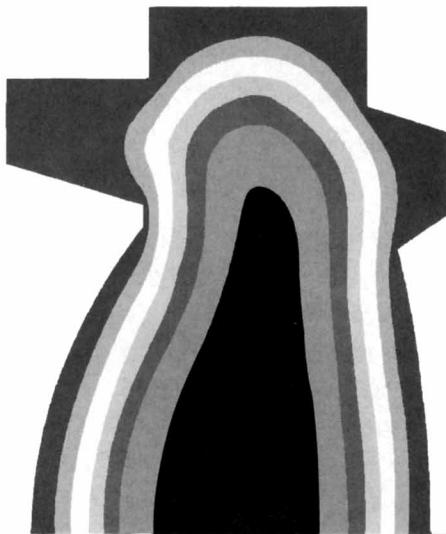


光ディスク用プラスチック対物レンズの吸湿シミュレーション

Simulation on Moisture Absorption in a Plastic Objective

小林雅也
荒井則一
オプト事業部
光学開発センター
松丸 隆
オプト事業部
オプト生産グループ



Abstract:

The use of plastic lenses in optical disk readers, copiers, laser printers, and similar devices has brought great economy of production, among other benefits. A problem, however, in the use of plastic has been its propensity to absorb moisture and swell. In plastic lens design, then, a practical and accurate method of predicting moisture absorption and its effects is essential.

Precisely such a method is presented here. In the method's development, we addressed the spherical aberrations occurring in a bi-aspherical singlet objective lens developed by Konica for use with optical disks. Assuming these aberrations resulted from inhomogeneous refractive distribution caused by the absorption of moisture, we attempted to simulate the degree of spherical aberration through the application of the finite element method(FEM) and inhomogeneous ray tracing. A comparison of the rms wavefront aberrations produced by the simulation with those found in observed experimental data showed high correspondence, and the accuracy and practicality of the simulation was confirmed.

Kobayashi, Masaya
Arai, Norikazu
Optics Research & Development
Center
Optics Division
Matsumaru, Takashi
Optics Production Section
Optics Devision

1

はじめに

1984年、当社はコンパクトディスク(CD)用両面非球面プラスチック対物レンズの商品化に成功した。このことは当時としては大きな脚光を浴び、CDピックアップの低コスト化に著しく貢献した。また当社はこれに続いて光学式ビデオディスク(VD)用プラスチック対物レンズ、光磁気ディスク(MO)用プラスチック対物レンズの開発等々、次々と高精度なプラスチックレンズを世に送り出している。

このような光ディスク用プラスチックレンズは環境の湿度の変化により球面収差が変化するということが知られている。この球面収差変化は、プラスチックレンズが水をよく吸収するためプラスチックレンズ内に吸収された水分の不均質な分布によりレンズの屈折率に不均質な状態が生じることが原因となるということが推定される。

湿度によるレンズの球面収差変化を小さくするためには、レンズの素材として耐湿素材を用いるなどの対策があるが、従来、この変化量が許容値内かどうか判断するには実際にレンズを試作し、いろいろな角度から耐湿試験を行なう必要があった。したがって、レンズの設計段階でレンズ設計データ、形状、レンズ素材の物性から球面収差の変化を予測できればレンズ開発期間の短縮が可能となる。

ここでは、レンズ形状による球面収差量の変化を有限要素法と不均質媒体の光線追跡プログラムを用いて解析を行ない、その結果を紹介する。

2

光ディスク用非球面プラスチック対物レンズと湿度による波面収差変化

2.1 波面収差

光ディスク用プラスチックレンズの光学性能は波面収差によって表わすことができる。波面とは光線に直交する面をいい、理想的な波面—すなわち収差のないとき、波面は球面波、もしくは平面波を形成する。波面収差とはこの理想的な球面波、あるいは平面波からのずれを言う。波面収差は干渉計を用いて測定することができる。

