不均質ガラスを用いた光学レンズ

研究ノート

山　本　公　明*

Optical lenses using inhomogeneous glasses

Key Words：Inhomogeneous glass, Gradient-index lens

1．はじめに

光学レンズは近年，各種レンズにおいて機能，性能面で大きく発展してきているが，レンズの歴史的な発展の歴史は，詳しく見ると設計法や加工法の進展の外に新種ガラスと言われる高屈折率低分散ガラスや，異常分散ガラスの出現に大きく依っている．不均質ガラスも，均質ガラスにはない設計上の自由度を持つため，レンズに同様の大きな進展を起こす可能性を持つガラスとして期待されている[1-3]．本稿では，不均質ガラスを用いるとどの様な光学的効果が期待できるのか，また効果の最も高いRadial型ガラスにつき，その効果を材料特性から把握する手段について述べてみたい．

2．不均質レンズの分類と光学特性

回転対称な結像系に用いられる屈折率分布は，通常，光軸方向に屈折率分布をもつAxial型，レンズの半径方向に分布をもつRadial型および光軸上の一点から球対称に屈折率分布を有するSpherical型に分類できる．Spherical型レンズは平板マイクロレンズのような特殊レンズに用いられる事が多く，またAxial型とRadial型レンズの中間的光学特性をもつので，ここではAxial型とRadial型についての光学的特性・効果を述べる．

2.1　Axial型レンズの光学特性

光軸方向をz軸，それに直交する方向にx，y軸また半径を$r=(x^2+y^2)^{1/2}$とし，回転対称な屈折率分布を

$$N(z)=N_0(z)+N_1(z)r^2+N_2(z)r^4+\cdots \quad (1)$$

と表すと，近軸光線は一般に

$$N_0(z)d^2h(z)/dz^2+dN_0(z)/dz \cdot dh(z)/dz-2N_1(z)h(z)=0 \quad (2)$$

の微分方程式に従って伝播する[4]．但し，h(z)は光線高を示す．Axial型の屈折率分布は(1)式で$N_i(z)=0$　$(i\geqq1)$，$N_0(z)=N_{00}+N_{01}z+N_{02}z^2+\cdots$の場合に相当する．この時，(2)式より光線の傾角u(z)は，$u(z)=dh/dz=N_0(0)u(0)/N_0(z)$となりこの型のレンズでは，媒質中で近軸光線を大きく曲げる程屈折率分布が効果を持たない．即ち媒質によるレンズのパワー（＝1/焦点距離）は零である．しかし近軸光線以外では，レンズが曲率をもつとレンズ面の各点毎に屈折率が異なるので，同じ形状のレンズでもレンズ面での屈折作用は均質系と異なり，屈折率分布が本質的に均質形の非球面と同等の光学的効果をもつ．しかし，効果の大きさが屈折率差に依存するので，最大効果は一般に非球面に及ばない事が多い．

2.2　Radial型レンズの光学特性

Radial型の分布は(1)式で$N_i(z)$＝定数$(i\geqq0)$の場合に相当し

$$N(r)=N_{00}+N_{10}r^2+N_{20}r^4+\cdots \quad (3)$$

*Kimiaki YAMAMOTO
1946年2月20日生
1977年大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士課程終了
現在，オリンパス光学工業(株)，技術開発本部，所隈研究室，次長，工学博士，光学
TEL 0426－91－7111

と表される．この型のレンズでは，近軸光線の軌跡は (2) 式より，

$$h=\begin{cases} h(0)\cosh(az)+u(0)\sinh(az)/a \\ \quad \text{但し}\quad a=(2n_{10}/n_{00})^{1/2},\quad n_{10}>0 \\ h(0)\cos(az)+u(0)\sin(az)/a \\ \quad \text{但し}\quad a=(-2n_{10}/n_{00})^{1/2},\ n_{10}<0 \end{cases} \tag{4}$$

のようになり媒質自体が近軸的なパワーをもつ．従って，両面が平面のレンズ（ヴッドレンズ）でもレンズ作用をもち，この時のレンズパワーはレンズ厚 t がそれ程厚くない時，

$$\phi_m \fallingdotseq -2N_{10}t \tag{5}$$

で与えられる．また，パワーを持つことから媒質自体が色収差と像面湾曲の補正力も持ち，薄肉レンズ１枚に対する軸上色収差 PAC とペッツバール和 PS は以下で示される[1]．

$$PAC=K(\phi_s/V_{00}+\phi_m/V_{10}) \tag{6}$$
$$PS=\phi_s/N_{00}+\phi_m/N_{00}^2 \tag{7}$$

ここで，K は定数，また ϕ_s は面のパワーを示し，(6) および (7) 式の第一項は通常の均質ガラスに対する PAC および PS に相当する．また，V_{00} 及び V_{10} はアッベ数を表し，次式で示される．

$$V_{00}=(N_{00d}-1)/(N_{00F}-N_{00C}) \tag{8}$$
$$V_{i0}=N_{i0d}/(N_{i0F}-N_{i0C}) \quad (i=1,\ 2,\cdots) \tag{9}$$

