

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4802372号
(P4802372)

(45) 発行日 平成23年10月26日(2011.10.26)

(24) 登録日 平成23年8月19日(2011.8.19)

(51) Int.Cl.

G O 2 B 13/00 (2006.01)

F I

G O 2 B 13/00

請求項の数 2 (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2001-28514 (P2001-28514)
 (22) 出願日 平成13年2月5日(2001.2.5)
 (65) 公開番号 特開2002-228924 (P2002-228924A)
 (43) 公開日 平成14年8月14日(2002.8.14)
 審査請求日 平成20年1月15日(2008.1.15)

(73) 特許権者 000004112
 株式会社ニコン
 東京都千代田区有楽町1丁目12番1号
 (74) 代理人 100077919
 弁理士 井上 義雄
 (72) 発明者 勝沼 淳
 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株
 式会社ニコン内
 審査官 荒井 良子

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 アサーマルレンズ系及びこれを含む光学装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1の材料からなる第1レンズエレメントと、
 第2の材料からなる第2レンズエレメントと、
 第3の材料からなる第3レンズエレメントとからなり、
 前記第1レンズエレメントと前記第2レンズエレメントと前記第3レンズエレメントと
 は相互に略密着して配置されているアサーマルレンズ系であって、
 前記アサーマルレンズ系全体の屈折力の符号と、前記第1レンズエレメントの屈折力の
 符号及び前記第3レンズエレメントの屈折力の符号とは同一であり、
 前記アサーマルレンズ系全体の屈折力の符号と、前記第2レンズエレメントの屈折力の

10

符号とは反対の符号であり、
さらに以下の条件式を満足することを特徴とするアサーマルレンズ系。

$$75 < v1$$

$$v2 < v1$$

$$v3 < v1$$

$$\theta1 < \theta2 < \theta3$$

$$0 < c1 / c2 < 4$$

$$c3 < 0$$

ただし、

v1：前記第1の材料のアップベ数、

20

θ_1 : 前記第 1 の材料の部分分散比,
 c_1 : 前記第 1 の材料の温度係数,
 v_2 : 前記第 2 の材料のアッベ数,
 θ_2 : 前記第 2 の材料の部分分散比,
 c_2 : 前記第 2 の材料の温度係数,
 v_3 : 前記第 3 の材料のアッベ数,
 θ_3 : 前記第 3 の材料の部分分散比,
 c_3 : 前記第 3 の材料の温度係数,

また、前記アッベ数と前記部分分散比は次式で定義される。

$$v_i = (n_{di} - 1) / (n_{Fi} - n_{Ci}) \quad i = 1, 2, 3$$

$$\theta_i = (n_{Fi} - n_{Ci}) / (n_{gi} - n_{Fi})$$

ただし、

n_{Ci} : 前記第 i 番の材料の C 線 (波長 656.273 nm) の屈折率 ($i = 1, 2, 3$),

n_{di} : 前記第 i 番の材料の d 線 (波長 587.562 nm) の屈折率 ($i = 1, 2, 3$),

n_{Fi} : 前記第 i 番の材料の F 線 (波長 486.133 nm) の屈折率 ($i = 1, 2, 3$),

n_{gi} : 前記第 i 番の材料の g 線 (波長 435.834 nm) の屈折率 ($i = 1, 2, 3$),

$$c_i = \alpha_i - (1 / (n_{di} - 1)) \cdot (d(n_{di}) / dt)$$

α_i : 前記第 i 番の材料の線膨脹率

t : 当該材料の温度。

【請求項 2】

請求項 1 に記載のアサーマルレンズ系を含むことを特徴とする光学装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、温度変化による焦点位置の変動が少ないアサーマルレンズ系、特にアポクロマートアサーマルレンズ系、及びこれを含む光学装置に関する。

【0002】

【従来の技術】

光学系の焦点位置は環境温度の変化によって変動する。その原因としては、光学部材自体の熱膨脹収縮、光学部材の保持材の熱膨脹収縮、および屈折レンズを用いる場合のレンズ屈折力の温度変動などが挙げられる。そして、環境温度の変化による焦点位置の変動（以下、「焦点位置の温度変動」という。）は、特に、屈折レンズを用いる光学系において顕著である。焦点位置の温度変動をなるべく抑えるために、例えば、特開昭 55-143518 号公報ではレンズエレメントの光学材料を適切に選択する方法が提案されている。また、特開昭 60-250316 号公報には、光学部品を保持する部材の温度変化に起因する伸縮によるレンズエレメントやレンズ群間隔の変動を積極的に用いて焦点位置の温度変動を低減する方法が提案されている。

【0003】

また、屈折型光学系においては色収差が必ず発生する。この色収差を極力低減して、いわゆるアポクロマートレンズ系とするためには、光学系の結像機能を主として果たす部材に異常分散性光学材料を用いれば良いことが知られている。そして、現在生産されているアポクロマートレンズ系の多くに異常分散性光学材料が用いられている。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】

図 3 (a) は、第 1 の従来技術による正の屈折力を持つ典型的なダブルットアポクロマートレンズ系のレンズ構成を示す図、図 3 (b) はその軸上色収差と球面収差とを示す図で

