

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2015 年 9 月 17 日(17.09.2015)



(10) 国際公開番号

WO 2015/136997 A1

- (51) 国際特許分類:
G02C 7/02 (2006.01) *G02B 7/06* (2006.01)
A61F 2/16 (2006.01) *G02C 7/04* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2015/052409
- (22) 国際出願日: 2015 年 1 月 28 日(28.01.2015)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2014-048026 2014 年 3 月 11 日(11.03.2014) JP
- (71) 出願人: 興和株式会社(KOWA COMPANY, LTD.)
[JP/JP]; 〒4608625 愛知県名古屋市中区錦三丁目
6 番 2 9 号 Aichi (JP).
- (72) 発明者: 石川 治雄 (ISHIKAWA, Haruo); 〒
4570841 愛知県名古屋市中区豊田二丁目 7 番 1
0 号 興和株式会社 I O L 研究開発本部内
Aichi (JP).
- (74) 代理人: 川口 嘉之, 外(KAWAGUCHI, Yoshiyuki
et al.); 〒1030004 東京都中央区東日本橋 3 丁目 4
番 1 0 号 アクロポリス 2 1 ビル 6 階 Tokyo
(JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA,
BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN,
CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES,
FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN,
IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR,
LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH,
PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK,
SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保
護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW,
MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユー
ラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨー
ロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE,
ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC,
MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR),
OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM,
ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- 添付公開書類:
— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

(54) Title: OPHTHALMIC LENS AND METHOD FOR DESIGNING OPHTHALMIC LENS

(54) 発明の名称: 眼用レンズ及び眼用レンズの設計方法

$$Z = \frac{cr^2}{1 + [1 - c^2 r^2 (k + 1)]^{1/2}} + A(\theta)r^2 + B(\theta)r^4 \cdots (1)$$

(57) Abstract: Provided are an ophthalmic lens and a design method for an ophthalmic lens wherein a toric surface, spherical surface/aspherical surface and the like can be prescribed across the entire surface of the lens. An ophthalmic lens is configured such that the cross-sectional shape of the ophthalmic lens in any meridian direction on the lens surface is expressed by an equation that includes (1) where c is paraxial curvature in the ophthalmic lens, r is the distance from the lens center in the ophthalmic lens, k is a conic constant for a surface rotationally symmetrical around the lens optical axis in the ophthalmic lens, c , r , and k are common for the meridian directions on the lens surface, and $A(\theta)$ and $B(\theta)$ are parameters expressed by functions dependent on angles in the meridian directions.

(57) 要約: レンズ面全体に亘ってトーリック面及び球面・非球面等を規定することができる眼用レンズ及び眼用レンズの設計方法を実現する。眼用レンズを、眼用レンズのレンズ面上の任意の経線方向における断面形状が〔数 1〕を含む式で表現され、 c は眼用レンズにおける近軸曲率であり、 r は眼用レンズのレンズ中心からの距離であり、 k は眼用レンズにおけるレンズ光軸に回転対称な面のコーニック定数であり、 c 、 r 、 k はレンズ面上の経線方向について共通であり、 $A(\theta)$ 及び $B(\theta)$ は、経線方向の角度に依存する関数で表現されるパラメータである眼内レンズとする。



WO 2015/136997 A1

明 細 書

発明の名称： 眼用レンズ及び眼用レンズの設計方法

技術分野

[0001] 本発明は、乱視矯正用の眼用レンズ及び眼用レンズの設計方法に関する。

背景技術

[0002] 乱視矯正用の眼用レンズの例としては、眼鏡やコンタクトレンズ、眼内レンズ等が挙げられる。これらの眼用レンズにおいては、レンズ面が非球面形状を有する場合やトーリック面と呼ばれる光学面を有する場合がある。トーリック面とは、ラグビーボールやドーナツの側面のように、少なくとも2本の経線の曲率半径が異なっているレンズの面形状を指す。そして、従来は、レンズ軸方向及び主経線方向のレンズ断面形状のみを規定する式や、レンズの光軸からの距離及び主経線と子午線とがなす角度によりレンズ断面形状を規定する式等を用いて乱視矯正用の眼用レンズが設計、製造されていた（特許文献1及び特許文献2）。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特許第4945558号

特許文献2：特表2011-519682号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] しかしながら、従来のように主経線方向のレンズ断面形状のみを規定する乱視矯正用の眼用レンズの設計方法では、レンズ全体の断面形状を規定できない。また、レンズ断面形状を規定する際に採用する方向以外における形状を規定することも難しい。さらに、主経線と子午線とがなす角度等の角度を変数に用いても、当該変数は、レンズの光軸に垂直な平面における強主経線方向及び弱主経線方向における形状を決めると一意に決まる値であるため、結果的に設計上の自由度に制限が生じる。このため、これらの設計方法を用

いてレンズを作製しても、レンズ全体に亘って適正に収差を補正することができない可能性があった。

[0005] 近年、収差測定装置の発展により、近視、遠視、乱視などの低次の収差だけでなく、高次の収差まで好適に制御できるレンズが求められている。特に、非球面眼用レンズが実用に供され、当該レンズにおいて球面収差の制御をより好適に行うことができるレンズ設計方法が求められている。この球面収差は回転対称型の収差であるが、トーリックレンズにおいても同様な現象が生じると考えられる。

[0006] すなわち、レンズにおいて光軸から離れた位置を通る光は、強主経線の方角と弱主経線の方角とにおいて、近軸焦点とは異なる位置で光軸と交わると考えられる。したがって、トーリックレンズでは、近軸における円柱屈折力と光軸から離れた部分での円柱屈折力とは必ずしも一致するとは限らない。むしろ一致していないと考える方が自然である。しかし、従来技術においては、レンズ全体に亘ってトーリック面を規定しつつ近軸領域と非近軸領域において好適に円柱屈折力を制御可能な式を用いたレンズの設計方法は提案されていない。

[0007] 本件開示の技術は、上記の事情に鑑みてなされたものであり、その目的とするところは、レンズ面全体に亘ってトーリック面及び球面・非球面等を規定することができる眼用レンズ及び眼用レンズの設計方法を実現することである。

課題を解決するための手段

[0008] 本件開示の眼用レンズは、眼用レンズのレンズ面上の任意の経線方向における断面形状が

[数1]

$$Z = \frac{cr^2}{1 + [1 - c^2 r^2 (k + 1)]^{1/2}} + A(\theta)r^2 + B(\theta)r^4 \cdots (1)$$

を含む式で表現され、 c は眼用レンズにおける近軸曲率であり、 r は眼用レ

レンズのレンズ中心からの距離であり、 k は眼用レンズにおけるレンズ光軸に回転対称な面のコーニック定数であり、 c 、 r 、 k はレンズ面上のいずれの経線方向について共通であり、 $A(\theta)$ 及び $B(\theta)$ は、経線方向の角度に依存する関数で表現されるパラメータである。また、眼用レンズはトーリックレンズである。これにより、レンズ中心から任意の方向についてレンズ面全体に亘って円柱屈折力を制御しつつ眼用レンズを設計することができる。つまり、任意の方向の断面形状が一般的な非球面の式で表現されるため、その方向の断面内において、容易にかつ厳密に近軸屈折力や収差の計算、特に球面収差を求めることができる。

[0009] また、式(1)において第2項以降にある r^n の係数は光軸回りの角度に対して 180° 周期の関数である。さらに、式(1)における $A(\theta)$ は 180° 周期関数であり、 $B(\theta)$ は 180° 周期関数又は 180° 周期関数と 90° 周期関数の和である。または、レンズの光軸に対して回転対称のレンズ面を規定する定義式に、

[数2]

$$(X^2 + Y^2)^n \cdots (2)$$

に基づくトーリック面の定義式を加算した式を用いて眼用レンズのレンズ形状を規定し、 $n = 1, 2, \dots$ であり、 X は眼用レンズの第1の方向におけるレンズ中心からの距離であり、 Y は眼用レンズの第2の方向におけるレンズ中心からの距離である。したがって、球面レンズ又は非球面レンズ等のレンズ光軸に対して回転対称のレンズ面を規定する式に上記のトーリック面の定義式を加えることで、レンズ中心から任意の方向についてレンズ面全体に亘って円柱屈折力を制御しつつ眼用レンズを作製することができる。また、

$(X^2 + Y^2)^n$ の係数を0とするだけで、新しい式を用いることなく球面レンズ又は非球面レンズ等のレンズ光軸に対して回転対称のレンズ面を作製することもできる。

[0010] また、トーリック面の定義式を加算した式は、

[数3]

$$Z = \frac{cr^2}{1 + [1 - c^2 r^2 (k+1)]^{1/2}} + \sum_{n=1}^m \sum_{j=0}^n a_{2j \times 2(n-j)y} X^{2j} Y^{2(n-j)} \dots \quad (3)$$

で与えられ、 c はトーリック面を付加する前の眼用レンズにおけるレンズ光軸に回転対称である基準面の曲率であり、 r は眼用レンズのレンズ中心からの距離であり、 k はトーリック面を付加する前の眼用レンズにおけるレンズ光軸に回転対称である基準面のコーニック定数であり、 $a_{2j \times 2(n-j)y}$ はトーリック面を付加するパラメータである眼用レンズとしてもよい。また、眼用レンズの光軸回りにおけるエッジ厚みの変化が弱主経線付近と強主経線付近とで異なるように眼用レンズのレンズ形状が規定されるようにしてもよい。ここで、 m は設計の最大次数を表すが、6次まで（ $m=3$ ）としてもよく、あるいは4次まで（ $m=2$ ）としてもよい。 n は m 以下の自然数、 j は0以上 n 以下の整数である。

[0011] また、式（3）において、

[数4]

$$a_{2nx} = a_{2ny} \dots \quad (4)$$

[数5]

$$a_{2j \times 2(n-j)y} = \frac{n!}{(n-j)!j!} a_{2nx} \dots \quad (5)$$

を満たし、 n は m 以下の自然数、 j は0以上 n 以下の整数である眼用レンズとしてもよい。

[0012] これにより、式（2）～（5）を用いてレンズ面形状を非球面とすることができ、式（2）を用いて上記に従って作製する眼用レンズと非球面レンズとの比較を容易に行うことができる。さらに、ゼルニケ収差のうち、

テトラフォイルの制御を目的とした眼内レンズとしてもよい。また、式（３）において、 $m \geq 2$ であり、 $a_{2x} a_{2y} \neq 0$ 又は $a_{4x} \neq -a_{4y}$ である眼内レンズとしてもよい。球面収差の制御により、トーリックレンズ軸と乱視軸とにずれが生じた場合でも像の劣化を軽減できる眼内レンズとしてもよい。球面収差は眼用レンズを挿入する眼球の角膜の球面収差と合わせて $+0.2 \mu\text{m}$ から $+0.5 \mu\text{m}$ である眼内レンズとしてもよい。そして、球面収差は $\phi 5.2 \text{ mm}$ の光線を眼内レンズに通したときに $-0.08 \mu\text{m}$ から $+0.22 \mu\text{m}$ である眼内レンズとしてもよい。また、球面収差は水中で収束光を眼内レンズに入射させたときの球面収差としてもよい。より望ましくは、球面収差は眼用レンズを挿入する眼球の角膜の球面収差と合わせて $+0.2 \mu\text{m}$ から $+0.3 \mu\text{m}$ である眼内レンズとしてもよい。そして、球面収差は $\phi 5.2 \text{ mm}$ の光線を眼内レンズに通したときに $-0.08 \mu\text{m}$ から $+0.02 \mu\text{m}$ である眼内レンズとしてもよい。

[0013] さらに、本件開示の眼用レンズの設計方法は、上記の特徴を有する眼用レンズの設計方法である。また、式（３）において、

[数6]

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \cos \theta - Y \sin \theta \\ X \sin \theta + Y \cos \theta \\ Z \end{pmatrix} \cdots (6)$$

によって得られる X' 及び Y' を X 、 Y の代わりに用い、 θ はレンズの光軸周りの回転角度、 X' 、 Y' 、 Z' は変換後の係数及び変数であり、 X 、 Y 、 Z は回転前の変数である眼用レンズの設計方法としてもよい。

[0014] これにより、式（３）を用いた眼用レンズの設計時において、レンズを任意の角度に回転する場合に、別の式を用いることなくレンズ形状を評価することができる。

発明の効果

[0015] 本件開示の技術によれば、レンズ面全体に亘ってトーリック面及び球面・

非球面等を規定することができる眼用レンズ及び眼用レンズの設計方法を実現することができる。また、効果的に高次の収差（特に球面収差やテトラフォイル）を低減又は制御することができる。

図面の簡単な説明

[0016] [図1]図1は、レンズの球面収差を示す模式図である。

[図2]図2は、トーリックレンズの球面収差を示す模式図である。

[図3]図3は、トーリックレンズにおける球面収差の計算方法を示す模式図である。

[図4]図4は、一実施例におけるトーリック眼内レンズと従来のトーリック眼内レンズのシミュレーション結果の一例を示す表である。

[図5]図5は、一実施例におけるトーリック眼内レンズの評価用の模型眼の概略構成を示す図である。

[図6]図6は、図4に示す模型眼の評価結果の一例を示す表である。

[図7]図7（a）～図7（c）は、一実施例におけるトーリック眼内レンズのMTFの測定結果の一例を示すグラフである。

[図8]図8（a）～図8（c）は、従来のトーリック眼内レンズのMTFの測定結果の一例を示すグラフである。

[図9]図9は、一実施例におけるトーリック眼内レンズのトーリック面のサグ量の変化を示すグラフである。

[図10]図10は、一実施例におけるトーリックレンズの軸ずれに対する評価結果の一例を示す表である。

[図11]図11は、一実施例におけるトーリックレンズの軸ずれに対する光学シミュレーションの結果の一例を示す表である。

[図12A]図12Aは、一実施例におけるトーリックレンズの軸ずれに対する光学シミュレーションの結果の一例を示す表である。

[図12B]図12Bは、一実施例におけるトーリックレンズの軸ずれに対する光学シミュレーションの結果の一例を示す表である。

発明を実施するための形態

- [0017] 以下に、本発明の実施の形態について説明する。以下の説明ではトーリック眼内レンズについて説明するが、本発明は眼内レンズに限らずコンタクトレンズ等の種々の眼用レンズにも適用することができる。
- [0018] まず、上記の特許文献を参照しつつ従来のトーリック眼内レンズの設計に用いられる式について説明する。トーリック眼内レンズでは、トーリック面によって、面上に設定された互いに直交する方向（第1の経線方向と第2の経線方向）においてレンズの屈折力に差が生じる。この屈折力の差を利用することで乱視を矯正することができる。一般に、この屈折力の差は、円柱屈折力と呼ばれる。トーリック面において、屈折力の大きい方向の経線は強主経線と呼ばれ、屈折力の小さい方向の経線は弱主経線と呼ばれる。また、これら2つの経線における屈折力の平均値は、等価球面度数（あるいは単に球面度数）と呼ばれる。なお、通常、乱視矯正用の眼用レンズでは、その光学的性能を示す指標として、等価球面度数及び円柱屈折力が用いられる。
- [0019] 以下の説明において、トーリック眼内レンズの強主経線方向をX方向、弱主経線方向をY方向とするが、XとYは逆でもよいことは自明である。なお、以下に説明する式の導出の詳細については、各特許文献に記載されているため、説明を省略する。従来のトーリック面を規定する式として、X軸と光軸を含む平面によるレンズ断面の形状を表す式（7）と、Y軸と光軸を含む平面によるレンズ断面を表す式（8）が挙げられる。ここで、 R_x 及び R_y は、X軸と光軸を含む平面によるレンズ断面の曲率半径及びY軸と光軸を含む平面によるレンズ断面の曲率半径をそれぞれ表す。なお、 $R_x \neq R_y$ である。 c_x 及び c_y は、X軸と光軸を含む平面によるレンズ断面の曲率及びY軸と光軸を含む平面によるレンズ断面の曲率をそれぞれ表す。ここで、 $c_x = 1/R_x$ 、 $c_y = 1/R_y$ である。 k_x 及び k_y は、X方向におけるコーニック定数（円錐定数）及びY方向におけるコーニック定数をそれぞれ表す。なお、特許第4945558号には $k_x \neq k_y$ との記載がある。

