

最先端光学素子の開発に適用できる 光学シミュレーション

Optical Simulation Analysis for Development of Leading-Edge Electronic Devices

岡田 直忠

■ OKADA Naotada

近年性能の向上が著しい光学素子の開発に光学シミュレーションが用いられているが、対象が複雑な発光素子や光の波長に近い微細構造素子の場合、解析の誤差が大きくなるという問題があった。しかし、近年コンピュータの性能向上によって、光学シミュレーション分野では何百万本もの光線の追跡による照明解析や、波動方程式を近似なしで直接解くベクトル波動解析が実用的になった。

東芝は、これらの光学シミュレーション手法を照明用白色発光ダイオード (LED) やカメラ用 CMOS (相補型金属酸化膜半導体) センサの開発に適用した。精度よく性能を見積もることで試作回数を削減し、開発期間を短縮している。

In the conventional optical simulation technique used for the design of optical devices, there has been a problem that the analysis error becomes large in the case of light-emitting elements with a complicated or fine structure corresponding to the wavelength of the light. With the drastic increase in computation power, illumination analysis by tracing several million rays and vector wave analysis by solving wave equations without approximation have recently become available for practical use in the field of optical simulation.

Toshiba has applied these analysis techniques to the development of white light-emitting diodes (LEDs) for general lighting and complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) sensors for camera modules, and confirmed that estimation of performance with high accuracy makes it possible to shorten the development period by the use of such simulations instead of trial production.

1 まえがき

近年、LEDは発光効率の向上が著しく、水銀などの有害な物質を含まないため、蛍光灯や白熱電球に代わる新光源として注目されている。白色化などの付加価値を付けたり、発光効率を向上させるため、LEDの構造は複雑になってきている。白色LEDは青色又は紫外のLEDと蛍光体で構成され、LEDで蛍光体を励起し、発光させることで白色の光を生み出している。また、発光効率を高めるため、LEDの表面や内部にサブミクロンサイズの微細な構造を作ることも試みられている。

CMOSセンサは、CCD (電荷結合素子) センサに比べて低コストで消費電力が少ないという利点があり、小型カメラ向けでは主流になりつつある。低コスト化のため画素サイズは年々小さくなり、2.2 μm から1.75 μm 、更に1.4 μm になろうとしている。

これらの光学素子を開発するとき、その構造解析に光学シミュレーションを用いている。以前はコンピュータ能力の制限から、サンプリングが不足したり近似解法を採用せざるをえず、十分な計算精度が得られない場合があった。しかし、近年のコンピュータの性能向上により、複雑で微細な構造の解析が正確にできるようになってきた。

ここでは、東芝が照明用白色LEDやカメラモジュール用 CMOSセンサに適用した、光学シミュレーションの概要について述べる。



2 光学シミュレーションの手法

これらの光学素子を解析する光学シミュレーションの手法には大きく分けて2種類ある。それらの比較を表1に示す。

一つは、光を“粒子の流れ”とみて粒子の軌跡を光線として扱う手法で、一般に“幾何光学”と呼ばれる⁽¹⁾。光線を追跡していくことから“光線追跡法”とも呼ばれる。対象物の構造が波長に比べて十分大きい場合に適用できる。レンズ、ミラーなどの光学部品や、プロジェクターなどのディスプレイ、照明器具の設計に用いられている。

表1. 光学解析手法の比較

Comparison of geometric optics and wave optics analysis

項目	光学シミュレーション手法	
	幾何光学	波動光学
基礎法則	スネルの法則 	波動方程式 
解析手法	光線追跡法 (照明解析)	FDTD法, RCWA, 境界要素法
原理	屈折	回折
対象物の寸法	mm ~ m (波長よりかなり大きい)	nm ~ μm (波長とほぼ同じ)
適用	ディスプレイ, 照明レンズ, ミラー	微細光学素子, 光導波路薄膜発光体 (LED, OLED)

