

# 光磁気ディスク用プラスチック 非球面対物レンズ

## A Plastic Aspherical Objective for a Magneto-optical Disc

荒井則一  
服部洋幸  
オプト事業部  
光学開発センター



Abstract:

Plastic aspherical objectives have been widely used in various types of optical heads for CD players. For the purpose of improving the access time of MO(Magento-Optical) disc drives, it is necessary to reduce the weight of the objectives. Since plastic objectives are light in comparison to glass combination objectives, plastic singlet objectives suitable for application in MO disc drives would present a distinct advantage. On the other hand, plastic singlet objectives have presented several obstacles: (1)chromatic aberration, (2)birefringence, and (3)lack of durability in a MO environment. We have overcome these difficulties and developed a plastic singlet objective for use in MO disc drives by adopting means described as follows.

In order to ensure the reliability of MO disc drives, it is necessary to correct chromatic aberration. Since chromatic correction of a singlet is impossible, heavy achromatic glass combination objectives are usually employed. We solved this problem by designing a special collimator with over-corrected chromatic aberration to compensate for the chromatic aberration of the singlet objective.

A certain amount of birefringence that deteriorates the S/N ratio of readout signals remains in the conventional plastic aspherical objective for CD use. We have developed a new molding system that reduces the birefringence of molded lenses. The retardation of the objective made by the new system is reduced to 1/7 of that of objectives made by the former system. This reduces birefringence to a level acceptable for MO use.

In ensuring durability to environment, we carried out a variety of tests and found that by controlling specifications, material, and shapes, we were able to design plastic aspherical singlet objectives whose wavefront aberration caused by temperature and/or humidity were well within the limits demanded by MO disc drive use.

Arai, Norikazu  
Hattori, Hiroyuki  
Optics Research & Development  
Center  
Optics Division

# 1

## はじめに

1984年に当社が世界で初めてコンパクトディスク（以下CDと略す）プレイヤーの光ヘッドに用いられる非球面プラスチックレンズの開発に成功して以来、以前から用いられていた球面ガラスレンズの組み合せレンズは姿を消し、CD用光ヘッドのほとんどに非球面プラスチックレンズが使用されている状況である。Fig.1にCD用光ヘッドの結像光学系を示す。CDプレイヤーの市場は1988年に年間総出荷台数が2000万台を越えようとしており、さらに成長を続けている。CDは光ディスクの一種である。光ディスクには大容量の情報を記録させることが可能であることから、その後種々多様なタイプの光ディスクが提案され実用化されてきている。当社もこれらの動向をいち早く先取りして光ディスクのタイプにみあった非球面プラスチックレンズの開発を進めてきた。

近年コンピューターの発達とともにコンピューター用の大容量記憶媒体として光ディスクが注目を浴びている。情報があらかじめ記録された形で提供されるCD-ROM、一度だけ利用者が情報を書き込むことのできる追記型光ディスク（DRAW）はすでに一部で利用されており、対物レンズに非球面プラスチックレンズが使われている。またここにきて何回も書き込みと消去が可能な光磁気ディスク（以下MOと略す）が商品化されワークステーションクラスのコンピューターを中心に普及しつつある。フロッピーディスクドライブやハードディスクドライブが低価格になりパーソナルコンピューターの外部記憶装置として普及してきたように、MOドライブも同じような道をたどるであろうと予測されている。

MOディスクは記録再生の原理が他の光ディスクと異なり光学系も複雑である。Fig.2にMO用光ヘッドの結像系の代表的な例を示す。対物レンズ、コリメータレンズはそれぞれに球面ガラスレンズの組み合せレンズで構成されている。さらにコリメータレンズと対物レンズの間には、半導体レーザーの光出力を有効に活用する目的で、多くの場合ビーム整形用アナモフィックプリズムが挿入される。対物レンズのNA（開口数）は、0.50～0.55とCD用対物レンズの0.45と比較して大口径であり、色収

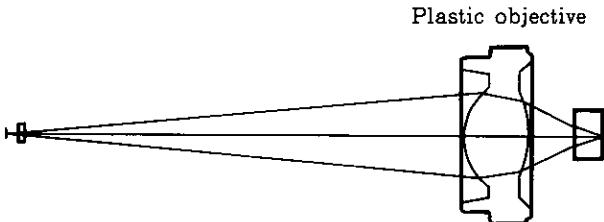


Fig.1 Optical system for CD use

差の補正がされているため4ないし5枚の球面ガラスレンズから構成されている。従ってCD用のプラスチック対物レンズの重量が0.1g程度と軽量であるのに対し、重量は0.5～0.7gに達する。

