

2.3 空間グリッドと波長

FDTD法に限らず電磁界解析の計算のとき、空間をユニットセルを単位とする微小空間でメッシュを切る。一般的に対象の構造に対して注意が行ってしまうが、それより重要なことは、対象とする波長である。電磁界解析の場合、電界および磁界は波としての性質がある。よって伝播解析をしたいターゲットの波長をまず明確にすることが必要である。連続光(単色光)として計算する場合は、光源の波長を考慮すればよいがパルス励振をする場合は特に短波長の波長域を注意してグリッドを設定する必要がある。

それなりの精度で計算するためには波長の1/10より小さいグリッドを設定したほうがよいと一般的にいわれている。ここでよく間違えられるのがこのときの波長が真空中の一般的な波長としてしまうことである。周波数はどんな媒質内での光でも変わらないが、波長と波数は媒質の屈折率によって変わる。あくまでも計算グリッドを考慮する場合は、媒質内での波長をベースに考えるべきである。

2.4 不等分メッシュの注意点

FDTD法のような計算対象の空間をメッシュ状に分割して計算していくようなタイプのソルバにとって、計算負荷を減らしスピードを上げる方法として不等分メッシュや部分メッシュ、適応メッシュといったメッシュ分割の方法がある。これにより、確かに計算量の削減により結果を得るまでの時間は減らすことができるが、波動を扱う電磁界の解析において基本的に波を表現するのに必要な分割数まで減らすことはできないことを忘れないようにするべきである。いくらこのような機能であっても、通常の波動を再現するための分割数まで減らすことはできない。これらの方法は、たとえば近接場光のように異なる誘電率を持つ領域の界面を細かく計算する必要があるときに、細かくする必要のある部分だけ局所的にグリッドを小さくすることで、最小限の計算負荷の増加で精度のよい計算を可能にするために使うものである。

このような不等分メッシュを利用する場合、空間グリッドに関連している時間グリッドは一番細かいグリッドに連動していることが一般的である。そのため注意すべきは、不用意に不等分メッシュを細かくすると、計算時間が増大し計算回数の増大に伴う計算誤差も増える可能性が増すという点と、不等分メッシュを利用するときは立方体のメッシュが理想であるが、これのアスペクトレシオが極端に悪くなっていることがあるという点である。

2.5 境界条件

幾何光学のツールでは計算領域の境界条件は基本的にないが、電磁光学ツールではこの境界条件は必ず必要である。これは、計算機のメモリ量が有限で実際の空間の一部分しか計算でき

ないために有限の空間であたかも無限の空間であるような疑似無限空間を作り出す境界条件が必要となる。これが最も多く使われている完全吸収境界(Perfect Matched Layer)である。この境界条件は計算領域内には何ら影響を及ぼさないためこの領域内で起こりうる物理現象が計算できなくなることはない。

注意しなければならないのは他の境界条件を利用する場合である。これらの境界条件は、計算量を大幅に少なくする代わりに境界条件の種類によって異なるが、かなりの部分の物理現象をシミュレーションできなくなる。どのような現象が起こるか不明の場合、完全吸収境界以外の境界条件を利用すると現象を見落とす危険性があることを承知しておくべきである。

2.6 電気双極子光源

幾何光学系のツールでは、点光源はすべて等方的に光が放射する光源がふつうであるが、電磁光学が適用となる微細構造や、発光点のすぐ近くに構造の境界があるような場合、より現実に近い光源を選択する必要がある。発光点での発光現象がランダムな偏光状態を持っているため等方的な光源でもよいとする考えもあるが、発光現象の見地から考えた場合、固体物理学でポピュラーな電気双極子振動のモデルが物理現象をかなりよく表していると考えられるため市販のツール(Synopsys社のFullwaveなど)に多く採用されている。