[数7]

$$Z_x = \sqrt{2R_x x - (1+k_x)x^2} \quad \dots (7)$$

[数8]

$$Z_y = \sqrt{2R_y y - (1+k_y)y^2} \quad \dots (8)$$

[0020] また、従来のトーリック眼内レンズの設計に用いられる式として、式（7）、（8）の代わりに式（9）、（10）が挙げられる。なお、 $R_x \neq R_y$ である。また、特許第4945558号には $k_x \neq k_y$ との記載がある。

[数9]

$$Z_x = \frac{x^2/R_x}{1 + \sqrt{1 - (1+k_x)x^2/R_x^2}} + \sum_j c_j x^j \quad \dots (9)$$

[数10]

$$Z_y = \frac{y^2/R_y}{1 + \sqrt{1 - (1+k_y)y^2/R_y^2}} + \sum_j c_j y^j \quad \dots (10)$$

[0021] 式（7）及び（8）、あるいは式（9）及び（10）を用いる場合、X方向及びY方向のレンズ断面の形状が規定できるだけで、レンズ全体の断面形状は規定できない。

[0022] あるいは式（11）を用いてトーリック眼内レンズを設計する方法もある。

[数11]

$$Z(r, \theta) = \frac{(c_x \cos^2 \theta + c_y \sin^2 \theta)r^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k_x)c_x^2 r^2 \cos^2 \theta - (1+k_y)c_y^2 r^2 \sin^2 \theta}} \quad \dots (11)$$

[0023] しかし、式（１１）を用いる場合でも、X方向及びY方向の形状が決まると、つまりc_x、c_y、k_x、k_yが決まると、一意的にその2方向以外の形状も決まるため、レンズ全体の断面形状を規定する際の自由度が小さい。

[0024] そこで、本発明では、以下の式（１２）によりレンズ面を規定して眼内レンズを作製する。なお、式（１２）の第１項はレンズの光軸について回転対称のレンズ面を規定し、第２項以降はトーリック面を規定する。

[数12]

$$Z = \frac{cr^2}{1+[1-c^2r^2(k+1)]^{1/2}} + a_{1x}X^2 + a_{1y}Y^2 + a_{4x}X^4 + a_{2x2y}X^2Y^2 + a_{4y}Y^4 + \dots$$

・・・（１２）

ここで、cは式（１２）の第２項以降により規定されるトーリック面を付加する前のレンズの回転対称の基準面の曲率である。XとYは第１の方向及び第２の方向におけるレンズ中心からの距離であり、例えば強主経線方向及び弱主経線方向におけるレンズ中心からの距離である。また、rは径方向の距離（ $r^2 = X^2 + Y^2$ ）である。また、kは式（１２）の第２項以降により規定されるトーリック面を付加する前の回転対称の基準面のコーニック定数であり、c、r、及びkはX方向とY方向とで共通となっている。また、aはトーリック面を付加するパラメータである。式（１２）の第２項以降の項は、 $(X^2 + Y^2)^n$ （ $n = 1, 2, \dots$ ）を展開したときの各項を表す。また、第２項以降の各項の係数は、トーリック面を付加するためのパラメータを表す。なお、式（１２）の第１項が、レンズの光軸に対して回転対称のレンズ面を規定する所定の定義式の一例である。また、式（１２）の第１項と同等のレンズ面を規定する式であれば、当該第１項は他の式であってもよい。

[0025] 上記の式を用いるとレンズ全体に亘ってレンズ面を規定することができる。これにより、従来に比べて高い自由度をもってレンズ面を規定することができる。特に、上記のように従来式では規定できなかったX方向及びY方向以外（例えばX=Yとなる方向）の形状も自由に規定することができる。

[0026] また、式（１２）の第１項は、球面レンズの式あるいはコーニック定数の

みによる非球面レンズの式と同じ形になっている。このため、式（１２）を用いてトーリック眼内レンズを設計する場合、トーリック眼内レンズのベース形状を従来と同様に回転対称レンズにすることができる。したがって、式（１２）を用いてレンズ設計を行い作製したトーリック眼内レンズは、従来の挿入器にも支障なく装填することができる。

[0027] さらに、従来ではレンズの 45° 方向のエッジ厚を回転対称レンズと統一する方法が提案されている（例えば特許文献２等）が、エッジ厚の計算はトーリック面のパラメータが決定した後でないと計算できない。一方、本発明の式（１２）を用いた設計方法では、 $X^{2j}Y^{2(n-j)}$ （ただし、 j は n 以外の自然数）の係数を０にする、もしくは $a_{2qx} = -a_{2qy}$ 、 $a_{2qx}a_{2py} = 0$ （ p 、 q は自然数）とすればエッジ厚の計算は必要なく、 45° 方向のエッジ厚を回転対称レンズと同等な形状を設計することができる。

[0028] また、レンズをいわゆるモールド方式で作製する場合、レンズ材料の収縮によるレンズ形状の変化を考慮する必要がある。本発明の式（１２）を用いてレンズを設計することにより、レンズのベース形状が回転対称レンズと同じであれば、収縮率を回転対称レンズと同等とみなすことができる。したがって、本発明のレンズ設計方法によれば、非回転対称レンズであるトーリック眼内レンズで収縮率を評価する従来の方法よりも効率よく収縮率を評価することができる。

[0029] また、後述するように X 方向及び Y 方向の近軸曲率も容易に計算することができるため、近軸屈折力の計算も容易になる。したがって、式（１２）の関数から近軸パワーの計算を容易に行うこともできる。また、式（１２）を用いることで、トーリック眼内レンズの X 方向及び Y 方向における球面収差を制御することができる。このように、式（１２）を用いてレンズ設計をすることにより、トーリック眼内レンズのトーリック面を規定するパラメータの自由度が高くなり、様々な収差を従来よりも好適に補正するレンズ面形状を設計することができる。

[0030] 以下に、上記の式（１２）を用いた眼内レンズ及び眼内レンズの設計方法

に関する実施例について説明する。

[0031] (実施例 1)

実施例 1 について以下説明する。眼内レンズについて、近軸光学によると屈折力 P (D) は以下の式 (13) で表される。

[数13]

$$P = (n_e - n_e^{\text{medium}}) \cdot \left[\left(\frac{1}{R1} \right) - \left(\frac{1}{R2} \right) \right] + \frac{(n_e - n_e^{\text{medium}})^2 \cdot t}{n_e \cdot R1 \cdot R2} \cdot \cdot \cdot \quad (13)$$

n_e は眼内レンズの e 線 ($\lambda = 546 \text{ nm}$) における屈折率、 n_e^{medium} はレンズを取り囲む媒質の e 線における屈折率、 $R1$ は眼内レンズ前面におけるレンズの中心曲率半径、 $R2$ は眼内レンズ後面におけるレンズの中心曲率半径、 t は眼内レンズの中心厚である。

[0032] トーリック眼内レンズの場合、上記の $R1$ もしくは $R2$ の値が X 方向と Y 方向とで異なる。すなわち、 $R2$ 面をトーリック面と仮定した場合、X 方向、Y 方向のパワーはそれぞれ以下の式 (14)、(15) で表される。

[数14]

$$P = (n_e - n_e^{\text{medium}}) \cdot \left[\left(\frac{1}{R1} \right) - \left(\frac{1}{R2_x} \right) \right] + \frac{(n_e - n_e^{\text{medium}})^2 \cdot t}{n_e \cdot R1 \cdot R2_x} \cdot \cdot \cdot \quad (14)$$

[数15]

$$P = (n_e - n_e^{\text{medium}}) \cdot \left[\left(\frac{1}{R1} \right) - \left(\frac{1}{R2_y} \right) \right] + \frac{(n_e - n_e^{\text{medium}})^2 \cdot t}{n_e \cdot R1 \cdot R2_y} \cdot \cdot \cdot \quad (15)$$

なお、 P_x と P_y の差が円柱屈折力であり、 $(P_x + P_y) / 2$ が等価球面度数である。

[0033] また、式 (12) から X 方向及び Y 方向の曲率は、次のように求めることができる。まず、曲率 c は曲率半径 R の逆数として式 (16) で表すことが

できる。

[数16]

$$C = \frac{1}{R} \dots (16)$$

また、ある関数 $f(x)$ の点 x における曲率半径 R は以下の式 (17) で表される。

[数17]

$$R = \frac{[1 + \{f'(x)\}^2]^{\frac{3}{2}}}{f''(x)} \dots (17)$$

[0034] 一般に光学レンズの表面を表す関数 $f(x)$ は、レンズ面とレンズの光軸との交点である原点を通り、光軸に対して対称である関数とみなせる。ここで光軸を Z 軸とする。すなわち、式 (17) に $x=0$ を代入すれば曲率半径 R を求めることができ、 R の逆数として曲率を求めることができる。

[0035] 例えば、以下の式 (18) で表される非球面 $Z(X)$ における曲率 c' を求める。

[数18]

$$Z(X) = \frac{cX^2}{1 + [1 - c^2 X^2 (k+1)]^{\frac{1}{2}}} + a_{2x}X^2 + a_{4x}X^4 + a_{6x}X^6 + \dots \dots (18)$$

[0036] まず、 $Z(X)$ の1階微分値 $Z'(X)$ について、1階微分しても変数 X はすべての項で残る。そのため、 $X=0$ を代入すると $Z'(0) = 0$ である。

[0037] 次に、 $Z(X)$ の2階微分値 $Z''(X)$ の2階微分値 $Z'''(X)$ は、式 (19) で与えられる。

[数19]

$$Z''(X) = \frac{c}{2} [1 - c^2 x^2 (k+1)]^{-\frac{3}{2}} \cdot \{-2c^2 x(k+1)\} \cdot x + c [1 - c^2 x^2 (k+1)]^{\frac{1}{2}} + 2a_{2x} + 12a_{4x}x^2 + \dots$$

\dots (19)

ここで、 $X=0$ を代入すると以下の式(20)が得られる。

[数20]

$$Z''(0) = c + 2a_{2x} \dots (20)$$

以上より、曲率 c' は式(21)で表される。

[数21]

$$c' = c + 2a_{2x} \dots (21)$$

[0038] 同様に本発明によるレンズ面の式(12)において、X方向及びY方向の曲率 c_x 、 c_y はそれぞれ式(22)、(23)で表される。

[数22]

$$c_x = c + 2a_{2x} \dots (22)$$

[数23]

$$c_y = c + 2a_{2y} \dots (23)$$

[0039] このように a_{2x} 、 a_{2y} 、 c から直接 c_x 、 c_y が計算できるため、 R_x 及び R_y も計算できる。したがって、式(12)を用いることで、任意にX方向及びY方向の屈折力(近軸)を指定してトーリック眼内レンズを設計及び

提供することができる。

[0040] (実施例2)

次に実施例2について説明する。本発明の式(12)において、第2項以降のパラメータをすべて0とすると、第1項から回転対称のレンズを表す式が得られる。つまり、本発明の式(12)は、曲率 c 、コーニック定数 k の回転対称面をベース形状とするトーリック面を規定する。そこで、 $a_{2qx} = -a_{2qy}$ 、 $a_{2qx2py} = 0$ (p 、 q は自然数)とすると、トーリック眼内レンズの強主経線及び弱主経線の平均である等価球面度数は、曲率 c 、コーニック定数 k を持つ回転対称面によって生じる屈折力として規定できる。すなわち、式(12)の第1項からトーリック面の等価球面度数を規定する近軸曲率が容易に求まるため、等価球面屈折力も容易に算出することができる。このように、式(12)において、基準面形状の曲率半径 R ($c = 1/R$)と、絶対値が同一で正負の符号だけを逆にした一对の係数 ($a_{2qx} = -a_{2qy}$) の、2つのパラメータを設定するだけで、等価球面度数と円柱屈折力を指定してトーリック眼内レンズを設計することができる。

[0041] また、強主経線及び弱主経線の屈折力は等価球面度数から振り分けられた屈折力となり、その屈折力はそれぞれ以下の式(24)、(25)によって表される曲率を用いて計算される。

[数24]

$$c_x = c + 2a_{2x} \cdots (24)$$

[数25]

$$c_y = c - 2a_{2x} \cdots (25)$$

上記はパラメータを設定するだけで複雑な計算を必要としない場合であるが、本発明の式(12)において、 $a_{2qx} \neq -a_{2qy}$ 、 $a_{2qx2py} \neq 0$ であって

