

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5553566号
(P5553566)

(45) 発行日 平成26年7月16日 (2014. 7. 16)

(24) 登録日 平成26年6月6日 (2014. 6. 6)

(51) Int. Cl.

F 1

G O 2 B 13/00 (2006. 01)
 G O 2 B 3/00 (2006. 01)
 G O 2 B 13/04 (2006. 01)
 G O 2 B 13/02 (2006. 01)
 G O 2 B 15/20 (2006. 01)

G O 2 B 13/00
 G O 2 B 3/00
 G O 2 B 13/04
 G O 2 B 13/02
 G O 2 B 15/20

B

請求項の数 7 (全 43 頁)

(21) 出願番号 特願2009-221630 (P2009-221630)
 (22) 出願日 平成21年9月25日 (2009. 9. 25)
 (65) 公開番号 特開2011-70032 (P2011-70032A)
 (43) 公開日 平成23年4月7日 (2011. 4. 7)
 審査請求日 平成24年9月12日 (2012. 9. 12)

(73) 特許権者 000001007
 キヤノン株式会社
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号
 (74) 代理人 100110412
 弁理士 藤元 亮輔
 (74) 代理人 100104628
 弁理士 水本 敦也
 (72) 発明者 石橋 友彦
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ
 ヤノン株式会社内

審査官 小倉 宏之

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光学素子、光学系、および光学機器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

媒質が屈折率分布を有する光学素子であって、以下の条件を満足することを特徴とする光学素子。

$$\begin{aligned}
 & \left| \frac{g F(p_{\max}) - g F(p_{\min})}{d g_i(p)} \right| \leq 0.02 \\
 & \left| \frac{g F g_i(p_1)}{g d g_i(p_1)} \right| \leq 0.0272 \\
 & \left| \frac{g F g_i(p_{\max g_i}) - g F g_i(p_{\min g_i})}{g d g_i(p_1)} \right| \leq 0.1
 \end{aligned}$$

但し、

$g F(p_{\max})$ および $g F(p_{\min})$ はそれぞれ、前記媒質中の位置 p_{\max} および p_{\min} における g 線と F 線とに関する部分分散比であり、前記位置 p_{\max} および p_{\min} はそれぞれ、前記媒質中において g 線と F 線とに関する部分分散比が最大値および最小値となる位置であり、

p_0 を前記媒質中において基準屈折率を有する位置とし、 p_1 を前記媒質中における前記位置 p_0 とは異なる位置とし、 $n F(p_1)$ 、 $n d(p_1)$ 、 $n C(p_1)$ をそれぞれ前記媒質の前記位置 p_1 での F 線、 d 線および C 線に関する屈折率とし、 $n F(p_0)$ 、 $n d(p_0)$ 、 $n C(p_0)$ をそれぞれ前記媒質の前記位置 p_0 での F 線、 d 線および C 線に関する屈折率とし、 $n g(p_1)$ 、 $n F(p_1)$ 、 $n d(p_1)$ 、 $n C(p_1)$ をそれぞれ前記位置 p_1 での g 線、 d 線、 F 線および C 線に関する屈折率差とし、

10

20

$dgi(p1)$ を前記媒質の前記位置 $p1$ での d 線と g 線との等価アッペ数とし、
 $gFgi(p1)$ を前記媒質の前記位置 $p1$ における g 線と F 線とに関する等価部分分散比とし、
 $gdgi(p1)$ を前記媒質の前記位置 $p1$ における g 線と d 線とに関する等価部分分散比とすると、

$$\begin{aligned} ng(p1) &= ng(p1) - ng(p0) \\ nd(p1) &= nd(p1) - nd(p0) \\ nF(p1) &= nF(p1) - nF(p0) \\ nC(p1) &= nC(p1) - nC(p0) \\ dgi(p1) &= \frac{nd(p1)}{\{nF(p1) - nC(p1)\}} \\ gFgi(p1) &= \frac{\{ng(p1) - nF(p1)\}}{\{nF(p1) - nC(p1)\}} \\ gdgi(p1) &= \frac{\{ng(p1) - nd(p1)\}}{\{nF(p1) - nC(p1)\}} \end{aligned} \quad 10$$

であり、

$gFgi(p1)$ および $gdgi(p1)$ をそれぞれ、前記等価部分分散比の異常分散性とし、

$$\begin{aligned} gFgi0(p1) &= -1.665 \times 10^{-7} dgi(p1)^3 + 5.213 \times 10^{-5} dgi(p1)^2 - 5.656 \times 10^{-3} dgi(p1) + 0.7278 \\ gdgi0(p1) &= -1.687 \times 10^{-7} dgi(p1)^3 + 5.702 \times 10^{-5} dgi(p1)^2 - 6.603 \times 10^{-3} dgi(p1) + 1.462 \end{aligned} \quad 20$$

とすると、

$$\begin{aligned} gFgi(p1) &= gFgi(p1) - gFgi0(p1) \\ gdgi(p1) &= gdgi(p1) - gdgi0(p1) \end{aligned}$$

であり、

$gFgi(pmaxgi)$ および $gFgi(pmingi)$ はそれぞれ、前記媒質の位置 $pmaxgi$ および $pmingi$ における前記等価部分分散比であり、前記位置 $pmaxgi$ および $pmingi$ はそれぞれ、前記媒質中における前記位置 $p0$ とは異なる位置であって、 g 線と F 線とに関する前記等価部分分散比が最大値となる位置である。

【請求項 2】

前記媒質は固体材料と光学材料とを混合して得られる混合体であり、該固体材料と該光学材料との組成比率は空間的に分布しており、かつ以下の条件を満足することを特徴とする請求項 1 に記載の光学素子。

$$\left| \frac{gFs - gFm}{gFs} \right| \leq 0.027$$

但し、 gFs および gFm はそれぞれ、前記固体材料および前記光学材料の g 線と F 線とに関する異常分散性である。

【請求項 3】

請求項 1 または 2 に記載の光学素子を含むことを特徴とする光学系。

【請求項 4】

前記条件である $\left| \frac{gF(pmax) - gF(pmin)}{gF(pmax)} \right| \leq 0.02$ として、以下の条件を満足することを特徴とする請求項 3 に記載の光学系。

$$\left| \frac{gFR(rea) - gFR(0)}{gFR(rea)} \right| \leq 0.02$$

但し、 rea は前記光学素子の光線有効半径であり、 $gFR(rea)$ および $gFR(0)$ はそれぞれ、前記媒質中における前記光学系の光軸に垂直な方向での前記光軸からの距離が rea および 0 となる位置での g 線と F 線とに関する部分分散比である。

【請求項 5】

前記条件である $\left| \frac{gF(pmax) - gF(pmin)}{gF(pmax)} \right| \leq 0.02$ として、以下の条件を満足することを特徴とする請求項 3 に記載の光学系。

$$\left| \frac{gFA(tobj) - gFA(timg)}{gFA(tobj)} \right| \leq 0.02$$

但し、 $tobj$ および $timg$ はそれぞれ、前記光学素子における光軸方向での最も光入射側の点および最も光射出側の点であり、 $gFA(tobj)$ および $gFA(timg)$

10

20

30

40

50

g) はそれぞれ、前記媒質中における前記点 t o b j および t i m g での g 線と F 線とに関する部分分散比である。

【請求項 6】

前記光学素子を含むレンズユニットを有し、該レンズユニットの屈折力を G、前記媒質の屈折力を g i、とすると、以下の条件を満足することを特徴とする請求項 3 乃至 5 のいずれか 1 項に記載の光学系。

$$\frac{G \times g i \times g F g i (p 1)}{> 0}$$

【請求項 7】

請求項 3 乃至 6 のいずれか 1 項に記載の光学系を有することを特徴とする光学機器。

【発明の詳細な説明】

10

【技術分野】

【0001】

本発明は、媒質が屈折率分布を有する光学素子に関する。

【背景技術】

【0002】

デジタルカメラやビデオカメラ等の光学機器に用いられる光学系には高性能であり、かつ小型軽量であることが求められている。一般に、光学系は小型化を図るほど諸収差、特に軸上色収差や倍率色収差に代表される色収差が多く発生し、光学性能が低下する。

【0003】

既存のガラス等の光学材料のみを用いた光学系では、高性能化と小型軽量化を同時に満足することは難しい。このため、光学系の一部に、媒質が屈折率分布を有する光学素子を用いることで諸収差を補正（低減）する方法が知られている。

20

【0004】

このような屈折率分布を有する光学素子は、その媒質の屈折率が均質な光学素子と比較して収差補正の自由度が大きい。色収差補正のために屈折率分布を有する光学素子を含む光学系が特許文献 1 および特許文献 2 に開示されている。

【0005】

また、光軸に直交する方向に屈折率分布を有するレンズにおいて、分散を考慮して 2 次スペクトルを補正した光学系が特許文献 3 に開示されている。

【先行技術文献】

30

【特許文献】

【0006】

【特許文献 1】特開 2004 - 212644 号公報

【特許文献 2】特開 2004 - 240464 号公報

【特許文献 3】特許第 3573575 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかしながら、特許文献 1 ~ 3 にて開示された光学系では、材料自体の可視光中の短波長領域での特性は考慮されているが、屈折率分布による屈折作用の波長分散特性が十分に考慮されていない。屈折率分布を有する光学素子を、屈折率分布を持たない屈折光学素子と等価なものとして扱い、焦点距離、アッペ数および部分分散比の値を等価的に定義する。この場合の屈折率分布による屈折作用の波長分散は、それら等価的に定義されたアッペ数（本明細書では等価アッペ数という）および部分分散比（本明細書では等価部分分散比という）等によって表すことができる。

40

【0008】

特に、F 線（486.1nm）、d 線（587.6nm）および C 線（656.3nm）に g 線（435.8nm）を含めた 4 波長の光線に対する屈折率分布による屈折作用の分散特性を考慮すれば、2 次スペクトルを良好に補正することが可能である。

【0009】

50

また、特許文献 1 ~ 3 には、屈折率分布を有する光学素子を作成するための材料の特性等についての記載が十分ではなく、目標とする屈折率分布を実現するための方法が明確ではない。

【 0 0 1 0 】

本発明は、諸収差を良好に補正できる屈折率分布を有する光学素子およびこれを用いた光学機器を提供する。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 1 】

本発明の一側面としての光学素子は、媒質が屈折率分布を有する。該光学素子は、以下の条件を満足することを特徴とする。

【 0 0 1 2 】

$$\left| \frac{g F(p_{\max}) - g F(p_{\min})}{d g i(p)} \right| \leq 0.02$$

$$\left| \frac{g F g i(p_1)}{g d g i(p_1)} \right| \leq 0.0272$$

$$\left| \frac{g d g i(p_1)}{g F g i(p_{\max} g i) - g F g i(p_{\min} g i)} \right| \leq 0.1$$

但し、 $g F(p_{\max})$ および $g F(p_{\min})$ はそれぞれ、媒質中の位置 p_{\max} および p_{\min} における g 線と F 線とに関する部分分散比であり、位置 p_{\max} および p_{\min} はそれぞれ、媒質中において g 線と F 線とに関する部分分散比が最大値および最小値となる位置である。 p_0 を媒質中において基準屈折率を有する位置とし、 p_1 を媒質中における位置 p_0 とは異なる位置とし、 $n F(p_1)$ 、 $n d(p_1)$ 、 $n C(p_1)$ をそれぞれ媒質の前記位置 p_1 での F 線、 d 線および C 線に関する屈折率とし、 $n F(p_0)$ 、 $n d(p_0)$ 、 $n C(p_0)$ をそれぞれ媒質の位置 p_0 での F 線、 d 線および C 線に関する屈折率とし、 $n g(p_1)$ 、 $n F(p_1)$ 、 $n d(p_1)$ 、 $n C(p_1)$ をそれぞれ位置 p_1 での g 線、 d 線、 F 線および C 線に関する屈折率差とし、 $\frac{d g i(p_1)}{g F g i(p_1)}$ を媒質の位置 p_1 での d 線と g 線との等価アッペ数とし、 $\frac{g F g i(p_1)}{g d g i(p_1)}$ を媒質の位置 p_1 における g 線と F 線とに関する等価部分分散比とし、 $\frac{g d g i(p_1)}{g F g i(p_{\max} g i) - g F g i(p_{\min} g i)}$ を媒質の位置 p_1 における g 線と d 線とに関する等価部分分散比とする。このとき、

$$n g(p_1) = n g(p_1) - n g(p_0)$$

$$n d(p_1) = n d(p_1) - n d(p_0)$$

$$n F(p_1) = n F(p_1) - n F(p_0)$$

$$n C(p_1) = n C(p_1) - n C(p_0)$$

$$\frac{d g i(p_1)}{g F g i(p_1)} = \frac{n d(p_1)}{\{ n F(p_1) - n C(p_1) \}}$$

$$\frac{g F g i(p_1)}{g d g i(p_1)} = \frac{\{ n g(p_1) - n F(p_1) \}}{\{ n F(p_1) - n C(p_1) \}}$$

$$\frac{g d g i(p_1)}{g F g i(p_{\max} g i) - g F g i(p_{\min} g i)} = \frac{\{ n g(p_1) - n d(p_1) \}}{\{ n F(p_1) - n C(p_1) \}}$$

である。

また、 $\frac{g F g i(p_1)}{g d g i(p_1)}$ および $\frac{g d g i(p_1)}{g F g i(p_{\max} g i) - g F g i(p_{\min} g i)}$ をそれぞれ、等価部分分散比の異常分散性とし、

$$\begin{aligned} \frac{g F g i_0(p_1)}{g d g i_0(p_1)} &= -1.665 \times 10^{-7} d g i(p_1)^3 + 5.213 \times 10^{-5} d g i(p_1)^2 - 5.656 \times 10^{-3} d g i(p_1) + 0.7278 \\ \frac{g d g i_0(p_1)}{g F g i_0(p_{\max} g i) - g F g i_0(p_{\min} g i)} &= -1.687 \times 10^{-7} d g i(p_1)^3 + 5.702 \times 10^{-5} d g i(p_1)^2 - 6.603 \times 10^{-3} d g i(p_1) + 1.462 \end{aligned}$$

とすると、

$$g F g i(p_1) = g F g i(p_1) - g F g i_0(p_1)$$

$$g d g i(p_1) = g d g i(p_1) - g d g i_0(p_1)$$

である。

【 0 0 1 3 】

$g F g i(p_{\max} g i)$ および $g F g i(p_{\min} g i)$ はそれぞれ、媒質の位

置 $p_{max\ g\ i}$ および $p_{min\ g\ i}$ における等価部分分散比であり、位置 $p_{max\ g\ i}$ および $p_{min\ g\ i}$ はそれぞれ、媒質中における位置 p_0 とは異なる位置であって、 g 線と F 線とに関する等価部分分散比が最大値となる位置である。

【0014】

なお、上記光学素子を含む光学系、さらに、該光学系を有する光学機器も、それぞれ、本発明の他の一側面を構成する。

【発明の効果】

【0015】

本発明によれば、屈折率分布を有する光学素子であって、光学系に用いた場合に色収差等の諸収差を十分に低減する（補正する）ことが可能な光学素子を実現することができる。

10

【図面の簡単な説明】

【0016】

【図1】本発明の実施例1である光学素子を用いた光学系の断面図。

【図2】実施例1の収差図。

【図3】本発明の実施例2である光学素子を用いた光学系の断面図。

【図4】実施例2の収差図。

【図5】本発明の実施例3である光学素子を用いた光学系の断面図。

【図6】実施例3の広角端、中間ズーム位置および望遠端における収差図。

【図7】本発明の実施例4である光学素子を用いた光学系の断面図。

20

【図8】実施例4の収差図。

【図9】本発明の実施例5である光学素子を用いた光学系の断面図。

【図10】実施例5の収差図。

【図11】本発明の実施例6である光学素子を用いた光学系の断面図。

【図12】実施例6の収差図。

【図13】本発明の実施例7である光学素子を用いた光学系の断面図。

【図14】実施例7の収差図。

【図15】本発明の実施例8である光学素子を用いた光学系の断面図。

【図16】実施例8の収差図。

【図17】本発明の実施例9である光学素子を用いた光学系の断面図。

30

【図18】実施例9の収差図。

【図19】本発明の実施例10である光学素子を用いた光学系の断面図。

【図20】実施例10の収差図。

【図21】色収差係数の波長特性に関する説明図。

【図22】本発明の実施例11である撮像装置の概略図。

【発明を実施するための形態】

【0017】

以下、本発明の実施例について図面を参照しながら説明する。

まず、後述する本発明の実施例1～10に共通する事項について説明する。実施例の光学素子は、媒質中に屈折率分布を有する。そして、該屈折率分布の波長特性について、後述する条件を満足する。

40

実施例の光学素子は、デジタルスチルカメラ、銀塩フィルムカメラ、ビデオカメラ、望遠鏡、双眼鏡、複写機、プロジェクタ等の光学機器の光学系の一部に用いられる。

実施例の光学素子を構成する「固体材料」とは、光学系に適用して使用する状態で固体となっている材料である。製造時等の光学系に使用する前の状態では、どのような状態であってもよい。例えば、製造時には液体材料であっても、それを硬化させて固体材料としたものも固体材料に該当する。