もちろん有機ELなどより複雑な発光過程をとるものはより複雑であると考えられるが、少なくとも等方的ではないと推定できる。

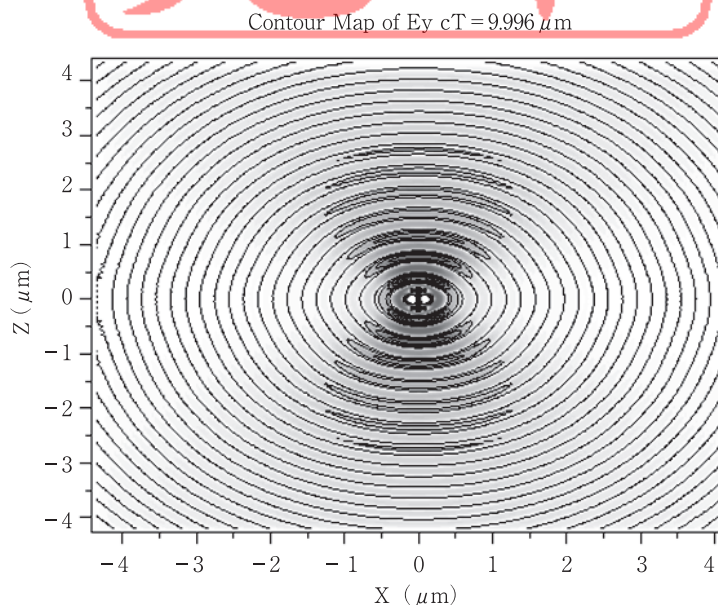


図7 双極子点光源の波動領域と放射領域の計算例

4. 走査レンズ面形状の変遷と設計例

前述したように、走査光学系は主走査方向と副走査方向の機能が異なっているため、アナモフィックな光学系となる。かつてはレンズ面形状の制約により、おもに主走査方向の機能を有する走査レンズ群 $L^{(m)}$ 、おもに副走査方向の機能を有する走査レンズ群 $L^{(s)}$ というように、機能を分離して設計を行うのが一般的であった。具体的には、走査レンズ群 $L^{(m)}$ を2枚の球面レンズ $L_1^{(m)}$ 、 $L_2^{(m)}$ で構成する場合、曲率半径、肉厚、屈折率を感光体面における主走査像面湾曲と等速性を確保するように最適化する。そして、主走査方向にパワーを持たない走査レンズ群 $L^{(s)}$ 、基本的には1枚のアナモフィック光学素子を挿入し、副走査方向の集光性と面倒れ補正を最適化する。最も単純なアナモフィック光学素子は、円筒形状の表面の一部を切り取ったものをレンズ面に採用したシリンドリカルレンズである。

図11(a)にその具体的な例(設計例1)を示す。これは2枚のガラス製球面レンズと1枚の樹脂製シリンドリカルレンズによって、必要な機能を得ているものである。図11(b)に走査光学系の光学特性を示す。左は像面湾曲を示し、点線が主走査方向、実線が副走査方向である。右は等速性であり、各像高における速度を中心像高における速度からのズレ量(比率)として表した。主走査像面湾曲は1 mm程度、等速性は1%に収まっており、良好に補正されている。しかし、副走査像面湾曲は周辺で大きくなっている。これは、シリンドリカルレンズに入射する光ビームに作用するパワーが、入射角が大きくなるにつれて強くなるためである。

(a) レイアウト図

(b) 光学特性

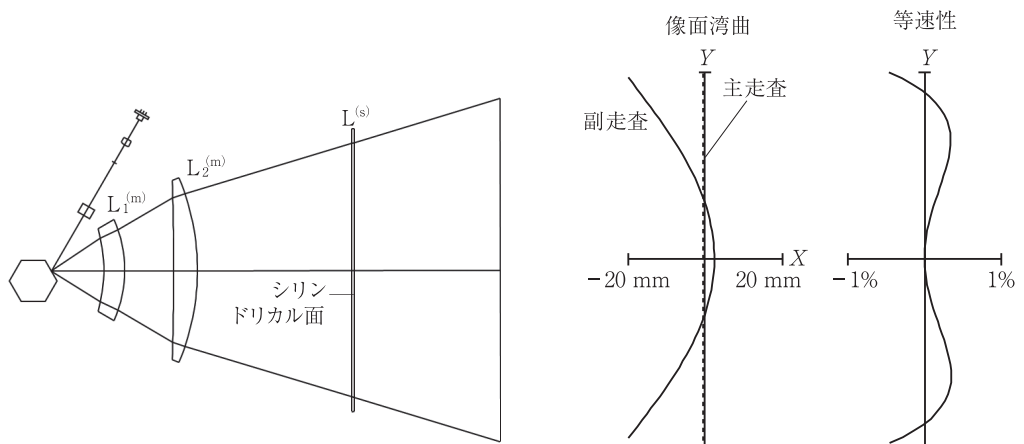


図11 設計例1

この対策として考え出されたのが、トロイダルレンズである⁹⁾。半径 r の円弧の頂点から半径 R だけ離れた軸を中心にして回転させると、図12(a)のようなドーナツ形状ができる。ドーナツ形状の表面の一部を切り取ったものをレンズ面に採用したレンズをドーナツ型トロイダルレンズと呼ぶ。このようなレンズをシリンドリカルレンズの代わりに走査光学系に組み込むと、完全とはいえないまでも、周辺像高での副走査像面湾曲を補正することができる。

