

低分散屈折率分布レンズの開発と応用

山本 公明・槌田 博文・野田 聡

屈折率分布型レンズ (GRIN レンズ) は、均質レンズにない設計上の自由度をもつため、レンズ用素子として高い潜在力を有している。中でもラジアル型 GRIN レンズ (以後 r-GRIN レンズと呼ぶ) は、レンズ枚数の削減や性能向上に大きな効果が期待でき、すでに多くの研究がなされてきた。特に設計面では、その潜在力を示す多くの研究が発表されてきている¹⁻⁵⁾。しかし、カメラや顕微鏡対物レンズ等の白色照明下で使用する高精度な光学レンズとして有効な設計は、そのほとんどが低分散分布または負分散分布を有する r-GRIN 素材を使用したものであり、その実現性はかなり疑問視されてきたのが実体であったと思われる。しかしながら、近年、材料開発研究の進展により、低分散分布材料が実現されるようになり、改めて低分散 r-GRIN レンズの有効性が実用的観点から検討される必要性が出てきている。

本稿では、実現可能となった低分散 r-GRIN 素材の作製方法を概観し、それを利用した有効なレンズ設計例の一端を紹介する。実用的観点を重視すると両面が平坦なウッド (Wood) レンズがコスト面からも魅力的であるので、ここでは特にウッドレンズとその利用法に焦点を当ていくつかの有効な設計例を紹介してみたい。

1. 低分散 r-GRIN 素材の作製方法

r-GRIN 素材の主な作製方法には、イオン交換法とゾルゲル法がある。前者の方法は溶融塩中でガラス中のイオンを動かし金属イオン成分に濃度分布を付与することで、屈折率に分布をつける方法である⁶⁾。実用化されている歴史ある方法であり低分散分布 GRIN の作製も可能であるが、動かすことのできる金属イオンが、1 価の金属イオン (Li^+ ,

K^+ , Na^+ , Tl^+ , Cs^+ , Ag^+ , Rb^+) に限定され、分布付与できる金属イオンの種類の制約から、低分散 GRIN レンズの場合に得られる屈折率差が小さいのが難点である。一方、後者の方法はガラスの前駆体であるゲルの段階で、金属成分に濃度分布をつける作製法であり、それぞれ分散特性の大きく異なる多価の金属イオンを生じる金属成分 (Zr , Pb , Ti , Ba , Ge など) を使用できるという利点がある。まだ実用化されておらず開発途上の技術であるが、この方法で作製したレンズも撮像レンズとして十分に使用可能であることが確認されている^{7,8)}。

この章では、後者の方法で得られる低分散分布ラジアル GRIN 素材につき、組成設計、作製方法、および得られた材料の特性等につき概括する⁹⁻¹¹⁾。

1.1 組成設計

シリカを主成分とするガラスに、単独の金属成分の濃度分布をもたせた場合、得られる GRIN の分散分布特性は高分散分布となるため、低分散分布を得るためには組成設計上の工夫が必要である。

一般の光学ガラスで、低分散ガラスの凸レンズと、高分散ガラスの凹レンズを接合すると色消し効果が得られることはよく知られているが、このことを r-GRIN レンズに置き換えて考えてみると、GRIN レンズを構成する金属イオンを 2 種類混入させ、低分散の金属イオン成分を凸状分布に、高分散イオン成分を凹状分布とする濃度分布が構成できればよいことになる。このことは、ガラスの組成成分と屈折率の間に加成性が成立すると仮定すると得られる結論である^{12,13)}。

このようにして構成された低分散分布 r-GRIN レンズの組成設計例を図 1 に示す。比較的 low dispersion な特性をもつバリウムの大きな凸状の濃度分布と、高分散特性をもつチタンの小さな凹状の濃度分布で構成されたものであり、全体

