

## 光ディスク用光学素子のレンズ設計

田中 康弘

光ディスクシステムは、当初のCDのような読み出し専用のディスクから、相変化を利用したPDや、光磁気効果を利用したMOなどの書き換え可能型へと進化してきた。最近ではより大容量のDVDが大きな話題となっている。また光ディスクシステムのキーデバイスである光ヘッドも、部品点数の削減、小型化、高機能化、低コスト化に向けて、さまざまな開発が行われている。光ヘッドの光学系は、対物レンズの集光機能、トラッキング、フォーカシングおよび再生信号の検出機能、ディスクからの反射光を光源から分離するための波面分割機能から成り立っている。

対物レンズの性能は光ディスクの性能を決定づける。光源の波長 $\lambda$ と開口数(NA)は絞りこめるスポットの大きさを原理的に制限する。光ヘッドの対物レンズは、開発の当初は何枚かの球面組レンズから成り立っており、色収差を除くと顕微鏡の対物レンズに匹敵する性能を有するといわれてきた<sup>1)</sup>。しかし非常に高精度な非球面レンズ<sup>2-5)</sup>の大量生産が可能となり、今ではほとんどすべての対物レンズが非球面単レンズとなっている。

光ディスクのような画角の狭い対物レンズは、まず球面収差が完全に補正されており、次に軸外コマ収差が補正されていることが必要となる。このようなレンズをアラナートレンズと呼ぶ。近軸近傍での軸外コマ収差は、正弦条件によりその補正状況を確認できる。単レンズの非球面アラナートレンズの歴史は古く、1909年には片面非球面のアラナートレンズの記載の例があ

る<sup>6)</sup>。このレンズのパワー配置は、現在使われている光ディスク用の対物レンズとほとんど変わらないといってよい。光学系の中の2面を非球面化することによって、球面収差と正弦条件が同時に満足できることはよく知られている<sup>7)</sup>。さらに具体的な高NAのレンズ形状も計算されている<sup>8)</sup>。また対物レンズのもつ各種の収差によって、光ディスクの再生信号がどのように影響を受けるかについての詳細な研究もなされている<sup>9)</sup>。

最近光ヘッドの光学系の簡素化を追求して、機能を複合化した光学素子が多く提案されている。これらの新規なレンズにおいても、従来のレンズ設計技術が巧みにいかされている。ここでは筆者らが開発した異なる基板厚みのディスクを再生できる2焦点レンズとナイフエッジ法や非点収差法によるフォーカス検出素子について、球面収差の補正や、正弦条件の補正がどのように設計にいかされているかについて述べる。

### 1. CD, DVD互換2焦点対物レンズ

#### 1.1 基板厚み

光ディスクの記録密度は光源の波長 $\lambda$ と対物レンズのNAに大きく依存する。映像をデジタル記録するDVDは、CDに対して6倍以上の記録容量を達成している。このため光源の短波長化とともに、対物レンズのNAが0.45から0.6へと高くなった。ディスク基板は平板ではあるが、対物レンズ光学系の一部となるため、その傾きにより収差が発生する。ディスクの傾き時に発生するコマ収差はNAのほぼ3乗に、また基板厚みに比例する。したがってNAを高くしたときは基板厚みを薄くしたほうが有利となる。

DVDはディスクの基板厚みが0.6mmであり、CD,

Lens design of optical elements for optical disk system  
(1996年7月31日受理)  
Yasuhiro TANAKA 松下電器産業(株)AVC商品開発研究所  
(〒571 門真市大字門真1006)

CD-ROMなどの1.2 mmの基板厚みと異なる。DVD用に設計された対物レンズをCDの再生に用いると球面収差が発生し、データの読み取りが困難となる。そこでホログラムにより波面を2つに分割してそれぞれの焦点を異なる基板厚みに対応させる光ヘッドが開発された<sup>10)</sup>。今回レンズの表面にホログラムを一体成形した、ガラスマールドによる2焦点対物レンズを開発した。これにより、1つの対物レンズでCDとDVDを再生することが可能となった。

## 1.2 2焦点レンズの設計

2焦点レンズの構成は、図1に示すように回折しない光、すなわち0次光が0.6 mmのディスクに対して性能を満足するよう非球面形状に設計した。さらにレンズの第1面側にホログラムを形成し、その1次回折光を1.2 mmのディスクに対して性能を満足するよう設計した。DVDに対してはNAが0.6であるが、CDに対しては波長が短くなった点と、適切なレンズへの入射光量分布を得る観点から、従来のNAである0.45よりも小さいNA0.43としている。