も回転対称面の曲率 c に a_{2x} と a_{2y} を加えるという単純な計算を行うことで、等価球面度数を規定する曲率を計算することもできる。

[0042] 以上のように式 (12) を用いてトーリック眼内レンズの等価球面屈折力を計算できることは、白内障手術において要求されるレンズ設計に有利である。理由は次の通りである。まず、トーリック眼内レンズは乱視低減のために患者の眼球に挿入される。そして、一般に眼科において実施される視機能検査の結果は、球面度数と乱視度数で出力される。例えば、検査結果が「S + 5.00C - 1.00A × 90°」である場合、この結果は、球面度数（等価球面度数）が +5.00D、乱視度数が -1.00D、乱視軸が 90° であることを示している。したがって、視機能検査の結果が球面度数及び乱視度数（乱視軸角度）で与えられることを踏まえると、式 (12) を用いて（等価）球面度数と乱視度数をインプットとしてトーリック眼内レンズを設計できることは有用である。

[0043] （実施例 3）

次に実施例 3 について説明する。最初に、ザイデルの 5 収差の 1 つである球面収差について、図 1 を参照しながら説明する。球面収差が生じると、回転対称型のレンズにおける中心部（近軸部）と周辺部とにおけるパワーに差が出る。球面収差とは、レンズの中心部を透過する光と周辺部を透過する光が同一の焦点に集まらない現象である。

[0044] 図 1 に示すように、レンズ L1 の後側主点を H' とし、近軸焦点を F、焦点距離を f 、後側主点 H' から周辺光線（レンズの周辺部を透過する光）の焦点までの距離を f' とすると、近軸でのレンズ L1 の屈折力 P は、焦点距離 f を用いて以下の式 (26) で表される。ただし、レンズ前後は空気とし、屈折率は 1 として説明するが、限定されるものではない。

[数26]

$$P = \frac{1}{f} \cdots (26)$$

[0045] ここで、球面収差が生じている場合とは、周辺光線の焦点 F' の位置と近軸焦点 F の位置は異なり、レンズ L_1 の周辺部の屈折力 P' は、距離 f' を用いて以下の式 (27) で表される。

[数27]

$$P' = \frac{1}{f'} \cdots (27)$$

[0046] 図1では、近軸焦点 F より周辺光線の焦点 F' の方が後側主点 H' に近い
ため、以下の式 (28) が成り立つ。すなわち、レンズ L_1 で球面収差が生じていると、レンズ L_1 の中心部と周辺部とでは屈折力に差が生じる。

[数28]

$$P < P' \cdots (28)$$

[0047] 次に、トーリックレンズ L_2 における球面収差について、図2を参照しながら説明する。ここでは説明の便宜上、トーリックレンズ L_2 の光軸を Z 軸とし、光軸に直交する XY 平面を設定し、 X 軸と Y 軸が互いに直交するものとして説明する。ただし、 X 軸と Y 軸とは必ずしも互いに直交しなくてもよく、 X 軸が XY 平面の第1の方向に延び、 Y 軸が第1の方向とは異なる第2の方向に延びるように構成されていてもよい。図2 (a) 及び図2 (b) は、それぞれトーリックレンズ L_2 の X 方向及び Y 方向における光線の集光状態を示す。図2 (a) に示すように、トーリックレンズ L_2 の後側主点を H' とし、レンズの X 方向についての近軸焦点を F_x 、レンズの X 方向についての焦点距離を f_x 、レンズの X 方向について後側主点 H' から周辺光線の焦点までの距離を f_x' とする。同様に、図2 (b) に示すように、レンズの Y 方向についても、 F_y 、 f_y 、 f_y' をそれぞれ定める。

[0048] このとき、図1において説明したように、以下の式 (29) ~ (32) が成り立つ。

[数29]

$$P_x = \frac{1}{f_x} \cdots (29)$$

[数30]

$$P'_x = \frac{1}{f'_x} = \frac{1}{f_x + SA_x} \cdots (30)$$

[数31]

$$P_y = \frac{1}{f_y} \cdots (31)$$

[数32]

$$P'_y = \frac{1}{f'_y} = \frac{1}{f_y + SA_y} \cdots (32)$$

[0049] ここで、 SA_x 、 SA_y は、それぞれレンズのX方向、Y方向についての球面収差量の距離を表す。例えば図2に示すトーリックレンズL2における SA_x 、 SA_y は負の値とする。

[0050] また、トーリックレンズL2の近軸部における円柱屈折力 P_c と周辺部における円柱屈折力 P'_c は、以下の式(33)、(34)で表される。

[数33]

$$P_c = P_x - P_y \cdots (33)$$

[数34]

$$P_C' = P_x' - P_y' \cdots (34)$$

[0051] 一般的な光学ソフトにおいては、球面収差はY方向において計算される。そのため、X方向の球面収差を計算する場合、レンズデータを90°回転させるか、トーリック面のパラメータを入れ替える必要がある。また、X方向の計算を行う場合には、Y方向の計算はできない。しかし、X方向とY方向の計算が同時にできない場合、トーリック眼内レンズの設計の作業効率が低下する可能性がある。そこで、本実施例では、X方向の球面収差SAを以下のように求めることを提案する。

[0052] レンズ周辺部の円柱屈折力を計算するため、図3に示すように各パラメータを定義する。図3において、X方向の近軸焦点をF_x、Y方向の近軸焦点をF_y、F_xとF_yの差をdFとする。また、X方向の近軸焦点距離をf_x、任意の周辺光線と仮想面Oとの交点をMとする。そして、交点Mの仮想面Oに沿った光軸からの高さをh、近軸焦点面における近軸焦点F_xと周辺光線Aの距離をCOM、近軸焦点F_xと周辺光線Aの焦点F_x'との距離をSA(=球面収差)とする。なお、仮想面Oはレンズ後面から焦点までの間であれば、どこに設けてもよい。また、周辺光線は入射瞳孔の1/2より低い高さの光線であれば、任意で選択できる。さらに、レンズの素材及びレンズ周囲の媒質は任意に設定することができる。

[0053] 図3より、以下の式(35)が成り立つ。

[数35]

$$\frac{COM}{SA} = \frac{h}{L + SA} \cdots (35)$$

式(35)より以下の式(36)が得られる。

[数36]

$$SA = \frac{L \times COM}{h - COM} \dots (36)$$

式(36)におけるSAをSA_xとして、式(30)に代入すると、レンズの周辺(任意の入射瞳高さ)におけるX方向のパワーを計算することができる。また、X方向の近軸パワーはxから求めてもよく、またF_yとdFの和として求めてもよい。

[0054] 式(35)、(36)における値L、COM、hは一般的な光学ソフトで計算できるものであり、上記計算を設計時に評価することは容易な作業である。また、dFについても一般的な光学ソフトで計算できるものである。本変形例では、式(12)を用いて規定されたレンズ面について、X方向とY方向の屈折力分布を同時に計算評価して、トーリック眼内レンズを設計することができる。なお、周辺光線は入射瞳を通る光線であれば、自由に設定してよく、光軸から一定距離離れた位置でレンズに入射する光線について同時に計算し、パワーの変化を計算及び評価しながら設計することができる。

[0055] 次に、本実施例の一例として、式(12)を用いて規定されたレンズ面について、式(29)～(32)を用いたX方向及びY方向のパワーの評価結果について説明する。当該レンズのレンズデータは、以下の表1の通りである。ここで、Rは曲率半径、tは厚み、nは屈折率、Dは半径、kはコーニック定数、Aはトーリック面を付加するパラメータを表す。

[表1]

No	面	R(mm)	t(mm)	n(546nm)	D(mm)	k	A
0	物体面	inf	inf	1.336	0.00	—	—
1	絞り面	inf	0.000	1.336	3.00(絞り半径)	—	—
2	R1面(球面)	15.7933	0.800	1.4938 (PMMA)	3.00	—	—
3	R2面(Toric面)	-15.6812	5.000	1.336	3.00	—	表2参照
4	仮想面	inf	66.830	1.336	2.77	—	—
5	像面	inf	0.000	1.336	0.08	—	—

[0056] また、式（１２）において係数を以下の表２の通りに設定する。

[表２]

a_{2x}	a_{2y}	a_{4x}	a_{2x2y}	a_{4y}
-4.7786E-03	4.7786E-03	9.2081E-06	0.0000E+00	-9.2081E-06

[0057] この場合、X方向及びY方向のレンズのパワーは瞳孔径に対して、以下の表３のようになる。

[表３]

瞳孔高さ(mm)	P _x (D)	P _y (D)	円柱屈折力(D)	等価球面度数(D)
0.0	21.50	18.50	3.0	20.00
1.0	21.55	18.55	3.0	20.05
1.5	21.62	18.62	3.0	20.12
2.0	21.72	18.72	3.0	20.22
2.5	21.84	18.84	3.0	20.34
3.0	22.00	19.00	3.0	20.50

[0058] この場合、円柱屈折力は瞳孔径によらず一定である。そして、X方向及びY方向のパワーは瞳孔径によって変化しており、レンズの中心から周辺にかけて0.5Dずつ大きくなっている。また、X方向とY方向のパワーの平均である等価球面度数も、レンズの中心から周辺にかけて0.5D大きくなっている。

[0059] 次に、本実施例の別の例として以下の表４に示すレンズデータを有するレンズを使用する。

[表４]

No	面	R(mm)	t(mm)	n(546nm)	D(mm)	k	A
0	物体面	inf	inf	1.336	0.00	-	-
1	絞り面	inf	0.000	1.336	3.00(絞り半径)	-	-
2	R1 面(球面)	13.6077	0.800	1.4938 (PMMA)	3.00	-	-
3	R2 面(Toric 面)	-18.6713	5.000	1.336	3.00	-	表５参照
4	仮想面	inf	66.768	1.336	2.79	-	-
5	像面	inf	0.000	1.336	0.16	-	-

[0060] また、式（１２）において係数を以下の表５の通りに設定する。

[表5]

a_{2x}	a_{2y}	a_{4x}	$a_{2 \times 2y}$	a_{4y}
-4.7998E-03	4.7657E-03	8.9565E-05	0.0000E+00	2.5020E-04

[0061] このとき、X方向及びY方向のレンズのパワーは瞳径に対して、以下の表6のようになる。

[表6]

瞳高さ(mm)	$P_x(D)$	$P_y(D)$	円柱屈折力(D)	等価球面度数(D)
0.0	21.50	18.50	3.00	20.00
1.0	21.50	18.39	3.11	19.95
1.5	21.50	18.25	3.25	19.88
2.0	21.50	18.06	3.44	19.78
2.5	21.50	17.81	3.69	19.66
3.0	21.50	17.50	4.00	19.50

[0062] この場合、X方向のパワーは瞳によらず一定で21.5Dである。そして、Y方向のパワーは瞳によって小さくなっており、円柱屈折力は中心から周辺にかけて1D大きくなっている。また、等価球面度数は、中心から周辺にかけて、円柱屈折力の変化分の1/2である0.5Dだけ小さくなっている。

[0063] 以上の例に示すように、本実施例によれば、式(12)を用いてレンズ設計を行う場合、レンズのX方向及びY方向のパワー変化を容易に制御することができ、様々なパワー分布を有するトーリック眼内レンズを設計及び提供することができる。

[0064] なお、眼科業界では、上記度数分布は度数マップやパワーマップと呼ばれ、患者の角膜形状の異常を検出する際に用いられている。例えば、Pentacam（登録商標）（OCULUS社製）やTMS-5（トーマコーポレーション社製）等の前眼部形状解析装置では、角膜の形状を測定することで、角膜の中心から周辺にかけてどのようにパワーが分布しているのかを把握することができる。また、IOLA plus（ROTHLEX社製）等の

眼内レンズ検査装置では、レンズのパワーマップを測定することができる。したがって、これらの装置により患者の眼球のパワー分布が得られる、得られたパワー分布に基づいて、上記の式（１２）を用いることで最適なトーリック眼内レンズを設計及び提供することができる。

[0065] 次いで、本実施例において、式（１２）を用いてトーリック眼内レンズを設計した場合に、当該トーリック眼内レンズによって得られるランドルト環の像についてのシミュレーション結果を、図４を参照しながら説明する。図４は、従来のトーリックレンズと本実施例におけるトーリックレンズを眼内レンズとして所定条件の乱視眼に処方した場合のいわゆるベストフォーカスでのランドルト環の像と、シミュレーションにおいて像面を 0.04 mm だけレンズから遠ざけた場合（＋）とレンズに近づけた場合（－）におけるランドルト環の像を示す。

[0066] 図４のベストフォーカス時のランドルト環に示すように、本実施例のトーリック眼内レンズでは、乱視が好適に低減され、明瞭なランドルト環の像が得られる。一方、従来のトーリック眼内レンズでは、認識可能な程度のランドルト環の像が確認できるが、ランドルト環の周辺にいわゆるぼけが生じている。

[0067] また、像面を移動させてピントをぼかした際にも違いが現れている。図４に示すように、本実施例のトーリック眼内レンズでは、像面がベストフォーカスの位置からずれても回転対称のぼけが生じている、すなわち乱視はほぼ完全に除去されているといえる。一方、従来のトーリック眼内レンズは、ぼけが縦方向（紙面上下方向）に伸びていたり（像面： $+0.04\text{ mm}$ ）、横方向（紙面左右方向）に伸びていたり（像面： -0.04 mm ）しているため、乱視が完全には除去されていないことがわかる。以上より、本実施例のトーリック眼内レンズは、従来と比較して乱視矯正により効果があるといえる。

[0068] 次に、レンズの中心部と周辺部とで乱視量が異なる乱視角膜レンズを作製した場合の評価結果について説明する。図５に、当該評価に用いる模型眼の

概略構成を示す。図5に示す模型眼では、乱視角膜レンズL3は光軸周りに適宜回転可能になっている。したがって、乱視角膜レンズL3とトーリック眼内レンズL4との間で乱視軸を一致させることができる。図5では、乱視角膜レンズL3の形状は、両凸レンズであるが、レンズ形状はメニスカスレンズでも両凹レンズでもよい。

[0069] 図5に示す模型眼では、トーリック眼内レンズL4は、眼内を想定して水中に配置しているが、乱視を持つ角膜レンズを適切に設計、作製すれば空气中に配置する構成としてもよい。図5の模型眼において観察する指標としては、3m視力表のランドルト環を用いる。撮影する指標は視力1.0とする。また、光源であるハロゲンランプには546nmのフィルタを取り付け、視力表の裏面から、フィルタを通過した光を照射する。カメラ10はピント調節のため、トーリック眼内レンズL4の光軸に対して前後に移動することができる。なお、図5に示すように、トーリック眼内レンズL4は、両面が平面ガラス101、101で構成された略直方体のケース100内に位置決めされている。また、ケース100内は前述のように水で満たされており、トーリック眼内レンズL4の乱視角膜レンズL3側に絞りSが設けられている。

