



## 準等価ガラスを用いたラジアル型 GRIN レンズの 光学設計法

永岡 利之・槌田 博文・山本 公明

オリンパス光学工業(株) 諸隈研究室 〒192 八王子市久保山町 2-3

(1992年4月30日受付, 1992年8月4日受理)

### Optical Design Method Based on the Quasi-Equivalent Glass of the Radial GRIN Lens

Toshiyuki NAGAOKA, Hirofumi TSUCHIDA and Kimiaki YAMAMOTO

T. Morokuma Research Laboratory, Olympus Optical Co., Ltd.,  
2-3, Kuboyama-cho, Hachioji 192

(Received April 30, 1992; Accepted August 4, 1992)

A simple method to effectively use the radial GRIN material in the optical system is presented. The method is based on the concept of the quasi-equivalent glass which is composed of the equivalent Abbe number  $\nu_{\text{eqv}}$  and the effective refractive index  $n_{\text{eff}}$ ,  $\nu_{\text{eqv}}$  and  $n_{\text{eff}}$  being defined in a way that both chromatic aberration and field of curvature of a single radial GRIN lens are nearly equal to those of a single lens made of homogeneous glass. Lens design examples applied this technique are demonstrated and its effectiveness is verified.

#### 1. はじめに

レンズ内部に屈折率分布を有する不均質レンズ (GRIN レンズ) は, 均質系にない設計上の自由度を有するため, 大きな光学的效果を期待できる. 中でも, 光軸から半径方向に向かって屈折率分布を有するラジアル型 GRIN レンズは, 均質非球面レンズも有しない像面湾曲および色収差補正能力をもち, 理論上大きな利用価値をもつものと期待されている<sup>1,2)</sup>.

しかし, これを利用した設計例<sup>2-6)</sup>が多く存在する反面, 実際の設計法に関する研究報告はきわめて少なく, 特にカメラ等を対象とした白色光学系に対し, 実際の設計場面で利用できる設計法はほとんどないのが実状と思われる. このため, 実際の素材特性を考慮しつつラジアル型 GRIN 素材の持つポテンシャルを十分に引き出すような有効設計が非常に困難なものになっている. われわれは均質媒質に準等価になるような準等価ガラス (正確には準等価均質媒質とすべきであるが, ここでは, 準等価ガラスと略称する) の概念を導入し, ラジアル型

GRIN 素材を通常の均質ガラスと同様に扱える簡単な方法を考案した. 本方法は実際の設計において GRIN レンズ素材のポテンシャルを把握する場合や, 適用箇所を考慮する時, 非常に有効な一手段となり得ると思われる. 準等価ガラスの定義とその利用法および設計例について報告する.

#### 2. ラジアル型 GRIN レンズの基本特性<sup>2)</sup>

説明の展開上, 最初にラジアル型 GRIN レンズの設計的に重要な基本特性を整理する.

ラジアル型 GRIN レンズの屈折率分布式  $N(r)$  は次式で与えられる.

$$N(r) = N_{00} + N_{10}r^2 + N_{20}r^4 + \dots \quad (1)$$

ここで,  $r$  は光軸から半径方向の距離,  $N_{00}$  は光軸上の屈折率,  $N_{i0}(i=1, 2, 3, \dots)$  は屈折率分布を表す係数である.

また, ラジアル型 GRIN レンズの分散特性は次式で特徴づけられる.

$$V_{00} = (N_{00d} - 1) / (N_{00f} - N_{00c}), \quad (2)$$

$$V_{i0} = N_{i0d} / (N_{i0F} - N_{i0C}), \quad (3)$$

$$(i=1, 2, 3, \dots)$$

ここで、 $V_{00}$  および  $V_{i0}$  はそれぞれ屈折率の基本成分および分布係数に対するアッベ数、また  $N_{00d}$ ,  $N_{00F}$ ,  $N_{00C}$  はそれぞれ d, F, C ラインに対する屈折率  $N_{00}$  であり、 $N_{i0d}$ ,  $N_{i0F}$ ,  $N_{i0C}$  はそれぞれ d, F, C ラインに対する屈折率分布係数  $N_{i0}$  を表している。