対物レンズは、設計上は軸上にコマ収差が現れることはないが、実際のレンズでは面と面の傾きや、ディセンターによって軸上にもコマ収差が発生する。ディスクと対物レンズの光軸が傾いた場合に発生するコマ収差により、この対物レンズ自身が軸上にもコマ収差を補正することができる。これを対物レンズのあおり調整という。従来の単焦点のレンズでは、当然1種類のディスクに対してのみあおり調整すればよかった。一般に、2焦点レンズの場合は、それぞれの焦点においてあおり調整の角度が異なると、焦点ごとに調整が必要となってしまう。しかしながら、2つの焦点であおり調整角度が等しくなる条件を求めることができる<sup>11)</sup>。

図2に対物レンズを傾けたときに発生するコマ収差を示す。レンズを傾けるとレンズの軸外に光線が入射することによる軸外コマ収差 $F$ と、ディスクとレンズの相対的な光軸の傾きによるコマ収差 $D$ が発生する。これらはレンズのあおり調整角 $\theta$ に対してリニアに変化する。レンズ自身のもつ軸上でのコマ収差を $L$ とし、基板厚みの異なる2つのディスクでの諸量にそれぞれ1, 2の添え字をつけると第1のディスクに対してコマ収差を補正するあおり角 $\alpha_1$ は、

$$\alpha_1 = L_1 / (F_1 + D_1) \quad (1)$$

となる。したがって2つのディスクに対して同じあおり角度でコマ収差を補正する条件は

$$L_1 / (F_1 + D_1) = L_2 / (F_2 + D_2) \quad (2)$$

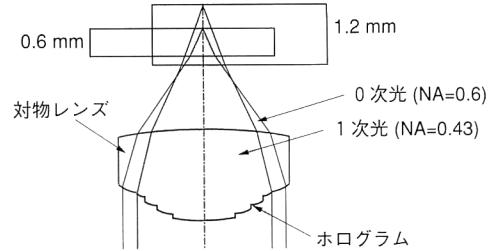


図1 ホログラム一体型2焦点レンズの構成。

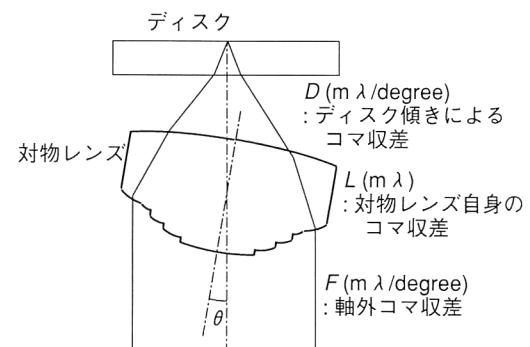


図2 あおり調整時のコマ収差。

となる。レンズ面が傾いて生じるコマ収差 $L$ と、ディスクとの光軸傾きによって生じるコマ収差 $D$ は、それぞれNAのほぼ3乗に比例し、設計的な自由度はほとんどない。一方軸外コマ収差は、レンズの正弦条件をコントロールしたり、ホログラムの位置によって変化させることができる。図3にDVDのディスクに対して正弦条件をほぼ完全に補正したときのCD側での正弦条件を示す。ホログラムの位置は、対物レンズの第2面、すなわちディスク側の面と、第1面すなわち光源側の面および対物レンズに一体化させず入射光束側の平面基板上に形成した場合について検討した。対物レンズの第2面に形成した場合、CD側での正弦条件が最もオーバーになる。次に平面基板上に形成した場合、第1面に形成した場合と続く。アブラナートな対物レンズの正面は焦点を中心とする球面状になる。ホログラムがレンズの正面に近いほど、正弦条件が崩れないため、今回の場合は第1面側にホログラムを形成すると最も正弦条件が満足するようになる。

それぞれのホログラム位置での軸外コマ収差、およびDVDであおり調整したときにCD側で残存するコマ収差を表1に示す。CD側での軸外コマ収差が小さいほど

ど、残存コマ収差も少なくなることがわかる。これは、式(2)に示される左辺と右辺において、コマ収差量  $L$  と  $F$  の比が設計条件に関係なくほぼ一定になるため、軸外のコマ収差  $F$  の値も、異なるディスクでなるべく等しいほうが式(2)を満足しやすいということで定性的に説明できる。実際の設計では、CD側のコマ収差とDVD側のコマ収差のバランスをとって、第1面-2に示すような正弦条件と残存コマ収差  $2.8 \text{ m}\lambda$  を得ることができた。このように、正弦条件をコントロールすることで、DVDとCDでのあたり角度がほぼ同じになるよう設計することができる。