【0018】

実施例の光学素子は、媒質中の屈折率分布によって入射した光線に位相差を与え、屈折率分布を持たない媒質（均質媒質）による凸レンズや凹レンズのような光線収束作用又は

50

光線発散作用を有する。

【 0 0 1 9 】

屈折率分布の種類としては、光軸に直交する方向に屈折率分布があるラジアル屈折率分布や、光軸方向に屈折率分布があるアキシアル屈折率分布等がある。

【 0 0 2 0 】

また、屈折率分布を有する光学素子では、界面での屈折に加えて、媒質中で光線を屈折させる。このため、均質媒質の光学素子と比較すると、収差補正の自由度が大きい。

【 0 0 2 1 】

媒質中に屈折率分布を形成する方法は種々提案されており、イオン交換法、ゾルゲル法、3次元プリンティング技術等がある。

【 0 0 2 2 】

イオン交換法では、イオン交換が可能なイオンを含有する材料を、溶液に浸水させて屈折率分布を得る。ゾルゲル法では、シリコンを主成分としたゾルを調合してゲルを得て、ゲルに所望の屈折率分布を付与し、乾燥・焼結等によりガラス体を得る。

3次元プリンティング技術では、屈折率の異なる媒質を複数層成形して、屈折率分布を付与する。

【 0 0 2 3 】

これらの方法では、媒質中の複数材料に、所望の組成比率の分布を作成することで屈折率分布を得ている。

【 0 0 2 4 】

屈折率分布の波長分散を考えると、各波長について同様の屈折率分布があるならば、媒質中の屈折成分としては色収差が発生しない。しかし、上記のように複数材料の組成比率を分布させて屈折率分布を作る場合には、各波長での屈折率分布量、すなわち屈折率分布の波長分散が存在する。

【 0 0 2 5 】

実施例の光学素子における屈折率分布の波長分散は、以下の条件を満足する。

【 0 0 2 6 】

$$|g F(p_{\max}) - g F(p_{\min})| \leq 0.02 \quad \dots (1)$$

$$|g F g_i(p_1)| \leq 0.0272 \quad \dots (2)$$

$$|g d g_i(p_1)| \leq 0.0250 \quad \dots (3)$$

$$|g F g_i(p_{\max} g_i) - g F g_i(p_{\min} g_i)| \leq 0.1 \quad \dots (4)$$

このとき、媒質中の位置 p での波長の光線に関する屈折率を $n(p)$ とする。この定義に従うと、位置 $p (= p_1, p_0)$ でのフラウンフォーファ線である g 線 (435.8 nm)、 F 線 (486.1 nm)、 d 線 (587.6 nm) および C 線 (656.3 nm) に関する屈折率はそれぞれ以下のように表される。 p_0 は媒質中で基準屈折率を有する位置であり、 p_1 は p_0 とは異なる媒質中の位置である。

$n_g(p)$, $n_F(p)$, $n_d(p)$, $n_C(p)$

実施例における位置 $p (= p_1, p_{\max}, p_{\min}, p_{\max} g_i, p_{\min} g_i)$ での d 線に関するアッペ数 $d(p)$ 、 g 線と d 線に関する部分分散比 $g d(p)$ 、 g 線と F 線に関する部分分散比 $g F(p)$ はそれぞれ次の通りである。

【 0 0 2 7 】

$$d(p) = \{n_d(p) - 1\} / \{n_F(p) - n_C(p)\}$$

$$g d(p) = \{n_g(p) - n_d(p)\} / \{n_F(p) - n_C(p)\}$$

$$g F(p) = \{n_g(p) - n_F(p)\} / \{n_F(p) - n_C(p)\}$$

g 線と d 線に関する異常分散性 $g d$ および g 線と F 線に関する異常分散性 $g F$ は次の通りである。一般的な光学材料の部分分散比は、アッペ数の変化に対してほぼ同傾向に変化する。このときの部分分散比の標準値 $g d_0$, $g F_0$ を d 線に関するアッペ数 d の関数として以下のように表す。

$$g d_0 = -1.687 \times 10^{-7} d^3 + 5.702 \times 10^{-5} d^2 - 6.603 \times 10^{-3} d + 1.462$$

10

20

30

40

50

$$g F 0 = - 1.665 \times 10^{-7} d^3 + 5.213 \times 10^{-5} d^2 - 5.656 \times 10^{-3} d + 0.7278$$

異常分散性とは、この標準値からの差分を示す。すなわち、異常分散性 $g d$, $g F$ はそれぞれ、

$$g d = g d - g d 0$$

$$g F = g F - g F 0$$

と表される。

【0028】

実施例の光学素子は、媒質中に屈折率分布を有しているため、媒質中の位置 p によって屈折率が変化する。このため、アッペ数および部分分散比についても位置 p によって変化する。

10

【0029】

位置 p_{max} は、媒質中において g 線と F 線に関する部分分散比が最も大きな値となる位置を表す。位置 p_{min} は、媒質中において g 線と F 線に関する部分分散比が最も小さな値となる位置を表す。

【0030】

また、実施例にいう媒質の屈折における等価部分分散比および等価アッペ数は次の通りである。

屈折率が媒質中で均質である光学素子（以下、均質レンズという）において、光線は媒質と雰囲気との界面で屈折するが、媒質中では屈折しない。媒質の屈折率は波長によって変化するため、均質レンズで屈折した光線には色収差が生じる。

20

【0031】

屈折作用とは光束の位相差から生じる現象であり、均質レンズにおいては形状を変化させることで位相差を与えている。このとき、波長分散の指標となる d 線に関するアッペ数は、空気の屈折率を 1 としたときの空気との屈折率差の比で表される。

【0032】

一方、媒質が屈折率分布を有する光学素子（以下、屈折率分布レンズという）では、光線は、媒質と雰囲気との界面で屈折するのに加え、媒質中でも屈折する。そして、屈折率分布の波長分散によって、媒質中での屈折においても色収差が発生する。

【0033】

30

媒質中の屈折率分布による位相差は、媒質中の基準となる位置での屈折率と、光線が通過する位置での屈折率の差分によって生じる。このため、媒質中の屈折における波長分散は、光線通過位置での屈折率と、基準位置での屈折率の差分の比となる。

【0034】

これにより求まる波長分散は、媒質中での屈折を、色収差が等しくなる波長分散特性を有する仮想ガラスとして置き換えて考えると、仮想ガラスの波長分散として等価的に扱うことが可能となる。つまり、媒質中の屈折における波長分散は、等価アッペ数および等価部分分散比を用いることで、仮想的な屈折レンズと置き換えることが可能となる。

【0035】

媒質中に屈折率分布を有するときの、各波長での位置 p_0 での基準屈折率を $n(p_0)$ とする。このとき、媒質中の位置 p_1 での屈折率差 $n(p_1)$ 、等価アッペ数 $d g i(p_1)$ および等価部分分散比 $g F g i(p_1)$, $g d g i(p_1)$ は以下のように表される。

40

【0036】

$$n(p_1) = n(p_1) - n(p_0)$$

（すなわち、 $n g(p_1)$, $n F(p_1)$, $n d(p_1)$, $n C(p_1)$ をそれぞれ位置 p_1 での g 線、 d 線、 F 線および C 線に関する屈折率差とすると、

$$n g(p_1) = n g(p_1) - n g(p_0) ,$$

$$n d(p_1) = n d(p_1) - n d(p_0) ,$$

$$n F(p_1) = n F(p_1) - n F(p_0) ,$$

50

$$\begin{aligned}
n_C(p_1) &= n_C(p_1) - n_C(p_0) \\
dgi(p_1) &= nd(p_1) / \{ n_F(p_1) - n_C(p_1) \} \\
gFgi(p_1) &= \{ ng(p_1) - n_F(p_1) \} / \{ n_F(p_1) - n_C(p_1) \} \\
&= \{ ng(p_1) - nd(p_1) \} / \{ n_F(p_1) - n_C(p_1) \}
\end{aligned}$$

媒質中での屈折におけるg線とF線に関する異常分散性 $gFgi$ およびg線とd線に関する異常分散性 $gdgi$ はそれぞれ、

$$\begin{aligned}
gdgi &= gdgi - gdgi_0 \\
gFgi &= gFgi - gFgi_0
\end{aligned}$$

と表される。但し、 $gdgi_0$ および $gFgi_0$ はそれぞれ等価アッベ数 dgi の関数として、

$$\begin{aligned}
gdgi_0 &= -1.687 \times 10^{-7} dgi^3 + 5.702 \times 10^{-5} dgi^2 \\
&\quad - 6.603 \times 10^{-3} dgi + 1.462 \\
gFgi_0 &= -1.665 \times 10^{-7} dgi^3 + 5.213 \times 10^{-5} dgi^2 \\
&\quad - 5.656 \times 10^{-3} dgi + 0.7278
\end{aligned}$$

とする。

【0037】

実施例の光学素子は、前述したように媒質中に屈折率分布を有し、媒質中の位置 p によって屈折率が変化する。屈折率の変化量は各波長によって異なるため、等価アッベ数および等価部分分散比についても位置 p によって変化する。

【0038】

位置 p_{maxgi} は、媒質中において、媒質の屈折におけるg線とF線に関する等価部分分散比が最も大きな値となる位置を表す。位置 p_{mingi} は、媒質中において、g線とF線に関する等価部分分散比が最も小さな値となる位置を表す。

【0039】

媒質中において、光軸に直交する方向に屈折率が変化する屈折率分布をラジアル屈折率分布という。ラジアル屈折率分布の波長における屈折率は、光軸から該光軸に直交する方向での距離を r とすると、次の式で表すことができる。

【0040】

【数1】

$$n_{\lambda} R(r) = \sum_{i=0}^{\infty} N_{\lambda i} R \cdot r^{2i}$$

【0041】

このとき、d線に関するアッベ数 $dR(r)$ 、g線とd線に関する部分分散比 $gdR(r)$ およびg線とF線に関する部分分散比 $gFR(r)$ はそれぞれ次のように表される。

【0042】

$$\begin{aligned}
dR(r) &= \{ ndR(r) - 1 \} / \{ nFR(r) - nCR(r) \} \\
gdR(r) &= \{ ngR(r) - ndR(r) \} / \{ nFR(r) - nCR(r) \} \\
gFR(r) &= \{ ngR(r) - nFR(r) \} / \{ nFR(r) - nCR(r) \}
\end{aligned}$$

ラジアル屈折率分布では、光軸上の屈折率を基準屈折率として、媒質中の屈折率差 $nR(r)$ を以下の式で表すことができる。

【0043】

$$nR(r) = nR(r) - nR(0)$$

また、0より大きい r_1 でのラジアル屈折率分布における等価アッベ数 $dgiR(r)$

10

20

30

40

50

1) および等価部分分散比 $g F g i R(r 1)$, $g d g i R(r 1)$ を表すと、以下
のようになる。

【0044】

$$\begin{aligned} d g i R(r 1) &= n d R(r 1) / \{ n F R(r 1) - n C R(r 1) \} \\ g F g i R(r 1) &= \{ n g R(r 1) - n F R(r 1) \} / \{ n F R(r 1) - n C R(r 1) \} \\ g d g i R(r 1) &= \{ n g R(r 1) - n d R(r 1) \} / \{ n F R(r 1) - n C R(r 1) \} \end{aligned}$$

媒質の屈折におけるg線とF線に関する異常分散性 $g F g i R$ およびg線とd線に
関する異常分散性 $g d g i R$ はそれぞれ、

10

$$\begin{aligned} g d g i R &= g d g i R - g d g i R 0 \\ g F g i R &= g F g i R - g F g i R 0 \end{aligned}$$

と表される。但し、 $g d g i R 0$ および $g F g i R 0$ はそれぞれ、等価アッベ数 $d g i R$ の関数として、

$$\begin{aligned} g d g i R 0 &= -1.687 \times 10^{-7} d g i R^3 \\ &+ 5.702 \times 10^{-5} d g i R^2 \\ &- 6.603 \times 10^{-3} d g i R + 1.462 \\ g F g i R 0 &= -1.665 \times 10^{-7} d g i R^3 \\ &+ 5.213 \times 10^{-5} d g i R^2 \\ &- 5.656 \times 10^{-3} d g i R + 0.7278 \end{aligned}$$

20

である。

【0045】

ラジアル屈折率分布を有する屈折率分布レンズの光線有効半径を $r e a$ とすると、光軸
からの距離 $r e a$ および光軸上(距離 = 0)におけるg線とF線に関する部分分散比は条
件(1)から得られる、つまりは条件(1)としての以下の条件を満足する。

【0046】

$$| g F R(r e a) - g F R(0) | \leq 0.02 \dots (5)$$

さらに好ましくは、等価アッベ数 $d g i R(r)$ が以下の条件を満足する。

【0047】

$$0 < d g i R(r) \leq 80 \dots (6)$$

30

媒質中において、光軸方向に屈折率が変化する屈折率分布を、アキシャル屈折率分布と
いう。アキシャル屈折率分布の波長における屈折率は、媒質中の最も光入射側の点から
光軸方向での距離 t とすると、次の式で表すことができる。

【0048】

【数2】

$$n_{\lambda} A(t) = \sum_{i=0}^{\infty} N A_{\lambda i} t^i$$

【0049】

このとき、d線に関するアッベ数 $d A$ 、g線とd線に関する部分分散比 $g d A$ およ
びg線とF線に関する部分分散比 $g F A$ はそれぞれ、以下の式で表される。

40

【0050】

$$\begin{aligned} d A(t) &= \{ n d A(t) - 1 \} / \{ n F A(t) - n C A(t) \} \\ g d A(t) &= \{ n g A(t) - n d A(t) \} / \{ n F A(t) - n C A(t) \} \\ g F A(t) &= \{ n g A(t) - n F A(t) \} / \{ n F A(t) - n C A(t) \} \end{aligned}$$

アキシャル屈折率分布では、媒質中の屈折率差 $n A(t)$ は次式で表すことができ
る。

【0051】

$$n A(t) = n A(t) - n A(0)$$

50

また、0より大きい t_1 において、アキシャル屈折率分布における等価アッペ数 $dgiA(t_1)$ および等価部分分散比 $gFgiA(t_1)$ 、 $gdgiA(t_1)$ を表すと、以下のようになる。

【0052】

$$\begin{aligned} dgiA(t_1) &= ndA(t_1) / \{ nFA(t_1) - nCA(t_1) \} \\ gFgiA(t_1) &= \{ ngA(t_1) - nFA(t_1) \} / \{ nFA(t_1) - nCA(t_1) \} \\ gdgiA(t_1) &= \{ ngA(t_1) - ndA(t_1) \} / \{ nFA(t_1) - nCA(t_1) \} \end{aligned}$$

媒質の屈折における g 線と F 線に関する異常分散性 $gFgiA$ および g 線と d 線に関する異常分散性 $gdgiA$ はそれぞれ、

$$\begin{aligned} gdgiA &= gdgiA - gdgiA_0 \\ gFgiA &= gFgiA - gFgiA_0 \end{aligned}$$

と表される。但し、 $gdgiA_0$ および $gFgiA_0$ はそれぞれ等価アッペ数 $dgiA$ の関数として、

$$\begin{aligned} gdgiA_0 &= -1.687 \times 10^{-7} dgiA^3 \\ &+ 5.702 \times 10^{-5} dgiA^2 \\ &- 6.603 \times 10^{-3} dgiA + 1.462 \\ gFgiA_0 &= -1.665 \times 10^{-7} dgiA^3 \\ &+ 5.213 \times 10^{-5} dgiA^2 \\ &- 5.656 \times 10^{-3} dgiA + 0.7278 \end{aligned}$$

である。

【0053】

媒質中において、光軸方向における最も光入射側の点を $tobj$ とし、最も光射出側の点を $timg$ とすると、それら点 $tobj$ 、 $timg$ での g 線と F 線に関する部分分散比は、条件(1)から得られる、つまりは条件(1)としての以下の条件を満足する。

【0054】

$$| gFA(tobj) - gFA(timg) | \leq 0.02 \quad \dots (7)$$

さらに好ましくは、等価アッペ数 $dgiA(t)$ は以下の条件式を満足する。

【0055】

$$0 < dgiA(t) \leq 200 \quad \dots (8)$$

屈折率分布を有する光学素子を作成する方法として、光学素子を構成する媒質が、固体材料と、少なくとも1つの光学材料との混合体からなる場合を考える。屈折率分布を作るには、該固体材料と該光学材料との組成比率を媒質中で空間的に分布(変化)させればよい。実施例では、固体材料と光学材料の g 線と F 線に関する異常分散性をそれぞれ gFs 、 gFm とするとき、以下の条件を満足する。

【0056】

$$| gFs - gFm | \leq 0.027 \quad \dots (9)$$

このとき、固体材料と光学材料の d 線に関するアッペ数および g 線と F 線に関する部分分散比をそれぞれ ds 、 dm 、 gFs 、 gFm とする。

【0057】

次に、前述した各条件の技術的意味について説明する。各条件は、実施例の光学素子における屈折率分布の波長分散特性について規定する。条件(1)から(4)に示す波長分散特性を満足するとき、光学系の諸収差、特に色収差を良好に補正(低減)することが可能となる。