オリンパス光学工業(株) (〒192-8512 八王子市久保山町 2-3)
E-mail: kimiaki@rnet.olympus.co.jp

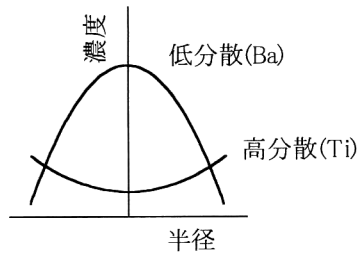


図1 低分散 r-GRIN 素材の組成分布構成。

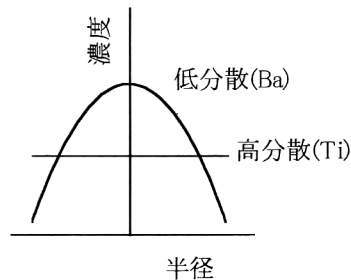


図2 作製プロセスを考慮した低分散 r-GRIN 素材の組成分布構成。

として正パワーをもつ。

しかし、作製プロセスを考慮すると2種の成分の濃度分布を同時に制御することは容易でないため、シリコンに対するチタン濃度比を径方向にわたって一定とし、そこにバリウムのみ径方向に凸状分布とする構成としてもよい(図2)。このような構成としても、全体容積の中で占めるチタン含有量はバリウムに対し相対的に凹形状に分布するので、相当な低分散化が可能となる。

1.2 作製法

図3にゾルゲル法による r-GRIN 素材作製プロセスの概略を示す。

まず、シリコンアルコキシド、チタンアルコキシド、酢酸バリウムを含有するゾル(液体)を調製する。ゾルを円筒状の容器に注ぎ、室温でゲル化(固化)させる。ゲルを熟成した後に、容器から取り出してメタノール、エタノール、アセトンまたはそれらの混合液に浸漬し、酢酸バリウムをゲル中に微結晶として析出させて固定する。次にこのゲルを溶液に浸漬し、ゲル中の酢酸バリウムを溶出し、バリウムが半径方向の中心部分で高く周辺部分で低い凸状の濃度分布を付与する。溶出液は酢酸カリウム入りメタノールまたは酢酸カリウム入りメタノール/アセトンの混合液等を使用する。このとき、シリコンとチタンは強い結合関係をもっているため、溶かし出されることはなく、シリコンとチタンの比率は一定に保たれる。次にこのゲルをアセトン等の別の溶液に浸漬し、ゲル中のバリウムの濃度分布を

