

白色用回折レンズ

中 井 武 彦

White Light Diffraction Lens

Takehiko NAKAI

Diffraction lens have attracted attention as elements that have the different characteristics from the conventional refraction lens. In spite of the excellent characteristics, such as wave branch and imaging, it has mainly been used for a monochromatic light system, and has not been used for a white light system such as a photographic system. Because the conventional diffractive lens cannot be obtained high diffraction efficiency over broadband wavelength. Thus, we developed the multi-layer diffractive optical elements (DOEs) to operate with visible wavelength region. In this paper, we explain the feature of the white light diffractive lens, the notes and subjects for use, etc. After that, we explain the configuration and characteristics of the multi-layer DOE.

Key words: diffraction grating, diffractive optics, white light, diffractive optical elements (DOEs), lens

回折光学素子 (DOE; diffractive optical element) を結像素子として用いる考えは、1870年代のフレネルゾーンプレートにまでさかのぼる¹⁾。1898年にはWoodが矩形凹凸形状ではあるが表面レリーフ型の回折光学素子で効率が改善することを示した²⁾。その後、表面に位相形状を与え、効率の向上をはかる表面レリーフ型の回折光学素子の研究が進み、断面形状をブレード化して特定の単波長では理論的に100%の効率が得られるようになった。また、近年の超精密加工技術や、リソグラフィ技術の進展により、ほぼ理論通りの回折光学素子が製作できるようになり、さまざまな分野に応用されはじめている。

一方、回折型レンズと屈折型レンズを組み合わせる収差を補正する考えは、1960年代にはすでに提案されている³⁾。その後、さまざまな光学系のレンズへの応用設計は報告されているが^{4,5)}、白色可視光など広波長域で使用される光学系のレンズとしては、回折型レンズはこれまで実用化には至っていなかった。これは、今まで知られていた回折光学素子はブレード化された回折光学素子であったとしても、

広波長域な光で使用した場合、いずれかの波長で効率の低下を生じ、不要な回折光が増加し、フレア光となり大きく画質を劣化させていたためである。

筆者らは、この問題を解決するために、回折光学素子の構造を工夫し、可視域で不要な回折光を大幅に低減した「積層型回折光学素子」を開発した。

本稿では、最初に回折型レンズの応用例を示しながら、広波長域の光学系へ回折型レンズを用いる際の特徴を説明する。次に従来の回折光学素子との比較を行いながら、筆者らが開発した「積層型回折光学素子」の構成や性能について説明する。

1. レンズとしての回折光学素子

1.1 逆分散特性 (色消し作用)

最初に、一般的な回折光学素子のレンズとしての特徴を説明する。積層型回折光学素子も、回折効率以外の特性は一般的な回折光学素子と同じである。回折光学素子による光線の回折角は、以下の回折の公式に従う。

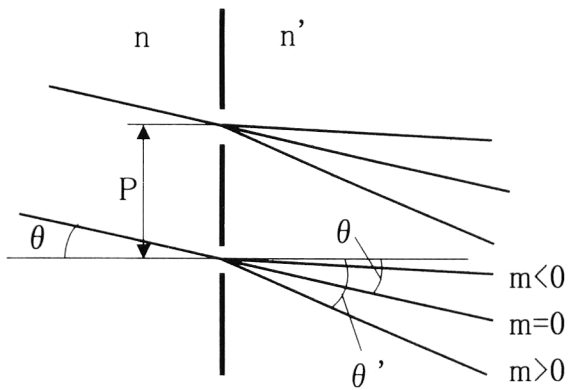


図1 回折の原理.

$$n'(\lambda) \sin \theta' = n(\lambda) \sin \theta + m\lambda/P \quad (1)$$

ここで、 $n(\lambda)$ は入射媒質の波長 λ での屈折率、 θ は入射角、 $n'(\lambda)$ は射出媒質の波長 λ での屈折率、 θ' は回折角、 m は回折次数、 λ は波長、 P は格子ピッチである。

さらに、図1に示したように、入射光が回折格子で回折せず通過する光束を0次回折光 ($m=0$) とよぶ。また便宜上、これ以降の説明では、0次回折光に対し、回折角 θ' が大きくなる方向を正の回折次数 ($m>0$)、回折角 θ' が小さくなる方向を負の回折次数 ($m<0$) として取り扱う。

