

# 光学設計と方向性光検出器への応用

中山 朋子, 小舘 香椎子  
日本女子大学理学部数物科学科

(2006年2月7日受理)

**要 旨** 使用頻度が高い光学機器である望遠鏡や顕微鏡を対象として始められた光学設計は、ナノ領域までの微細構造作製技術の向上、新材料の開発、機器の小型化などに伴い、一体化・集積化が進むとともに、複合機能を持つ光学素子への要求が高まり、高性能化が進んでいる。我々のグループでは、回折型の微細光学素子の黎明期から基礎理論の検討を加え、設計・作製・評価を行い、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、色分離用フィルタなどの実用可能なデバイスを提案している。

一方、コンピュータを利用した光学設計ソフトは、コンピュータツールが使われ始めた1950年後半から1960年初頭にかけて、大きな進展を遂げている。初期に開発されたソフトウェアは、幾何学的な光線追跡により、光学デバイス通過後の光線の振る舞いを観察面でスポットダイアグラムなどで表現することで、実行可能な解析も限られていた。しかし、その後DSL法(Damped Least Squares Method: 減衰最小自乗法)を利用した自動最適化機能を持つソフトウェアが開発され、現在ではこれらのソフトウェアは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。レンズなどによる収差が最小になる構成データを見つける光学設計は、その要求仕様から逆に曲率半径、面間隔、ガラスの屈折率、分散率などの光学系の部分や全体の構成データの数値の解を求める「逆解析」は難しく、パラメータを少しずつ変化させて、その影響を丹念に調べ上げ、収差論的考察や設計者の経験的判断も加えながら、性能の改善を予想し次の新しい構成データを組み上げることになる。さらに、新構成データを用いた光線追跡を行い、収差を計算し、性能の改善を判断する「試行錯誤」の繰り返しである。この試行錯誤の作業をコンピュータに処理させ、設計パラメータの最適化を行う。

本論文では、まず光学設計ソフトによる光学設計の特徴と最適化について述べる。また、代表的な市販の光学設計ソフトを紹介し、さらにそれらを用いたトリプレットレンズの最適化の例と、検討を行ったVCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) 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光束干渉系への適用を示す。最先端技術であるMEMS (Micro Electro-Mechanical Systems, 微小電気機械システム) を用いたマイクロオリガミと名付けられた方向性光検出器への入射光の検出角度の範囲について、光学設計ソフトの照明解析の機能を用いて検討した結果について述べる。

**キーワード:** 光学設計, 光学設計ソフト, 光線追跡, 最適化, MEMS, マイクロオリガミ, 方向性光検出器

## 1. はじめに

複数のレンズの組み合わせで遠くの物体を拡大する望遠鏡が発明され、夜空の星をより詳しく観察したいという天文学者の要求とあいまって、様々な工夫が試みられ、天体望遠鏡が発展した。ミクロの世界でも、微細な物を観察したい要求から複数のレンズの組み合わせにより顕微鏡が発明された。また、銀塩写真法が発明されると、

結像用にレンズが使用され写真レンズとして発展してきた。このようなレンズの応用分野の進展とともに、レンズの性能向上をめざすレンズの設計が、光学設計法として発展してきた。

このような従来からの光学機器に加え、ユビキタス社会の到来とともに、各種ビデオカメラ用レンズ、液晶プロジェクタ、ICパターンを焼き付けるための縮小露光投影機、光磁気ディスクのピックアップ光学系や各種のOA機器の複写機やファクシミリなどの画像用光学部品にも用途が広がり、光通信分野でも効率の良い機能デバ

Contribution No.: MP 05-5

イスとしての重要性も増している。さらに、作製技術の向上、新材料の開発、機器の小型化に伴い複合機能を持つ光学素子の要求が高まり、高性能化が進んできている現在、光学設計の必要性が高まっている。

光学設計は、基本的には、レンズ系の要素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レンズ系に変更を加え、最適な条件を求める工程を取っている。したがって、光学設計は試行錯誤的な正確さを本質とする作業である。近年、光学設計ソフトにより、MTF (Modulated Transfer Function) などの精密な評価と試行錯誤の作業を、コンピュータによって処理する最適化の技術が確立され、利用分野の拡大により光学設計プログラムが商業ベースで開発され、高額ではあるが企業を中心に利用可能となりユーザも増えている。コンピュータは社会のあり方を変えるという大きな変化をもたらしているが、光学設計技術もまた、膨大な計算量を必要とする技術であるために、コンピュータ技術の進展により高性能化をとげている。それにより、設計経験の浅い人でもレンズ設計が十分可能な状況が生まれてきた。

我々のグループでは、回折型の微細光学素子の黎明期から基礎理論の検討を加え、設計・作製・評価を行い、多くの成果を残してきている<sup>2)</sup>。現在は、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ミュレータ、色分離用フィルタなどの実用可能なデバイスを提案し、独自に開発したシミュレーションソフトウェアを用いて設計・評価を行っている<sup>3-5)</sup>。

本論文は、光学設計の中でも、基礎的な光線追跡を取り上げ、市販の設計ソフトを適用した、VCSEL アレイを用いた小型で簡便なホログラフィック光メモリの光学系の最適設計、および光 MEMS デバイスである方向性

光検出器の入射光の検出角度範囲に関する検討について述べる。

第2章では光学シミュレーションの代表的な3つの手法、光線追跡、スカラー解析、電磁波解析の特徴を述べ、比較を行う。第3章では光学設計の特徴と光学設計ソフトの使用手順について述べる。また、コンピュータによる光学設計に欠かせない最適化機能に用いられる DSL 法とグローバル最適化に向けた動向について述べ、代表的な市販光学設計ソフトを紹介する。また、第4章では光学設計ソフトを適用した具体的な解析例を示す。次に、第5章では光学設計ソフトの照明解析機能の方向性光検出器への適用について述べ、最後に、第6章でまとめる。

## 2. 光学シミュレーション<sup>6)</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に、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、Table 1 に示すように、幾何光学、波動光学、電磁波光学の3つの理論を基礎としたものとして分類することができる。

幾何光学に基づく光線追跡は、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。この手法は回折型と屈折型の光デバイスを用いたハイブリッド光学系にも有効である。

実際に光は波長の極めて短い電磁波であり、その振る舞いはマックスウェルの方程式により記述される。しかし、この方程式は等方性媒質で電荷が存在しない、誘電

Table 1 Classification of design and analytical approach for optical elements<sup>6)</sup>.

項目 \ 解析手法		光線追跡	スカラー解析	電磁波解析
理 論		幾何光学	波動光学	電磁波光学
入 力 パラメータ	光 源	形状、拡がり角、 任意の強度分布、 入射角度、位置	光線追跡に加え、 波長	スカラー解析に加え、 偏光状態
	素 子	面形状、素子径、 観察距離、屈折率	光線追跡に加え、 振幅分布、位相分布	スカラー解析に加え、 屈折率分布、回折次数
出力パラメータ		光線の軌跡、 スポットダイヤグラム、 収差曲線	位相・振幅分布、 強度分布、 回折効率、 結像スポット径	位相・振幅分布、 強度分布、偏光分布、 各次数の回折効率、 結像スポット径、 エバネッセント波の振る舞い
適 応 格子周期		全 領 域	入射波長 $\lambda$ と格子周期 $\Lambda > 10\lambda$	全 領 域
具 体 例		市販ソフト	Fresnel-Kirchhoff 積分、 平面波展開	微分法、積分法、 有限差分時間領域法など

率・透磁率が場所の関数でないという仮定の下では、光の波をスカラー量として取り扱うことができる。この考えに基づいているのがスカラー回折理論であり、光波の干渉・回折現象に適応可能で、入射光の波長より十分大きな構造の通常の回折光学素子や光ファイバの設計にはこの手法で十分である。この手法を用いると、周期回折光学素子に平面波を入射した例のように、フレネル領域における観察面からの距離の差によって形成される振幅分布と位相分布などを算出することができる。

しかし、周期構造が入射光の10波長以下になると、スカラー解析理論では、その特性を正確に表現することができなくなり、電場、磁場がベクトル場であることに留意した電磁波光学を基とするベクトル回折理論により解析することになる。したがって、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。