[0070] 図6に、図5に示す模型眼を使用した場合に、指標であるランドルト環をカメラで撮影した結果を示す。図6に示すように、図4に示すシミュレーション結果と同様、本実施例のトーリック眼内レンズL4では、ベストフォーカスにおいて、ランドルト環を明瞭に撮影することができている。また、カメラ10をトーリック眼内レンズL4の光軸方向に移動させ、意図的にデフォーカスさせた像についても、ぼけが回転対称に生じており、乱視が好適に低減されることがわかる。一方、従来のトーリック眼内レンズでは、ベストフォーカスにおいてはランドルト環を認識できるものの、意図的にデフォーカスさせた場合に像が著しく劣化しており、乱視が十分に低減されていないことがわかる。

[0071] 図7は、図6に示す模型眼の構成を用いて、本実施例のトーリック眼内レ

ンズのMTF (Modulation Transfer Function) を測定した結果を示す。図中、横軸は、被写体として用いる縞模様の縞の間隔を示す空間周波数であり、縦軸は、トーリック眼内レンズによってカメラの受光面に結像される縞模様の画像のMTFの値を示す。また、点線は、トーリック眼内レンズのサジタル（放射）方向（ここでは0度方向）における数値を表し、破線は、トーリック眼内レンズのメリジオナル（同心円）方向（ここでは90度方向）における数値を表す。図7に示すように、本実施例のトーリック眼内レンズを挿入した模型眼の場合、ベストフォーカス時は0度方向と90度方向ともに良好であることがわかる。また、デフォーカス時でも、MTFの値は低下するが0度方向と90度方向において同様の変化を示していることから、乱視はほぼ発生していないといえる。

[0072] 次に、図8に、図6に示す模型眼の構成を用いて、従来のトーリック眼内レンズのMTFを測定した結果を示す。図8に示すように、従来のトーリック眼内レンズでは、ベストフォーカスにおいて空間周波数100本/mmにおけるMTFは0.2以上あるため、視力1.0は見えると考えられるが、図7からわかるように本実施例のトーリック眼内レンズに比較してMTFは低い値を示している。また、図8に示すように、従来のトーリック眼内レンズでは、デフォーカス時も0度方向と90度方向において互いに異なる変化を示していることから、乱視が残存しているといえる。以上より、本実施例のように、レンズの中心部だけでなく周辺部の乱視量を考慮して上記の通り設計されたトーリック眼内レンズを用いることで、従来と比較して乱視矯正をより好適に行うことができる。

[0073] （実施例4）

次に実施例4について説明する。実施例4では、以下の仕様でトーリック眼内レンズを設計する。

<設計仕様>

入射光線径 : $\phi 6\text{ mm}$

X方向屈折力（水中） : +21.5 D（近軸）、+22.0 D（周

辺)

Y方向屈折力(水中) : +18.5D(近軸)、+18.0D(周

辺)

球面収差Z {4, 0} RMS : 0.1λ以下

レンズタイプ : 両凸レンズ(R1面:球面、R2面:トーリック面)

ただし、 $|R1| < |R2|$

レンズ材質 : PMMA

レンズ中心厚 : 0.8mm

水の屈折率 : 1.333 (λ=546nm)

光源波長 : 546nm

[0074] ここで、上記の説明で示した式(11)において、 $x = r \cos \theta$ 、 $y = r \sin \theta$ とおくと、以下の式(37)が得られる。

[数37]

$$Z(x, y) = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x) c_x^2 x^2 - (1 + k_y) c_y^2 y^2}} \cdots (37)$$

この式は、バイコーニック面を表す。

[0075] そこで、式(37)を用いてトーリック眼内レンズを設計した場合と、式(12)を用いてトーリック眼内レンズを設計した場合における、ゼルニケ収差の比較について以下説明する。

[0076] 式(37)を用いて設計した場合のレンズデータは、以下の表7の通りである。ここで、 R_y はy方向の曲率半径、 t は厚み、 n は屈折率、 D は半径、 k_y はy方向のコーニック定数、 R_x はx方向の曲率半径、 k_x はx方向のコーニック定数を表す。

[表7]

No	面	Ry(mm)	t(mm)	n(546nm)	D(mm)	ky	Rx	kx
0	物体面	inf	inf	1.336	0	—	—	—
1	絞り面	inf	0	1.336	3.00 (絞り半径)	—	—	—
2	R1 面 (球面)	10.8319	0.8	1.4938 (PMMA)	3	—	—	—
3	R2 面(Toric 面)	-43.6503	5	1.336	3	-191.184	-23.967	-2.337
4	仮想面	inf	66.48	1.336	2.78	—	—	—
5	像面	inf	0	1.336	0.08	—	—	—

[0077] また、式(12)を用いて設計した場合のレンズデータは、以下の表8の通りである。

[表8]

No	面	R(mm)	t(mm)	n(546nm)	D(mm)	k	A
0	物体面	inf	inf	1.336	0	—	—
1	絞り面	inf	0	1.336	3.00(絞り半径)	—	—
2	R1 面(球面)	16.0177	0.8	1.4938 (PMMA)	3	—	—
3	R2 面(Toric 面)	-28.5387	5	1.336	3	—	表9参照
4	仮想面	inf	66.67	1.336	2.78	—	—
5	像面	inf	0	1.336	0.08	—	—

[0078] また、式(12)において係数を以下の表9の通りに設定する。

[表9]

a_{2x}	a_{2y}	a_{4x}	a_{2x2y}	a_{4y}
-1.8313E-02	-8.9336E-03	-1.9690E-05	1.1230E-04	1.3380E-04

[0079] 上記の条件において、それぞれ設計したレンズのゼルニケ収差は以下の表10の通りである。なお、ゼルニケ収差はRMS (Root Mean Square) 値(単位λ)で示す。また、収差の順序はZernike Standard Orderに従った。

[表10]

No	式(12)	式(37)	収差名
1	0.004	0.151	ピストン
2	0	0	シフト
3	0	0	
4	$<-1\text{E}-03$	$<-1\text{E}-03$	デフォーカス
5	0	0	非点収差
6	5.629	5.781	
7	0	0	コマ収差
8	0	0	
9	0	0	トレフォイル
10	0	0	
11	-0.002	-0.052	球面収差
12	0.159	0.166	4次非点収差
13	0	0	
14	0.0003	0.2350	テトラフォイル
15	0	0	
16	-0.000	0.012	6次球面収差

[0080] 上記の計算において、デフォーカスは 10^{-3} 以下とした。表10に示すように、本発明における式(12)を用いて設計したレンズと式(37)に示されるバイコーニック面を用いて設計したレンズの収差を比較すると、No. 14(テトラフォイル)の収差において、大きな差があり、本発明の方が小さくすることができる。また、設計時に必要とする収束時間も本発明による式の方が早く、効率よく設計を行うことができる。この現象は屈折力差の大きい眼用レンズを設計する場合に、より顕著になる。また、モールド製法で作製する場合、回転対称レンズとR1を共通化する場合があるが、その場合でも式(12)を用いて設計すれば自由にトーリックレンズを設計することができる。

[0081] 理由は次の通りである。上記のバイコーニック面による設計ではパラメータが R_x 、 R_y 、 k_x 、 k_y の4つしかなく、X方向とY方向における形状しか規定できていないため、XY方向、すなわちX方向とY方向の間の任意の方向における収差を抑えることができない。一方、本発明における式(12)を用いた設計では、例えば X^2Y^2 等の変数X及びYを含む項があるため

、X方向とY方向の間の方向についてもレンズの面形状を規定することができる、この結果、不要な収差を除去することができる。また、テトラfoilと呼ばれる収差は $\cos 4\theta$ ($\sin 4\theta$) の関数形を持つ収差であるが、後述するように式(12)は $n \geq 2$ のときには4次の項を含む、つまり $\cos 4\theta$ 形の関数を含み、パラメータによって独立にトーリック面に付加することができるため、効果的に収差を除去することができる。

[0082] 近年では、眼科用測定機器の発達により、眼の収差を従来よりも詳細に測定することが可能となっている。そのため、レンズ面全体に亘って収差を適正に補正する機能を有するレンズを作製する重要性が高まっている。したがって、本実施例により式(11)を用いてトーリック眼内レンズを設計することにより、収差を適正に補正する機能を有するレンズを作製することができる。

[0083] (実施例5)

次に実施例5について説明する。本実施例では、式(12)が以下の式(38)で表されることに注目する。

[数38]

$$Z = \frac{cr^2}{1 + [1 - c^2 r^2 (k+1)]^{1/2}} + \sum_{n=1}^m \sum_{j=0}^n a_{2j, 2(n-j)y} X^{2j} Y^{2(n-j)} \dots \quad (38)$$

[0084] ここで、mは自然数であり、nはm以下の自然数であり、jは0以上n以下の整数である。ここで、Xは第1の方向におけるにおけるレンズ中心からの距離であり、Yは第2の方向におけるレンズ中心からの距離である。この式(38)によれば、トーリックレンズに限定されることなく、以下に説明する2つの条件を満たせば、球面レンズや非球面レンズ等の回転対称のレンズを設計することもできる。すなわち、式(12)を用いてレンズ設計を行う場合、パラメータを変更するだけで、回転対称型のレンズとトーリックレンズの比較を容易に実現することができる。例えば、光学ソフトZEMAXでは、レンズ式を変更する場合、1つのレンズデータを流用することはでき

ず、新規にレンズデータを作成しなければならない。しかし、本実施例によれば、式（１２）から得られる式でレンズの比較を行うことができるため、例えばＺＥＭＡＸのマルチコンフィグレーションという機能を用いれば、パラメータの変更を容易に行うことができる。

[0085] 本実施例では、式（３８）において以下の式（３９）、（４０）を満たすことを条件とする。

[数39]

$$a_{2nx} = a_{2ny} \dots (39)$$

[数40]

$$a_{2jx2(n-j)y} = \frac{n!}{(n-j)!j!} a_{2nx} \dots (40)$$

[0086] ここで、 n は m 以下の自然数、 j は 0 以上 n 以下の整数とする。

[0087] 一例として、以下の式（４１）で表される非球面形状のレンズを考える。

[数41]

$$Z = \frac{cr^2}{1 + [1 - c^2 r^2 (k+1)]^{1/2}} + a_2 r^2 + a_4 r^4 \dots (41)$$

[0088] このレンズの場合、以下の表１１に示すように式（１２）の各パラメータに「係数の値」欄に示す値を設定することで、式（１２）により示されるレンズ面形状を式（４１）により示されるレンズ面形状に一致させることができる。

[表11]

式(12)のパラメータ	係数の値
a_{2x}	a_2
a_{2y}	a_2
a_{4x}	a_4
a_{2x2y}	$2a_4$
a_{4y}	a_4

[0089] なお、 $R=10.000$ 、 $a_2=0.001$ 、 $a_4=0.0001$ として得られる非球面レンズは、 $R=10.000$ 、 $a_{2x}=a_{2y}=0.001$ 、 $a_{4x}=a_{4y}=0.0001$ 、 $a_{2x2y}=0.0002$ として得られるトーリックレンズと同一面形状とみなすことができる。

[0090] さらに、 $X=Y$ となる方向のサグ量は、以下の表12に示す通り、式(12)を用いて設計した場合と式(41)を用いて設計した場合とで一致していることがわかる。

[表12]

式(41)の場合		式(12)の場合	
r (mm)	サグ量(mm)	$X=Y=\sqrt{r}$ (mm)	サグ量(mm)
0	0.00000	0	0.00000
0.5	0.012764	0.35355	0.012764
1.0	0.051226	0.70711	0.051226
1.5	0.115896	1.06066	0.115896
2.0	0.207641	1.41421	0.207641
2.5	0.327698	1.76777	0.327698
3.0	0.477708	2.12132	0.477708

[0091] なお、一例として $X=Y$ となる方向のサグ量を示したが、任意の方向においても、一致していることがわかっている。したがって、式(39)、(40)により式(12)の第2項以降において X^{2n} 及び Y^{2n} の項だけを用いるように設定すると、45度方向（すなわち $X=Y$ ）は、トーリック面を付加しない基準面形状と同等になり、式(12)を用いてレンズ設計を行った複数の製品群（球面、非球面、トーリック面等）の相互の関連付けや評価が容

易になる。なお、他の実施例においても式（１２）の代わりに式（３８）を用いてもよい。

[0092] （実施例６）

次に実施例６について説明する。この実施例では式（１２）に $(X+Y)^2$ $n-1$ に基づく定義式（ n は自然数）を加えたトーリック面を用いる。トーリック眼内レンズの設計においては、乱視軸とトーリック軸の軸合わせが重要である。そこで、乱視軸とトーリック軸のずれを評価する必要もある。また、トーリック眼内レンズのエッジ厚は一定ではなく変化する。しかし、一般的な光学ソフトでは X 方向又は Y 方向のエッジ厚しか計算できない。そのため、ソフト内でレンズの光学系を回転させる作業を行ったり、トーリック面のサグ量を計算してレンズの中心厚との差からエッジ厚を計算したりする必要がある。

[0093] 本実施例では、以下のようにパラメータの変換を行うことで、レンズを任意に回転させることができる。このようにすることで、ソフト内において X 軸及び Y 軸に所望の角度の経線（直径）を設定することができるため、レンズ設計時の計算量を抑えることができる。例えば、式（１２）において X^2 の係数と Y^2 の係数のそれぞれの差を XY の係数とすると、レンズを 45° （又は -45° ）回転させることができる。

[0094] なお、以下の式（４２）を用いて変数を変換することで、自由にレンズの回転を行うことができる。

[数42]

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \cos \theta - Y \sin \theta \\ X \sin \theta + Y \cos \theta \\ Z \end{pmatrix} \cdots (42)$$

ここで、 θ は回転角度、 X' 、 Y' 、 Z' は変換後の係数及び変数、 X 、 Y 、 Z は回転前の変数である。

[0095] 一例として、式（１２）から得られる以下の式（４３）により表されるトーリック面を考える。

[数43]

$$Z = \frac{cr^2}{1 + [1 - c^2 r^2 (k+1)]^{1/2}} + a_{2x} X^2 + a_{2y} Y^2 \cdots (43)$$

[0096] このトーリック面を θ だけ回転させる場合、式(43)の第2項及び第3項について、以下の式(44)のように変換する。なお、式(43)の第1項は回転対称のレンズ形状を表すため変換の説明は省略する。