簡単のため屈折率は波長依存がないとし、入射角を $\theta=0$ とした場合、正の回折次数を例にとると、回折次数が高いほど、格子ピッチが小さいほど回折角が大きくなる。もうひとつ、波長が長いほど回折角は大きくなる。この波長特性が、回折型レンズの重要な特性である。

次に、図2に示す光軸に直交する回折格子で、光軸から離れるに従って格子ピッチが徐々に小さくなる構成を考える。光軸に平行な光束がこの回折格子に入射した場合、正の回折次数の光束は、光軸から離れるに従って回折角が大きくなる。この回折格子を光軸に対して回転対称な形状とした同心円状の回折格子は、格子ピッチを適切に選べば、平行光束を一点に集光することができ凸レンズとして作用する。一方、負の回折次数の光束は、図2における平行光束を発散させるため凹レンズとして作用する。

また、凸レンズ形状の場合、図に示したように長波長の光ほど回折角は大きくなるので、焦点までの距離は短くなる。これに対し、屈折型の凸レンズでは、使用される光学ガラスの屈折率が長波長ほど低くなる特性をもつので、長波長の光ほど焦点距離は長くなる。つまり、回折型レンズは屈折型レンズと逆の分散特性を有しているわけである。このことは、屈折型レンズでは色収差を補正するのに凸凹レンズの構成で補正する必要があったのが、屈折型と回折型の凸レンズどうしで色収差が補正できることを意味す

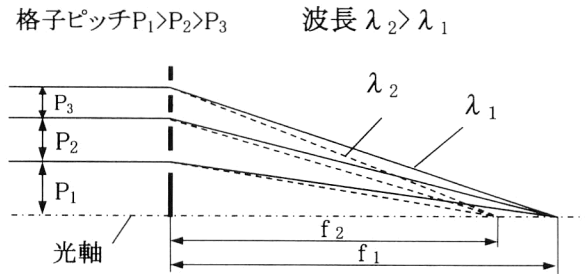


図2 回折型レンズ (特定の次数 $m>0$ での回折).

る。これにより、レンズ系として構成する各レンズのパワーを緩くすることが可能となり、色収差補正にとどまらず他の収差補正にも効果をもたらしている。

また、この回折型レンズの分散特性を、可視域で一般に用いられるアッペ数 ν_d や部分分散比 $\theta_{g,F}$ で表すと、

$$\nu_d = \lambda_d / (\lambda_F - \lambda_C) = -3.453 \quad (2)$$

$$\theta_{g,F} = (\lambda_g - \lambda_F) / (\lambda_F - \lambda_C) = 0.2956 \quad (3)$$

となる⁶⁾。ここで、 λ_d 、 λ_F 、 λ_C 、 λ_g は、それぞれ d 線、F 線、C 線、g 線の波長を表す。

通常の光学ガラスのアッペ数が 25~70 の範囲であるので、回折型レンズは、負の分散特性をもつことに加え、かなり大きな分散特性を有していることがわかる。これは、回折型レンズでは必要な色収差を得るためのパワー変化量が屈折型レンズの 1/7~1/20 ですむことを意味している。このことは、収差論上、球面収差やコマ収差などに悪影響を及ぼすことなく色収差を制御でき、回折型レンズの特徴といえる。

部分分散比も、通常の光学ガラスが 0.53~0.63 であるので、非常に大きな部分分散特性を有している。これは、回折型レンズの波長変化に対する色収差の変化が線形であることに起因している。したがって、屈折型レンズと回折型レンズの組み合わせで光学系の色収差を補正する場合、屈折型レンズのガラス材の選択を注意しないと全系で部分分散が残存してしまう。回折型レンズを用いた光学系の設計では、特に注意する点である⁷⁾。

1.2 非球面作用

上の色消し効果のほかに回折型レンズの非球面作用がある。式(1)からも明らかなように、回折光学素子は、格子ピッチで光の回折角(進行方向)を制御している。格子ピッチを部分的に変えれば、回折型レンズの非球面作用は簡単に得ることができる。屈折系との組み合わせを工夫し非球面作用を適切に与えれば、球面作用だけの回折型レンズに比べ回折型レンズの外周付近の格子ピッチを緩くできるなど、製造上のメリットも出てくる。

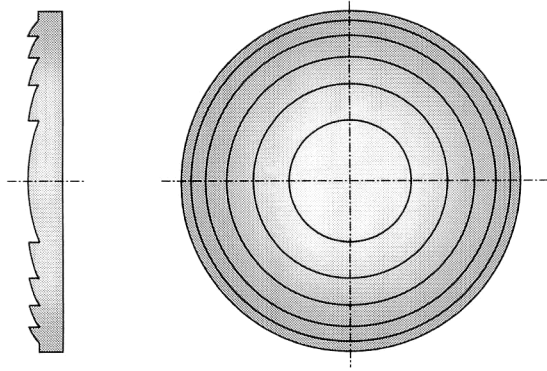


図3 単層型回折光学素子.

