

# CODE Vによる回折光学素子の解析と応用

中山 朋子, 駒井 友紀, 小館香椎子

日本女子大学理学部数物科学科

(2007年1月23日受理)

**要旨** ユビキタスネットワーク社会への実現に向けて、高速性、並列性、大容量性が求められており、これらの要求は光技術によって満たすことができる。位相波面制御、振幅制御、波長変換、偏光制御などの光による操作・制御が可能で、小型・軽量、設計の自由度を持ち、他素子との一体化、集積化が容易な回折光学素子 (Diffractive Optics Element : DOE) が注目されている。我々のグループでは、DOEの黎明期から基礎理論の検討を加え、設計・作製・評価を行っており、現在、天体観測用の高分散分光素子、フォトニックネットワーク用光波シンセサイザなどの実用可能なデバイスを提案している。

また、光学設計は、コンピュータツールが使われ始め、大きな進展を遂げた。初期に開発された光学設計ソフトウェアは、幾何学的な光線追跡に基づき、実行可能な解析も限られていたが、自動最適化機能を持つソフトウェアが開発され、光学設計者にとって欠くことのできないツールとなっている。また、市販のソフトの中には、DOEの光線追跡を行い、結像解析が可能で、自動最適化機能、スカラー理論やKogelnikの理論による回折効率算出機能、作製をサポートするマクロを多数備えるなど、DOEの設計・作製および性能評価に大変有効なものがある。

本稿では市販の光学設計ソフトの中でも、特に高機能、高性能な光学設計ソフト「CODE V」を用いた、位相型DOEに屈折型レンズと同じく単体で分岐・結像機能を持つMulti-Level Zone Plate (MLZP)、ホログラフィック光学素子 (Holographic Optical Element : HOE) で周期の微細化が容易で高効率の達成できるVPH (Volume Phase Holographic) グレーティングの解析例を示す。さらに、我々はホログラフィーの技術を応用した大容量、高速読み出しが期待されるホログラフィックメモリのための小型光メモリシステムを実現可能な2つのプリズムとVCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) を用いた2光束干渉系を提案している。CODE Vを使いプリズムをモデリングする際のテクニックを示し、それにより2光束干渉系の設計の有効性を確認したので、報告する。

**キーワード** : 回折光学素子, 光学設計ソフト, CODE V, 光線追跡, 位相型回折光学素子, Multi-Level Zone Plate, ホログラフィック光学素子, VPH グレーティング, ホログラフィックメモリ, プリズム

## 1. はじめに

21世紀のマルチメディア高度情報社会では、超高速・大容量の光情報システムへの期待が高まり、光・電子間のインターフェース、波面制御技術やセキュリティ技術などの研究開発が進められている。この要求を満たす光技術として重要なキーデバイスとなるマイクロオプティクスは、発光, 受光, 増幅, 変調, 集光, 接続, 合分岐, 合

分波, 波長変換, 波長制御, 偏光制御などの機能を持っている<sup>1)</sup>。これらの機能を持ち、高密度並列化を実現するための1つの素子を多機能化 (複合機能化)、小型・軽量化、作製の容易さ、安価などの要求を満たす素子として、DOEが注目されている。

DOEは平面上に微細なピッチの凹凸や濃淡の縞や屈折率変調量の変化により、回折現象に基づいて光波を制御する光学素子である。高効率、平面構造・小型・薄型で集積可能、設計の自由度が大きく、作製が容易、上記のような機能を単一素子で実現し、任意波面を所望の波

Contribution No.: MP 06-6

面に変換可能、レプリカによる複製ができ、量産可能で低コスト、屈折型光学素子に比べて球面収差が小さいなど、優れた特徴を持っている<sup>2, 3)</sup>。

光学素子の設計や評価に用いられる光学シミュレーションには、光の空間的な伝播の取り扱いとして単純な近似理論から複雑かつ厳密な理論まで様々なものがあり、幾何光学、波動光学、電磁波光学の大きく3つに分類することができる。数々の回折現象を適切に記述するには、格子の周期 $\Lambda$ と使用する波長 $\lambda$ との関係を考慮して解析法を選ぶ必要がある<sup>4)</sup>。

幾何光学に基づく光線追跡法は、光の波長を0と近似し、同一媒質中では光は直線的に進むものとし、光線という概念を導入している。数十本の光線を入射させ、媒質の異なる境界面でスネルの法則を適用し、光線が屈折して進む経路と像面での到達位置を計算する。

光学設計は、望遠鏡、顕微鏡、写真レンズなどの光学機器を対象として始められた。幾何光学をベースとし、曲率半径、面間隔、ガラスの屈折率、分散率などの構成データを変化させて光線追跡を行い、その結果をフィードバックして構成データに変更を加え、収差が最小になる最適な条件を求め、レンズなど様々な光学素子の設計を行う。近年、光学設計ソフトは、光路図、スポットダイヤグラム、幾何学的収差、波面収差、点像強度分布、MTF (Modulation Transfer Function) など精密な評価とDSL法 (Damped Least Squares Method: 減衰最小自乗法) を用い、試行錯誤の作業をコンピュータによって処理する最適化の技術により、商業ベースで開発が進んだ。市販の光学設計ソフトは高価なものから比較的手ごろなものがあり、企業を中心に利用され、光学設計者にとって欠くことのできないツールとなっている。代表的な光学設計ソフトに、CODE V, ZEMAX, OSLOなどが挙げられる<sup>5)</sup>。

我々のグループは、回折光学素子の黎明期から、使用目的に合わせた多種類の回折光学素子の設計・作製・評価を行い、多くの成果を残してきている。現在は、天体観測<sup>6)</sup> およびフォトニックネットワーク用の高分散分光素子<sup>7)</sup>、フォトニックネットワーク用導波路型光波シミュレータ<sup>8)</sup>、色分離用フィルタ<sup>9)</sup> などの実用可能なデバイスを提案し、独自に開発した数値解析エンジンを用いて設計の最適化や光学解析、および試作素子の評価を行っている。

本稿では市販の光学設計ソフトの中でも、特に高機能、高性能な光学設計ソフト「CODE V」を用い、DOEの解析を行ったので報告する。第2章では表面が凹凸によって形成される位相型DOEであり、屈折型レンズと同じく単体で分岐・結像機能を持つMLZP、第3章では2光束干渉露光により作製されるHOEで、周期の微細化が

容易で高効率の達成できる屈折率変調格子のVPHグレーティング、第4章ではホログラフィーの技術を応用した大容量、高速読み出しが期待されるホログラフィックメモリである2つのプリズムを用いた小型光メモリシステムが実現可能な2光束干渉系への適応例を示す。適応例とともに、それぞれの素子を設計するために必要な基本的な理論を述べる。また、DOEをCODE Vで解析を行う手順とその結果を具体的に示した。最後に得られた結果を総括し、まとめとする。

## 2. バイナリオプティクスとMLZPへの適応例<sup>10)</sup>

### 2.1. MLZP

DOEの非周期光学素子には半径の異なる多数の輪帯を同心円上に並べた回折による結像作用を利用するフレネルゾーンプレートと高効率化を図りブレード化したフレネルレンズがある。これらの素子に垂直に波長を入射すると、光は輪帯による回折作用により、正、負の焦点に結像する。つまり、これらはレンズ機能を持つ。

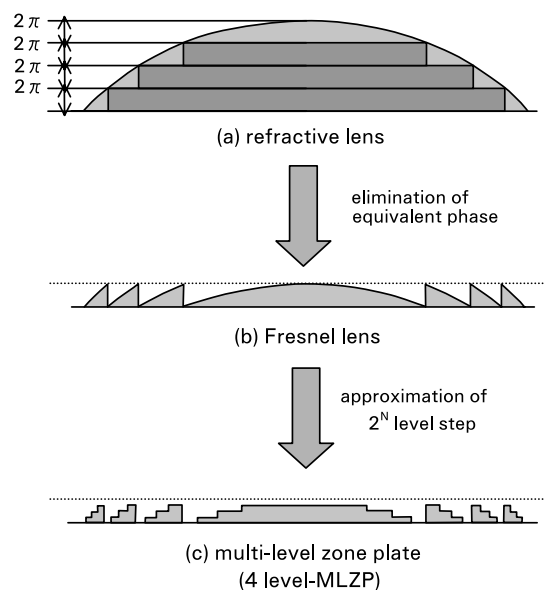


Fig. 1 Conversion of a continuous function into a diffractive element.