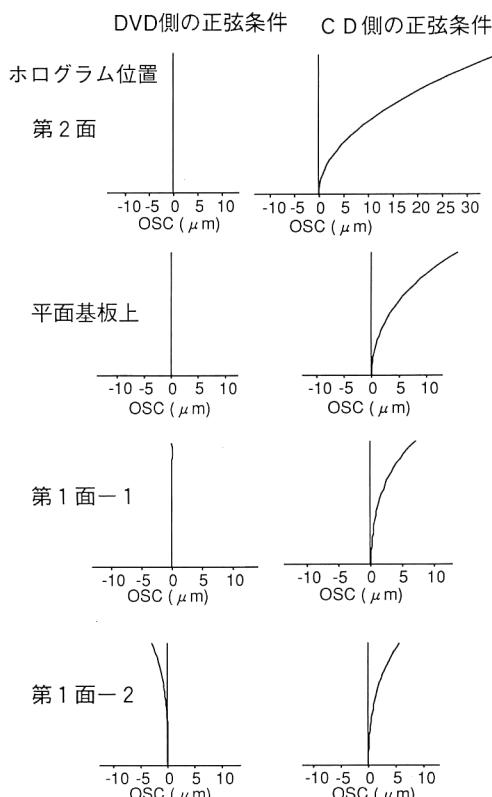


図3 ホログラム位置と正弦条件。

表1 ホログラム位置と軸外および残存コマ収差。

ホログラム位置	DVD での軸外コマ収差 (mλ)	CD での軸外コマ収差 (mλ)	残存コマ収差 (mλ)*
第2面	0.0	178.0	91.8
平面基板上	0.0	71.4	21.9
第1面-1	0.0	35.1	3.6
第1面-2	20.8	28.1	2.8

\*レンズの面の傾きが 0.05 度の場合の CD 側での残存コマ収差。

## 2. 検出光学系

### 2.1 ダブルナイフエッジ法の光学素子

光ディスクでは、対物レンズの集光スポットを常に要求される情報面上に集光させるため、トラッキングとフォーカシングが必須である。それを達成するために、さまざまな検出光学系が開発されてきた<sup>12)</sup>。図4に筆者らが開発したダブルナイフエッジ方式のフォーカス検出素子<sup>13)</sup>を示す。素子は入射面側が平面と球面に分割されており、さらに平面は光軸に垂直な面に対して少し傾斜している。出射面側は回転対称の非球面である。

図5にフォーカス検出の原理を示す。入射側の平面部と球面部により、波面は空間的に2つに分割され、2つ

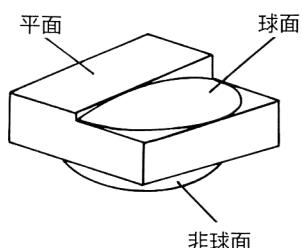


図4 ダブルナイフエッジ法のフォーカス検出素子。

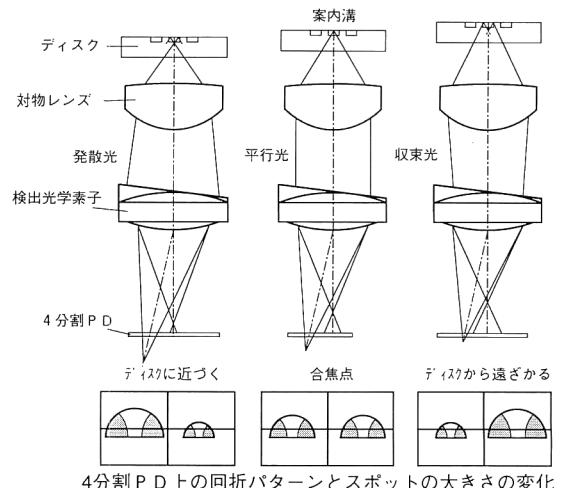


図5 ダブルナイフエッジ法のフォーカス検出原理。

の焦点をもつ。さらに平面部が傾斜しているため、平面側の焦点位置は光軸からはずれたところにできる。その2つの焦点の中間にフォトディテクターを挿入すると、ディテクター上の光のパターンは半円を2つ並べた形になる。対物レンズのフォーカスがずれると、反射した光は平行光ではなくなり、検出光学系の2つの焦点位置が光軸方向に移動する。結果としてフォトディテクター上の2つの半円パターンは互いに大きさが変化することになる。この変化量を4分割のディテクターの出力を演算することで、フォーカス検出の信号を得ることができる。

