

明 細 書

発明の名称：多焦点回折レンズ

技術分野

[0001] 本発明は、主に眼内レンズに適用される多焦点回折レンズに関する。

背景技術

[0002] 従来の多焦点回折レンズは、0次光（屈折光）を遠方視の焦点とし、+1次光（回折光）を近方視又は中間視の焦点とすることが多い。上記とはタイプが異なる多焦点回折レンズの例として、色収差を低減するために+1次光（回折光）を遠方視の焦点とする多焦点眼科用レンズが開示されている（特許文献1参照）。また、他の多焦点回折レンズの例として、0次光（屈折光）を中間視の焦点とし、+1次光（回折光）を近方視の焦点とし、-1次光（回折光）を遠方視の焦点とする三焦点レンズが開示されている（特許文献2参照）。また、眼科用レンズとして、色収差の幅を増加させるための負の回折能を有するものが開示されている（特許文献3参照）。

[0003] 眼内レンズの光学特性の試験方法に関するISO11979-2において、屈折力やMTF（空間周波数：Modular Transfer Function）等は波長546±10nmの単色光源を使用して測定することとなっており、これらの単色性能評価によって眼内レンズの仕様が定められる。ここで、特許文献1において、色収差についての記載があるように、多焦点レンズを多色（白色）性能評価することが着目されている。しかしながら、特許文献1の多焦点レンズでは、単色性能の焦点位置と多色性能の焦点位置とのずれを考慮しておらず、ISO11979-2に従う波長546±10nmの単色性能における眼内レンズの一般的な光学設計を行うと、単色性能と多色性能とにおいて焦点位置がシフトする。従来の多焦点回折レンズにおいては、単色性能評価における遠方視のための焦点位置に対し、多色性能評価における遠方視のための焦点位置が遠方側に配置されることが多く、その場合、遠方視のために分配した光は網膜上及び網膜より奥側に掛けて集光されることとなり、光を

効率良く使用することができず、眼内レンズの仕様に対する実性能にずれが生じるおそれがある。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：国際公開第2018/100459号

特許文献2：国際公開第2019/020435号

特許文献3：特開昭59-224818号公報

発明の概要

[0005] 本発明は、上記背景技術の問題点に鑑みてなされたものであり、光を効率良く使用することができる多焦点回折レンズを提供することを目的とする。

[0006] 上記課題を達成するため、本発明に係る多焦点回折レンズは、回折格子を有し、マイナス次数光が遠方視のための焦点を生成し、0次光が遠方視より近方側の焦点を生成し、焦点数が2以上であり、単色性能評価における遠方視のための焦点位置に対し、多色性能評価における遠方視のための焦点位置が近方側に配置される。

[0007] 上記多焦点回折レンズでは、多色性能評価における遠方視焦点が、単色性能評価における遠方視焦点よりも近方側に配置される多焦点レンズとすることで、可視光域において遠方視焦点が網膜よりも眼内レンズ（多焦点回折レンズ）寄りに配置され有限位置にある物体にピントを合わせることが可能となり光を効率的に使用することができる。

[0008] 本発明の具体的な側面によれば、上述の多焦点回折レンズにおいて、プラス次数光が0次光より近方側の焦点をさらに生成し、焦点数が3以上である。この場合、3段階以上の対象距離に対して結像が可能になる。

[0009] 本発明の別の側面によれば、回折格子は、キノフォームプロファイルを組み合わせた形状を有する。この場合、キノフォームプロファイルの組み合わせにより、マイナス次数光が遠方視のための焦点を生成し、0次光が遠方視より近方側の焦点を生成し、プラス次数光が0次光より近方側の焦点をさらに生成する回折格子形状を有する多焦点回折レンズを効率良く設計すること

ができる。

- [0010] 本発明のさらに別の側面によれば、キノフォームプロファイルに媒体屈折率の補正項を付加する。この場合、多焦点回折レンズを眼内で使用する場合、液中配置を想定して媒体屈折率の補正項によってキノフォームサグ高さを補正することができる。
- [0011] 本発明のさらに別の側面によれば、キノフォームプロファイルに瞳孔拡大率の補正項を付加する。設計値において、曲率を変化させ屈折光パワーを付加する方法と回折格子で回折光パワーを付加する方法との2つの方法でシミュレーションした結果、両者の付加したいパワー値が同じであるにもかかわらず得られるパワー値が異なるような場合であっても、瞳孔拡大率の補正項によって屈折光で得られたパワーに合わせることができる。
- [0012] 本発明のさらに別の側面によれば、二焦点回折レンズで生成される2つの焦点に、さらに1つの焦点を加えた三焦点回折レンズであり、二焦点回折レンズに対する三焦点回折レンズの近方加入パワーは2倍であり、回折縞本数は同じである。
- [0013] 本発明のさらに別の側面によれば、二焦点回折レンズで生成される2つの焦点に、さらに2つの焦点を加えた四焦点回折レンズであり、二焦点回折レンズに対する四焦点回折レンズの近方加入パワーは3倍であり、回折縞本数は同じである。
- [0014] 本発明のさらに別の側面によれば、回折格子は、2種類のキノフォームプロファイルを組み合わせた形状を有し、2種類のキノフォームプロファイルの回折格子高さの半分の高さを有し、0次光より遠方側の焦点を生成するマイナス次数光と、0次光より近方側の焦点を生成するプラス次数光とに配光され、マイナス次数光とプラス次数光との次数の数値が等しい。この場合、合成後のそれぞれの回折格子高さの変化量は均等となり、マイナス次数光及びプラス次数光への配光比率をほぼ一致させることができる。
- [0015] 本発明のさらに別の側面によれば、回折格子は、2種類のキノフォームプロファイルを組み合わせた形状を有し、2種類のキノフォームプロファイル

の回折格子高さが異なり、0次光より遠方側の焦点を生成するマイナス次数光と、0次光より近方側の焦点を生成するプラス次数光とに配光され、マイナス次数光とプラス次数光との次数の数値が異なる。この場合、焦点を生成する回折の次数光が増加し、焦点調整量を大きくすることができる。

[0016] 本発明のさらに別の側面によれば、回折格子における山谷部が平坦領域を有する。この場合、山谷部を平坦化しない場合に意図しない高次数光の焦点位置に配光される可能性のある光を、低次数光の焦点位置に配光させることができる。

[0017] 本発明のさらに別の側面によれば、多焦点回折レンズは正常分散の光学材料で形成され、波長546nmにおける材料屈折率が1.45以上1.56以下であり、各焦点間のパワー設定が0.75D以上である。

[0018] 本発明のさらに別の側面によれば、一对の光学面を有し、一方の光学面が回折格子を有し、他方の光学面がトーリック形状を有する。この場合、他方の光学面がトーリック形状を有することにより、乱視矯正用の多焦点回折レンズとすることができる。

図面の簡単な説明

[0019] [図1]図1Aは、第1実施形態の多焦点回折レンズを説明する平面図であり、図1Bは、多焦点回折レンズを説明する側面図であり、図1Cは、多焦点回折レンズの使用例を説明する概念図である。

[図2]図2Aは、多焦点回折レンズにおける屈折光及び回折光の焦点の関係を説明する図であり、図2Bは、単色性能の焦点と多色性能の焦点との関係を説明する図である。

[図3]図3Aは、実施例1の多焦点回折レンズの回折格子形状を説明する図であり、図3Bは、実施例1の多焦点回折レンズを組み込んだ場合の光強度を説明する図であり、図3Cは、実施例1の多焦点回折レンズのMTFを説明する図であり、図3Dは、比較例1の多焦点回折レンズの回折格子形状を説明する図であり、図3Eは、比較例1の多焦点回折レンズを組み込んだ場合の光強度を説明する図であり、図3Fは、比較例1の多焦点回折レンズのM