Fig. 1 に示すように、フレネルレンズは従来の屈折レンズから等位相部分を取り除いて最適化した形状しており、これにより100%近い効率が得られる。入射波長 $\lambda$ 、焦点距離 $f$ のフレネルレンズの位相関数 $\phi(r)$ は

$$\phi(r) = -\frac{2\pi}{\lambda} \left( f - \sqrt{f^2 + r^2} \right) \quad (1)$$

で与えられ、 $f$  がレンズの口径より十分に大きい時 ( $f \gg r$ ) は次式ようになる。

$$\phi(r) = -\frac{\pi r^2}{\lambda f} \quad (2)$$

ただし、実現可能な位相シフト量は  $0 \sim 2\pi$  の範囲であるので位相関数は

$$\phi_F(r) = -\phi(r) \bmod 2\pi \quad (3)$$

となり、厚さを変えたレリーフ型が作りやすい。

1985年後半になって、MIT の Lincoln 研究所では CAD を用いた設計とフォトリソグラフィとエッチングを繰り返す、通常の IC の作製技術を用い、ブレード形状を階段形状にデジタルブレードした DOE を開発した。これらはバイナリオプティクスと呼ばれている。フレネルレンズの鋸歯形状断面を  $M$  ( $=2^N$  レベル) の階段形状で、デジタル近似された素子を MLZP と呼ぶ。レベル数が  $M$  の場合、溝の深さはフレネルレンズの  $2\pi$  の位相シフトを  $2^N$  のステップに等分割するので、位相変調振幅は

$$\Delta\phi = \frac{(M-1)2\pi}{M} \quad (4)$$

となり、 $m$  番目の半径はフレネルゾーンプレートの半径を求める式から、

$$r_m = \sqrt{\frac{2mf\lambda}{M} \left(\frac{m\lambda}{M}\right)^2} \quad (5)$$

となる。

我々のグループは、この MLZP の作製誤差の影響を軽減し、要求される高効率、高 NA な素子を作製するために、Hybrid Multi-Level Zone Plate (HMLZP) を提案している<sup>11)</sup>。この HMLZP を衛星間などの全光ネット

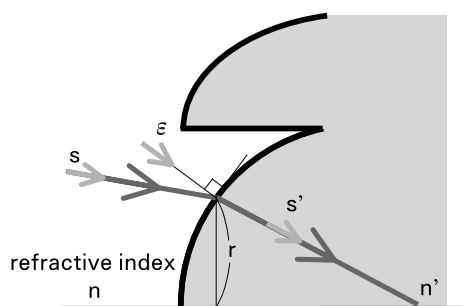


Fig. 2 Ray tracing of phase DOE.

(Parameters of phase DOE)

$n$ : refractive index of incident side,  $n'$ : refractive index of output side,  $s'$ : unit vector in the direction of incident light,  $s$ : unit vector in the direction of output light,  $\epsilon$ : normal unit vector at incident plane,  $\Lambda$ : grating period,  $q$ : parallel unit vector at grid line tangent to plane,  $k$ : diffraction order,  $\lambda$ : wavelength of vacuum,  $\nu$ : spatial frequency.

トワークシステムにおける光束光信号処理を行うために搭載した自由空間型微小光学モジュールを試作し、時間多重信号を用いたフォトニックネットワークのノード処理への有効性を確認している<sup>12)</sup>。さらに、MLZP アレイを用いた光並列相関演算を提案し、これにデジタルコンピュータによる前後処理を加え、光並列顔認識システムとして、バイオメトリクス認証評価ガイドラインに沿った 300 人データベースでの精度評価において本人拒否率、他人受け入れ率ともに 1% 未満の結果を得ており、入退出などの管理に十分対応なセキュリティレベルを持つ装置であることを確認している<sup>13)</sup>。

## 2.2. 位相型 DOE の光線追跡<sup>14)</sup>

次に、これらの表面が凹凸によって形成される位相型 DOE の光線追跡について述べる。Fig. 2 に示すように、入射側および出射側の屈折率を  $n$  および  $n'$ 、入射および出射光線の方向ベクトル (進行方向にとった単位ベクトル) を  $s'$  および  $s$ 、入射点における光線方向にとった境界面の法線単位ベクトルを  $\epsilon$ 、格子間距離を  $\Lambda$ 、面に接し格子線に平行な単位ベクトルを  $q$  で表すと、光線追跡式は次式で表される。

$$\begin{aligned} n'(s' \times \epsilon) &= n(s \times \epsilon) + k \frac{\lambda}{\Lambda} q \\ &= n(s \times \epsilon) + k \lambda \nu q \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 $k$  は回折次数、 $\lambda$  は真空中の波長、 $\nu$  は空間周波数を示す。

さらに、光路差  $\Phi(r)$  とすると、境界面の不連続な位相差を表す位相関数は  $\varphi(r) = 2\pi \Phi(r) / \lambda$  なので、

$$n'(s' \times \epsilon) = n(s \times \epsilon) + \nabla \Phi(r) \times \epsilon \quad (7)$$

となる。

このとき、MLZP のような回転対称の位相型 DOE を考えると、

$$\Phi(r) = a_1 r^2 + a_2 r^4 + \dots \quad (8)$$

と置き、レンズのパワー  $\phi$  は

$$\phi = \phi_s + \phi_{doe} = \phi_s - 2a_1 \quad (9)$$

となる。ここで、 $\phi_s = (n' - n) / R$  で表せ、 $\phi_s$  は屈折作用によるパワー、 $\phi_{doe}$  は回折作用によるパワーである。したがって、レンズのパワーは屈折作用によるパワーに回折作用によるパワーを加えたものとなる。また、これらの式は、光線を対象としているため、球面波でも、平面波でも、成り立つ。

2.3. CODE Vによる数値計算

CODE Vで位相型DOEをモデリングするには、DOE面上に定義される位相 $\varphi$ を、係数 $C_{ij}$ を指定し、DOEの位相を基板上のX、Y座標を使って表現する<sup>14-16</sup>。

$$\varphi = \sum_{i=0}^{10} \sum_{j=0}^{10} C_{ij} X^i Y^j \quad (10)$$

$$C_{00} = 0 \quad (11)$$

位相を多項式ではなく、自由度をつけて指定したい場合は、FORTRAN言語、C言語 Macro-PLUS (CODE Vのマクロ言語) を用い、DOEの基板上のX、Y座標に関する位相分布と微分係数を記述し、CODE Vとリンクして使用する。また、CODE Vは、位相型DOEの最適化機能を備えている。さらに、回折効率を算出するマクロやフォトリソグラフィック・マスクを生成するマクロなど、DOEの解析、作製をサポートするマクロが多数用意されている。

次に、CODE Vで焦点距離 $f$ が開口より十分大きいMLZPの回折効率を算出する方法を示す。まず、フレネルレンズのモデリングを行う。

1. ツールバーの「レンズ」>「面特性」>「回折特性」を選択する。
2. タイプに「位相多項式 (キノフォーム/バイナリ)」を選ぶ (Fig. 3 ①)。
3. 回折格子の多項式タイプに「回転対称」を選ぶ (Fig. 3 ②)。

回転対称の場合、位相多項式は

$$\varphi = \sum_{n=0}^{10} C_n R^{2n} \quad (12)$$

で表され、半径 $R$ の多項式の係数 $C_n$ を指定し、形状を入力する。 $\varphi$ の単位はレンズ単位で、通常mmである。

4. 回折次数 (通常1) を入力する (Fig. 3 ③)。
5. 規格化周波数 (設計波長) を入力する (Fig. 3 ④)。
6. 係数 $C_1$ は「 $-0.5/f$ 」で、 $C_2$ 、 $C_3$ 以降は全て「0」を入力する (Fig. 3 ⑤)。

