

[光学論文賞受賞記念]

# 解説

## スポットの強度分布によるレーザー光学系の収差評価\*

田中 康弘

松下電器産業(株)光デバイス研究所 〒571 門真市大字門真 1006

(1993年3月29日受理)

### Evaluation of Laser Optics from the Spot Image

Yasuhiro TANAKA

Optical Devices Research Laboratory, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.,  
1006, Kadoma, Kadoma 571

#### 1. はじめに

半導体レーザーの普及により、レーザーを組み込んだ機器が身近になってきた。その代表例がコンパクトディスクプレーヤー、光磁気ディスクドライブ、レーザービームプリンターなどである。これらの機器に必要なレーザー光学系は、従来の写真レンズなどの結像光学系とは異なり、広い波長帯域にわたる色収差の補正はほとんど必要ないかわりに、回折限界という高い光学性能が要求される。そのため従来からの研磨光学部品だけでなく、プラスチック非球面レンズ<sup>1)</sup>、ガラス非球面レンズ<sup>2-5)</sup>、ハイブリッド非球面レンズ<sup>6)</sup>、屈折率分布レンズ<sup>7)</sup>、ホログラム<sup>8,9)</sup>など多くの新しい素子が開発され、実用化している。これらの回折限界の性能を要求される光学素子の評価方法としては、集光されたスポットの点像強度分布を測定する方法と、素子の波面収差を測定する方法が一般的である<sup>10)</sup>。

点像強度分布の測定は、集光されたスポットを顕微鏡の光学系で拡大し、CCDカメラで観察するという比較的簡便な装置で実現できる。そのため光ディスク光学系の評価などにも多用されており、目視検査としてはかなり敏感な方法であると言える。たとえば回折限界の一つの目安である  $0.07\lambda$  以内の RMS (root mean square) 波面収差であっても、スポットのパターンはかなり変化

するので目視検査でも十分認識できる。さらに球面収差、コマ収差、非点収差などの収差の種類についてもある程度定性的には推定できる。しかし定量化という面においては、スポットの直径を測定する<sup>11,12)</sup>程度で、それも回折限界内での収差ではほとんど変化しない。

一方干渉計による波面収差の測定は、物理量の測定であり、特に縞走査技術と組み合わせることで、位相分布を容易に定量化できる。さらにゼルニケ級数展開によって、波面収差を球面、コマ、非点など各収差成分に分解して解析することが可能である。しかし干渉計は一般的にスポットの測定に比べて時間がかかり、空気の乱れや振動にも弱い。さらに実際に使用するレーザーの波長と、干渉計のレーザー波長を同一にすることが困難な場合がある。

波面収差を位相とし、光量分布を振幅として、フーリエ変換すると、焦点位置での点像強度分布が得られる。逆に点像強度分布を測定しても位相の情報が欠落しているため、フーリエ逆変換によってもとの波面収差を計算することは通常できない。しかし目視検査では点像強度分布の特徴をつかむことにより、定性的に波面収差の状態を推定していた。本稿では、点像強度分布の情報から、もとの波面収差を定量的に推定する新しいアルゴリズムを説明するとともに、この方法を実際の光ディスク用対物レンズの評価に応用した例を紹介する<sup>13)</sup>。

\* 本稿は平成4年度光学論文賞受賞記念講演(1993年3月30日、青山学院大学)を中心として、まとめたものである。

## 2. 点像強度分布からの収差の抽出

### 2.1 非球面レンズに生じる波面収差

光ディスク用の非球面対物レンズで集光されたスポットを観察すると、軸上であっても非点収差やコマ収差が観察される。これは非球面レンズの製造プロセスにおいてさまざまなエラーが生じ、それが波面収差を劣化させる要因となっているからである。例えばガラスモールドプロセスにおいてプレス時の上型と下型の傾きや横ずれによりコマ収差が発生するし、熱分布の不均一性により非点収差が発生する。さらにレンズの厚み、曲率半径、屈折率などの誤差により球面収差が発生する。レンズの検査工程においてこれらの収差要因が定量的に特定できれば、モールドプロセスへのフィードバックが可能となる。これらの誤差要因によって生じる波面収差は3次の収差が支配的である。焦点距離のような1次の変動は、オートフォーカスによってキャンセルされる。したがってここでは3次のコマ収差、非点収差、球面収差を点像強度分布から推定する方法について述べる。