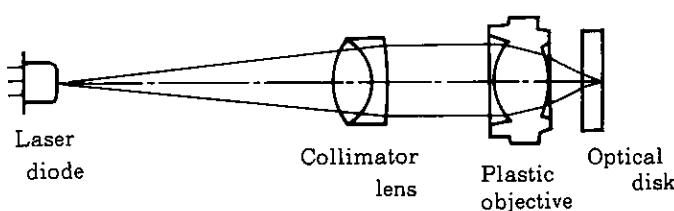


Fig.1 Plastic objective in optical disk reader

ここでは波面収差のrms (Root Mean Square) 値を光学性能の代表する量として用いることにする。波面収差が大きいと、対物レンズから光ディスク面上に結ばれる光線のスポット径が大きくなったり、あるいは変形したりディスクからの信号の読み取りに悪影響を及ぼす。波面収差rms値が、Maréchal criterionである $0.07\lambda (\lambda=780\text{nm})$ 以下のとき、回折限界の光学系となり理想光学系として扱うことができる。

2.2 湿度による波面収差変化

プラスチック対物レンズを室内放置したとき、波面収差のrms値は時間的に変動する。この様子をFig.2に示す。これはレンズの取り巻く環境の湿度変化によるものであると確認できている。乾燥したプラスチックレンズを60°C 90%RHの高温高湿な環境下に入れて湿度による波面収差の変化を調べた。その結果をFig.3に示す。ここで図に示される実線は波面収差のrms値を表わし、他の3本の線は波面収差をZernike展開により球面収差(SA)、コマ収差(COMA)、非点収差(AS)にそれぞれ分類したものである。Fig.4に(a)プラスチックレンズの初期の波面の状態を表わす干渉縞像と(b)波面収差が最も大きく変化したときの波面を表わす干渉縞像を表わす。

Fig.3をみるとコマ収差と非点収差はほとんど変化していないが、球面収差は時間とともにアンダー(-)方向に変化して約12時間後にピークに達する。その後球面収差は小さくなる方向に向かい最終的にはほぼ初期値に戻る。

この湿度によるレンズの球面収差変化のメカニズムは次の様に想像される。乾燥したレンズを高湿状態の環境下に入れると水分がレンズ表面から内部に徐々に浸透し拡散していく。レンズ表面周辺では水分の密度が高くな