[数44]

$$\begin{aligned} a_{2x} X^2 + a_{2y} Y^2 &= a_{2x} (X \cos \theta - Y \sin \theta)^2 + a_{2y} (X \sin \theta + Y \cos \theta)^2 \\ &= (a_{2x} \cos^2 \theta + a_{2y} \sin^2 \theta) X^2 + (a_{2x} \sin^2 \theta + a_{2y} \cos^2 \theta) Y^2 + 2(-a_{2x} + a_{2y}) \sin \theta \cos \theta XY \\ &\cdots (44) \end{aligned}$$

[0097] なお、上記では2次の次数の変数までを変換の対象としているが、さらに高次の係数を持つ式により表されるレンズ形状であっても、上記と同様に計算することで、レンズを任意の角度で回転させることができる。

[0098] 一例として、 $R = 10.000$ 、 $k = 0$ 、 $a_{2x} = 0.001$ 、 $a_{2y} = -0.001$ として得られるトーリック面を有するレンズを 30° 回転させる場合、回転後のトーリック面は、 $R = 10.000$ 、 $k = 0$ 、 $a_{2x} = 0.0005$ 、 $a_{xy} = -0.0017321$ 、 $a_{2x2y} = -0.0005$ として表される。また、同様に -15° 回転させる場合、回転後のトーリック面は、 $R = 10.000$ 、 $k = 0$ 、 $a_{2x} = 0.00086603$ 、 $a_{xy} = 0.001$ 、 $a_{2x2y} = -0.00086603$ として表される。

[0099] トーリック眼内レンズの場合、通常エッジ厚は光軸回りに 180° 周期で周期的に変動する。従来のトーリック、例えば特表2011-519682号公報で示されるようにエッジ厚が光軸回りに正弦的に変化する場合、正弦関数($\sin$ 関数)の特徴により 90° 位相をずらした関数は $\cos$ 関数と一致するため、強主経線付近のエッジ厚変化と弱主経線付近のエッジ厚変化は同等である。このように正弦的なトーリックのエッジ厚は $\sin 2\theta$ (又

は $\cos 2\theta$) で変化する一方、式 (12) によるトーリック眼用レンズの場合、 X^4 、 Y^4 、 X^2Y^2 の項があるためエッジは $\cos 2\theta + \cos 4\theta$ で変化する。そのため、周期は 180° であるが、強主経線付近のエッジ厚変化と弱主経線付近のエッジ厚変化が異なる。

[0100] 一例として、図9に、式 (12) において $R10.000$ 、 $k=0$ 、 $a_{2x}=0.001$ 、 $a_{4x}=0.0003$ として得られるトーリック面について、 $\phi 6\text{ mm}$ の点でのサグ量をプロットした結果を示す。図9に示すように、 90° と 270° 付近においては、サグ量の変化が急であるのに対し、 0° 、 180° 、 360° においてはサグ量の変化が緩やかになっている。このように変化する関数は一般的な正弦的に変化する関数と異なり、 0° から 270° の範囲における関数がその範囲の中間である 135° を中心に回転対称になっていない。エッジ厚の変化量が小さいということは、レンズ形状が回転対称に近づくことを意味する。すなわち、 0° 、 180° 、 360° 付近においてはエッジ厚の変化が小さく、回転対称レンズに近い振る舞いをするトーリック眼内レンズを設計することができる。したがって、本実施例によれば、レンズの弱主経線又は強主経線付近におけるエッジ厚の変化量を小さくすることができ、折り畳んで眼内に挿入する際に回転対称レンズと同様に挿入器にも装填が容易であり安定して搬送することが可能となるトーリック眼内レンズを設計することができる。

[0101] (実施例7)

次に実施例7について説明する。一般に、光学部品の製造においては部品の検品を行う工程が設けられている。一般的な回転対称系の光学面は、以下の式 (45) で与えられる。

[数45]

$$Z = \frac{cr^2}{1 + [1 - c^2 r^2 (k+1)]^{1/2}} + a_2 r^2 + a_4 r^4 + \dots \quad (45)$$

[0102] この式 (45) で与えられる光学面は光軸に対して回転対称であるため、いずれの直径方向で評価しても同じ評価結果が得られる。しかし、トーリッ

クレンズのような非回転対称の光学面を評価する場合、従来のトーリック面の場合は軸方向（ $X=0$ 又は $Y=0$ ）以外の方向における評価は非常に困難であった。一方、本発明の式（１２）を用いて面形状を定義すれば、従来のトーリック面形状に比べて任意の方向の断面形状を容易に推測及び表現できる。

[0103] ここで、式（１２）について、レンズの光学面の任意の方向（角度 θ ）における断面形状の表現式を導出する。ここでは、一例として最大次数４次の場合を考える。式（１２）において $x = r \cos \theta$ 、 $y = r \sin \theta$ とすると、以下のように変換して式（４６）が得られる。

[数46]

$$\begin{aligned} Z &= \frac{cr^2}{1+[1-c^2r^2(k+1)]^{1/2}} + a_{2x}X^2 + a_{2y}Y^2 + a_{4x}X^4 + a_{2x2y}X^2Y^2 + a_{4y}Y^4 \\ &= \frac{cr^2}{1+[1-c^2r^2(k+1)]^{1/2}} + (a_{2x} \cos^2 \theta + a_{2y} \sin^2 \theta)r^2 + (a_{4x} \cos^4 \theta + a_{2x2y} \cos^2 \theta \sin^2 \theta + a_{4y} \sin^4 \theta)r^4 \\ &= \frac{cr^2}{1+[1-c^2r^2(k+1)]^{1/2}} + A(\theta)r^2 + B(\theta)r^4 \cdots (46) \end{aligned}$$

ここで、

[数47]

$$A(\theta) = a_{2x} \cos^2 \theta + a_{2y} \sin^2 \theta, B(\theta) = a_{4x} \cos^4 \theta + a_{2x2y} \cos^2 \theta \sin^2 \theta + a_{4y} \sin^4 \theta$$

である。

また、

[数48]

$$\begin{aligned} A(\theta) &= \frac{1}{2} [a_{2x} + a_{2y} + (a_{2x} - a_{2y}) \cos 2\theta], \\ B(\theta) &= \frac{1}{8} [(3a_{4x} + a_{2x2y} + 3a_{4y}) + 4(a_{4x} - a_{4y}) \cos 2\theta + (a_{4x} - a_{2x2y} + a_{4y}) \cos 4\theta] \end{aligned}$$

である。

[0104] 式（４６）からわかるように、式（１２）を用いれば、レンズ面における

任意の方向（任意の θ ）の断面形状を一般的な光学面定義式で表現することができる。このことは、レンズの評価において非常に都合がよい。なぜならば、例えば、市販されている三鷹光器製非接触三次元測定装置NH-3SPに組み込まれているソフトウェアでは、測定された断面形状を上記の式（45）の形状にフィッティングできるからである。また、設計値との比較や実際に製造されたレンズの任意の断面内における光学シミュレーションを容易に行うことが可能となるからである。

[0105] 一方、従来のトーリック光学面（式（11）又は式（37））の場合、 $X=0$ 又は $Y=0$ （ $\theta=0^\circ$ 又は $\theta=90^\circ$ ）では断面形状が、一般的な式（45）の第1項に一致するが、 $X \neq 0$ かつ $Y \neq 0$ の場合は一般的な式（45）の形で表現すること、つまり式（45）に当てはまる k 、 c 及び a を求めることは非常に困難である。

[0106] したがって、従来用いられていたレンズの表現式を用いて製造されたレンズの軸上以外の断面形状を評価する場合、レンズの断面形状が非常に複雑であるために特殊な形状評価ソフトを準備しなければならない。また、式（7）～式（10）で示されるトーリック面においては、 $X=0$ 又は $Y=0$ の場合以外、レンズがどのような形状になっているかは加工方法により変わるため、形状の調整は非常に困難である。

[0107] さらに、レンズ面に対して光学的な計算を行う場合は、任意の位置におけるレンズ面の傾きを計算しなければならず、傾きを計算するために関数の微分が必要となる。式（12）又は式（38）に示す本発明の定義式では、平方根の中に他の関数（例えば三角関数）が含まれていないため容易に微分計算を行うことができる。また、本発明の定義式を用いて作製した眼内レンズをレンズ挿入器に装填してもレンズ挿入器の操作に支障が生じないことを確認する場合でも、当該定義式に対して容易に積分計算を行ってレンズの断面積を算出することができる。

[0108] また、本発明の式（12）又は式（38）で定義される面に対しては任意のレンズ面を組み合わせることができる。例えば、適当な非球面を組み合わせ

せることで球面収差を適切に設定することで、トーリックレンズの軸が乱視軸とずれても像の劣化を軽減するようにしてもよい。また、このような球面収差の設定は本発明の定義式で定義される面で行ってもよい。例えば、式(12)又は式(38)における第1項部分において、そのような球面収差の設定を実現することができる。あるいは、式(12)又は式(38)における第2項以降のパラメータで実現してもよい。

[0109] ここで、球面収差を制御する非球面と組み合わせたトーリックレンズにおける、軸ずれに対する評価結果を示す。評価は図5に示す模型眼を用いて行った。図10に、図5に示す模型眼を使用して軸ずれを起こした場合に、指標であるランドルト環をカメラで撮影した結果を示す。図10はIOL (Intraocular Lens) を挿入した模型眼としての球面収差量を変化させたときに、角膜レンズの乱視軸とトーリックIOLの軸とを一致させた状態から $\pm 5^\circ$ 回転させて撮影したランドルト環の様子を示す。ここで、図10の試験条件を以下に示す。

[0110] 角膜レンズ : PMMA
 角膜屈折力 : 弱主経線40.4D、強主経線42.4D
 角膜球面収差 : +0.28 μm (@ $\phi 6\text{mm}$)
 絞り径 : $\phi 5.2\text{mm}$ (@ IOL 前面)
 IOL : 円柱屈折力3.0D、等価球面度数20D

[0111] 図10に示すように、IOLの球面収差とIOLを挿入する眼球の角膜の球面収差とを合わせた球面収差がほぼ0 (図10では+0.03 μm) の場合、IOLの球面収差がほぼ-0.28 μm の場合、軸が一致している状態ではランドルト環を鮮明に観察することができるが、回転して軸がずれてしまうとランドルト環の像が著しく劣化して目視ではランドルト環を認識することができない。一方、IOLの球面収差とIOLを挿入する眼球の角膜の球面収差とを合わせた球面収差が0.2 μm ~ 0.3 μm の範囲 (図10では+0.26 μm) の場合、IOLの球面収差が-0.08 μm ~ +0.02 μm の場合、軸が一致している状態でランドルト環を認識でき、かつ回転

して軸がずれてもランドルト環を認識することができる。図10において比較例のIOL (+0.13 μm)の球面収差の場合、軸が一致している状態では前記2種のほぼ中間くらいの像となっている。しかし、レンズが回転して軸がずれた場合、ランドルト環が縦や横に重なった像になっており、目視においてランドルト環を認識できる状態とは言い難い。

[0112] 次に、上記の模型眼における網膜像の光学シミュレーションを実施した結果を図11に示す。図11に示すように、IOLの球面収差とIOLを挿入する眼球の角膜の球面収差とを合わせた球面収差が0の場合、すなわちIOLの球面収差がほぼ-0.28 μm の場合、軸が一致している状態ではランドルト環を鮮明に観察することができるが、回転して軸がずれてしまうとランドルト環の像が著しく劣化して目視ではランドルト環を認識することができない。これは図10で示した実機での評価結果と一致していることから、本光学シミュレーションの正確性を確認できたと考えられる。

[0113] そこで、さらに図12A、図12Bに示す光学シミュレーションの結果を見ると、IOLの球面収差とIOLを挿入する眼球の角膜の球面収差とを合わせた球面収差が0.2 μm ~0.3 μm の範囲の場合、すなわちIOLの球面収差が-0.08 μm ~+0.02 μm の場合、軸が一致している状態でランドルト環を認識でき、かつ回転して軸がずれてもランドルト環を認識できることがわかる。また、IOLの球面収差とIOLを挿入する眼球の角膜の球面収差とを合わせた球面収差が0.5 μm より大きい場合、すなわちIOLの球面収差が+0.22 μm より大きい場合、軸ずれに対するランドルト間の劣化は少ないが、軸が一致している状態におけるコントラストが低下して、全体として像質が低下する懸念があることがわかった。

[0114] 本件開示の眼用レンズはモールド製法で作製しても切削加工製法で作製してもよい。ただし、トーリック面の加工は回転速度と同期させながら加工ツールを光軸方向に移動可能な旋盤加工機で行うことが望ましい。

符号の説明

[0115] L4 トーリック眼内レンズ

請求の範囲

[請求項1] 眼用レンズのレンズ面上の任意の経線方向における断面形状が
[数1]

$$Z = \frac{cr^2}{1+[1-c^2r^2(k+1)]^{1/2}} + A(\theta)r^2 + B(\theta)r^4 \cdots (1)$$

を含む式で表現され、 c は前記眼用レンズにおける近軸曲率であり、 r は前記眼用レンズのレンズ中心からの距離であり、 k は前記眼用レンズにおけるレンズ光軸に回転対称な面のコーニック定数であり、前記 c 、 r 、 k は前記レンズ面上の前記経線方向について共通であり、 $A(\theta)$ 及び $B(\theta)$ は、前記経線方向の角度に依存する関数で表現されるパラメータであることを特徴とする眼用レンズ。

[請求項2] 前記眼用レンズはトーリックレンズであることを特徴とする請求項1に記載の眼用レンズ。

[請求項3] 請求項1に記載の式(1)において第2項以降にある r^n の係数は光軸回りの角度に対して 180° 周期の関数であることを特徴とする請求項1又は請求項2に記載の眼用レンズ。

[請求項4] 前記式(1)における $A(\theta)$ は 180° 周期関数であり、 $B(\theta)$ は 180° 周期関数又は 180° 周期関数と 90° 周期関数の和であることを特徴とする請求項1から請求項3のいずれか1項に記載の眼用レンズ。

[請求項5] レンズの光軸に対して回転対称のレンズ面を規定する定義式に、
[数2]

$$(X^2 + Y^2)^n \cdots (2)$$

に基づくトーリック面の定義式を加算した式を用いて前記眼用レンズ

のレンズ形状を規定し、 $n = 1, 2, \dots$ であり、 X は前記眼用レンズの第1の方向におけるレンズ中心からの距離であり、 Y は前記眼用レンズの第2の方向におけるレンズ中心からの距離であることを特徴とする請求項1又は請求項2に記載の眼用レンズ。