記憶装置の性能のひとつにアクセスタイムがあり、より短いほうが望ましい。MOドライブのアクセスタイムはハードディスクドライブと比較して長いため実用的なレベルまで短縮する必要がある。そのためには対物レンズの軽量化がポイントとなり対物レンズのプラスチック単レンズ化が期待されていた。しかしながら球面ガラスの組み合せレンズと比較すると以下に示すような短所があり実用化の障害となっていた。

- (1)プラスチック単レンズでは色収差が補正できない。
- (2)複屈折が大きい。
- (3)耐環境特性が低い。

当社ではこれらの課題を解決し、MOディスク用非球面プラスチックの対物レンズ及びこれと組み合わせて使用するコリメーターの開発を行なった。ここではこれらの諸問題をどのような手段で解決したかについて紹介する。

# 2

## 色収差の補正

MOドライブの光ヘッドの光源にはLD（半導体レーザー）が用いられているのは周知のことであるが、MOディスク上のIDブロックに書き込まれている情報を読み取る場合、LDは低出力で使用される。一方書き込みを行なう場合やデータブロックを消去する場合はLDを高出力状態にしている。LDの発振波長は光出力により変化するので、読み取り状態と書き込み／消去状態とではLDの発振波長は異なる。LDの種類によっても異なるがこの波長変化は一般に5nm程度である。

従来のMOドライブの光ヘッドにおいては対物レンズとコリメータレンズ双方の色収差を、LDの発振波長が急激に変化しても焦点位置の変化が焦点深度内におさまる

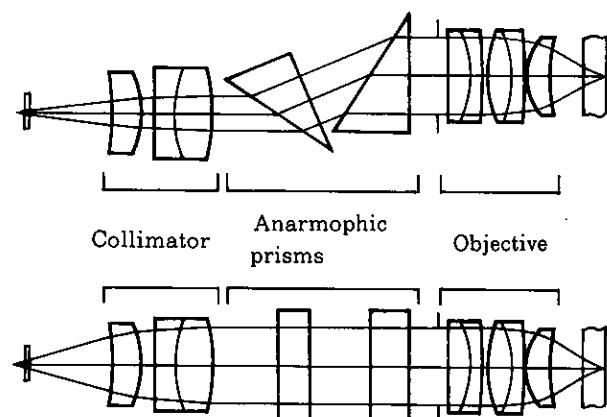


Fig.2 Optical system for MO use

ように補正していた。このために対物レンズには球面ガラスレンズの組み合せレンズが採用されていた。

## 2.1 光学系全体での色収差補正

MOドライブ用光ヘッドの対物レンズを単レンズにすることが可能かを検討するにあたってまず結像光学系の色収差の定式化を試みた。次にこれらの式をもとにして光学系全体の波面収差が最小になる条件を見い出した。

LDから放射される光束の発散角は、LDの接合面に平行な方向（水平方向）とそれに直交する方向（垂直方向）とで異なる。従って光束は楕円形となるがMOドライブではLDの光出力と最大限に利用するために、Fig.2に示すようなアナモフィックプリズムを光学系に挿入し、水平方向の光束を拡大している。このような光学系においては、水平方向と垂直方向とを別々に扱う必要がある。アナモフィックプリズムにより水平方向の光束を $\gamma$ 倍( $\gamma > 1$ )したとする。 $\gamma$ のことを光束拡大率と呼ぶ。このとき水平方向のコリメーターの焦点距離は等価的にコリメーター自身の焦点距離を $\gamma$ 倍した値になる。計算を進めるにあたり、以下のように近軸量を定義する。

$fo$  : 対物レンズの焦点距離

$fc$  : コリメーターレンズの焦点距離

$fbo$  : 対物レンズのバックフォーカス

$fbc$  : コリメーターレンズのバックフォーカス

$dfbo/d\lambda$  : 対物レンズの色収差

$dfbc/d\lambda$  : コリメーターレンズの色収差

なお、MOディスクの基板やLDのカバーガラスはそれぞれ対物レンズ、コリメーターレンズに含ませることとする。 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ を $\Delta\lambda$ の波長変化が発生したときの水平方向と垂直方向における焦点位置の変化とする。(Fig.3)、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$

$$\left. \begin{aligned} \Delta y &= \left\{ \left( \frac{fo}{rhc} \right)^2 \frac{dfbc}{d\lambda} + \frac{dfbo}{d\lambda} \right\} \Delta\lambda \\ \Delta z &= \left\{ \left( \frac{fo}{fc} \right)^2 \frac{dfbc}{d\lambda} + \frac{dfbo}{d\lambda} \right\} \Delta\lambda \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