### 2.2 コマ収差

点像強度分布を表すための座標を図1のようにとる。点像強度分布の最大強度の位置を原点とし、説明の都合上極座標と  $x$ - $y$  座標を設け、点像強度分布を  $I(r, \theta)$  あるいは  $I(x, y)$  で表す。レンズが無収差で、かつ入射光の光量分布が一様である場合には、エアリーリングと呼ばれる第1の暗環の半径を  $R_1$ 、第2の暗環の半径を  $R_2$  とするとそれぞれ

$$R_1 = 0.61\lambda / NA \quad (1)$$

$$R_2 = 1.22\lambda / NA \quad (2)$$

で求められる<sup>14)</sup>。ただし  $\lambda$  は光源の波長、 $NA$  は対物レンズの開口数である。ここで第1の暗環と第2の暗環

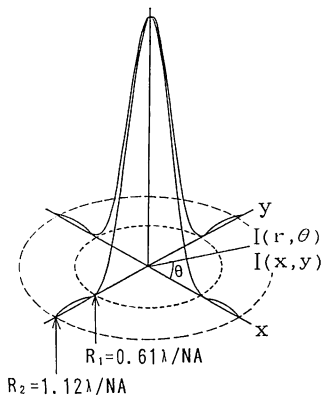


図1 スポットの点像強度分布と座標の取り方

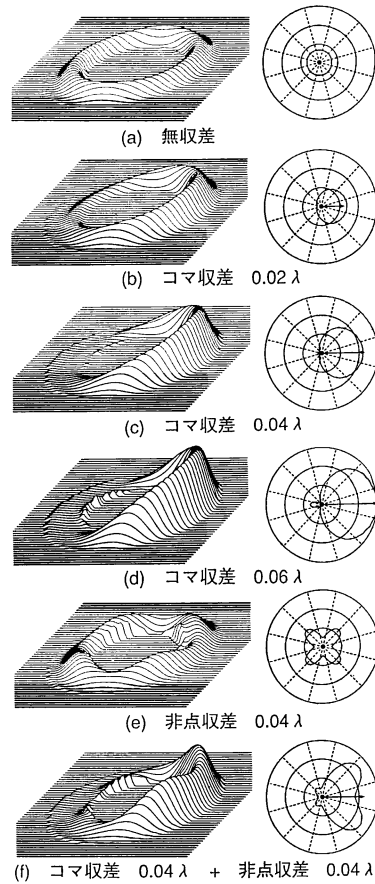


図2 スポットの1次リング内の強度分布とコマ収差ベクトル

の間を1次リングと呼ぶことにする。

コマ収差の特徴はこの1次リングに現れる。図2にコマ収差があるときの点像強度分布の1次リングの部分のみを示す。点像強度分布は波面収差をフーリエ変換することによって計算した。コマ収差の量に応じて、1次リングの一部の強度が大きくなっているのがわかる。コマ収差は量と方向をもつベクトルであるため、点像強度分布から抽出するコマ収差ベクトルを  $C$  とし、

$$C = \sum_{\theta} \left( \sum_{r=R_1}^{R_2} I(r, \theta) \mathbf{i}_{\theta} \right) \quad (3)$$

で表すことにする。ここで  $\mathbf{i}_{\theta}$  は  $\theta$  方向の単位ベクトルである。すなわちベクトル  $C$  は1次リング内の強度を方向ごとに和をとり、それを  $\theta$  方向の向きを持つベクトルとして全周方向に加算したものである。図2の(a)から(d)に示すように、コマ収差が大きくなるにつれて、コマ収差ベクトルもほぼ比例して大きくなっている。

コマ収差に球面収差が混合した場合は、1次リング全

体の光量が増減するため比較的影響が少ない。ここでは非点収差が混合した場合の解析結果について示す。図2(e), (f)は非点収差が  $0.04\lambda$  ある場合のコマ収差ベクトルを示したものである。非点収差のみの場合は当然コマ収差ベクトルはゼロになる。非点収差とコマ収差が混合した場合は、1次リングの形状はコマ収差だけの場合と比較してかなり変化するが、コマ収差ベクトルの方向と強度は、コマ収差だけが存在した場合とほとんど変わらない。

2.3 非点収差

非点収差を含む点像強度分布をデフォーカスしながら観察すると、非点収差のちょうど中間では最小錯乱円となってスポットの断面形状がほぼ円形となる。そこから外れるとスポットの断面形状が楕円状となる。したがってその楕円度を定量化することにより非点収差の量を抽出できる。ビームの楕円度を表すために1次モーメント  $M(\theta)$  を導入する。

$$M(\theta) = \sum_{r=0}^{\infty} r I(r, \theta) \quad (4)$$

1次モーメント  $M(\theta)$  を  $2\theta$  方向の向きを持つベクトルとして全周方向に加算することで、楕円度の量と方向を表す1次モーメントベクトル  $M_{2\theta}$  が次のように得られる。

$$M_{2\theta} = \sum_{\theta} i_{2\theta} M(\theta) \quad (5)$$

図3(a)は非点収差のみを含む点像強度分布をデフォーカスさせたときのシミュレーションである。1次モーメントが点像強度分布の楕円度を良く表している。デフォーカスの方向を変えることで、1次モーメントベクトル  $M_{\theta}$  の方向が90度変化する。すなわち  $+2.5 \mu\text{m}$