[請求項6] 前記トーリック面の定義式を加算した式は、

[数3]

$$Z = \frac{cr^2}{1 + [1 - c^2 r^2 (k+1)]^{1/2}} + \sum_{n=1}^m \sum_{j=0}^n a_{2j \times 2(n-j)y} X^{2j} Y^{2(n-j)} \dots (3)$$

で与えられ、 c は前記トーリック面を付加する前の前記眼用レンズにおけるレンズ光軸に回転対称である基準面の曲率であり、 r は前記眼用レンズのレンズ中心からの距離であり、 k は前記トーリック面を付加する前の前記眼用レンズにおけるレンズ光軸に回転対称である基準面のコーニック定数であり、 $a_{2j \times 2(n-j)y}$ は前記トーリック面を付加するパラメータであることを特徴とする請求項5に記載の眼用レンズ。

[請求項7] 前記眼用レンズの光軸回りにおけるエッジ厚みの変化が弱主経線付近と強主経線付近とで異なるように前記眼用レンズのレンズ形状が規定されることを特徴とする請求項5又は請求項6に記載の眼用レンズ。

[請求項8] 前記式(3)において、

[数4]

$$a_{2nx} = a_{2ny} \dots (4)$$

[数5]

$$a_{2j \times 2(n-j)y} = \frac{n!}{(n-j)! j!} a_{2nx} \dots (5)$$

を満たし、 n は m 以下の自然数、 j は 0 以上 n 以下の整数であることを特徴とする請求項 6 に記載の眼用レンズ。

[請求項9] ゼルニケ収差のうち、テトラフォイルの制御を目的とした請求項 5 又は請求項 6 に記載の眼用レンズ。

[請求項10] 前記式 (3) において、 $m \geq 2$ であり、 $a_{2x} a_{2y} \neq 0$ 又は $a_{4x} \neq -a_{4y}$ である請求項 9 に記載の眼用レンズ。

[請求項11] 球面収差の制御により、トーリックレンズ軸と乱視軸とにずれが生じた場合でも像の劣化を軽減できる請求項 5 又は請求項 6 に記載の眼用レンズ。

[請求項12] 前記球面収差は前記眼用レンズを挿入する眼球の角膜の球面収差と合わせて $+0.2 \mu\text{m}$ から $+0.5 \mu\text{m}$ である請求項 11 に記載の眼用レンズ。

[請求項13] 前記球面収差は $\phi 5.2 \text{ mm}$ の光線を前記眼内レンズに通したときに $-0.08 \mu\text{m}$ から $+0.22 \mu\text{m}$ である請求項 11 に記載の眼用レンズ。

[請求項14] 前記球面収差は前記眼用レンズを挿入する眼球の角膜の球面収差と合わせて $+0.2 \mu\text{m}$ から $+0.3 \mu\text{m}$ である請求項 11 に記載の眼用レンズ。

[請求項15] 前記球面収差は $\phi 5.2 \text{ mm}$ の光線を前記眼内レンズに通したときに $-0.08 \mu\text{m}$ から $+0.02 \mu\text{m}$ である請求項 11 に記載の眼用レンズ。

[請求項16] 前記球面収差は水中で収束光を前記眼内レンズに入射させたときの球面収差である請求項 13 又は請求項 15 に記載の眼用レンズ。

[請求項17] レンズの光軸に対して回転対称のレンズ面を規定する所定の定義式に、

[数6]

$$(X^2 + Y^2)^n \cdots (6)$$

に基づくトーリック面の定義式を加算した式を用いて前記レンズのレンズ形状を規定し、 $n = 1, 2, \dots$ であり、 X は前記レンズの第1の方向におけるレンズ中心からの距離であり、 Y は前記レンズの第2の方向におけるレンズ中心からの距離であることを特徴とする眼用レンズの設計方法。

[請求項18] 前記トーリック面の定義式を加算した式は、

[数7]

$$Z = \frac{cr^2}{1 + [1 - c^2 r^2 (k+1)]^{1/2}} + \sum_{n=1}^m \sum_{j=0}^n a_{2j \times 2(n-j)y} X^{2j} Y^{2(n-j)} \dots (7)$$

で与えられ、 c は前記トーリック面を付加する前の前記眼用レンズにおけるレンズ光軸に回転対称である基準面の曲率であり、 r は前記眼用レンズのレンズ中心からの距離であり、 k は前記トーリック面を付加する前の前記眼用レンズにおけるレンズ光軸に回転対称である基準面のコーニック定数であり、 $a_{2j \times 2(n-j)y}$ は前記トーリック面を付加するパラメータであることを特徴とする請求項17に記載の眼用レンズの設計方法。

[請求項19] 前記式(7)において、

[数8]

$$a_{2nx} = a_{2ny} \dots (8)$$

[数9]

$$a_{2j \times 2(n-j)y} = \frac{n!}{(n-j)!j!} a_{2nx} \dots (9)$$

を満たし、 n は m 以下の自然数、 j は0以上 n 以下の整数であることを特徴とする請求項18に記載の眼用レンズの設計方法。

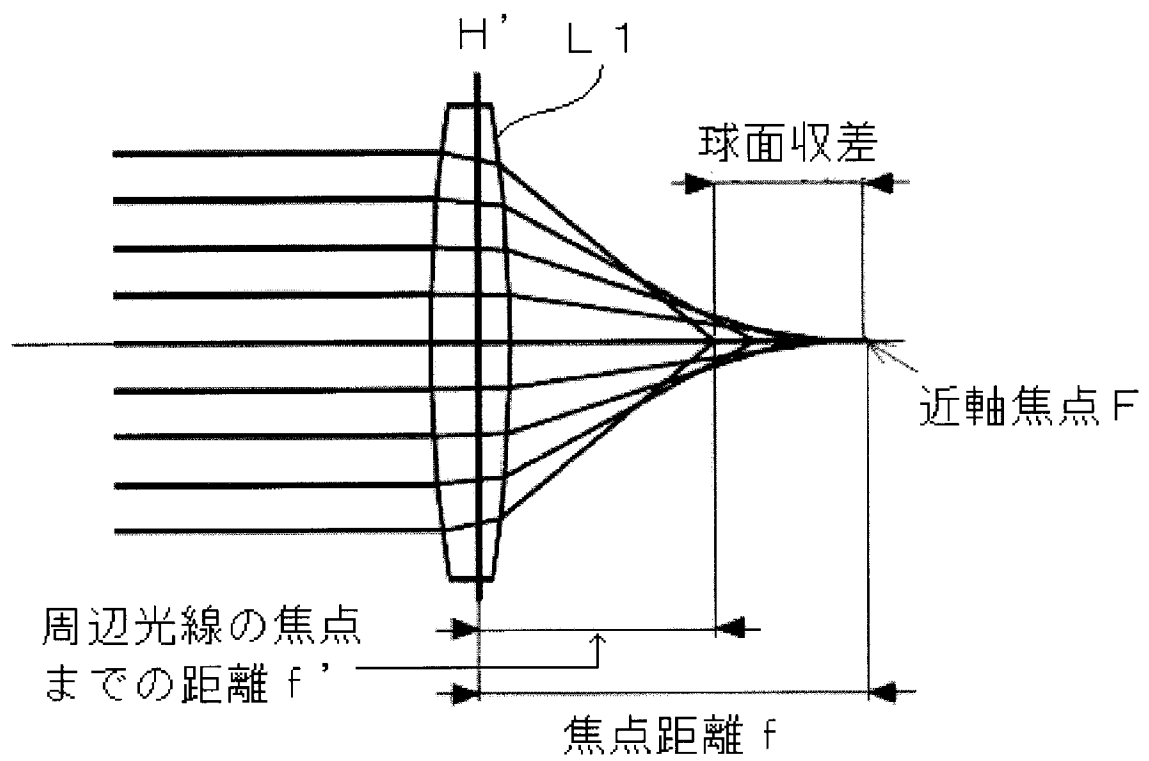
[請求項20] 前記式(7)において、

[数10]

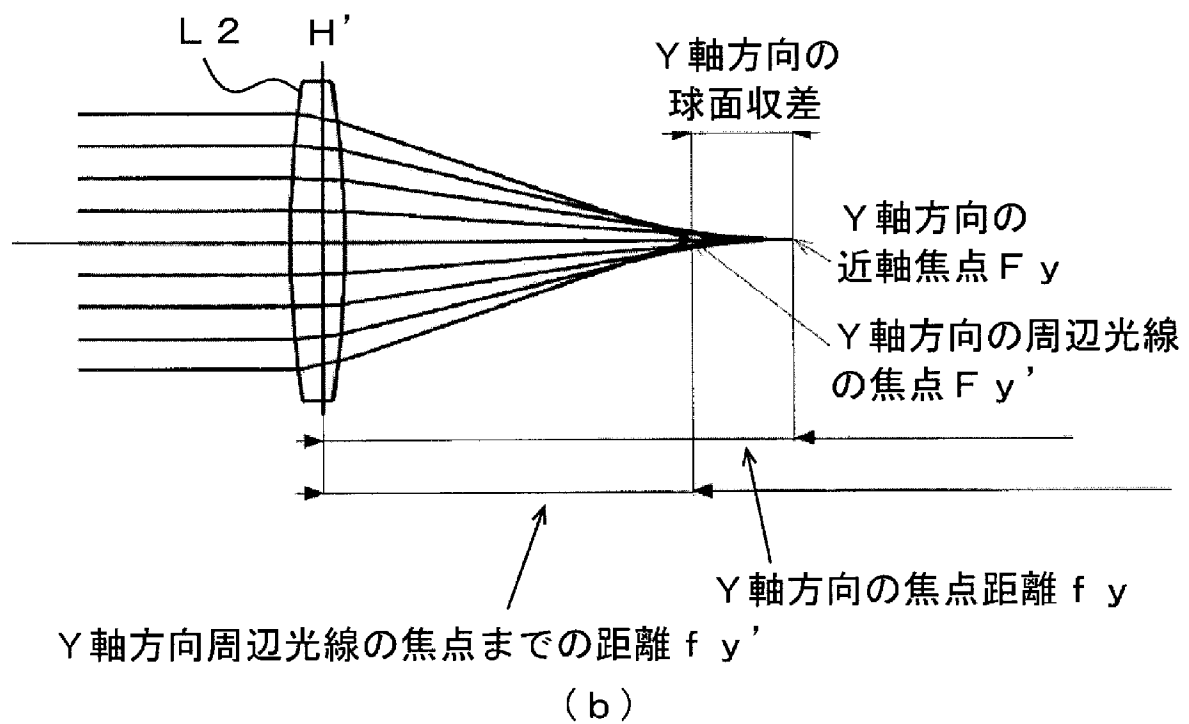
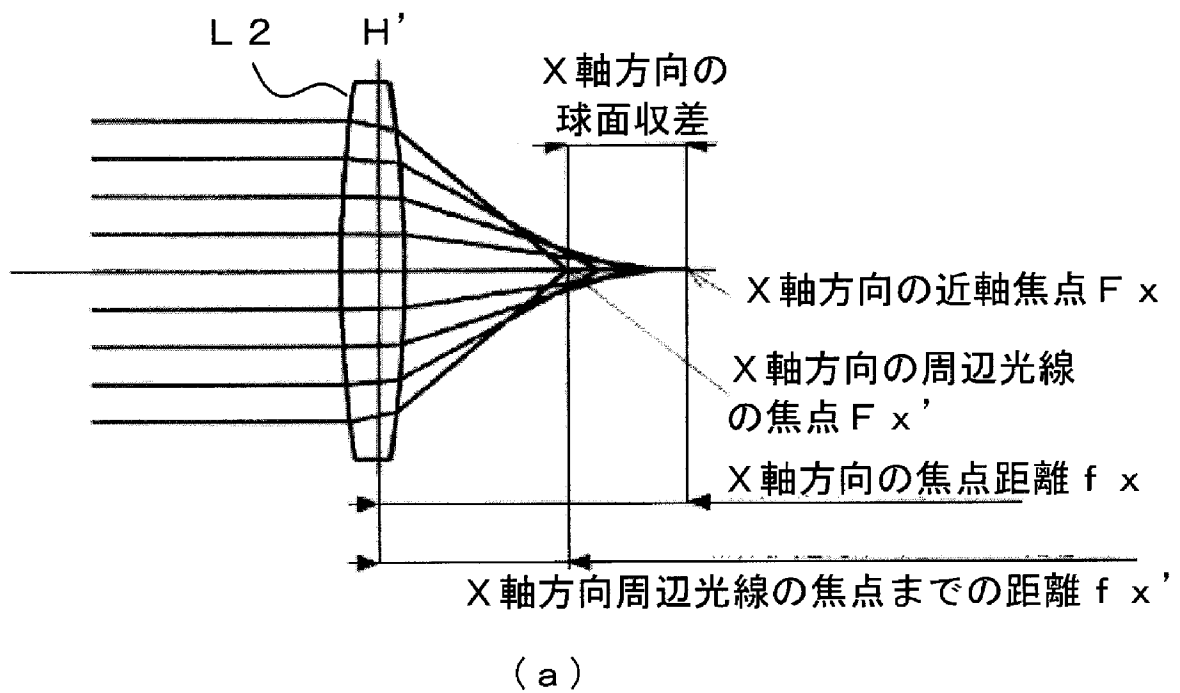
$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \cos \theta - Y \sin \theta \\ X \sin \theta + Y \cos \theta \\ Z \end{pmatrix} \cdots (10)$$

によって得られる X' 及び Y' を X 、 Y の代わりに用い、 θ は前記レンズの光軸周りの回転角度、 X' 、 Y' 、 Z' は変換後の係数及び変数であり、 X 、 Y 、 Z は回転前の変数であることを特徴とする請求項17又は請求項18に記載の眼用レンズの設計方法。