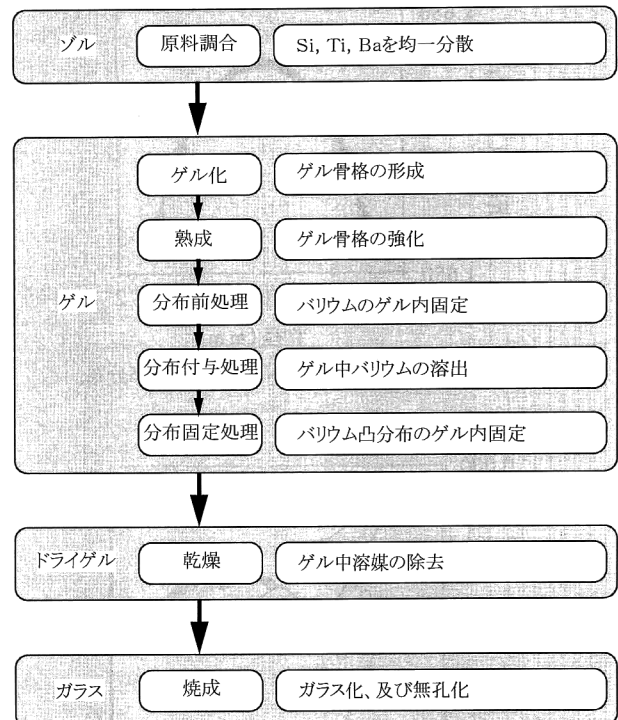


図3 ゾルゲル法による r-GRIN 素材の作製プロセス。

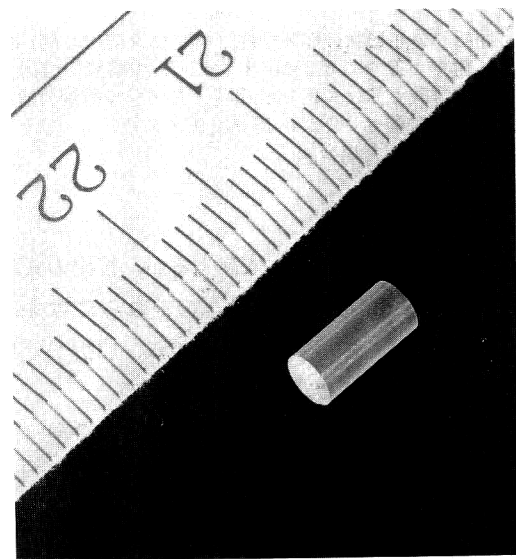


図4 作製した r-GRIN 素材。

固定する。

このゲルを乾燥、焼成することにより無孔化し、 $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-BaO-K}_2\text{O}$ 系ガラスのロッドを得る。

1.3 材料特性

作製した GRIN 素材の一例を図4に、また径方向の屈折率分布を図5に示す。屈折率差 Δn は約0.018であり、屈折率分布形状はほぼ放物線状の分布プロファイルになっている。分布プロファイルは酢酸バリウムの溶出過程で使用

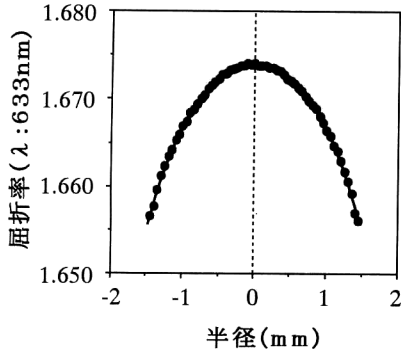


図5 作製した低分散 r-GRIN 素材の屈折率分布。

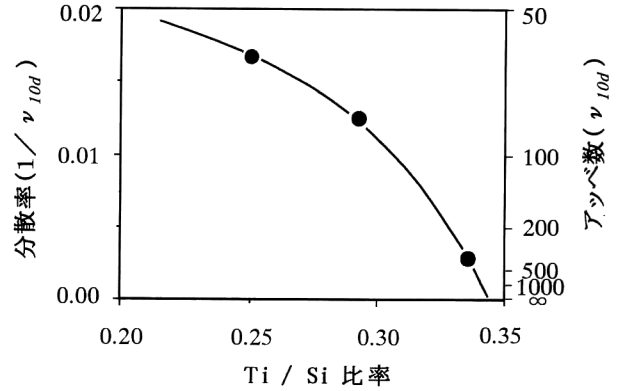


図7 分散率の Ti/Si 依存性。

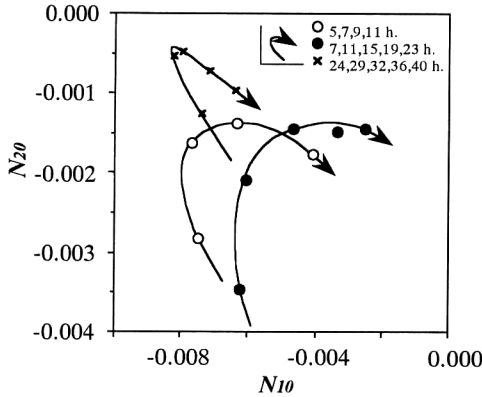


図6 屈折率分布形状の作製条件（バリウム溶出時間）依存性。○：酢酸カリウム 0.3 mol/l メタノール溶液で溶出した場合、●：酢酸カリウム 0.15 mol/l メタノール溶液で溶出した場合、×：酢酸カリウム 0.15 mol/l メタノール・アセトン混合溶液で溶出した場合。

する溶媒の種類と浸漬時間に依存するが、後出の式(1)で示される屈折率分布係数 N_{10} 、 N_{20} のそれらに対する依存性（測定値）を図6に示す。この図から、屈折率分布もかなり制御可能であることがわかる。

図7はこのガラス中のチタン量と媒質の分散率（ $=1/\text{媒質のアッペ数 } \nu_{10d}$ ）との関係を実測したデータを示す。含有するチタン量が多いほど分散率は低下（ ν_{10d} 値は増加）し、色収差発生量が抑制される。また、チタン含有量がある値以上になると負分散分布となり、負の色収差の発生も可能になることを示唆している。