位相は $2\pi$ 、 $4\pi$ 、 $\dots$ が0に等しいと考え、位相多項式は式(2)に従う。

1から6の手順により、フレネルレンズのモデリングができた。光線追跡が可能となり、光路図、スポットダイヤグラム、点像強度分布をなどの出力が可能となる。さらに、MLZPの回折効率算出には、以下の手順が必要である。

7. マクロDOEDEFs実行する。  
他のマクロでも使用するいくつかの関数が定義される。
8. マクロDOESET実行し、レベル数を定義する。
9. マクロDOEEFFIC実行する。

以上の手順により、MLZPのスカラー近似の回折効率が算出される。

Fig. 4に設計波長 $\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$ 、開口数 $\text{NA} = 0.1$ 、焦点距離 $f = 10.0 \text{ mm}$ の厚みを考慮しない理想的なフレネルレンズに、ビーム直径 $d = 2.0 \text{ mm}$ 、入射波長 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 、入射角度 $\theta = 0.0^\circ$ の光を入射したときの、光路図、焦点面上のスポットダイヤグラム、横収差、波面収差、点像強度分布、波動光学的MTFを示す。

さらに、Table 1に示すように、CODE V、および、Fresnel-Kirchhoffの回折理論で、設計波長 $\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$ 、開口数 $\text{NA} = 0.02$ 、焦点距離 $f = 50.53 \text{ mm}$ 、開口サイズ (MLZP直径)  $D = 2.0 \text{ mm}$ 、ライン数 $M = 32 \text{ lines}$ 、最小ライン幅 $W_{\min} = 1.00 \mu\text{m}$ のMLZPに設計波長の光を垂直入射し、焦点距離における回折効率を計算したところ、それぞれ40.5%と40.3%と極めてよい一致を得た。また、実験結果では39.6%と、CODE VでのMLZPの回折効率の計算値ともよく一致したことを確認できた。したがって、CODE Vにより算出したMLZPの回折効率の値は、

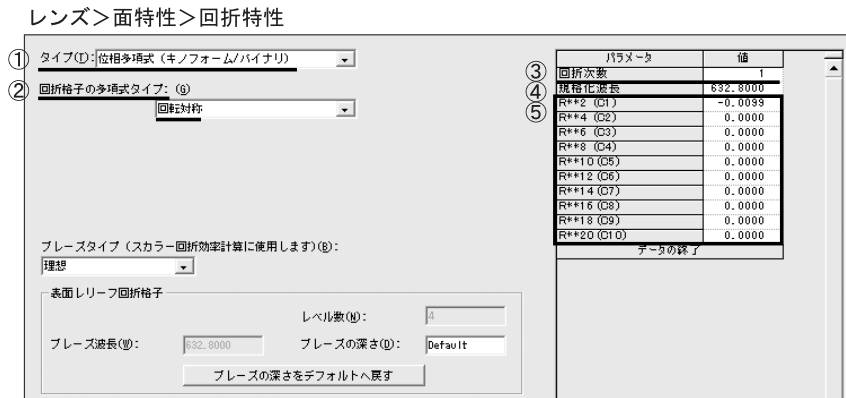


Fig. 3 Modeling process of Fresnel lens using CODE V.

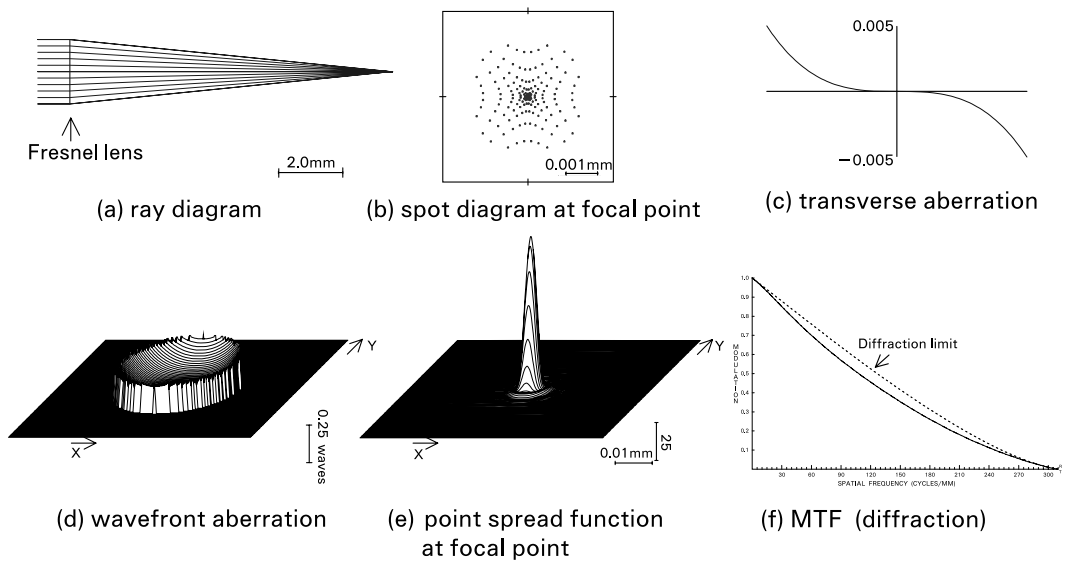


Fig. 4 Analysis of Fresnel lens using CODE V.

(Parameters of Fresnel lens)  
 design wavelength ( $\lambda_0$ ): 632.8nm  
 numerical aperture (NA): 0.1  
 focal length (f): 10.0mm  
 Thickness is excluded.

(Parameters of incident light)  
 diameter of beam (d): 2.0mm  
 wavelength ( $\lambda$ ): 632.8nm  
 incident angle ( $\theta$ ): 0.0deg.

Table 1 Diffraction efficiency of 2 level MLZP.

(a) design parameters		(b) diffraction efficiency	
Design wavelength $\lambda_0$	632.8nm	Analysis method	Diffraction efficiency $\eta$ [%]
Number of level L	2 level	CODE V	40.5
Numerical Aperture NA	0.02	Fresnel-Kirchhoff diffraction theory	40.3
Focal length f	50.53mm	Experiment	39.6
Diameter of MLZP D	2.0mm		
Number of line M	32 lines		
Minimum feature size $W_{min}$	1.00 $\mu$ m		

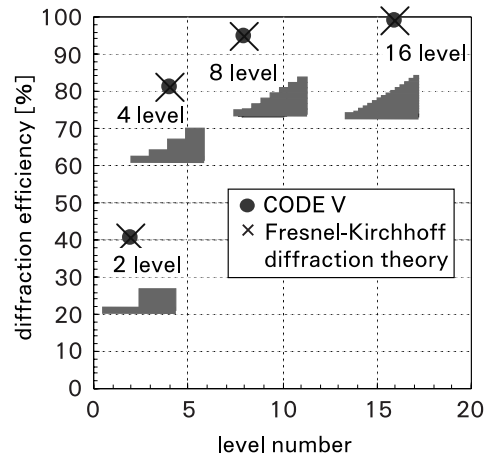


Fig. 5 Dependence of diffraction efficiency of MLZP on number of level.

(Parameters of MLZP)  
 design wavelength ( $\lambda_0$ ): 632.8nm  
 numerical aperture (NA): 0.02  
 focal length (f): 50.53mm  
 Thickness is excluded.

(Parameters of incident light)  
 diameter of beam (d): 2.0mm  
 wavelength ( $\lambda$ ): 632.8nm  
 incident angle ( $\theta$ ): 0.0deg.