デフォーカスしたときの1次モーメントベクトルを  $(R_x, R_y)$  とすると、 $-2.5 \mu\text{m}$  デフォーカスしたときの1次モーメントベクトルは  $(-R_y, R_x)$  となる。点像強度分布が楕円状になるのは、非点収差のときだけでなく、例えば半導体レーザーのように、光量分布そのものが楕円状をしているときにも生じる。しかしこの場合は図3(b)に示すように正負の両方向にデフォーカしてもその1次モーメントベクトル  $(B_x, B_y)$  は変化しない。したがって非点収差量を表すときにはデフォーカスを正負の両方向にかけて、変化しない成分  $(B_x, B_y)$  をキャンセルすることができる。正のデフォーカスで測定した1次モーメントベクトルを  $(P_x, P_y)$ 、負の場合を  $(M_x, M_y)$  とすると、

$$(P_x, P_y) = (R_x, R_y) + (B_x, B_y) \quad (6)$$

$$(M_x, M_y) = (-R_y, R_x) + (B_x, B_y) \quad (7)$$

となる。ここから非点収差ベクトル  $A$  を次のように表す。

$$A = (R_x, R_y) = \left( \frac{P_x - M_x - (P_y - M_y)}{2}, \frac{P_x - M_x + (P_y - M_y)}{2} \right) \quad (8)$$

2.4 球面収差

無収差の場合の点像強度分布はデフォーカスの正負の方向に対して対称に変化する。しかし球面収差があるとその対称性がなくなり、特に1次リング内の強度変化が著しく異なる。球面収差がある場合のスポットの1次リング内のみの強度分布を図4に示す。球面収差が増加するにしたがって、正方向へデフォーカスした時と負方向へデフォーカスした時の1次リング内の総光量の比が大

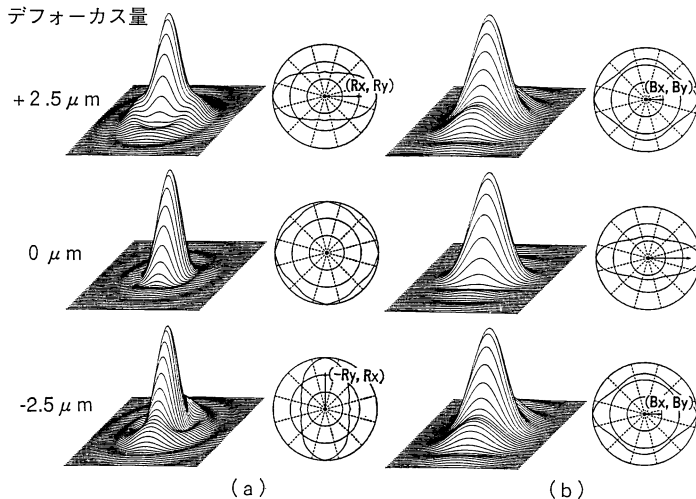


図3 非点収差のある点像強度分布と非点収差ベクトル

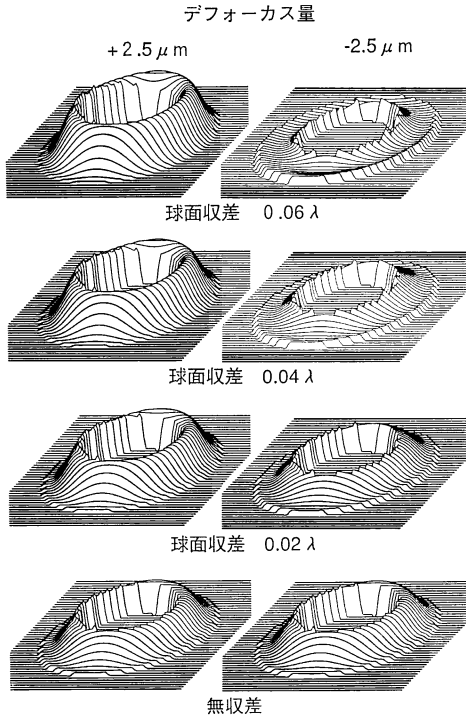


図 4 球面収差のあるスポットの 1 次リング内の強度分布

大きく異なる。球面収差がない場合はその比は 1 となる。したがって球面収差量  $S$  はその対数をとることにより  $S = \log(S_p/S_m)$  (9) と表すことができる。ここで  $S_p$  および  $S_m$  は正および負の方向へデフォーカスしたときの 1 次リング内の強度の和を表す。