バリウムとチタンの複合分布により達成されたこの低分散分布 r-GRIN レンズは、バリウム濃度分布を大きくすることで、屈折率差の拡大を図ることが可能である¹⁴⁾。

2. 低分散 r-GRIN 素材を用いたレンズの設計例

2.1 r-GRIN レンズの基本特性表示

r-GRIN レンズの屈折率分布 $N_i(r)$ は、

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

表1 設計に使用した r-GRIN 素材の特性。

パラメーター	素材 (GP)	素材 (GN)
N_{00}	1.70000	1.66000
N_{10}	-1.0000×10^{-2}	1.0000×10^{-2}
N_{20}	0	0
ν_{00}	40.00	40.00
ν_{10}	500.0	500.0
P_{00}	0.295	0.295
P_{10}	0.295	0.295
有効径 D_e	4.0	4.0
最大屈折率差 Δn	0.04	0.04

で表される。ここで、 r は光軸からの半径方向の距離、 N_{i0d} は波長 λ における屈折率分布係数を示す。

また、アッペ数 ν_{i0} 、部分分散比 P_{i0} はそれぞれ以下の式で与えられる。

$$\nu_{00} = \frac{(N_{00d} - 1)}{(N_{00F} - N_{00C})}, \quad \nu_{i0} = \frac{N_{i0d}}{(N_{i0F} - N_{i0C})} \quad (i=1, 2, \dots) \quad (2)$$

$$P_{i0} = \frac{(N_{i0d} - N_{i0C})}{(N_{i0F} - N_{i0C})} \quad (i=0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

ただし、 N_{i0d} 、 N_{i0C} 、 N_{i0F} は、それぞれ d, C, F ラインに対する屈折率分布係数を表す。

このとき、薄肉 r-GRIN レンズのパワー（屈折力） ϕ_r は次式で示される。

$$\phi_r = \phi_s + \phi_m, \quad \phi_m = -2 N_{10} t_m \quad (4)$$

ここで、 ϕ_s 、 ϕ_m はそれぞれ面および媒質のパワーを示し、 t_m は媒質の厚さを表す。

また、薄肉レンズのペッツパウル和 PTZ 、軸上色収差 PAC は、それぞれ次式で表される。

$$PTZ = \frac{\phi_s}{N_{00}} + \frac{\phi_m}{N_{00}^2} \quad (5)$$

$$PAC = K \left(\frac{\phi_s}{\nu_{00}} + \frac{\phi_m}{\nu_{10}} \right) \quad (6)$$

ただし、 K は近軸光線高と最終面以後の近軸光線角度に依

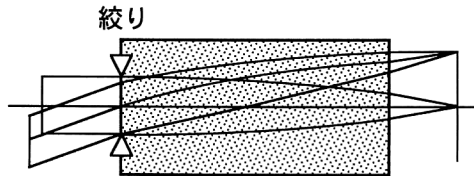


図8 ビデオ用ウッドレンズ。

表2 収差補正に用いるパラメーターとそれによる収差補正レベル。

収差	収差補正に用いるパラメーター	収差補正レベル
球面収差	N_{20}	許容される
コマ収差	N_{20} , 絞り位置	許容される
非点収差	レンズ厚	補正される
像面湾曲	媒質の屈折力	許容される
屈曲収差	(電氣的補正)	補正されない
軸上色収差	ν_{10}	補正される
倍率色収差	ν_{10} , 絞り位置	許容される