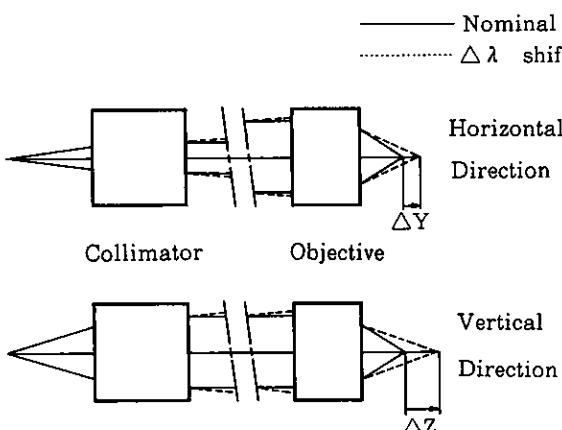


Fig.3 Focus shifts due to wavelength shift

$\Delta z$ は、(2)で表される。 $\gamma \neq 1$  のとき、 $\Delta y$ と $\Delta z$ は異なる。すなわち水平方向と垂直方向とでは焦点位置が異なることになり非点収差が発生する。非点隔差  $s$  を

$$s = \Delta y - \Delta z \quad (3)$$

で表わす。小量の3次非点収差がある場合、回折焦点（最も波面収差が小さくなる焦点位置）は水平方向と垂直方向の焦線位置の中間にあることが知られている。従って回折焦点の変化 $d$ （デフォーカス）は

$$d = \frac{\Delta y + \Delta z}{2} \quad (4)$$

で表わされる。光ヘッドのように回折限界性能を必要とする光学系では、性能を評価する量として波面収差を用いるのが適切である。 $\Delta W_d$ 、 $\Delta W_s$ をそれぞれデフォーカス $d$ 、非点隔差  $s$  が存在するときの波面収差のrms値とすると、

$$\Delta W_d = \frac{(NA)^2 |d|}{4\sqrt{3}} \quad (5)$$

$$\Delta W_s = \frac{(NA)^2 |d|}{4\sqrt{6}} \quad (6)$$

上式でNAは対物レンズの開口数である。(1)～(6)をまとめると(7)(8)が求まる。

$$\Delta W_d = \frac{(NA)^2}{4\sqrt{3}} \left| \left\{ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{\gamma^2} \right) \left( \frac{fo}{fc} \right)^2 \frac{dfbc}{d\lambda} + \frac{dfbo}{d\lambda} \right\} \Delta\lambda \right| \quad (7)$$

$$\Delta W_s = \frac{(NA)^2}{4\sqrt{6}} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{\gamma^2} \right) \left( \frac{fo}{fc} \right)^2 \frac{dfbc}{d\lambda} \Delta\lambda \right| \quad (8)$$

また全体の波面収差のrms値 $\Delta W_t$ は(9)となる。

$$\Delta W_t = \sqrt{(\Delta W_d)^2 + (\Delta W_s)^2} \quad (9)$$

## 2.2 波面収差を最小にする条件

非球面単レンズに代表されるように、対物レンズの色収差は補正不足であることがほとんどである。従ってここでは $dfbo/d\lambda > 0$ の場合について考えることにする。このような場合、 $\Delta W_d$ 、 $\Delta W_s$ 、 $\Delta W_t$ と $dfbc/d\lambda$ の関係はFig.4

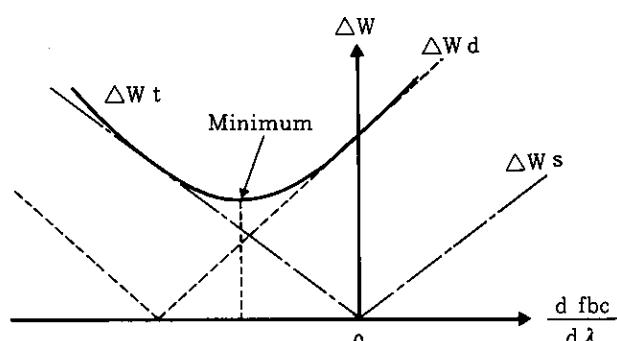


Fig.4  $\frac{dfbc}{d\lambda}$  vs  $\Delta W_d$ ,  $\Delta W_s$  and  $\Delta W_t$