カメラ用レンズの設計は古くからこの手法で行われていた。レンズは通常円形であるため、軸対象の2次元モデルで扱うことができる。必要となる光線数は数本からせいぜい十数本であるため、計算の負荷が小さく、1990年代にはパソコン(PC)レベルのコンピュータで最適化設計を行うことが一般的になっていた。

2000年代になってコンピュータの性能が向上し、数百万本以上の光線を用いて、3次元(3D)モデルで照度や輝度を計算する“照明解析”が実用的になり、LEDをはじめとする様々な光学部品の開発に使われるようになった。

もう一つは、光を“波”として扱う“波動光学”という手法である。光は電磁波であるため、Maxwell方程式を解くことで厳密解が得られる。これまでは計算時間がかかるため、近似解を用いるのが一般的であった⁽²⁾。しかし、近似手法によっては偏光が扱えず、波長以下の微細構造の解析で誤差が大きくなる、といった問題があった。

近年のコンピュータの性能向上により、波動光学分野では、Maxwell方程式を近似なしに解くFDTD (Finite Difference Time Domain) 法、RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis) や境界要素法などのベクトル波動解析手法が使えるようになり、微細構造の解析が正確にできるようになってきた⁽³⁾。これにより、波長よりも短い周期の回折格子や数十nmの薄膜で構成されるLED、及びOLED (Organic Light Emitting Diode) の発光部周辺の解析ができるようになった。また、近接場やフォトニック結晶といった新しい光学デバイスの解析にも適用できる。

3 照明解析の白色LEDへの適用

青色や赤色LEDのチップ及びパッケージの設計には照明解析が使われており、要求される光束や配光分布が得られるように材質や形状が設計されている。しかし、白色LEDでは蛍光体を用いているため、従来の手法は適用できなかった。ここでは、一般的な青色LEDで黄色蛍光体を励起し、青色と黄色の混色で白色を出す方式への適用について述べる。照明解析シミュレータは市販のツールを用いた。

図1に示すように、通常白色LEDは、波長440～450nmの光を出す青色LEDのチップの周りに、樹脂中に分散された数 μm から数十 μm の蛍光体が充てんされている。青色LEDから出た光は蛍光体粒子に散乱されながら、一部は蛍光体に吸収されて黄色光に変わり、残りはそのまま外部に放出される。この青色光と黄色光が混合して白色になる。

シミュレーションのスキームを図2に示す。まず、青色光がLED光源から発生し、その一部が蛍光体に吸収される現象を計算する。次に、蛍光体に吸収された光は所定の量子効率で黄色光に変換されるため、蛍光体を二次光源として黄色光を

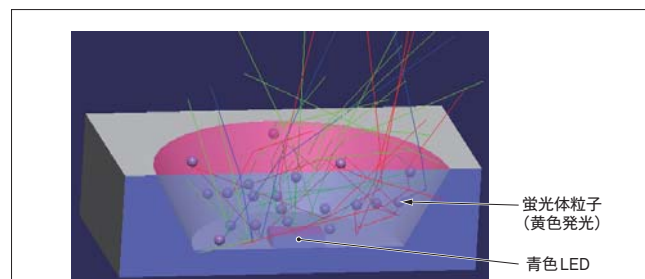


図1. 白色LED内部の青色LEDと黄色蛍光体 — 青色LEDから出た光の一部は黄色蛍光体に吸収されて黄色光に変わり、青色光と黄色光が混合して白色光になる。

White LED with blue LED and yellow phosphor

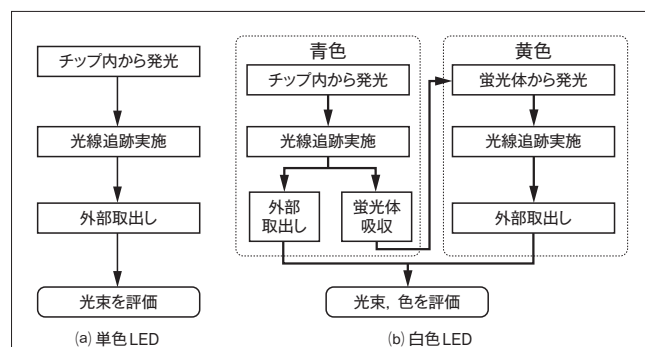


図2. LEDのシミュレーションスキーム — まず、青色光がLED光源から発生し、その一部が蛍光体に吸収される現象を計算する。次に、蛍光体を二次光源として黄色光を発生させ、光の伝搬をシミュレーションする。