2. 単層型回折光学素子

2.1 回折効率

まず、図3に示すブレード化された回折光学素子の回折効率について説明する。図のように格子断面形状を鋸歯形状の位相格子とすることで、格子面での屈折方向と回折の式から求まる回折方向を一致させること（ブレード化）ができる。このブレード化された回折光学素子は、1つの回折次数にだけ、ほとんどの光を回折させることが可能となる。

図3は、凸レンズの作用をする回折型レンズである。以下、図3のような格子が1つの回折光学素子を、積層型回折光学素子と区別する意味で単層型回折光学素子とよぶ。ブレード化された単層型回折光学素子で垂直入射において回折効率が最大となるには、格子の山と溝の光路長差が波長の整数倍となればよい。

$$\{n'(\lambda_0) - n(\lambda_0)\}d = m\lambda_0 \quad (4)$$

ここで d は格子厚、 $n'(\lambda_0)$ 、 $n(\lambda_0)$ はそれぞれ波長 λ_0 での入射側と射出側の材質の屈折率である。図3の構成では、入射側は空気であり、 $n(\lambda_0) = 1$ である。

式(4)の等号が成り立たない他の波長における m 次の回折効率は、以下のように表される。

$$\eta_m(\lambda) = [\sin\{\pi(\phi(\lambda) - m)\} / \{\pi(\phi(\lambda) - m)\}]^2 \quad (5)$$

ここで、

$$\phi(\lambda) = \{n'(\lambda) - 1\}d / \lambda \quad (6)$$

また、 $n'(\lambda)$ は波長 λ での格子材質の屈折率である。

図4に、単層型回折光学素子の可視波長域の回折効率を示す。1次回折光の回折効率が高くなるように形状を決定した。格子部の媒質として光学定数 $(n_d, \nu_d) = (1.524, 50.8)$ の材質を用い、格子厚 d は $0.98 \mu\text{m}$ である。図4より、波長 520 nm で回折効率が 100% であることがわかる。以降、回折効率が 100% ($\eta_m(\lambda) = 1$) となる回折次数 m と波長 λ を、それぞれ設計次数、設計波長とよぶことに

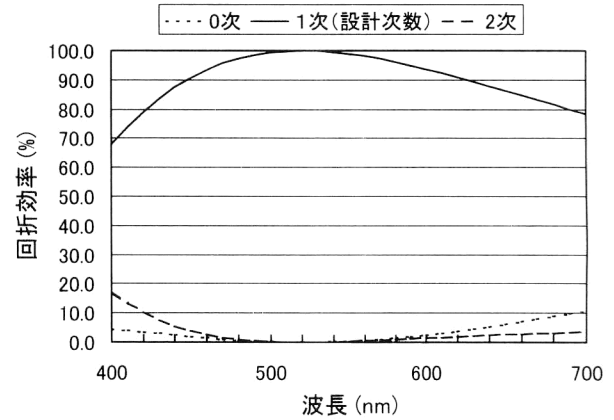


図4 単層型回折光学素子の回折効率.

する。

さらに、図から明らかなように、設計次数において単波長側と長波長側で効率は低下している。そして、設計次数での回折効率の低下に応じて、図中、設計次数±1次である0次と2次の回折効率が增加していることがわかる。設計次数以外の光はほとんど結像せず、フレア光となり、コントラストを低下させる。

3. 積層型回折光学素子

3.1 回折効率

上の問題をかかえたままでは白色用レンズ系への適用は困難であり、回折効率を改善することが重要である。

では、回折効率を使用波長全域で 100% とするにはどうすればよいか、式(5)、(6)を用いて考えてみる。 $\phi(\lambda)$ が m となり、波長依存性がなくなれば、 $\eta_m(\lambda)$ は使用波長全域で 1 となることが明らかである。つまり、式(6)の中で波長の関数である屈折率が長波長になるにつれて比例して増加すれば、 $\phi(\lambda)$ の波長依存性は緩和され、回折効率の波長特性も改善される。しかしながら、ガラスなどの一般の光学材料は、長波長になるにつれて屈折率は低くなる特性をもつ。そのため単層型回折光学素子では、広波長域で回折効率を改善させることは不可能である。ところが、この単層型回折光学素子を複数使い、空気を介して近接した積層構造とすることによって、この問題が解決できることが明らかとなった。