のようになり、 $dfbc/d\lambda$ を適切に選択することで $\Delta Wt$ を最小にすることが可能になる。詳しい計算過程は省略するが、 $dfbc/d\lambda$ が(10)で表わされるとき $\Delta Wt$ は(11)に示す最小値 $\Delta Wtm$ をとる。

$$\frac{dfbc}{d\lambda} = -\frac{2(\gamma^2 + 1)\gamma^2}{3\gamma^4 - 2\gamma^2 + 3} \left( \frac{fc}{fo} \right)^2 \frac{dfbo}{d\lambda} \quad (10)$$

$$\Delta Wtm = \frac{(NA)^2}{4\sqrt{6}} \frac{2(\gamma^2 - 1)}{\sqrt{3\gamma^4 - 2\gamma^2 + 3}} \left| \frac{dfbo}{d\lambda} \right| |\Delta\lambda| \quad (11)$$

(11)からわかるように、 $\Delta Wtm$ は $fc$ 、 $fo$ に依存しない。従ってNAと $|\Delta\lambda|$ が与えられた場合、 $\Delta Wtm$ は $\gamma$ と $dfbo/d\lambda$ で決定される。次に典型的な2つの例について考えてみる。  
 (a)色消し対物レンズの場合( $dfbo/d\lambda = 0$ )波面収差の最小値は0である。これはコリメーターレンズが完全に色収差補正されるとき実現される。  
 (b)単レンズの対物レンズの場合( $dfbo/d\lambda > 0$ )  
 (10)を満足する場合、 $dfbc/d\lambda < 0$ となる。すなわち波面収差を最小にするためには色収差が過剰に補正されたコリメーターが必要となる。また(11)より $\gamma = 1$ のときは $\Delta Wtm =$

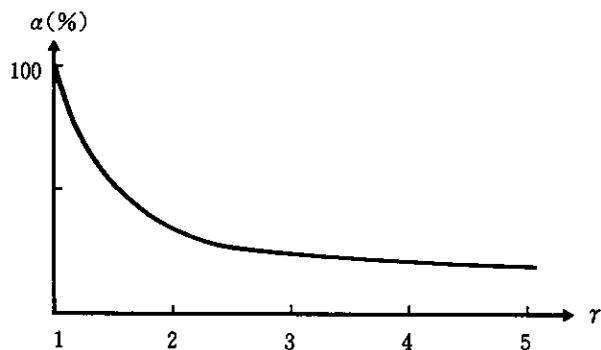


Fig.5 Factor of improvement dependence on enlargement ratio

Table 1 Specifications of MO objectives

	plastic objective	conventional objective
Focal length (f)	3.3mm	3.9mm
Numerical aperture (NA)	0.53	0.55
Magnification (m)	0	0
Working distance (WD)	1.0mm	1.2mm
Cover glass thickness (dc)	1.2mm	1.2mm
Maximum image height (Ymax)	0.07mm	0.07mm
Wavefront aberration* (on axis)	0.001λrms	0.017λrms
Chromatic aberration (dfbc/dλ)	0.087μm/nm	0.01μm/nm
Dimension	φ6.9mm×3mm	φ7.2mm×7.5mm
Weight	0.085g	0.6g
Constitution of the objective	aspherical singlet	4 spherical elements

\*designed value

0とすることが可能であるが、 $\gamma > 1$ のときは波面収差を完全に補正することができない。

$\Delta \tilde{W}t$ を通常の色消しコリメーターレンズを使用したときの全体の波面収差とすると(7)～(9)より、

$$\Delta \tilde{W}t = \frac{(NA)^2}{4\sqrt{3}} \cdot \frac{dfbo}{d\lambda} |\Delta\lambda| \quad (12)$$

波面収差改良係数 $\alpha$ を(13)で定義する。

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta Wtm}{\Delta \tilde{W}t} \quad (13)$$

(11)(12)より $\alpha$ は(14)で表わされる。

$$\alpha = 1 - \frac{\sqrt{2}(\gamma^2 - 1)}{\sqrt{3\gamma^4 - 2\gamma^2 + 3}} \quad (14)$$