本研究室で開発した波動論の Fresnel-Kirchhoff 回折理論を用いた数値計算、実験と値が一致を示し、十分これらの回折光学素子の回折効率算出に CODE V が有効であることを確認した<sup>17)</sup>。

さらに、MLZP のレベル数を 2 ~ 16 level と変え、CODE V と Fresnel-Kirchhoff 回折理論を用いて算出した回折効率のレベル数依存性の数値計算を Fig. 5 に示す。CODE V と Fresnel-Kirchhoff 回折理論により、これら 4 つの level の数値計算結果の回折効率の値が高くなり、CODE V が回折効率の算出に有効であることを

確認した<sup>17)</sup>。

### 3. VPH グレーティングへの適応例

#### 3.1. VPH グレーティング

平面波どうし、あるいは平面波と球面波（拡散光）の干渉縞を記録し、再生時に他の波面との相互作用を利用して作製する回折光学素子を **HOE** という。中でも、入射波長に比べ記録材料膜厚が厚い **VPH** グレーティングは入射光がブラッグ条件を満たすとき、100%に近い回折効率が得られ、Fig. 6 に示すように、2 光束干渉法を用いて作製するため、微細周期の作製が可能で、ビーム径を広げることにより大面積が作製可能であるという優れた特徴を持っている。

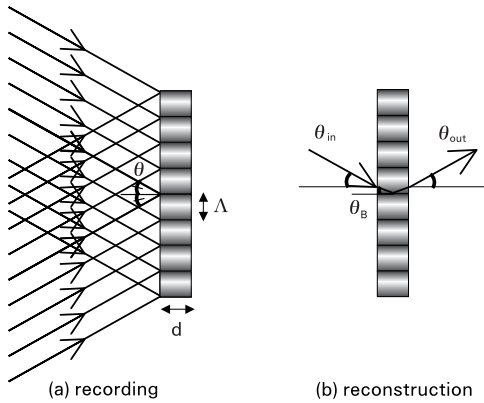


Fig. 6 Recording and reconstruction of VPH grating.

(Design parameters)

$\Delta$ : grating period,  $n$ : refractive index,  $\Delta n$ : refractive index modulation,  $d$ : thickness of grating,  $\lambda$ : recording wavelength,  $\lambda'$ : reconstruction wavelength,  $\theta_B$ : Bragg angle,  $\theta$ : incident angle (recording),  $\theta_{in}$ : incident angle (reconstruction),  $\theta_{out}$ : diffraction angle,  $k$ : diffraction order.

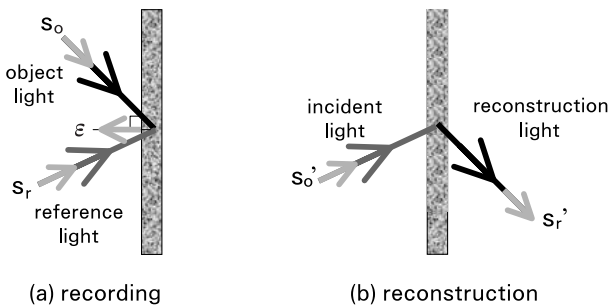


Fig. 7 Ray tracing of HOE.

(Parameters of HOE)

$k$ : diffraction order,  $\epsilon$ : normal unit vector at holographic plane,  $s_o$ : unit vector in the direction of object light,  $s_r$ : unit vector in the direction of reference light,  $s_o'$ : unit vector of incident light,  $s_r'$ : unit vector of reference light,  $\lambda$ : recording wavelength,  $\lambda'$ : reconstruction wavelength.

格子の厚みを示す  $Q$  値は、次式で定義される。

$$Q = \frac{2\pi\lambda d}{n\Lambda^2} \quad (13)$$

ここで、 $\lambda$ は考慮する光の波長、 $d$ は膜厚、 $n$ は屈折率、 $\Lambda$ は周期である。 $Q > 10$ のとき、厚いホログラムと定義される。

我々のグループは、乾式型フォトポリマーを記録材料として作製した **VPH** グレーティングと2つのプリズムを組み合わせて、直視型高分散の分光素子を開発した。回折効率80%以上、面積100mm<sup>2</sup>、分解能3,000、波面精度0.097 $\lambda$ の **VPH** グリズムを作製し、ハワイ島のすばる望遠鏡に搭載し、試験観測を行ったところ、従来の3倍の高効率が得られることを確認している<sup>18)</sup>。

#### 3.2. HOE の光線追跡<sup>14)</sup>

Fig. 7 に示すように、物体光と参照光の干渉で格子が作られる **HOE** の場合は、次の光線追跡式が成り立つ。

$$(s_o' - s_r') \times \epsilon = \frac{k\lambda'}{\lambda} (s_o - s_r) \times \epsilon \quad (14)$$

ここで、 $\epsilon$ はホログラム面の法線単位ベクトル、 $s_o, s_r$ はホログラム作製時の物体光および参照光の方向ベクトル(余弦を成分とする単位ベクトル)、 $s_o', s_r'$ はホログラム再生時の入射光および出射光の方向ベクトル、 $\lambda, \lambda'$ は作製時および再生時の波長、 $k$ は回折次数を表す。これらの式は、光線を対象としているため、球面波でも、平面波でも成り立つ。

#### 3.3. Kogelnik 理論<sup>19-21)</sup>

格子の幾何学的な考察では、回折効率を求めることができない。そこで、**Kogelnik** は音響光学素子の回折効率の計算に使われていた **Coupled-Wave Theory** を厚いホログラムに適用すると提案した。実際のホログラムでは、格子は厚みのある感光材料の内部に記録されていて、それを空気やガラス板などの変調を受けない外部領域中において再生を行う。**Kogelnik** 理論では、再生のための照明光が外部領域からホログラムに入射するとき、および、再生され光が外部領域に出射するとき、変調・非変調の境界面で回折が起るはずであるが、これを無視している。さらに、ホログラムの内部においては多数の次数の回折光が存在するはずであるが、0次と+1次の回折光のみを考えるという近似を行い、ホログラム内における回折波の複素振幅分布の2次微分項を省略して、計算を簡易化している。解を簡単な代数式で表現でき、厚いホログラムとして良く用いられる  $Q > 10$  程度に適用できることを明らかにした。

記録の際の物体光と参照光がともに平行光で、波長が  $\lambda$ 、入射角が  $\theta$  のとき、作製される傾斜のない透過型格子の格子周期  $\Lambda$  は

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (15)$$

で表される。また、ブラッグ角  $\theta_B$  は、屈折率  $n$ 、回折次数  $k$  により

$$\sin \theta_B = \frac{k\lambda}{2n\Lambda} \quad (16)$$

で表され、この式はブラッグの条件と呼ばれる。この格子に、波長  $\lambda$  の平行光を入射角  $\theta_{in}$  で入射させると、出射角  $\theta_{out} = -\theta_{in} + 1$  次光が再生される。Kogelnik 理論に基づくと、回折効率  $\eta$  は、ブラッグ条件を満たすとき、屈折率  $n$ 、屈折率変調量  $\Delta n$ 、膜厚  $d$  に応じて決まり、TE モードの場合、

$$\nu = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda \cos \theta_B} \quad (17)$$

となり、回折効率は、

$$\eta = \sin^2 \nu \quad (18)$$

で表される。よって、

$$\frac{\Delta n d}{\cos \theta_B} = \frac{\lambda}{2} \quad (19)$$

であるとき、100%の回折効率が実現される。

同様に、ブラッグ条件を満たすとき、TM モードの場合、

$$\nu_{\parallel} = \nu \cos 2\theta_B \quad (20)$$

となり、回折効率は

$$\eta_{\parallel} = \sin^2 \nu_{\parallel} \quad (21)$$

で表される。

また、格子内での入射角度がブラッグ角からずれた場合、そのずれは  $\xi$  で表すことができる。

$$\xi = \frac{\pi \Delta \theta_B d}{\Lambda} \quad (22)$$

さらに、TE モードの回折効率は、

$$\eta = \frac{\sin^2 \sqrt{\xi^2 + \nu^2}}{1 + \frac{\xi^2}{\nu^2}} \quad (23)$$

で表される。同様に、TMモードの回折効率は、

$$\eta_{\parallel} = \frac{\sin^2 \sqrt{\xi^2 + \nu_{\parallel}^2}}{1 + \frac{\xi^2}{\nu_{\parallel}^2}} \quad (24)$$

で表される。

### 3.4. CODE V による数値計算

CODE V では、グレーティングベクトルを求めた後、ホログラムの記録媒体内での光線方向を算出し、Kogelnik の理論に基づき計算を行うことで、体積ホログラムの回折効率を求めることができる。反射型、および、透過型、傾斜のある格子も計算可能で、また、ホログラムを記録(硬化)後の厚みの伸縮、および、屈折率のシフトも考慮できる。さらに、HOE の最適化機能を備えている。