また、薄肉のラジアル型 GRIN レンズ単体のペッツバル和  $PTZ$ 、軸上色収差  $PAC$  に関し次の関係式がある。

$$PTZ = \phi_s / N_{00} + \phi_m / N_{00}^2, \quad (4)$$

$$PAC = K(\phi_s / V_{00} + \phi_m / V_{i0}). \quad (5)$$

ただし、 $\phi_s$  は面の屈折力、 $\phi_m$  は媒質の屈折力、また  $K$  は光線高および最終近軸光線角度に依存する係数を示す。

### 3. ラジアル型 GRIN レンズの準等価ガラス

式(4)および式(5)からわかるように、ラジアル型 GRIN レンズの大きな特徴はペッツバル和と色収差の補正能力にある。一方、ペッツバル和と色収差は、この両収差の同時補正が新種ガラスの発明によって可能となった歴史的背景を持つように、白色光学系を規定する程重要な収差である。この二つの重要性に注目し、ラジアル型 GRIN レンズの素材特性とペッツバル和および色収差の補正能力を関連づける方法を考える。

そのため、ラジアル型 GRIN レンズの準等価ガラスという概念を導入する。準等価ガラスは薄肉系においてラジアル型 GRIN レンズ単体で発生するペッツバル和と色収差の値が、同じ屈折力の均質レンズ単体で発生する値と等しくなるような屈折率、およびアッベ数をもつガラスと定義する。したがって、以下のように数式化できる。

ラジアル型 GRIN レンズ単体と同じ屈折力を持つ均質レンズの屈折率およびアッベ数を、それぞれ  $n_{eff}$  および  $\nu_{eqv}$  とすると、

$$\phi / n_{eff} = \phi_s / N_{00} + \phi_m / N_{00}^2, \quad (6)$$

$$\phi / \nu_{eqv} = \phi_s / V_{00} + \phi_m / V_{i0}, \quad (7)$$

が成立する。ここで、

$$\phi = \phi_s + \phi_m.$$

したがって、

$$n_{eff} = N_{00}^2 / \{(1 - N_{00})a + N_{00}\}, \quad (8)$$

$$\nu_{eqv} = V_{00} V_{i0} / \{(V_{00} - V_{i0})a + V_{i0}\}, \quad (9)$$

となる。ここで、 $a$  はラジアル型 GRIN レンズの媒質

の屈折力比を示し、

$$a = \phi_m / \phi,$$

を表す。

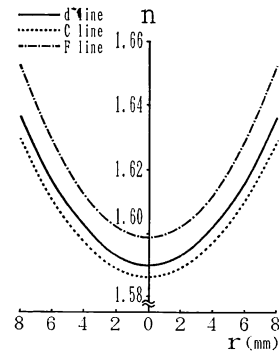
以上より、準等価ガラスは式(8)、式(9)で与えられる  $n_{eff}$ ,  $\nu_{eqv}$  をもつガラスとみなせる。ここで、 $n_{eff}$ ,  $\nu_{eqv}$  はそれぞれラジアル型 GRIN レンズの有効屈折率および等価アッベ数と考えることもできる。 $n_{eff}$  および  $\nu_{eqv}$  は通常の均質レンズの屈折率、アッベ数と同様に取り扱いえるので、均質レンズを用いた設計上の知識がラジアル型 GRIN レンズの適用において、そのまま利用することが可能となる。

### 4. 設 計 例

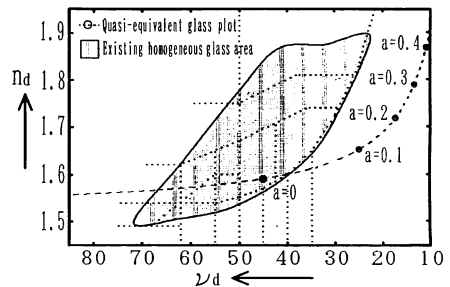
準等価ガラスは種々利用できるがここではそれを用いた設計例を示す。設計に用いるラジアル型 GRIN レンズの屈折率分布は **Fig. 1** に示されたものとする。このラジアル型 GRIN レンズは以下に示す素材特性を持つ。

$$N_{00} = 1.5900, V_{00} = 45.00, V_{i0} = 5.00, N_{i0} > 0.$$

$N_{00}$ ,  $V_{00}$ ,  $V_{i0}$  の値を式(8)、式(9)に代入し、準等価ガラスを求める。求めた準等価ガラスは  $a$  を変数としてガラスマップ上に **Fig. 2** のような軌跡を描く。



**Fig. 1** Index profile of the radial GRIN material used in the design.



**Fig. 2** Quasi-equivalent glass plot on a glass map.

Fig. 2 より, この素材の等価曲線は  $a > 0.05$  程度  
 のとき既存ガラスにない特性を持つので,  $a > 0.05$  で用い  
 れば, 利用法によって均質レンズ以上の効果が期待でき  
 る.