$\alpha$ と $\gamma$ との関係をFig.5に示す。5.25"のMOドライブでは、アナモフィック光学系を用いることが多い、使用されるLDにもよるが1.5から3.0の値が選ばれている。この場合 $\gamma$ は52%～24%である。 $\alpha$ は $\gamma$ だけに依存するので、波長変化により発生する波面収差が許容範囲を超える場合には、 $\Delta Wt$ を小さくするためにより色収差の小さい対物レンズが必要となる。

次の章では今回開発した対物レンズとコリメーターレンズについて数値例を示す。

### 3 対物レンズとコリメーターレンズの仕様

今回開発した非球面プラスチック対物レンズと典型的なMOドライブ光ヘッド用の色消し対物レンズの仕様をTable 1に示す。両者を比較した場合、非球面プラスチック対物レンズのすぐれている点は以下の通りである。

(1)長さで1/2.5、重量で1/7と大巾に軽量小型化されている。(Fig.6に断面図を示す。)

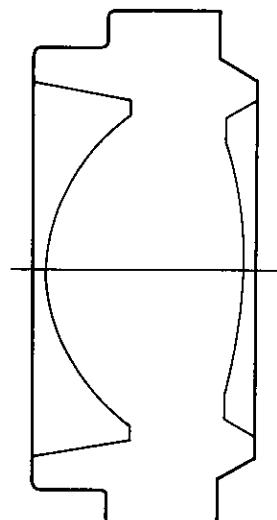


Fig.6 Cross section of plastic objective

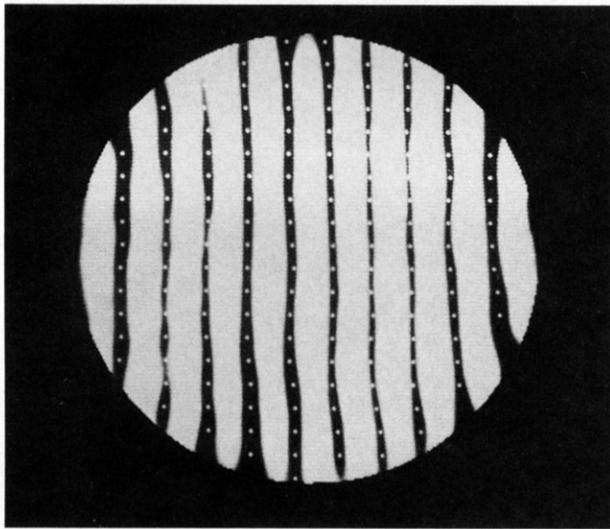


Fig.7 Interferogram of the molded plastic objective

(2)軸上波面収差がNAが大きいにもかかわらずほぼ完全に補正されている。(Fig.7には実際に成形されたレンズの波面収差を示す。)

また短所としては、非球面プラスチック対物レンズには色収差が残存している。これに対し球面ガラスの組み

Table 2 Specifications of collimator

Focal length (f)	8.75mm
Numerical aperture (NA)	0.25
Magnification (m)	0
Working distance (WD)	3.0mm
Cover glass thickness (dc)	0.25mm
Maximum image height (Ymax)	0.20mm
Wavefront aberration* (on axis)	0.003λ
Chromatic aberration (dfbc/dλ)	-0.342μm/nm
Dimension	φ6.4mm×9.7mm
Constitution of the objective	5 spherical elements

\*designed value

Table 3 Wavefront aberrations caused by wavelength shift of 5nm

γ	1	2	3	Eqn	Remark
ΔWd	0.0094λ	0.0138λ	0.0146λ	(7)	Using the collimator we developed (dfbc/dλ=-0.342μm/nm)
ΔWs	0	0.0063λ	0.0075λ	(8)	
ΔWt	0.0094λ	0.0152λ	0.0164λ	(9)	Minimizing ΔWt
dfbc/dλ	-0.612μm/nm	-0.569μm/nm	-0.483μm/nm	(10)	
ΔWtm	0	0.0137λ	0.0159λ	(11)	
ΔW̃t	0.0212λ	0.0212λ	0.0212λ	(12)	Achromatic collimator

合わせレンズでは、4枚の球面ガラスレンズを使用し、凸レンズには分散の小さい硝材、凹レンズには分散の大きい硝材を用いることで色収差がほぼ完全に除去されている。ところでこの色収差の問題に関しては、第2章で述べた方法を適用することで改善が可能である。ここでは以下に示す方針で色収差が補正過剰なコリメーターレンズを設計し試作を行なった。