T F を説明する図である。

[図4]図 4 A ～ 4 E は、実施例 2 の多焦点回折レンズの M T F を説明する図である。

[図5]図 5 A ～ 5 F は、実施例 2 の別の多焦点回折レンズの M T F を説明する図である。

[図6]図 6 A ～ 6 F は、第 2 実施形態の実施例 3 の多焦点回折レンズの回折格子形状を説明する図であり、図 6 G ～ 6 I は、比較例 2 の多焦点回折レンズの回折格子形状を説明する図であり、図 6 J ～ 6 L は、実施例 3 の変形例の多焦点回折レンズの回折格子形状を説明する図である。

[図7]図 7 A 及び 7 B は、第 3 実施形態の実施例 4 の多焦点回折レンズの回折格子形状を説明する図であり、図 7 C は、実施例 4 の多焦点回折レンズの光強度を説明する図であり、図 7 D は、実施例 4 の多焦点回折レンズの M T F を説明する図である。

[図8]図 8 A 及び 8 B は、比較例 3 の多焦点回折レンズの回折格子形状を説明する図であり、図 8 C は、比較例 3 の多焦点回折レンズの光強度を説明する図であり、図 8 D は、比較例 3 の多焦点回折レンズの M T F を説明する図である。

[図9]図 9 A は、実施例 5 の多焦点回折レンズの回折格子形状を説明する図であり、図 9 B は、実施例 5 の瞳孔径 $\phi 3 \text{ mm}$ 時のレンズの光強度を説明する図であり、図 9 C は、実施例 5 の瞳孔径 $\phi 3 \text{ mm}$ 時のレンズの M T F を説明する図であり、図 9 D は、比較例 4 の多焦点回折レンズの回折格子形状を説明する図であり、図 9 E は、比較例 4 の瞳孔径 $\phi 3 \text{ mm}$ 時のレンズの光強度を説明する図であり、図 9 F は、比較例 4 の瞳孔径 $\phi 3 \text{ mm}$ 時のレンズの M T F を説明する図である。

[図10]図 10 A は、実施例 5 の瞳孔径 $\phi 5 \text{ mm}$ 時のレンズの光強度を説明する図であり、図 10 B は、実施例 5 の瞳孔径 $\phi 5 \text{ mm}$ 時のレンズの M T F を説明する図であり、図 10 C は、比較例 4 の瞳孔径 $\phi 5 \text{ mm}$ 時のレンズの光強度を説明する図であり、図 10 D は、比較例 4 の瞳孔径 $\phi 5 \text{ mm}$ 時のレン

ズのMTFを説明する図である。

[図11]図11Aは、実施例6の多焦点回折レンズのMTFを説明する図であり、図11B及び11Cは、既存レンズの多焦点回折レンズのMTFを説明する図である。

[図12]図12Aは図6Lに示す実施例3の変形例において、キノフォームプロファイルの係数 α の値が異なる四焦点レンズの光強度を説明する図であり、図12Bは係数 α の値が異なる上記四焦点レンズのMTFを説明する図である。

[図13]図13Aは、第4実施形態の多焦点回折レンズの底面図であり、図13Bは、多焦点回折レンズの弱主経線に平行である概念的な側面図であり、図13Cは、多焦点回折レンズの強主経線に平行である概念的な側面図であり、図13Dは、レンズ本体のレンズ中心からみた端部厚の角度方向における変化の一例を示す図である。

[図14]図14Aは、図13Aに示す多焦点回折レンズに設けたトーリックマークの拡大図であり、図14Bはトーリックマークの断面図である。

発明を実施するための形態

[0020] 〔第1実施形態〕

以下、図1等を参照して、本発明の第1実施形態である多焦点回折レンズ100について説明する。図1Aは、多焦点回折レンズ100の平面図であり、図1Bは、多焦点回折レンズ100の側面図であり、図1Cは、多焦点回折レンズ100の使用例を説明する概念図である。

[0021] 図1A及び1Bに示す多焦点回折レンズ100は、眼内レンズとして用いられるものであり、図1Cに示す眼球200内において水晶体2aの代わりとして機能するレンズ本体100aと、レンズ本体100aを眼球200内で支持する2本の支持部100bとを有する。レンズ本体100aと支持部100bとは一体に形成されている。レンズ本体100aは、前面である第1光学面1aと、第1光学面1aと反対側の後面である第2光学面1bとを有する。図示の例において、レンズ本体100aは、両凸レンズとなってい

るが、レンズ特性に応じて片側が凹面であっても平面であってもよい。支持部100bは、レンズ本体100aの外周部から突出した湾曲した突起を有する。なお、レンズ本体100aと支持部100bとが別体で形成されていてもよい。図1Cに示すように、多焦点回折レンズ100の使用に際して、水晶体2aの中身だけを取り除き、周りのカプセル状の膜(水晶体嚢)を残し、このカプセルの中に多焦点回折レンズ100を入れて、固定する。

[0022] 多焦点回折レンズ100は、例えば熱可塑性樹脂、非熱可塑性樹脂、無機非晶質物質等の可撓性を有する軟性材料で形成されている。多焦点回折レンズ100は、正常分散の光学材料で形成され、波長546nmにおける材料屈折率が1.45以上1.56以下であり、この時の各焦点間のパワー設定が0.75D以上であることが望ましい。

[0023] 多焦点回折レンズ100は、屈折型レンズ構造と、回折格子1cとを組み合わせたものであり、レンズ本体100aの第1光学面1a又は第2光学面1bに回折格子1cを有する。図示の例では、一方の光学面である第1光学面1aが回折格子1cを有し、他方の光学面である第2光学面1bが球面又は非球面を有する。多焦点回折レンズ100は、マイナス次数光が遠方視のための焦点を生成し、0次光が遠方視より近方側の焦点を生成し、焦点数が2以上であり、単色性能評価における遠方視のための焦点位置に対し、多色性能評価における遠方視のための焦点位置が近方側に配置される。0次光(屈折光)が遠方視より近方側の焦点を生成するとは、特定の物体からの光がレンズを経ることによる0次光が、同じ物体からの光がレンズを経ることによる例えば-1次光よりも近方側に集光するということであって、網膜基準で考えた場合、-1次光は、0次光よりも遠方視を可能にする。

[0024] 図2Aは、多焦点回折レンズ100における屈折光及び回折光の焦点の関係を説明する図であり、図2Bは、単色性能の焦点と多色性能の焦点との関係を説明する図である。図2Aの例では、多焦点回折レンズ100は、0次光(屈折光)L1のパワーが+20Dであり、0次光の焦点f1を基準とした場合、マイナス次数光(例えば、-1次光L2)が遠方側の焦点f2を生

成し、プラス次数光（例えば、+1次光 L_3 ）が近方側の焦点 f_3 を生成する。図2Aは、多焦点回折レンズ100の無限遠の焦点を示しており、最遠方側に位置するマイナス次数光の焦点位置を基準として網膜2bでの結像位置に設定している。0次光、プラス次数光、及び基準以外のマイナス次数光については、対応する対象距離に位置する対象について網膜2bでの結像が可能になる。ここで、対象距離とは、無限遠から多焦点回折レンズ100寄りに離散して位置する各対象までの距離を意味する。

[0025] 本実施形態では、多焦点回折レンズ100は、二焦点回折レンズとし、0次光 L_1 と-1次光 L_2 とを利用する構成について説明する。多焦点回折レンズ100は、0次光 L_1 が近方視のための焦点 f_1 を生成し、-1次光 L_2 が遠方視のための焦点 f_2 を生成する。多焦点回折レンズ100では、遠方視の焦点位置に関して、多焦点回折レンズ100から網膜2bまでの距離 F を標準値としている。つまり、本実施形態では、-1次光 L_2 の焦点位置が距離 F に相当する。なお、距離 F に合わせて、遠方視の焦点を生成する回折構造の設定又は設計によって-1次光 L_2 の焦点距離を変化させることができる。