次に、CODE V で VPH グレーティングの回折効率角度依存性を算出する手順を述べる<sup>16)</sup>。まず始めに、HOE の設定を行う。

1. ツールバーから「面特性」>「回折特性」を選ぶ。
2. タイプに「ホログラフィック光学素子」を指定する

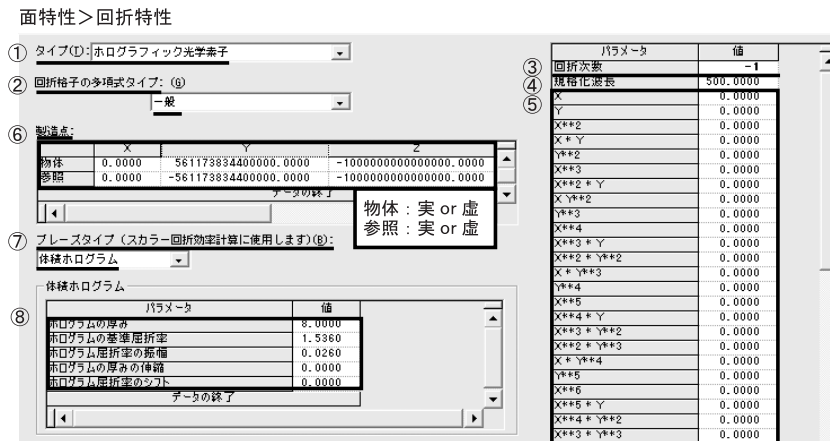


Fig. 8 Calculation process of holographic plane and VPH grating.

(Fig. 8 ①)。

3. 基盤の凹凸（形状）を表す回折格子の多項式タイプは、「一般」を選択する (Fig. 8 ②)。  
一般の多項式は次のように表すことができる。

$$\varphi = \sum_{i=0}^{10} \sum_{j=0}^{10} C_{ij} X^i Y^j \quad (25)$$

$$C_{00} = 0 \quad (26)$$

4. 回折次数を入力する (Fig. 8 ③)。
5. 物体光と参照光の波長である規格化波長を入力する (Fig. 8 ④)。
6. 今回、基板は平面と仮定し、多項式の係数は全て「0」を入力する (Fig. 8 ⑤)。
7. 製造物点（作製する際の物体点光源）の座標 ( $x_0, y_0, z_0$ )、製造参照点（作製する際の参照点光源）の座標 ( $x_r, y_r, z_r$ ) を入力し、「実」あるいは「虚」を指定する (Fig. 8 ⑥)。

実の場合は点光源から発光している発散ビーム、虚の場合は点光源に収束する収束ビームとなる。 $z_0, z_r$  は  $10^{10}$  より大きいと無限大として扱われるので、 $z_0, z_r$  を  $10^{10}$  より大きい値とすることにより、平行

光が表現できる。物体光と参照光が HOE に対して、同じ方向から入射されれば、透過型、異なる方向から入射されると反射型の HOE となる。

これらの設定により、光線追跡が可能となる。さらに、光線追跡が可能な状態で、VPH グレーティングの回折効率を計算するのに必要なパラメータを入力する。

8. ブレーズタイプの中から「体積ホログラム」を選ぶ (Fig. 8 ⑦)。
9. ホログラムの厚み、基準屈折率、屈折率の振幅、厚みの伸縮、屈折率のシフトの値を入力する (Fig. 8 ⑧)。

次に、VPH グレーティングの再生光の入射角度を設定する。

10. ツールバーの「解析」>「波動光学的」>「ブラッグ回折効率」を選択する。
11. 「物体側格子」のタブを選ぶ (Fig. 9 ①)。
12. 度単位でエレベーション（仰角）の最大（値）と最小（値） (Fig. 9 ②)、エレベーションの数（最小値から最大値の間の出力数） (Fig. 9 ③)、エレベーションのオフセット値（度）（出力されるデータの位置を基準点からの差で表した値） (Fig. 9 ④)、アジマス（方位角） (Fig. 9 ⑤) を入力する。

以上の操作により、VPH グレーティングの回折効率が算出できる。

Fig. 10 に HOE の光路図を示す。再生波長  $\lambda' = 500.0$

解析>波動光学的>ブラッグ回折効率

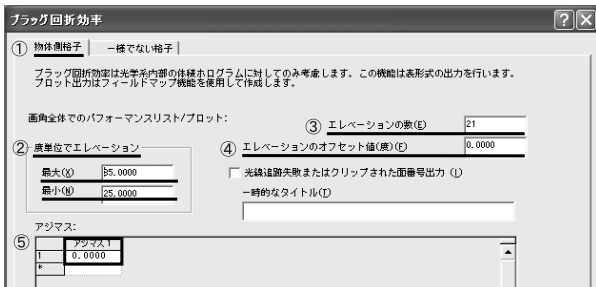


Fig. 9 Calculation process of diffraction efficiency of a VPH grating using CODE V.

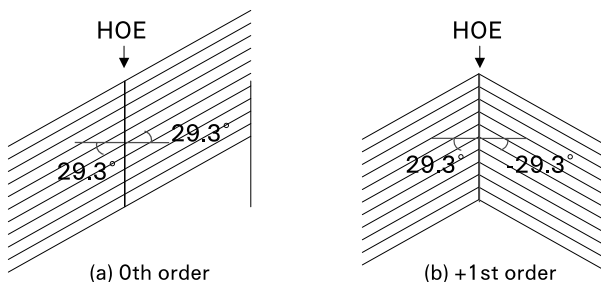


Fig. 10 Bragg diffraction of a HOE.

(Parameters of HOE)

$\lambda' = 500.0\text{nm}$ ,  $\Lambda = 510.8\text{nm}$ ,  $\theta_{in} = 29.3\text{deg}$ ,  
Thickness of the HOE is excluded.

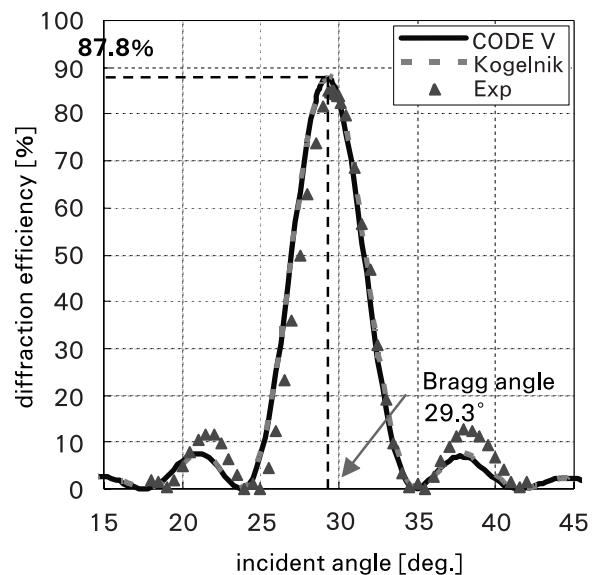


Fig. 11 Dependence of diffraction efficiency of a VPH grating on incident angle using CODE V.

(Parameters of VPH grating)

$\lambda' = 500.0\text{nm}$ ,  $k = 1$ ,  $\Lambda = 510.8\text{nm}$ ,  $\theta_B = 18.6^\circ$ ,  $\theta_{in} = 29.3^\circ$ ,  
 $d = 8.0 \mu\text{m}$ ,  $n = 1.520$ ,  $\Delta n = 0.026$ .