積層型回折光学素子は、図5に示したように2種類の単層型回折光学素子を向き合わせて配置した積層構造の素子である。2種類の単層型回折光学素子は、後ほど詳細に述べるが、負の回折次数へ回折する回折型凹レンズと、正の回折次数へ回折する回折型凸レンズで構成される。図5で、2つの素子間は空気である。この2枚の単層型回折光学素子は、同心円状の格子周期構造が基本的に等しい形状

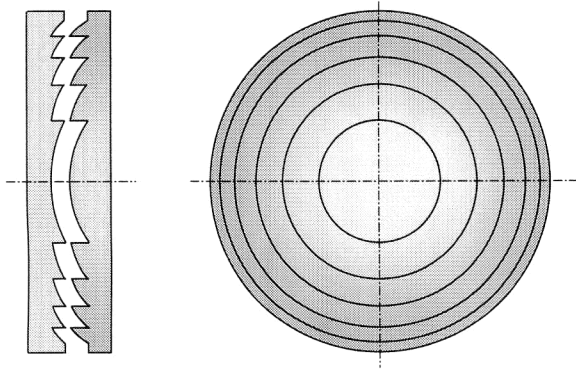


図5 積層型回折光学素子.

であるが、格子高さ、格子を形成する材料が異なっている。この格子高さ、格子を形成する材質を最適に設定し、数マイクロメートルの間隔で近接して向かい合わせることで回折効率の大幅な改善を実現した。

図6に、積層型回折光学素子の可視波長域の回折効率を示す。設計次数 m は1次である。回折型の凹レンズである第1の単層型回折光学素子は、格子媒質として光学定数 $(n_d, \nu_d) = (1.635, 22.8)$ の材質を使用し、格子高さ d_1 は $7.90 \mu\text{m}$ である。回折型の凸レンズである第2の単層型回折光学素子は、格子媒質として光学定数 $(n_d, \nu_d) = (1.524, 50.8)$ の材質を使用し、格子高さ d_2 は $10.71 \mu\text{m}$ である。図から、可視域全域で高い回折効率を得られていることがわかる。とくに、 $450 \sim 650 \text{ nm}$ の波長域では、回折効率は 98.5% 以上の高い値が得られている。このような高い回折効率を得られる積層型回折光学素子としては、格子厚が従来の単層型回折光学素子に比べ厚いこと、一方の素子が高分散な材料で形成されるなどの特徴をもつ。

次に、単層型回折光学素子と同様に、式のうえから積層型回折光学素子の回折効率を考えてみる。積層型の回折光学素子で垂直入射において回折効率が最大となるには、単層型回折光学素子と同様に、2つの格子を足し合わせた光路長差が波長の整数倍となればよい。

$$-\{n_1(\lambda_0) - 1\}d_1 + \{n_2(\lambda_0) - 1\}d_2 = m\lambda_0 \quad (7)$$

ここで d_1, d_2 は格子厚、 $n_1(\lambda_0), n_2(\lambda_0)$ はそれぞれ第1の単層型回折光学素子と第2の単層型回折光学素子における波長 λ_0 での格子部の材質の屈折率である。式(7)において $\{ \}$ の前の符号は、各単層型回折光学素子の回折パワーの符号と一致している。例えば、第1の単層型回折光学素子は、回折型の凹レンズで負の回折次数へ回折するので、符号はマイナスとなっている。式(7)の等号が成り立たない他の波長における m 次の回折効率も、単層型回折光学素子と同じで以下の式で表される。

$$\eta_m(\lambda) = [\sin\{\pi(\phi(\lambda) - m)\} / \{\pi(\phi(\lambda) - m)\}]^2$$

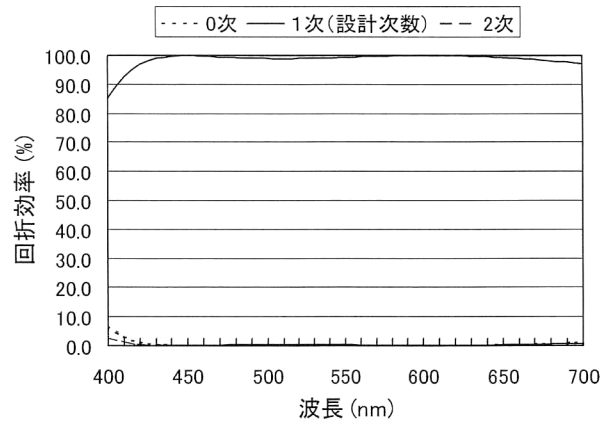


図6 積層型回折光学素子の回折効率.