10

20

30

40

50

ある。収差図において、CはC線 ($\lambda = 656.273 \text{ nm}$)、dはd線 ($\lambda = 587.562 \text{ nm}$)、FはF線 ($\lambda = 486.133 \text{ nm}$)、gはg線 ($\lambda = 435.834 \text{ nm}$)をそれぞれ示している。以下、本明細書の全ての収差図において同様の符号を用いる。また、このレンズ系の諸元値を表1、温度変化に関する諸特性値を表2にそれぞれ掲げる。ここで、物体は無限遠に位置するものとする。なお、本明細書における全ての透過光学材料の名称とその物性値は、(株)オハラの2000年版電子カタログに記載されているものを使用する。また、表2における「E-n」は、「 $\times 10^{-n}$ 」を示している。以下、本明細書の全ての温度変化に対する諸特性値について同様の表記をする。

【0005】

【表1】

10

(全体諸元)

焦点距離: $f=1000\text{mm}$

入射瞳径: $EP=70\text{mm}$

(レンズデータ)

面番号 曲率半径 間隔 光学材料

1 561.059 15.0 S-FPL52

20

2 -276.774 0.314

3 -295.809 7.0 S-LAL8

4 -749.965 990.620

【0006】

【表2】

	L1	L2	総合
$f [\text{mm}]$	408.747	-689.534	1000
$\Phi [\text{mm}^{-1}]$	0.00245	-0.00145	
$c [\text{degree}^{-1}]$	2.468E-5	3.496E-7	
$\Delta \Phi [\text{mm}^{-1} \cdot \text{degree}^{-1}]$	-6.04E-8	5.07E-10	-5.99E-8
$\Delta f [\text{mm} \cdot \text{degree}^{-1}]$			0.0599

30

【0007】

また、さらに比較として、第2の従来技術による正の屈折力を持つ典型的なダブルットアクロマートレンズ系の設計例について、レンズ構成図を図4(a)に、軸上色収差と球面収差を図4(b)にそれぞれ示す。さらに、その諸元値を表3、温度変化に関する諸特性

40

【0008】

【表3】

(全体諸元)

焦点距離： $f=1000\text{mm}$ 入射瞳径： $EP=70\text{mm}$

(レンズデータ)

面番号 曲率半径 間隔 光学材料

1 560.307 15.0 S-BSL7

2 -369.867 0.1

3 -377.588 7.0 S-TIM2

4 -1902.014 987.724

【 0 0 0 9 】

【 表 4 】

	L1	L2	総合
$f [\text{mm}]$	433.882	-761.147	1000
$\Phi [\text{mm}^{-1}]$	0.00230	-0.00131	0.001
$c [\text{degree}^{-1}]$	1.971E-6	3.584E-6	
$\Delta \Phi [\text{mm}^{-1} \cdot \text{degree}^{-1}]$	-4.54E-9	4.71E-9	1.67E-10
$\Delta f [\text{mm} \cdot \text{degree}^{-1}]$			-0.0002

【 0 0 1 0 】

次に、レンズエレメントの温度変化の影響を考察する。大気または真空中の薄肉単レンズの屈折力 Φ_s は下式で与えられる。

【 0 0 1 1 】

$$\Phi_s = (n - 1) (1/R_1 - 1/R_2)$$

ただし、

 n ：レンズエレメントの屈折率 R_1 ：レンズエレメントの第1面の曲率半径 R_2 ：レンズエレメントの第2面の曲率半径

【 0 0 1 2 】

よって、 Φ_s を温度 t で微分して次式が得られる。

$$d\Phi_s / dt = -\Phi_s \cdot c$$

ただし、

$$c = \alpha - (1/(n - 1)) \cdot (dn/dt)$$

 α ：熱膨張係数

【 0 0 1 3 】

各レンズエレメント L_1 、 L_2 、 L_3 について、上式を書き直すと、以下の通りである。

【 0 0 1 4 】

$$\Delta \Phi_i = -\Phi_i \cdot c_i \cdot \Delta t \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

ただし、

$$c_i = \alpha_i - (1/(n_i - 1)) \cdot (dn_i/dt)$$

 α_i ：第 i 番レンズエレメントを構成する光学材料の熱膨張係数

【 0 0 1 5 】

従来技術によるダブルットアポクロマートを例にして、焦点位置の温度変動を考えてみる

10

20

30

40

50

。簡単化のため近似的に２枚のレンズエレメントＬ１、Ｌ２を薄肉密着系とすると、合成屈折力Φは次式となる。

【００１６】

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$$

ただし、

Φ１：レンズエレメントＬ１の屈折力

Φ２：レンズエレメントＬ２の屈折力

【００１７】

両辺の微小変動ΔΦ、ΔΦ１、ΔΦ２は次式（２）となる

$$\Delta \Phi = \Delta \Phi_1 + \Delta \Phi_2 \quad (2)$$

【００１８】

一方、屈折力Φは、次式のように焦点距離ｆの逆数で定義される。

$$f = 1 / \Phi$$

【００１９】

従って、焦点距離の微小変動Δｆは次式（３）となる。

$$\Delta f = - (1 / \Phi^2) \cdot \Delta \Phi \quad (3)$$

【００２０】

薄肉密着系では、焦点距離の変動と焦点位置の変動とは一致する。現実の厚肉系の場合においても、概ね各レンズエレメントが密着していれば近似的に焦点距離の変動と焦点位置の変動とは一致すると考えられる。