### 3. 光学設計ソフト

設計には機械設計、電子回路設計、意匠設計、建築土木設計、光学設計などがあるが、一般的に設計とは「個々の部分の機能の集まりが、全体としてうまくその機能を働かせるように構成すること」である。そのために、全体の機能が効率よく発揮できるように、部分の機能設計をそれぞれ詰めて、最後に全体のバランスの調整を行う。その中で光学設計は、個々の部分の機能が分離できず、構成要素が互いに関連し合っただけで全体として一つの機能を発揮するシステムを作り上げることである。従って、個々の部分機能の構成は常に他の構成要素との関連により決定される。つまり、部分の小さな変更でも光学系全体に影響を与えるので、設計に大きな変更が生じる。また、収差が最小になる構成データを見つける光学設計は、要求仕様から逆に解を求める「逆解析」は難しく、曲率半径、面間隔、ガラスの屈折率、分散率などの光学系の全体や部分を構成する構成データの数値を少しずつ変化させて、収差論的考察や設計者の経験的判断も加えながら、性能の改善が予想される、次の新しい構成データを組み上げることになる。そして、新構成データで、再び光線追跡を行い、収差を計算し、性能が改善されたかどうか確認する「試行錯誤」の連続である<sup>1)</sup>。このような繰り返しの作業を、コンピュータによる処理としたのが、光学設計ソフトによる最適化の技術である。また、設計法の他に、性能評価も重要な技術であり、いろいろの基本的な性能評価はもちろんのこと、現在では製造誤差までも含めた性能評価シミュレーション等の評価技術も実用化してきている。これによって、従来は試作を繰り返してきたレンズ開発も大幅に省略化できるようになってきている<sup>2)</sup>。

今回は、大型のホストコンピュータと自社開発の設計ソフトを持つカメラメーカーやレンズメーカーに限られていた光学設計を、安価で高性能なハードウェアの普及とともに、多くのメーカーや研究機関でも日常的に行われることを可能にした、光線追跡がベースの市販の光学設計ソフトによる光学設計について述べる。

#### 3.1 光学設計ソフトによる光学設計の手順<sup>1, 7-16)</sup>

光学設計ソフトを使った光学設計の一般的な手順をFig. 1に示す。設計に際しては、有効焦点距離、画角、Fナンバー、波長領域など、近軸緒量と大きさと重量の制約、公称と製造後に求められる性能指標（製造と組み立て公差を含む実際の光学システムの性能）、その他の最終的な設計システムに与える制約や問題を、最初に設計仕様として決める。

次に光学設計者は光学設計ソフトのサンプルレンズやパテントレンズ、あるいは、市販のデータベースなどから、仕様に対して近いと思われるデータを選ぶ。この過程では、これまでの経験やノウハウが役に立つことが多い。基データが決まると、そのデータの持っている基礎能力を調べることで、その基データの選択が正しいかどうかを判断する。

その後、最適化を行う。最適化とは、曲率半径や面間隔などの構成データの数値を少しずつ変化させて、その影響を調べ、性能の改善が予想される次の新しい構成データをくみ上げ、光線追跡を行い、収差の改善について確認する、このような計算による試行錯誤を十数回、何百回も繰り返しながら、少しでも優れた構成データを見出そうとする収差補正のルーチンの自動化であり、自動設計とも呼ばれる。光学設計ソフトによる最適化では、変数に指定可能なパラメータを定義し、性能を上げるために適切な評価関数と設計仕様を基にした制約条件を指定することが必要である。

従来の市販光学設計ソフトでは、出発点の直近の極小解に向かうローカル最適化しか行えず、より良い別解があっても、単独では自動的に探すことができなかった。しかし、最近の光学設計ソフトでは、複数の新しいレンズタイプをリストアップすることができ、その中からユーザが選択するグローバル最適化の補助的役割を果たしている。はじめにグローバル最適化を行い、その後、ローカル最適化を重ね、最終的なパラメータでグローバル最適化を行い、より良いレンズ形状を見つければその最終設計解がベストな解であると確認するなど、グローバル最適化とローカル最適化をうまく利用し設計を進めていく。

次に、設計データの詳細な解析・評価を行う。レンズの製造誤差が性能に与える影響を評価すること、または

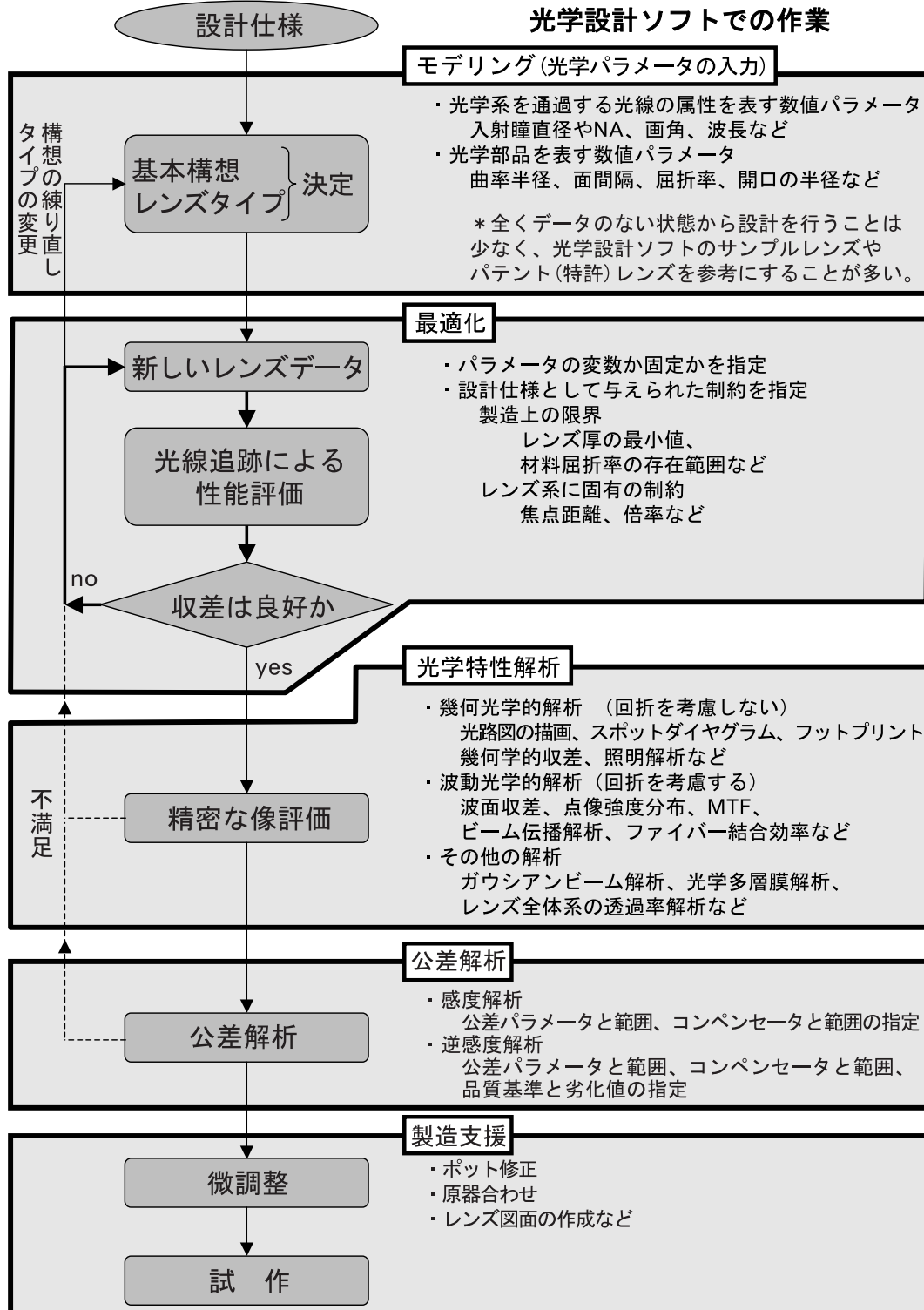


Fig. 1 Flow chart of optical design.