【0058】

ここで、光学系において可視光における短波長領域まで良好に補正する方法について述べる。一般的な光学材料において、その波長分散は、前述したようにアッペ数に対してある傾向を有し、その特性を上記のように gF_0 および gd_0 等として表現できる。 d 線、 F 線、 C 線に加え g 線の4波長光線の収差補正を行う場合には、 gF および

10

20

30

40

50

g dの絶対値が大きいような異常分散性を有する光学材料を用いる方法等が考えられる。

【0059】

屈折率分布による屈折作用の波長分散についても同様に考えられ、等価部分分散比が異常分散性を有する場合には、可視光をその短波長領域も含めて良好に色収差を補正することが可能である。つまり、屈折率分布による屈折作用において、g線に関する屈折率の変化がd線、C線およびF線に関する屈折率の変化と大きく異なるときに、色収差を良好に補正することが可能である。

【0060】

条件(1)が成り立つとき、屈折率分布による屈折作用が有する異常分散性がより顕著となる。条件(1)の式の左辺は下限値よりも大きくなるほど好ましい。

10

【0061】

条件(4)において、上限値を超えると色の球面収差等が大きく発生するため、収差の補正が困難となる。また、条件(4)を満足しない屈折率分布を作成するには、母材に対して複数材料の組成比を変化させて混合させる等の方法があるが、その組成比の制御は困難である。

【0062】

光学素子がラジアル屈折率分布を有する場合には、条件(5)を満足するのがよい。これによれば、更に色収差を良好に補正するのが容易となる。また、条件(6)を満足すれば、C線からF線までの、可視光での短波長領域を除く波長域で、色収差を良好に補正することが可能となる。

20

【0063】

光学素子がアキシャル屈折率分布を有する場合には、条件(7)を満足するのがよい。これによれば、更に色収差を良好に補正するのが容易となる。また、条件(8)を満足すれば、C線からF線までの、可視光での短波長領域を除く波長域で、色収差を良好に補正することが可能となる。

【0064】

実施例の光学素子を作成するために、固体材料と少なくとも1つの光学材料とを混合するときの組成比率を媒質中で変化させる際に、条件(9)を満足する固体材料と光学材料を選択することで、条件(1)~(4)を満足する屈折率分布を実現できる。

【0065】

30

例えば、固体材料に無機酸化物の微粒子を混合させ、その混合比率を媒質中で変化させたものは、条件(1)~(4)を満足する。無機酸化物としては、例えば、 TiO_2 ($n_d = 2.304$, $d = 13.8$)、 Nb_2O_5 ($n_d = 2.367$, $d = 14.0$)、 ITO ($n_d = 1.8571$, $d = 5.69$)がある。また、他の無機酸化物として、 CrO_3 ($n_d = 2.2178$, $d = 13.4$)、 BaTiO_3 ($n_d = 2.4362$, $d = 11.3$)等もある。

【0066】

これらの無機酸化物微粒子の中で、 TiO_2 微粒子、 ITO (Indium-Tin-Oxide)微粒子を固体材料中に適切な体積比で分散させ、その組成比率を変化させる場合、上記条件を満足する光学素子が得られる。

40

【0067】

散乱を考慮すると、これらの微粒子の粒径は2nmから50nmが好ましく、凝集を抑えるために分散剤等を添加してもよい。

【0068】

なお、上記条件(1)~(4)を満足すれば、製法および材料は上述したものに限定されない。

【0069】

微粒子を分散させた混合体において、波長での屈折率 $N(\lambda)$ は、よく知られたDrudeの式から導き出される次式によって、簡単に計算することができる。

【0070】

50

$$N(\lambda) = [1 + V \{N_m^2(\lambda) - 1\} + (1 - V) \{N_0^2(\lambda) - 1\}]^{1/2}$$

但し、 λ は任意の波長であり、 N_m は分散する微粒子等の屈折率であり、 N_0 は微粒子等を分散させるポリマー等の屈折率であり、 V はポリマー等の体積に対する微粒子等の総体積の分率である。

【0071】

表1には、上記材料の各波長での屈折率、 d 線に関するアッペ数 d 、 g 線と F 線に関する部分分散比 g_F および g 線と d 線に関する部分分散比 g_d を示す。

【0072】

実施例における屈折率分布を有する光学素子では、媒質中の位置 p に応じて固体材料と光学材料の組成比率を変化させている。これによれば、媒質中の位置 p に応じて g 線と F 線に関する部分分散比 $g_F(p)$ が変化することとなる。このとき、媒質中の位置 p に関して、部分分散比 $g_F(p)$ の変化量を大きくするほど、媒質での屈折に関する等価部分分散比の異常分散性 $g_F g_i(p)$ の絶対値が大きくなる傾向にある。 $g_F g_i(p)$ の絶対値が大きいほど、以下で説明する色収差補正効果をより得やすくなる。

【0073】

実施例では、一般的な光学材の部分分散比と比較して、等価部分分散比の値が大きい又は小さい光学素子を用いることにより、良好な色収差補正を可能としている。

【0074】

光学材料の屈折率における波長分散特性において、等価アッペ数は分散特性曲線の傾きを表し、等価部分分散比は分散特性曲線の曲がり具合を表す。

【0075】

一般的に光学材料で屈折率分布素子を作成すると、短波長側の屈折率分布が長波長側の屈折率分布よりも変化が大きく、 d 線に関する等価アッペ数、 g 線と F 線に関する等価部分分散比、 g 線と d 線に関する等価部分分散比はそれぞれ正の値となる。このため、分散特性曲線（波長に対する屈折率の特性）は下に凸状の形状となる。さらに、短波長側ほど波長の変化に対する屈折率分布の変化が大きくなる。

【0076】

また、一般の光学材料において、部分分散比はアッペ数に対して低分散領域ではほぼ直線的な変化をし、高分散になるにつれて変化の度合いは大きくなる傾向にある。このような分布から外れたものが異常分散性を有する光学材料である。

【0077】

光学系のうち等価部分分散比が大きな光学材料を用いた部分（光学系部分） G_{NL} と、等価部分分散比が小さな光学材料を用いた光学系部分 G_L と、部分分散比が一般的な値である光学材料を用いた屈折光学系部分 G とにより構成される光学系があるとする。この光学系の色収差の補正について、図21を用いて説明する。

【0078】

図21において、屈折光学系部分 G の色収差がある程度補正された状態での色収差係数の波長特性曲線（以下、色収差係数曲線ともいう）を破線 G で示す。曲線 G_{NL} および G_L はそれぞれ光学系部分 G_{NL} および G_L における色収差係数曲線を表す。また、色収差の補正後の曲線は屈折光学系部分 G に、光学系部分 G_{NL} および G_L を導入して色収差を補正した場合の色収差係数曲線を示す。

【0079】

一般的に色収差が補正された光学系における色収差係数曲線は、破線 G のように短波長側に曲がりを残した状態で、色収差のバランスをとっていることが多い。一般的な光学材料のみを使用して、色収差をより良好に補正するのは困難である。

【0080】

このような屈折光学系部分 G に対して、光学系部分 G_{NL} を導入し適当なパワーを与えると、設計基準波長を中心にして色収差係数の傾きが変化する。このとき、光学系部分 G_{NL} は一般の光学材料に比べて等価部分分散比が大きいため、短波長側での色収差係数曲

10

20

30

40

50

線の変化がより大きくなる。

【 0 0 8 1 】

この場合に、光学系部分 G N L で発生している色収差係数曲線の傾きを補正すれば、屈折光学系部分 G の短波長領域における曲がりを打ち消し、色収差を良好に補正することができる。

【 0 0 8 2 】

光学系部分 G L は一般的な光学材料と比較して等価部分分散比が小さい光学系で構成されている。このため、色収差係数曲線は比較的線形性を示す。

【 0 0 8 3 】

この場合に、屈折光学系部分 G のパワーを緩めて、光学系部分 G L に適切なるパワーを与えると、色収差係数曲線の短波長領域における曲がりを緩めることができる。これによれば、可視光における短波長領域まで含めた領域において、良好に色収差を補正することが可能である。

【 0 0 8 4 】

実施例の光学素子は、一般の光学材料と組み合わせて、色収差をはじめとする諸収差を補正する。このため、等価部分分散比は異常分散性を持つことが収差補正上必要ではあるが、異常分散性が大き過ぎると色収差の補正が困難となる。

【 0 0 8 5 】

一般の光学材料とかけ離れた特性を有するレンズを用いた場合、色収差係数の波長依存特性の変化は特に大きくなる。その大きな変化を補正し、色収差補正をするには、他のレンズのパワーも大きく変化させる必要がある。但し、パワーを大きく変化させると球面収差やコマ収差や非点収差等の収差に大きな影響を及ぼすため、収差補正が困難となる。

【 0 0 8 6 】

このため、光学素子の波長分散に関する条件 (1) の数値範囲を以下の範囲とすれば、更に良好に色収差を補正することができる。

【 0 0 8 7 】

$0.020 \quad | \quad g F (p_{max}) - g F (p_{min}) \quad | \quad 0.800 \quad \dots (1 a)$

また、収差補正の観点から、更に望ましくは、(1 a) の数値範囲を以下に示す範囲とするのがよい。

【 0 0 8 8 】

$0.030 \quad | \quad g F (p_{max}) - g F (p_{min}) \quad | \quad 0.750 \quad \dots (1 b)$

更に望ましくは、(1 b) の数値範囲を以下に示す範囲とするのがよい。

【 0 0 8 9 】

$0.040 \quad | \quad g F (p_{max}) - g F (p_{min}) \quad | \quad 0.700 \quad \dots (1 c)$

光学素子の媒質の屈折における、g 線と F 線の等価部分分散比に関する条件 (2) の数値範囲を以下の範囲とすれば、更に良好に色収差を補正することが可能となる。

【 0 0 9 0 】

$0.0272 \quad | \quad g F g i (p 1) \quad | \quad 1.000 \quad \dots (2 a)$

また、収差補正の観点から、更に望ましくは、(2 a) の数値範囲を以下に示す範囲とするのがよい。

【 0 0 9 1 】

$0.050 \quad | \quad g F g i (p 1) \quad | \quad 0.900 \quad \dots (2 b)$

更に望ましくは、(2 b) の数値範囲を以下に示す範囲とするのがよい。

【 0 0 9 2 】

$0.080 \quad | \quad g F g i (p 1) \quad | \quad 0.800 \quad \dots (2 c)$

光学素子の媒質の屈折における g 線と d 線の等価部分分散比に関する条件 (3) の数値範囲を以下の範囲とすれば、更に良好に色収差を補正することが可能となる。

【0093】

$$0.025 \quad | \quad g d g i (p1) \quad | \quad 1.000 \quad \dots (3a)$$

更に望ましくは、(3a)の数値範囲を以下に示す範囲とするのがよい。

【0094】

$$0.050 \quad | \quad g d g i (p1) \quad | \quad 0.900 \quad \dots (3b)$$

更に望ましくは、(3b)の数値範囲を以下に示す範囲とするのがよい。

【0095】

$$0.080 \quad | \quad g d g i (p1) \quad | \quad 0.800 \quad \dots (3c)$$

光学素子の媒質の屈折におけるg線とF線の等価部分分散比に関する条件(4)の数値範囲は、以下の範囲とすれば、更に良好に色収差を補正することが可能となる。

10

【0096】

$$| \quad g F g i (pmaxgi) - g F g i (pmingi) \quad | \quad 0.09$$

... (4a)

更に望ましくは、(4a)の数値範囲を以下に示す範囲とするのがよい。

【0097】

$$| \quad g F g i (pmaxgi) - g F g i (pmingi) \quad | \quad 0.08$$

... (4b)

ラジアル屈折率分布レンズのg線とF線の部分分散比に関する条件(5)の数値範囲を以下の範囲とすれば、更に良好に色収差を補正することが可能となる。

20

【0098】

$$0.020 \quad | \quad g F R (rea) - g F R (0) \quad | \quad 0.800 \quad \dots (5a)$$

更に望ましくは、(5a)の数値範囲を以下に示す範囲とするのがよい。

【0099】

$$0.030 \quad | \quad g F R (rea) - g F R (0) \quad | \quad 0.750 \quad \dots (5b)$$

更に望ましくは、(5b)の数値範囲を以下に示す範囲とするのがよい。

【0100】

$$0.040 \quad | \quad g F R (rea) - g F R (0) \quad | \quad 0.700 \quad \dots (5c)$$

ラジアル屈折率分布レンズにおけるd線の等価アッペ数に関する条件式(6)の数値範囲を以下の範囲とすれば、更に良好に色収差を補正することが可能となる。

30

【0101】

$$0 < d g i R (r) \quad 60 \quad \dots (6a)$$

更に望ましくは、(6a)の数値範囲を以下に示す範囲とするのがよい。

【0102】

$$0 < d g i R (r) \quad 40 \quad \dots (6b)$$

アキシャル屈折率分布レンズのg線とF線の部分分散比に関する条件式(7)の数値範囲を以下の範囲とすれば、更に良好に色収差を補正することが可能となる。

【0103】

$$0.020 \quad | \quad g F A (tobj) - g F A (timg) \quad | \quad 0.800$$

... (7a)

更に望ましくは、(7a)の数値範囲を以下に示す範囲とするのがよい。

40

【0104】

$$0.030 \quad | \quad g F A (tobj) - g F A (timg) \quad | \quad 0.750$$

... (7b)

更に望ましくは、(7b)の数値範囲を以下に示す範囲とするのがよい。

【0105】

$$0.050 \quad | \quad g F A (tobj) - g F A (timg) \quad | \quad 0.700$$

... (7c)

アキシャル屈折率分布レンズにおけるd線の等価アッペ数に関する条件式(8)の数値範囲を以下の範囲とすれば、更に良好に色収差を補正することが可能となる。

【0106】

50

$$0 < d g i A (t) \quad 100 \quad \dots (8a)$$

更に望ましくは、(8a)の数値範囲を以下に示す範囲とするのがよい。

【0107】

$$0 < d g i A (t) \quad 60 \quad \dots (8b)$$

更に望ましくは、(8b)の数値範囲を以下に示す範囲とするのがよい。

【0108】

$$0 < d g i A (t) \quad 40 \quad \dots (8c)$$

各実施例では、条件式(1)～(4)を満足する光学素子を光学系中に使用している。これらの光学素子で構成された屈折面は非球面形状を有していてもよい。これによれば色の球面収差等の色収差フレアを補正することが容易となる。また、これらの光学素子と空気等の雰囲気や屈折率差が大きい光学材料とで境界面を形成すれば、境界面の僅かな曲率変化で色収差を比較的大きく変化させることができ、この結果、色収差の補正が容易となる。

【0109】

以下、上述した屈折率分布を有する光学素子(屈折率分布レンズ)を用いた光学系の具体的な実施例について説明する。

【0110】

図1は実施例1の光学系のレンズ断面図である。図2は実施例1の光学系が無限遠物体に合焦したときの収差図である。図3は実施例2の光学系のレンズ断面図である。図4は実施例2の光学系が無限遠物体に合焦したときの収差図である。図5は実施例3の光学系の広角端におけるレンズ断面図である。図6(a)、(b)、(c)はそれぞれ、実施例3の光学系が広角端、中間ズーム位置、望遠端において無限遠物体に合焦したときの収差図である。

【0111】

図7は実施例4の光学系のレンズ断面図である。図8は実施例4の光学系が無限遠物体に合焦したときの収差図である。図9は実施例5の光学系のレンズ断面図である。図10は実施例5の光学系が無限遠物体に合焦したときの収差図である。図11は実施例6の光学系のレンズ断面図である。図12は実施例6の光学系が無限遠物体に合焦したときの収差図である。

【0112】

図13は実施例7の光学系のレンズ断面図である。図14は実施例7の光学系が無限遠物体に合焦したときの収差図である。図15は実施例8の光学系のレンズ断面図である。図16は実施例8の光学系が無限遠物体に合焦したときの収差図である。図17は実施例9の光学系のレンズ断面図である。図18は実施例9の光学系が無限遠物体に合焦したときの収差図である。図19は実施例10の光学系のレンズ断面図である。図20は実施例10の光学系が無限遠物体に合焦したときの収差図である。

【0113】

各実施例の光学系は、ビデオカメラ、デジタルスチルカメラ、銀塩フィルムカメラ等の撮像装置に用いられる撮影レンズ系である。レンズ断面図において、左方が物体側(前方)、右方が像側(後方)である。

【0114】

なお、各実施例の光学系をプロジェクタ等の投射レンズとして用いるときは、左方が投射面(スクリーン)側、右方が投射面に投射される原画側である。

【0115】

レンズ断面図において、OLは光学系である。iは物体側からのレンズの順番を示し、Liは第iレンズである。SPは開口絞りである。IPは像面であり、撮像装置における固体撮像素子の撮像面や銀塩フィルムカメラのフィルム面に相当する感光面が配置される。

【0116】

Ggi j (j = 1、2、3...)は屈折率分布レンズを表す。各実施例の光学系は、屈折

10

20

30

40

50

率分布レンズを少なくとも１つ含む。

【０１１７】

収差図において、 d 、 g 、 C 、 F はそれぞれ d 線、 g 線、 C 線および F 線に関する収差であることを示す。 M および S はそれぞれメリディオナル像面およびサジタル像面である。倍率色収差は g 線によって表している。 θ は半画角、 Fno は F ナンバーである。