【００２１】

上記第１の従来技術例では、第１レンズエレメントＬ１に異常分散性光学材料を用いている。この異常分散性光学材料は屈折率の温度についての微分係数が、通常のガラスに比べて大きい。また、屈折率の温度についての微分係数の符号が大半の光学材料とは逆向きの負である。さらに、一般的に異常分散性光学材料の線膨脹率は、多くの光学材料の線膨脹率に比べて大きい。

【００２２】

例えば、表２に示した上記第１の従来例の諸特性値を参照すると、レンズエレメントＬ１については式（１）より線膨脹率αと屈折率変動項が共に正になるため、ｃ１は $2.468E-5$ と正の比較的大きい値になる。よって、ΔΦ１は負の比較的大きな値 $-6.04E-8$ となる。一方、レンズエレメントＬ２については、ｃ２はｃ１よりもかなり小さい $3.496E-7$ になる。この結果、ΔΦ２は $5.07E-10$ となる。すなわちΔΦ１とは異符号となるが絶対値が大きく異なるため、式（２）よりΔΦはΔΦ１の値が支配的となり、ΔｆはほとんどレンズエレメントＬ１の焦点変動によって決まるといえる。

【００２３】

レンズエレメントＬ１を構成する材料として、レンズエレメントＬ２と同じように屈折率の温度係数が正の光学ガラスを用いた場合は、ｃ１の値は小さくなる。そして、ΔΦ１とΔΦ２の打ち消しあいの効果がより大きくなる。この結果、ΔΦの絶対値が小さくなり、焦点位置変動も小さくなることが予想される。しかし、そのような透過光学材料は異常分散性を持たないため色消し性能が劣化することが想定される。

【００２４】

例えば、表３にレンズデータを示した第２の従来技術のダブルレットアクロマートでは、ΔΦ１とΔΦ２が適度に互いに打ち消し合っている。この結果、レンズ群に起因する焦点位置の温度変動がダブルレットアポクロマートに比べて非常に小さくなっていることがわかる。しかしながら、図４（ｂ）を参照すると軸上色収差がダブルレットアポクロマートに比べるとかなり大きい。

【００２５】

このように、異常分散性光学材料を用いると色消し性能には優れているが、焦点位置の温度変動を招きやすい。特に、長い焦点距離の光学系の場合、またはレンズエレメントの最終面と焦点面との間の距離が比較的大きいような場合は、レンズエレメント間やレンズ群

10

20

30

40

50

間の保持材料を適切に選択しても焦点位置の温度変動を十分に低減できないことが多い。

【 0 0 2 6 】

また、常分散性光学材料を用いると焦点位置の温度変動を低減したレンズ設計が可能である。しかし、色消し性能が十分でないと考えられてきたものである。

【 0 0 2 7 】

本発明は、上記問題に鑑みてなされたものであり、優れた色消し性能を有し、かつ焦点位置の温度変動を低減したアサーマルレンズ系、及びこれを含む光学装置を提供することを目的とする。

【 0 0 2 8 】

【課題を解決するための手段】

10

上記課題を解決するために、本発明は、

第 1 の材料からなる第 1 レンズエレメント L 1 と、

第 2 の材料からなる第 2 レンズエレメント L 2 と、

第 3 の材料からなる第 3 レンズエレメント L 3 と からなり、

前記第 1 レンズエレメント L 1 と前記第 2 レンズエレメント L 2 と前記第 3 レンズエレメント L 3 とは相互に略密着して配置されているアサーマルレンズ系であって、

前記アサーマルレンズ系全体の屈折力 ϕ の符号と、前記第 1 レンズエレメントの屈折力 $\phi 1$ の符号及び前記第 3 レンズエレメントの屈折力 $\phi 3$ の符号とは同一であり、

前記アサーマルレンズ系全体の屈折力 ϕ の符号と、前記第 2 レンズエレメントの屈折力 $\phi 2$ の符号とは反対の符号である。そして、さらに以下の条件式を満足することを特徴とするアサーマルレンズ系を提供する。