[0026] 図2Bに示すように、多焦点回折レンズ100は、上述のように、単色性能評価における遠方視のための焦点位置 f_s に対し、多色性能評価における遠方視のための焦点位置 f_c が近方側に配置されている。つまり、多色性能評価における遠方視の焦点位置 f_c が単色性能評価における遠方視の焦点位置 f_s よりも近方側にシフトする。

[0027] 多焦点回折レンズ100において、多色性能評価における遠方視焦点を近方側に配置することで、可視光域において遠方視焦点が網膜2bよりも眼内レンズである多焦点回折レンズ100寄りに配置され有限位置にある物体にピントを合わせることが可能となり光を効率的に使用することができる。遠方焦点位置の配置については、眼内レンズにおいて球面収差を近方側に残す事象を参考にしている。以下、具体的に説明する。眼内レンズにおいて、球面収差が近方側に残る低補正である場合、網膜上及び網膜より手前側にかけ

て集光される。眼内に収差の範囲が残ることにより、収差を焦点に利用することができる。光を効率的に利用するため、眼内レンズは球面収差を近方側に残す低補正になるように選択されることが多い。これは単色性能における事象であるが、多色性能において考える際にも同様であると考えられる。眼内レンズは、単色よりも多色で現実使用されるものであり、単色性能で基準位置に焦点位置を設定しつつも、単色性能においても多色性能においても遠方視の焦点位置が網膜よりも眼内レンズ寄りに配置されることが望ましい。つまり、本実施形態の多焦点回折レンズ100のように、単色性能の焦点位置に対し、多色性能の焦点位置が近方側にシフトしていることが望ましくなる。

[0028] なお、多色性能においては色収差を考える。屈折光の色収差は、546 nmより短波長側の青色の焦点が近方側に形成され、546 nmより長波長側の赤色の焦点が遠方側に形成されるため、近方側より順に青緑赤の焦点が形成される。また、プラス次数の回折光においては、近方側より順に赤緑青の焦点が形成され、マイナス次数の回折光においては、近方側より順に青緑赤の焦点が形成される。つまり、回折光で生じる色収差について、プラス次数光では、屈折光とは逆の色収差となるが、マイナス次数光では、屈折光と同方向の色収差となる。そして、多焦点回折レンズは、屈折光で生じる色収差を、回折光で生じる色収差が補償することが知られている。そのため、一般的な回折レンズでは、設計波長である546 nm付近の緑色の焦点に対して遠方側に546 nmより短波長側の青色の焦点が形成されることが多い。つまり、一般的な回折レンズは、通常の屈折レンズと逆の色収差となり、近方側より順に赤緑青の焦点が形成される。本実施形態の多焦点回折レンズ100の遠方視焦点においては、回折レンズであっても、緑色の焦点に対して近方側に青色の焦点が形成されるため、近方側より順に青緑赤の焦点が形成される。

[0029] 多焦点回折レンズ100において、単色性能評価の遠方視焦点位置に対して多色性能評価の遠方視焦点位置をシフトさせるには、多色性能における屈

折光と回折光との光強度が波長によって異なることを利用する。単色光源 546 nm の光強度を基準とした場合、屈折光においては、短波長側の光強度は低下し、長波長側の強度は増加するもののその変化量は少ない。それに対し、回折光においては、短波長側の光強度は増加し、長波長側の強度は低下する。具体的には、-1 次の回折光（遠方視の光）については、546 nm より近方に位置する短波長（青）側の光強度が強くなり、多色性能としては近方にシフトする。一方、0 次の屈折光（近方視の光）については、546 nm より遠方に位置する長波長（赤）側の光強度が強くなり、多色性能としては遠方にシフトする。遠方視焦点にマイナス次数光（回折光）を配置し、遠方視焦点より近方側の焦点に 0 次光（屈折光）を配置することで、多色性能においては、単色性能におけるマイナス次数光（回折光）と 0 次光（屈折光）との間に、光強度の増加した波長域が集中することとなるため、多色性能評価における遠方視焦点が、単色性能における遠方視焦点よりも近方側に配置されることとなる。

[0030] 以下、多焦点回折レンズ 100 の光学面について説明する。多焦点回折レンズ 100 において、屈折型レンズ構造は、図 2 A に示す 0 次の仮想的な基準面 1 d で表され、球面又は非球面を有する。なお、基準面 1 d は下記の非球面プロファイル式を用いた。ここで、x 次の非球面係数を 0 と設定してもよい。また、コーニック定数 k と 4 次の非球面係数 A_4 を使用してもよいし、さらに、6 次の非球面係数 A_6 や 8 次の非球面係数 A_8 を使用してもよい。

$$z(r) = \frac{\left(\frac{1}{R}\right)r^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)\left(\frac{1}{R}\right)^2 r^2}} + A_4 r^4 + A_6 r^6 + A_8 r^8 + \dots$$

ここで、

$z(s)$: サグ高さ

r : 光軸からの距離（半径）

R : 曲率半径

k : コーニック定数

A_4 : 4 次の非球面係数

A_6 : 6 次の非球面係数

A_8 : 8 次の非球面係数

[0031] また、回折格子 1 c は、キノフォームプロファイルで設計された形状を有する。つまり、回折格子 1 c は、キノフォームプロファイルに基づく回折パターンを有しており、0 次の仮想的な基準面 1 d に対して、キノフォームの厚さ又は段差と、輪帯の間隔又はピッチとを適宜調整したものである。図示の例では、0 次光及び 1 次光の回折パターンを示しており、キノフォームの各輪帯は基準面 1 d に対してレンズ本体 1 0 0 a 側に凹面を有している。

[0032] 回折格子 1 c に関して回折格子高さ $h(r)$ を算出するにあたり、以下の参考文献に記載のキノフォームプロファイル式に対し、パラメータ（具体的には、 $n_A(\lambda_0)$ 及び M) を変更したものを用いた。キノフォームプロファイル式において、媒体屈折率の補正項や瞳孔拡大率の補正項を付加している。具体的には、数式中の媒体屈折率 n_A は液中配置を目的とした補正項であり、瞳孔拡大率 M は屈折光で得られたパワーに合わせるための補正項である。なお、元式では、空气中配置を想定して空気の媒体屈折率 1.0 を適用していた。なお、式中において、 r は光軸からの距離（半径）であり、 m は回折縞 ($m = 0, 1, 2, \dots$) であり、 n_L は材料屈折率であり、 λ_0 は設計波長であり、 α はキノフォームサグ高さ $s(r)$ を調整する係数であり、 P は付加する回折光パワーである。

参考文献 : Dale A. Buralli, G. Michael Morris, and John R. Rogers., "Optical performance of holographic kinoforms", Applied Optics, vol.28, No.5, 976 (1989)

$$\begin{aligned}
 s(r) &= \frac{m\lambda_0}{n_L(\lambda_0) - n_A(\lambda_0)} + \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (\kappa + 1)c^2r^2}} \\
 c &= \frac{1}{f\{n_A(\lambda_0) - n_L(\lambda_0)\} + m\lambda_0} \\
 \kappa &= -n_L^2(\lambda_0) \\
 m &= \frac{r_m^2}{2\lambda_0 f} \\
 &\rightarrow m = m(r) - \text{MOD}\{m(r), m_{\text{order}}\} \\
 f &= \frac{1000}{M \times P} \\
 &\Rightarrow h(r) = s(r) \times \alpha
 \end{aligned}$$