色収差を補正過剰にしてしかも回析限界性能を得るには多くのレンズエレメントを必要とする。したがって(10)を満足して全体の波面収差を最小にしようとするとコスト高となってしまう。Fig.4からわかるようにΔWtは最小値付近ではそれほど変化しないので必ずしも(10)を満足しなくとも当初の目的が達成されることがわかる。今回はコリメーターレンズのレンズ枚数を5枚に制限し設計を行なった。コリメーターレンズの仕様と断面図をそれぞれTable 2とFig.8に示す。

今回開発した対物レンズとコリメーターレンズを使用した場合、5nmの波長変化で発生する波面収差をγ=1, 2, 3についてTable 3にまとめる。波面収差の単位は使用波長λ(830nm)である。ΔWtはマレシャルの許容値(0.07λrms)の1/7.4~1/4.6と十分小さく、MOドライブの光ヘッドに使用しても問題のないレベルである。

## 4

### 複屈折の改良

MOディスク上に記録されているデータを再生するた

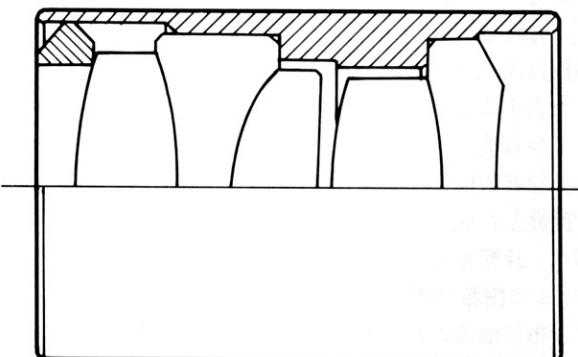
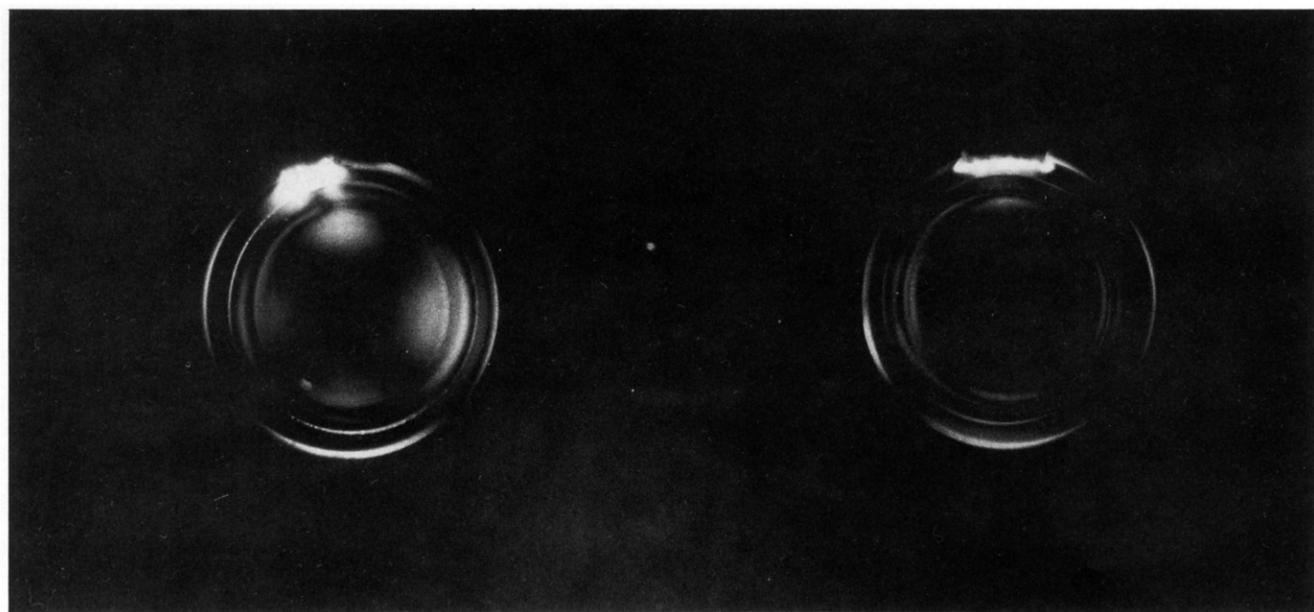


Fig.8 Cross section of the collimator with overcorrected Chromatic aberration



left:molded by old system

right:molded by new system

Fig.9 Birefringence of the objectives.