### 3. 実験結果

測定光学系を図 5 に示す。ピックアップに搭載した被検レンズで集光されたスポットを顕微鏡光学系で拡大

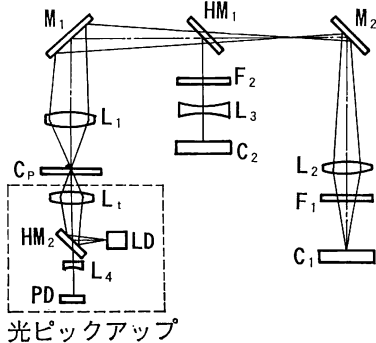


図 5 測定器の光学系

し、CCD カメラで強度分布のデータをコンピュータに取り込みデータ処理を行った。データは  $240 \times 240 \times 16$  bit で取り込まれる。また光学系にはアライメントのための光学系も構成されている。光軸方向へのアライメントは、ピックアップ光学系のフォーカスエラー信号を用いて、ピックアップ全体を移動させるような構成になっている。これによりフォーカス位置の再現性向上を図っている。

光ディスクの対物レンズでは、ディスクを通して像が結像される。ディスクがレンズに対して相対的に傾くとコマ収差が発生する。これを利用して、光ピックアップに残存するコマ収差を補正することができる。点像強度分布の測定時にもこれを利用して、まずコマ収差を補正し、その補正量からコマ収差の量を定量化すると同時に、非点収差、球面収差の測定時にコマ収差の影響を除去するようにした。

図 6 はディスクを傾けながら、点像強度分布からコマ収差ベクトルを測定した結果を示す。ディスクの傾きに対して、コマ収差は比例する。点像強度分布から計算したコマ収差もほぼリニアに増大していることがわかる。

コマ収差を補正した後に非点収差と球面収差を測定する。非点収差の異なる 14 個の被検レンズを測定した。点像強度分布から測定した非点収差ベクトル  $A$  の量と、干渉計で測定した波面収差との相関を図 7 に示す。相関があまりよくない理由に光源となっている半導体レーザーの非点収差がある。そこで被検レンズを光軸に対して回転させながら測定すると図 8(a) に示すように周期的に非点収差が変化した。そこで変化量から残存非点収差を計算し補正した結果を図 8(b) に示す。補正することにより測定の再現性は波面収差の RMS に換算して  $2 \text{ m}\lambda$  以下となった。