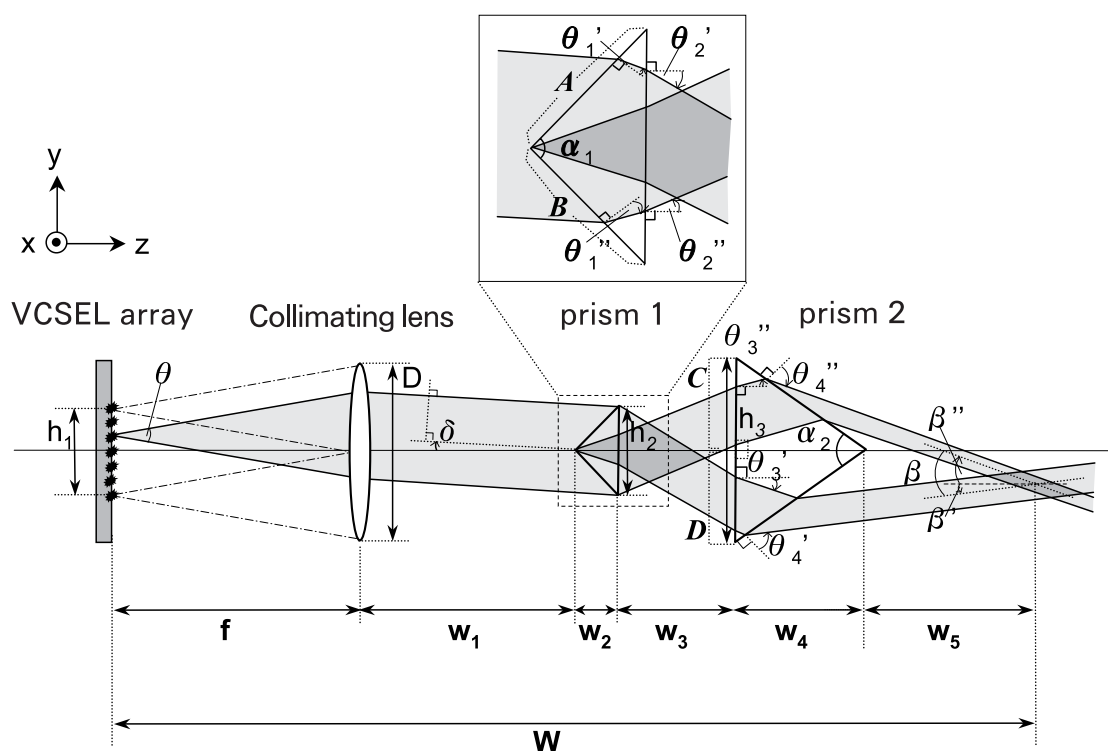


Fig. 12 Two waves interferometer combined array light source and two prisms.

(Design parameters)

- $\theta$ : beam divergence angle,  $\alpha_1$ : apex angle of prism1,  $\alpha_2$ : apex angle of prism2,
- $f$ : focal length of lens,  $\delta_{\max}$ : maximum oblique incident angle allowed to setup,
- $w_1$ : distance between lens and prism1,  $w_2$ : height of prism1
- $w_3$ : distance between prism1 and prism2,  $w_4$ : height of prism2,
- $w_5$ : distance between prism2 and crossing position of two beams,  $W$ : total width,
- $h_1$ : length of array light source,  $D$ : aperture of lens,  $h_2$ : length of prism1's base,  $h_3$ : length of prism1's base

nm, 周期  $\Lambda = 510.8$  nm, 厚さを無視した HOE に, ブラック条件を満たす (ブラッグ角  $\theta_B = 18.6^\circ$ ) 入射角度  $\theta_{in} = 29.3^\circ$  で光が入射すると, 0 次光は  $\theta_{out} = 29.3^\circ$  となり, +1 次光の出射角は  $\theta_{out} = -29.3^\circ$  となること, 実光線追跡により分かった。つまり, 0 次光は直進し, +1 次光は, 記録波長  $\lambda$  が再生波長  $\lambda'$  と等しいとき, つまり,  $\lambda = 500.0$  mm のときの物体光の方向に再生されることを確認した。

上記の条件に加え, 回折次数  $k = 1$ , 膜厚  $d = 8.0 \mu\text{m}$ , 記録材料の屈折率  $n = 1.520$ , 屈折率変調量  $\Delta n = 0.026$  の時の, VPH グレーティングの回折効率入射角依存性 CODE V により算出した (Fig. 11)。VPH グレーティングの回折効率の値は, ブラック条件の入射角度  $\theta_{in} = 29.3^\circ$  で, 最大の回折効率  $\eta = 87.8\%$  となり, また, 実験結果とよく一致した。この結果, CODE V が有効であることを確認した。Kogelnik の理論より求めた傾斜のない透過型格子である VPH グレーティングの回折効率は, 円偏光の光を入射した場合, TE モードの回折効率 (式 (23)) と TE モードの回折効率 (式 (24)) の平均

値となる。Fig. 11 に示すように, この値も, CODE V を用いて得られた VPH グレーティングの回折効率と良く一致することを確認した。

#### 4. VCSEL アレイと 2 つのプリズムを用いた小型光メモリシステムの適応例

##### 4.1. VCSEL アレイと 2 つのプリズムを用いた小型光メモリシステム<sup>22, 23)</sup>

我々の研究グループは, VCSEL と 2 つのプリズムを用いた小型光メモリシステムのための 2 光束干渉系を提案し, 光学設計ソフトを用い検討を行ってきた。提案した書き換え可能な小型光メモリシステムを Fig. 12 に示すが, VCSEL アレイ, コリメートレンズ, 2 つのプリズムと記録媒質にフォトリフラクティブ結晶を用いている。光軸に対して垂直に VCSEL アレイ, コリメートレンズを配置し, プリズムを光軸に対称に配置する。また, 2 つのビームの干渉位置に記録媒体としてフォトリフラクティブ結晶を置く。VCSEL のシングルチップからの光

は、コリメートレンズを通り平行光となり、プリズム 1 の頂角  $\alpha_1$  を形成する長さの等しい 2 辺 (エリア A, B) に入射する。それぞれの辺, エリア A, B に入射し屈折した光は、入射したエリア A, B ごとに 2 つのビームに分かれ、光軸方向に向かう。プリズム 1 の底辺を通過し、2 つのビームが交わった後、プリズム 2 の底辺 (エリア C, D) に入射する。2 つのビームはプリズム 2 の頂角  $\alpha_2$  を形成する辺を通過し、再び空气中で交わる。コリメートレンズにより平行光が作られ、プリズム 1 はこの平行光を 2 つに分岐し、プリズム 2 は分岐した 2 つのビームを干渉させる役割を担っている。本システムでは、VCSEL アレイを制御し、1 つずつ VCSEL を点灯させて記録を行う。点灯する VCSEL の位置を変化すると、この VCSEL とレンズの中心を結ぶ線と光軸がなす角が変化し、コリメートレンズによる平行光のプリズム 1 への入射角  $\delta$  が変化する (VCSEL とレンズの中心を結ぶ線と光軸のなす角は  $\delta$  と等しい)。したがって、空気とプリズムの境界面での入射角と屈折角 ( $\theta_1'$ ,  $\theta_1''$ ,  $\theta_2'$ ,  $\theta_2''$ ,  $\theta_3'$ ,  $\theta_3''$ ,  $\theta_4'$ ,  $\theta_4''$ ) がそれぞれ変化し、ビームの干渉位置、干渉する 2 つのビームのなす角  $\beta$  が変化して、空間多重と角度多重の両方の効果により多重記録が実現される。また、使用するプリズムの屈折率の値の変化により書き込み角の調整が可能である。さらに、2 つのプリズムの使用で、プリズムの間に入力画像表示デバイスを置くことが可能となり、プリズムの上下にマウント部を配置すれば、スペースを有効に使うことができる。

#### 4.2. CODE V でのプリズムのモデリング

通常、光学設計ソフトでは、光線の伝播する順番に 1 ずつ光学面を設定するシーケンシャルの光線追跡を行う。我々の提案する光メモリシステムでは、光源からの光が 1 つ目のプリズムの頂角を形成する 2 つの面に入射する (Fig. 13)。そこで、この 2 つの面を 1 つの双曲面としてモデリングを行う。CODE V では、双曲面、放物面、楕円面などの 2 次曲面を扱う場合、コーニック面を設定する<sup>24)</sup>。コーニック面は、次の式で与えられる。

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} \quad (27)$$

ここで、 $c$  は頂点の曲率、 $r^2 = x^2 + y^2$  であり、純粋なコーニック面の場合、 $A=B=C=D=0$  となる。また、コーニック係数  $k$  は、離心率  $e$  を用いて、 $k = -e^2$  と表される。 $k=0$  のとき球、 $k < -1$  のとき双曲面、 $k = -1$  のとき放物面、 $-1 < k < 0$  のとき楕円、 $k > 0$  のとき真のコーニックではない辺縁球となる。

双曲面は、Fig. 14 のように、2 焦点からの距離の差が一定となる点の集合により形成され、次式で表現できる。

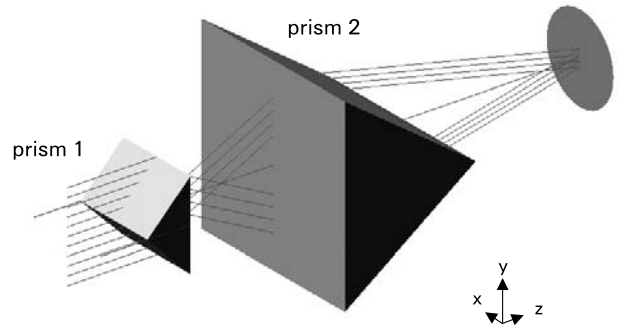


Fig. 13 Modeling of two prisms of using CODE V.