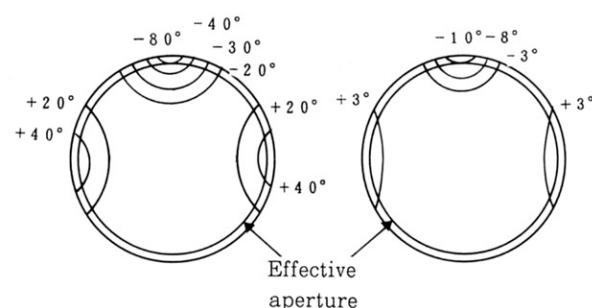
めに、光ヘッドではカー効果による偏光方向の回転を検出している。このためディスク基板を含めた光学素子の複屈折は再生信号のC/N比を悪化させる。<sup>3)</sup>プラスチックレンズはガラスレンズと比較して複屈折が大きいがこれは成形による残留歪が主たる原因で、材料として比較的複屈折の少ないPMMAを使用したとしても従来の成形システムで成形されたレンズは複屈折が大きく、MOドライブの光ヘッドに使用するには不安の残るレベルであった。

一方同じPMMAを成形して作られているMOディスク基板は5°の複屈折を達成している。従って成形システムを工夫することで複屈折を同様なレベルまで減少させることが可能であると考え、金型構造と圧縮過程を含む成形法などの開発に着手した。従来の成形システムと新しく開発した成形システムで前述の仕様の対物レンズを成形し、比較を行なった。材料はアクリル系の樹脂を用いた。この樹脂はPMMAと比べ、後述するように耐環境性が大巾に改善されたもので、またPMMAと同程度の光弾性係数を有する材料である。成形されたレンズの複屈折をセナルモン法で測定した結果をFig.9、Fig.10に示す。新しい成形システムで作成されたレンズは複屈折がほぼ1/7に減少しており、MOドライブの光ヘッドに十分投載可能なレベルとなった。

## 5

### 対物レンズの環境特性

プラスチックレンズはガラスレンズと比較して耐環境性が問題となることが多く十分な検討が必要である。また温度や水分の吸収でプラスチック素材の屈折率が変化するので限界テストを行なうだけでなく、実使用状態に



left:molded by old system right:molded by new system

Fig.10 Retardation map of the objectives

おける性能変化にも着目しなければならない。

#### 5.1 耐熱テスト

限界テストとして以下のような耐熱テストを行なったが波面収差、透過率、複屈折に変化はみられなかった。

- ・高温テスト (30°C 50%RH 168時間)
- ・低温テスト (-30°C 168時間)
- ・ヒートサイクルテスト (70°C / -30°C 1時間周期10サイクル)

#### 5.2 温度と湿度による球面収差変化

プラスチックレンズは通常の使用環境のもとでも、温度と湿度の影響により球面収差が変化する。MOディスクはデジタル記録であるため球面収差の影響は比較的小ないが、対物レンズの開口数がCDと比較して大きいため、これらの性能変化について検討しておく必要がある。ここでは以下に述べる2つの検討を行なった。

- (1) 温度収差の測定

環境試験室内に干渉計を持ち込み、温度変化による波面収差の変化（温度収差）を測定した。湿度は各温度で設定できる最低値とした。得られた干渉図は画像処理後ツェルニケの多項式を用いて収差分解を行ない球面収差成分だけを取り出した。5°C~40°Cの間で球面収差の変化は0.005λrmsと小さく問題のないレベルであった。(Fig.11)

## (2) 湿度の影響の評価

球面収差はまたレンズが大気中の水分を吸収したり放出したりすることで変化することが知られている。この現象の詳しい解析は本書74ページの「光ディスク用対物レンズの吸湿シミュレーション」をご覧いただくとして我々がとった対策は以下の通りである。