[0033] 上記式中の係数 α によって回折格子高さを変化させることで、任意の二焦点への光の配分が変わる。つまり、回折格子高さを変更することで、得られる次数が変わる。例えば、 $\alpha = 0$ の場合0次光となり、 $\alpha = 1$ の場合+1次光となり、 $\alpha = 0.5$ の場合0次光及び+1次光となる。また、 $\alpha = -1$ の場合-1次光となり、 $\alpha = -2$ の場合-2次光となり、 $\alpha = -1.5$ の場合-1次光及び-2次光となる。なお、回折縞本数は回折加入パワーによって決定される。また、ここでは、一例として、焦点距離 f を定める際、瞳孔拡大率 $M = 1.13$ を考慮した。設計値において、曲率を変化させ屈折光パワーを付加する方法と回折格子で回折光パワーを付加する方法との2つの方法でシミュレーションした結果、両者の付加したいパワー値が同じであるにもかかわらず得られるパワー値が異なる。回折光のパワー付加量 $\div$ 屈折光のパワー付加量 $\div 1.13$ であるため、両者を揃えるために M の補正項を加えた。実瞳孔面では、回折格子縞ピッチが $M = 1.13$ 倍になることで回折パワーが $1/1.13$ 倍になってしまっていると考え、レンズ面で回折パワーを 1.13 倍しておくことを考えた数式となる。なお、必ずしも $M = 1.13$ を考慮しなくてもよく、 $M = 1$ としてもよい。

[0034] 以上説明した多焦点回折レンズ100では、多色性能評価における遠方視

焦点が、単色性能評価における遠方視焦点よりも近方側に配置される多焦点レンズとすることで、可視光域において遠方視焦点が網膜2bよりも眼内レンズである多焦点回折レンズ100寄りに配置され有限位置にある物体にピントを合わせることが可能となり光を効率的に使用することができる。これにより、ISO 11979-2に準じて波長546nm（単色性能）における眼内レンズの一般的な光学設計を行う際に、白色光源環境（多色性能）における遠視化リスクを回避することができる。

[0035] 〔実施例1〕

＜二焦点回折レンズ+1.5DのMTFシミュレーション（実施例1と比較例1との比較）＞

実施例1では、二焦点回折レンズに関して、0次光が近方視のための焦点を生成し、-1次光が遠方視のための焦点を生成する場合、多色性能評価において、光を効率的に使用できることについて説明する。

[0036] 実施例1において、多焦点回折レンズ100のMTFシミュレーションは以下の通り行った（以降の実施例についても同様）。太陽光を代表とする白色光における光学性能を評価するための多色性能評価として、可視光領域380nm～780nmのうち、430nm、490nm、546nm、590nm、650nmの5波長を用いたシミュレーションを行った。なお、これらの波長選択は白色光を表現するための一例にすぎない。MTF本数は50本/mmで比較した。一方、単色性能評価は、ISO 11979-2:2014、Annex C (MTF)において、波長546±10nmの単色光源を使用して測定することとなっているため、波長546nmでのシミュレーションを行った。

[0037] 実施例1では、遠方+20D、近方+21.5Dの二焦点回折レンズにて比較した。実施例1では、0次光が近方視のための焦点を生成し、-1次光が遠方視のための焦点を生成する。比較例1では、0次光が遠方視のための焦点を生成し、+1次光が近方視のための焦点を生成する。図3Aは、実施例1における-1.5D、0D加入の回折格子形状を説明する図であり、図

3 Bは、実施例1における屈折+2 1. 5 D（近方）、回折-1. 5 D（遠方）の光強度を説明する図であり、図3 Cは、実施例1における屈折+2 1. 5 D、回折-1. 5 DのMTFを説明する図である。図3 Dは、比較例1における0 D、+1. 5 D加入の回折格子形状を説明する図であり、図3 Eは、比較例1における屈折+2 0 D（遠方）、回折+1. 5 D（近方）の光強度を説明する図であり、図3 Fは、比較例1における屈折+2 0 D、回折+1. 5 DのMTFを説明する図である。なお、図3 A及び3 Dにおいて、回折格子深さ（回折格子高さ）のマイナス側が多焦点回折レンズ1 0 0におけるレンズ本体1 0 0 a側を示している（他の実施形態でも同様）。

[0038] 図3 Cに示すように、実施例1のMTF結果では、単色性能の遠方焦点位置に対し、多色性能の遠方焦点位置は近方側にシフトしている。それに対し、図3 Fに示すように、比較例1のMTF結果では、単色性能の遠方焦点位置に対し、多色性能の遠方焦点位置は遠方側にシフトしている。これは、図3 B及び3 Eに示す多色性能における光強度結果より説明できる。波長5 4 6 n mで設計された回折格子を通過した回折光は、設計波長より短波長側の光強度が増加し、設計波長より長波長側の光強度が減少するという特徴を有する。それに対し、屈折光の光強度変化はほぼないといえる。図3 Bに示す実施例1の光強度結果では、遠方焦点位置より近方側に光強度の増加された短波長領域と、近方焦点位置より遠方側に光強度が同等の長波長領域とが、遠方焦点位置と近方焦点位置との間に存在している。それに対し、図3 Eに示す比較例1の光強度結果では、遠方焦点位置より近方側に光強度が同等の短波長領域と、近方焦点位置より遠方側に光強度の減少された長波長領域とが、遠方焦点位置と近方焦点位置との間に存在している。これらの光強度結果の分布より、実施例1では、遠方焦点位置と近方焦点位置との間に、光強度の増加された波長域が集中していることで、MTF結果において、単色性能の遠方焦点位置に対し、多色性能の遠方焦点位置が近方側にシフトしたことが示唆される。

[0039] 実施例1のように、多色性能評価における遠方視焦点が、単色性能評価に

おける遠方視焦点よりも近方側に配置される多焦点レンズとすることで、可視光域において遠方視焦点が網膜よりも眼内レンズ（多焦点回折レンズ）寄りに配置されることとなり光を効率的に使用することができる。

[0040] 〔実施例 2〕

＜屈折率、焦点間パワー変化時のシミュレーション＞

実施例 2 では、波長 546 nm における材料屈折率 n が 1.45 ~ 1.56 の範囲のレンズ材料において、各焦点間パワー設定を 0.75 D 以上とすることが望ましいことについて説明する。

[0041] 図 4 A ~ 4 E に示すように、波長 546 nm における材料屈折率 $n = 1.52$ のレンズ材料において、遠方 +20 D を -1 次光（以下、加入パワーを A と表す）にて生成し、近方 (+20 - A) D を 0 次光にて生成する二焦点回折レンズにおいて、加入パワー A を -0.6 D、-0.75 D、-1.5 D、-2.0 D、及び -3.0 D の 5 通りに変化させた時の単色性能及び多色性能の遠方焦点位置をシミュレーション比較した。その結果、図 4 A に示すように、加入パワー $A = -0.6$ D の時、単色性能の遠方焦点位置に対し、多色性能の遠方焦点位置は遠方側にシフトしたが、図 4 B ~ 4 E に示すように、それ以外の加入パワーでは、単色性能の遠方焦点位置に対し、多色性能の遠方焦点位置は近方側にシフトした。これにより、本実施形態の回折格子形状において、各焦点間のパワー差の設定を 0.75 D 以上とすることで発明の効果が得られることが確認できた。

[0042] 次に、図 5 A 及び 5 B に示すように、波長 546 nm における材料屈折率 $n = 1.52$ のレンズ材料において、遠方 +26 D を -1 次光（加入パワー $A = -0.75$ D）にて生成し、近方 +26.75 D を 0 次光にて生成する二焦点回折レンズと、遠方 +6 D を -1 次光（加入パワー $A = -0.75$ D）にて生成し、近方 +6.75 D を 0 次光にて生成する二焦点回折レンズとにおいてシミュレーションを行った。これにより、いずれの遠方パワーでも、単色性能の遠方焦点位置に対し、多色性能の遠方焦点位置が近方側にシフトすることを確認した。この結果により、遠方パワー設定を変更した場合に