(8)

ここで、

$$\phi(\lambda) = [-\{n_1(\lambda) - 1\}d_1 + \{n_2(\lambda) - 1\}d_2] / \lambda \quad (9)$$

また、 $n_1(\lambda), n_2(\lambda)$ は、波長 λ での各格子部の材質の屈折率である。

3.2 素子構造の特徴

では、積層型回折光学素子で高い回折効率を得るために、それぞれの単層型回折光学素子にはどのような特徴をもった素子を用いるかを説明する。式(9)の $\phi(\lambda)$ を2つの単層型回折光学素子の成分に分けて調べてみる。

$$\phi(\lambda) \equiv \phi_1(\lambda) + \phi_2(\lambda)$$

$$\phi_1(\lambda) = -\{n_1(\lambda) - 1\}d_1 / \lambda \quad (10)$$

$$\phi_2(\lambda) = \{n_2(\lambda) - 1\}d_2 / \lambda$$

まず、図7、図8に、積層型回折光学素子を構成する2つの単層型回折光学素子の回折効率を示す。図より、可視域で複数の回折次数に回折していることがわかる。これは、格子厚を厚くすることにより実現できる。また、次数の指標を隠すと2つの図は非常によく似ている。これは、各回折次数のピーク波長が2つの素子どうしてほぼ等しいことを意味している。さらに、等しいピーク波長の回折次数を足した合成の回折次数が一定の値をもつようにすることが、積層型回折光学素子で高い回折効率を得るためには必要である。

表1に、各単層型回折光学素子の回折次数とピーク波長を示す。これは、式(10)で $\phi_1(\lambda), \phi_2(\lambda)$ が整数となる値である。例をあげて補足する。第1の単層型回折光学素子で-9次に回折する回折光のピーク波長は 561 nm である。一方、第2の単層型回折光学素子で10次に回折する回折光のピーク波長は 563 nm であり、ほぼ等しいことがわかる。厳密には、波長 561 nm の光では $\phi_1(\lambda) = -9.005$, $\phi_2(\lambda) = 10.035$, $\phi(\lambda) = -9.005 + 10.035 = 1.03$ となり、

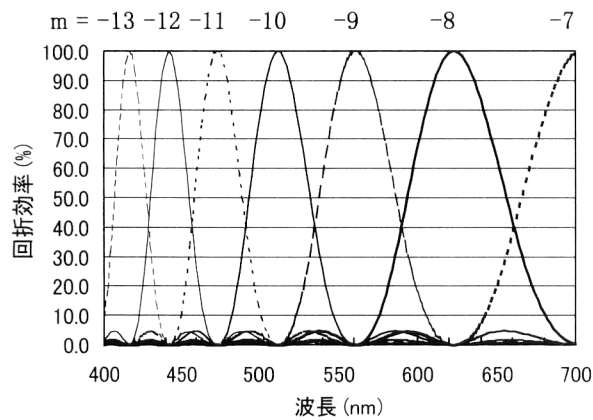


図7 第1の単層型回折光学素子の回折効率.

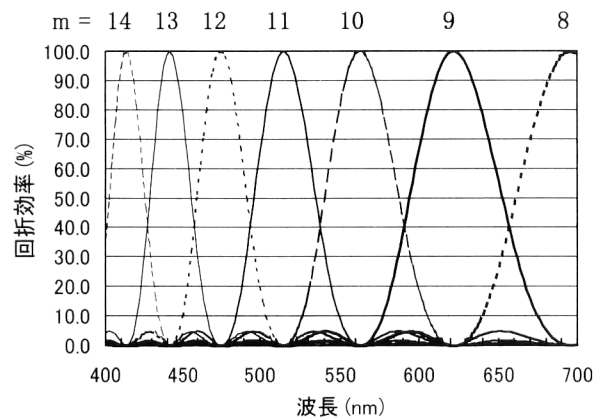


図8 第2の単層型回折光学素子の回折効率.