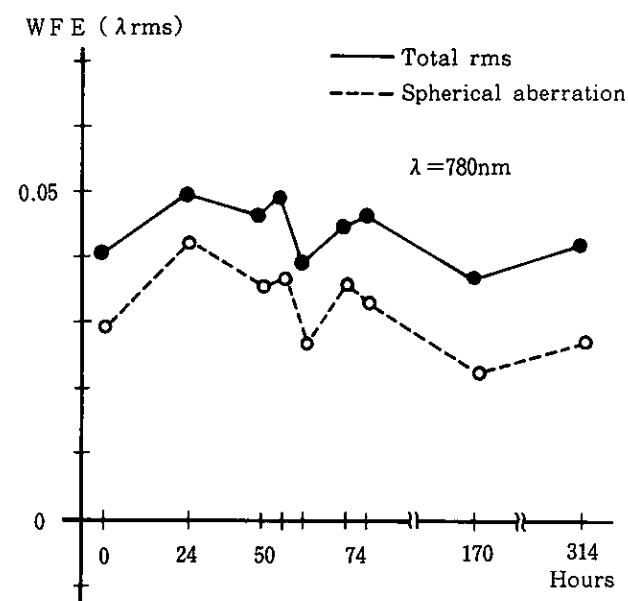


Fig.2 Wavefront aberration change in plastic objective

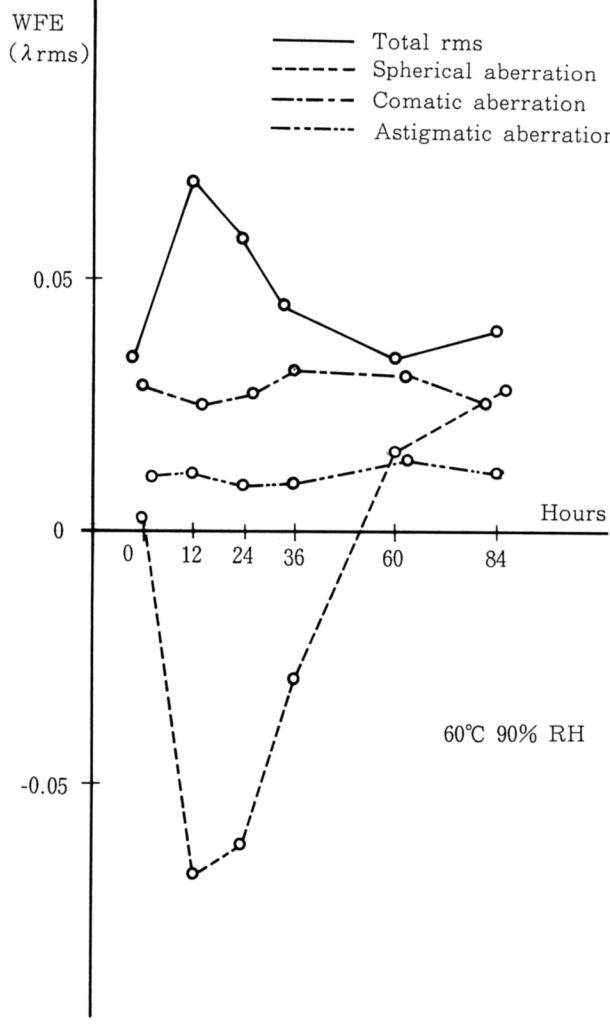


Fig.3 The wavefront aberration changes at high temperature and humidity

り、レンズ内部へいくほど密度が低いというような不均質分布が生じる。またレンズ形状が光軸に対して軸対称であるためこの不均質分布は軸対称となる。

ここで球面収差の原因として以下の二つが考えられる。

(A)レンズ光学面の面変形

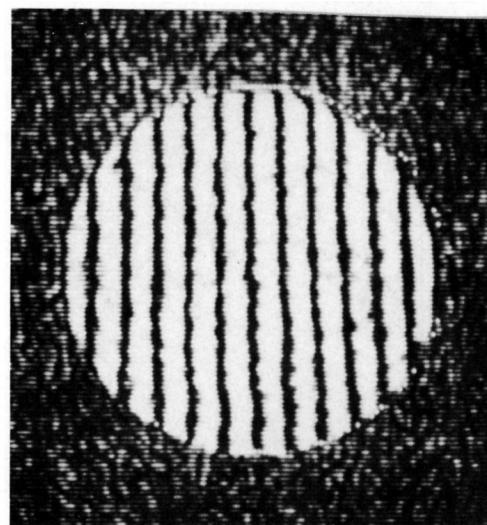
プラスチックは水を吸うと膨張する。レンズの吸水分布は不均質分布であるためレンズ内部各部での膨張量が異なる。そのためレンズ光学面の膨張量も各箇所で異なり不均等な面変形が生じる。レンズ内の吸水分布はレンズの光軸に対して軸対称であり、またプラスチックの膨張は等方性であると仮定すると、この不均等な面変形により球面収差が生じると考えることができる。

そこでプラスティック対物レンズを高温高湿の環境下に置き、レンズの光学面の形状変化を様子を調べてみた。その結果、面形状は比例膨張することが分かった。レンズの面変形は比例膨張する場合、シミュレーション結果により収差にあまり大きな影響を及ぼさないことが分かった。従って、吸水変化による面形状変化は球面収差に影響を及ぼさないと推定できる。

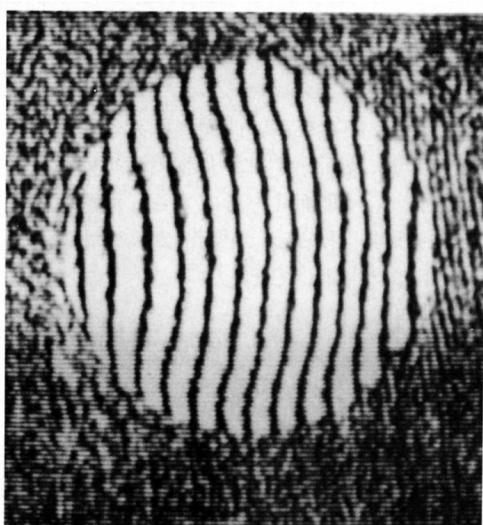
(B)レンズ内の屈折率の不均質分布化

アクリル系プラスチック素材は一般に吸水率が高いほど屈折率が高くなることが分かっている。上記のレンズ内部の水分密度分布の推定からレンズ内部の屈折率は軸対称な不均質屈折率分布と推定され、この屈折率分布により唯一の軸対称な収差、球面収差が生じると考えることができる。