においても、発明の効果が同様に得られることが確認できた。

[0043] また、図5C～5Fに示すように、遠方+20Dを-1次光（加入パワー $A=-0.75D$ ）にて生成し、近方+20.75Dを0次光にて生成する二焦点回折レンズと、遠方+20Dを-1次光（加入パワー $A=-1.5D$ ）にて生成し、近方+21.5Dを0次光にて生成する二焦点回折レンズとにおいて、波長546nmにおける材料屈折率 $n=1.45$ のレンズ材料と、波長546nmにおける材料屈折率 $n=1.56$ のレンズ材料とに関してシミュレーションをそれぞれ行った。これにより、いずれの条件においても単色性能の遠方焦点位置に対し、多色性能の遠方焦点位置が近方側にシフトすることを確認した。この結果により、波長546nmにおける材料屈折率が $1.45 \leq n \leq 1.56$ の範囲のレンズ材料においても、発明の効果が同様に得られることが確認できた。

[0044] 以上の結果より、波長546nmにおける材料屈折率 n が $1.45 \sim 1.56$ の範囲のレンズ材料において、各焦点間パワー設定を0.75D以上とすることが望ましいことが確認できた。

[0045] 〔第2実施形態〕

以下、第2実施形態に係る多焦点回折レンズについて説明する。なお、第2実施形態の多焦点回折レンズは第1実施形態の多焦点回折レンズを変形したものであり、特に説明しない事項は第1実施形態と同様である。

[0046] 本実施形態では、多焦点回折レンズ100において、プラス次数光が0次光より近方側の焦点をさらに生成し、焦点数が3以上となっている。これにより、3段階以上の対象距離に対して結像が可能になる。多焦点回折レンズ100は、二焦点回折レンズで生成される2つの焦点に、さらに1つの焦点を加えた三焦点回折レンズであり、二焦点回折レンズに対する三焦点回折レンズの近方加入パワーは2倍であり、回折縞本数は同じとなっている。つまり、二焦点回折レンズに対して近方に焦点を追加した三焦点回折レンズの近方加入パワーは2倍である。二焦点回折レンズで生成される2つの焦点と、さらに1つの焦点とを加えた三焦点回折レンズは、加入パワーの異なる2種

類のキノフォームプロファイルを合成したものである。

[0047] 多焦点回折レンズ100において、三焦点回折レンズの場合、回折格子は、2種類のキノフォームプロファイルの組み合わせであり、2種類のキノフォームプロファイルの回折格子高さの半分の高さ（例えば、後述する図6Cに示す回折格子深さD）を有し、0次光より遠方側の焦点を生成するマイナス次数光と、0次光より近方側の焦点を生成するプラス次数光に配光され、マイナス次数光とプラス次数光との次数の数値が等しくなっている。これにより、合成後のそれぞれの回折格子高さの変化量は均等となり、マイナス次数光及びプラス次数光への配光比率をほぼ一致させることができる。

[0048] 多焦点回折レンズ100は、三焦点回折レンズの場合、例えば、0次光が中間視のための焦点を生成し、-1次光が遠方視のための焦点を生成し、+1次光が近方視のための焦点を生成する。

[0049] また、多焦点回折レンズ100は、二焦点回折レンズで生成される2つの焦点に、さらに2つの焦点を加えた四焦点回折レンズであり、二焦点回折レンズに対する四焦点回折レンズの近方加入パワーが3倍であり、回折縞本数が同じとしてもよい。つまり、二焦点回折レンズに対して近方に焦点を追加した四焦点回折レンズの近方加入パワーは3倍である。二焦点回折レンズで生成される2つの焦点と、さらに2つの焦点とを加えた四焦点回折レンズは、加入パワーの異なる2種類のキノフォームプロファイルを合成したものである。

[0050] 多焦点回折レンズ100は、四焦点回折レンズの場合、回折格子において、2種類のキノフォームプロファイルの回折格子高さが異なり、0次光より遠方側の焦点を生成するマイナス次数光と、0次光より近方側の焦点を生成するプラス次数光に配光され、マイナス次数光とプラス次数光との次数の数値が異なるものとする。これにより、焦点を生成する回折の次数光が増加し、焦点調整量を大きくすることができる。この場合、両次数の数値は不等となり、例えば-1次、0次、+1次、+2次の四焦点を意味する。

[0051] 〔実施例3〕

＜三焦点回折レンズの加入パワー設定が同じである回折格子形状と、+1.5 D、+3 D加入回折格子形状（従来キノフォーム）との比較＞

実施例3では、三焦点回折レンズにおいて2種類のキノフォームプロファイルを合成する際の加入パワーについて説明する。

[0052] 多焦点回折レンズ100において、加入パワーの異なる2種類のキノフォームプロファイルを合成することで、三焦点回折レンズとなる。図6Cは、実施例3において、max選択した回折格子形状設計について説明する図であり、図6Aに示す+1.5 D加入の回折格子形状と、図6Bに示す-1.5 D加入の回折格子形状とを合成した回折格子形状を示す。図6Fは、実施例3において、min選択した回折格子形状設計について説明する図であり、図6Dに示す+1.5 D加入の回折格子形状と、図6Eに示す-1.5 D加入の回折格子形状とを合成した回折格子形状を示す。なお、回折格子形状設計のmax選択では、深い方を選択し、min選択では、浅い方を選択している。図6Iは、比較例2における一般的な回折格子形状設計について説明する図であり、図6Gに示す+1.5 D加入の回折格子形状と、図6Hに示す+3.0 D加入の回折格子形状とを合成した回折格子形状を示す。

[0053] 図6C、6F、及び6Iに示すように、三焦点回折レンズの加入パワー設定が同じ場合、本実施形態の回折縞本数は少なくなり、加工しやすい回折格子形状になっているといえる。また、三焦点回折レンズの回折格子高さ（回折格子深さD）は、2種類のキノフォームプロファイルの回折格子高さの半分の高さとなっており、この時、0次光より遠方側の焦点となるマイナス次数光と0次光より近方側の焦点となるプラス次数光とを生成することができ、両者の次数の値は等しくなる。例えば、 $\alpha = 1.0$ の時、-1次、0次、+1次の三焦点回折レンズとなる。また、 $\alpha = 2.0$ の時、0次光よりも回折光が相対的に強くなり、-2次、-1次、+1次、+2次の四焦点となる。なお、ここでの回折格子高さについては、三焦点への光の配分を調整した結果、本実施例の回折格子形状においては $\alpha = 1.3$ とし、一般的な回折格子形状においては $\alpha = 0.6$ としたが、これは一例である。

[0054] また、実施例3の変形例として、加入パワーの異なる2種類のキノフォームプロファイルの回折格子高さが不一致になるようにしてもよい。具体的には、係数 α を異なる値に設定することで、四焦点レンズとなる。図6Lは、実施例3の変形例において、min選択した回折格子形状設計について説明する図であり、図6Jに示す+1.0D及び+2.0D加入の回折格子形状と、図6Kに示す-1.0D加入の回折格子形状とを合成した回折格子形状を示す。係数 α の設定を限定するものではないが、好適には、一方のキノフォームプロファイルが $\times \alpha$ であるとき、もう一方のキノフォームプロファイルを $2 \times \alpha$ とすることが望ましい。この時、0次光より遠方側の焦点となるマイナス次数光と0次光より近方側の焦点となるプラス次数光とを生成することができ、両者の次数の値は不等となる。例えば、加入パワー-1.0D、+1.0Dとしたキノフォームプロファイルをそれぞれ $\alpha = 1.0$ 及び $\alpha = 2.0$ とする時、-1次、0次、+1次、+2次の四焦点レンズとなる。+1.0D側を $\alpha = 2.0$ とすることで、プラス次数側で回折光が相対的に強くなり、+1次光に加えて+2次光まで効率的に取り出せる。ここで、一般的な回折格子形状においては、焦点数の増加に伴い回折縞の本数が追加されることとなるが、本実施形態の回折格子形状においては回折縞の本数を追加することなく、焦点数を増加できることが特徴である。なお、2つのキノフォームプロファイルにおいて、 $\alpha = 1.0$ 及び $\alpha = 2.0$ としたが、これは一例であり、係数 α の設定により各焦点の光強度比を調整することができる。