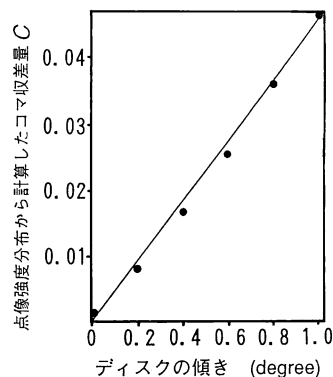


図 6 ディスクの傾きによるコマ収差ベクトル量の変化

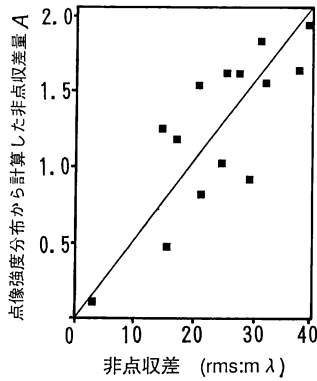


図7 非点収差における波面収差と非点収差ベクトル量の相関

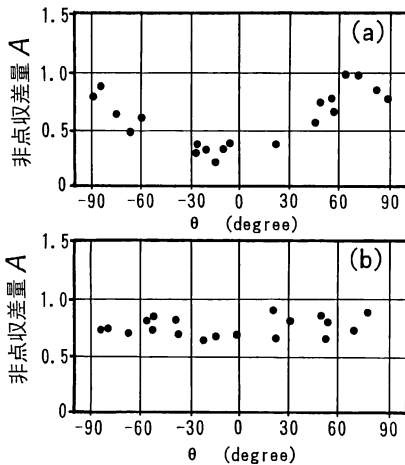


図8 レンズを回転させながら測定したときの非点収差量の変化。(a)半導体レーザーの非点収差を補正する前、(b)補正後。

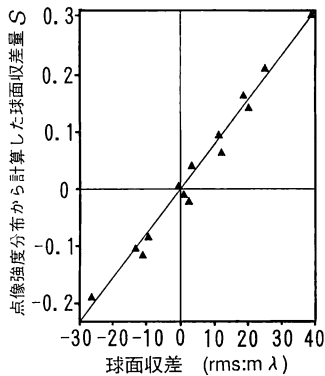


図9 球面収差における波面収差と点像強度分布から計算した球面収差量との相関

同様にして球面収差の異なる14個の被検レンズを測定した。干渉計で測定した波面収差と点像強度分布から計算した球面収差量との相関を図9に示す。相関係数は

0.963と非常に良く、球面収差の符号にも対応している。再現性は波面収差のRMSに換算して $3\text{m}\lambda$ 以内であった。

#### 4. おわりに

集光されたスポットの強度分布から、レンズの波面収差を推定する方法を提案した。本来位相情報が欠落している点像強度分布から波面収差を再生することはできない。しかし点像強度分布の特徴をうまく抽出することによって、波面収差を高い相関をもって抽出することができる方法を提案した。市販の測定器にソフトウェアを付加することで実際に光ディスク用の対物レンズの測定に応用したところ、干渉計による波面収差測定値と高い相関が得られた。本システムでの測定時間は、レンズ1個につきアライメント時間も含めて12.8秒と高速であった。今回は光ディスク用対物レンズの検査に応用したが、回折限界を有するレーザー光学系の評価に応用可能である。今後多くのレーザー応用機器の評価に使用されることを期待したい。

最後に本研究の遂行に当たり、ご指導いただきました当社部品デバイス研究センター長澤雅浩取締役役に感謝いたします。また測定器のハードウェアおよびソフトウェアに関して有益な助言をいただきました小野測器(株)、日商エレクトロニクス(株)、ならびにレンズサンプルの提供とご議論いただきました当社オーディオ事業部吉村宗洋主任技師、共同研究者の吉川智延氏に感謝いたします。

#### 文 献

- 1) J. Haisma, E. Hugues and C. Babolat: "Realization of a bi-aspherical objective lens for Philips Video Long Play system," *Opt. Lett.*, **4** (1979) 70-72.
- 2) R.O. Maschmeyer, C.A. Andrysick, T.W. Geyer, H.E. Meissner, C.J. Parker and L.M. Sanford: "Precision molded-glass optics," *Appl. Opt.*, **22**(1983) 2410-2412.
- 3) R.O. Maschmeyer, R.M. Hujar, L.L. Carpenter, B.W. Nicholson and E.F. Vozenilek: "Optical performance of a diffraction-limited molded-glass bi-aspherical lens," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 2413-2415.
- 4) Y. Tanaka, Y. Nagaoka and M. Ueda: "Lens and optics for optical disk system," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**, Suppl. (1987) 121-126.
- 5) M. Sunohara, Y. Tanaka, Y. Nagaoka, M. Ueda and K. Azuma: "Single lens CD player pickup system using a bi-aspheric molded glass lens," *IEEE Trans.*, **CE-33** (1987) 520-530.
- 6) D. Visser, T.G. Gijsbers and R.A.M. Jorna: "Molded and measurements for replicated aspheric lenses for optical recording," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 1848-1852.

- 7) H. Nishi, H. Ichikawa, M. Toyama and I. Kitano: "Gradient-index objective lens for the compact disk system," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 3340-3344.
- 8) Y. Kimura, S. Sugama and Y. Ono: "Compact optical head using a holographic optical element for CD players," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 668-671.
- 9) Y. Komma, S. Kadowaki, Y. Hori and M. Kato: "Holographic optical element for an optical disk head with spot-size detection servo optics," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 5127-5130.
- 10) P. Kuttner: "Design and testing of lenses for optical disk technology," *Opt. Eng.*, **22** (1983) 473-478.
- 11) D.K. Cohen, B. Little and F.S. Luecke: "Techniques for measuring 1  $\mu$ m diam Gaussian beams," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 637-640.
- 12) M.T. Gale and H. Meier: "Rapid evaluation of submicron laser spots," *RCA Rev.*, **46** (1985) 56-69.
- 13) Y. Tanaka and M. Yosikawa: "Novel measuring technique of the optical performance of objective lenses for optical disk systems," *Appl. Opt.*, **31** (1992) 5305-5311.
- 14) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics* (Pergamon, Oxford, 1980) pp. 395-398.