存する係数である。

以下では、表1に示す素材特性を仮定し、設計した結果を報告する¹⁵⁾。

2.2 両平面単レンズ(ウッドレンズ)の設計

最も単純で簡素化したr-GRINレンズはウッドレンズと呼ばれる両面が平坦な単レンズであるが、このレンズでは面のパワー ϕ_s はゼロであるので、式(4)~(6)からわかるように、レンズのパワー、像面湾曲、軸上色収差はすべて屈折率分布係数 N_{10} に大きく依存する。したがって、 N_{10} の制御は特に重要である。使用素材を表1中の正屈折力素材(表中のGP)とし、1/4インチCCDの使用を仮定し、ウッドレンズ1枚でビデオ用レンズを設計した例を図8に示す。撮像素子として1/4インチCCDを想定したことから、スペックは焦点距離 $f=6$ mm, F/2.8, 最大像高2.0 mm, 画角 $2\omega=38.7^\circ$ とした。

図8からわかるように、このレンズ系の設計では、絞りをレンズ第1面に置いているが、これにより倍率色収差とコマ収差の抑制が可能となっている。このレンズの収差補正のために主として利用する設計パラメーター(補正原理)と補正レベルを表2にまとめた。各パラメーターを変化させることにより各収差を完全に補正できたり、あるいは許容レベルとすることができる。表2から、非点収差はレンズ厚によって制御されることがわかるが、図9に非点収差とレンズ厚との関係を示す。歪曲収差は、補正されず樽型に発生するが、用途によっては許容されるレベルとなる。軽減が必要な場合は、電氣的に補正する手法もある。

このレンズの詳しい設計データを表3に示す。また、このレンズの収差図を図10に、空間周波数20, 40, 100 lp/

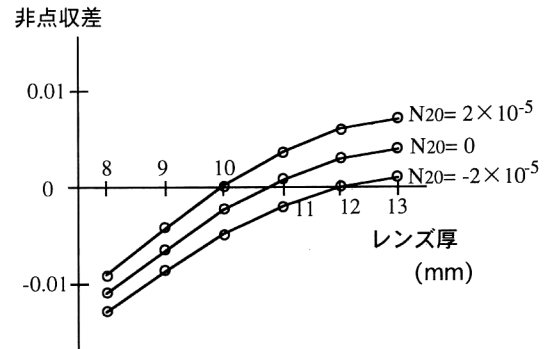


図9 非点収差のレンズ厚依存性。

表3 ビデオ用ウッドレンズの設計データ。

画番号	曲率半径(mm)	厚み(mm)	ガラス
1	∞ (絞り)	10.41	GRIN(GP)
2	∞	2.56	

焦点距離 $f=6.0$ mm, F ナンバー F/2.8, 最大像高IH=2.0 mm (1/4"), 画角 $2\omega=38.8^\circ$

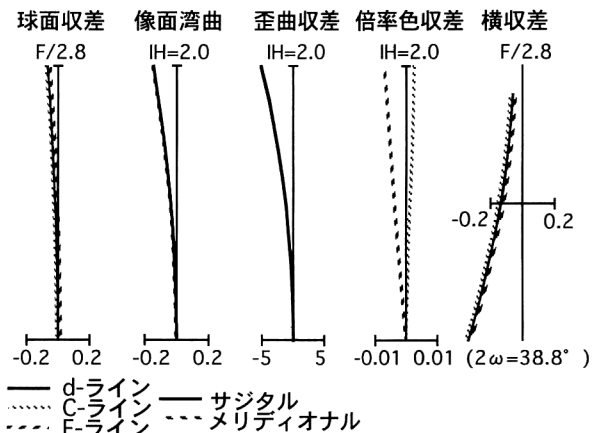


図10 ビデオ用ウッドレンズの収差図。

mmにおける撮像素子位置とMTF(modulation transfer function)の関係を図11に示す。図10および図11から、収差レベルやMTF値は良好であり、このレンズはウッドレンズ1枚でありながら、ビデオカメラ用レンズとして実用上十分な性能をもつものであることがわかる。均質球面レンズでほぼ同性能を達成するためのレンズ構成を図12に示すが、図12からわかるように少なくとも3枚のレンズ枚数が必要であるので、このウッドレンズは球面系レンズに対しほぼ1/3のレンズ枚数削減効果があると見なせる。

高分散材料との比較のため、同スペックのレンズを $\nu_{10}=14.7$ で他の設計パラメーターは表1,表3と同じ高分散r-GRINレンズで設計した場合の収差図を図13に示すが、色収差が大きく、ビデオ用レンズとして全く利用でき