[0055] 以下、係数 α の設定例について説明する。実施例3の変形例である図6Lにおいて、加入パワー-1.0D、+1.0Dとしたキノフォームプロファイルをそれぞれ $\alpha = 1.0$ 及び $\alpha = 2.0$ とした四焦点レンズに対して、 $\alpha = 1.3$ 及び $\alpha = 2.0$ に変更した場合の四焦点レンズについて説明する。

[0056] 図12Aは図6Lに示す実施例3の変形例において、キノフォームプロファイルの係数 α の値が異なる上記四焦点レンズの光強度を説明する図であり、図12Bは係数 α の値が異なる上記四焦点レンズのMTFを説明する図で

ある。

[0057] 図 1 2 A に示すように、各焦点位置における光強度ピークを比較すると、中間視焦点（0 次光）の光強度ピークが減少または消失した分、近方視焦点（+ 2 次光）の光強度ピークが増加しており、係数 α の設定を変更することで、各焦点位置への配光比率を調整できることが確認できる。また、図 1 2 B に示すように、MTF 結果も光強度と同様の結果を示している。なお、ここでは加入パワー + 1. 0 D としたキノフォームプロファイルの係数 α の設定を変更したが、加入パワー - 1. 0 D としたキノフォームプロファイルの係数 α の設定を変更してもよいし、両者ともに変更してもよく、加入パワーを変更してもよい。

[0058] 〔第 3 実施形態〕

以下、第 3 実施形態に係る多焦点回折レンズについて説明する。なお、第 3 実施形態の多焦点回折レンズは第 1 及び第 2 実施形態の多焦点回折レンズを变形したものであり、特に説明しない事項は第 1 実施形態等と同様である。

[0059] 本実施形態において、多焦点回折レンズ 1 0 0 の回折格子における山谷部 3 0 0 が平坦領域 3 c を有するものとなっている（後述する図 7 A 及び 7 B 参照）。これにより、山谷部 3 0 0 を平坦化しない場合に意図しない高次数光の焦点位置に配光される可能性のある光を、低次数光の焦点位置に配光させることができる。なお、平坦領域 3 c を有するとは、山高さ及び谷深さの制限を意味し、直線形状だけでなく、傾斜形状や円弧形状等も含む。

[0060] 〔実施例 4〕

<三焦点回折レンズにおける山谷部の平坦化>

実施例 4 では、多焦点回折レンズ 1 0 0 の回折格子形状の山谷部 3 0 0 に平坦領域 3 c を設けた三焦点回折レンズについて説明する。

[0061] 図 7 A に示す - 1. 5 D、0 D、+ 1. 5 D 加入した図 6 C の三焦点回折レンズの高さ 1. 9 7 μm の回折格子形状における山谷部 3 0 0（山部 3 a と谷部 3 b とを総称したもの）に対して、図 7 B に示す山部 3 a 及び谷部 3

bについて、回折格子形状の高さの20%となる $0.4\ \mu\text{m}$ を制限値としてそれぞれ平坦化したときを比較する。図7Bに示すように、実施例4の回折格子形状は、山谷部300が平坦領域3cを有している。図7Cは、図7Aに示す平坦化前の回折レンズ及び図7Bに示す平坦化後の回折レンズの光強度を説明する図であり、図7Dは、図7Aに示す平坦化前の回折レンズ及び図7Bに示す平坦化後の回折レンズのMTFを説明する図である。

[0062] 図7Cに示すように、各焦点位置における光強度ピークを比較すると、±2次光の光強度ピークが減少した分、中間視焦点（0次光）の光強度ピークが大きく増加し、任意の焦点範囲内への総集光量も $1.96 \times 10^6\ (\text{V}/\text{m})^2$ から $2.32 \times 10^6\ (\text{V}/\text{m})^2$ と高くなり、1.18倍になったことが確認できる。また、図7Dに示すように、MTF結果も光強度と同様の結果を示している。なお、ここでは全ての山谷部300を平坦化したが、一部の山谷部300を平坦化してもよいし、上述の20%平坦化の比率を調整してもよい。

[0063] なお、比較例3の0D、+1.5D、+3D加入した図6Iに示す一般的な三焦点回折レンズについては、+1.5D加入と回折縞ピッチとが同じとなる-1.5D加入の回折格子形状の一部を合成することが可能である。図8Aは、一部合成前の回折格子形状を説明する図であり、図8Bは、一部合成後の回折格子形状を説明する図である。図8Cは、図8Aに示す一部合成前の回折レンズ及び図8Bに示す一部合成後の回折レンズの光強度を説明する図であり、図8Dは、図8Aに示す一部合成前の回折レンズ及び図8Bに示す一部合成後の回折レンズのMTFを説明する図である。図8Cに示すように、比較例3の場合、近方視焦点（+2次光）の光強度ピークが低下した分、中間視焦点（+1次光）と遠方視焦点（0次光）との光強度ピークが増加し、任意の焦点範囲内への総集光量も $2.10 \times 10^6\ (\text{V}/\text{m})^2$ から $2.24 \times 10^6\ (\text{V}/\text{m})^2$ と高くなり、1.06倍になったことが確認できる。また、図8Dに示すように、MTF結果も光強度と同様の結果を示している。このことより、実施例4は比較例3よりも任意の焦点範囲内への総集

光量の増大量が大きく、意図しない高次数光の焦点位置に配光される可能性のある光を、低次数光の焦点位置に配光させることができる効果大きい。

[0064] 〔実施例 5〕

＜平坦化と従来キノフォームとの加工 R に関する対比＞

実施例 5 では、多焦点回折レンズ 100 の回折格子形状における切削加工時の加工 R について説明する。

[0065] 図 7 B に示す実施例 4 の回折格子形状の型を切削加工する際、谷部 3 b (図 7 A 参照) には加工 R が付与されるため、回折格子形状の崩れが生じ、光学性能がシミュレーション結果の通りにならないことがある。実施例 5 では、+3 D 加入の三焦点レンズに対して、バイト先端 R 0.3 mm で加工した場合のシミュレーション結果の変化を示す。図 9 A は、実施例 5 の回折格子形状 (図 7 B と同様のもの) を説明する図であり、図 9 B は、実施例 5 の瞳孔径 ϕ 3 mm 時のレンズの光強度を説明する図であり、図 9 C は、実施例 5 の瞳孔径 ϕ 3 mm 時のレンズの MTF を説明する図である。また、図 10 A は、実施例 5 の瞳孔径 ϕ 5 mm 時のレンズの光強度を説明する図であり、図 10 B は、実施例 5 の瞳孔径 ϕ 5 mm 時のレンズの MTF を説明する図である。図 9 D は、比較例 4 の回折格子形状 (図 8 B と同様のもの) を説明する図であり、図 9 E は、比較例 4 の瞳孔径 ϕ 3 mm 時のレンズの光強度を説明する図であり、図 9 F は、比較例 4 の瞳孔径 ϕ 3 mm 時のレンズの MTF を説明する図である。また、図 10 C は、比較例 4 の瞳孔径 ϕ 5 mm 時のレンズの光強度を説明する図であり、図 10 D は、比較例 4 の瞳孔径 ϕ 5 mm 時のレンズの MTF を説明する図である。