トロイダル面は、 r と R の条件によって、いくつかのバリエーションがあり、図12(b)の樽型¹⁰⁾、図12(c)の鞍型¹¹⁾もトロイダル面に属する。いずれのトロイダル面も、副走査曲率半径がレンズ高さに応じて変化しているため、副走査像面湾曲を効果的に補正することが可能となる。図13(a)に、樽型トロイダル面を入射面に、ドーナツ型トロイダル面を射出面に採用した樹脂製トロイダルレンズを、2枚のガラス製球面レンズと組み合わせた例(設計例2)を示した¹⁰⁾。このときの走査光学系の光学特性は図13(b)にあるとおりで、副走査像面湾曲が設計例1に比べて改善していることがわかる。

ここで、2枚の球面レンズで構成されていた走査レンズ群 $L^{(m)}$ を1枚のレンズにする 것을考える。このためには非球面を採用する必要がある。最も単純な非球面は、回転対称形状である。これは、回転軸からの距離 h を用いて、式(10)のように表記することができる。

$$X(h) = R - \sqrt{R^2 - h^2} + \sum_{j=1} A_j \cdot h^j \quad (10)$$

一般的にレンズ面の表現式は、 $h=0$ におけるデプスを0としたとき、任意の位置における深さ(あるいは高さ) X というデプス量で与えられる。式(10)においてすべての自然数 j において $A_j=0$ のとき、その形状は球面(曲率半径 R)である。つまり、球面に多項式で表記される第3項が付与される形で回転対称非球面が与えられる。

回転対称非球面は式(3)を満たす等速性の確保と集光性の確保を両立させる必要がある。

等速性に対しては、レンズ高さ h において、式(10)の1階微分値 $X'(h)$ を最適化する。また、主走査像面湾曲を補正するためには、レンズ高さ h において、式(10)の2階微分値 $X''(h)$ で表される局所的な曲率(以降、部分曲率と呼ぶ)を最適化する。すなわち、 $X'(h)$ が等速性を、 $X''(h)$ が主走査像面湾曲を補正するような $X(h)$ を求めることが、主走査方向の設計の内容である。当然のことながら、主走査方向の光学特性を効果的に補正するには非球面を入射面、射出面ともに採用するのが好ましく、このことにより走査レンズ群 $L^{(m)}$ を1枚のレンズにすることができる。この1枚の走査レンズ $L^{(m)}$ に、副走査方向にパワーを有する1枚の走査レンズ $L^{(s)}$ を加えることにより、主走査・副走査方向の光学特性を満足することができる。

次に、主走査・副走査方向の光学特性を1枚の走査レンズで補正することを考える。この場合、前述したレンズによる主走査・副走査方向の機能分離は成立しないため、設計パラメータをレ

2.1.4 高輝度白色LED封止レンズ

エポキシ樹脂は、分子構造に光を吸収する官能基を含んでいるので時間の経過とともに樹脂に着色(黄ばみ)が発生し、ひいては可視光の透過率が低下する傾向がある。発光効率がよいとはいえLED照明は、放熱対策が大きな課題となる程の発熱がある。現状、代表的に使用されるGaAsLEDの場合、ジャンクション温度の制限から120℃程度の上限があるが、投入電力に比例して温度が上がる。その温度により封止材料は、劣化が促進される。

図7(a)に160℃で加速したエポキシ樹脂の分光透過率変化を示す。時間経過とともに短波長側(青～緑)で透過率が低下する。透過率が低減するとともに、黄ばみが強まることがわかる。

このようなUV劣化が少ない封止材料として採用されるのがシリコン樹脂である。図7(b)にシリコン樹脂の分光透過率の変化を示す。同一条件でのエポキシ樹脂の試験結果と比較すると劣化の差が歴然であることがわかる。紫外線LEDはいうに及ばず青色LEDチップからは微弱ながら紫外線(UV)が発せられている。高輝度、長寿命のLEDでは、UVが封止材に及ぼす影響が無視できなくなる。また屋外で長時間使用する場合には、太陽光に含まれるUVの影響も考えなければならなくなる。