製造にあたって許容される製造誤差の大きさを決定する公差解析を行う。製造や組み立ての際における誤差の蓄積やエラーを組み立ての際に調整できないか検討することもできる。組み立ての際の調節はコンペンセータと呼

ばれ、一般的なものは焦点シフトやその他の空気間隔の調整である。コンペンセータがどの程度の範囲であれば、全体の性能劣化をどのくらい抑えることができるかも検討できる。この検討のためには、素子のマウント方法に



も精通する必要がある。

光学設計は繰り返しの作業で、どうしても良い結果が得られなければ、さらに前のステップに戻り、基データの評価や、レンズタイプの選択の見直しを行うことになる。設計者がレンズを追加したり、非球面を使用など、変数の追加をしたり、コンストレインツを緩和して設計の自由度をあげることでモデルを変更していく。この大きなサイクルの繰り返しを、何回か行って最良の解を見いだす。

その後、最終的な微調整をする。設計値で使われるガラスの恒数値に対して、その実際の値に設計値を合わせるため、少々の変更を行う。これは、ポット修正と呼ばれる。レンズ研磨の精度検査に用いられるニュートン原器の値は、飛び飛びに作られており、設計値をその原器の値の中で一番近い値に変更して研磨することになり、設計値の変更を原器合わせと呼ばれる。

以上の全ての面で満足されれば、試作となる。

### 3.2 光学設計の最適化<sup>8)</sup>

従来は、光線追跡を行って収差を調べ、次にレンズ系を構成する個々のパラメータ（例えば曲率半径、面間隔、ガラス材料の屈折率や分散等）の値を変化し、収差について検討する。設計者はこの作業を繰り返し行うことにより、どのパラメータがどういう働きをするかを経験的に身に付け、レンズのタイプそのものへの理解を深めることができる。一方、この繰り返しの作業をコンピュータで処理するのが最適化であり、設計の流れを整理し、数学的なモデルに置き換えておくことが必要になる。基本的原理として、最も広く用いられているのは DSL 法である。

レンズを構成する  $n$  個の変数（曲率半径、面間隔、屈折率など）を  $x_j$  ( $j=1 \sim n$ :  $n$  は整数) とし、コントロールの対象となる  $m$  個の収差等（寸法条件も含む）を  $f_i$  ( $i=1 \sim m$ :  $m$  は整数) とすると、 $x_i$  の関数となるので、次式で表せる。

$$f_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

評価関数  $f_i$  は収差等の絶対値でなく、目標値からの偏差を表すものとする。各  $f_i$  をできるだけ小さくすることが設計目的に一致する。通常  $m > n$  であるので、 $m$  個の収差を同時に小さくする手段として、単一の評価量であるメリット関数

$$\phi = \sum_{i=1}^m (\omega_i f_i)^2 \quad (2)$$

を定め、これを最小にする解  $\mathbf{x}$  ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) を求め、最適化する。ウェイト  $\omega_i$  は各収差の重要度に応じて与えられる。

各  $f_i$  式は、 $n$  個の変数  $x_j$  の複雑な関数なので、 $\phi$  を極小にする解を一気に求めることは不可能で、逐次接近法で解を求める。

そこで、任意の出発点  $\mathbf{x}_0$  ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) の近傍について、 $f$  を  $\mathbf{x}$  の変化量  $\Delta \mathbf{x}$  の一次式で近似すると、行列表示を使って、

$$f = f_0 + A_0 \Delta \mathbf{x} \quad (3)$$

と表される。ただし、

$$A_0 = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}, & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}, & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}, & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1}, & \dots & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\Delta \mathbf{x} = \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$f = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix} \quad (6)$$

はじめの構成データでの評価関数の微分係数を求めることから、その近傍では各収差  $f_i$  を各構成要素  $x_j$  の一次関数として近似できる。 $\phi$  は  $x_1 \cdots x_n$  の 2 次関数として近似され、評価関数の極小点が一応求まる

DSL 法は、単なる最小自乗法と異なり、上述のように線形近似の範囲外に解がはみ出ることを防ぐため、 $\phi$  の極小点を狙うかわりに、 $|\Delta \mathbf{x}|$  を組み入れた  $\varphi$  の極小点を見つける。

$$\varphi = \sum_{i=1}^m (\omega_i f_i)^2 + \rho \sum_{j=1}^n (\Delta x_j)^2 \quad (7)$$

$\varphi$  の極小点を見つけるために、 $n$  個の連立方程式（正規方程式） $\frac{\partial \varphi}{\partial x_j} = 0$  ( $j=1 \sim n$ ) を解くと、 $\mathbf{x}_0$  からの変化量  $\Delta \mathbf{x}$  が求まる。

$$\Delta \mathbf{x} = -(A_0^T A_0 + \rho I)^{-1} A_0^T f_0 \quad (8)$$

すなわち、ダンピング・ファクター  $\rho$  の値が適当であれば、収差が改良された次の地点（レンズの構成データ） $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \Delta \mathbf{x}$  が求まるので、 $\rho$  を変えながらこれを繰り返すことで、与えられた目標値に近い収差補正が達成さ

れていく。

ここで、 $A_0^T$  は  $A_0$  の転置行列、 $I$  は単位行列、 $( )^{-1}$  は逆行列を表す。

数値解法としての DSL 法は、K. Levenberg によって、すでに 1944 年に提示されているが、これをレンズの自動設計に最初に応用したのは、C.G. Wynne である (1959 年)。

しかし、DLS 法はローカル最適化といい、基本的に、出発点の近傍にある極小点に落ち込むと、出発データや最適条件を変えない限りそこから抜け出せないという欠点を有している。そこで近年、より大域的な意味で最適解を見出そうとする様々な試みがなされている。

その代表的なものの 1 つは、エスケープ関数によるものである。この方法は、DSL 法でメリット関数の極小点に落ち込んだ場合、その窪みだけを埋めてしまうような関数をメリット関数に付け加えて逃がし、新たな極小値の検索に進ませる方法で、単純ではあるが DSL 法の大域化ともいえ、従来のアルゴリズムとも親和性のよい手法といえる<sup>9)</sup>。光学設計ソフト「OSLO」は、エスケープ関数法を商用ソフトとして初めて実用化した。光学設計者が出発点を決定すると、必ず最小解を探索できるとは限らないが、複数の新しいレンズタイプがリストアップされ、その中から、目的に合ったものを選択する。

さらに全く異なる見地からグローバル最適化を実現しようとするものに、遺伝的アルゴリズムの応用がある。この方法は、もともと生物の進化をモデル化したもので、ある世代を形成する個体（ここではレンズ）の集合の中で環境への適応度（評価値）の高い個体を増殖（「再生」）させたり、複数の個体を「交叉」により、親の特性を受け継いだ子を作ったり、「突然変異」によって親の世代にない多様性を導入したりして、次の世代の個体群を形成し、これを何世代かにわたって繰り返す。この方法は、微分的演算を含まず、変数の連続性を問わない点や、複数の個体の集合としての最適化をはかる点、確率的な要素を含み多様性のある程度考慮に入れながら最適化を行

う点で特徴を持ち、大域的な検索や目的検索に優れているとされており、研究が進んでいる<sup>9)</sup>。

その他にも、独自のアルゴリズムを開発し、光学設計者がスタートのデザインを与え、新しいレンズタイプを探し出し、グローバル最適化の実現の補助的役割を果たす「CODE V」などの市販ソフトもある。新しい方法と従来の最適化手法との融合が進み、レンズ構成に予備知識がない場合の初期データ作成に有効性が発揮されつつある。

### 3.3 代表的な市販光学設計ソフト

レンズを設計する手法も古くから研究、開発されてきたが、高速・高性能のパソコンが廉価に使用できるようになり、かつては光学メーカーの門外不出の秘伝と言われてきたレンズ設計ソフトも市販されるようになった。その中でも代表的な市販光学設計ソフトと開発元、特徴を Table 2 に示す<sup>17)</sup>。

多くの光学設計ソフトは、マクロ機能を備えており、必要に応じてカスタマイズすることが可能である。ビルトインされていない特別な計算やグラフィックス表示が可能で、柔軟性を与え、機能強化を行うことができる。例えば、面形状や GRIN 分布あるいは回折面などで、プログラムに内蔵されていないものがあれば、それをマクロ言語を用いユーザ定義できる。また、最適化や公差解析において評価関数を構成する成分要素を追加定義することもできる。光学設計ソフトは、多くのサンプルマクロを持っており、機能拡張を果たすと同時に、ユーザが改良したり、例として参考にすることができる<sup>18)</sup>。

### 4. 光学設計ソフトを用いた解析例

Fig. 1 のように、回折を考慮しない幾何光学的解析では、光路図の描画、スポットダイヤグラム、フットプリント、幾何学的収差、照明解析などを行うことができる。また、回折を考慮する波動光学的解析として波面収差、点像強度分布 (Point Spread Function)、MTF、ビーム

Table 2 Representative optical design software and these characteristics.