【実施例１】

【０１１８】

図１に示す実施例１（数値例１）の光学系は、物体側から像側へ順に、フォーカスに際して不動である正の屈折力を有する第１レンズユニット $L1$ と、フォーカスのために光軸方向に移動する負の屈折力を有する第２レンズユニット $L2$ とを有する。また、該光学系は、フォーカスに際して不動である負の屈折力を有する第３レンズユニット $L3$ を有する。この光学系は、倒立１回結像の縮小結像光学系である。

10

【０１１９】

実施例１の光学系は、焦点距離が 294 mm 、望遠比（第１レンズ面から像面までの光軸方向に沿う長さを焦点距離で割った値）が 0.80 の望遠レンズである。

【０１２０】

実施例１では、第１レンズユニット $L1$ に、 UV 硬化樹脂１に ITO 微粒子を組成比率を変化させて分散させた媒質により形成された屈折率分布レンズ $Ggi1$ を用いている。この屈折率分布レンズ $Ggi1$ は、光軸に直交する方向（径方向）に屈折率が変化するラジアル屈折率分布レンズである。屈折率分布レンズ $Ggi1$ の媒質は、 UV 硬化樹脂１に対して、 ITO 微粒子を、体積比で最大で 5.05% 、最小で 0.0% 分散させた混合体である。屈折率分布レンズの光軸から径方向に ITO 微粒子の組成比率が増加している。このため、屈折率分布レンズ $Ggi1$ において、 g 線と F 線に関する部分分散比は、光軸上で最大値となり、径方向での最外有効位置（以下、有効径位置という）で最小値となる。すなわち、 $gF(p_{max}) = gFR(0)$ 、 $gF(p_{min}) = gFR(r_{ea})$ である。 g 線と F 線に関する等価部分分散比は、光軸上で最小値となり、有効径位置で最大値となる。すなわち、位置 p_{maxgi} は有効径位置であり、位置 p_{mingi} は光軸上の位置である。

20

実施例１の光学系に用いられた屈折率分布レンズ $Ggi1$ の光入射側の面と光射出側の面は共に平面形状を有する。このため、雰囲気と媒質の界面での屈折力は実質的に無い。また、媒質の屈折力は負である。 g 線と F 線における等価部分分散比は、一般的な光学材料と比較して小さい。

30

【０１２１】

実施例１の光学系は、開口絞り SP より物体側の屈折力が正で、像側の屈折力が負となるテレフォトタイプのパワー配置を有する。実施例１では、開口絞り SP よりも物体側での近軸軸上光線の通過位置が比較的高い、開口絞り SP よりも前方に配置された第１レンズユニット $L1$ 内に屈折率分布レンズ $Ggi1$ を含ませることで、諸収差、特に色収差を良好に補正している。

【実施例２】

【０１２２】

図３に示す実施例２（数値例２）の光学系は、物体側から像側へ順に、フォーカスに際して不動である正の屈折力を有する第１レンズユニット $L1$ と、フォーカスのために光軸方向に移動する負の屈折力を有する第２レンズユニット $L2$ とを有する。また、該光学系は、フォーカスに際して不動である負の屈折力を有する第３レンズユニット $L3$ を有する。この光学系は、倒立１回結像の縮小結像光学系である。

40

【０１２３】

実施例２の光学系は、焦点距離が 294 mm 、望遠比が 0.765 の望遠レンズである。

【０１２４】

実施例２では、第１レンズユニット $L1$ に屈折率分布レンズを２つ用いている。屈折率

50

分布レンズ G_{gi1} は、UV硬化樹脂 2 にITO微粒子を組成比率を変化させて分散させた媒質により形成されている。屈折率分布レンズ G_{gi2} は、UV硬化樹脂 1 に、 TiO_2 微粒子の組成比率を変化させて分散させた媒質により形成されている。

【0125】

屈折率分布レンズ G_{gi1} および屈折率分布レンズ G_{gi2} は、径方向に屈折率が変わるラジアル屈折率分布レンズである。屈折率分布レンズ G_{gi1} の媒質は、UV硬化樹脂 2 に対して、ITO微粒子を、体積比で最大で 5.05%、最小で 0.00% 分散させた混合体である。光軸から径方向にITO微粒子の組成比率が増加している。

また、屈折率分布レンズ G_{gi2} の媒質は、UV硬化樹脂 1 に対して、 TiO_2 微粒子を、体積比で最大で 3.0%、最小で 0.0% 分散させた混合体である。光軸から径方向に TiO_2 微粒子の組成比率が減少している。

このため、屈折率分布レンズ G_{gi1} において、 g 線と F 線に関する部分分散比は、光軸上で最大値となり、有効径位置で最小値となる。すなわち、 $gF(p_{max}) = gFR(0)$ 、 $gF(p_{min}) = gFR(r_{ea})$ である。 g 線と F 線に関する等価部分分散比は、光軸上で最小値となり、有効径位置で最大値となる。すなわち、位置 p_{maxgi} は有効径位置であり、位置 p_{mingi} は光軸上の位置である

屈折率分布レンズ G_{gi2} において、 g 線と F 線に関する部分分散比は、光軸上で最大値となり、有効径位置で最小値となる。すなわち、 $gF(p_{max}) = gFR(0)$ 、 $gF(p_{min}) = gFR(r_{ea})$ である。 g 線と F 線に関する等価部分分散比は、光軸上で最小値となり、有効径位置で最大値となる。すなわち、位置 p_{maxgi} は有効径位置であり、位置 p_{mingi} は光軸上の位置である

実施例 2 の光学系に用いられた屈折率分布レンズ G_{gi1} の光入射側の面と光射出側の面が共に平面形状を有する。このため、雰囲気と媒質の界面での屈折力は実質的に無い。また、媒質の屈折力は負の屈折力を有している。 g 線と F 線における等価部分分散比は、一般的な光学材料と比較して小さい。また、ITO微粒子を分散させる媒質として、異常分散性を有する樹脂を使用している。これにより、等価部分分散比は、より異常分散性を有する。

屈折率分布レンズ G_{gi2} の光入射側の面と光射出側の面は共に曲面形状を有する。このため、雰囲気と媒質の境界において屈折力を有する。媒質の屈折力は正である。 g 線と F 線における等価部分分散比は、一般的な光学材料と比較して大きい。

【0126】

一般的な光学材料と比較して、等価部分分散比が小さい屈折率分布レンズと、等価部分分散比が大きい屈折率分布レンズの両者を用いることで、色収差をより良好に補正することが可能となる。

【0127】

実施例 2 の光学系は、開口絞り SP より物体側の屈折力が正で、像側の屈折力が負となるテレフォトタイプのパワー配置を有する。実施例 2 では、開口絞り SP よりも物体側での近軸軸上光線の通過位置が比較的高い、開口絞り SP よりも前方に配置された第 1 レンズユニット $L1$ に屈折率分布レンズ G_{gi1} 、 G_{gi2} を含ませることで、諸収差、特に色収差を良好に補正している。

【実施例 3】

【0128】

図 5 に示す実施例 3 (数値例 3) の光学系は、物体側から像側へ順に、正の屈折力を有する第 1 レンズユニット $L1$ と、負の屈折力を有する第 2 レンズユニット $L2$ と、正の屈折力を有する第 3 レンズユニット $L3$ とを有する。また、該光学系は、正の屈折力を有する第 4 レンズユニット $L4$ を有する。この光学系は、ズーム比が約 1.2 倍の 4 レンズユニット構成のズームレンズである。

【0129】

図 5 中の矢印は、広角端から望遠端へのズーミングの際の各レンズユニットの移動軌跡を示している。ズーミングに際して、各レンズユニットは、隣接するレンズユニット間の

間隔が変化するように移動する。また、第4レンズユニットL4はフォーカスのために光軸方向に移動する。この光学系は、倒立1回結像の縮小結像光学系である。

【0130】

実施例3では、第1レンズユニットL1に、屈折率分布レンズを用いている。屈折率分布レンズGgi1は、UV硬化樹脂1にITO微粒子を組成比率を変化させて分散させた媒質により形成されている。

【0131】

屈折率分布レンズGgi1は、径方向に屈折率が変化するラジアル屈折率分布レンズである。屈折率分布レンズGgi1の媒質は、UV硬化樹脂1に対して、ITO微粒子を、体積比で最大で3.34%、最小で0.0%分散させた混合体である。光軸から径方向にITO微粒子の組成比率が増加している。

このため、屈折率分布レンズGgi1において、g線とF線に関する部分分散比は、光軸上で最大値となり、有効径位置で最小値となる。すなわち、 $gF(p_{max}) = gFR(0)$ 、 $gF(p_{min}) = gFR(rea)$ である。g線とF線に関する等価部分分散比は、光軸上で最大値となり、有効径位置で最小値となる。位置 p_{maxgi} は光軸上の位置であり、位置 p_{mingi} は有効径位置である。

【0132】

実施例3の光学系に用いられた屈折率分布レンズGgi1の光入射側の面および光射出側の面は共に曲面形状を有する。屈折率分布レンズGgi1は、2つのレンズの間に配置され、それらレンズに密着接合されている。雰囲気と媒質の境界において屈折力を有する媒質の屈折力は負である。g線とF線における等価部分分散比は、一般的な光学材料と比較して小さい。

【0133】

実施例3では、ズームレンズを構成する各レンズユニットのうち、開口絞りSPよりも物体側において、望遠端において、近軸軸上光線の光軸からの通過位置が比較的高くなる第1レンズユニットL1に、屈折率分布レンズGgi1を含ませている。これにより、諸収差、特に色収差を良好に補正している。

【実施例4】

【0134】

図7に示す実施例4(数値例4)の光学系は、物体側から像側へ順に、負の屈折力を有する第1レンズユニットL1と、フォーカスのために光軸方向に移動する負の屈折力を有する第2レンズユニットL2とを有する。また、該光学系は、フォーカスのために光軸方向に移動する正の屈折力を有する第3レンズユニットL3を有する。

【0135】

実施例4の光学系は、焦点距離が約24mmの広角レンズであり、フローティングを利用した倒立1回結像の縮小結像光学系である。

【0136】

実施例4では、第3レンズユニットL3に屈折率分布レンズを用いている。屈折率分布レンズGgi1は、UV硬化樹脂1にTiO₂微粒子を組成比率を変化させて分散させた媒質により形成されている。

【0137】

屈折率分布レンズGgi1は、径方向に屈折率が変化するラジアル屈折率分布レンズである。屈折率分布レンズGgi1の媒質は、UV硬化樹脂1に対して、TiO₂微粒子を、体積比で最大で20.0%、最小で10.8%分散させた混合体である。光軸から径方向にTiO₂微粒子の組成比率が減少している。

このため、屈折率分布レンズGgi1において、g線とF線に関する部分分散比は、光軸上で最大値となり、有効径位置で最小値となる。すなわち、 $gF(p_{max}) = gFR(0)$ 、 $gF(p_{min}) = gFR(rea)$ である。g線とF線に関する等価部分分散比は、光軸上で最小値となり、有効径位置で最大値となる。すなわち、位置 p_{maxgi} は有効径位置であり、位置 p_{mingi} は光軸上の位置である。

【0138】

実施例4の光学系に用いられた屈折率分布レンズGgi1の光入射側の面と光射出側の面は共に曲面形状を有する。該屈折率分布レンズGgi1は、他のレンズに接合されている。このため、雰囲気と媒質の境界において屈折力を有する。媒質の屈折力は正である。g線とF線における等価部分分散比は、一般的な光学材料と比較して大きい。

【0139】

実施例4では、光学系を構成する各レンズユニットのうち、開口絞りSPよりも像側の第3レンズユニットL3に屈折率分布レンズGgi1を含ませている。これにより、諸収差、特に色収差を良好に補正している。

【実施例5】

10

【0140】

図9に示す実施例5（数値例5）の光学系は、物体側から像側へ順に、正の屈折力を有する第1レンズユニットL1と、正の屈折力を有する第2レンズユニットL2とにより構成されている。この光学系は、焦点距離が51mmのガウスタイプの倒立1回結像の縮小光学系である。

【0141】

実施例5では、第1レンズユニットL1および第2レンズユニットL2のそれぞれに、屈折率分布レンズを1つずつ用いている。第1レンズユニットL1内の屈折率分布レンズGgi1および第2レンズユニットL2の屈折率分布レンズGgi2はいずれも、UV硬化樹脂1にTiO₂微粒子を組成比率を変化させて分散させた媒質により形成されている。

20

【0142】

屈折率分布レンズGgi1および屈折率分布レンズGgi2は、径方向に屈折率が変化するラジアル屈折率分布レンズである。屈折率分布レンズGgi1の媒質は、UV硬化樹脂1に対して、TiO₂微粒子を、体積比で最大で10.0%、最小で0.28%分散させた混合体である。屈折率分布レンズGgi2の媒質は、UV硬化樹脂1に対して、TiO₂微粒子を、体積比で最大で20.0%、最小で2.74%分散させた混合体である。いずれの屈折率分布レンズでも、光軸から径方向にTiO₂微粒子の組成比が減少している。

このため、屈折率分布レンズGgi1において、g線とF線に関する部分分散比は、光軸上で最大値となり、有効径位置で最小値となる。すなわち、 $g_F(p_{max}) = g_{FR}(0)$ 、 $g_F(p_{min}) = g_{FR}(rea)$ である。g線とF線に関する等価部分分散比は、光軸上で最小値となり、有効径位置で最大値となる。すなわち、位置 p_{maxgi} は有効径位置であり、位置 p_{mingi} は光軸上の位置である。

30

また、屈折率分布レンズGgi2においても、g線とF線に関する部分分散比は、光軸上で最大値となり、有効径位置で最小値となる。すなわち、 $g_F(p_{max}) = g_{FR}(0)$ 、 $g_F(p_{min}) = g_{FR}(rea)$ である。g線とF線に関する等価部分分散比は、光軸上で最大値となり、有効径位置で最小値となる。すなわち、位置 p_{maxgi} は光軸上の位置であり、位置 p_{mingi} は有効径位置である。

【0143】

40

実施例5に適用した屈折率分布レンズGgi1および屈折率分布レンズGgi2の光入射側の面と光射出側の面は共に平面形状を有する。このため、雰囲気と媒質の界面での屈折力は実質的に無い。また、媒質の屈折力は正である。g線とF線における等価部分分散比は、一般的な光学材料と比較して大きい。

【0144】

一般的な光学材料と比較して、異常分散性を有する屈折率分布レンズを開口絞りSPより物体側および像側の両者に用いることにより、ガウスタイプの光学系では収差、特に色収差を良好に補正することが可能となる。

【実施例6】

【0145】

50

図 1 1 に示す実施例 6 (数値例 6) の光学系は、物体側から像側へ順に、正の屈折力を有する第 1 レンズユニット L 1 と、正の屈折力を有する第 2 レンズユニット L 2 とにより構成されている。この光学系は、焦点距離が 5 1 m m のガウスタイプの倒立 1 回結像の縮小光学系である。

【 0 1 4 6 】

実施例 6 では、第 2 レンズユニット L 2 に屈折率分布レンズを用いている。屈折率分布レンズ G g i 1 は、無機ガラス 1 1 に、I T O 微粒子を組成比率を変化させて分散させた媒質により形成されている。

【 0 1 4 7 】

屈折率分布レンズ G g i 1 は、径方向に屈折率が変化するラジアル屈折率分布レンズである。屈折率分布レンズ G g i 1 の媒質は、無機ガラス 1 1 に対して、I T O 微粒子を、体積比で最大で 2 . 3 %、最小で 0 . 0 % 分散させた混合体である。光軸から径方向に I T O 微粒子の組成比率が増加している。

屈折率分布レンズ G g i 1 において、g 線と F 線に関する部分分散比は、光軸上で最大値となり、有効径位置で最小値となる。すなわち、 $g F (p m a x) = g F R (0)$, $g F (p m i n) = g F R (r e a)$ である。g 線と F 線に関する等価部分分散比は、光軸上で最大値となり、有効径位置で最小値となる。すなわち、位置 $p m a x g i$ は光軸上の位置であり、位置 $p m i n g i$ は有効径位置である。

【 0 1 4 8 】

実施例 6 の光学系に使用された屈折率分布レンズ G g i 1 の光入射側の面と光射出側の面は共に平面形状を有する。このため、雰囲気と媒質の界面での屈折力は実質的に無い。また、媒質の屈折力は負である。g 線と F 線における等価部分分散比は、一般的な光学材料と比較して小さい。

【 0 1 4 9 】

一般的な光学材料と比較して、異常分散性を有する屈折率分布レンズを用いることにより、ガウスタイプの光学系では、諸収差、特に色収差を良好に補正することが可能となる。

【 実施例 7 】

【 0 1 5 0 】

図 1 3 に示す実施例 7 (数値例 7) の光学系は、物体側から像側へ順に、フォーカスに際して不動である正の屈折力を有する第 1 レンズユニット L 1 と、フォーカスのために光軸方向に移動する負の屈折力を有する第 2 レンズユニット L 2 とを有する。また、フォーカスに際して不動である負の屈折力を有する第 3 レンズユニット L 3 を有する。この光学系は倒立 1 回結像の縮小結像光学系である。