20

【 0 0 2 9 】

$$\frac{75 < v1}{v2 < v1} \quad (4)$$

$$v2 < v1 \quad (5)$$

$$v3 < v1 \quad (6)$$

$$\theta1 < \theta2 < \theta3 \quad (7)$$

$$0 < c1 / c2 < 4 \quad (8)$$

$$c3 < 0 \quad (9)$$

ただし、

$v1$: 前記第 1 の材料のアッベ数、

30

$\theta1$: 前記第 1 の材料の部分分散比、

$c1$: 前記第 1 の材料の温度係数、

$v2$: 前記第 2 の材料のアッベ数、

$\theta2$: 前記第 2 の材料の部分分散比、

$c2$: 前記第 2 の材料の温度係数、

$v3$: 前記第 3 の材料のアッベ数、

$\theta3$: 前記第 3 の材料の部分分散比、

$c3$: 前記第 3 の材料の温度係数、

また、前記アッベ数と前記部分分散比は次式で定義される。

$$v_i = (n_{di} - 1) / (n_{Fi} - n_{Ci}) \quad i = 1, 2, 3$$

40

$$\theta_i = (n_{Fi} - n_{Ci}) / (n_{gi} - n_{Fi})$$

ただし、

n_{Ci} : 第 i 番の材料の C 線 (波長 656.273 nm) の屈折率 ($i = 1, 2, 3$),

n_{di} : 第 i 番の材料の d 線 (波長 587.562 nm) の屈折率 ($i = 1, 2, 3$),

n_{Fi} : 第 i 番の材料の F 線 (波長 486.133 nm) の屈折率 ($i = 1, 2, 3$),

n_{gi} : 第 i 番の材料の g 線 (波長 435.834 nm) の屈折率 ($i = 1, 2, 3$),

$$c_i = \alpha_i - (1 / (n_{di} - 1)) \cdot (d(n_{di}) / dt)$$

α_i : 第 i 番の材料の線膨脹率

t : 当該材料の温度。

【 0 0 3 0 】

50

また、本発明によれば、請求項 1 に記載のアサーマルレンズ系を含むことを特徴とする光学装置を提供する。

【 0 0 3 1 】

なお、本発明の構成を説明する上記課題を解決するための手段の項では、本発明を分かり易くするために発明の実施の形態の図を用いたが、これにより本発明が実施の形態に限定されるものではない。

【 0 0 3 2 】

【発明の実施の形態】

以下、添付図面に基づいて本発明の実施の形態を説明する。

3つのレンズエレメント L 1、L 2、L 3を用いた、いわゆる 3 波長色消しであるアポクロマートについて、薄肉密着系での近似のもとでは下記の 3 式 (1 0)、(1 1)、(1 2) が成立する。

【 0 0 3 3 】

合成屈折力

$$\Phi = \Phi 1 + \Phi 2 + \Phi 3 \quad (1 0)$$

3 波長色消し条件

$$0 = \Phi 1 / v 1 + \Phi 2 / v 2 + \Phi 3 / v 3 \quad (1 1)$$

$$0 = \Phi 1 / v 1' + \Phi 2 / v 2' + \Phi 3 / v 3' \quad (1 2)$$

【 0 0 3 4 】

ただし、

Φi : 第 i 番レンズエレメントの d 線 (波長 5 8 7 . 5 6 2 nm) における屈折力、

$$v i = (n d i - 1) / (n F i - n C i) ,$$

$$v i' = (n d i - 1) / (n g i - n F i) ,$$

$n C i$: 第 i 番レンズエレメントを構成する光学材料の C 線 (波長 6 5 6 . 2 7 3 nm) の屈折率、

$n d i$: 第 i 番レンズエレメントを構成する光学材料の d 線 (波長 5 8 7 . 5 6 2 nm) の屈折率、

$n F i$: 第 i 番レンズエレメントを構成する光学材料の F 線 (波長 4 8 6 . 1 3 3 nm) の屈折率、

$n g i$: 第 i 番レンズエレメントを構成する光学材料の g 線 (波長 4 3 5 . 8 3 4 nm) の屈折率。

【 0 0 3 5 】

ここで、(1 0) 式、(1 1) 式、(1 2) 式を $\Phi 1$ 、 $\Phi 2$ 、 $\Phi 3$ について解くと次式が得られる。

$$\Phi 1 = (\theta 2 - \theta 3) \cdot v 1 \cdot K \cdot \Phi \quad (1 3)$$

$$\Phi 2 = (\theta 3 - \theta 1) \cdot v 2 \cdot K \cdot \Phi \quad (1 4)$$

$$\Phi 3 = (\theta 1 - \theta 2) \cdot v 3 \cdot K \cdot \Phi \quad (1 5)$$

【 0 0 3 6 】

ただし、

$$K = 1 / ((\theta 2 - \theta 3) \cdot v 1 + (\theta 3 - \theta 1) \cdot v 2 + (\theta 1 - \theta 2) \cdot v 3)$$

【 0 0 3 7 】

また、(1 0) 式より、

$$\Delta \Phi = \Delta \Phi 1 + \Delta \Phi 2 + \Delta \Phi 3 \quad (1 6)$$

である。

【 0 0 3 8 】

薄肉密着系で考えているから合成焦点距離 f の変動量 Δf と焦点位置の変動量は一致する。この Δf と $\Delta \Phi$ の関係は (3) 式に示した。

このレンズ群の 2 次分散をなるべく小さくするには、ダブルットアポクロマートと同じように、レンズ群全体の屈折力と同符号の屈折力を持つレンズエレメントのうち、その屈折力の絶対値が最大であるレンズエレメントに異常分散性光学材料を用いるのが効果的であ

10

20

30

40

50

る。そこで、レンズエレメント L 1 に異常分散性光学材料を適用するレンズエレメントとして選択することになると、異常分散性光学材料の一般的な屈折率分散についての特徴から (4) 式に示した条件がレンズエレメント L 1 の材料条件として規定される。