## 2.2 球面収差の影響

対物レンズの集光光学系に対して、検出光学系は収差にあまり考慮がなされていない場合も多い。ここでは球面収差が検出光学系の特性に与える影響について検討した。光ディスクには、図5に示すようにトラッキングのための案内溝があらかじめ形成してある場合がある。この溝により、対物レンズで集光されたスポットは回折し、その回折パターンの非対称性からトラッキング信号が得られる。しかしこのパターンの変化は当然フォーカスエラー信号を検出するためのフォトディテクター上にも現れる。通常は回折パターンが変化してもその影響がキャンセルされるようにフォーカスエラー信号は検出されるが、フォトディテクターの位置ずれやレンズの収差によって、偽のフォーカスエラー信号を発生させる。これを溝横断ノイズと呼ぶ。溝横断ノイズが大きい場合には、対物レンズを駆動するためのアクチュエーターに余分な消費電力が必要になったり、フォーカスがはずれやすくなるなどの現象が起きる。ここでは溝横断ノイズが検出レンズの球面収差によってどのように変化するかをシミュレーションした。

図6はフォトディテクター上の検出レンズのスポットダイアグラムを示している。検出レンズの出射面側を非球面にしてほぼ完全に球面収差を補正した場合は、スポットダイアグラムから明らかなように、一様な光量分布が得られる。一方球面のままであれば球面収差が発生する。フォトディテクター上では、焦点より手前の半円と、焦点より後方の半円が組み合わされるため、2つの半円の光量分布が異なることがわかる。案内溝によって生じる回折パターンの変化を波動光学的な計算により求め、検出レンズは幾何光学的な光線追跡を行い、各光線に回折パターンの光量の重み付けをして、最終的なフォトディテクターの出力を計算した結果を図7に示す。非球面により球面収差を補正した場合は、対物レンズが案

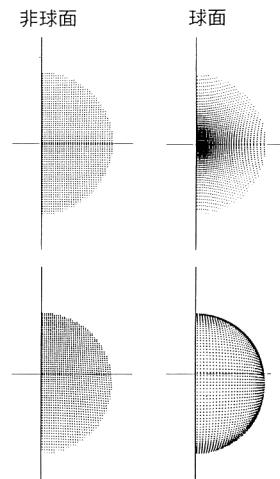


図6 フォトディテクター上のスポットダイアグラム。

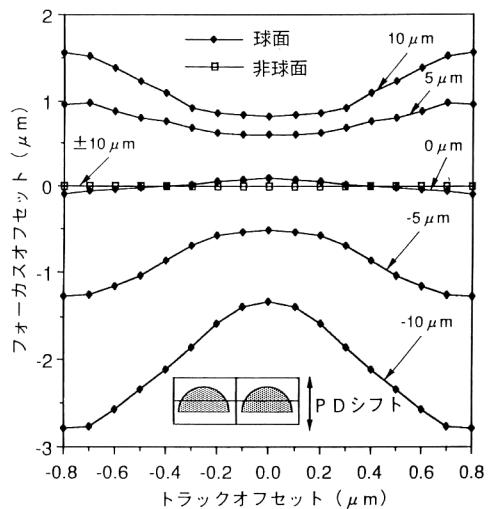


図7 トラッキングオフセットによる溝横断ノイズ。

内溝を横切ることにより回折パターンが変化しても、フォーカス信号に変化が生じない。さらにフォトディテクターの位置ずれが生じても、まったく変化が生じない。一方球面収差がある場合は、フォトディテクターの位置が正しく調整されると溝横断ノイズはほとんど出ないが、フォトディテクターの位置ずれが生じるに従って、フォーカスオフセットが生じる。このことから球面収差があると、フォトディテクターの位置精度が厳しくなることがわかる。