ソフト名 (開発元)	特 徴
CODE V (Optical Research Associates)	機能と共にユーザーインターフェースも優れ、日本語版があり、初心者にも使いやすい強力な光学設計・解析・評価総合プログラム。
ZEMAX (ZEMAX Development Corporation)	高機能・低価格の先鞭をつけた定評と実績ある光学設計ソフト。株式会社レンズ屋のホームページ ( <a href="http://www.lensya.co.jp/">http://www.lensya.co.jp/</a> ) の“光学サロン”では、ZEMAX のユーザーを中心に、活発な意見が交わされている。
OSLO (Lambda Research Corporation)	光学設計と解析のための総合ソフト。機能を制限した OSLO EDU が、国内代理店 チャート株式会社のホームページ ( <a href="http://www.chartinc.co.jp/">http://www.chartinc.co.jp/</a> ) から、フリーでダウンロード可能。

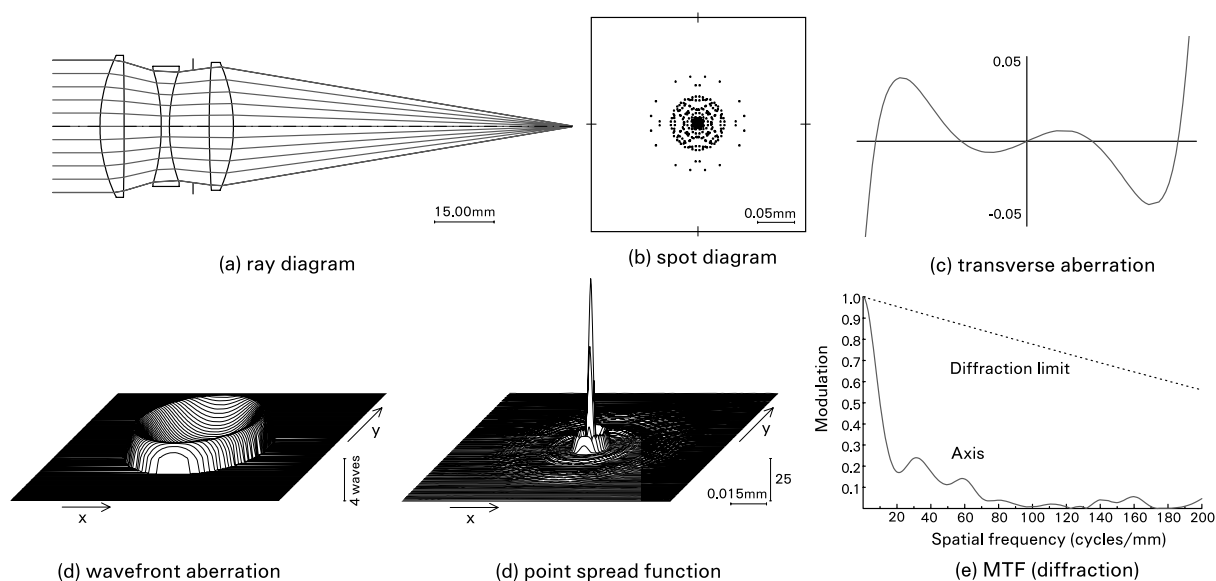
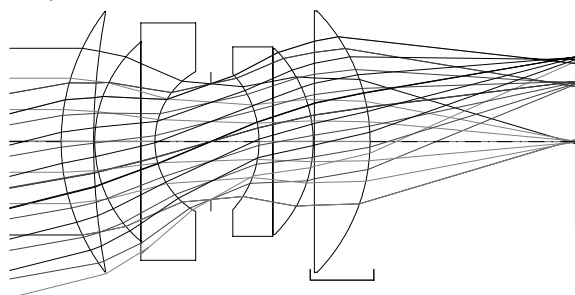


Fig. 2 Analysis examples of triplet lens by optical design software [CODE V].

before optimization



after optimization

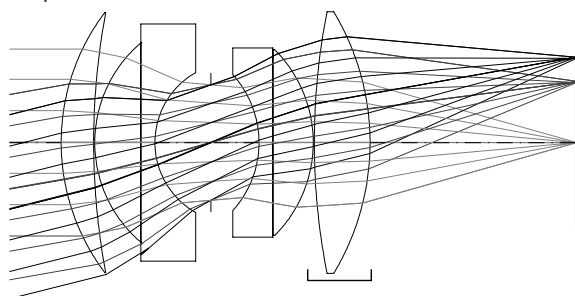


Fig. 3 Optimization of triplet by optical design software [CODE V].

伝播解析, ファイバ結合効率など, その他の解析としてガウシアンビーム解析, 光学多層膜解析, レンズ全体系の透過率解析などへの適用が挙げられる。今回使用した光学設計ソフトは光線追跡を基本としているが, 波動光学的評価や回折光学素子への適用も, 等位相面の考え方を導入し, 光線追跡から波面を生み出して解析を行うこ

とが可能だ<sup>19)</sup>。Fig. 2に光学設計ソフト「CODE V」によるトリプレットレンズの解析例を示す。Fig. 3は, 異なる3つの画角を持つ平行光を入射させ, 一番最後に光が入射されるレンズの両面の曲率半径を変数とし, 最適化を行った光路図である。最適化前は像面で収差が生じているが, 最適化後, レンズの曲率半径が変わり, 収差が改善されていることが確認できる。

さらに, 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「OSLO」を用い検討を行ってきた<sup>20, 21)</sup>。提案した書き換え可能な小型光メモリシステムをFig. 4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

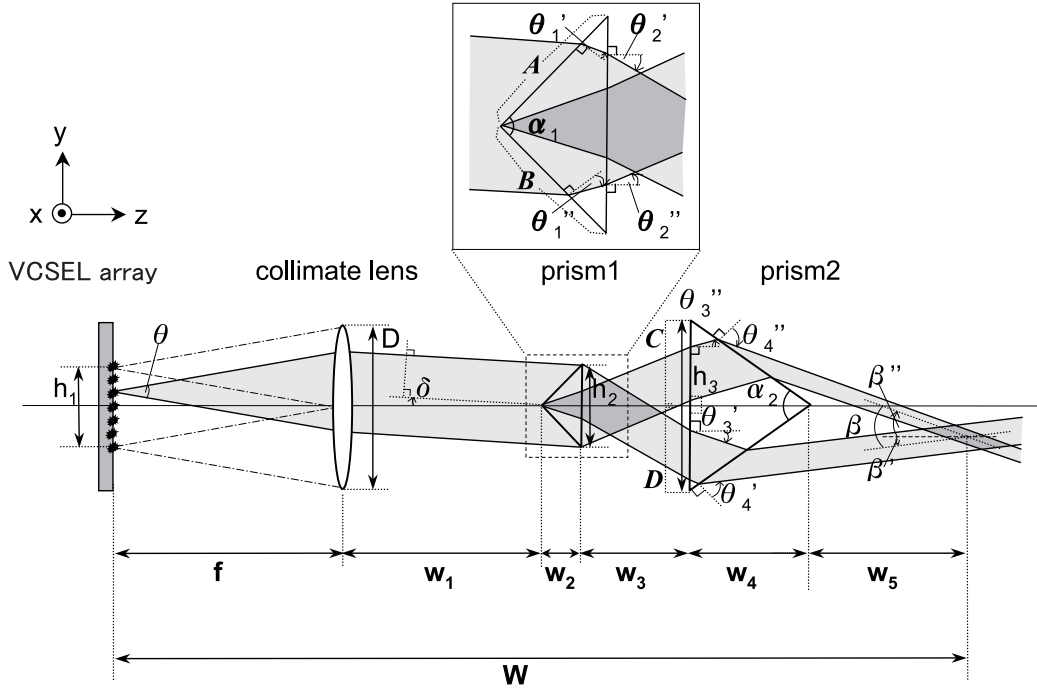


Fig. 4 Two waves interferometer combined array light source and two prisms.