【 0 0 3 9 】

$$75 < v_1 \quad (4)$$

ただし、

$$v_1 = (n_{d1} - 1) / (n_{F1} - n_{C1})$$

【 0 0 4 0 】

次に、(1 3) , (1 4) , (1 5) 式から、各レンズエレメントの屈折力について以下のことがわかる。色消しレンズとするには、かならず正と負の屈折力のレンズエレメントを両方用いる必要がある。例えば、レンズエレメント L 2 と L 3 が同一符号の屈折力を持つ場合、

$$0 < \phi_2 / \phi_3$$

が成立する。

【 0 0 4 1 】

この場合、(1 4) 式, (1 5) 式より、

$$0 < ((\theta_3 - \theta_1) / (\theta_1 - \theta_2)) \cdot (v_2 / v_3)$$

を満足する必要がある。

【 0 0 4 2 】

ここで、 v_2 、 v_3 は共に常に正の値を持つから、

$$0 < (\theta_3 - \theta_1) / (\theta_1 - \theta_2)$$

が成立する必要がある。

【 0 0 4 3 】

言い換えれば、

$$\theta_3 < \theta_1 < \theta_2, \quad \text{または} \quad \theta_2 < \theta_1 < \theta_3$$

が成立する必要がある。

【 0 0 4 4 】

ここで、常分散性光学材料の θ より小さい値を取るのが異常分散性光学材料であることの主要な特徴であるから、上記条件は現実には成立しないと言える。したがって、レンズエレメント L 2 とレンズエレメント L 3 の屈折力は異符号でなければならない。そこで、レンズエレメント L 1 とレンズエレメント L 3 の屈折力を同符号とし、レンズエレメント L 2 の屈折力をレンズエレメント L 1 の屈折力とは異符号とする。

【 0 0 4 5 】

この場合、(1 3) 式, (1 4) 式, (1 5) 式より、(7) 式が導かれる。

$$\theta_1 < \theta_2 < \theta_3 \quad (7)$$

これが、3つのレンズエレメントから成るアポクロマートレンズ系を成立させる必要条件となる。

【 0 0 4 6 】

また、(1 6) 式において、合成屈折力 ϕ の変動量 $\Delta \phi$ を小さくするのは、 $\Delta \phi_1$ 、 $\Delta \phi_2$ および $\Delta \phi_3$ が互いに打ち消し合えば良い。特に、 $\Delta \phi_1$ を主として $\Delta \phi_2$ で打ち消すことが効果的である理由を以下述べる。

【 0 0 4 7 】

レンズエレメント L 1 の屈折力の温度による変動が比較的大きくなる理由は、異常分散性光学材料では α_1 、 dn_1/dt とともに絶対値が比較的大きく、かつ α_1 が正、 dn_1/dt が負の値を示すことから両者の効果が加算され、 c_1 の値が大きくなることによる。一方、レンズエレメント L 3 はレンズエレメント L 1 と屈折力が同符号であるので、レンズエレメント L 3 まで異常分散性光学材料を用いると $\Delta \phi_1$ と $\Delta \phi_3$ が同符号になってしまい、 $\Delta \phi$ の圧縮が困難になる。したがって、レンズエレメント L 3 には常分散性光学材料を用いなければならない。

【 0 0 4 8 】

10

20

30

40

50

常分散性光学材料の通常特性によって、(6)式に示した条件によりレンズエレメントL3の材料は規定される。すなわち、

$$v_3 < v_1 \quad (6)$$

である。

【0049】

大部分の透過光学材料の線膨張率 α は正であるが、異常分散性光学材料の線膨張率 α よりは小さく、また dn/dt も正の値を取ることが多い。このため、結果的にほとんどの場合 c の絶対値が異常分散性光学材料にくらべてかなり小さくなる。この結果、 $\Delta\phi_1$ を $\Delta\phi_3$ で打ち消す効果は弱くなる。ただし、 $\Delta\phi_1$ と $\Delta\phi_3$ は異符号になることが好ましい。

10

【0050】

異常分散性光学材料の場合、

$$0 < c_1$$

である。このため、(9)式の条件、

$$c_3 < 0 \quad (9)$$

であることが $\Delta\phi$ の絶対値を小さくするには必要である。

【0051】

次に、レンズエレメントL2について同様の検討をしてみる。収差補正の観点からは、各レンズエレメントの面の曲率半径が小さくなりすぎないことが望ましい。そのためには、 $|\phi_1|$ 、 $|\phi_2|$ 、 $|\phi_3|$ の値をなるべく小さく保つよう配慮する必要がある。

