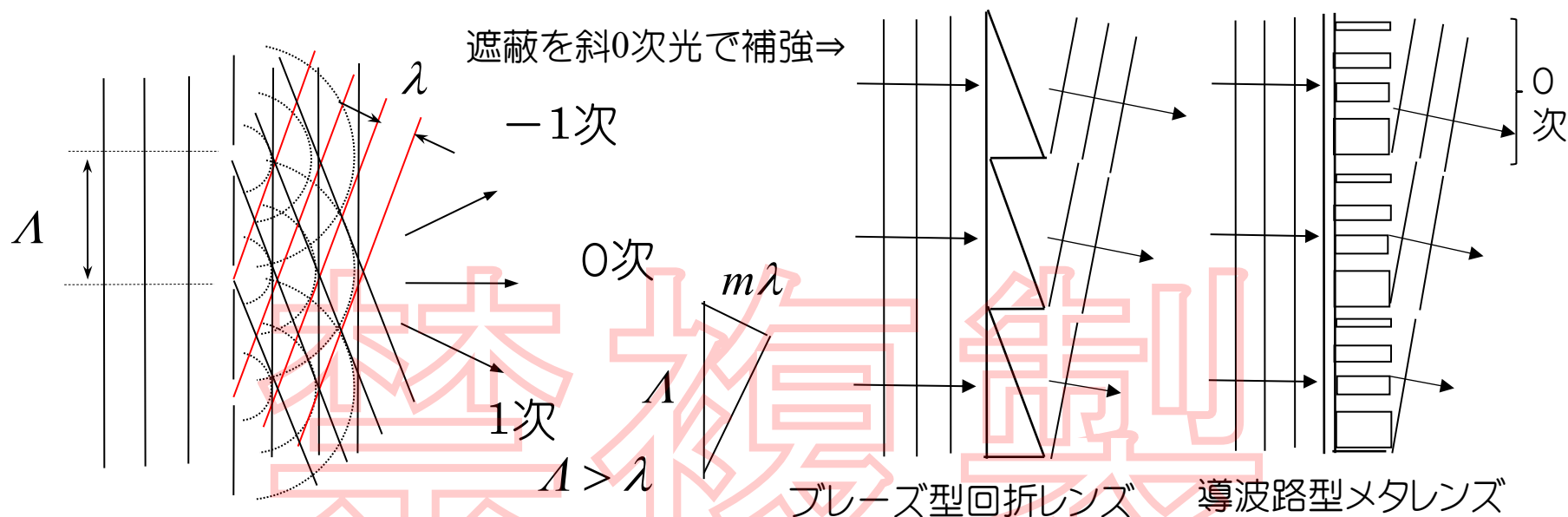


ティー・イー・エム 回折光学系設計法

2025年11月20日
チームオプト株式会社
宮前 博・丸山晃一

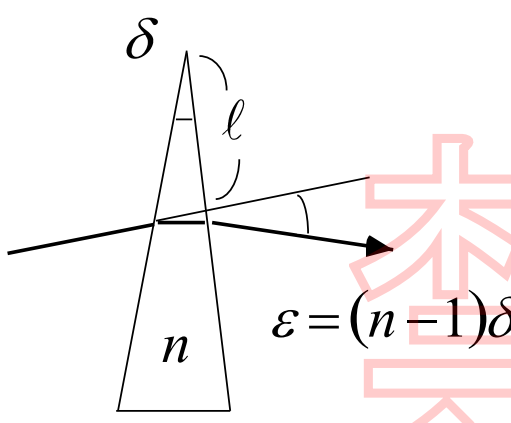
1-1-2. 薄型回折素子の基本的な機能



- 1) マクロな入射波面がミクロな波面（穴がピンホールの場合球面波）に分解される。
(ホイヘンスの原理)
- 2) 隣り合うミクロな波面が遠方で複数の平面波に再構成される。
(周期構造のフラウンホーファ回折～光学的なフーリエ級数展開：回折方向が離散的)
(波長が長いほど回折角は大きい：プリズムによる屈折とは逆方向)
- 3) ブレード型（中図）の回折格子では条件によって直後に1つの平面波に変換される。
(小プリズムの屈折方向＝格子周期に固有な回折方向、素子直後で波面が再構成)
→ 位相フレネルレンズともいう。
- 4) (導波路型) メタレンズ（右図）も回折光学素子の例（各微小導波路は0次回折のみ）

1-4-2. 回折面のアッベ数・部分分散比は定数 (2)