式(8)に代入すると回折効率は99.7%である。 $\phi(\lambda) = 1$ だと回折効率が100%となり理想だが、 $0.945 < \phi(\lambda) < 1.055$ であれば回折効率は99%以上となり、実用上、1つの回折次数のみに回折しているとみなしてよいだろう。他のピーク波長も同様で、合成で1次の回折次数に回折する。

では、600 nmの光はどうなるのだろうか。第1の単層型回折光学素子をみると、 $\phi_1(\lambda) = -8.346$ となる。整数でないので、単層型回折光学素子だけでは、-8次と-9次の2つの回折次数に分かれる。一方、第2の単層型回折光学素子は、 $\phi_2(\lambda) = 9.345$ である。積層すると、 $\phi(\lambda) = -8.346 + 9.345 = 0.999$ となる。つまり、積層型回折光学素子にすることで、600 nmの光も1次の方向に回折することになる。

このように2つの単層型回折光学素子を、近接して配置させた積層の構造にすることで、第1の単層型回折光学素子に入射した光束が複数の回折次数に回折を始める前に第2の単層型回折光学素子に入射するので、積層型回折光学素子としては合成の回折次数で高い回折効率を有することが可能となる。

表1 各回折光学素子の回折次数とピーク波長.

第1の単層型 DOE	第2の単層型 DOE
$m = -13, \lambda = 416 \text{ nm}$	$m = 14, \lambda = 413 \text{ nm}$
$m = -12, \lambda = 442 \text{ nm}$	$m = 13, \lambda = 442 \text{ nm}$
$m = -11, \lambda = 474 \text{ nm}$	$m = 12, \lambda = 475 \text{ nm}$
$m = -10, \lambda = 512 \text{ nm}$	$m = 11, \lambda = 515 \text{ nm}$
$m = -9, \lambda = 561 \text{ nm}$	$m = 10, \lambda = 563 \text{ nm}$
$m = -8, \lambda = 623 \text{ nm}$	$m = 9, \lambda = 622 \text{ nm}$
$m = -7, \lambda = 700 \text{ nm}$	$m = 8, \lambda = 696 \text{ nm}$

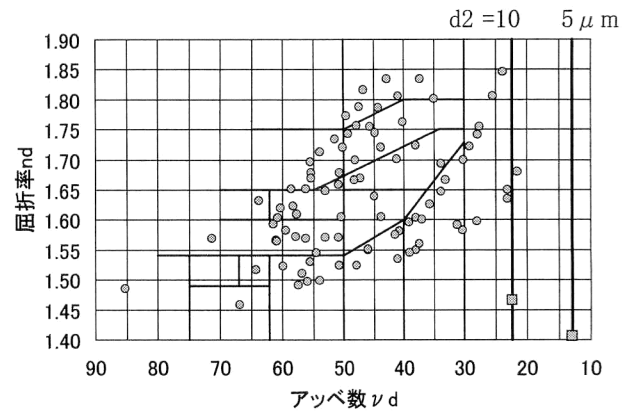


図9 格子材料の選択範囲.

3.3 格子材料の選択範囲

積層型回折光学素子で、上のような回折効率の特性が得られるための格子形成材料の選択範囲について説明する。図9は、光学ガラスの特性を表した図である。回折型の凸レンズからなる第2の単層型回折光学素子の格子部の材質を固定する。材質としては、前述した光学定数(n_d, ν_d) = (1.524, 50.8)の材質を用いる。このとき、第1の単層型回折光学素子の格子材料と、2つの単層型回折光学素子の格子高さについての関係を調べる。まず、d線、F線、C線の波長での式(10)の値を求める。

$$\begin{aligned} \phi(\lambda_d) &= [-\{n_1(\lambda_d) - 1\}d_1 + \{n_2(\lambda_d) - 1\}d_2] / \lambda_d \\ &\equiv m_d \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \phi(\lambda_F) &= [-\{n_1(\lambda_F) - 1\}d_1 + \{n_2(\lambda_F) - 1\}d_2] / \lambda_F \\ &\equiv m_F \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \phi(\lambda_C) &= [-\{n_1(\lambda_C) - 1\}d_1 + \{n_2(\lambda_C) - 1\}d_2] / \lambda_C \\ &\equiv m_C \end{aligned} \quad (13)$$

式の下添字が、波長を表している。 $d_1 = c * d_2$ として式(11)を変形すると、第1の単層型回折光学素子の格子材料のd線での屈折率 $n_1(\lambda_d)$ は、以下ようになる。

$$n_1(\lambda_d) = 1 + [\{n_2(\lambda_d) - 1\} - m_d \lambda_d / d_2] / c \quad (14)$$