20

【0052】

(7)式から、

$|\theta_3 - \theta_1| > |\theta_2 - \theta_3|$ が成り立つ。これと(13)式、(14)式を参照すると、 $|\phi_2|$ をなるべく小さく抑えるには、レンズエレメントL2の光学材料のアップ数について(5)式の条件、

$$v_2 < v_1 \quad (5)$$

を満たすことが望ましいことがわかる。

【0053】

さらに、 dn/dt の値がなるべく小さくできれば負であることが望ましい。

(1)式で考えると、 $\Delta\phi_1$ と $\Delta\phi_2$ が打ち消し合うためには、 ϕ_1 と ϕ_2 は異符号だから、 c_1 と c_2 が同符号である必要がある。一般に $|\phi_2|$ は $|\phi_1|$ のおおよそ2倍の値になるので、 c_2 は c_1 の1/2程度の値が望ましい。しかし、(8)式の条件、

$$0 < c_1 / c_2 < 4 \quad (8)$$

の範囲にあれば、 $\Delta\phi$ の打ち消し効果が得られる。

30

【0054】

以上述べた手順により、各レンズエレメントL1、L2、L3の材料を選択すれば、焦点位置の温度変動が低減されたアポクロマートレンズ系が設計できる。

なお、必ずしも $\Delta\phi$ を0にすることが望ましいわけではない。レンズと焦点面との間は現実には何らかの保持部材で結合されており、この保持部材自身も温度変動により収縮する。したがって、理想的には機械的に規定される焦点面と光学的焦点とが常に一緒に動くことが望ましい。

40

【0055】

しかし、複数のレンズ群からなるような光学系では、各レンズ群間隔も保持部材の収縮により変化し、それに原因する焦点の移動が、レンズ系自体に起因する焦点移動に合成される。そのような場合でも、特に焦点位置の移動に対して寄与の大きいレンズ群に上述した諸条件を満足する光学材料を選択することにより大きな効果を得ることができる。

【0056】

【実施例】

(第1実施例)

以下、第1実施例にかかるアサーマルアポクロマートレンズ系について説明する。図1(

50

a) は本実施例のレンズ構成を示す図である。第 1 の材料からなる第 1 レンズエレメント L 1 と、第 2 の材料からなる第 2 レンズエレメント L 2 と、第 3 の材料からなる第 3 レンズエレメント L 3 とを有し、第 1 レンズエレメント L 1 と第 2 レンズエレメント L 2 と第 3 レンズエレメント L 3 とは相互に略密着して配置されている。

【 0 0 5 7 】

また、アサーマルレンズ系全体の屈折力の符号 (正) と、第 1 レンズエレメント L 1 の屈折力の符号 (正) 及び前記第 3 レンズエレメント L 3 の屈折力の符号 (正) とは同一である。さらに、アサーマルレンズ系全体の屈折力の符号 (正) と、第 2 レンズエレメント L 2 の屈折力の符号 (負) とは反対の符号である。

【 0 0 5 8 】

以下の表 5 に本実施例の諸元値を掲げる。ここで、物体は無限遠に位置するとする。また、本実施例の温度変化に関する諸特性値を表 6 に掲げる。なお、表 6 中の総合 f および ϕ は、厚肉レンズの間隔の効果も含めて算出された値であり、薄肉系における総合屈折力の式

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \quad (1 0)$$

による値とは異なる値を示しているが、本発明の主旨を逸脱するものではない。

【 0 0 5 9 】

【表 5】

(全体諸元)

焦点距離： f=1000mm

入射瞳径： EP=70mm

(レンズデータ)

面番号	曲率半径	間隔	光学材料
1	217.465	15.0	S-FPL52
2	-178.604	8.8	
3	-207.231	6.5	S-LAM3
4	113.05	2.9	
5	123.645	10.6	S-LAH53
6	1256.027	936.7	

【 0 0 6 0 】

【表 6】

10

20

30

	L1	L2	L3	総合
f [mm]	217.634	-101.16	169.428	1000
Φ [mm ⁻¹]	0.00459	-0.00989	0.00590	0.001
c [degree ⁻¹]	2.468E-5	8.279E-6	-2.660E-6	
$\Delta \Phi$ [mm ⁻¹ · degree ⁻¹]	-1.13E-7	8.18E-8	1.57E-8	-1.59E-8
Δf [mm · degree ⁻¹]				0.0159

10

(条件式対応値)

$\nu 1 = 90.33$

$\nu 2 = 47.92$

$\nu 3 = 40.92$

$\theta 1 = 0.5339$

$\theta 2 = 0.5605$

$\theta 3 = 0.5701$

20

$c 1 / c 2 = 2.981$

【 0 0 6 1 】

図 1 (b) は本実施例の軸上色収差と球面収差を示す図である。図 1 (b) から明らかなように、上記従来技術例の軸上色収差と球面収差 (図 3 (b) , 図 4 (b)) に比べて、良好に軸上色収差と球面収差とが補正されていることがわかる。

【 0 0 6 2 】

次に、表 6 に基づいて本実施例の温度変化に関する特性を説明する。本実施例では、第 1 レンズエレメント L 1 に異常分散性光学材料を使用している。表 6 によれば該第 1 レンズエレメント L 1 の屈折力変動 $\Delta \Phi 1$ は比較的大きな値であるが、第 2 レンズエレメント L 2 の屈折力変動 $\Delta \Phi 2$ によってかなり打ち消されている。また、第 3 レンズエレメント L 3 の屈折力変動 $\Delta \Phi 3$ も該 $\Delta \Phi 2$ ほどではないが、 $\Delta \Phi 1$ を打ち消すように作用している。この結果、焦点位置変動量は、0.0159mm/degree に圧縮される。なお、焦点位置の温度変動量の符号が正の場合は、レンズ群から遠ざかる方向に光学的焦点が移動することを意味する。