その後レンズは吸水をつづけて最終的にレンズ全体がその素材の飽和吸水率に達する。そして水分の密度分布は一定となる。これにより屈折率は初期よりも少し高い



(a) Initial state



(b) Greatest aberration

Fig.4 Optical disk objective interference fringes

値で一定となるが、しかしこの程度の屈折率変化は波面収差に影響を及ぼさないことがシミュレーションにより確認されている。その結果、球面収差は初期状態に比べてほとんど変化がない状態に戻ることになる。

以上が我々の仮定した吸水時に起こる球面収差変化のメカニズムである。球面収差の原因収差の原因是ほとんど屈折率の不均質分布によるものであるということが推定できる。

2.3 各種レンズの湿度による球面収差変化量の違い

当社で開発した光ディスク用対物レンズは多種にわたるが、各々同じ湿度変化に対する吸水時の波面収差量は異なる。そこで各レンズの様々な違いを見比べてその変化量の違いの原因を次のように大別した。

1 レンズ形状

- ・レンズの曲率半径
- ・レンズの厚み
- ・レンズの外形状

2 レンズ素材

- ・レンズ素材の飽和吸水率
- ・レンズ素材の吸水率に対する屈折率変化量

当社ではVD用プラスチック対物レンズを開発する際、CDレンズを単に高NA化 ($NA0.45 \rightarrow NA0.50$) するだけでは球面収差の変化量が大きく、実用上問題が生じることが判明した。

そこでレンズ材料として耐湿性の高い素材を用いるだけでなく、レンズ形状も若干変更した。これによりFig.5(a)に示される波面収差の湿度特性をFig.5(b)の様に改善することができた。

以上のようにレンズの素材、形状等は球面収差の変化量に大きな影響を及ぼすため、レンズ設計段階で湿度による球面収差変化量を予測する必要がある。

3

吸湿の数学的モデルと シミュレーション方法

従来、光ディスク用対物レンズの吸湿特性は、実際にレンズを試作し、そのレンズを高温高湿な環境に入れて波面収差の動きを見る試験を行わなければ得られなかった。光ディスク用対物レンズの試作は多大な費用と労力を必要とするためレンズ設計時点で吸湿による波面収