【 0 1 5 1 】

実施例 7 の光学系は、焦点距離が 2 9 4 m m、望遠比が 0 . 8 1 6 の望遠レンズである。

【 0 1 5 2 】

実施例 7 では、第 1 レンズユニット L 1 に、無機ガラス 1 1 に T i O ₂ 微粒子を組成比率を変化させて分散させた媒質により形成された屈折率分布レンズ G g i 1 を用いている。

【 0 1 5 3 】

屈折率分布レンズ G g i 1 は、径方向に屈折率が変化するラジアル屈折率分布レンズである。屈折率分布レンズ G g i 1 の媒質は、無機ガラス 1 1 に対して、T i O ₂ 微粒子を、体積比で最大で 1 5 . 0 %、最小で 0 . 0 % 分散させた混合体である。光軸から径方向に T i O ₂ 微粒子の組成比が減少している。

屈折率分布レンズ G g i 1 において、g 線と F 線に関する部分分散比は、光軸上で最大値となり、有効径位置で最小値となる。すなわち、 $g F (p m a x) = g F R (0)$, $g F (p m i n) = g F R (r e a)$ である。g 線と F 線に関する等価部分分散比は、光軸上で最小値となり、有効径位置で最大値となる。すなわち、位置 $p m a x g i$ は有

10

20

30

40

50

効径位置であり、位置 $p_{min\ g\ i}$ は光軸上の位置である。

【0154】

実施例7の光学系に用いた屈折率分布レンズ $G\ g\ i\ 1$ の光入射側の面と光射出側の面は共に平面形状を有する。このため、雰囲気と媒質の界面での屈折力は実質的に無い。また、媒質の屈折力は正である。 g 線と F 線における等価部分分散比は、一般的な光学材料と比較して大きい。

【0155】

実施例7の光学系は、開口絞り $S\ P$ よりも物体側の屈折力が正、像側の屈折力が負であるテレフォトタイプのパワー配置を有する。本実施例では、開口絞り $S\ P$ よりも物体側にて近軸軸上光線の通過位置が比較的高い、開口絞り $S\ P$ よりも前方に配置された第1レン

10

【実施例8】

【0156】

図15に示す実施例8(数値例8)の光学系は、物体側から像側へ順に、フォーカスに際して不動である正の屈折力を有する第1レンズユニット $L\ 1$ と、フォーカスのために光軸方向に移動する負の屈折力を有する第2レンズユニット $L\ 2$ とを有する。また、該光学系は、フォーカスに際して不動である負の屈折力を有する第3レンズユニット $L\ 3$ を有する。この光学系は倒立1回結像の縮小結像光学系である。

【0157】

20

実施例8の光学系は、焦点距離が294mm、望遠比が0.816の望遠レンズである。

【0158】

本実施例では、第1レンズユニット $L\ 1$ に、アクリル樹脂 31 に TiO_2 微粒子を組成比率を変化させて分散させた媒質により形成された屈折率分布レンズ $G\ g\ i\ 1$ を用いている。

【0159】

屈折率分布レンズ $G\ g\ i\ 1$ は、光軸方向に屈折率が変化するアキシャル屈折率分布レンズである。屈折率分布レンズ $G\ g\ i\ 1$ の媒質は、アクリル樹脂 31 に対して、 TiO_2 微粒子を、体積比で最大で6.96%、最小で0.0%分散させた混合体である。光軸方向

30

の物体側から像側に TiO_2 微粒子の組成比率が増加している。
屈折率分布レンズ $G\ g\ i\ 1$ において、 g 線と F 線に関する部分分散比は、最も物体側で最小値となり、最も像側で最大値となる。すなわち、 $g\ F(p_{max}) = g\ F A(t_{img})$, $g\ F(p_{min}) = g\ F A(t_{obj})$ である。 g 線と F 線に関する等価部分分散比は、最も物体側で最大値となり、最も像側で最小値となる。すなわち、位置 $p_{max\ g\ i}$ は最も物体側の位置であり、位置 $p_{min\ g\ i}$ は最も像側の位置である。

【0160】

実施例8の光学系に用いられた屈折率分布レンズ $G\ g\ i\ 1$ の光入射側の面と光射出側の面は共に曲面形状を有する。このため、雰囲気と媒質の界面での屈折力を有する。また、媒質の屈折力は正である。 g 線と F 線における等価部分分散比は、一般的な光学材料と比較して大きい。

40

【0161】

実施例8の光学系は、開口絞り $S\ P$ より物体側の屈折力が正で、像側の屈折力が負であるテレフォトタイプのパワー配置を有する。本実施例では、開口絞り $S\ P$ よりも物体側にて近軸軸上光線の通過位置が比較的高い、開口絞り $S\ P$ よりも前方に配置された第1レン

【実施例9】

【0162】

図17に示す実施例9(数値例9)の光学系は、物体側から像側へ順に、フォーカスに

50

際して不動である正の屈折力を有する第1レンズユニットL1と、フォーカスのために光軸方向に移動する負の屈折力を有する第2レンズユニットL2とを有する。また、該光学系は、フォーカスに際して不動である負の屈折力を有する第3レンズユニットL3を有する。この光学系は倒立1回結像の縮小結像光学系である。

【0163】

実施例9の光学系は、焦点距離が294mm、望遠比が0.816の望遠レンズである。

【0164】

実施例9では、第1レンズユニットL1に、無機ガラス11にITO微粒子を組成比率を変化させて分散させた媒質により形成された屈折率分布レンズGgi1を用いている。

10

【0165】

屈折率分布レンズGgi1は、光軸方向に屈折率が変化するアキシャル屈折率分布レンズである。屈折率分布レンズGgi1の媒質は、無機ガラス11に対して、ITO微粒子を、体積比で最大で10.0%、最小で2.78%分散させた混合体である。光軸方向の物体側から像側にITO微粒子の組成比率が減少している。

屈折率分布レンズGgi1において、g線とF線に関する部分分散比は、最も物体側で最小値となり、最も像側で最大値となる。すなわち、 $gF(p_{max}) = gFA(t_{img})$ 、 $gF(p_{min}) = gFA(t_{obj})$ である。g線とF線に関する等価部分分散比は、最も物体側で最小値となり、最も像側で最大値となる。すなわち、位置 p_{maxgi} は最も像側の位置であり、位置 p_{mingi} は最も物体側の位置である。

20

【0166】

実施例9の光学系に用いられた屈折率分布レンズGgi1の光入射側の面と光射出側の面は共に曲面形状を有する。このため、雰囲気と媒質の界面での屈折力を有する。また、媒質の屈折力は負である。g線とF線における等価部分分散比は、一般的な光学材料と比較して小さい。

【0167】

実施例9の光学系は、開口絞りSPより物体側の屈折力が正で、像側の屈折力が負であるテレフォトタイプのパワー配置を有する。実施例9では、開口絞りSPよりも物体側にて近軸軸上光線の通過位置が比較的高い、開口絞りSPよりも前方に配置された第1レンズユニットL1に屈折率分布レンズGgi1を含ませている。これにより、諸収差、特に色収差を良好に補正している。

30

【実施例10】

【0168】

図19に示す実施例10(数値例10)の光学系は、物体側から像側へ順に、正の屈折力を有する第1レンズユニットL1と、正の屈折力を有する第2レンズユニットL2とにより構成されている。この光学系は、焦点距離が51mmのガウスタイプの倒立1回結像の縮小光学系である。

【0169】

実施例10では、第2レンズユニットL2に屈折率分布レンズGgi1を用いている。屈折率分布レンズGgi1は、UV硬化樹脂1にITO微粒子を組成比率を変化させて分散させた媒質により形成されている。

40

【0170】

屈折率分布レンズGgi1は、光軸方向に屈折率が変化するアキシャル屈折率分布レンズである。屈折率分布レンズGgi1の媒質は、UV硬化樹脂1に対して、ITO微粒子を、体積比で最大で12.0%、最小で6.24%分散させた混合体である。光軸方向の物体側から像側にITO微粒子の組成比率が減少している。

屈折率分布レンズGgi1において、g線とF線に関する部分分散比は、最も物体側で最小値となり、最も像側で最大値となる。すなわち、 $gF(p_{max}) = gFA(t_{img})$ 、 $gF(p_{min}) = gFA(t_{obj})$ である。g線とF線に関する等価部

50

分散比は、最も物体側で最小値となり、最も像側で最大値となる。すなわち、位置 $p_{max} \times g_i$ は最も像側の位置であり、位置 $p_{min} \times g_i$ は最も物体側の位置である。

実施例 10 の光学系に用いられた屈折率分布レンズ G_{gi1} の光入射側の面と光射出側の面は共に曲面形状を有する。このため、雰囲気と媒質の界面での屈折力を有する。また、媒質の屈折力は負である。g 線と F 線における等価部分分散比は、一般的な光学材料と比較して小さい。

【0171】

一般的な光学材料と比較して、異常分散性を有する屈折率分布レンズ G_{gi1} を適用することにより、ガウスタイプの光学系で諸収差、特に色収差を良好に補正することが可能となる。

10

【0172】

なお、上記条件 (1) ~ (4) を満足する屈折率分布レンズは、実施例 1 ~ 10 の光学系に限らず、種々の光学系に用いることができる。

【0173】

以下、各実施例 (数値例) の具体的な数値データを示す。各実施例において、 i は物体側から数えた面の番号を示す。 R_i は i 番目の光学面 (第 i 面) の曲率半径であり、 D_i は第 i 面と第 $(i+1)$ 面との間の軸上間隔である。

【0174】

N_{di} , d_i はそれぞれ、 d 線に対する i 番目の光学部材の材料の屈折率、アッベ数を表す。 i 番目の光学部材が屈折率分布レンズの場合は、 N_{gi} , d_{gi} と表記し、屈折率分布の波長分散については別途表記する。

20

【0175】

また、非球面形状は、 X を光軸方向の面頂点からの変位量とし、 h を光軸に直交する方向の光軸からの高さとし、 r を近軸曲率半径とし、 k を円錐定数とし、 B, C, D, E, \dots を各次数の非球面係数とすると、

【0176】

【数 3】

$$x(h) = \frac{(1/r)h^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)(h/r^2)^2}} + Bh^4 + Ch^6 + Dh^8 + Eh^{10} + \dots$$

30

【0177】

で表す。

【0178】

なお、各数値における「 $E \pm XX$ 」は「 $\times 10^{\pm XX}$ 」を意味する。

【0179】

屈折率分布レンズで使用した光学材料の d 線、 g 線、 C 線、 F 線における屈折率、アッベ数および部分分散比等の数値を表 11 に示す。また、各実施例の屈折率分布の材料特性を表 12 に示す。

【0180】

40

各実施例においては、屈折率分布を以下の式で近似している。

ラジアル屈折率分布

【0181】

【数 4】

$$n_{r\lambda}(r) = N_{r\lambda 0} + N_{r\lambda 2}r^2 + N_{r\lambda 4}r^4$$

【0182】

アキシヤル屈折率分布

【0183】

【数 5】

$$n_{a\lambda}(z) = N_{a\lambda 0} + N_{a\lambda 1}z + N_{a\lambda 2}z^2$$

【0184】

なお、屈折率分布の近似式は上式に限定されるわけではなく、任意の近似式を用いることが可能である。

【0185】

各実施例においては、屈折率分布特性として、d線、g線、C線、F線およびe線（546.1nm）での屈折率分布の近似式の係数を記載する。

【0186】

10

【表 1】

(数値実施例1)

焦点距離	294.00
Fナンバー	4.06
画角	4.29
像高	21.64
レンズ全長	236.3
BF	87.1

面番号	曲率半径	面間隔	Nd	ν_d	有効径
1	∞	1.64	Ng1	ν_{dgi}	71.27
2	∞	0.15			71.28
3	179.203	9.58	1.48749	70.2	71.31
4	-152.401	0.18			71.08
5	121.218	6.02	1.57250	57.7	67.04
6	821.892	3.70			66.08
7	-193.280	3.40	1.88300	40.8	65.93
8	597.468	18.01			64.50
9	77.656	7.50	1.48749	70.2	58.02
10	15272.385	9.94			57.16
11	64.136	3.89	1.75520	27.5	47.22
12	48.246	10.84			43.82
13(絞り)	∞	0.00			40.36
14	∞	4.00			40.86
15	436.492	4.00	1.80518	25.4	38.00
16	-78.435	2.00	1.88300	40.8	37.57
17	81.708	20.94			35.74
18	176.844	1.60	1.68893	31.1	32.62
19	29.305	8.40	1.65160	58.5	31.69
20	-76.744	2.35			31.38
21	39.723	7.01	1.85026	32.3	27.93
22	-47.520	1.50	1.83481	42.7	26.87
23	26.468	4.55			24.15
24	-51.428	1.50	1.75500	52.3	24.16
25	109.994	5.51			25.01
26	63.080	7.00	1.54814	45.8	29.00
27	-31.278	4.00	1.88300	40.8	29.34
28	-54.605				31.21

20

30

40

屈折率分布特性

第1面	g線	F線	e線	d線	C線
Nr0	1.53706	1.53133	1.52658	1.52415	1.52116
Nr2	1.7900E-05	1.6206E-05	1.4459E-05	1.3327E-05	1.1386E-05
Nr4	-1.0212E-10	-8.4178E-11	-6.7344E-11	-5.7378E-11	-4.2056E-11

【0187】

【表 2】

(数値実施例 2)

焦点距離	294.00
Fナンバー	4.14
画角	4.08
像高	21.64
レンズ全長	225.00
BF	83.12

面番号	r	d	nd	vd	有効径
1	∞		1.83 Ngi1	ν dgi1	71.24
2	∞		0.15		71.25
3	151.611	8.68	1.48749	70.2	71.28
4	-186.059	2.00	Ngi2	ν dgi2	71.12
5*	-180.567	0.15			70.85
6	107.280	6.34	1.48749	70.2	66.83
7	569.990	7.91			65.82
8	-204.577	3.40	1.85026	32.3	62.51
9	403.377	1.11			60.98
10	67.565	7.88	1.48749	70.2	59.09
11	503.354	12.32			58.14
12	51.880	3.00	1.67003	47.2	46.31
13	39.579	10.27			43.11
14(絞り)	∞	4.00			40.63
15	186.289	4.00	1.75520	27.5	38.00
16	-102.544	2.00	1.88300	40.8	37.50
17	81.708	28.25			35.61
18	141.821	2.35	1.80809	22.8	29.34
19	33.233	6.77	1.63930	44.9	28.29
20	-74.880	0.15			28.39
21	64.467	6.80	1.85026	32.3	28.00
22	-51.309	2.21	1.73400	51.5	27.06
23	27.021	6.97			24.74
24	-35.482	1.50	1.62041	60.3	25.02
25	-5499.714	2.04			26.48
26	57.920	7.00	1.56732	42.8	29.00
27	-28.967	2.80	1.88300	40.8	29.23
28	-55.832				30.82

非球面データ

	k	B	C	D	E
第5面	3.6672E-03	-7.9527E-11	-7.7244E-14	2.5256E-16	-5.2268E-20

屈折率分布特性

第1面	g線	F線	e線	d線	C線
Nr0	1.67532	1.65604	1.64203	1.63555	1.62807
Nr2	1.1152E-05	1.0214E-05	9.0136E-06	8.1409E-06	6.5273E-06
Nr4	-3.6686E-11	-3.1159E-11	-2.4500E-11	-2.0083E-11	-1.2992E-11
第4面	g線	F線	e線	d線	C線
Nr0	1.57249	1.56326	1.55650	1.55324	1.54936
Nr2	-2.7862E-05	-2.5129E-05	-2.3564E-05	-2.2918E-05	-2.2218E-05
Nr4	-2.5493E-10	-2.0797E-10	-1.8335E-10	-1.7367E-10	-1.6351E-10

【 0 1 8 8 】

10

20

30

【表 3】

(数値実施例 3)

	広角	中間	望遠
ズーム比	11.59		
焦点距離	6.15	20.45	71.28
Fナンバー	2.73	3.40	3.08
画角	31.63	10.59	3.30
像高	3.60	3.60	3.60
レンズ全長	82.44	86.28	90.00
BF	10.70	13.87	8.03
d6	0.80	18.16	31.50
d12	27.74	13.60	1.35
d13	6.59	1.20	3.46
d19	1.10	1.27	6.86

面番号	r	d	nd	vd	有効径
1	84.187	2.18	1.85026	32.3	30.53
2	31.281	1.76	Ng1	ν dgi	28.98
3	32.572	4.94	1.48749	70.2	28.81
4	-193.412	0.15			28.72
5	31.897	2.87	1.74100	52.6	27.95
6	203.162	(可変)			27.89
7	56.434	0.90	1.83481	42.7	16.97
8	8.593	4.02			13.25
9	-29.285	0.75	1.55880	62.5	13.20
10	28.445	0.70			13.18
11	15.945	1.79	1.92286	18.9	13.55
12	35.607	(可変)			13.26
13(絞り)	∞	(可変)			6.33
14*	7.231	3.05	1.55880	62.5	9.00
15	-83.843	2.17			8.60
16	63.445	0.70	1.85026	32.3	8.10
17	7.087	0.88			7.90
18	23.759	1.70	1.75500	52.3	8.10
19	-63.787	(可変)			8.40
20	14.419	2.70	1.73400	51.5	9.78
21	-13.058	0.80	1.67270	32.1	9.62
22	51.544				9.19