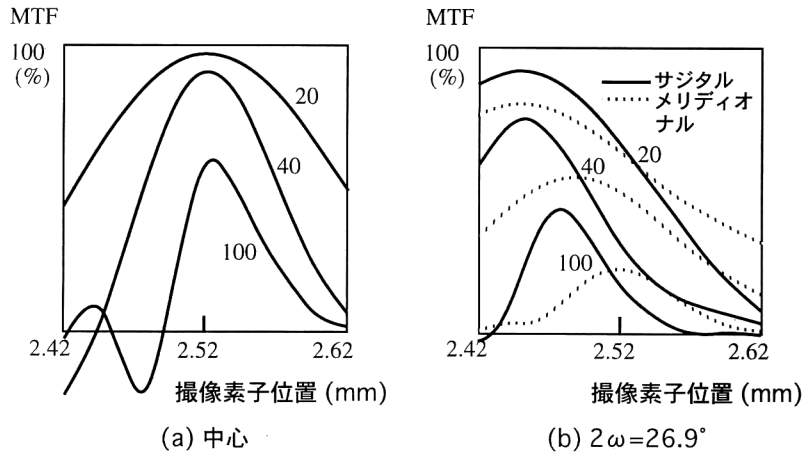


図11 ビデオ用ウッドレンズのMTF. 20, 40, 100 はそれぞれ 20, 40, 100 本/mmの空間周波数を示す.

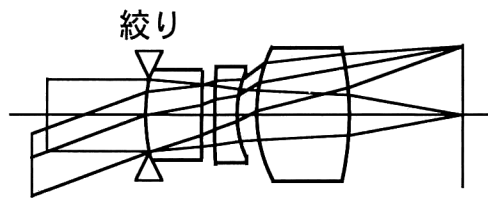


図12 ビデオ用ウッドレンズと同性能の球面レンズ系.

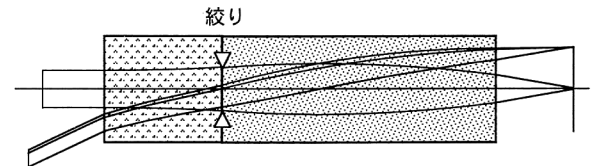


図14 広角レンズの設計例.

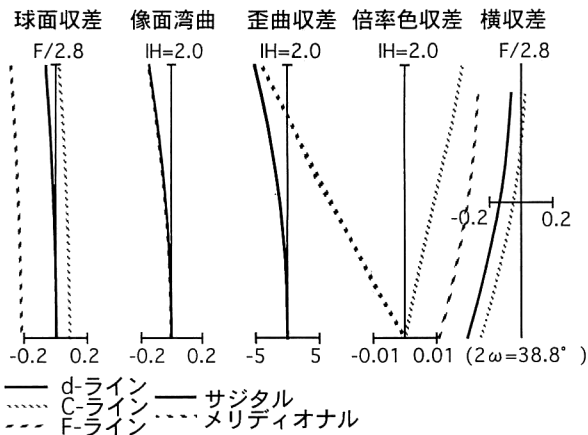


図13 高分散分布素材を用いたときのビデオ用ウッドレンズの収差図.

ないことがわかる.

図8のレンズの課題としては、レンズ系の画角が狭いことが挙げられる。画角は、最大屈折率差でほぼ決定されるので、0.04では限界があるが、最大屈折率差のさらに大きな素材ができれば、同様の構成でさらに大きな画角をとることも可能である。

2.3 広角レンズの設計

ウッドレンズの物体側に負パワーをもつ両平板ラジアル型GRINレンズを配置することにより、画角を広げることができる。このようにして設計した広角レンズの設計例を

表4 広角レンズの設計データ.