高輝度白色LEDは、強いUVを発するためその封止レンズには主として耐紫外線耐光性、耐熱性に優れたシリコン樹脂が使用される。LED封止用シリコン樹脂の物性例を表5に示す。

化学メーカー各社で、シリコン樹脂対抗の耐UVのエポキシ、ウレタンなどの開発が積極的に行われている。

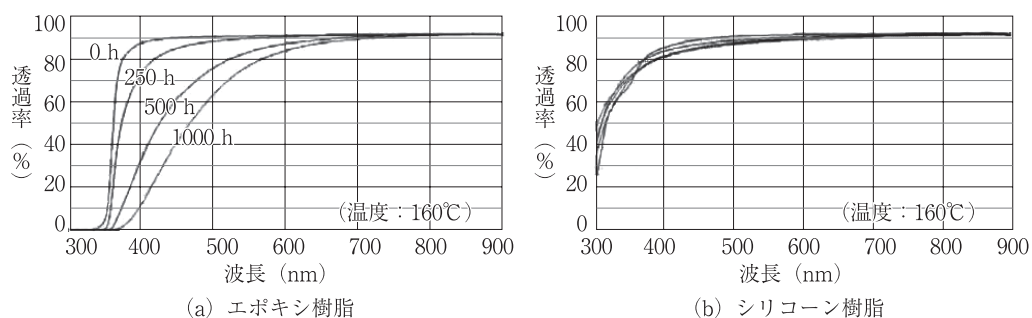


図7 封止樹脂の透過率変化⁷⁾

表5 LED封止用シリコン樹脂の物性例(東レ・ダウコーニング)⁸⁾

| | | OE-6665A/B | OE-6665A/B | OE-6665A/B |
|--------------------|---------|-----------------|------------------|--------------------|
| A/B混合比 | | 1/20 | 1/4 | 1/3 |
| 梱包形態 | | A:30 g, B:500 g | A:100 g, B:500 g | A:500 g, B:500 g×3 |
| 混合後外観 | | 無色 - 淡黄色 | 無色 - 淡黄色 | 無色 - 淡黄色 |
| 粘度 (A液)@ 25℃ | mPa・s | 114 | 2,970 | 31,700 |
| 粘度 (B液)@ 25℃ | mPa・s | 2,360 | 2,770 | 2,850 |
| 混合後粘度@ 25℃ | mPa・s | 2,220 | 2,490 | 5,010 |
| 混合後屈折率@ 25℃ | | 1.530 | 1.534 | 1.536 |
| 硬化条件 | | 150℃/1時間 | 150℃/1時間 | 150℃/1時間 |
| 硬さ@25℃ | Shore D | 68 | 41 | 33 |
| 透過性(450 nm, 1 mmt) | % | >99 | >99 | >99 |
| 不揮発分 | % | 99.4 | 99.8 | 99.8 |
| 熱膨張率 | ppm | 210 | 210 | -- |

2.2 リフロー用耐熱樹脂

リフロー対応レンズとは、携帯電話やタブレットのカメラモジュールを鉛フリー半田のリフロー処理で回路基板に直接半田付けするカメラに使用できるレンズユニットである。リフロー処理条件としては、例えば250℃以上30秒確保、最高温度260℃の処理を1パスとして、補修を含め3パス通して光学性能劣化がないことである。携帯電話カメラの取付ソケットやカメラ用FPC、コネクタを削減し部品コスト低減および組立工数の低減を図るとともにソケットの分だけ小型軽量化、低背化を図ることがリフロー化の目的である。低画素のセカンドカメラ(主にVGA以下)で実用化が始まっているほか、高画素メインカメラへの適用拡大の検討が進んでいる。検討状況をまとめて表6に示す。

リフローレンズ実現には、レンズを構成する全部品・部材のリフロー耐熱が要求される。レンズを除き他の部品・部材(鏡筒、絞り、赤外カットフィルター、スペーサ、抑えリング、接着剤など)は、スーパーエンジニアリングプラスチック、金属、ガラス、シリコン接着剤などで対応可能である。一番問題になるのがレンズ本体である。

ガラスモールド(GMO)非球面レンズ、熱硬化樹脂のプラスチックレンズ、ガラス平板に非球面層を2P法で形成したハイブリッドレンズが既に低画素用のリフロー対応レンズは実用化している。高画素用リフロー対応レンズの検討課題を纏めて表6に併せて示す。