次に、材料のアッベ数 ν_d は以下の式で求められる。

$$\nu_d = \{n_1(\lambda_d) - 1\} / \{n_1(\lambda_F) - n_1(\lambda_C)\} \quad (15)$$

式(14)と同様に、F線、C線についても屈折率を算出し、式(15)に代入すると、以下ようになる。

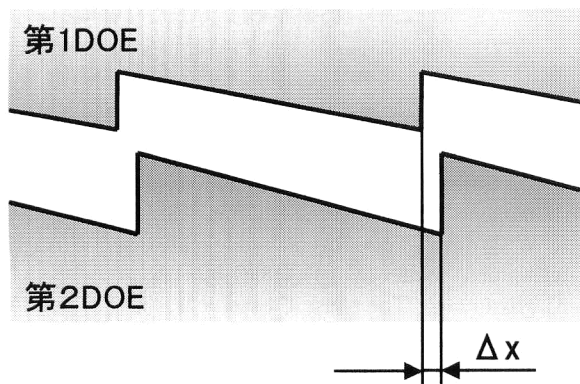


図10 相対格子位置ずれ。

$$v_d = \left[\frac{\{n_2(\lambda_d) - 1\} - m_d \lambda_d / d_2}{\{n_2(\lambda_F) - n_2(\lambda_C)\} - m_F \lambda_F / d_2 + m_C \lambda_C / d_2} \right] \quad (16)$$

式(16)には第2の単層型回折光学素子の情報しか含まれていないので、第2の単層型回折光学素子の格子材料と格子厚が決定すると、第1の単層型回折光学素子の格子材料のアップベ数が一意的に決定される。一方、屈折率に関しては、式(14)で、 c の値を変えることで任意に選ぶことができる。つまり、第1の単層型回折光学素子の構成は、まず格子材料のアップベ数を決定し、次にアップベ数を満足する材料を探すことで屈折率が決定する。最後に式(14)で、 c の値を求め、第1の単層型回折光学素子の格子厚が決定される。

次に、材料の選択範囲を、第2の単層型回折光学素子の格子高さが $d_2 = 10 \mu\text{m}$ の場合を例に説明する。このとき、第1の単層型回折光学素子として、格子材料のアップベ数だけが一意的に決定され、その値は $v_d = 22.2$ となる。一方、第1の単層型回折光学素子の格子部の屈折率は、第1の単層型回折光学素子の格子高さを調整することで自由に選ぶことができる。第2の単層型回折光学素子の格子高さが $d_2 = 5 \mu\text{m}$ の場合も、同様に第1の単層型回折光学素子の格子材料のアップベ数だけが $v_d = 12.8$ と決定される。このように、積層型回折光学素子には、格子形成材料として高分散な材料が必要であることがわかる。

また、図9の中に2つの単層型回折光学素子の格子高さが等しくなる場合の材料を■印で示した。この場合は、式(14)で $c = 1$ となり、屈折率も一意的に決定されることになる。格子高さ d_2 が $10 \mu\text{m}$ の場合を例にとると、屈折率は1.4654となり、かなり小さな値となる。この低屈折率で高分散な材料は、通常の光学材料では実現が困難な領域である。

