore,1966),Chap.13,Article 116.

41) A.Sharma : "Computation of Optical Path Length in Gradient Index Optical Imaging System",Post deadline Paper in GRIN'84,(Monterey) USA.

42) 松居："レンズ設計法"、共立出版,p134 (昭56).

43) 牧之内、鳥居："数値解析"、オーム社,p137 (昭50).

44) M.Born and E.Wolf:"Principles of Optics",東海大学出版,pp.600-605 (昭50).

45) M.Born and E.Wolf:"Principles of Optics",東海大学出版,p697 (昭50).

46) M.Born and E.Wolf:"Principles of Optics",東海大学出版,pp.288-292 (昭50).

47) 遠山："不均質媒体レンズのGaussian Optics", 光学技術コンタクト, 21, pp.38-44 (1983).

48) 松居："レンズ設計法"、共立出版, p59 (昭56).

49) M.Born and E.Wolf:"Principles of Optics", 東海大学出版, p.321(昭50).

50) M.Born and E.Wolf:"Principles of Optics", 東海大学出版, p.278(昭50).

51) M.Born and E.Wolf:"Principles of Optics", 東海大学出版, pp.726-732(昭50).

52) 浅野:"レンズ光学の理論と実際", 光学工業技術協会, p172 (昭59) .

53) 浅野:"レンズ光学の理論と実際", 光学工業技術協会, pp.131-167(昭59).

54) 久保田, 浮田, 合田:"光学技術ハンドブック", 朝倉書店, p.273 (昭62).

55) 久保田, 浮田, 合田:"光学技術ハンドブック", 朝倉書店, p.270 (昭62).

56) 久保田, 浮田, 合田:"光学技術ハンドブック", 朝倉書店, p.245 (昭62).

57) 鈴木、小倉、小瀬:"固体撮像素子を用いた写真レンズの球面収差の測定", 光学, 8, pp. 265-270 (1979).

58) 末松、伊賀:"光ファイバ通信入門" 、オーム社、p.34 (1976).

59) 久保田, 浮田, 合田:"光学技術ハンドブック", 朝倉書店, p.592 (昭62).

60) D.Malacara: "Optical Shop Testing", John Wiley and Sons, pp.70-75 (1978).

61) 電子通信学会編："電子通信ハンドブック"、オーム社、p846 (1979).

著者関連文献

（1）論　文

1) I.Kitano, M.Toyama and H.Nishi: " Spherical aberration of gradient-index rod lenses",Appl. Opt.,22,pp.396-399 (1983).

2) 遠山、西："屈折率分布型レンズの収差測定と解析"、光学、11,pp.546-552 (1982).

3) N.Yamamoto,H.Nishi,K.Nishizawa and I.Kitano:"Selfoc microlens with a spherical surface",Appl. Opt.,21,pp.1021-1023 (1982).

4) 西、市川、遠山："光ディスク用屈折率分布型対物レンズ"、光学、15, pp. 303-308 (1986).

5) H.Nishi and M.Toyama : "Design of an aplanatic GRIN singlet for the compact disk system", Proc. SPIE, 554,pp.301-305 (1985).

6) H.Nishi, H.Ichikawa, M.Toyama and I.Kitano :"Gradient-index objective lens for the compact disk system", Appl.Opt.,25, pp.3340-3344 (1986).

7) 西："ガラス製屈折率分布型レンズ"、応用物理、57,pp.757-758 (1988).

（2）国際会議発表

1) H. Nishi and M. Toyama:"Design of an Aplanatic GRIN Singlet for the Compact Disk",Technical Digest,International Lens Design Conference, paper TuB5,Cherry Hill U.S.A. (1985).

2) H.Nishi, M.Toyama, T.Yamagishi, K.Fujii and H.Ueno : "Plano-convex Gradient-Index Singlet", Topical Meeting on Gradient-index Optical Imaging System Tech. Digest,C2, Kobe Japan (1983).

（３）学会発表（国内）

1) 西、山本、遠山 ： ”セルフォックレンズの歪曲像評価法”、昭和57年秋季応用物理学会全国大会予稿集、28p-I-5 (1982).

2) 西、遠山：”セルフォックマイクロレンズの球面収差測定と屈折率分布定数の算出”、電子通信学会光・電波部門全国大会 p439(1982).

3) 遠山、西：”屈折率分布型レンズの収差測定と解析”、第７回光学シンポジウム、pp.5-6 (1982).

4) 西、遠山：”セルフォックレンズの球面収差自動測定と屈折率分布定数の算出”,昭和60年春季応用物理学会全国大会予稿集 29ａ-ZD-2(1985).

5) 西、上野、遠山、北野：”球面収差を補正した屈折率分布型コリメータレンズ”,昭和59年秋季応用物理学会全国大会予稿集 14p-L-10 (1984).

6) 西、遠山：”屈折率分布型レンズを用いた光ディスク用対物レンズ”、昭和60年春季応用物理学会全国大会予稿集 29a-ZD-3 (1985).