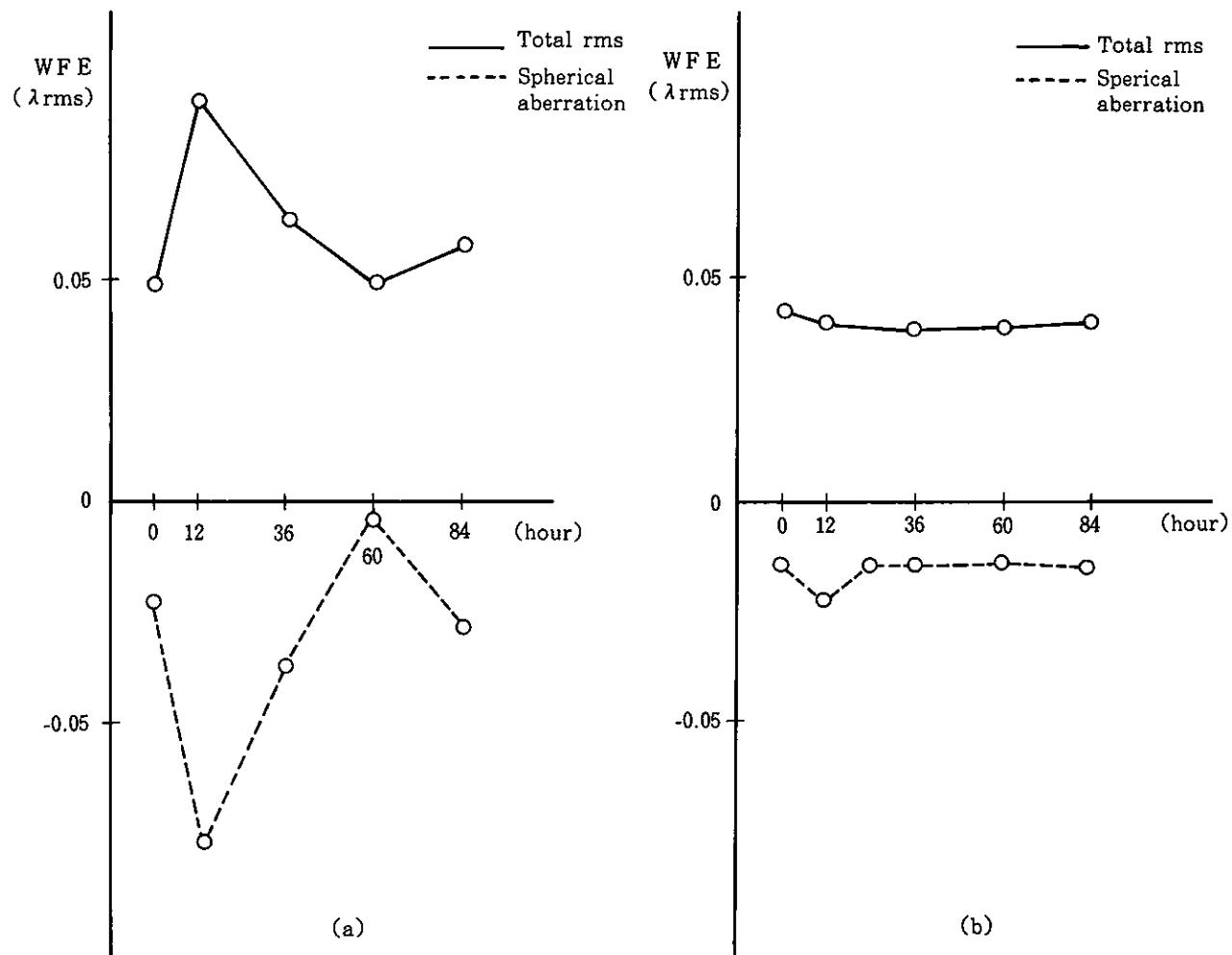


Fig.5 Effect of material and shape on wavefront aberration change

差の変化量が予測できる手法の確立が望まれていた。そこでこのレンズの吸湿についての数学的モデルをたてシミュレーションを試みた。

このシミュレーションの流れを示すフローチャートをFig.6に表わす。このフローチャートの各過程の詳細について以下に説明する。

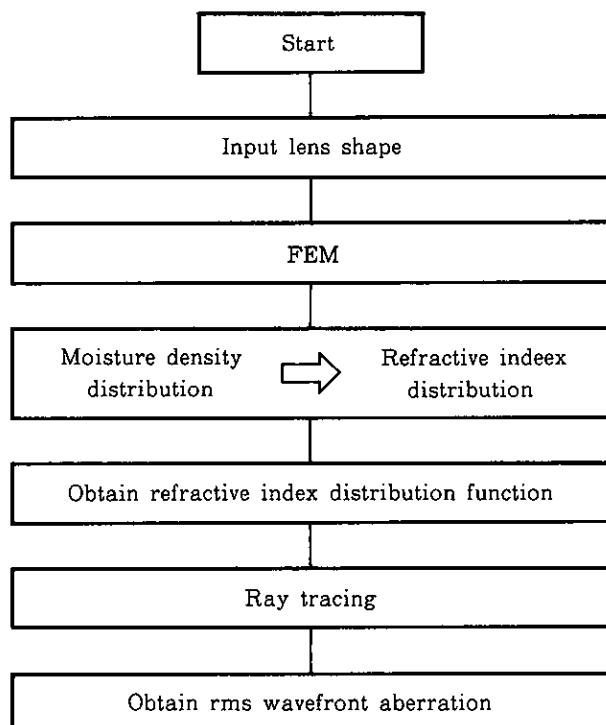


Fig.6 Simulation flow chart

3.1 吸水過程の拡散方程式

プラスチックレンズの水分の浸透及び拡散は次に示す非定常拡散方程式で表わすことができる。

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

ここでDはプラスチック材料の水分の拡散係数であり、湿度が高くなるほど拡散速度が速くなる。Dは定数であり等方的であると仮定する。Wはレンズ内の水分の密度、tは時間経過を表わす。

レンズは光軸に対して軸対称であるため(1)式は次の様になる。

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D \left[\left(\frac{1}{y} \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right] \quad (2)$$

ここでxは光軸方向を表わし、yは径方向を表わす。

実際に用いる光ディスク用対物レンズの形状は複雑であり(2)式を解析的に解くことは困難である。そこで(2)式に基づいた有限要素法(FEM)を用いてシミュレーションを行なった。