薄い屈折型プリズムの波長分散は、微小角近似： $\varepsilon = (n-1)\delta$ を直接用いて



アッベ数	部分分散比
$v_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_F - \varepsilon_C}$ $\left(v'_d = \frac{n_d - 1}{n_g - n_F} = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_g - \varepsilon_F} \right)$	$\theta_{g,F} = \frac{v_d}{v'_d} = \frac{n_g - n_F}{n_F - n_C} = \frac{\varepsilon_g - \varepsilon_F}{\varepsilon_F - \varepsilon_C}$

回折面を極薄プリズムと考え $\varepsilon^D = m\lambda v_h$ の関係を用いると：

アッベ数	部分分散比
$v_d^D = \frac{\varepsilon_d^D}{\varepsilon_F^D - \varepsilon_C^D} = \frac{\lambda_d}{\lambda_F - \lambda_C} = -3.453$	$\theta_{g,F}^D = \frac{\varepsilon_g^D - \varepsilon_F^D}{\varepsilon_F^D - \varepsilon_C^D} = \frac{\lambda_g - \lambda_F}{\lambda_F - \lambda_C} = 0.2956$

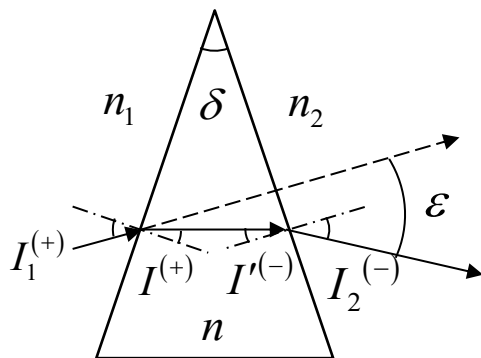
1-6-1. 高屈折率法の導出

下図の薄いプリズムによる屈折を考える。簡単のために前後の屈折面に垂直な面内の光線について考える。スネルの法則を2回使って、

$$n_1 \sin I_1 = n \sin I, \quad n_2 \sin I_2 = n \sin I', \quad \therefore n_2 \sin I_2 - n_1 \sin I_1 = n(\sin I' - \sin I)$$

回折面の微小プリズムについては、回折効率補償条件 $\varepsilon = (n-1)\delta = m\lambda v$ が成り立つ。この条件を保ちながら極限操作 $n \rightarrow \infty$ を行くと、右上の式の右辺は $n(\sin I' - \sin I) \rightarrow (n-1)(I' - I) = -(n-1)\delta = -m\lambda v$ となり、結局

$n_2 \sin I_2 - n_1 \sin I_1 = -m\lambda v$ の関係が得られる。更に回折面上に乗る微小プリズム全体をあたかも段差の無い1つのプリズムに置き換えて考えることができる。



このように回折面の屈折率は ∞ と考えることができ、この面のペッツバル和は0となる。

実際の設計では $n-1 \propto m\lambda$ となるような有限の n の値を設定することが多いが、これは媒質が空気の場合との整合性をとることが1つの理由である。

光学設計ソフトウェアでの回折素子の取り扱い

- 光学設計ソフトウェアにおける回折素子の定義

回折格子による付加光路長の関数は、
光軸に垂直な高さ（xyz座標で光軸を x とする場合は y,z ）の座標で定義されます。
しかしソフトウェアによって、正規化方法と関数の値自体が異なります。

正規化半径 （関数の値が係数の値になる高さ）

- 1 (mm) : 回折光路長の計算が面倒、比較は容易
- レンズ半径 : 付加光路長総量や次数毎の寄与 がわかりやすい
- 指定した値 :
の定義方式があります。

関数の値

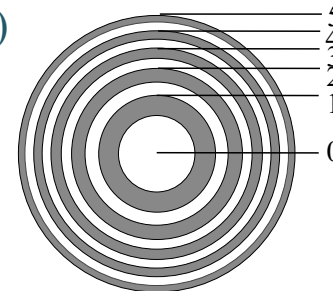
- 特定の波長の光路長（mmなどの長さの単位）
- 設定波長に依存しない「位相量」 rad
- 設定波長に依存しない「段」、「波長」、「 λ 」、「周期」
など様々です。

例 $\lambda_0=588\text{nm}$ 5.0輪帯

0.00294(mm)