非球面データ

	k	B	C	D	E
第14面	-4.5356E-01	-5.6922E-05	-3.1787E-07	-1.0665E-08	1.7447E-10

屈折率分布特性

第2面	g線	F線	e線	d線	C線
Nr0	1.53706	1.53133	1.52658	1.52415	1.52117
Nr2	7.1670E-05	6.4709E-05	5.7655E-05	5.3288E-05	4.5630E-05
Nr4	-1.5449E-09	-1.2729E-09	-1.0211E-09	-8.7763E-10	-6.5006E-10

【 0 1 8 9 】

【表 4】

(数値実施例 4)

焦点距離	24.48
Fナンバー	2.86
画角	38.26
像高	21.64
レンズ全長	92.00
BF	38.00

面番号	r	d	nd	vd	有効径
1	77.921	3.48	1.61800	63.3	43.52
2	269.364	0.15			42.04
3	39.103	1.00	1.83481	42.7	33.92
4	16.390	7.08			26.97
5	18.456	2.62	1.80809	22.8	23.10
6	25.750	4.09			21.88
7	19.071	0.90	1.83481	42.7	16.60
8	10.225	2.90			14.27
9	58.071	3.47	1.75520	27.5	13.95
10	-337.057	0.37			12.38
11	53.775	5.25	1.64769	33.8	11.62
12	26.907	2.43			12.14
13(絞り)	∞	1.52			13.09
14	40.640	4.72	1.77900	49.7	14.27
15	-17.532	2.93			14.60
16	-19.182	3.27	1.84887	23.9	12.84
17	41.402	1.09	Ngi	ν dgi	14.52
18	44.682	1.32			15.36
19	-68.757	2.62	1.62041	60.3	15.73
20	-18.094	0.15			16.80
21	-279.033	2.64	1.68385	55.1	19.03
22	-29.370				19.71

屈折率分布特性

第17面	g線	F線	e線	d線	C線
Nr0	1.75983	1.73307	1.71620	1.70874	1.70031
Nr2	-2.0780E-03	-1.8933E-03	-1.7858E-03	-1.7410E-03	-1.6922E-03
Nr4	-1.4874E-06	-1.2332E-06	-1.0974E-06	-1.0435E-06	-9.8649E-07

【 0 1 9 0 】

【表 5】

(数値実施例 5)

焦点距離	51.70
Fナンバー	1.39
画角	21.74
像高	21.64
レンズ全長	96.15
BF	37.50

面番号	r	d	nd	vd	有効径
1	59.72	4.13	1.77250	49.6	39.66
2	391.032	0.15			39.29
3	31.721	6.00	1.85026	32.3	36.73
4	48.687	1.12			33.95
5	67.751	2.50	1.76182	26.5	33.75
6	22.218	7.07			29.24
7	∞	0.42	Ng1	ν dgi1	29.02
8	∞	0.50			28.98
9(絞り)	∞	5.93			28.91
10	∞	1.64	Ng2	ν dgi2	28.03
11	∞	4.21			27.83
12	-26.100	1.20	1.78472	25.7	27.79
13	74.157	7.07	1.88300	40.8	30.60
14	-31.171	1.23			31.09
15	-25.794	1.20	1.67270	32.1	31.02
16	76.542	7.50	1.88300	40.8	35.20
17	-40.999	1.60			36.18
18*	218.520	5.18	1.77250	49.6	40.18
19	-62.802				40.60

非球面データ

	k	B	C	D	E
第18面	-7.1171E+01	-1.7154E-06	2.1331E-09	-7.5966E-12	6.8613E-15

屈折率分布特性

第7面	g線	F線	e線	d線	C線
Nr0	1.65222	1.63533	1.62417	1.61909	1.61323
Nr2	-4.9341E-04	-4.4706E-04	-4.2032E-04	-4.0924E-04	-3.9720E-04
Nr4	-8.1634E-08	-6.7083E-08	-5.9389E-08	-5.6351E-08	-5.3152E-08

第10面	g線	F線	e線	d線	C線
Nr0	1.75983	1.73307	1.71620	1.70874	1.70031
Nr2	-9.2358E-04	-8.4148E-04	-7.9369E-04	-7.7379E-04	-7.5211E-04
Nr4	-2.9380E-07	-2.4359E-07	-2.1677E-07	-2.0612E-07	-1.9486E-07

【 0 1 9 1 】

【表 6】

(数値実施例 6)

焦点距離	51.70
Fナンバー	1.30
画角	22.84
像高	21.64
レンズ全長	98.01
BF	37.51

面番号	r	d	nd	vd	有効径
1	71.208	3.78	1.78000	50.0	39.66
2	806.522	0.15			39.36
3	31.790	6.00	1.88123	37.9	36.94
4	47.156	1.06			34.14
5	62.790	2.37	1.64017	32.7	33.96
6	21.990	8.69			29.51
7(絞り)	∞	4.72			28.85
8	∞	5.00	Ngi	ν dgi	27.80
9	∞	4.34			27.10
10	-24.176	1.94	1.69192	29.8	27.05
11	159.530	8.50	1.88500	41.0	29.86
12	-32.556	0.72			31.19
13	-29.413	1.60	1.72810	27.1	31.12
14	-2008.000	5.55	1.84993	43.4	36.48
15	-42.000	0.15			37.57
16*	138.393	5.93	1.88500	41.0	42.53
17	-70.581				42.89

非球面データ

	k	B	C	D	E
第16面	-1.5812E+00	-1.4579E-06	1.8057E-09	-3.9492E-12	3.2039E-15

屈折率分布特性

第8面	g線	F線	e線	d線	C線
Nr0	1.52621	1.52191	1.51825	1.51633	1.51386
Nr2	5.5357E-05	5.0031E-05	4.4600E-05	4.1114E-05	3.5191E-05
Nr4	-9.4381E-10	-7.7741E-10	-6.2287E-10	-5.3196E-10	-3.9291E-10

【 0 1 9 2 】

【表 7】

(数値実施例 7)

焦点距離	293.99
Fナンバー	4.14
画角	3.64
像高	21.64
レンズ全長	240.00
BF	85.49

面番号	r	d	nd	vd	有効径
1	∞	1.29	Ng1	ν dgi	71.25
2	∞	0.15			71.25
3	186.219	9.35	1.51741	57.7	71.19
4	-157.573	0.15			70.92
5	120.851	6.18	1.57071	45.0	66.65
6	1149.692	3.49			65.65
7	-192.596	3.40	1.84441	26.1	65.47
8	278.314	19.83			63.56
9	72.730	9.42	1.51105	57.7	57.69
10	1636.856	11.26			56.03
11	66.222	3.00	1.62917	34.2	45.80
12	45.425	9.24			42.80
13(絞り)	∞	0.00			40.42
14	∞	4.00			40.92
15	190.555	3.75	1.75168	26.6	38.00
16	-117.898	2.00	1.88500	41.0	37.53
17	81.708	27.22			35.82
18	151.123	1.60	1.67146	30.8	30.82
19	29.394	8.40	1.64104	51.6	29.85
20	-75.901	2.75			29.33
21	53.249	5.11	1.87569	34.4	28.00
22	-52.435	1.50	1.83912	35.3	27.50
23	30.701	4.88			25.22
24	-41.375	1.50	1.71249	53.3	25.23
25	1198.107	4.03			26.25
26	81.507	7.00	1.65694	31.9	29.00
27	-28.732	4.00	1.85997	42.7	29.27
28	-78.725				30.97

屈折率分布特性

第1面	g線	F線	e線	d線	C線
Nr0	1.69859	1.67764	1.66436	1.65844	1.65165
Nr2	-1.2979E-04	-1.1784E-04	-1.1088E-04	-1.0798E-04	-1.0483E-04
Nr4	-5.7733E-09	-4.7534E-09	-4.2084E-09	-3.9922E-09	-3.7648E-09

【 0 1 9 3 】

【表 8】

(数値実施例 8)

焦点距離	294.00
Fナンバー	4.14
画角	3.86
像高	21.64
レンズ全長	239.98
BF	87.15

面番号	r	d	nd	vd	有効径
1	200.331	9.05	1.48749	70.2	71.21
2	-143.674	2.50	Ngi	ν dgi	71.04
3	-143.674	0.15			70.71
4	113.240	6.39	1.56384	60.7	66.37
5	976.586	3.93			65.37
6	-168.592	3.40	1.85026	32.3	65.21
7	583.173	27.68			63.69
8	76.220	7.56	1.48749	70.2	54.59
9	-607.692	6.13			53.75
10	71.492	3.00	1.59270	35.3	46.08
11	46.263	9.17			42.92
12(絞り)	∞	0.00			40.41
13	∞	4.00			40.88
14	288.232	3.55	1.80518	25.4	37.97
15	-108.993	2.00	1.88300	40.8	37.52
16	81.708	24.81			35.75
17	199.163	1.60	1.67270	32.1	31.03
18	26.710	8.39	1.63930	44.9	30.01
19	-71.592	0.15			29.65
20	38.018	5.77	1.85026	32.3	28.00
21	-55.937	1.50	1.80100	35.0	27.37
22	26.503	4.75			24.41
23	-48.399	1.50	1.88300	40.8	24.40
24	228.324	6.63			25.13
25	83.174	6.04	1.59270	35.3	29.00
26	-31.669	3.04	1.88300	40.8	29.21
27	-65.343				30.66

屈折率分布特性

第2面	g線	F線	e線	d線	C線
N0	1.50249	1.49774	1.49376	1.49172	1.48918
N1	1.2551E-02	1.1318E-02	1.0611E-02	1.0318E-02	1.0001E-02
N2	-4.6717E-05	-3.8498E-05	-3.4128E-05	-3.2395E-05	-3.0568E-05

【 0 1 9 4 】

【表 9】

(数値実施例 9)

焦点距離	294.01
Fナンバー	4.01
画角	4.33
像高	21.64
レンズ全長	240.00
BF	91.21

面番号	r	d	nd	vd	有効径
1	194.187	9.42	1.48700	70.4	71.24
2	-136.073	2.50	Ngi	ν dgi	71.08
3	-136.073	0.15			70.86
4	122.373	6.47	1.48700	70.4	66.54
5	5488.945	3.73			65.57
6	-160.312	3.40	1.86782	42.1	65.38
7	1072.228	20.89			64.13
8	68.432	10.00	1.48700	70.4	56.95
9	3376.375	6.95			55.10
10	59.172	3.81	1.61030	36.2	46.72
11	42.057	9.78			42.95
12(絞り)	∞	0.00			40.38
13	∞	4.00			40.85
14	390.620	3.97	1.81048	24.6	37.95
15	-81.171	2.00	1.88500	41.0	37.51
16	81.708	21.54			35.64
17	180.339	1.60	1.67769	30.4	32.00
18	29.357	8.40	1.62363	59.9	31.05
19	-74.633	0.60			30.71
20	36.090	5.39	1.86523	29.0	28.06
21	-80.670	1.50	1.77045	40.7	27.33
22	25.016	4.59			24.42
23	-62.468	1.50	1.84013	44.2	24.41
24	90.892	6.62			24.96
25	61.999	6.43	1.55093	45.6	29.00
26	-32.050	3.41	1.88500	41.0	29.19
27	-64.132				30.73

屈折率分布特性

第2面	g線	F線	e線	d線	C線
Na0	1.57195	1.56330	1.55520	1.55042	1.54308
Na1	-4.5064E-03	-4.0836E-03	-3.6504E-03	-3.3711E-03	-2.8944E-03
Na2	-6.7526E-06	-5.5530E-06	-4.4417E-06	-3.7894E-06	-2.7936E-06

【 0 1 9 5 】

【表 10】

(数値実施例 10)

焦点距離	51.70
Fナンバー	1.30
画角	22.79
像高	21.64
レンズ全長	98.00
BF	37.50

面番号	r	d	nd	vd	有効径
1	62.246	3.90	1.78000	50.0	39.66
2	352.986	0.15			39.31
3	31.116	6.00	1.87156	31.7	36.86
4	42.057	0.98			33.78
5	52.521	2.50	1.72943	27.0	33.61
6	21.957	8.63			29.36
7(絞り)	∞	12.69			28.83
8*	-23.658	1.40	Ngi	ν dgi	27.37
9	-27.571	1.20	1.63827	32.8	28.13
10	106.839	8.38	1.88500	41.0	30.76
11	-31.867	0.89			31.88
12	-28.313	1.20	1.70124	28.5	32.01
13	263.741	6.70	1.88500	41.0	38.48
14	-42.979	0.15			39.45
15*	155.935	5.74	1.78000	50.0	43.31
16	-72.370	(可変)			43.63

非球面データ

	k	B	C	D	E
第8面	4.5161E-02	1.0357E-07	-6.0253E-10	4.8928E-12	1.9565E-14
第15面	-4.6127E+00	-1.6205E-06	1.9989E-09	-4.9032E-12	3.8956E-15

屈折率分布特性

	e線	F線	e線	d線	C線
第8面					
Na0	1.59016	1.57948	1.56961	1.56385	1.55515
Na1	-5.2200E-03	-4.7405E-03	-4.2430E-03	-3.9192E-03	-3.3607E-03
Na2	-9.0168E-06	-7.4529E-06	-5.9798E-06	-5.1045E-06	-3.7538E-06

【0196】

【表 11】

	UV硬化樹脂1	UV硬化樹脂2	無機ガラス1	アクリル樹脂1	ITO	TiO2
Nd	1.5241	1.6356	1.5163	1.4917	1.8571	2.3038
Ng	1.5371	1.6753	1.5262	1.5025	1.9924	2.4568
NC	1.5212	1.6281	1.5139	1.4892	1.7979	2.2803
NF	1.5313	1.6560	1.5219	1.4977	1.9487	2.3745
ν d	51.55	22.78	64.14	57.44	5.69	13.84
θ gd	1.2695	1.4229	1.2273	1.2570	0.8976	1.6241
θ gF	0.5631	0.6918	0.5342	0.5537	0.2901	0.8731
$\Delta \theta$ gd	0.0195	0.0838	-0.0012	0.0181	-0.5287	0.2430
$\Delta \theta$ gF	0.0111	0.0677	-0.0014	0.0104	-0.4072	0.2141

【0197】

【表 1 2】

	実施例1	実施例2①	実施例2②	実施例3	実施例4
rea	35.64	35.62	35.56	14.49	7.26
$\theta_{gF(0)}$	0.5631	0.6895	0.6645	0.5631	0.8168
$\theta_{gF(rea)}$	0.4838	0.6274	0.5623	0.5072	0.7598
$ \theta_{gF(rea)} - \theta_{gF(0)} $	0.0793	0.0621	0.1022	0.0559	0.0570
$\nu_{dgiR(rea)}$	2.781	2.215	7.798	2.803	8.389
$\theta_{gdgi(rea)}$	0.9474	0.8161	1.7006	0.9627	1.6835
$\theta_{gFgi(rea)}$	0.3505	0.2541	0.9409	0.3643	0.9254
$\theta_{gFgi(pmingi)}$	0.3502	0.2530	0.9389	0.3655	0.9186
$ \theta_{gFgi(pmaxgi)} - \theta_{gFgi(pmingi)} $	0.0003	0.0011	0.0020	0.0012	0.0068
$\Delta \theta_{gdgi(rea)}$	-0.4967	-0.6315	0.2867	-0.4812	0.2730
$\Delta \theta_{gFgi(rea)}$	-0.3619	-0.4614	0.2541	-0.3480	0.2415
$ \Delta \theta_{gFs} - \Delta \theta_{gFm} $	0.4183	0.4749	0.2029	0.4183	0.2029

10

	実施例5①	実施例5②	実施例6	実施例7
rea	14.51	14.02	13.90	35.63
$\theta_{gF(0)}$	0.7646	0.8168	0.5342	0.8059
$\theta_{gF(rea)}$	0.5912	0.6527	0.4882	0.5257
$ \theta_{gF(rea)} - \theta_{gF(0)} $	0.1734	0.1641	0.0459	0.2803
$\nu_{dgiR(rea)}$	7.976	8.230	2.778	7.921
$\theta_{gdgi(rea)}$	1.6951	1.6879	0.9593	1.6869
$\theta_{gFgi(rea)}$	0.9359	0.9294	0.3586	0.9279
$\theta_{gFgi(pmingi)}$	0.9292	0.9185	0.3593	0.9181
$ \theta_{gFgi(pmaxgi)} - \theta_{gFgi(pmingi)} $	0.0067	0.0109	0.0007	0.0098
$\Delta \theta_{gd(rea)}$	0.2822	0.2765	-0.4848	0.2737
$\Delta \theta_{gF(rea)}$	0.2499	0.2447	-0.3539	0.2417
$ \Delta \theta_{gFs} - \Delta \theta_{gFm} $	0.2029	0.2029	0.4058	0.2154