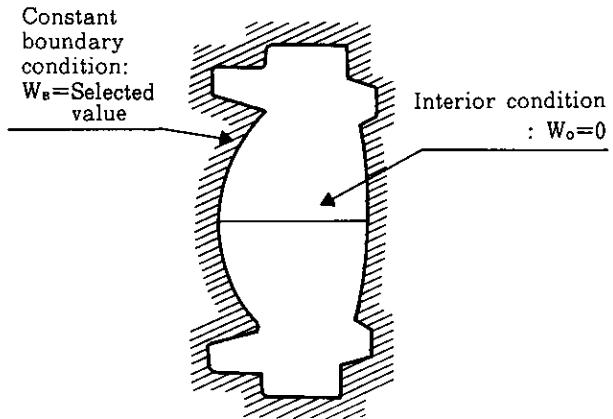


Fig.7 Boundary and interior conditions

Fig.7に示されるように初期条件は吸水分布がレンズ内どこでもゼロとなるようにし、境界条件はレンズ表面の吸水率がプラスチック材料の飽和吸水率となるようにした。以上によりFEMを用いて任意の経過時間での吸水分布を計算することが可能となる。

3.2 屈折率分布の算出

FEMにより算出された吸水分布を屈折率分布に換算し、屈折率関数を求める。吸水分布から屈折率分布への換算は次式のような形で求めた。

$$N_{xym} = N_0 + \alpha W_{xym} \quad (3)$$

ここで W_{xym} は座標 (x_m, y_m) での吸水率、 N_{xym} は座標 (x_m, y_m) での屈折率を表わす。また樹脂メーカーのデータを参考にして α は一定、すなわち屈折率と吸水率との関係はリニアであると仮定した。

データを光線追跡にかけるため屈折率分布の関数化が必要となる。屈折率分布関数 $N(x, y)$ は次のように表わすことができる。

$$N(x, y) = \sum_i \sum_j N_{ij} X^i Y^j \quad (4)$$

N_{ij} は最小自乗法により求めることができる。この最小自乗法のフィッティング精度は 1×10^{-5} のオーダーであり、フィッティング誤差の影響はシミュレーションに影響を与えないレベルである。

3.3 光線追跡

屈折率分布関数 $N(x, y)$ を持つレンズについて、当社で開発した非球面不均質光線追跡法を用いて波面収差rms値をもとめる。

4 実験結果とシミュレーション結果

乾燥したCD用プラスチック対物レンズを高温高湿の環境に入れ、波面収差の変化を調べる試験を行ない、それと同時に全節で述べたシミュレーションをこの実験と同じ条件で実行した。

この実験及びシミュレーションの対象としたレンズの

仕様をTable 1に示す。また環境条件は60°C 90%RHとした。

実際の測定結果をFig.8に示す。この図からレンズを高温高湿の状態に入れると球面収差(SA)は、アンダー方向(Fig.8で“-”方向)に変化することが分かる。

次に上記と同じ対物レンズの形状の設計データを計算機に入力し、FEMによりシミュレーションを実行した。これにより得られた時間経過に対する水分の密度分布の変化の様子をFig.9に示す。Fig.9からレンズ表面は常にこのレンズのプラスチック材料の飽和吸水率で拘束されており、レンズ内部にいくにしたがって水分の密度が低くな

Table 1 Specifications of plastic singlet objective for CD use

Focal length	(f)	4.5mm
Numerical aperture	(NA)	0.45mm
Magnification	(M)	0mm
Wavelength	(λ)	780mm
Working distance	(WD)	1.9mm
Cover glass thickness	(dc)	1.2mm
Maximum image height (Ymax)		0.16mm