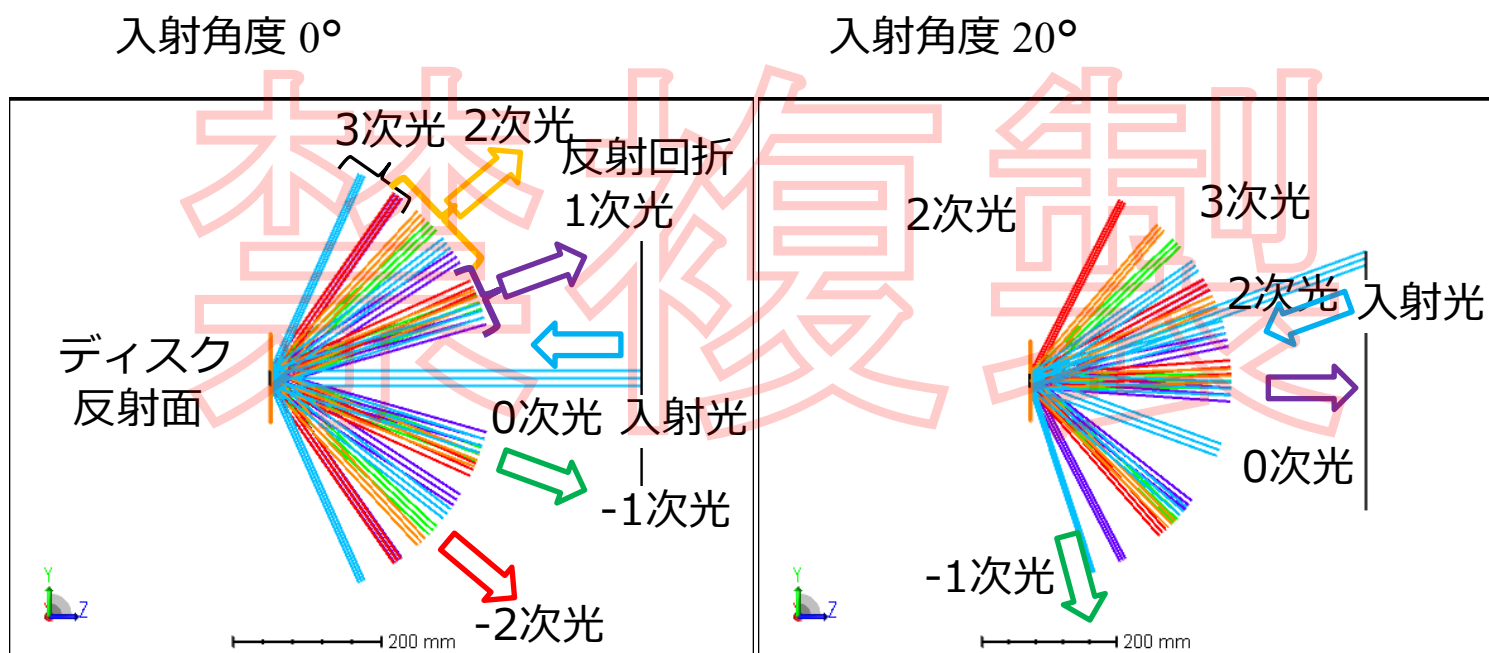
31.416 (rad)

5.00 (λ)



Zemax OpticStudioを用いた回折格子の評価

- CD (トラックピッチ $1.6\mu\text{m}$) の $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ 次回折光



5色を定義してレンズ図を書かせています。表に出てこない回折光があってもエラーになる事はなく 伝搬する光線だけ描かれます。

回折屈折ハイブリッドレンズの設計

- 曲面上の回折素子

フレネルゾーンプレートは平面型の素子ですが、ガラス基板の上にフレネルゾーンプレートを設ければ、光はフレネルゾーンプレートの表面で屈折作用と回折の作用を同時に受けます。

回折格子は微細なピッチを正確に作るためにルーリングエンジンと呼ばれる機械的刻線機を使って作られてきましたが、近年ではフォトリソグラフィや超精密旋盤によって作られた金型で回折を利用した製品の大量生産が行われています。

樹脂レンズを射出成形で作ったり、ガラスレンズ上に樹脂のハイブリッドレンズとすれば、容易に回折と屈折作用を一体化したレンズが作れます。

（赤外線用レンズでは直接精密切削加工も可能です。）



F4.0/300mm 回折ハイブリッド2枚レンズ



微細形状の設計

- ブレース化の別の考え方 タマネギモデル

光記録用レンズの様に画角が狭く設計上無収差のレンズは、どの輪帯を通る光も無収差で一点に結像する面です。光軸方向に1λずつ 光路長が違い、同じ像点に無収差で結像する面群を作って、位相関数から求めた輪帯切り替え点で、1段ずつ切り替えればできます。この方法であれば、ベース面の傾きの考慮などを一切することなしに確実に形状を決定できます。一般レンズでは球面収差の形が一致する面群を設計します。