画番号	曲率半径(mm)	厚み(mm)	ガラス
1	∞	5.67	GRIN (GN)
2	∞ (絞り)	13.57	GRIN (GP)
3	∞	3.70	

焦点距離 $f=4.8$ mm, F ナンバー F/2.8, 最大像高 IH=2.0 mm (1/4"), 画角 $2\omega=50.0^\circ$

図14に示す。設計に使用した負パワーGRIN素材は表1のGNであり、正パワーのものと逆の屈折率分布をもつが、分散特性は同特性のものである。このレンズの焦点距離は4.5 mm, F ナンバーは2.8となっているが、詳細な設計データを表4に、また収差図を図15に示す。図15からわかるように、このレンズの性能レベルは良好であり、レンズ系全体を負正のレトロタイプとすることで、画角 2ω を先の 38.7° から 54.0° に広げることが可能となる。

また、負正2枚の平面レンズの厚みだけを変化させることにより、任意の中間的な画角のレンズ系を得ることもできる。

2.4 ズームレンズの設計

図8のウッドレンズはそれ1枚で良好な結像性能をもつので、それをズームレンズのリレー系として用いることも有用である。正負正の3群構成のズームレンズの第3群にウッドレンズを適用した結果を図16に示す。スペックは、焦点距離 $f=3.5\sim 35$ mm, F/2.8, ズーム比 $\times 10$ である。

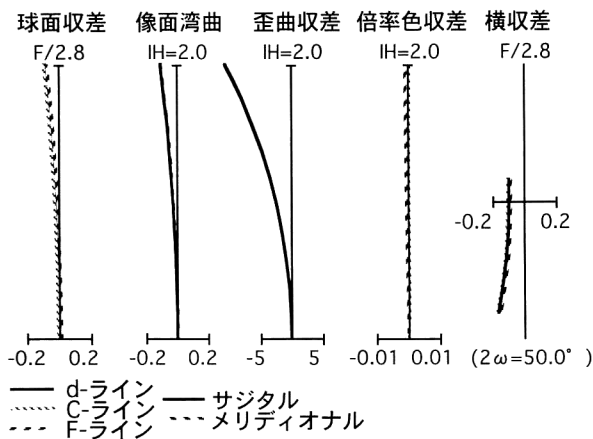


図 15 広角レンズの収差図。

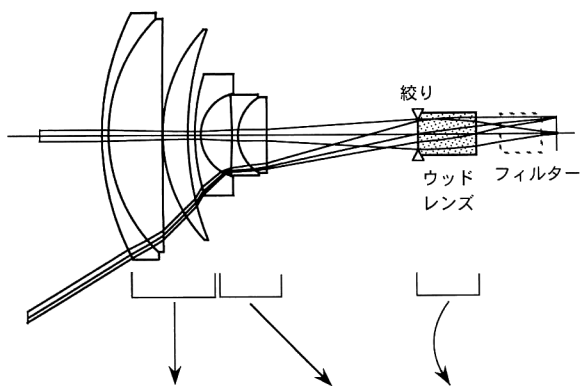
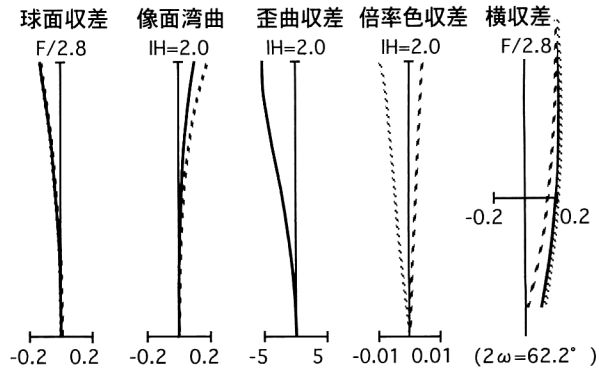