Scheme for optical simulation of LEDs

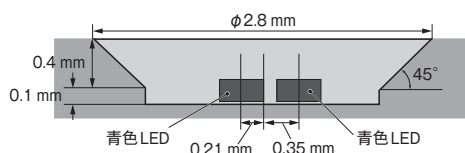
発生させ、光の伝搬を計算する。

通常、蛍光体粒子は個々の粒子形状をモデル化するのではなく、内部に球形の粒子が分散した樹脂を体積散乱体としてモデル化している。蛍光体の寸法は光の波長に比べて十分大きいので、個々の蛍光体粒子をモデル化しても精度上は問題なく計算できる。しかし、モデルが複雑になり計算時間も長くなるため、粒子形状や表面状態の影響を調べるとき以外は体積散乱モデルを使用している。体積散乱はMie (ミー) 散乱理論^(注1)に基づくもので、樹脂の屈折率、粒子の屈折率、粒径、密度から散乱を計算できる。一般に、蛍光体の正確な屈折率や吸収率を測定することは困難である。当社は、複数の実験サンプルの光学特性を測定し、その結果から蛍光体物性値を求めている。

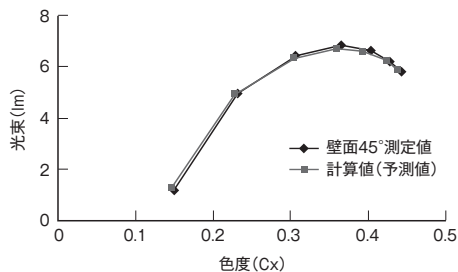
試作した白色LEDの色度と光束の関係を、計算結果と合わせて図3に示す。蛍光体の濃度を変えて色度(Cx, Cy)^(注2)を変え、光束の計算と実験の結果を比較した。白色LEDの光束が2%以下の誤差で推定できていることがわかる。

(注1) 球形の粒子による光の散乱現象で、粒子のサイズが非常に大きくなると、ミー散乱と幾何光学の二つの手法は計算結果が類似してくる。

(注2) Cx, Cyは、色度座標を示す。



(a) 青色LEDの位置



(b) 色度と光束

図3. 白色LEDの色度と光束の関係 — 蛍光体の濃度を変えたときの色度を変え、光束の計算と実験の結果を比較した。白色LEDの光束が2%以下の誤差で推定できている。

Relationship between chromaticity and luminous flux of white LED

4 ベクトル波動解析のCMOSセンサへの適用

CMOSセンサは、携帯電話のカメラモジュールなどで受光素子として用いられている。CMOSセンサでは、受光効率を上げるとともに、ほかの色の画素への光の混入を少なくするように画素構造が設計される。CMOSセンサの画素部構造を図4に示す。CMOSセンサの画素部には、受光部の上に光を集めるマイクロレンズや、色分離のためのカラーフィルタが組み込まれている。従来、設計には光線追跡に基づく照明解析が用いられていた。しかし、画素サイズが $2\mu\text{m}$ 以下に小さくなり、光線追跡法の適用が難しくなってきた。

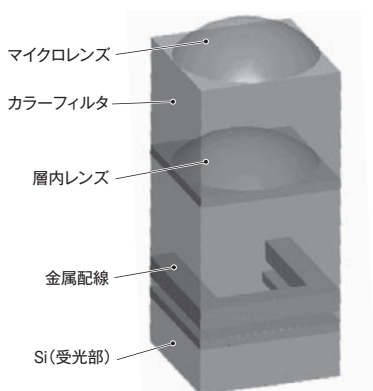


図4. CMOSセンサの画素部 — CMOSセンサの画素部には、受光部の上に、光を集めるマイクロレンズや色分離のためのカラーフィルタが組み込まれている。

Pixel structure of CMOS sensor

波動解析手法の選定にあたっては、次の点を考慮した。CMOSセンサの画素部には金属配線が存在する。金属表面での光のふるまいは偏光方向に依存するため、偏光を考慮したベクトル解析を用いる必要がある。また、定量的な受光効率の計算のためには、3D解析を行う必要があり、大規模なモデルを扱える手法を採用する必要があった。