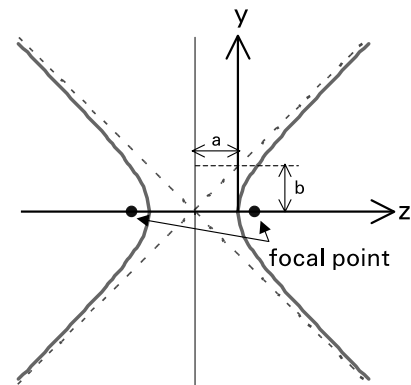


Fig. 14 Hyperbolic curve of prism's surface function.

$$\frac{(z-a)^2}{a^2} - \frac{r^2}{b^2} = 1 \quad (28)$$

頂点の曲率半径は  $R = b^2/a$ 、また、その曲率は  $c = 1/R = a/b^2$  で表される。また、コーニック定数  $k$  は

$$k = -\frac{a^2 + b^2}{a^2} \quad (29)$$

で得られる。

双曲面の中心から焦点までの距離は  $\sqrt{a^2 + b^2}$  となる。双曲面には  $z$  軸に対して  $\pm\theta$  の傾きを持つ線に漸近し、コーニック定数はこの  $\theta$  を用い、

$$k = -(1 + \tan^2 \theta) \quad (30)$$

と表すことができる。

よって、曲率半径をとっても小さな値をとり、 $\theta$  よりコーニック定数を導き入力すれば、円錐が作成できる。また、 $yz$  面にコーニック面を適応する Y トロイダルを定義すれば、2 つの面を 1 つの双曲面として表し、小型光メモリシステムに用いるプリズムをモデリングできる。

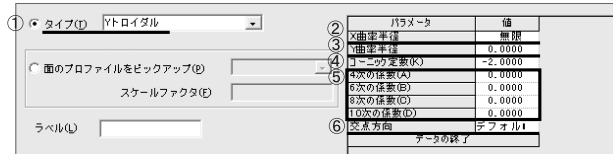
次に、矩形開口のプリズムのモデリング方法を具体的に示す。

1. ツールバーの「レンズ」>「面のタイプ」を選ぶ。
2. タイプの中から、「Yトロイダル」を指定する (Fig. 15 ①)。  
Yトロイダルは、次の式で表現される。

$$z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}} + Ay^4 + By^6 + Cy^8 + Dy^{10} \quad (31)$$

3. xy 面は平面なので、X 曲率半径はデフォルトのまま「無限」とする (Fig. 15 ②)。

レンズ>面のタイプ



レンズデータマネージャ (LDM)

面番号	面名前	面タイプ	Y曲率半径	X曲率半径	面間隔	材質
物体	球	無限	無限	無限	⑦ 無限	⑧
稜り面	Yトロイダル	0.0000	無限	1.0000	BK7_SCHOTT	
像	球	無限	無限	0.0000	BK7_SCHOTT	

面特性

面番号	形状	タイプ	ラベル	Xアパチャー径	Yアパチャー径	X偏心	Y偏心	回転角度	
⑨	OR	形状	タイプ	ラベル	Xアパチャー径	Yアパチャー径	X偏心	Y偏心	回転角度
1	矩形	アパチャー		1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	

Fig. 15 Calculation process of optical rays in two prisms using CODE V.

4. yz 面は双曲面なので、Y 曲率半径に小さな値を入力する (Fig. 15 ③)。
5. 双曲面のコーニック定数を入力する (Fig. 15 ④)。式 (30) に従う。
6. 純粋な双曲面なので、係数 A, B, C, D は全て「0」を入力する (Fig. 15 ⑤)。
7. 交点方向はデフォルトのままとする (Fig. 15 ⑥)。交点方向とは、ローカル軸に対して拡角で入射される光線が面と2回交差する場合の交点選択に関する設定である。詳しくは16)のマニュアルを参考のこと。

双曲面の設定は以上で終わり、次に双曲面以外のプリズムの形状などを指定する。

8. 「レンズデータマネージャ (LDM)」で、双曲面を設定した面の面間隔 (Fig. 15 ⑦) と材質 (Fig. 15 ⑧) を入力する。  
面間隔は、プリズムの頂点から底面までの距離である。
9. ツールバーの「面特性」のアパチャーを選ぶ。
10. 双曲面を設定した面とその次の面を選び、それぞれ形状に「矩形」を選択する (Fig. 15 ⑨)。

以上の操作で、矩形開口のプリズムがモデリングされる。

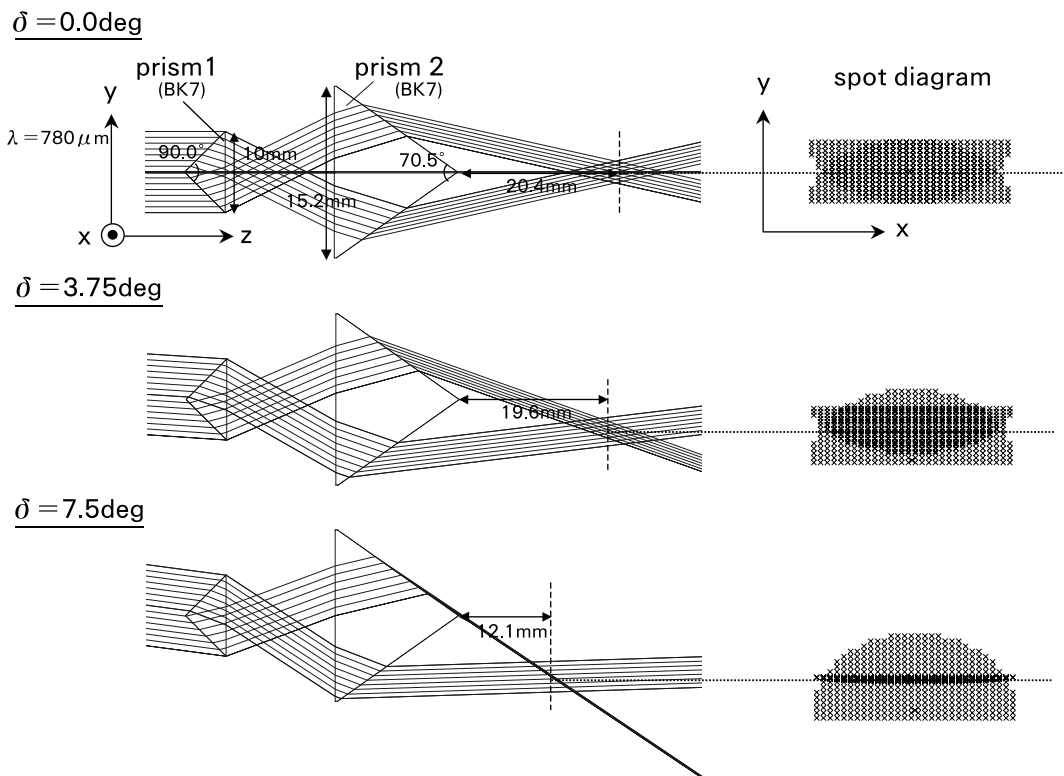


Fig. 16 Diagrams of optical rays and spots diagrams.