$\theta$ : 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

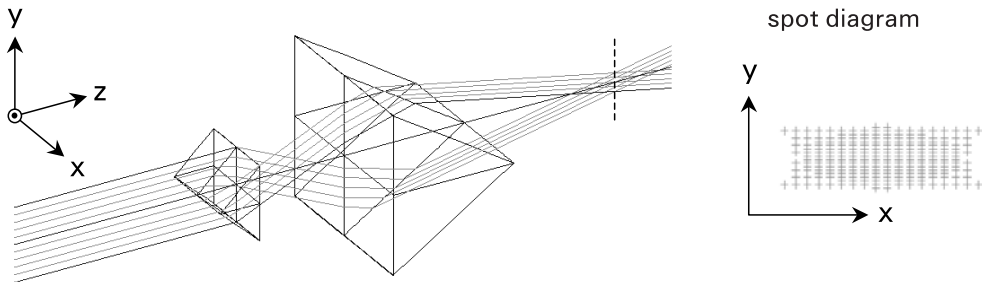


Fig. 5 Two waves interferometer of compact optical memory system using VCSEL array and two prisms [OSLO].

( $\lambda = 780\text{nm}$ ,  $\theta = 15.0\text{degrees}$ ,  $f = 10.0\text{mm}$ ,  $n = 1.51$  (BK7),  $h_2 = 10.0\text{mm}$ ,  $\delta_{\max} = 10.0\text{degrees}$ ,  $\alpha_1 = 120.0\text{degrees}$ ,  $\alpha_2 = 90.0\text{degrees}$ )

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)。従って、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。Fig. 5 に示すように、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アグラム



が示しており、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. 方向性光検出器への応用

### 5.1 MEMS<sup>22)</sup>

フォトリソグラフィーを基本にしてある程度立体的に加工する「マイクロマシンニング」技術を用いると、シリコン基板上などに、回路やセンサ、アクチュエータあるいは構造体など、小さな機械構造や稼働の機械を形成することができる。これによって MEMS と呼ばれる小型で機械・電子・光・化学などの多様な機能を集積化した微細デバイスが作製され、広い分野に用いられ急速に発展している。レーザや光に関連した MEMS は光 MEMS や MOEMS (Micro Opt Electro-Mechanical System) と呼ばれている。ディスプレイや光通信、光計測など、光に関係するシステムでは、その鍵を握る重要な働きをしている。

MEMS デバイスは同じ要素を平面的に多数配列し、駆動回路を集積化して各要素を動かすことができる。その代表的な製品はテキサスインスツルメンツ社 (アメリカ) で開発された DMD (Digital Micro mirror Device) で、これはチップ上の多数の鏡が静電気力で動くもので、ビデオプロジェクタをはじめ超高速な光スイッチング素子などとして用いられている。また、フォトリソグラフィー技術で同一基板上に光学デバイスを一体化し、光集積化技術を用いた MEMS は、光軸合わせなどの調整が不要になり小型化が可能で、多方面で使用が期待されている。

### 5.2 方向性光検出器

MEMS の中心技術は微細加工であり、最先端の半導体微細加工技術が先導的な役割を果たしている。電子ビーム露光、収束イオンビーム加工やリアクティブイオンエッチングなど、高度なプロセス技術を駆使することにより、最近ではナノ領域超微細加工も可能となり MEMS ではなく NEMS (Nano Electro-Mechanical Systems) デバイスという言葉も現実味を帯びてきた。プロセス装置の性能にものを言わせる、いわば力ずくの微細加工に対して、材料自体の性能を積極的に利用して自己組織的あるいは自動的に微細構造を作製する方法も、重要なアプローチである<sup>23)</sup>。国際電気通信基礎研究所 (ATR) のグループは、エピタキシャル成長した 2 層の半導体薄膜の格子定数不整合歪みによる内部応力を巧みに利用して、半導体薄膜を折り紙のように折り曲げて微細立体構造を自動的に作製する方法「マイクロオリガミ」を提案し、自立型マイクロミラーやレトロリフレクタ、マイクロステージなどの試作を行っている<sup>23-27)</sup>。マイクロオリガミは半導体ばかりではなく、原理的には格子定数不整合による

歪みを有するエピタキシャル成長可能な他の材料系にも適応可能な技術である。また、加工限界もサブミクロンからナノ領域までの微細化の可能性が見込まれ、NEMS デバイス作製への応用が期待されている。

マイクロオリガミを利用した自立型マイクロミラーは多層膜を成膜後、フォトリソグラフィーとウェットエッチングにより、(b) 蝶番部の形成、(c) コンポーネントであるミラー部の形成を行った後、(d) 犠牲層のみを選択エッチングすることにより、歪み層より上の多層膜を基板の拘束から開放する結果、(e) 蝶番部が歪みの応力で曲がり、ミラーが起き上がる。起き上がる角度  $\theta$  は、蝶番部の曲率半径  $R$  と長さ  $L$  ので、 $\theta = L/R$  のように決まるため、 $L$  の値で所望の  $\theta$  を得ることができる<sup>24)</sup>。

このマイクロオリガミを用いた光の入射角を正確に検出することができる方向性光検出器、および入射光を任意の方向に偏向することができる可動型コーナーキューブ・リフレクタの 2 つの素子を組み合わせたデバイスにより、アクセスポイントを介さずに機器同士が直接通信を行う光無線通信「アドホック通信」を行う事が可能となる。すなわち、ある方向からの光ビームを受信し、方向性光検出器により、入射光の入射角度を正確に検出する。その後、可動型コーナーキューブ・リフレクタの壁の角度を変えることにより、あらかじめ定めた別の機器にその光ビームを偏向し、データをやり取りする。光無線通信におけるデータを受信するノードとデータを転送するハブの持つ 2 つの機能を組み合わせた、小型化および薄型化できる新しいデバイスが実現出来る。特に、この方向性光検出器は光の入射方向の水平角と仰角を正確に検出できるため、単独のデバイスとしても、より多くのアプリケーションが期待できると考えている。そこで、この方向性検出器の光学特性について、設計ソフト「ZEMAX」を用いて検討した。

まず、方向性光検出器も構成と原理について述べる。方向性検出器は Fig. 6 に示すように、平面 (床) に直立

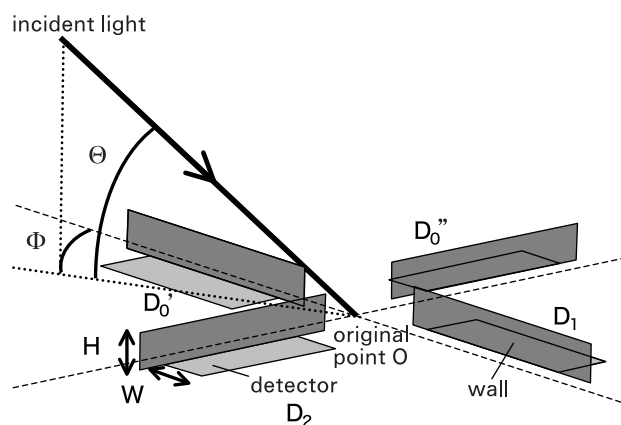


Fig. 6 Light aspect sensor.