当社は、ベクトル解析ができるFDTD法を採用し、数台のPCで分散処理を行うことで、大規模な3Dモデルを扱えるようにした。FDTD法はMaxwell方程式を時間依存で解く方法である。時間0から計算を実行し、定常状態になった時点で計算を打ち切り、解とする。複数の波長を同時に計算することもできる。

画素ピッチが $1.75\mu\text{m}$ での計算モデルを図5に示す。マイクロレンズ2枚を用いて受光部に光を導く構造である。計算は市販のツールを用いて行った。CMOSセンサの右側の画素では、カラーフィルタで光が透過しないが、左側の画素では、2枚のレンズを介して光が受光部のシリコン(Si)層に達する。計算した受光効率を試作品のそれと比較したところ、誤差は波動解析が2%、光線追跡が13%であり、波動解析を用いることで精度の高い結果が得られることがわかった。

また、FDTD法を用いることで、光の伝搬のようすや光の強度分布を図5(b)に示すように可視化することができる。更に、構成要素のどの部分で損失が発生しているかを明らかにすることもできるため、設計の改善に役だっている。

今後、画素ピッチが縮小するにつれ光線追跡法の誤差が大きくなっていくため、ベクトル波動解析の必要性はますます高まってくると考えられる。

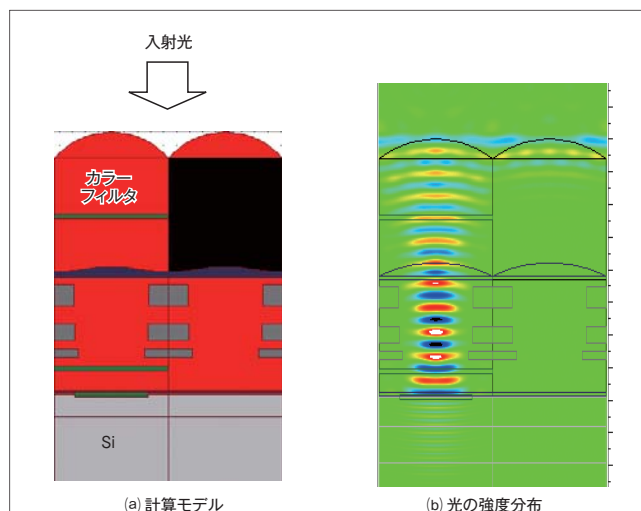


図5. CMOSセンサの光学シミュレーション結果 — CMOSセンサの右側の画素では、カラーフィルタで光が透過しないが、左側の画素では、2枚のレンズを介して光が受光部のSi層に達する。また、FDTD法を用いると、光の伝搬のようすと強度分布が可視化される。

Result of simulation of CMOS sensor

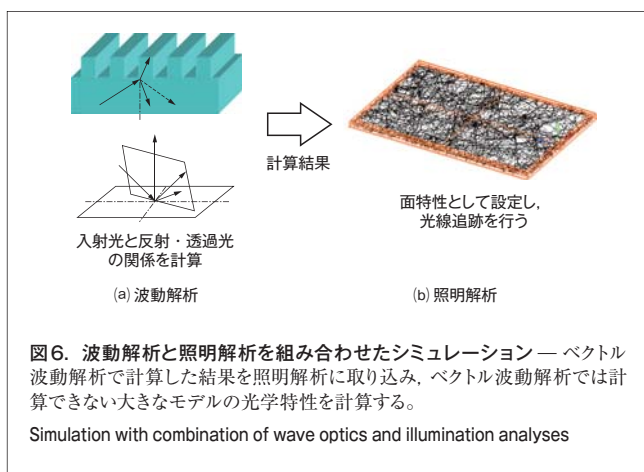
5 今後の取組み

5.1 波動解析と照明解析の組合せ

Maxwell方程式を直接解くベクトル波動解析手法は、たいへん強力なツールで、光に関しては波長変換も含めほとんどの現象を解析できる。しかし、波長の1/10以下でメッシュを切る必要があるため、モデルが大きくなりがちで、3D解析では数 μm 以上のモデルは事実上扱えない。