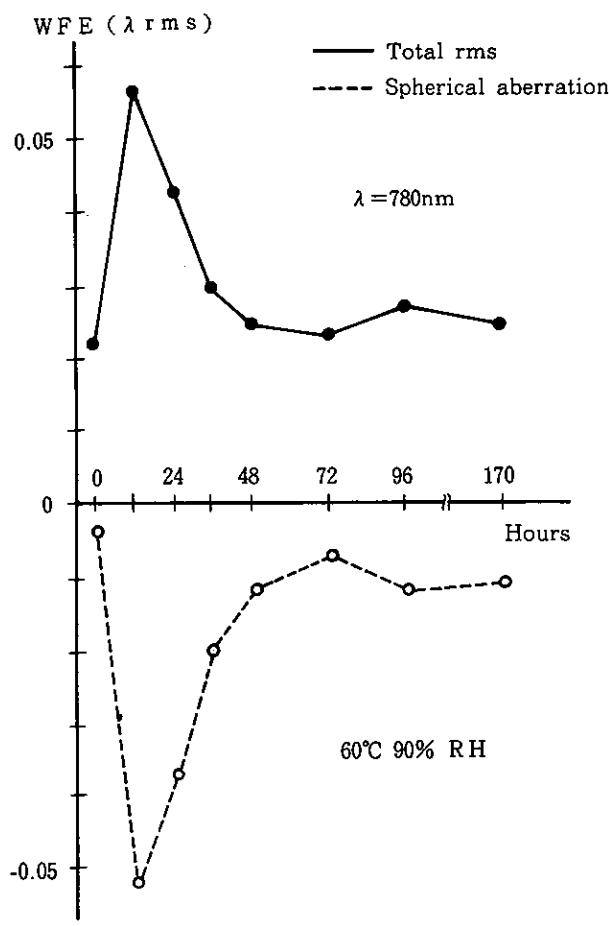


Fig.8 Observed data

っていることが分かる。そして時間経過にしたがい、外部の水分が徐々にレンズ内部に浸透、拡散していく様子を確認できる。

上記で得られた時間的に変化する水分の密度分布について各々屈折率分布に換算した。この分布における屈折率の最大値と最小値の差はおよそ 250×10^{-5} である。

各時間での屈折率分布は算出され、対応する非球面レンズの波面収差rms値が前節で述べた不均質光線追跡により得られた。その結果をFig.10に示す。このグラフはシミュレーションで得られた波面収差rms値の時間的推移を表わすもので球面収差はアンダー方向に変化している。

そして波面収差rms値の変化の最大値(ピーク値)について実験結果とシミュレーション結果を比較した表をTable 2に示す。

Table 2から実験結果とシミュレーション結果がよく対応していることが分かる。

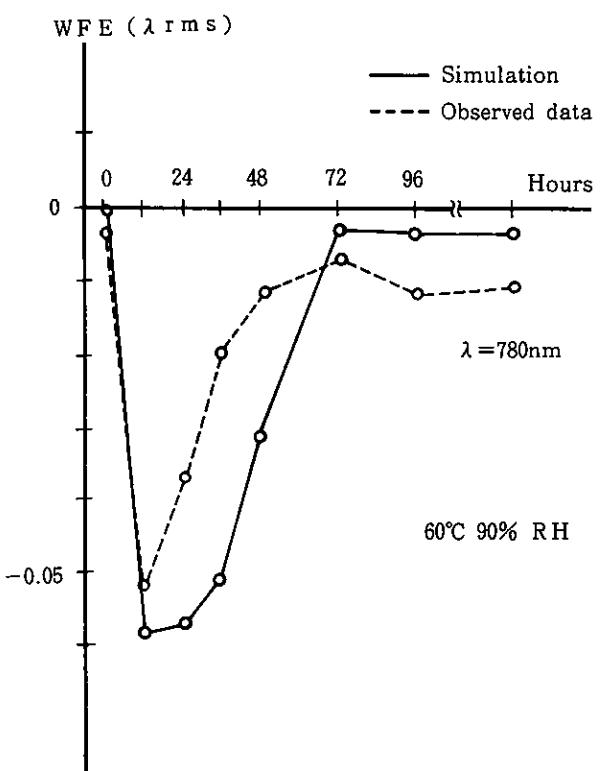


Fig.10 The result of the simulation

Table 2 Maximum change of rms waveform

Simulation	-0.058λ
Observed	-0.05λ

($\lambda=780\text{nm}$)