[0066] 図 9 A に示すように、本実施形態の回折格子形状では、設計値と加工値とがほぼ一致するのに対し、図 9 D に示すように、一般的な回折格子形状では、設計値と加工値とのずれが生じており、特に外周側にいくほどそのずれ量は大きくなっていることが確認できる。なお、一般的な回折格子形状において、加工値は設計値より回折格子高さが小さくなるような変化を示しており、これは遠方視焦点 (0 次光) への光の配分が増加し、近方視焦点 (+2 次

光)への光の配分が減少することに結びつく。このことは、図9E、9F、10C、及び10Dに示す光強度及びMTFのシミュレーション結果においても確認され、特に瞳孔径が大きくなるほどその影響が顕著で、瞳孔径 ϕ 5mmにおける近方視焦点については消失してしまっていることが確認できる。実施例5ではバイト先端R0.3mmでの結果を示したが、バイト先端Rを小さくすることで、この傾向は小さくなる。しかし、その場合、バイトの欠損が生じやすく、バイトの耐久性が悪いものと示唆される。これにより、本実施形態の回折格子形状は切削加工しやすい形状であるといえる。また、先鋭部は切削抵抗に弱く形状崩れが生じやすいが、全ての山谷部を平坦化することによって改善され、切削加工時の形状崩れを低減させることも示唆される。

[0067] [その他]

[実施例6]

＜本実施形態の試作品及び既存レンズのMTF測定結果＞

実施例6では、図9Aに示す回折格子形状を有する多焦点回折レンズと既存レンズとを比較して、多色性能評価における遠方視焦点の近方シフトの有効性について検証した。

[0068] 実施例6のレンズのMTF測定結果（単色性能、多色性能）は以下の通り行った。白色光評価としての光源にはハロゲンランプを使用した。単色光評価は、干渉フィルタを用いてハロゲンランプ光源の546nmを取り出して使用した。

[0069] 図11A～11Cは、本実施形態の遠方視焦点がマイナス次数光からなる試作品、遠方視焦点が0次光からなる既存レンズA、及び遠方視焦点がプラス次数光からなる既存レンズBをMTF測定した結果をそれぞれ示す。具体的には、図11Aは、本試作品のスルーフォーカスMTF測定結果（遠方視焦点＝－1次光、中間視焦点＝0次光）を説明する図であり、図11Bは、既存レンズAのスルーフォーカスMTF測定結果（遠方視焦点＝0次光、中間視焦点＝＋1次光）であり、図11Cは、既存レンズBのスルーフォーカ

スMTF測定結果（遠方視焦点＝＋１次光、中間視焦点＝＋２次光）である。図１１Ａに示すように、遠方視焦点がマイナス次数光、中間視焦点が０次光である本試作品は、単色性能評価における遠方視焦点に対し、多色性能評価における遠方視焦点は近方側に配置されている。それに対し、図１１Ｂ及び１１Ｃに示すように、遠方視焦点が０次光であり、中間視焦点がプラス次数光である既存レンズＡと、遠方視焦点、及び中間視焦点ともにプラス次数光である既存レンズＢとは、単色性能評価における遠方視焦点に対し、多色性能評価における遠方視焦点は遠方側に配置されており、シミュレーション結果と現物確認結果とで同様の傾向が得られた。これにより、本実施形態の試作品は、白色光において光を効率的に使用できることが示唆される。

[0070] 〔第４実施形態〕

以下、第４実施形態に係る多焦点回折レンズについて説明する。なお、第４実施形態の多焦点回折レンズは第１～第３実施形態の多焦点回折レンズを変形したものであり、特に説明しない事項は第１実施形態等と同様である。

[0071] 図１３Ａは、第４実施形態の多焦点回折レンズ１００の底面図であり、図１３Ｂは、多焦点回折レンズ１００の弱主経線Ｌ１に平行である概念的な側面図であり、図１３Ｃは、多焦点回折レンズ１００の強主経線Ｌ２に平行である概念的な側面図である。なお、図１３Ｂ及び１３Ｃでは、説明をわかりやすくするため、図１３Ａの多焦点回折レンズ１００から支持部１００ｂを除いた概念的な図を示している。

[0072] 図１３Ａ～１３Ｃに示すように、本実施形態の多焦点回折レンズ１００において、一方の光学面である第１光学面１ａが回折格子を有し、他方の光学面である第２光学面１ｂがトーリック形状（トーリック面）を有する。第１光学面１ａについては、第１実施形態と同様であるため、説明を省略する。

[0073] 多焦点回折レンズ１００は、第２光学面１ｂが有する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弱主経線Ｌ１及び強主経線Ｌ２の径線方向においてレンズの屈折力に差が生じ、この差を利用することで乱視を矯正することができる。トーリック面において、屈折力が大きい方向の径線が

強主径線L 2であり、屈折力の小さい方向の径線が弱主径線L 1である。

[0074] 多焦点回折レンズ100の第2光学面1b上の任意の経線方向（角度 θ ）における断面形状は、下式を含む式で表現される。

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (\kappa + 1)c^2r^2}} + A(\theta)r^2 + B(\theta)r^4$$

ここで、 c は第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多焦点回折レンズ100の近軸曲率であり、 r は多焦点回折レンズ100の光軸OAからの距離であり、 κ はトーリック面を付加する前の多焦点回折レンズ100における光軸OAに回転対称な面のコーニック定数であり、符号 c 、 r 、 κ は第2光学面1b上の経線方向について共通である。また、 $A(\theta)$ 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り、下式で与えられる。

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

[0075] 図13Aに示すように、多焦点回折レンズ100のレンズ本体100aには、乱視軸を示すマークであるトーリックマークMAが形成されている。具体的には、一対のトーリックマークMAが、レンズ本体100aのトーリック面（第2光学面1b）の外縁付近に、レンズ本体100aの光軸OAを挟んで互いに対向するように設けられている。一対のトーリックマークMAを結ぶ仮想の線が、レンズ本体100aの第1の軸（例えば、弱主径線L 1）を表し、レンズ本体100aの光軸OAを通り、第1の軸に直交する線が、第2の軸（例えば、強主径線L 2）を表す。トーリックマークMAを利用することにより、患者の眼球内に多焦点回折レンズ100を挿入した後、患者の角膜の乱視軸（角膜強主径線軸）と多焦点回折レンズ100のトーリック軸（レンズ弱主径線軸）とが一致するように多焦点回折レンズ100の位置を調整することができる。

[0076] 図14Aに拡大して示すように、第2光学面1bの上面視において、トーリックマークMAは、角に丸みを有する矩形形状を有する。トーリックマークMAの外形に関して、レンズ本体100aの半径方向の長さ l_1 とレンズ本体100aの円周方向の長さ l_2 とが異なっている。具体的には、トーリックマークMAは、レンズ本体100aの半径方向に長辺を有し、円周方向に短辺を有する。トーリックマークMAは、その縁部4aにおいて、長辺として、弱主径線L1に平行な一对の直線部AL1と、短辺として、一对の直線部AL1を放物線で繋ぐ曲線部AL2とで構成される。トーリックマークMAの外形を上記形状とすることにより、多焦点回折レンズ100の挿入後の乱視軸の位置合わせにおいて、トーリックマークMAの一端しか視認できない場合でも、縁部4aの形状に基づいて乱視軸の方向を決定することができる。図14Bに示すように、トーリックマークMAは、光軸OA方向の断面において凹部1eを有し、凹部1eは、底面4bと、縁部4aから底面4bに繋がる傾斜面4cとを有する。なお、トーリックマークMAの外形は、楕円、長円、長方形等の長辺及び短辺を有する多角形でもよい。また、縁部4aは、面取りされていてもよいし、底面4bや傾斜面4cは曲面を有していてもよい。