30

【 0 0 6 3 】

上記説明は、本アサーマルレンズ系が薄肉密着系であると近似した場合についてのものである。このため、各レンズエレメントの中心厚や間隔の変動が考慮されていないので、上記諸特性値には若干の誤差が含まれる。そこで、実際のレンズ形状やレンズ間隔、および実際の撮像素子の位置の熱変動などの要素も含めてより厳密な温度変動シミュレーション

40

【 0 0 6 4 】

レンズエレメント、および焦点位置に配置される撮像部材の保持部材をすべてアルミニウム製とする。この場合、撮像部材の機械的焦点位置と光学的焦点位置のずれ量は、-0.002mm/degree になる。ここで、アルミニウムの線膨脹率は $2.36E-6$ (degree⁻¹) とした。これは、アポクロマートレンズ系としては非常に小さいずれ量といえる。よって、優秀な色消し性能を有し、かつ環境温度が変化しても比較的焦点位置の変動量が小さい光学系が実現できるという本発明の効果が得られる。

【 0 0 6 5 】

(第 2 実施例)

50

次に、第２実施例にかかるアサーマルアポクロマートレンズ系について説明する。図２（
 a）は本実施例のレンズ構成を示す図である。第１の材料からなる第１レンズエレメント
 L１と、第２の材料からなる第２レンズエレメントL２と、第３の材料からなる第３レン
 ズエレメントL３とを有し、第１レンズエレメントL１と第２レンズエレメントL２と第
 ３レンズエレメントL３とは相互に略密着して配置されている。また、アサーマルレン
 ズ系全体の屈折力の符号（正）と、第１レンズエレメントL１の屈折力の符号（正）及び前
 記第３レンズエレメントL３の屈折力の符号（正）とは同一である。さらに、アサーマル
 レンズ系全体の屈折力の符号（正）と、第２レンズエレメントL２の屈折力の符号（負）
 とは反対の符号である。

以下の表７に本実施例の諸元値を掲げる。ここで、物体は無限遠に位置するとする。また
 、本実施例の温度変化に関する諸特性値を表８に掲げる。なお、表８中の総合fおよびφ
 は、厚肉レンズの間隔の効果も含めて算出された値であり、薄肉系における総合屈折力の
 式

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \quad (10)$$

による値とは異なる値を示しているが、本発明の主旨を逸脱するものではない。

【００６６】

【表７】

（全体諸元）

焦点距離：f=1000mm

入射瞳径：EP=70mm

（レンズデータ）

面番号	曲率半径	間隔	光学材料
1	153.909	15.0	S-FPL52
2	-206.969	13.2	
3	-241.484	6.5	S-LAM3
4	104.008	6.7	
5	122.098	10.0	S-LAH63
6	554.98	905.23	

【００６７】

【表８】

10

20

30

	L1	L2	L3	総合
f [mm]	196.126	-100.600	192.618	1000
Φ [mm ⁻¹]	0.0051	-0.0099	0.0052	0.001
c [degree ⁻¹]	2.468E-5	8.279E-6	-3.2E-6	
$\Delta \Phi$ [mm ⁻¹ · degree ⁻¹]	-1.26E-7	8.23E-8	1.64E-8	-2.72E-8
Δf [mm · degree ⁻¹]				0.0272

10

(条件式対応値)

$\nu 1 = 90.33$

$\nu 2 = 47.92$

$\nu 3 = 39.59$

$\theta 1 = 0.5339$

$\theta 2 = 0.5605$

$\theta 3 = 0.5729$

20

$c 1 / c 2 = 2.981$

【 0 0 6 8 】

図 2 (b) は本実施例の軸上色収差と球面収差を示す図である。図 2 (b) から明らかなように、上記従来技術例の軸上色収差と球面収差 (図 3 (b) , 図 4 (b)) に比べて、軸上色収差と球面収差とが良好に補正されていることがわかる。

【 0 0 6 9 】

次に、本実施例の温度変化に対する諸特性を説明する。本実施例では、第 1 レンズエレメント L 1 に異常分散性光学材料を使用している。表 8 によれば該第 1 レンズエレメント L 1 の屈折力変動 $\Delta \Phi 1$ は比較的大きな値だが、第 2 レンズエレメント L 2 の屈折力変動 $\Delta \Phi 2$ によってかなり打ち消されている。また、第 3 レンズエレメント L 3 の屈折力変動 $\Delta \Phi 3$ も該 $\Delta \Phi 2$ ほどではないが、 $\Delta \Phi 1$ を打ち消すよう作用している。この結果、焦点位置の温度変動量は、0.0272mm/degree に圧縮される。なお、焦点位置の温度変動量の符号が正の場合は、レンズ群から遠ざかる方向に光学的焦点が移動することを意味する。

30

【 0 0 7 0 】

次に、上記第 1 実施例と同様に、実際のレンズ形状やレンズ間隔、および実際の撮像素子の位置の熱変動などの要素も含めてより厳密な温度変動シミュレーションをしてみる。レンズエレメント、および焦点位置に置かれる撮像部材の保持部材をすべてアルミニウム製とする。この場合、撮像部材の機械的焦点位置と光学的焦点位置のずれ量は、0.011mm/degree になる。アルミニウムの線膨脹率は $2.36E-6$ (degree⁻¹) とした。これは、アポクロ