20

	実施例8	実施例9	実施例10
$ \text{timg-iobj} $	6.96	7.22	5.76
$\theta_{gF(tobj)}$	0.5540	0.4277	0.4387
$\theta_{gF(img)}$	0.7511	0.4812	0.4830
$ \theta_{gF(tobj)} - \theta_{gF(timg)} $	0.1971	0.0534	0.0443
$\nu_{dgiA(timg)}$	7.861	2.831	2.836
$\theta_{gdgi(timg)}$	1.6957	0.9549	0.9430
$\theta_{gFgi(timg)}$	0.9365	0.3557	0.3477
$\theta_{gFgi(pmingi)}$	0.9371	0.3555	0.3475
$ \theta_{gFgi(pmaxgi)} - \theta_{gFgi(pmingi)} $	0.0006	0.0002	0.0002
$\Delta \theta_{gd(timg)}$	0.2822	-0.4888	-0.5007
$\Delta \theta_{gF(timg)}$	0.2500	-0.3565	-0.3645
$ \Delta \theta_{gFs} - \Delta \theta_{gFm} $	0.2037	0.4058	0.4183

【実施例 1 1】

30

【0 1 9 8】

次に上記各実施例に示した光学系を撮影光学系として用いたデジタルスチルカメラ（光学機器）を図 2 2 を用いて説明する。

【0 1 9 9】

図 2 2 において、2 0 はカメラ本体である。2 1 は各実施例で説明した光学系によって構成された撮影光学系である。2 2 はカメラ本体 2 0 に内蔵され、撮影光学系 2 1 によって形成された被写体像を光電変換する CCD センサや CMOS センサ等の固体撮像素子（光電変換素子）である。

【0 2 0 0】

2 3 は固体撮像素子 2 2 によって光電変換された被写体像に対応する画像情報を記録するメモリである。2 4 は液晶ディスプレイパネル等によって構成され、固体撮像素子 2 2 上に形成された被写体像（つまりは画像情報）を観察するためのファインダである。