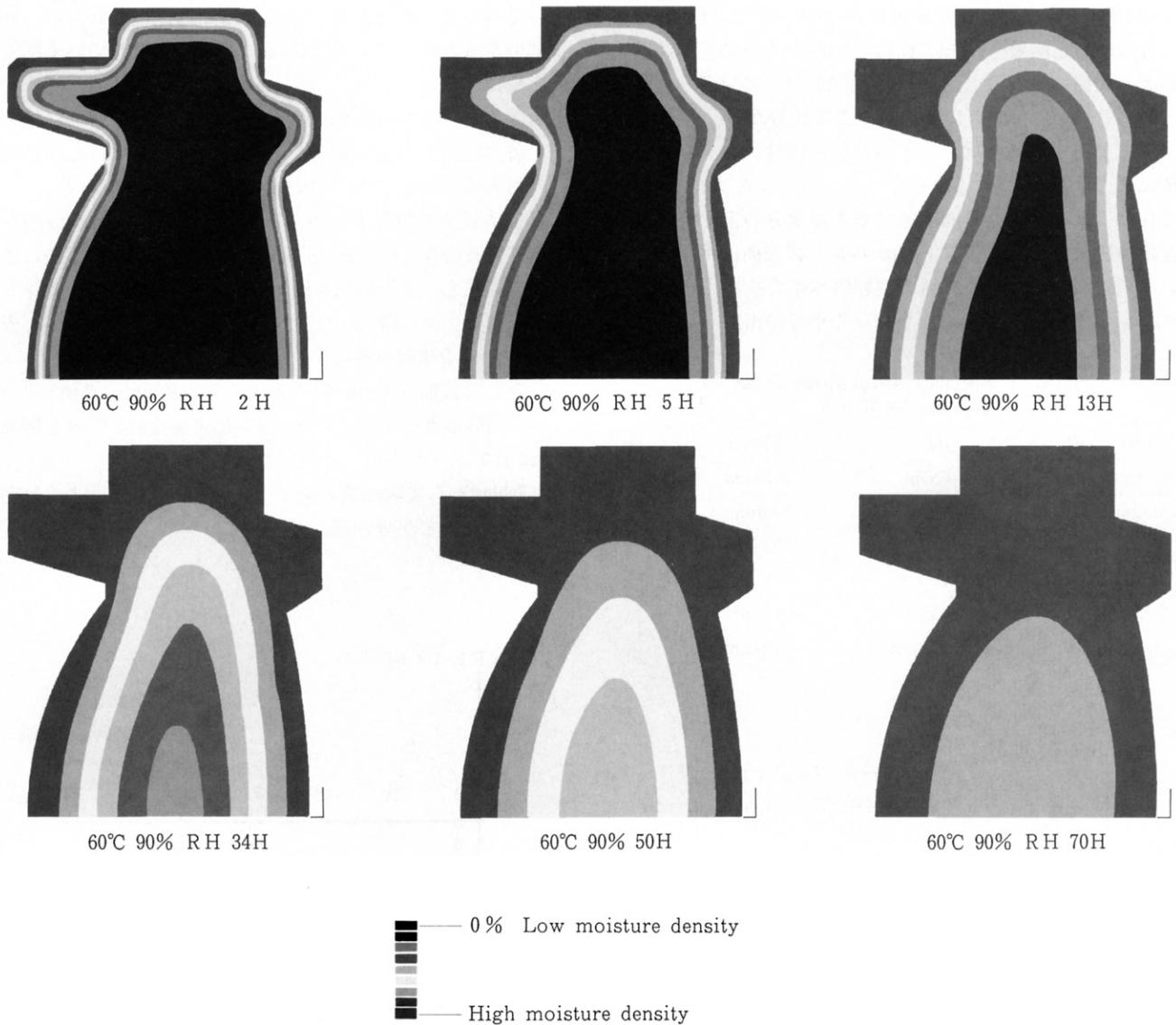


Fig.9 Display of change in moisture density distribution

5

終わりに

FEMと非球面不均質屈折率光線追跡法により光ディスク用非球面プラスチックレンズの湿度による変化は屈折率の不均質分布によるものであると確認でき、またそれによって算出された波面収差rms値は実際の測定結果とほぼ一致した。よって今後プラスチックレンズの設計段階で波面収差変化を予想することができ、これを設計にフィードバックすることにより、耐湿性能の優れたレンズを短期間に低成本で設計することが可能となった。

●参考文献

- 1) T.Kiriki, N.Izumiya and T.Kojima : CLEO '84 Conference Digest WB3,80
- 2) O. C. Zienkiewicz : "The Finite Element Method in Engineering Science" McGraw-Hill Company, London (1977)
- 3) 荒井則一"Physics in Microoptics" p.25-, 日本光学会 微小光学研究グループ(1988)
- 4) P. G. Shewmon : "Diffusion in Solids", McGraw-Hill, New York (1963)