40

マートとしては非常に小さいずれ量といえる。よって、優秀な色消し性能を有し、かつ環境温度が変化しても比較的焦点位置の変動量が小さい光学系が実現できるという本発明の効果が得られる。

【 0 0 7 1 】

また、上記各実施例では、無限遠物体の場合について説明している。しかし、本発明はこれにかぎられるものではなく、例えば上記各実施例にかかるアサーマルレンズ系を相互に対向させて配置して、有限距離物体についてのリレー光学装置を構成することもできる。

【 0 0 7 2 】

また、例えば潜望鏡等のペリスコープのように長い距離の像のリレーを要求されるような光学装置の一部または全部に本発明にかかるアサーマルレンズ系を用いると、温度変化の

50

激しい環境下においても像の移動が少なくなる。よって、光学系の調整の頻度が少なくて済むという効果が得られる。

【 0 0 7 3 】

また、上記リレー光学装置や上記ペリスコープ光学装置において、結像作用に最も寄与する部分に本発明にかかるアサーマルレンズ系を用いることが望ましい。これにより、焦点位置の温度変動量をより低減できるという効果を奏する。

【 0 0 7 4 】

さらに、レンズエレメント保持部材の種類を適切に選択することにより、優秀な色消し性能を有し、かつ焦点位置の温度変動が低減された光学系が実現できるという本発明の効果を一層高めることができる。

10

【 0 0 7 5 】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明によれば、優れた色消し性能を有し、かつ焦点位置の温度変動が低減されたアサーマルレンズ系、及びこれを含む光学装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】(a) は本発明の第 1 実施例にかかるアサーマルアポクロマートレンズ系のレンズ構成図、(b) はその軸上色収差および球面収差図である。

【図 2】(a) は本発明の第 2 実施例にかかるアサーマルアポクロマートレンズ系のレンズ構成図、(b) はその軸上色収差および球面収差図である。

【図 3】(a) は第 1 の従来例にかかるアサーマルアポクロマートレンズ系のレンズ構成図、(b) はその軸上色収差および球面収差図である。

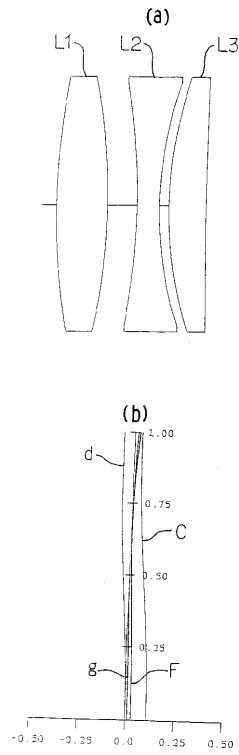
20

【図 4】(a) は第 2 の従来例にかかるアサーマルアポクロマートレンズ系のレンズ構成図、(b) はその軸上色収差および球面収差図である。

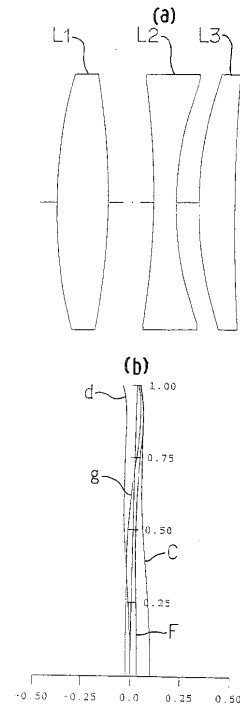
【符号の説明】

- L 1 第 1 レンズエレメント
- L 2 第 2 レンズエレメント
- L 3 第 3 レンズエレメント

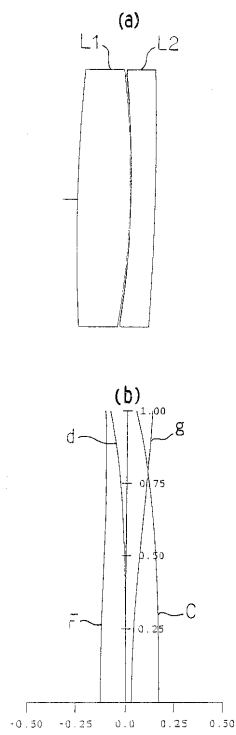
【図 1】



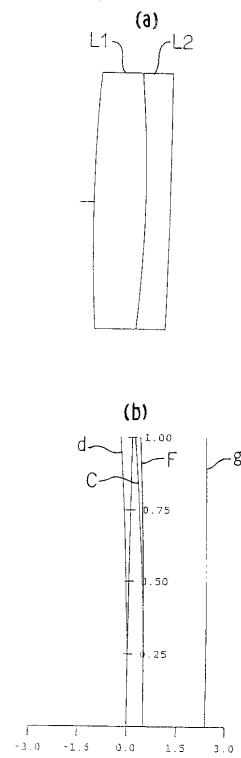
【図 2】



【図 3】



【図 4】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特公昭45-037385(JP,B1)
特開昭58-066907(JP,A)
特開昭62-178918(JP,A)
特開平07-013071(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G02B 13/00