## 2.3 非点収差法とテレフォト光学系

非点収差法は光ヘッドのフォーカス検出光学系でよく

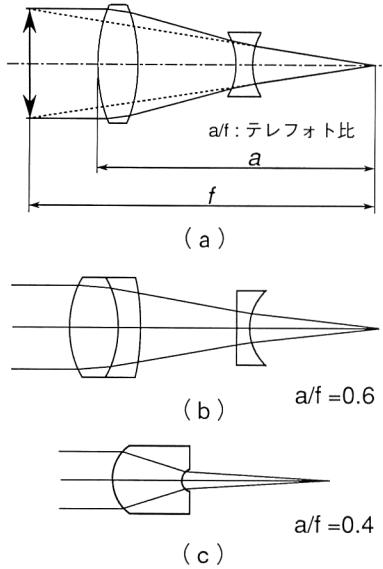


図8 非点収差の検出光学系。(a) テレフォト光学系、(b) 球面組レンズによるテレフォト光学系、(c) 単レンズによるテレフォト光学系。

使われれる方式のひとつである<sup>12)</sup>。光学系の一部にシリンドリカル面やトーリック面などの非回転対称面を用い、軸上に非点収差を発生させる。非点隔差の中間に位置する最小錯乱円上に4分割のフォトディテクターを配置し、その対角の信号の和の差動をとることにより、フォーカスエラー信号を得ることができる。

フォトディテクター上の最小錯乱円のスポット径を大きくするほど位置合わせが容易になり、また環境変化に対する信頼性も向上する。しかしどうかは検出光学系の焦点距離に比例するため、大きくするほど光学系のコンパクトさが損なわれる。そこで図8に示すようなテレフォト光学系が用いられる。テレフォト光学系は第1の正のパワーと第2の負のパワーからなり、焦点距離 $f$ より光学系全長 $a$ のほうが短くなるという特徴をもつている。ここで $a/f$ をテレフォト比と呼ぶ。球面レンズの組合せでは、図8(b)に示すように2群3枚構成で、テレフォト比0.6がほぼ限界となる。筆者らはプレスガラスによる単レンズでテレフォト光学系を構成した光ディスク用フォーカス検出素子<sup>14)</sup>を開発した。テレフォト比は0.4までコンパクトにすることができた。

## 2.4 片面非球面でのアラナートレンズの設計

光ディスクのフォーカス検出系では、像面上でのスポットの光量分布が不均一な場合、先に述べたように溝横断ノイズの増大につながる。均一な光量分布を得るために

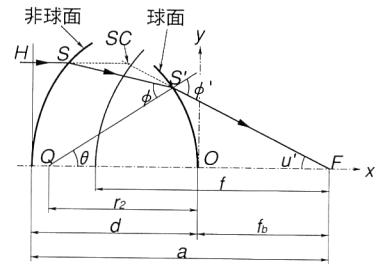


図9 テレフォト単レンズの座標系。

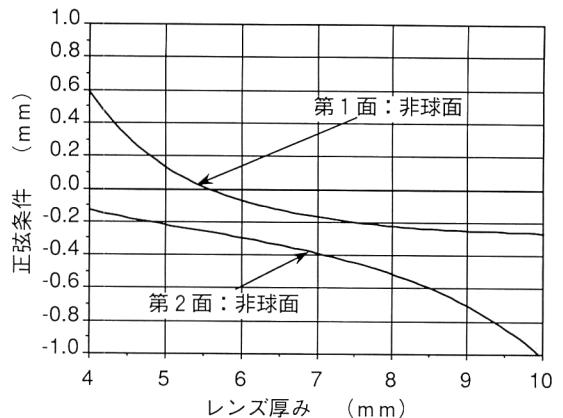


図10 片面非球面レンズの正弦条件。

にはまず球面収差の補正が必要になる。さらにアライメント誤差などによって生じる斜めの入射光線に対しても光量分布の均一性を保つために、正弦条件を満足させてコマ収差を補正することが必要になる。すなわち検出光学系でもアラナートレンズであることが望ましい。

球面収差と正弦条件を満足するためには両面非球面にすればよい<sup>7)</sup>。しかし本光学素子では非点収差を発生させるため、レンズの1つの面がトーリック面であり、加工上の制約から、直交する稜線のどちらかが球面となる。したがって光軸を含む1つの断面においては、少なくとも1面が球面の状態で、球面収差と正弦条件を同時に満足する必要がある。そこで光路長の計算から球面収差を補正する非球面形状を求め<sup>15)</sup>、そのときの正弦条件を計算した<sup>16)</sup>。まず第1面側が球面である場合の光学系断面の座標系を図9に示す。第2面の光軸との交点を原点とする $xy$ 座標をとる。球面収差が0となるためには、軸上を通る光線と、点 $S'$ を通る光線の光路長が等しいことより

$$HS + nSS' + S'F = dn + a - d \quad (3)$$

が成り立つように非球面形状 $S$ が決定される。ここで

$n$  はレンズの屈折率,  $d$  はレンズ厚み,  $a$  は光学系全長, すなわちレンズの第 1 面の頂点から像面までの距離である。このとき正弦条件  $SC$  は