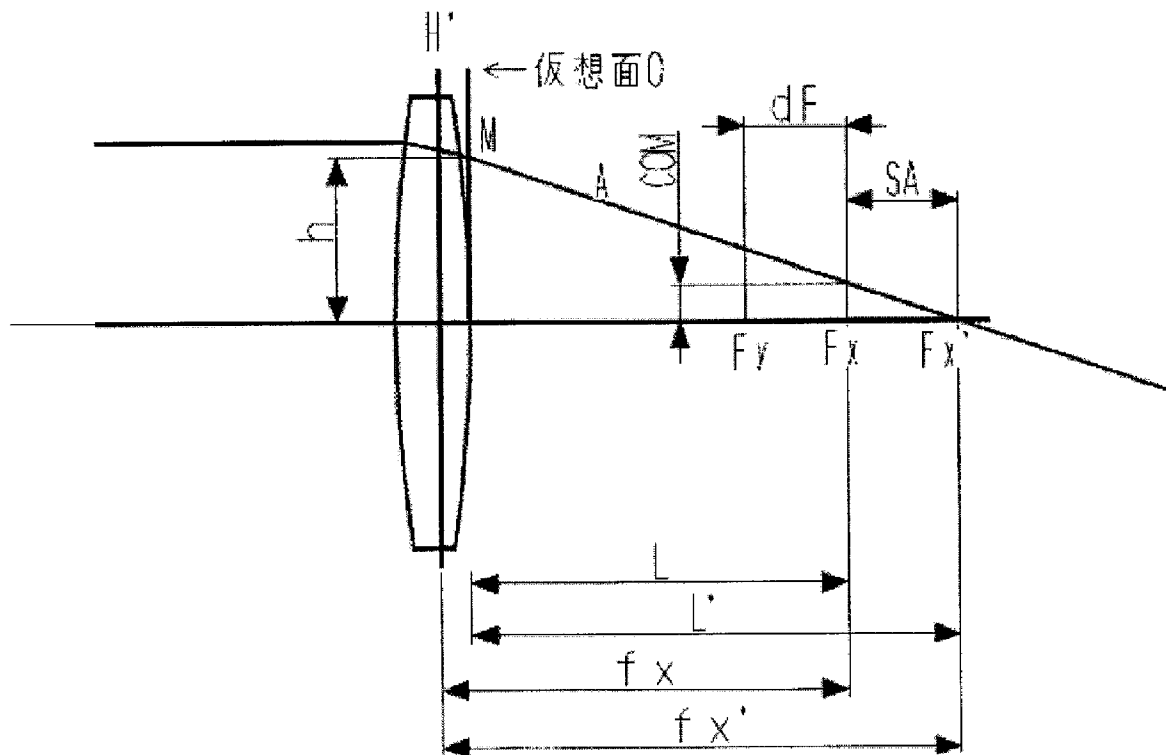
[図1]



[図2]



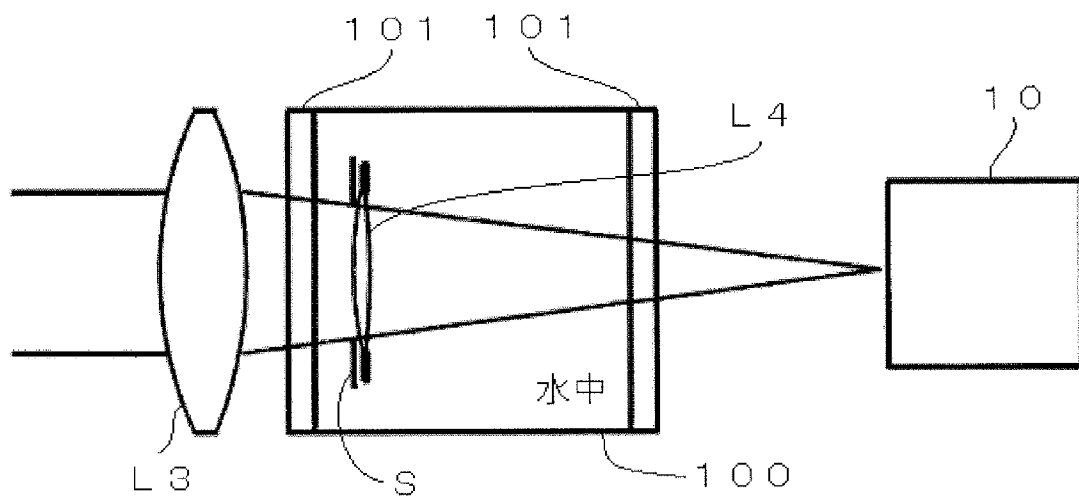
[図3]



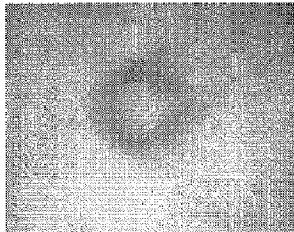
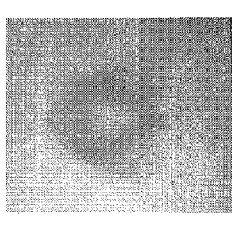
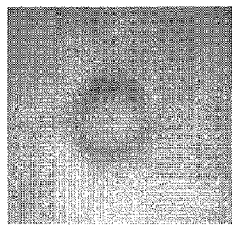
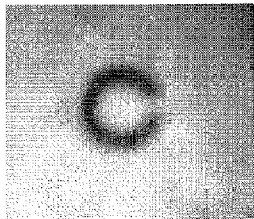
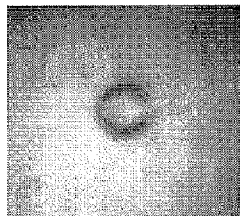
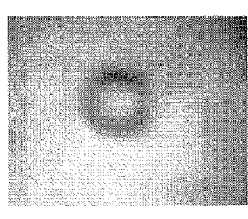
[図4]

眼内レンズ	ベストフォーカス	像面を +0.04mm した場合	像面を -0.04mm した場合
従来の トーリックレンズ			
本実施形態の トーリックレンズ			

[図5]

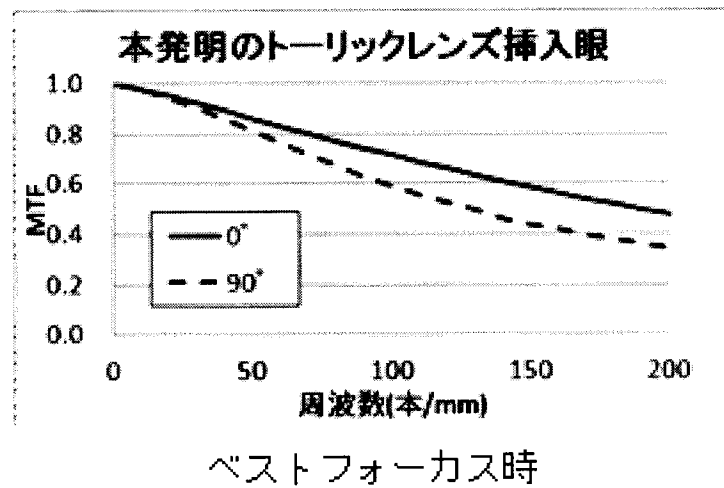


[図6]

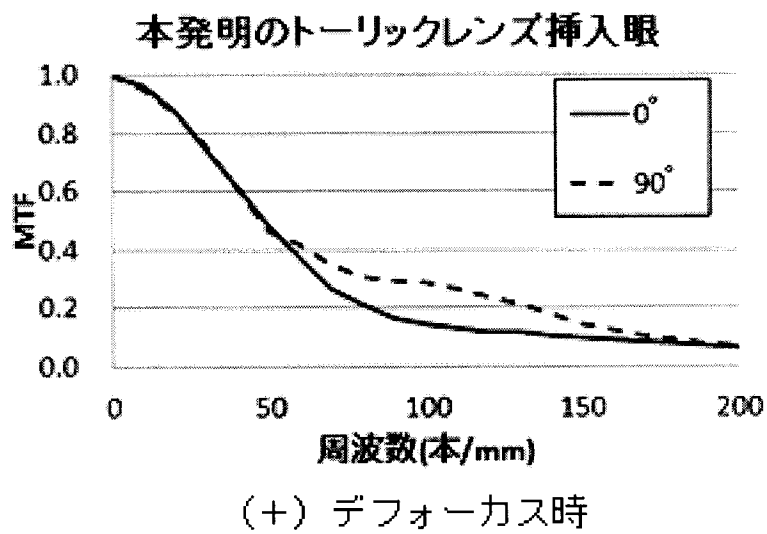
眼内レンズ	ベストフォーカス	像面を +0.04mm した場合	像面を -0.04mm した場合
従来の トーリックレンズ			
本実施形態の トーリックレンズ			

[図7]

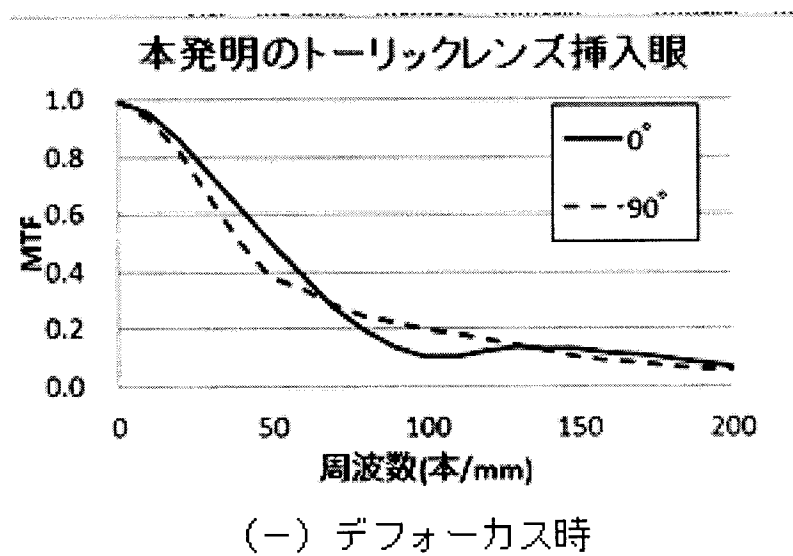
(a)



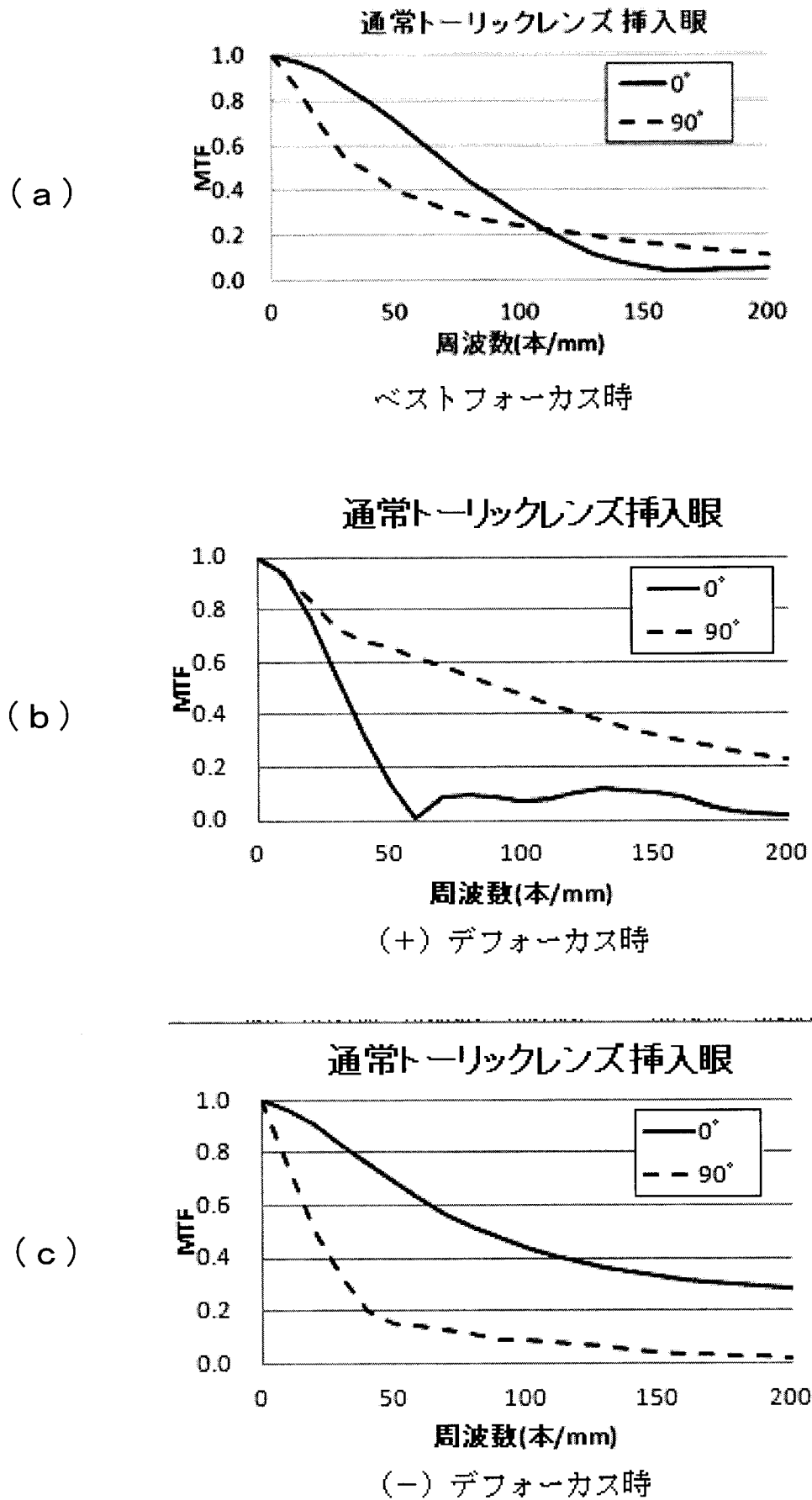
(b)



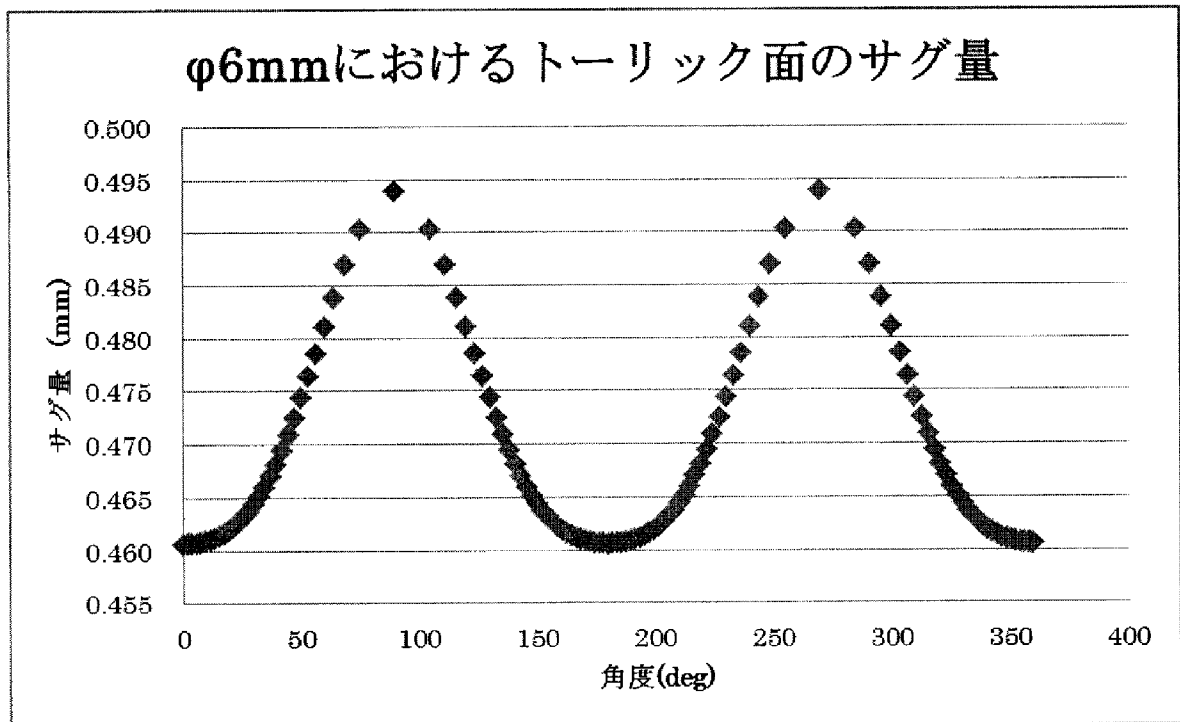
(c)