(a) 飽和吸収率が1.2重量%と低い素材を使用した。(PMMAは2.2重量%であり、ポリカーボネートのようなほとんど

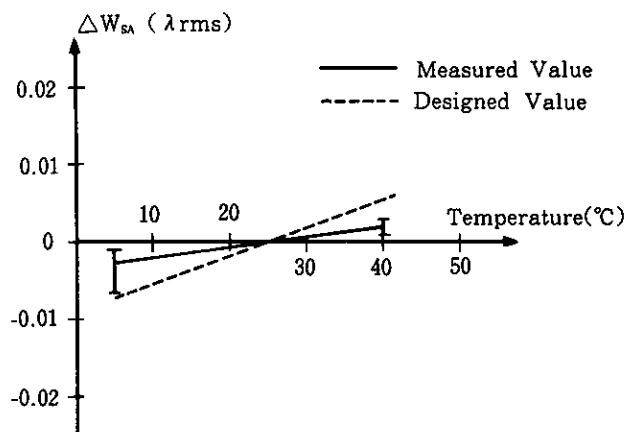


Fig.11 Experimental result of wavefront aberration due to temperature change

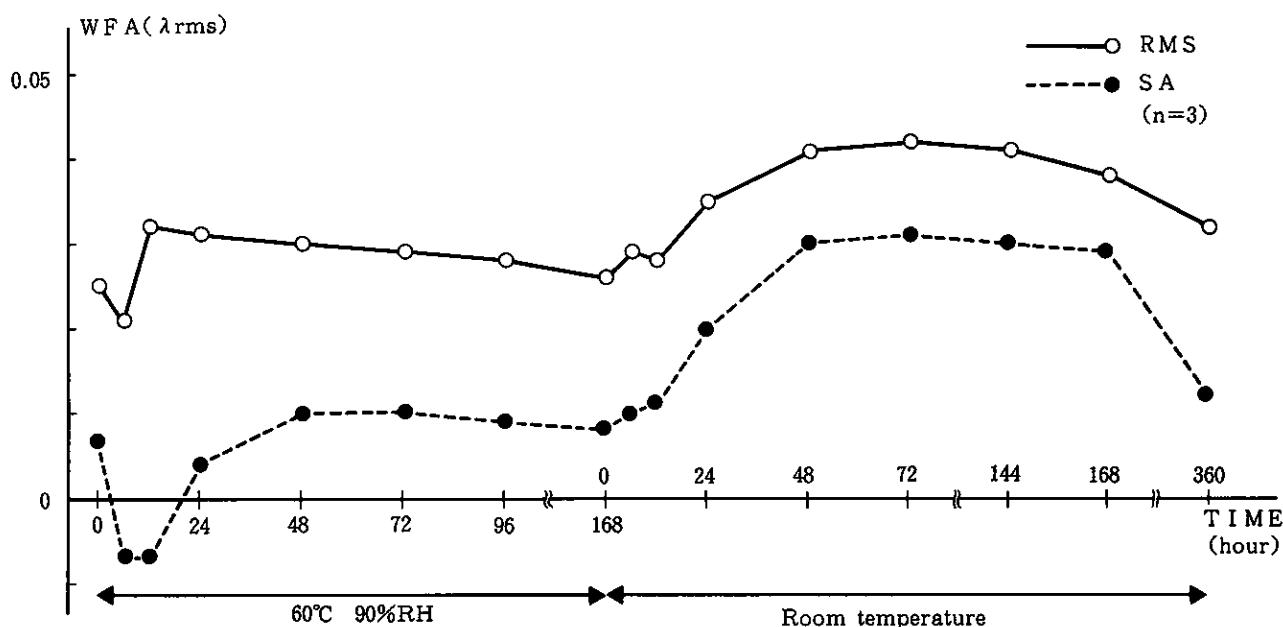


Fig.12 Experimental result of humidity test

水分を吸収しない樹脂もあるが、複屈折が大きく使用が困難である。)

(b) レンズの仕様と形状を工夫し、吸湿の影響があまり波面収差変化にきかないようにした。

Fig.12にレンズを60°C 90%RHの環境に168時間保存した後、常温常湿下に放置したときの波面収差変化の測定値を示す。球面収差変化は最大0.027λrmsでMOドライブ用光ヘッドに十分適用できる値である。

## 6 まとめ

MOドライブの光ヘッド用に使用可能な非球面プラスチック対物レンズの開発に成功した。この対物レンズを使うことでアクセスタイムの短縮やアクチュエーターの小型化が可能となり、球面ガラスレンズの組み合せレンズと比較しメリットが多く、今後広く普及していくと考えられる。さらに今後ますます高い仕様の対物レンズが求められてきているが、これに対応して、レンズの設計、成形システム、レンズ形状、素材の改良が現在も進められている。

### ●参考文献

- 1) M.Born & E.Wolf; Principles of Optics, ChapIX, Pergamon Press(1975)
- 2) 特開昭64-76011号公報
- 3) T.Toda, et al.; Topical Meeting on Optical Data Storage, Technical Digest WB4, 34(1987)
- 4) J.Hennig; Proc.Int.Symp.on Optical Memory, 1987 9-14(1987)