材料の詳細は、明らかにされていないが、小松ライトがエポキシ樹脂の32個取り成形と発

第1節 光学エレメントの仕様と評価法

トライオプティクス・ジャパン(株) 大矢 尚司

はじめに

光学系は様々な産業分野で活躍しているキーデバイスであり、いずれも所望の光学性能設計に基づき個々のレンズ、ミラー、プリズムなどエレメントの幾何的な仕様に対し評価や選別が行われている。近年、色々な産業分野での効率化・多様化・差別化に伴い光学系に求められる要求が一段と厳しくなっている。より微細化結像を追求する半導体ステッパー用投影レンズ、環境負荷を低減させるために増えているグリーンデバイス用のi線ステッパー用投影レンズは大面積一括露光のため光学系が大型化、デジタルカメラレンズにおいてもレンズ枚数の減少化、携帯電話用カメラレンズの高画素化とコンパクト化、マシンビジョンレンズや照明光学系の多品種少量化、セキュリティーレンズや車載用カメラレンズの高精細な画像化、眼鏡や眼内レンズの分野においてもトーリック回折型非球面など、いずれの分野も日進月歩での開発、改良が進んでいる。これらの光学系を正しく評価・解析できる測定技術及び測定装置自体も向上していかなければならない。弊社は幾何光学系の測定装置を得意とし、クラシックな測定原理を更に改良し、個々のワーク仕様に応じた測定仕様の提案ができ、カスタマイズされた測定装置や一台でマルチな測定機能を有する複合型の測定装置を多く開発してきている。本稿では弊社光学評価装置の開発の経験に基づき光学部品・光学系の仕様に応じた評価方法、評価技術を紹介する。

1. 単レンズの仕様と評価

単レンズは光を屈折させ発散、集光させるための光学素子である。入射光束がレンズ内の光路を通り設計通りの出射がされるかを定めるパラメータは、屈折率、曲率半径、中心厚、光学面形状、偏芯といった幾何的な評価が重要となる。材料の物性評価や各種コーティング仕様の評価もあるが、本項では単レンズとして重要な幾何光学の仕様と評価について紹介する。

1.1 偏芯測定

全てのレンズは設計通りの光路を伝播する役割であるため、偏芯(偏肉)が存在すると所望の光学性能が得られない。そのため、単レンズの偏芯は幾何的な評価で最も重要な評価の一つで

ある。薄肉レンズ，ロッドレンズ，シリンダリカル，トーリック，レンズ径 f 0.5～600 mm，球面，非球面など様々な単レンズを今まで測定してきたが，いずれも基準軸をどこで設けどのような偏芯測定を行うのかは，本来各メーカーの仕様とともに異なるのは当然で，測定機が単機能で制限があってはならない。その評価を正しく行える汎用性と測定技法が必要になる。

1.1.1 偏芯の定義と基準軸

ISO 10110-6：1996やDIN 3140-6：1978規格によれば，偏芯は「基準軸と光軸の不一致により生じる」(図1)と定義されている。しかし基準軸は該レンズを設計した際に決められるものであり，形状や用途により様々である。一般的な例として以下の基準軸を挙げる(図2)。

- ・「球面薄肉レンズ」 レンズの外径中心と片側のレンズ面の曲率中心を垂直に結ぶ軸
- ・「球面ロッドレンズ」 レンズ円筒外径の中心軸
- ・「成型レンズ」 レンズの外径中心と片側のフランジ平面を垂直に結ぶ軸
- ・「非球面レンズ」 近軸光軸(R1曲率中心とR2曲率中心を結ぶ軸)
- ・「シリンダリカルレンズ」 両側の側面長辺部の中心と平面基準面

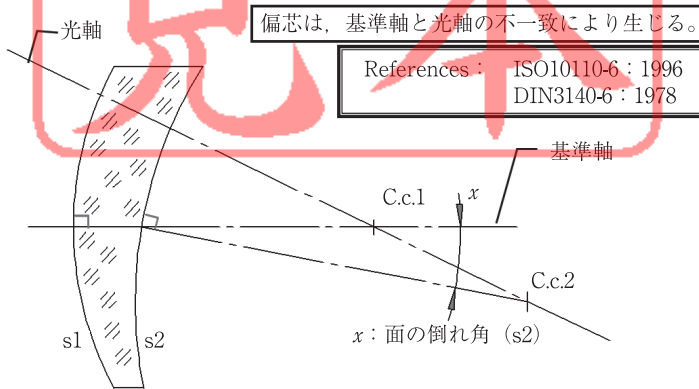


図1 偏芯の定義