この素材を有効に使用できるレンズ系を次に考える.  
 この素材は, 既述のように媒質の屈折力比  $a > 0.05$  程  
 度であれば, Pb 系の既存ガラスよりもさらに高分散ガ  
 ラスとして使用できる. また, この素材は媒質に負の屈  
 折力を持つ ( $N_{10} > 0$ ) ので, 色収差の補正上, 正の屈折  
 力を持つレンズ系あるいはレンズ群の負レンズに用いる  
 と効果的であると予測できる.

ここでは, レンズ枚数が少なく効果がわかりやすい,  
 トリプレットと多少複雑なズームレンズに適用して検討  
 した結果を示す. トリプレットは正レンズ, 負レンズ,  
 正レンズの3枚で構成され, ペッツバル和と色収差の  
 補正上, 負レンズは低屈折率, 高分散ガラスであるこ  
 とが望ましい. そこで,  $a = 0.07$  程度として準等価ガラ  
 スをトリプレットの負レンズに用い, ペッツバル和と色  
 収差を補正し, さらに屈折率分布の高次項を考慮するこ  
 とで球面収差を補正する. 具体的に適用し設計した結  
 果, 同性能で従来レンズより明るいレンズの設計が可能

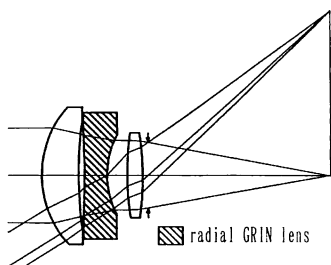


Fig. 3 Configuration of the triplet using a radial GRIN lens.

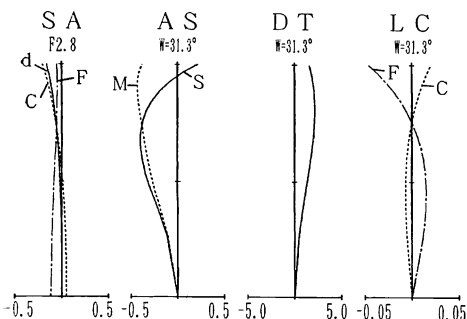


Fig. 4 Aberration plot of the triplet. SA, AS, DT and LC represent spherical aberration, astigmatism, distortion, and lateral chromatic aberration, respectively.

であった. 設計したレンズ系の光路図, 収差図をそれぞ  
 れ Fig. 3, Fig. 4 に示す. またレンズデータを Table  
 1 に示す. Fig. 4 において SA, AS, DT および LC は  
 それぞれ, 球面収差, 非点収差, 歪曲収差および倍率の  
 色収差を示す. また, Table 1 で  $P_{i0}$  は部分分散比を  
 示す.

Fig. 5 は Fig. 1 の同特性のガラスを正群, 負群, 正  
 群, 正群で構成された4群ズームレンズのリレー系に  
 適用した設計例である. この例も  $a = 0.08$  程度とし,  
 トリプレットへの適用と同様の設計的效果をねらって  
 GRIN レンズを使用しているが, 同性能で従来レンズよ  
 り明るいレンズ設計が可能となっている. 設計したレン  
 ズの光路図, レンズデータをそれぞれ Fig. 5, Table 2  
 に示す.

以上の設計例以外にも他の光学系への適用を幾つか試  
 みたが, 本方法は簡単であるが設計上非常に有効である  
 ことを確認できた<sup>7)</sup>. なお, 本方法は光学系の基本構造に  
 影響を及ぼすペッツバル和と色収差の補正を基本に組

Table 1 Lens parameters of the triplet. Focal length 35mm, F/2.8, half field of view 31.3°.

Surface	Curvature (mm <sup>-1</sup> )	Thickness (mm)	$n_d$	$\nu_d$
1	0.0755	4.8339	1.8160	46.62
2	0.0215	0.7835	1.0	
3	-0.0067	3.0127	GRIN*	
4	0.0898	2.6535	1.0	
5	0.0229	1.9678	1.7725	49.66
6	-0.0252	0.6965	1.0	
7	aperture stop	23.6650	1.0	
8	focal plane			

\* Radial GRIN lens.  $N_{00} = 1.5900$ ,  $V_{00} = 45.00$ ,  $V_{10} = 5.00$ ,  $V_{20} = 5.00$ ,  $N_{10} = 0.72124 \times 10^{-3}$ ,  $N_{20} = -0.35423 \times 10^{-5}$ ,  $P_{00} = 0.3$ ,  $P_{10} = 0.3$ ,  $P_{20} = 0.3$ ,  $n_{eff} = 1.63$ ,  $\nu_{eq} = 28.8$ .