する4つの壁と平面上の4つのディテクタで構成される。入射光の入射角（仰角 $\Theta$ と水平角 $\Phi$ ）が $0^\circ < \Theta < 90^\circ$ ,  $0^\circ \leq \Phi < 90^\circ$  のとき、ディテクタ  $D_0'$  と  $D_0''$  は組になる壁によって影が生じることがなく、ディテクタ全体に均一な光が入射される。また、ディテクタ  $D_1$  と  $D_2$  は入射光の入射角度によってそれぞれの組になる壁により生じる影の大きさが変化するので、それぞれのディテクタで検出される光強度から、光の入射角が算出可能だ。組ではない壁によって生じる影がディテクタに落ちることがないと仮定すると、下記の式が成り立つ。

$$\Theta = \arctan \left[ \frac{H}{W} \frac{I_0}{\sqrt{(I_0 - I_1)^2 + (I_0 - I_2)^2}} \right] \quad (9)$$

$$\Phi = \arctan \left[ \frac{I_0 - I_1}{I_0 - I_2} \right] \quad (10)$$

ここで、 $H$  は壁の高さ、 $W$  はディテクタの壁の幅、 $I_0$  はディテクタ  $D_0'$ ,  $D_0''$  の光強度、 $I_1$  はディテクタ  $D_1$  の光強度、 $I_2$  はディテクタ  $D_2$  の光強度である。しかし、この方向性光検出器の検出可能な角度は  $0^\circ < \Theta < 90^\circ$ ,  $0^\circ < \Phi < 90^\circ$  とされてきたが、正確に検出可能な $\Theta$ と $\Phi$ の範囲は限定され、それは $H/W$ の値によって変化することが、日本女子大学のグループの解析により分かったので以下に報告する。

式 (9) と (10) を  $I_1$  と  $I_2$  の式に変形すると、

$$I_1 = I_0 \left[ \frac{W - H \tan \theta_1}{W} \right] \quad (11)$$

$$I_2 = I_0 \left[ \frac{W - H \tan \theta_2}{W} \right] \quad (12)$$

となる。また、幾何学的な配置より、

$$\theta_1 = \tan \left[ \frac{\sin \Phi}{\tan \Theta} \right] \quad (13)$$

$$\theta_2 = \tan \left[ \frac{\cos \Phi}{\tan \Theta} \right] \quad (14)$$

となる。

Fig. 7 は、方向性光検出器をディテクタ  $D_1$  あるいはディテクタ  $D_2$  の対になるそれぞれの壁に対して垂直方向から見た図である。ここで、ディテクタ  $D_1$  とディテクタ  $D_2$  の壁に対する光の入射角をそれぞれ  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  と置く。Fig. 7 の角度  $\theta$  は、ディテクタ  $D_1$  を考える場合は  $\theta_1$ 、ディテクタ  $D_2$  を考える場合  $\theta_2$  を表している。同じく、光強度  $I$  はディテクタ  $D_1$  の場合の  $I_1$ 、ディテクタ  $D_2$  の場合の  $I_2$  に対応する。Fig. 7 に示すように、

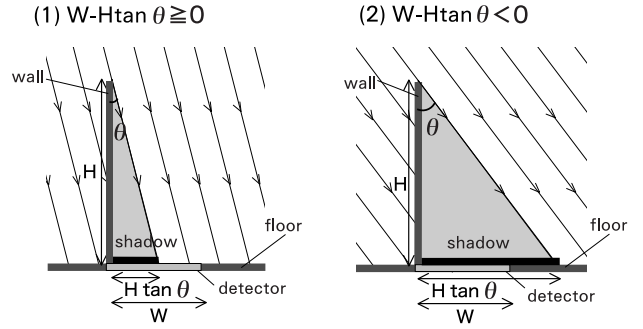


Fig. 7 Cross-section of light aspect sensor.

$H \tan \theta$  は床に落ちる影の長さである。 $\theta$  が小さいとき、影はディテクタの長さ  $W$  より短く、 $W - H \tan \theta \geq 0$  となり、式 (11), (12) より、ディテクタの光強度  $I$  は正となる。しかし、影がディテクタより長くなると、影はディテクタの長さ  $W$  より長くなる。 $W - H \tan \theta < 0$  より、上式よりディテクタの光強度  $I$  は負の値となり、ディテクタの光強度が負の値となる。実際には方向性光検出器のディテクタで検出される光強度の値が負になることはなく0となり、式と矛盾が生じる。よって、 $W - H \tan \theta < 0$  のとき、方向性光検出器が正確に光の入射角を検出することができず、 $W - H \tan \theta \geq 0$  の条件を満たしていれば、方向性光検出器は入射される光の方向 $\Theta$ と $\Phi$ が正確に検出可能であることが分かる。

そこで、 $H=10\mu\text{m}$ ,  $W=20\mu\text{m}$  のとき、式 (11), (12), (13), (14) より、 $I_1$  と  $I_2$  それぞれが正となる $\Theta$ と $\Phi$ の範囲を求めた。Fig. 8 の黒の実線は  $I_1$  が0、灰色の実線は  $I_2$  が0となる $\Theta$ と $\Phi$ の関係を示し、灰色の部分は  $I_1$  と  $I_2$  が共に正となる $\Theta$ と $\Phi$ の範囲である。 $\Phi=90^\circ$  のとき  $I_1=0$  の実線は $\Theta$ の最大値  $26.6^\circ$  を、 $\Phi=0^\circ$  のとき

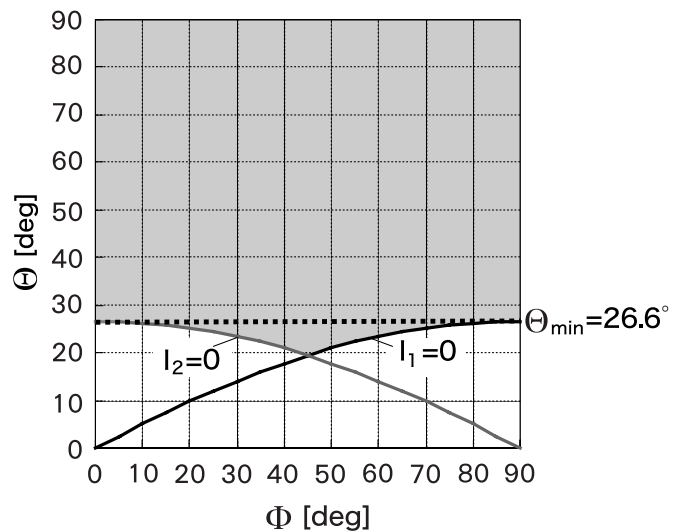
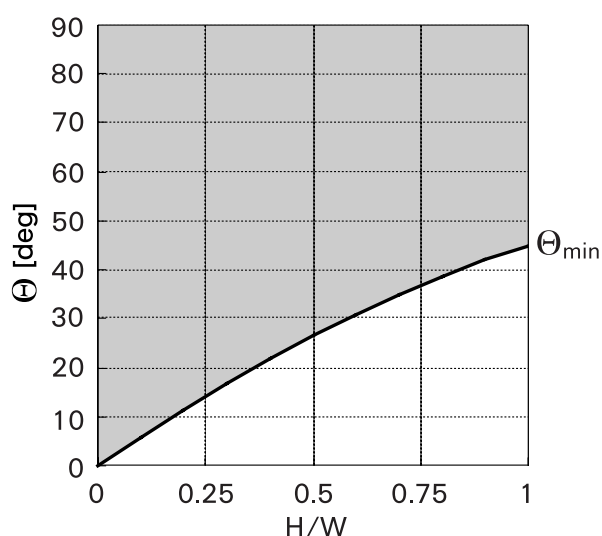


Fig. 8 Detectable angular range by light aspect sensor.  
 ( $H=10\mu\text{m}$ ,  $W=20\mu\text{m}$ )

Fig. 9 Detectable range of  $H/W$  and  $\Theta$  by light aspect sensor.