$$SC = y_1 / \sin(u') - f \quad (4)$$

として求められる。ここで  $y_1$  は、非球面上の点  $S$  の  $y$  座標,  $u'$  は像点  $F$  への出射角,  $\phi$  は球面上の点  $S'$  への入射角である。同様にして第 2 面が非球面の場合も球面収差を補正する非球面を求める、そのときの正弦条件を計算した。図 10 に焦点距離 36.5 mm, 光学系全長 14.5 mm でレンズ厚みを変化させたときの正弦条件の変化を示す。第 1 面が非球面の場合、レンズ厚みが 5.5 mm において正弦条件を満足する。一方第 2 面が非球面の場合は、レンズ厚みが薄くなりすぎ、結果として曲率半径が小さくなりすぎて、著しく加工が困難となる。したがって第 2 面側を 1 つの断面が球面であるトーリック面とすることで、球面収差と正弦条件を同時に満足したアプランナーなテレフォト光学系が実現できる。なおある入射高さ  $H$  についてのみ計算したが、この検出光学系の場合 NA は非常に小さいためほぼ有効径の全面にわたって正弦条件が満足されている。

光ヘッドの対物レンズと検出光学系の設計事例について述べた。球面収差や正弦条件の補正が光ヘッドの光学系でも非常に重要である。2 焦点レンズのような回折光学素子を導入した新しい光学素子も今後ますます進展するであろう。一方、検出光学系の収差は、その光ヘッドとしての信号への影響については、まだ未知な部分も多いと思われる。レンズ設計者と光ヘッドの開発者との対話がさらに必要とされる部分であろう。

## 文 献

- 1) P. Kuttner: "Design and testing of lenses for optical disk technology," Opt. Eng., **22** (1983) 473-478.
- 2) 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** (1983) 2413-2415.
- 3) D. Visser, T. G. Gijsbers and R. A. M. Jorna: "Molds and measurements for replicated aspheric lenses for optical recording," Appl. Opt., **24** (1985) 1848-1852.
- 4) J. J. M. Braat, A. Smid and M. M. B. Wijnakker: "Design and production technology of replicated aspheric objective lenses for optical disk systems," Appl. Opt., **24** (1985) 1853-1855.
- 5) Y. Tanaka, Y. Nagaoka and M. Ueda: "Lens and optics for optical disk system," Jpn. J. Appl. Phys., **26**, Suppl. 26-4 (1987) 121-126.
- 6) R. Straubel and M. Rohr: U. S. Patent No. 934579 (1909).
- 7) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 6th ed. (Pergamon Press, New York, 1987) pp. 197-202.
- 8) 吉田正太郎: "特に口径比の大きい非球面アランナー・レンズに関する計算", 東北大光学計測研究所報告, **6** (1958) 122-145.
- 9) S. Kubota: "Aplanatic condition required to reproduce jitter-free signals in an optical digital disk system," Appl. Opt., **26** (1987) 3961-3973.
- 10) Y. Komma, S. Nishino and S. Mizuno: "Dual focus optical head for 0.6 mm and 1.2 mm disks," Opt. Rev., **1** (1994) 27-29.
- 11) 田中康弘, 山形道弘, 金馬慶明, 水野定夫, 春原正明: "ホログラム一体型 2 焦点対物レンズ(1) レンズ設計", 1995 年秋期第 56 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集 No. 3, 29a-ZA-8 (1995) p. 956.
- 12) G. Bouwhuis, J. Braat, A. Huijser, J. Pasman, G. van Rosmalen and K. S. Immink: *Principles of Optical Disc Systems* (Adam Hilger, Bristol and Boston, 1985) pp. 70-87.
- 13) Y. Tanaka, M. Sunohara, J. Murata, T. Nakamura and H. Aikoh: "Molded-glass optical element for focusing servos," Appl. Opt., **33** (1994) 108-112.
- 14) Y. Tanaka, H. Aikoh, I. Yano, T. Kondou and M. Sunohara: "Single telephoto lens for focus error detection with astigmatic method," Opt. Rev., **1** (1994) 33-35.
- 15) 中川治平: レンズ設計工学(東海大学出版, 1986) pp. 175-179.
- 16) 田中康弘, 愛甲秀樹: "単レンズによるフォーカス検出用テレフォト光学系の設計と評価", 光学連合シンポジウム浜松'94 講演予稿集, 22Fa02 (1994) pp. 127-128.