### 4.3. 小型光メモリシステム設計の有効性

Fig. 16 に示すように、CODE V により光源からの円形ビームがプリズム 1 により半月状の 2 つのビームに分岐した後、再び重なることをスポットダイヤグラムが示している。また、 $\delta$  の変化にかかわらず、入射平行光はプリズム 1 の底辺全体を照射し、プリズム 1 への入射光の角度が最大の値  $\delta = \delta_{\max} = 7.5^\circ$  のときに、プリズム 1 で分岐した 2 つのビームはプリズム 2 の底辺へ全光線が入射していることが分かる。プリズム 1 の光軸より下のエリアに入射したビームはプリズム 2 の底辺の y 軸の正方向のエリアに進み、分岐した 2 つのビームにより干渉縞の書き込みが実現することができ、設計した小型なシステムはプリズム 1 とプリズム 2 の設計条件を満たしている。また、 $\delta$  の角度変化に依存して干渉の位置と 2 つのビームのなす角の変化が確認できる。従って、光源の VCSEL アレイの点灯位置の変化に伴い  $\delta$  が変化し、空間多重と角度多重の 2 つの効果を生じるので多重記録が可能である。よって、小型光メモリシステムの設計の有効性を確認し、十分実現可能な光多重記録システムであることを見いだした。

### 5. ま と め

光学設計ソフト CODE V で、DOE である Multi-Level Zone Plate (MLZP) と VPH グレーティングを解析のための具体的な操作手順を示し、適応例を挙げた。CODE V ではフレネルレンズをモデリングした後、既存のマクロを用い、MLZP のスカラー理論の回折効率を算出できる。CODE V により算出した MLZP の回折効率算出結果は、実験の結果、および、本研究室で開発した Fresnel-Kirchhoff 回折理論を用いた数値計算と良い一致が得られ、CODE V が有効であることを確認した。また、HOE の光線追跡理論を示し、CODE V の実光線追跡により、VPH グレーティングにブラック条件の入射角度で光を入射させると、0 次光は直進し、+1 次光は記録波長  $\lambda$  が再生波長  $\lambda'$  と等しい場合の物体光の方向に再生される事が確かめられた。さらに、CODE V は、VPH グレーティングの回折効率の算出に有効な Kogelnik の理論に基づき回折効率を算出できる。CODE V により算出した VPH グレーティングの回折効率の値は、実験結果とよく一致し、CODE V が数値計算に十分適応可能であることを確認した。また、ホログラフィックメモリを用いた VCSEL アレイと 2 つのプリズムを用いた小型光メモリシステムを実現する 2 光束干渉計を提案し、プリズムのモデリングのためのテクニックを示すとともに、CODE V により計算された光路図やスポット

ダイヤグラムから設計の有効性を確認した。CODE V は、DOE の設計・作製および性能評価に大変有効であることを示した。

### 参 考 文 献

- 1) 「光技術研究の最前線」編集委員会 編：光科学研究の最前線 強光子場科学研究懇談会 東京 (2005).
- 2) 小館香椎子, 駒井友紀: NEW GLASS **19** 73-82 (2004).
- 3) 小館香椎子: 「スカラー回折理論とシステム技術への展開」(招待講演) 日本光学会 (応用物理学会) 主催 29回冬期講習会 回折光学素子の設計・作製技術 (2003).
- 4) 中山朋子, 小館香椎子: 日本女子大学紀要 理学部 **14** 81-94 (2006).
- 5) 小館香椎子: 日本女子大学紀要 理学部 **10** 7-24 (2002).
- 6) Irisawa, M., Kashiwagi, M. and Kodate, K.: ICO Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics 2006 (2006).
- 7) Y. Komai, H. Nagano, K. Okamoto and K. Kodate: *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 6742-6749 (2006).
- 8) Komai, Y., Wada, N., Moritsuka, F. and Kodate, K.: *Proc. of SPIE* **6025** 204-210 (2006).
- 9) Nagayoshi, M., Oka, K., Klaus, W., Komai, Y. and Kodate, K.: *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 6670-6677 (2006).
- 10) 小館香椎子: レーザ加工学会誌 **12** 233-239 (2005).
- 11) Orihara, Y., Klaus, W., Fujino, M. and Kodate, K.: *Appl. Opt.* **40** 5877-5885 (2001).
- 12) Komai, Y., Kodate, K. and Kamiya, T.: *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** 4831-4834 (2002).
- 13) Kodate, K., Watanabe, E. and Inaba, R.: *Proc. SPIE* **4455** 42-50 (2001).
- 14) (社) 応用物理学会, 日本光学会 光設計研究グループ監修: 光学素子入門 増補改訂版 オプトロニクス社 東京 (2006).
- 15) Kress, B. and Meyrueis, P.: デジタル回折光学 第 1 版 (小館香椎子 監訳, 藤野 誠, 駒井友紀 訳) 丸善株式会社 東京 (2005).
- 16) CODE V リファレンスマニュアル CODE V バージョン 9.6 日本語版 サイバネットシステム株式会社 東京 (2005).
- 17) 大前瑞紀, 中山朋子, 駒井友紀, 小館香椎子: 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会 第11回講演論文集 85 (2006).
- 18) 小館香椎子, 岡 恵子, 海老塚 昇: 光学 **32** 483-485 (2003).
- 19) Kogelnik, H.: *Bell Sys. Tech. J.* **48** 2909-2947 (1969).
- 20) 辻内順平: ホログラフィー 裳華房 東京 (1997).
- 21) 小山次郎: 光波電子工学 コロナ社 東京 (1978).
- 22) Nakayama, T., Shimizu, K., Okazaki, Y., Watanabe, E., Kodate, K., Takayama, Y. and Aruga, T.: *Proc. of SPIE* **5290** 212-220 (2004).
- 23) 中山朋子, 小館香椎子: 日本女子大学理学部紀要 **13** 19-27 (2005).
- 24) CODE V 入門ガイド CODE V 9.5 日本語版 サイバネットシステム株式会社 東京 (2004).
- 25) 中山朋子, 小館香椎子: ORA CODE V セミナー 2006 174-189 (2006).

# Analysis of Diffractive Optical Elements by CODE V and Further Applications

Tomoko Nakayama, Yuki Komai and Kashiko Kodate

Department of Mathematical and Physical Science, Faculty of Science, Japan Women's University

(Received January 23, 2007)

**Abstract:** In order to realize so-called “ubiquitous society” where information technology can be accessed and used by anyone anywhere, processing large quantity of information at high speed and in parallel are necessary. In general, the control of information using optics requires optical devices that provide the functions of wave plane control, amplitude control, polarization of light and wavelength conversion. As optical technology can meet these requirements, much attention has been paid to diffractive optical elements (DOEs) and their features.

DOEs provide flexibility in designing a compact and light-weighted system and can also easily be integrated with other devices.

Over four decades, our team in the laboratory has been engaged with DOEs, from theory-testing, design, fabrication, experiments, evaluations to applications. Recent years has seen developments of applications such as a high-dispersion optical elements for astronomical (observation) and an optical spectrum synthesizer for photonic network

History of optical instruments demonstrates that computers have made huge contributions to their developments. Although early software for optical instruments were limited to analysis based on geometrical beam tracing, recent software is equipped with auto-optimization function and became indispensable for those in the field. Furthermore, sophisticated software comprises a number of macro-functions such as beam-tracing, image analysis, auto-optimization, diffractive efficiency calculation based on Scalar theory or Kogelnik theory, which is conducive to design, fabrication and performance assessment of DOEs.

In this paper, high-performing and highly efficient CODE V was selected among the available software to analyze Multi-level Zone Plate (MLZP) and Volume Phase Holographic (VPH) grating. MLZP is a phase-type diffractive grating and has the same function of separation · focusing as refractive lens, while VPH grating is a Holographic Optical Element (HOE) and can achieve high efficiency by periodic structure.

Moreover, we have proposed two-beam interferometer using two prisms and VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) as a method to create a holographic memory which can read out large quantity of information at high speed. Using CODE V, the technique of modeling was established and the validity of this method was confirmed. This paper also reports the results.

**Key words:** diffractive optical element (DOE), optical design software, CODE V, ray-tracing, multi-level zone plate (MLZP), holographic optical element, VPH grating, holographic memory, prism