ただし，N_{00d}, N_{00F}, N_{00C} はそれぞれ d, F, C ラインに対する光軸上の屈折率，N_{i0d}, N_{i0F}, N_{i0C} はそれぞれ d, F, C ラインに対する分布係数 N_{i0} である．(5) 式よりラジアル型レンズでは，パワーがレンズの厚さ t と分布係数 N_{10} に依存し，その符号を N_{10} で又その大きさを t と N_{10} で制御可能なことが分かる．また (6)，(7) 式より媒質のパワーや V_{10} を変える事で，色収差や像面湾曲を制御する事も可能となる．さらに，媒質部分の N_{20} 以上の項をコントロールすれば，球面収差等の他の収差の補正も可能であり，この型のレンズは収差補正上でも非常に有効である事が分かる．

3．準等価ガラスを用いた Radial 型レンズの設計および評価法

像面湾曲と色収差は近軸量に関係するので光学系の基本構造を決める程重要な収差であり，この両収差が (6) および (7) 式から求められる事より，Radial 型レンズの光学的効果を均質ガラスレンズに置き換え推定する事が可能となる．今，Radial 型レンズの PAC, PS が等価的な均質薄肉レンズのそれと等しいとすると，(6) および (7) 式から次式が成立する．

$$\phi/n_{eff}=\phi_s/N_{00}+\phi_m/N_{00}^2 \tag{10}$$
$$\phi/v_{eqv}=\phi_s/v_{00}+\phi_m/v_{10} \tag{11}$$

ここで，$\phi=\phi_s+\phi_m$．したがって

$$n_{eff}=N_{00}^2/\{(1-N_{00})a+N_{00}\} \tag{12}$$
$$v_{eqv}=v_{00}v_{10}/\{(v_{00}-v_{10})a+v_{10}\} \tag{13}$$

が得られる．ただし，$a=\phi_m/\phi$． n_{eff} および v_{eqv} をもつガラスを我々は準等価ガラスと呼んでいる．この準等価ガラスの n_{eff} および v_{eqv} は，通常の均質ガラスの屈折率，アッベ数と同様に扱えるので，均質ガラスを用いた設計上の知識が Radial 型不均質ガラスの使用においてもそのまま利用でき，その効果把握，および効果的利用法両面において，光学設計上重要な手段となり得る[5]．以下で，準等価ガラスを利用した簡単な設計の一例を示す．今，$N_{00}=1.59$, $V_{00}=45$, $V_{10}=5$, $N_{10}<0$ で示される Radial型ガラス素材を考える．この素材の準等価ガラスを通常のガラスマップ上にプロットすると，パラメー

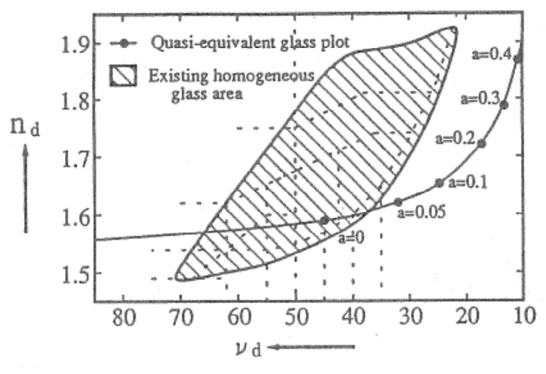

図１　設計に用いた不均質ガラスの準等価ガラス

タaの値に応じ図1の様に表される．図1から，このガラスはaが約0.05以上の時，既存ガラスとしては存在しない，高分散，高屈折率ガラスとして作用する事が分かる．この様なガラスは，負レンズに使用すると効果があるが，a=0.08としてズームレンズのリレー系に使用し，Fナンバーを小さく，全長を小さくするのに効果があった例を図2に示す[5]．

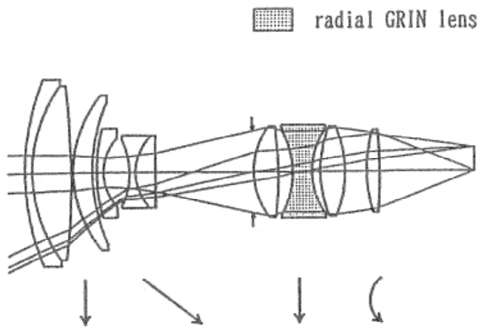

図2　ズームレンズの設計例
(f=7～42mm, F/1.4～1.8)

4．おわりに

既に述べてきたように，不均質レンズ，特にRadial型レンズは潜在的には非常に大きな力をもっているが，材料特性や大きさの面でまだまだ十分な材料はない．従来のイオン交換法の外にゾル・ゲル法等で優れた材料を得る努力が近年されてきているが[6]，今後の材料開発面での進展を期待したい．

参考文献

1) L G. Atkinson, S. N. Houde-Walter, D.T. Moore, D. P. Ryan and J. M. Stagaman : Appl. Opt., 21(1982)993.
2) 山本公明，槌田博文：オプトロニクス，11 (1992) 171
3) Hirofumi Tsuchida, Norihiko Aoki, Kazushi Hyakumura and Kimiaki Yamamoto : Appi. Opt., 31 (1992) 2279.
4) P. J. Sands : J. Opt. Soc. Am., 61 (1971) 879.
5) 永岡利之，槌田博文，山本公明：光学，21 (1992) 795.
6) 例えば野田聡：特開平3-141302.