灰色の実線  $I_2 = 0$  は  $\Theta$  の最大値  $26.6^\circ$  をとる。よって、 $H=10\mu\text{m}$ ,  $W=20\mu\text{m}$  のとき、 $\Theta$  が  $26.6^\circ$  以上であれば、どんな  $\Phi$  をとっても常に正確に光の入射角度を検出できる。この  $\Theta$  の値を  $\Theta_{\min}$  と置く。式 (11), (12), (13), (14) より、 $\Theta_{\min}$  は  $H/W$  に依存して変化する固有の値である。横軸を  $H/W$ 、縦軸を  $\Theta$  とし、 $\Theta_{\min}$  をグラフ化した (Fig. 9)。 $\Theta$  が  $\Theta_{\min}$  以上である灰色の部分は、方向性光検出器がどんな  $\Phi$  をとっても光の入射角を正確に検出できる検出可能範囲である。 $H/W$  が小さいほど、検出可能範囲が広がること分かる。

上記の検出可能範囲の検討を確認するために用いた「ZEMAX」は従来の光学設計ソフトにおける結像系を主な対象とした評価機能をさらに拡張し、より多様化した照明系評価が可能である。照明系シミュレーションは、面積を持つインコヒーレントな光源から光線が発生させ、被照明面における放射照度分布を求める場合、光線の発

生する座標と出射角度をモンテカルロ法によりランダムに決め、均一なエネルギーを持つ光線が発生させる。ディテクタに至るまで光線追跡し、ディテクタの微小区間に到達する光線をカウントし、放射照度分布を求める<sup>28)</sup>。通常の光学設計ソフトでは光線が伝搬する順番に光学面を設定するシーケンシャルな光線追跡を行う。しかし、コーナーキューブ・リフレクタやセグメント・レンズ/ミラー、ファイバ光学系などは、入射する光線によって伝播順序が異なり、光線の伝搬順序をあらかじめ設定することはできない。照明系シミュレーションは、上記の方法で、光線の伝播順序を定めることなく光学素子を自由に配置できるノン・シーケンシャルな光線追跡を行うことができる。

今回は、光源を半径  $0.3\text{mm}$  の円形の平行光で、強度は

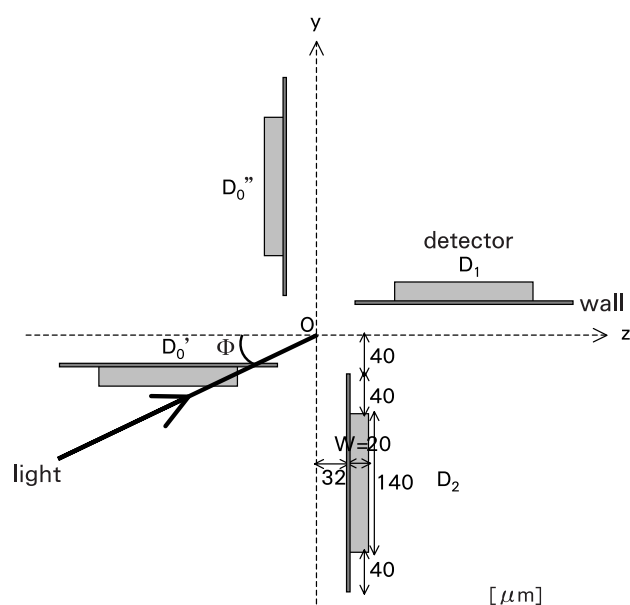
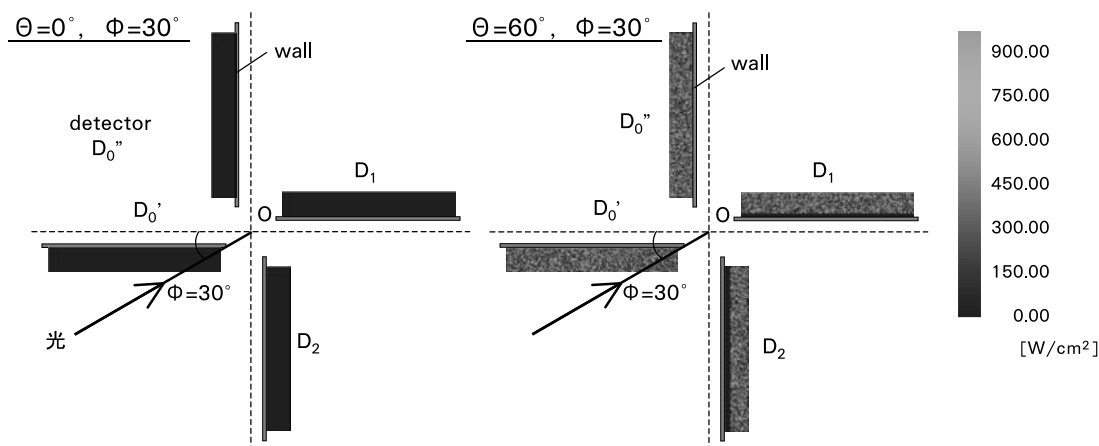


Fig. 10 Top view of light aspect sensor discussed.

Fig. 11 Illuminance distribution by light aspect sensor. ( $H=10\mu\text{m}$ ,  $W=20\mu\text{m}$ ) [ZEMAX].

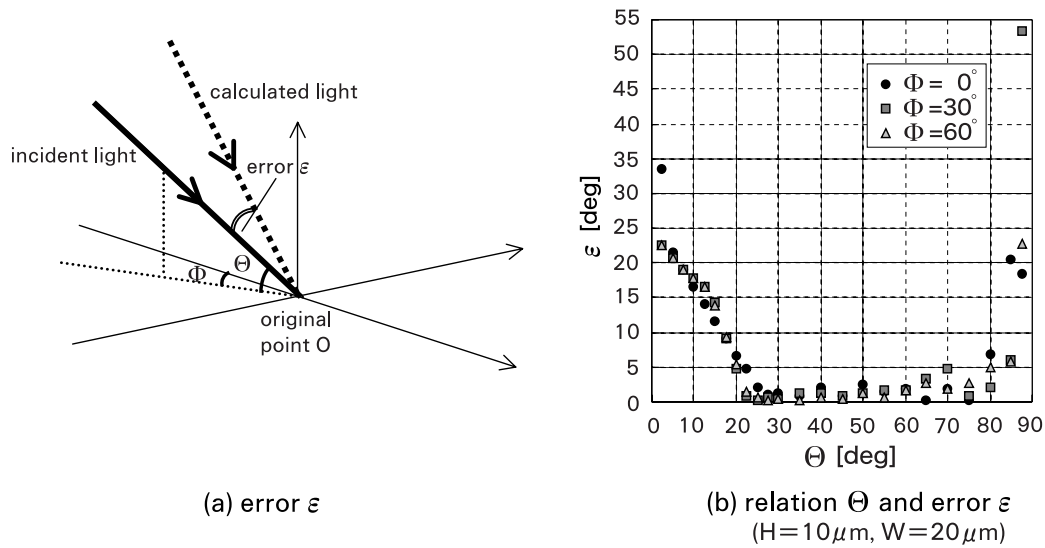


Fig. 12 Relation of  $\Theta$  and angular error  $\varepsilon$  by light aspect sensor.

1.0W, 光源の中心と 方向性光検出器の原点 O の距離が常に  $0.5\text{mm}$  となるよう、光源の位置を変化させた。壁の高さ  $H$  は  $10\mu\text{m}$ 、ディテクタの幅  $W$  は  $20\mu\text{m}$ 、Fig. 10 の配置とし、全ての構造は吸収体（反射率 0 %, 透過率 0 %）、とし、厚みの考慮はしない理想的な条件を用いた。入射した光線の本数は 1,000,000 である。まず、 $\Phi$  をそれぞれ  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$  に保ち、 $\Theta$  を  $0^\circ$  から  $90^\circ$  まで変化させ、それぞれのディテクタの光強度を算出する。Fig. 11 は方向性光検出器を上から見た模式図で、ディテクタでの照度分布を示している。ディテクタの  $\Theta$  が大きくなるにつれて、壁によって生じる影がなくなっていくことが分かる。さらに、Fig. 12 (b) に  $\Theta$  を横軸、誤差  $\varepsilon$  を縦軸のグラフで示した。Fig. 12 (a) に示すように、誤差  $\varepsilon$  はシミュレーションにより検出された光強度を式 (9)、(10) に代入し得られた入射角度を持つ検出された光とシミュレーションを行った入力した光のなす角度である。ここで、 $I_0$  はディテクタ  $D_0'$  の光強度  $I_0'$  とディテクタ  $D_0''$  の光強度の  $I_0''$  の平均値とした。 $\Theta$  が  $22.5^\circ$  から  $75^\circ$  までの間で、誤差  $\varepsilon$  は  $5^\circ$  に収まっている。壁の高さ  $H$  は  $10\mu\text{m}$ 、ディテクタの幅  $W$  は  $20\mu\text{m}$  のとき、理論計算では検出可能範囲は  $\Theta$  が  $26.6^\circ$  以上なので、シミュレーション結果と検出可能範囲の下限がほぼ一致した。さらに、今後、より多くの詳しいシミュレーションを行うと同時に、幾何光学的なアプローチでその原因を探り、正確に検出可能な角度範囲を広げる工夫を模索する。また、素子の材質を変えた場合や作製誤差により生じる検出角度の誤差など、光学特性に関する検討を行う予定である。試作に向け、要求される検出可能な入射光の入射角度範囲に応じた方向性光検出器の最適設計を目指している。