[図8]



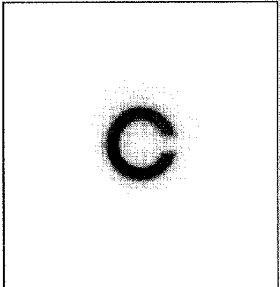
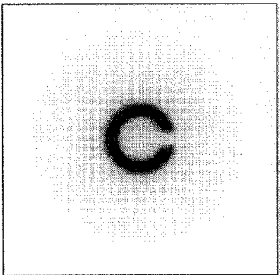
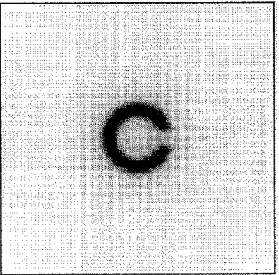
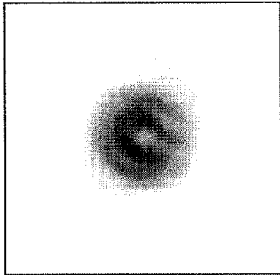
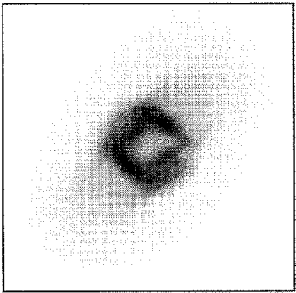
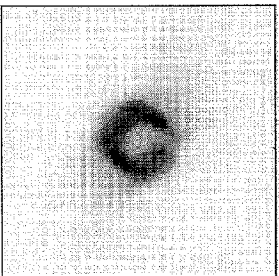
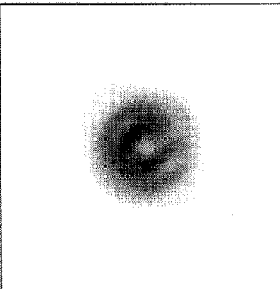
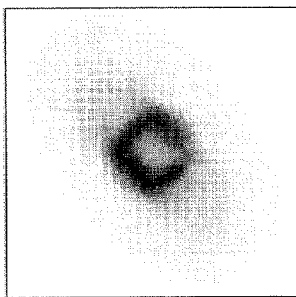
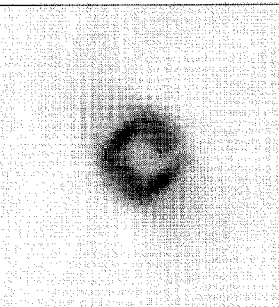
[図9]



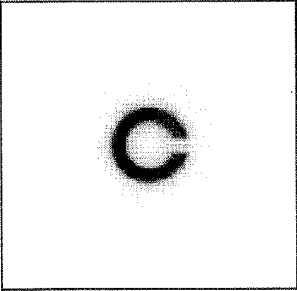
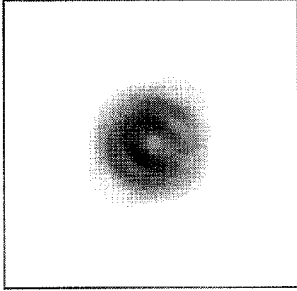
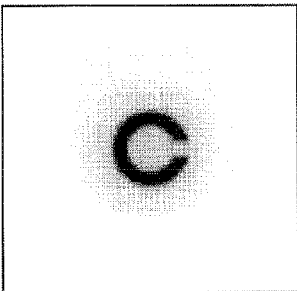
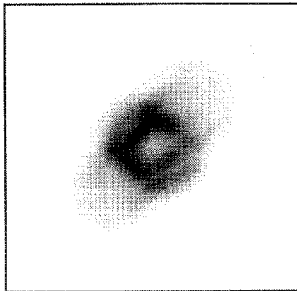
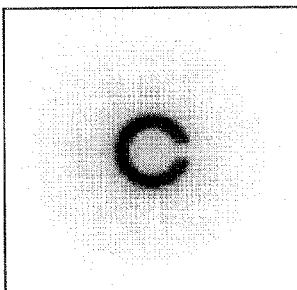
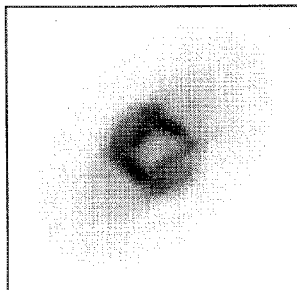
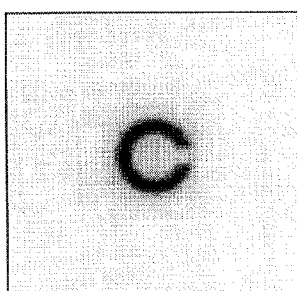
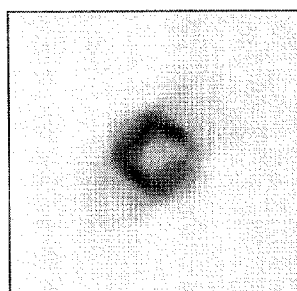
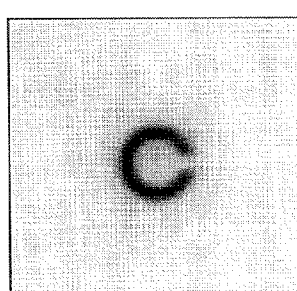
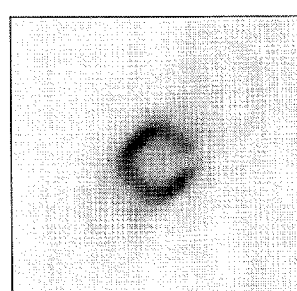
[図10]

レンズの 球面収差	+0.26μm	+0.03μm	+0.13μm (比較例)
ベスト像			
CW 5 deg			
CCW 5deg			

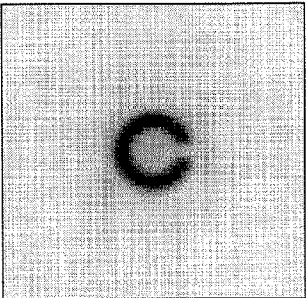
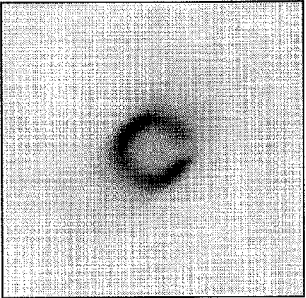
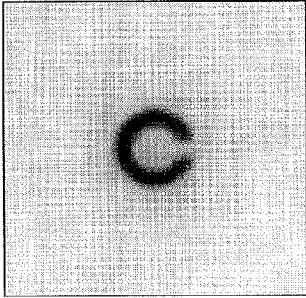
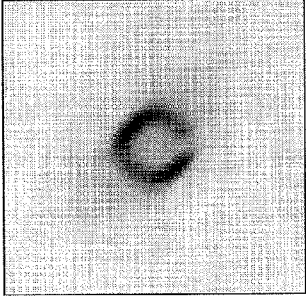
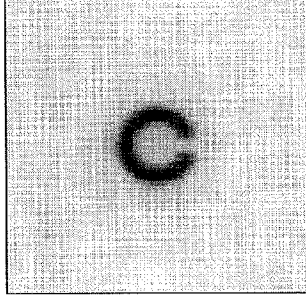
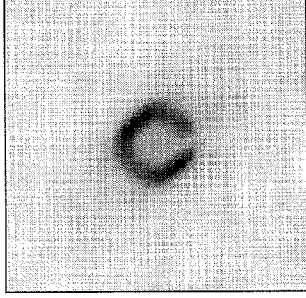
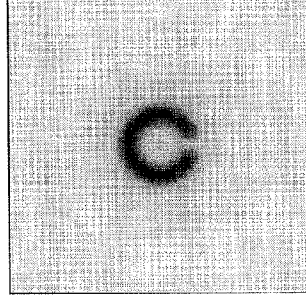
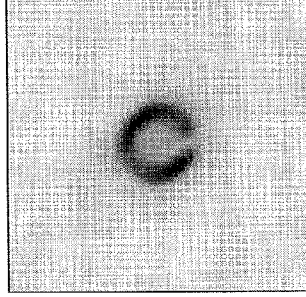
[図11]

	IOL+角膜の球面収差		
	0 μ m	+0.20 μ m	+0.30 μ m
0deg			
CW 5deg			
CCW 5deg			

[図12A]

IOL+角膜の球面収差 (μm)	0deg	5deg
0.00		
0.10		
0.20		
0.30		
0.40		

[図12B]

I O L + 角膜の球面収差 (μm)	0deg	5deg
0.45		
0.50		
0.60		
1.00		

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/052409

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02C7/02(2006.01)i, A61F2/16(2006.01)i, G02B7/06(2006.01)i, G02C7/04(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G02C7/02, A61F2/16, G02B7/06, G02C7/04

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2015

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2015 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2015

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2008-221720 A (Ito Optical Industrial Co., Ltd.), 25 September 2008 (25.09.2008), paragraphs [0024] to [0035], [0038] to [0046], [0062] to [0070] (Family: none)	1-20
X	WO 02/088828 A1 (Hoya Corp.), 07 November 2002 (07.11.2002), page 23, line 16 to page 26, line 9 & US 2003/0107702 A1 & US 2005/0041205 A1 & EP 1385038 A1 & DE 60239736 D & CA 2445706 A & KR 10-0530628 B1 & CN 1511270 A & CN 101446683 A & AU 2002253630 B & AT 505743 T & ES 2361230 T	1-20

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
07 April 2015 (07.04.15)Date of mailing of the international search report
21 April 2015 (21.04.15)Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/052409

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2004-133024 A (Nikon-Essilor Co., Ltd.), 30 April 2004 (30.04.2004), paragraphs [0070] to [0075] & US 2006/0055877 A1 & EP 1550897 A1 & WO 2004/034130 A1 & CA 2501723 A & AU 2003268692 A	1-20
X	JP 2002-122823 A (Asahi Optical Co., Ltd.), 26 April 2002 (26.04.2002), paragraphs [0035] to [0037] & US 2002/0089642 A1 & GB 2368660 A & DE 10151138 A & FR 2815426 A	1-20
A	JP 2009-535186 A (Revision Optics, Inc.), 01 October 2009 (01.10.2009), paragraphs [0041] to [0043] & US 2007/0255401 A1 & EP 2019651 A & WO 2007/130993 A2 & CA 2650883 A & AU 2007248100 A	1-20
A	JP 2002-040373 A (Hoya Corp.), 06 February 2002 (06.02.2002), entire text & JP 11-72754 A & US 6012813 A & EP 886166 A2 & DE 69841558 D & AU 7193798 A & AU 736878 B & AT 461468 T	1-20
A	WO 2010/064278 A1 (Toyohiko KASHIWAGI), 10 June 2010 (10.06.2010), entire text; all drawings (Family: none)	1-20

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G02C7/02(2006.01)i, A61F2/16(2006.01)i, G02B7/06(2006.01)i, G02C7/04(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G02C7/02, A61F2/16, G02B7/06, G02C7/04

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 5 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 5 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 5 年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	JP 2008-221720 A（伊藤光学工業株式会社）2008.09.25, 【0024】－【0035】、【0038】－【0046】、 【0062】－【0070】（ファミリーなし）	1－20

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

0 7 . 0 4 . 2 0 1 5

国際調査報告の発送日

2 1 . 0 4 . 2 0 1 5

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

吉川 陽吾

20

9811

電話番号 03-3581-1101 内線 3271

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	WO 02/088828 A1 (ホーヤ株式会社) 2002. 11. 07, 第 2 3 頁第 1 6 行乃至第 2 6 頁第 9 行 & US 2003/0107702 A1 & US 2005/0041205 A1 & EP 1385038 A1 & DE 60239736 D & CA 2445706 A & KR 10-0530628 B1 & CN 1511270 A & CN 101446683 A & AU 2002253630 B & AT 505743 T & ES 2361230 T	1 - 2 0
X	JP 2004-133024 A (株式会社ニコン・エシロール) 2004. 04. 30, 【 0 0 7 0 】 - 【 0 0 7 5 】 & US 2006/0055877 A1 & EP 1550897 A1 & WO 2004/034130 A1 & CA 2501723 A & AU 2003268692 A	1 - 2 0
X	JP 2002-122823 A (旭光学工業株式会社) 2002. 04. 26, 【 0 0 3 5 】 - 【 0 0 3 7 】 & US 2002/0089642 A1 & GB 2368660 A & DE 10151138 A & FR 2815426 A	1 - 2 0
A	JP 2009-535186 A (レヴィジョン・オプティックス・インコーポレーテッド) 2009. 10. 01, 【 0 0 4 1 】 - 【 0 0 4 3 】 & US 2007/0255401 A1 & EP 2019651 A & WO 2007/130993 A2 & CA 2650883 A & AU 2007248100 A	1 - 2 0
A	JP 2002-040373 A (ホーヤ株式会社) 2002. 02. 06, 全文 & JP 11-72754 A & US 6012813 A & EP 886166 A2 & DE 69841558 D & AU 7193798 A & AU 736878 B & AT 461468 T	1 - 2 0
A	WO 2010/064278 A1 (柏木 豊彦) 2010. 06. 10, 全文全図 (ファミリーなし)	1 - 2 0