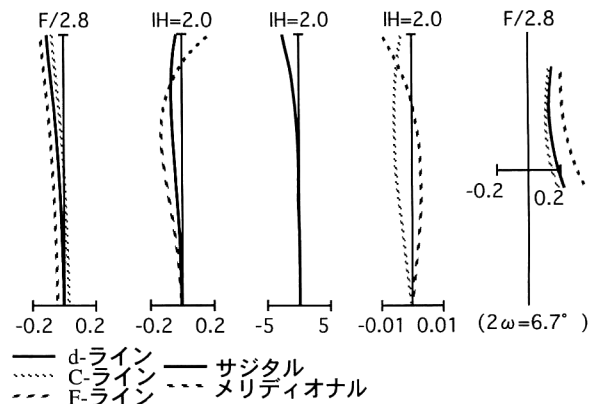
図 16 ズームレンズの設計例。

通常では少なくとも 3 枚のレンズ枚数が必要な第 3 群を、ウッドレンズ 1 枚にて構成することが可能となっている。このレンズの収差図を図 17 に示す。ズームレンズに適用した場合は、他の群による歪曲収差の補正も可能なので、トータルとして良好な歪曲収差の補正が実現できている。また、当然、3 群構成以外のズームレンズに適用することも可能である。

ガラス中にバリウムとチタンの複合濃度分布を付与することにより、低分散 r-GRIN レンズが実現でき、その r-GRIN 素材の潜在能力をビデオ用カメラレンズの設計例で示してきた。ここで示したような、色収差を含むすべての収差がとれた単レンズの出現は、レンズ設計者にとっては夢であり、また、長いレンズ設計の歴史の中では驚異に値するとも考えられるが、カメラのような高性能レンズにおいても、十分可能性があることを示してきた。すでに述べたように、本稿中の単レンズ、広角レンズ、ズームレンズの設計で使用した正パワーの GRIN 素材は、全く同一特性をもち、レンズ厚のみが異なるものとなっている。この



(a) 広角端



(b) 望遠端

図 17 ズームレンズの収差図。

ことは各レンズ系に同一 GRIN 素材が共通に使用できることを意味しており、実用的にはコスト面で大変望ましい性質である。

本稿では、バリウムとチタンの複合分布による GRIN レンズのみを示したが、将来的にそれ以外の複合分布による GRIN レンズも可能となれば、種々分野の光学系に大きな変革をもたらすことになると思われる。実用的にはまだいくつかの障壁があると考えられるが、低/負分散分布 GRIN レンズ分野のいっそうの発展を期待したい。

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) H. Tsuchida, T. Nagaoka and K. Yamamoto: "On the design of the optical system using GRIN lens," SPIE, **1780** (1993) 456-463.
- 4) J. B. Caldwell: "Optical design with Wood lenses 1: Infinite conjugate systems," Appl. Opt., **31** (1992) 2317-2325.
- 5) 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.
- 6) 北野一郎: "屈折率分布型レンズの製造法", *光学*, **10** (1981) 96-104.
 - 7) 野田 聡: "GRIN レンズ用光学ガラス", *光学*, **24** (1995) 85-86.
 - 8) T. Nagaoka, H. Tsuchida and K. Yamamoto: "Design, fabrication and evaluation of a photographic objective that uses a radial GRIN lens," *Opt. Rev.*, **1** (1994) 262-265.
 - 9) H. Kinoshita, M. Fukuoka, Y. Morita, H. Koike and S. Noda: "Preparation of radial GRIN material with low distributed dispersion by sol-gel process," *SPIE*, **3136** (1997) 230-231.
 - 10) Y. Morita, M. Fukuoka, H. Koike, H. Kinoshita and S. Noda: "Improvement of refractive index profile in radial GRIN material with low distributed dispersion prepared by sol-gel process," *MOC/GRIN '97 Technical Digest* (1997) pp. 398-401.
 - 11) M. Yamane and M. Inami: "Variable refractive index systems by sol-gel process," *J. Non-Cryst. Solids*, **147&148** (1992) 606-613.
 - 12) S. D. Fantone: "Refractive index and spectral models for gradient-index materials," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 432-440.
 - 13) D. P. Ryan-Howard and D. T. Moore: "Model for the chromatic properties of gradient-index glass," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 4356-4366.
 - 14) S. Noda: "Gradient index silicate glass," U.S. Patent 5448409 (1995).
 - 15) H. Tsuchida, T. Nagaoka and K. Yamamoto: "Design of imaging lens systems that use low dispersive radial GRIN rod," *MOC/GRIN '97 Technical Digest* (1997) pp. 32-35.

(1998年5月11日受理)