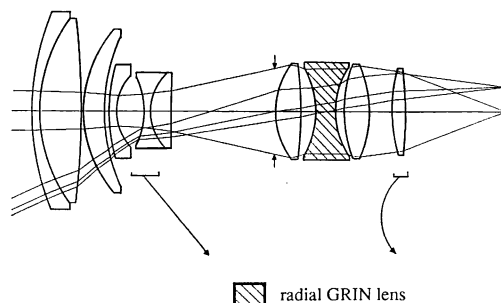


Fig. 5 Configuration of the zoom lens using a radial GRIN lens.

**Table 2** Lens parameters of the zoom lens.  
Focal length 7-42 mm, F/1.4-1.8, half field  
of view 25.3°-4.2°.

Surface	Curvature (mm <sup>-1</sup> )	Thickness (mm)	$n_d$	$\nu_d$
1	0.0305	1.0000	1.8467	23.78
2	0.0505	5.2000	1.6170	62.79
3	-0.0098	0.2000	1.0	
4	0.0636	2.7296	1.6170	62.79
5	0.0408	W 0.5000 T 12.8096	1.0	
6	0.0463	1.0000	1.7725	49.66
7	0.1440	3.4120	1.0	
8	-0.1092	0.8000	1.7410	52.68
9	0.1446	2.5742	1.7847	25.71
10	-0.0002	W 12.8096 T 0.5000	1.0	
11	aperture stop	0.2000	1.0	
12	0.0945	3.0893	1.7410	52.68
13	-0.0202	1.9751	1.0	
14	-0.0921	2.5189	GRIN*	
15	0.0984	1.0106	1.0	
16	0.0582	3.3116	1.7410	52.68
17	-0.0691	W 2.8834 T 3.1834	1.0	
18	0.0520	1.6000	1.6170	62.79
19	-0.0187	W 12.6000 T 12.3000	1.0	
20	focal plane		1.0	

\* Radial GRIN lens.  $N_{00}=1.5900$ ,  $V_{00}=45.00$ ,  
 $V_{10}=5.00$ ,  $V_{20}=5.00$ ,  $V_{30}=5.00$ ,  $N_{10}=0.20443 \times 10^{-2}$ ,  
 $N_{20}=-0.26029 \times 10^{-4}$ ,  $N_{30}=-0.26523 \times 10^{-6}$ ,  
 $P_{00}=0.3$ ,  $P_{10}=0.3$ ,  $P_{20}=0.3$ ,  $P_{30}=0.3$ ,  
 $n_{\text{eff}}=1.64$ ,  $\nu_{\text{eq}}=27.3$ .

み立てられたものであるが、その他の収差の補正は  $N_{20}$  以上を変化させることによって、ペッツバル和、色収差を変えることなくコントロールすることが可能である。

## 5. ま と め

ラジアル型 GRIN レンズのペッツバル和と色収差の補正能力に着目し、有効屈折率と等価アッペ数から構成される準等価ガラスの概念を提案した。準等価ガラスの方法を具体的設計に適用し、ラジアル型 GRIN レンズの適用箇所、ポテンシャル把握に有効であることが確認できた。

## 文 献

- 1) P. J. Sands: "Third-order aberrations of inhomogeneous lenses," J. Opt. Soc. Am., **60** (1970) 1436-1443.
- 2) L. G. Atkinson, S. N. Houde-Walter, D. T. Moore, D. P. Ryan and J. M. Stagaman: "Design of a gradient-index photographic objective," Appl. Opt., **21** (1982) 993-998.
- 3) J. B. Caldwell and D. T. Moore: "Design of gradient-index lens system for disk format cameras," Appl. Opt., **25** (1986) 3351-3355.
- 4) N. Kitagishi, H. Nakayama, S. Suda, J. Hattori and A. Horiuchi: U. S. Patent No. 4842386 (1989).
- 5) N. Kitagishi and J. Hattori: U. S. Patent No. 4859040 (1989).
- 6) H. Tsuchida, N. Aoki, K. Hyakumura and K. Yamamoto: "Design of zoom lens systems that use gradient-index materials," Appl. Opt., **31** (1992) 2279-2283.
- 7) 永岡利之, 槌田博文, 山本公明: "プランアクロマート系におけるラジアル GRIN レンズの利用法", 第17回光学シンポジウム講演予稿集 (1992) pp. 9-10.