40

【0 2 0 1】

このように各実施例の光学系をデジタルスチルカメラに適用することにより、小型で高い光学性能を有するカメラを実現することができる。

以上説明した各実施例は代表的な例にすぎず、本発明の実施に際しては、各実施例に対して種々の変形や変更が可能である。

【産業上の利用可能性】

【0 2 0 2】

諸収差を良好に補正できる屈折率分布光学素子とこれを用いた光学機器を提供できる。

50

【符号の説明】

【 0 2 0 3 】

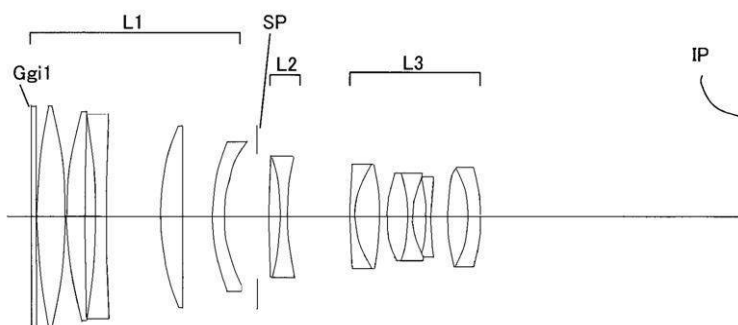
G g i j 屈折率分布レンズ

I P 像面

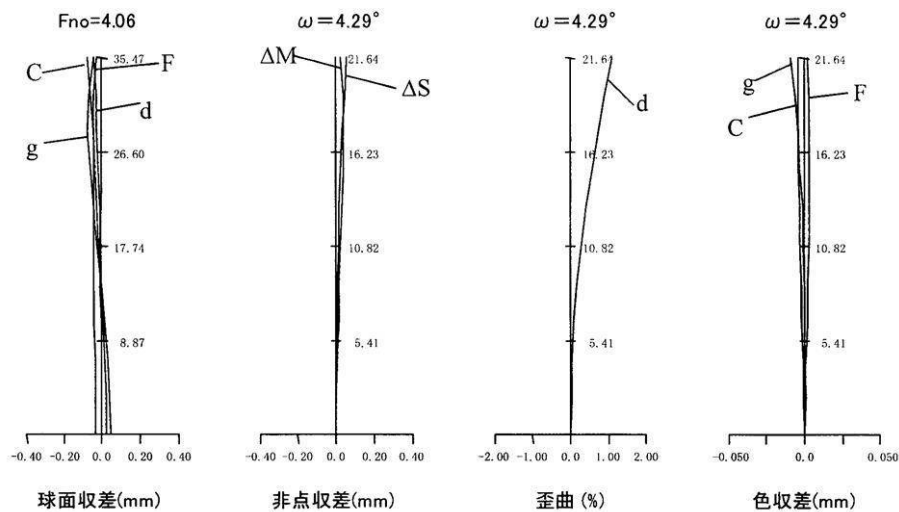
M メリディオナル像面

S サジタル像面

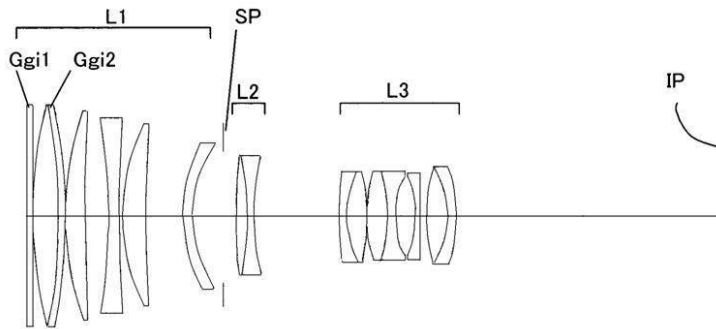
【 図 1 】



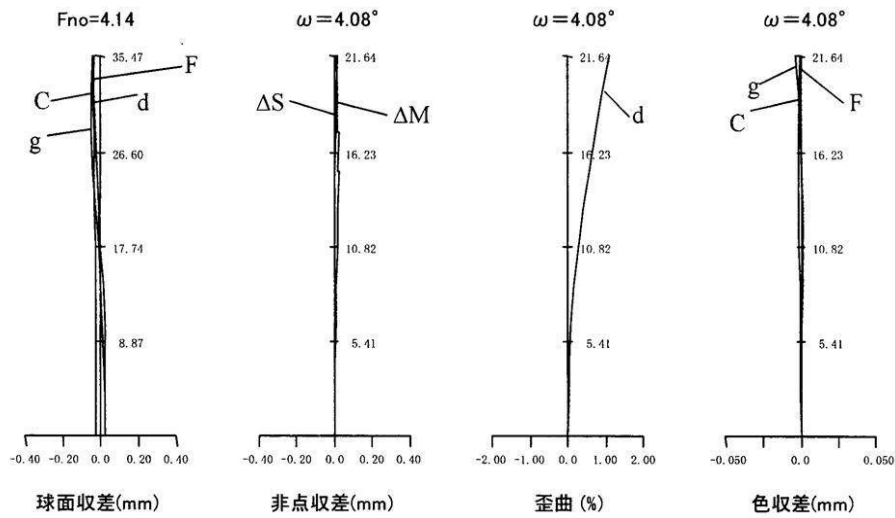
【 図 2 】



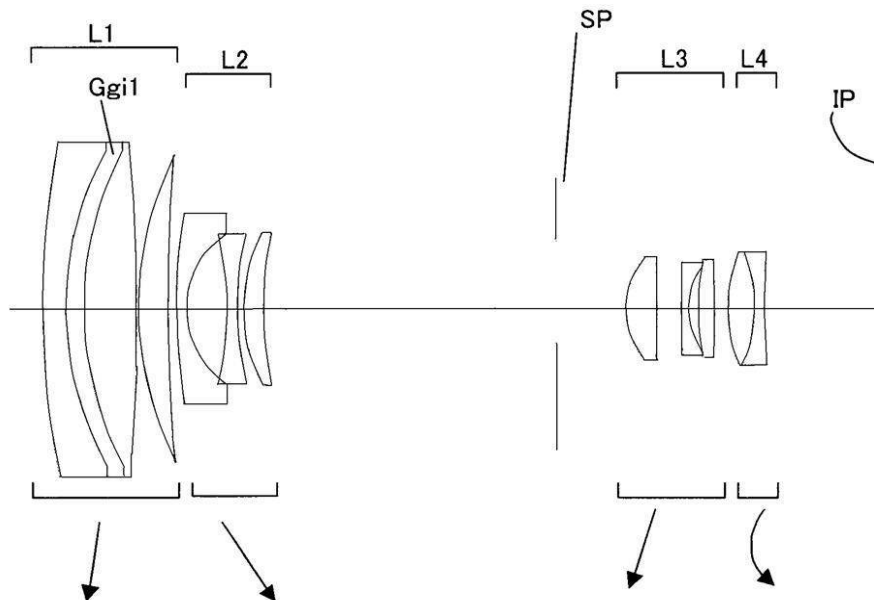
【図 3】



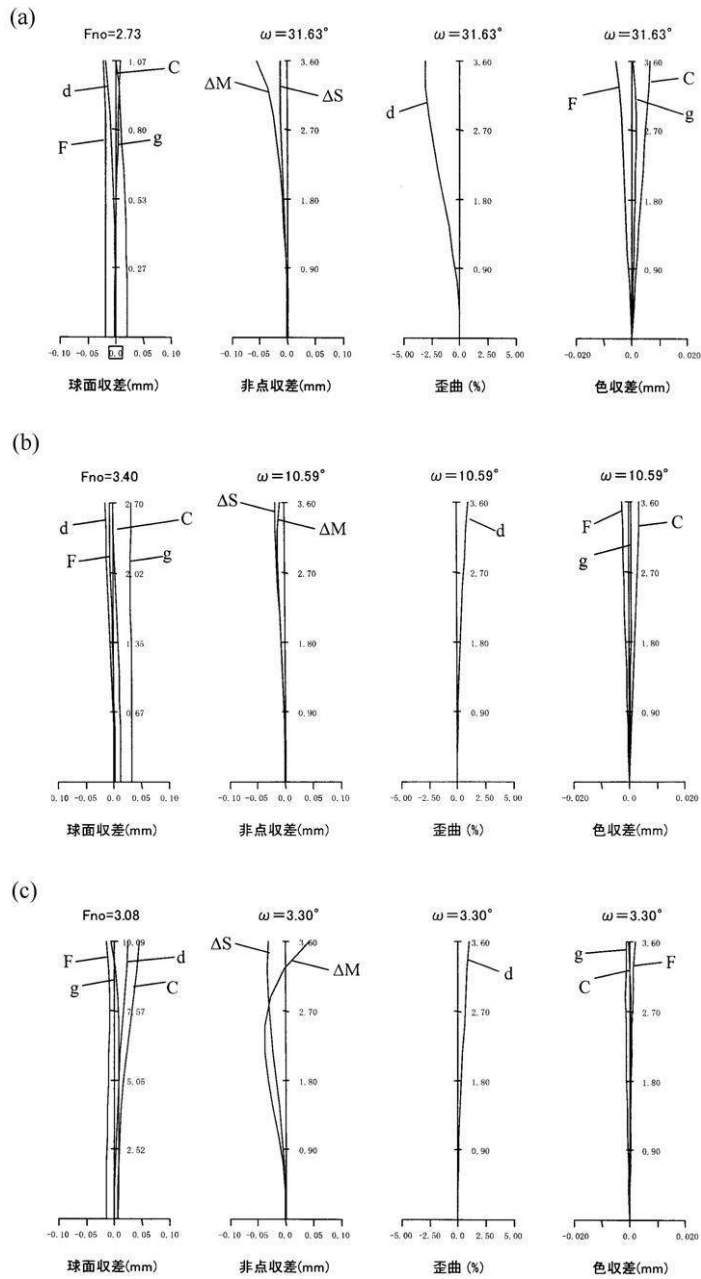
【図 4】



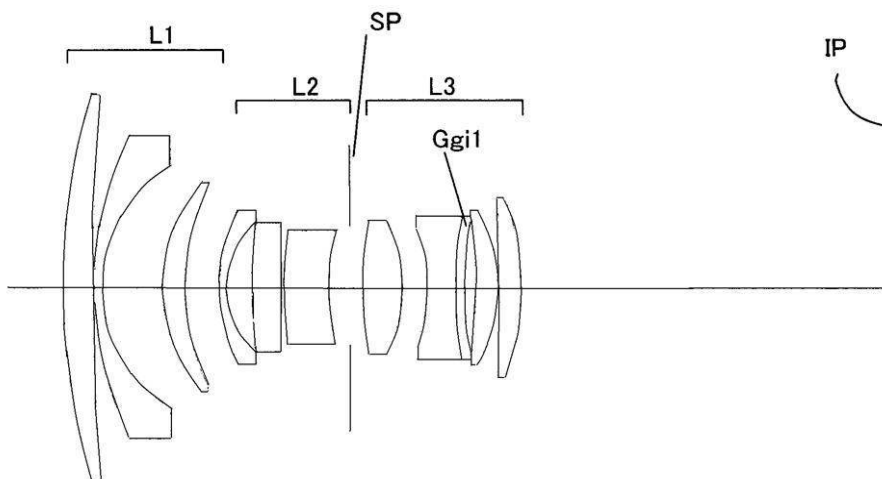
【図 5】



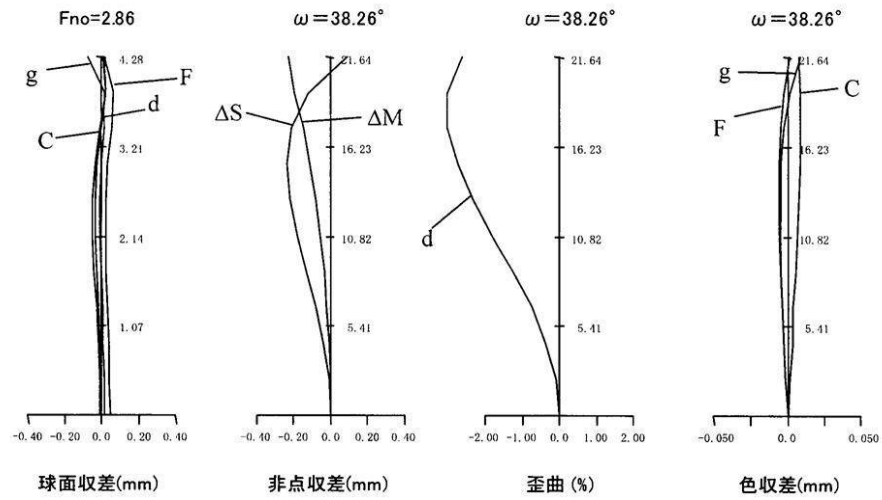
【図 6】



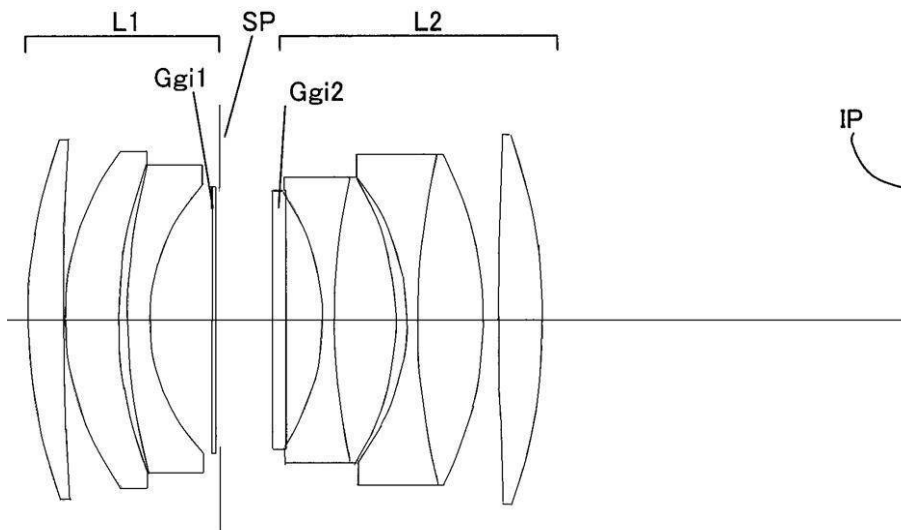
【図 7】



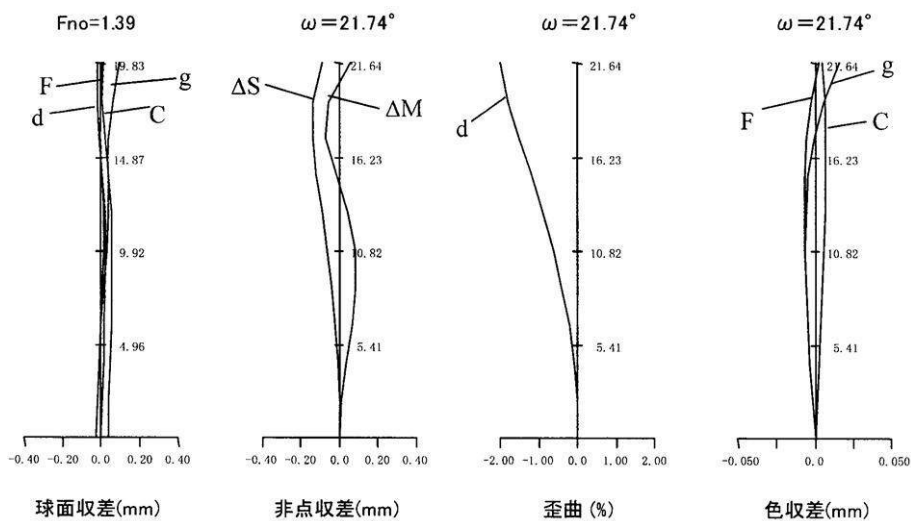
【図 8】



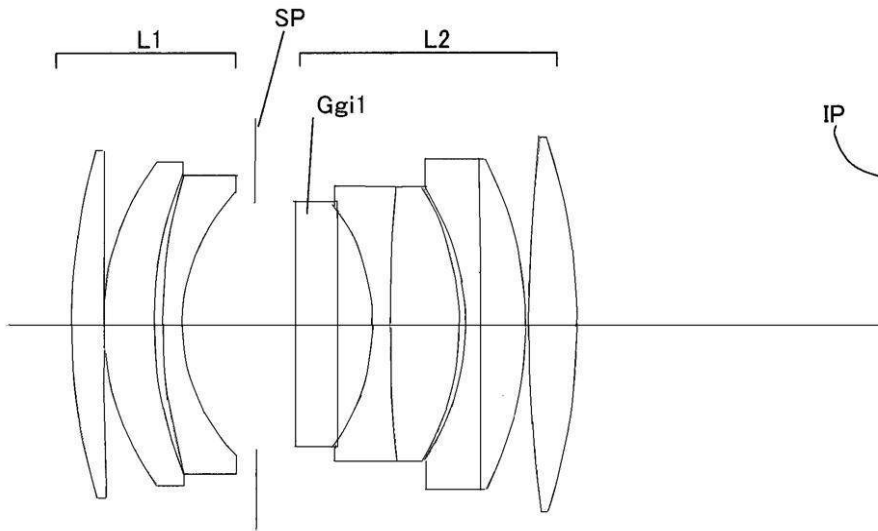
【図 9】



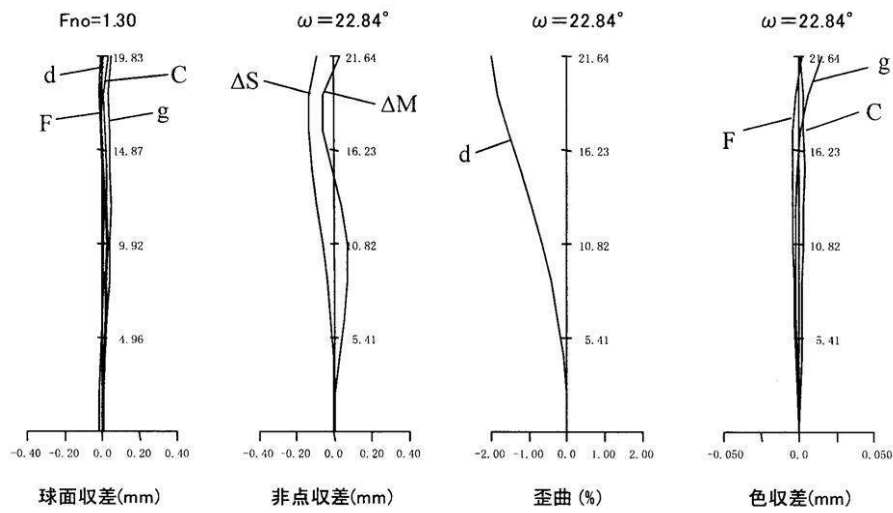
【図 10】



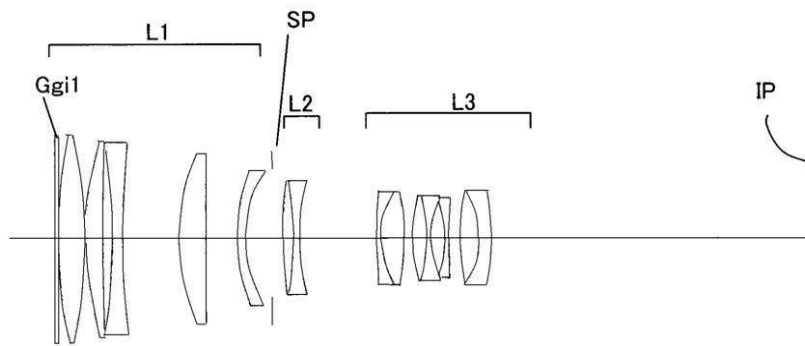
【図 1 1】



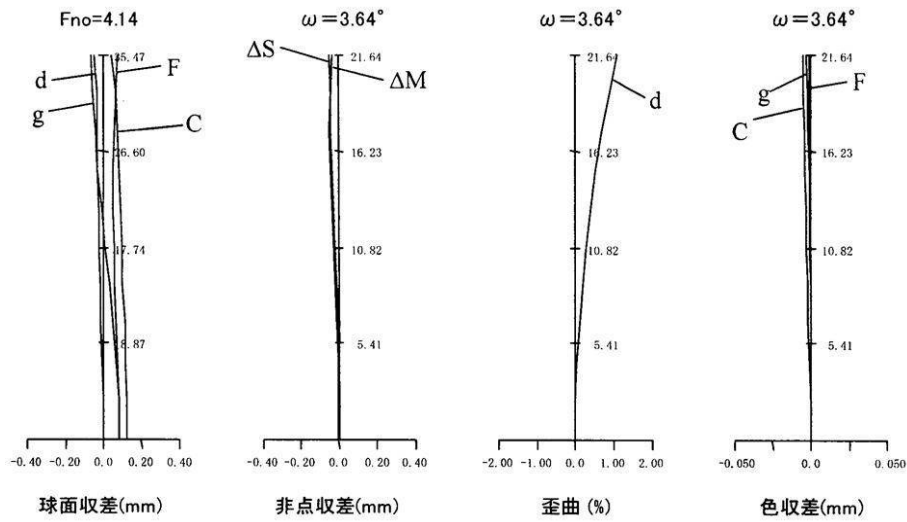
【図 1 2】



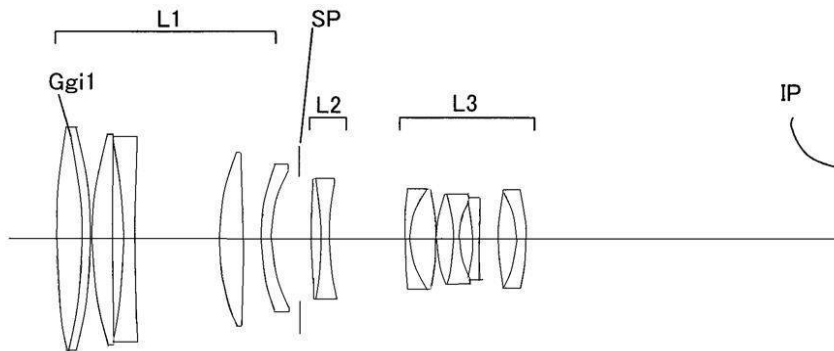
【図 1 3】



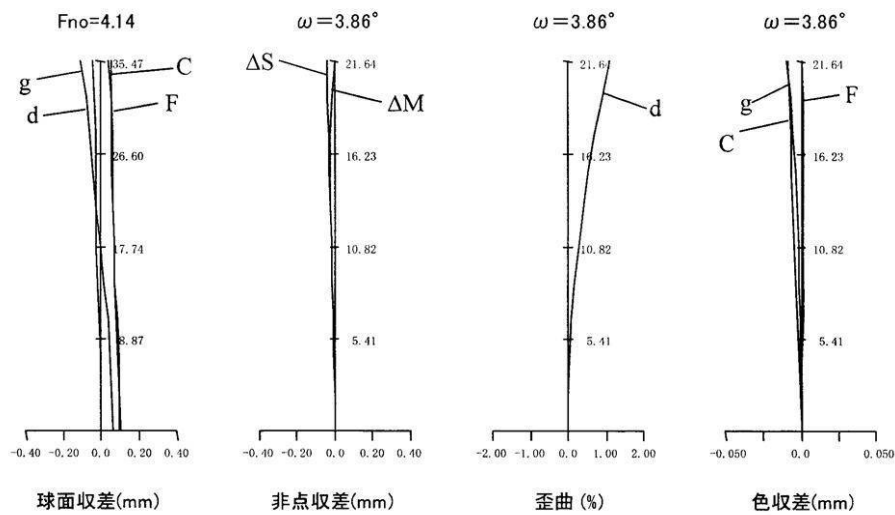
【図 14】



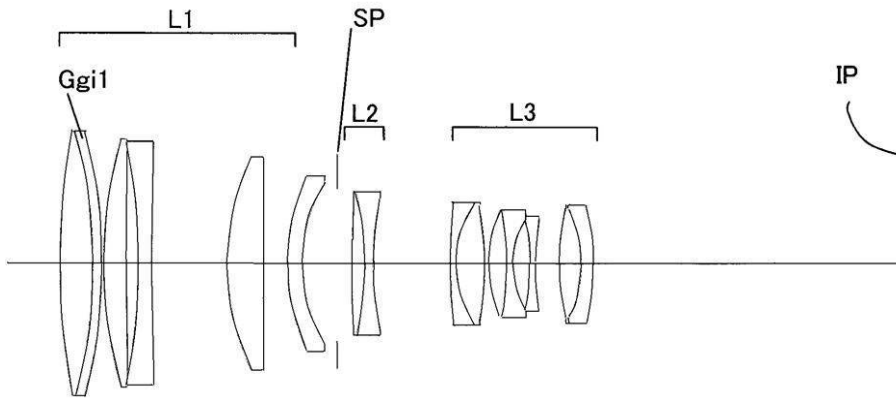
【図 15】



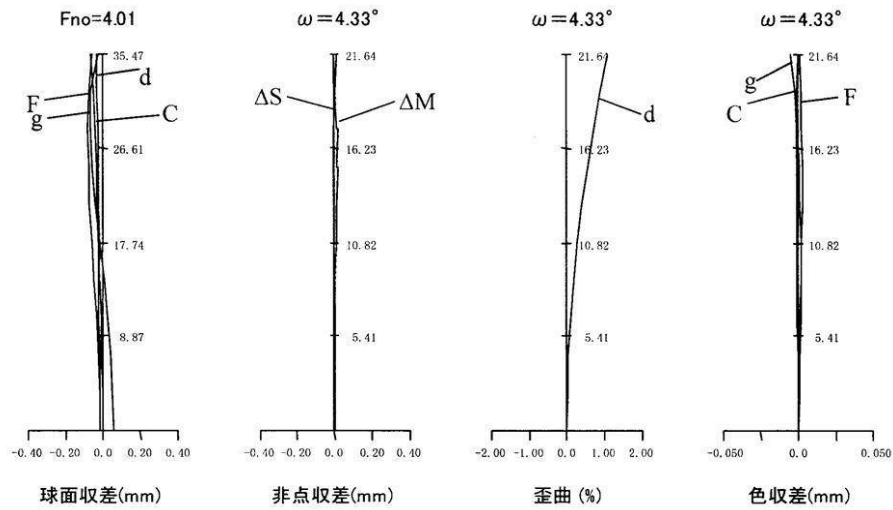
【図 16】



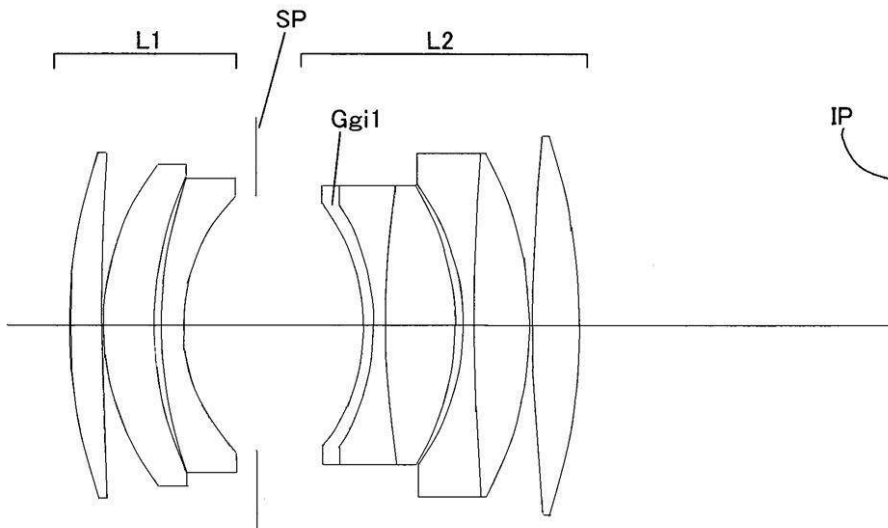
【図 17】



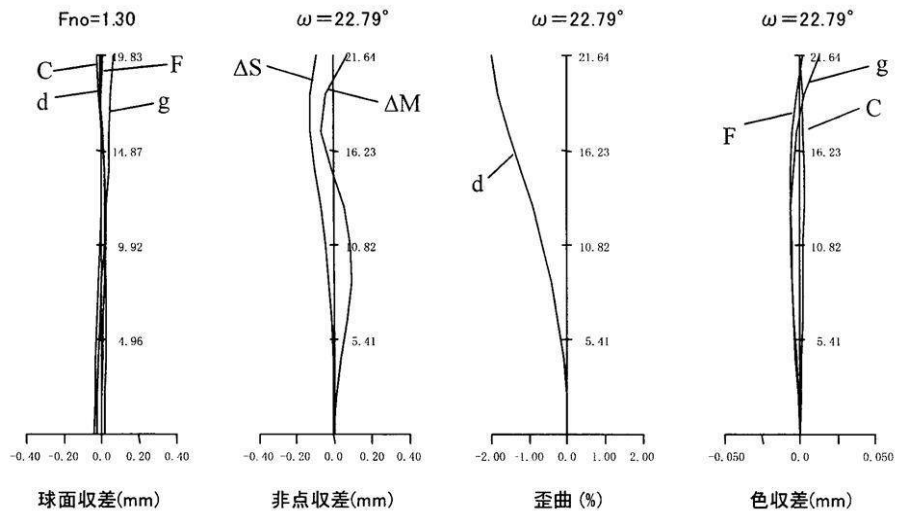
【図 18】



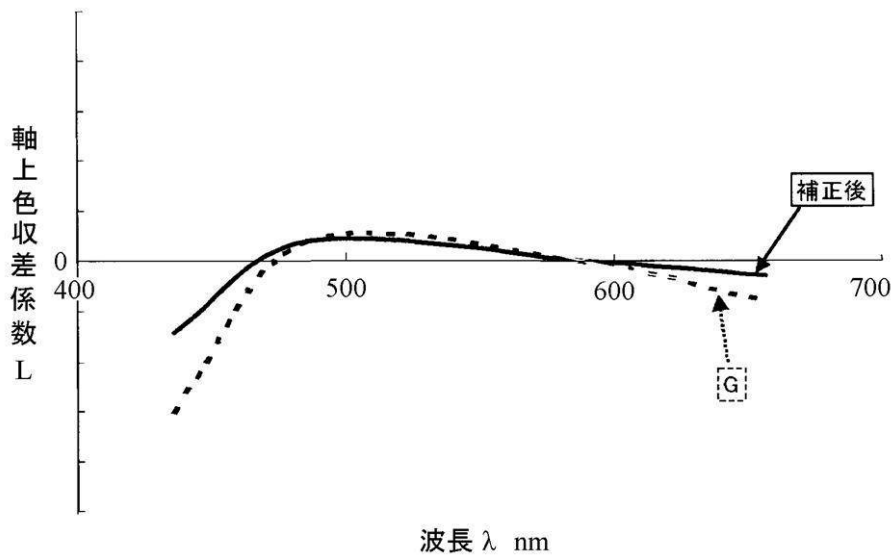
【図 19】



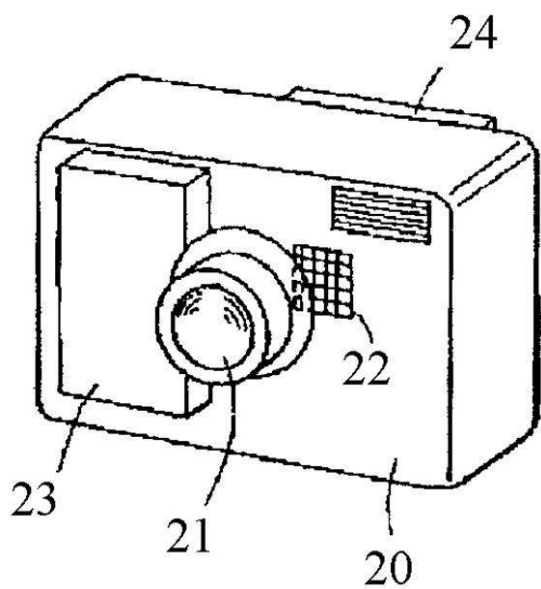
【図 20】



【図 21】



【図 22】



フロントページの続き

(56)参考文献 特許第3573575(JP, B2)
特開平10-333034(JP, A)
特開2004-212643(JP, A)
特開平04-022910(JP, A)
特開平05-142469(JP, A)
特開2008-203304(JP, A)
特開2008-216881(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 0 2 B	9 / 0 0	-	1 7 / 0 8
G 0 2 B	2 1 / 0 2	-	2 1 / 0 4
G 0 2 B	2 5 / 0 0	-	2 5 / 0 4