[0077] 図13A～13Cに示すように、多焦点回折レンズ100は、レンズ本体100aの端部100cに端部厚が略一定となる平坦化部100dが形成されている。平坦化部100dは、レンズ中心（光軸OA）からみて強主径線L2と重なる端部100cを含むように形成されている。具体的には、強主径線L2は、図13Aに示すX軸と重なっている。本実施形態では、一对の平坦化部100dが、レンズ本体100aのトーリック面（第2光学面1b）の端部100cに、レンズ本体100aの光軸OAを挟んで互いに対向するように設けられている。また、平坦化部100dの形状は、X軸、すなわち強主径線L2に対して略線対称になるように設けられている。なお、平坦化部100dの部分を緩い傾斜面や曲面等で形成してもよい。この場合、レンズ本体100aの端部100cにおいて、平坦化部100dに対応する強

主経線 L_2 付近の曲率は、弱主経線 L_1 付近の曲率より小さくなっている。

[0078] 平坦化部100dにおいて、レンズ中心からの半径 r の位置における端部厚を $e(r)$ とする。端部厚 $e(r)$ を適切に定めることにより、第2光学面1bの上面視において、レンズ中心からみた平坦化部100dが形成されている角度 ϕ の範囲と、平坦化部100dのレンズ本体100aの径方向における幅 l とが定まる。第2光学面1bのトーリック面は既述の式のように定義されているため、端部厚 $e(r)$ が定まると、第2光学面1bのトーリック面と平坦化部100dの平面との交線が定まる。

[0079] 平坦化部100dにおける端部厚 $e(r)$ は、レンズ本体100aの弱主径線 L_1 側の端部厚より薄く、かつ平坦化部100dをレンズ本体100aのトーリック面として形成した場合の端部厚よりも厚くなるように設定される。これにより、レンズ本体100aの弱主径線 L_1 側の端部厚、すなわち Y 軸と重なる部分の端部厚は、従来のレンズ本体と同様にすることができる。従来は強主径線 L_2 方向の端部厚が薄くなるが、本実施形態のように強主径線 L_2 方向の端部厚を所定の厚さに確保することにより、後発白内障防止効果を維持できる端部厚を維持しつつ、レンズ本体100aの中心厚が不必要に厚くならないようにすることができる。また、強主径線 L_2 方向の端部厚が所定の厚さに確保されているため、平坦化部100dに支持部100bを設けても、支持部100bによってレンズ本体100aが水晶体の後囊に押し付けられる力を安定して得ることができる。

[0080] 図13Dは、レンズ本体100aのレンズ中心からみた端部厚 $e(r)$ の角度方向における変化の一例を示す図である。図13Dにおいて、横軸は角度 ϕ （単位： $^{\circ}$ ）であり、縦軸は第2光学面1bにおけるサグ量 Z （単位： mm ）である。角度 ϕ が 0° 及び 180° の方向がレンズ本体100aの弱主径線 L_1 方向であり、角度 ϕ が 90° の方向がレンズ本体100aの強主径線 L_2 方向である。なお、角度 ϕ が $180^{\circ} \sim 360^{\circ}$ の範囲における端部厚 $e(r)$ の変化は、角度 ϕ が $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ の範囲における端部厚 $e(r)$ の変化と同じである。

- [0081] 図13Dに示す例では、レンズ本体100aの端部厚 $e(r)$ は、強主径線L2方向（角度 $\phi = 90^\circ$ ）を挟んで $70^\circ \sim 110^\circ$ の範囲において略一定となっている。つまり、上記角度範囲において、平坦化部100dが形成されている。
- [0082] なお、本実施形態において、図13Aに示す例では、支持部100bが弱主経線L1を挟んで対向するように、かつ平坦化部100dと接続するように設けたが、支持部100bの配置は適宜変更することができる。
- [0083] 以上、実施形態に即して本発明を説明したが、本発明は、上記実施形態等に限定されるものではない。例えば、多焦点回折レンズ100の回折格子形状は、上記実施形態の条件を満たす範囲で適宜変更することができる。
- [0084] また、上記実施形態において、マイナス次数光が遠方視のための焦点を生成し、0次光が遠方視より近方側の焦点を生成し、単色性能評価における遠方視のための焦点位置に対し、多色性能評価における遠方視のための焦点位置が近方側に配置される構成であれば、近方視、中間視、又は遠方視のための焦点を生成する回折の次数光は適宜変更することができる。
- [0085] また、上記実施形態の多焦点回折レンズ100は、様々な眼用レンズに適用することができる。
- [0086] また、上記実施形態において、多焦点回折レンズ100の一对の光学面のうち、一方の第1光学面1aが回折格子を有し、他方の第2光学面1bが球面、非球面、トーリック面等を有する構成としたが、第1光学面1aが球面、非球面、トーリック面等を有し、第2光学面1bが回折格子を有する構成としてもよい。

請求の範囲

- [請求項1] 回折格子を有し、
マイナス次数光が遠方視のための焦点を生成し、0次光が前記遠方視より近方側の焦点を生成し、
焦点数が2以上であり、
単色性能評価における前記遠方視のための焦点位置に対し、多色性能評価における前記遠方視のための焦点位置が近方側に配置される、
多焦点回折レンズ。
- [請求項2] プラス次数光が前記0次光より近方側の焦点をさらに生成し、
焦点数が3以上である、請求項1に記載の多焦点回折レンズ。
- [請求項3] 前記回折格子は、キノフォームプロファイルを組み合わせた形状を有する、請求項2に記載の多焦点回折レンズ。
- [請求項4] 前記キノフォームプロファイルに媒体屈折率の補正項を付加する、
請求項3に記載の多焦点回折レンズ。
- [請求項5] 前記キノフォームプロファイルに瞳孔拡大率の補正項を付加する、
請求項3及び4のいずれか一項に記載の多焦点回折レンズ。
- [請求項6] 二焦点回折レンズで生成される2つの焦点に、さらに1つの焦点を加えた三焦点回折レンズであり、
前記二焦点回折レンズに対する前記三焦点回折レンズの近方加入パワーは2倍であり、回折縞本数は同じである、請求項2～5のいずれか一項に記載の多焦点回折レンズ。
- [請求項7] 二焦点回折レンズで生成される2つの焦点に、さらに2つの焦点を加えた四焦点回折レンズであり、
前記二焦点回折レンズに対する前記四焦点回折レンズの近方加入パワーは3倍であり、回折縞本数は同じである、請求項2～5のいずれか一項に記載の多焦点回折レンズ。
- [請求項8] 前記回折格子は、2種類のキノフォームプロファイルを組み合わせた形状を有し、

2種類の前記キノフォームプロファイルの回折格子高さの半分の高さを有し、

前記0次光より遠方側の焦点を生成する前記マイナス次数光と、前記0次光より近方側の焦点を生成する前記プラス次数光とに配光され、前記マイナス次数光と前記プラス次数光との次数の数值が等しい、請求項3～6のいずれか一項に記載の多焦点回折レンズ。

[請求項9] 前記回折格子は、2種類のキノフォームプロファイルを組み合わせた形状を有し、

2種類の前記キノフォームプロファイルの回折格子高さが異なり、前記0次光より遠方側の焦点を生成する前記マイナス次数光と、前記0次光より近方側の焦点を生成する前記プラス次数光とに配光され、前記マイナス次数光と前記プラス次数光との次数の数值が異なる、請求項3～5、及び7のいずれか一項に記載の多焦点回折レンズ。

[請求項10] 前記回折格子における山谷部が平坦領域を有する、請求項3～9のいずれか一項に記載の多焦点回折レンズ。

[請求項11] 正常分散の光学材料で形成され、波長546nmにおける材料屈折率が1.45以上1.56以下であり、各焦点間のパワー設定が0.75D以上である、請求項1～10のいずれか一項に記載の多焦点回折レンズ。

[請求項12] 一对の光学面を有し、一方の光学面が回折格子を有し、他方の光学面がトーリック形状を有する、請求項1～11のいずれか一項に記載の多焦点回折レンズ。