つまり、積層型回折光学素子は、2つの格子で異なる格子高さとする事で材料の選択領域を大幅に広げているわけである。

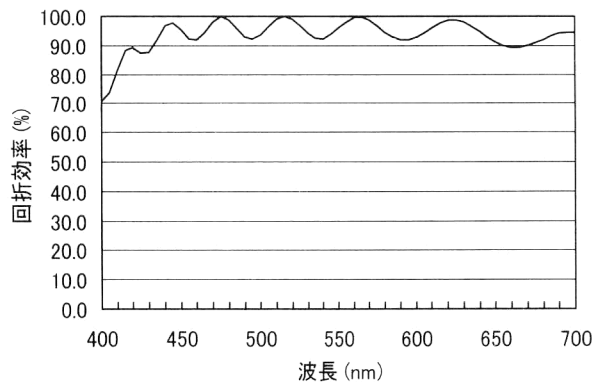


図11 回折効率 (位置誤差 $6 \mu\text{m}$)。

3.4 積層型回折光学素子の製造条件

積層型回折光学素子で高い回折効率を得るためには、格子高さや、材料の選択以外に以下のことが重要である。①第1の単層型回折光学素子を伝搬した光が複数の回折次数に回折する(前述の波長 600 nm の光)前に、第2の単層型回折光学素子に入射すること、②単層型回折光学素子どうしの次数の足し算が成立するには $(\phi(\lambda) = \phi_1(\lambda) + \phi_2(\lambda))$ 、第1の単層型回折光学素子のある格子輪帯に入射した光は対向する第2の単層型回折光学素子の格子輪帯に入射すること、である。①は2つの単層型回折光学素子間の距離を規制する。②はおもに、格子周期方向の回折光学素子の相対位置精度を規定する。光束の入射角が大きな場合や、格子ピッチが小さな場合には、②においても単層型回折光学素子間の距離は規制される。

3.5 積層型回折光学素子の製造誤差

製造誤差について、1つだけ例をあげて説明する。図10で示したように、格子ピッチ方向にずれた相対的な位置誤差についてである。図11は、格子ピッチ $150 \mu\text{m}$ に対して $6 \mu\text{m}$ の誤差が生じた場合の回折効率を表す。図6の理想的な回折効率に比べ大きなリップルが発生している。このリップルの山の位置は、単層型回折光学素子の各回折次数のピーク波長に一致していることがわかり興味深い。また、リップルの谷では、回折効率が10%近く低下している。低下分は、他の次数の回折光となり画質を低下させる。

そのため、ほとんどリップルが発生しない、 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ の位置合わせ精度を実現する必要がある。この精度を実現するには、型を加工する超高精度な三次元微細加工技術と、回折格子を精度よく型から成型、離型する技術により、2つの単層型回折光学素子が同じ格子ピッチで作製されることが必要である。そのうえで、2つの単層型回折光学素子を精度よく位置合わせを行い、接合することで、初めて高性能な積層型回折光学素子が提供できる。

3.6 応用光学系

今回筆者らは、撮影レンズ系への応用として、一眼レフカメラの交換レンズのひとつである超望遠レンズへ積層型回折光学素子を応用した。回折光学素子のもつ色補正効果を十分に発揮することで、従来の屈折型レンズ系に比べ、約3分の2という画期的なレンズ全長の短縮と軽量化を実現した^{8,9)}。これにより、白色用回折レンズは撮影レンズへ実用できることが示され、応用範囲は大きく広がったといえよう。

文献8), 9) は、回折レンズを一般のカメラマンが試用したときの報告である。撮影例も豊富で、ユーザーが回折レンズをどうとらえ、何を期待しているかは大変参考になる。

白色用回折レンズの特徴と、使用する際の注意点や課題などについて解説した。また、白色用回折レンズの実用化の例として、筆者らが開発した「積層型回折光学素子」について、構成や性能を説明した。回折光学は、理論面はほぼ整備され、今後さまざまな応用展開が期待されている分野である。白色用回折レンズの応用に限らず、さまざまな

分野で回折光学ならではの素子やシステムが実用化されることを期待する。

文 献

- 1) J. L. Soret: "Ueber die durch Kreisgitter diffraction shanomene," Ann. Phys. Chem., **156** (1875) 99-113.
- 2) R. W. Wood: "Phase-reversal zone-plates, and diffraction-telescopes," Phil. Mag., **45** (1898) 511-522.
- 3) K. Miyamoto: "The phase Fresnel lens," J. Opt. Soc. Am., **51** (1961) 17-20.
- 4) 鹿島伸悟: "回折光学素子のレーザー顕微鏡への応用", 光設計研究グループ第10回研究会予稿集 (1996) pp. 42-49.
- 5) 丸山晃一: "回折レンズの眼視系への応用", 光設計研究グループ第13回研究会予稿集 (1997) pp. 24-29.
- 6) 応用物理学会 日本光学会 光設計研究グループ監修: 回折光学素子入門 (オプトロニクス社, 1997).
- 7) 中井武彦, 小川秀樹: "積層型回折光学素子の研究と光学系への適用方法", 日本写真学会誌, **65** (2002) 180-185.
- 8) 竹中隆義: "世紀の最新技術 望遠レンズの常識を覆す DO レンズの革命度", アサヒカメラ, **87**, No. 1 (2002) 139-146.
- 9) 木村正博: "試用レポート キヤノン EF 400 mm F4 DO IS USM", 写真工業, **60**, No. 1 (2002) 51-55.

(2003年3月11日受理)