## 6. ま と め

光学シミュレーションの代表的な 3 つの手法である光線追跡、スカラー解析、電磁波解析のうち、幾何光学の光線追跡をベースにした光学設計ソフトによる光学設計の特徴と設計手順とともに、コンピュータを用いることで急激な発展を遂げ可能となった最適化の手法や様々な解析について述べた。また、実際に光学設計ソフトによるトリプレットレンズと VCSEL と 2 つのプリズムを用いた小型メモリシステムの 2 光束干渉系の解析例を示した。さらに光学設計ソフトの一機能である照明解析を用い、半導体薄膜の内部応力を巧みに利用するマイクロオリガミによって作製される MEMS の方向性光検出器の検討を行い、光の入射方向が正確に検出できる角度の検出可能範囲が存在することを立証し、方向性光検出器の有効性を示した。

作製技術の向上、新材料の開発、機器の小型化に伴い複合機能を持つ光学素子の要求が高まり、高性能化が進んできている現在、十分な光学設計の必要性が求められている現在、光学素子の最適設計や実用システムへの適応条件算出に必要不可欠な光学設計ソフトは、その重要性がさらに増すだろう。また、光学設計ソフトによる完全なグローバル最適化の実現など、今後の発展がますます期待される。

## 謝 辞

この研究を行うにあたり、多くのご助言いただきました本学理科学研究科卒業生の岡 恵子氏（現在：日立製作所生産技術研究所）と、方向性光検出器に関してご意見をいただきました株式会社国際電気通信基礎技術研究所



波動工学研究所光波研究室の會田田人氏（現在：大阪市立大学大学院 工学研究科教授）、斎藤信雄氏（日本放送協会放送技術研究所）、久保田和芳氏、光波研究室の皆様に感謝いたします。

# 参考文献

- 1) 高橋友刀：レンズ設計 東海大学出版会 東京 (1994).
- 2) Kawai, S.(Ed.): “*Handbook of Optical Interconnects (Optical Engineering)*” Marcel Dekker, Inc., New York (2005).
- 3) Kashiwagi, M., Oka, K., Irisawa, M., Ebizuka, N., Iye, M. and Kodate, K.: *Proceedings of SPIE* **5290** 168-178 (2004).
- 4) Komai, Y., Wada, N., Moritsuka, F. and Kodate, K.: 20th Congress of the International Commission for Optics (CD 7page) (2005).
- 5) Nagayoshi, M., Oka, K., Klaus, W., Komai, Y. and Kodate, K.: *Proceedings of SPIE* **6136** printing (2006).
- 6) 小舘香椎子：日本女子大学紀要理学部 **10** 7-24 (2002).
- 7) 中村莊一, 草川 徹：レンズ設計入門 日本オプトメカトロニクス協会 東京 (2003).
- 8) 小倉敏布：写真レンズの基礎と発展 株式会社朝日ソノラマ 東京 (1995).
- 9) オプトロニクス社編集部 編：光学設計とシミュレーションソフトの上手な使い方 オプトロニクス社 東京 (2000).
- 10) 中川治平：レンズ設計工学 東海大学出版会 東京 (1986).
- 11) 松井吉哉：レンズ設計法 共立出版株式会社 東京 (1973).
- 12) <http://www.cybernet.co.jp/optical/codev/advanced/wp03.pdf>
- 13) 日本語 CODE V イントロダクトリーユーザガイド パーシジョン 9.10 サイバネットシステム株式会社 東京 (2004).
- 14) 光学設計評価プログラム Code V 紹介セミナー J-1 版 サイバネットシステム株式会社 東京 (2003).
- 15) ZEMAX 光学設計プログラム ユーザーズガイド Version; 1.00 株式会社リーディンテックス.
- 16) 光学設計ソフトウェア OSLO ユーザガイド チャート株式会社 (2002).
- 17) [http://www.ekklesia.co.jp/link/other/ek\\_link.html](http://www.ekklesia.co.jp/link/other/ek_link.html)
- 18) 金子清一：光アライアンス **15**(2) 3-6 (2004).
- 19) 応用物理学会 日本光学会 光設計研究グループ 監：回折光学素子入門 オプトロニクス社 東京 (1997).
- 20) Nakayama, T., Shimizu, K., Okazaki, Y., Watanabe, E., Kodate, K., Takayama, Y. and Aruga, T.: *Proceedings of SPIE* **5290** 212-220 (2004).
- 21) 中山朋子, 小舘香椎子：日本女子大学紀要理学部 **13** 19-27 (2005).
- 22) 江刺正喜：レーザー研究 **33** 11 (2005).
- 23) 會田田人, 久保田和芳, パブロ・バッカロ：まてりあ **41** (10) 683-686 (2002).
- 24) 久保田和芳, Pablo O. Vaccaro, 會田田人：次世代センサ **11**(2) 6-9 (2002).
- 25) Ocampo, J.M.Z., Vaccaro, P.O., Fleischmann, T., Wang, T., Kubota, K. and Aida, T.: *App. Phys. Lett.* **83**(18) 3647-3649 (2003).
- 26) Vorobev, A., Vaccaro, P., Kubota, K., Saravanan, S. and Aida, T.: *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** 4024-4026 (2003).
- 27) Kubota, K., Fleischmann, T., Saravanan, S., Vaccaro, P.O. and Aida, T.: *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** 4079-4083 (2003).
- 28) 牛山善太, 草川 徹：シミュレーション光学—多様な光学設計のために 東海大学出版会 東京 (2003).

# Optical Design and Its Application of a Directional-Sensing Photodetector

Tomoko Nakayama and Kashiko Kodate

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

(Received February 7, 2006)

**Abstract:** The optical design was originally launched in order to develop classic optical elements such as telescopes and microscopes. Along with the demand for optical devices with a compound function, came improvements in fabricated techniques, development of new materials, and miniaturization of optical elements. Since the dawn of micro optics, our laboratory has been engaged in variety of research, ranging from basis study to design, fabrication and evaluation experiments. Currently, those devices and techniques are being applied to high-dispersion spectra for astronomical observation, a novel optical spectrum synthesizer for photonic network and a filter for color separation.

In parallel to this development, optical design software has made great progress since the late of 1950s when computer tools became available. Design and assessment methods for optical elements included ray tracing, scalar theory and electromagnetic wave theory. The most primitive software employed geometric ray tracing, in which many rays were observed after its entry through an optical system and spotted on the image plane by spot diagram. However, this analytical method has a limitation. Successively, the Damped Least Squares Method with an automatic optimization function was developed, and became one of the most frequently used optical software.

The optical design in finding construction data with the global minimum aberration requires a complex process. It is difficult to trace back numerical values by “inverse analysis”. These values make up the whole or part of the optical setup, for example, curvature radius, surface separation, refraction index and dispersive power of the glass. It requires minute processes of changing parameters at each phase and checking them carefully, based on aberration theory. In addition, experimental judgments of the designer play also an important role during series of elaborate investigations, as new data have to meet the criteria to improve performance. Ray tracing is to be conducted at each step by inputting new data, until aberrations are calculated to confirm better performance. We continue this “trial and error”, and have computers process and optimize these data.

This paper demonstrates characteristics and optimization processes of optical design software using computers. Referring to “automatic optimization” theory, the latest trend for global optimization of the optical design software is also introduced. Moreover, variations of optical design software on the market are presented, with some special characteristics featured. As applications, two examples will be displayed. Optimization of a triplet lens is one, while the other is two-beam interferometer for compact optical memory system using VCSEL and two prisms with optical design software. Lastly, experiments on the directional-sensing photodetector using MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) were carried out. An examination on its angle measurement of incidence was conducted using the illumination analysis. These results will be exhibited.

**Key words:** optical design, optical design software, ray tracing, optimization, MEMS, directional-sensing photodetector