一方で、数 μm 以上の構造体で、その一部にサブミクロン以下の微細な構造をもつデバイスがいくつか存在する。例えば、サブミクロンの回折パターンを備えたLCD（液晶ディスプレイ）用バックライト導光板は、厚さが0.6 mm、長さは数十mm以上あり、とても波動解析では扱えない。また、最近、発光効率を高めるために、LEDチップの表面や内部にサブミクロンからミクロンオーダーの微細パターンが設けられているものがある。LEDチップの幅は150 μm 以上あり、これも波動解析では扱えない。

このようなデバイスでは、ベクトル波動解析の結果を照明解析に取り込んで計算することで、微細化構造の解析が正確に実施できる。概念を図6に示す。まず、FDTD法やRCWAなどのベクトル波動解析手法で、あらかじめ各入射角や波長に対する回折特性を計算し、データベース化しておく。照明解析シミュレータでは、特定の面の光学特性として、このデータベースを取り込めるようにしておけばよい。市販の多くの照明解析ソフトでは、“ユーザー定義面”としてこのような設定が可能である。



5.2 コヒーレンスの考慮

現行のシミュレーション手法で改善の余地が大きいのは、光のコヒーレンス^(注3)の扱いである⁽²⁾。レーザー光は一般にコ

(注3) 複数の波が重ね合わさるとき、波が打ち消し合ったり強め合ったりすることを干渉といい、コヒーレンス(Coherence)とは、干渉のしやすさ(干渉じまの鮮明さ)を表す。

ヒーレンスが高いため、レーザーを用いた測定器や加工機では干渉により発生する光強度分布が問題になることがある。

実際の光は、空間的にも時間的にも一定の“コヒーレンス長”を持ち、コヒーレンス長より短い距離ではコヒーレント(可干渉性あり)、長い距離ではインコヒーレント(可干渉性なし)になる。光は、照明解析を含む幾何光学では基本的にインコヒーレントとして扱われ、逆に、波動光学ではコヒーレントとして扱われる。したがって、幾何光学でコヒーレント光を、波動光学でインコヒーレント光を扱おうとすると矛盾が生じ、いくつかの困難に突き当たる。これについては、いくつかの手法でアプローチされている⁽¹⁾。

波動光学的手法では波長 λ の分布 $\Delta\lambda$ を設定することで、以下の式に基づきコヒーレンス長 Δl が表現できる。

$$\Delta l = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

波長分布に従って複数の波長で計算し、結果を重ね合わせることで指定したコヒーレンス長での結果が得られる。しかし、複数波長で計算することに伴う計算量や計算時間の増大が課題である。

6 あとがき

近年のコンピュータの性能向上によって光学シミュレーション分野では、何百万本もの光線を追跡することで解析する照明解析や、波動方程式を近似なしで直接解くベクトル波動解析が使えるようになった。当社は、これらの解析手法を照明用LEDやカメラ用CMOSセンサの設計に適用し、十分な精度が得られることを確認した。

光学シミュレーションは非線形性がほとんどなく、現実の現象を高い精度で計算できる。今後、計算速度の更なる向上や自動最適化機能などの充実により、この解析手法はますます使いやすくなると思われる、多くの製品の設計に適用していく。

文献

- (1) 牛山善太, ほか. シミュレーション光学. 東京, 東海大学出版会, 2003, 274p.
- (2) Hecht, E. Optics (4th ed.). San Francisco, Addison Wesley, 2002, 698p.
- (3) 渋谷真人, ほか. 回折と結像の光学. 東京, 朝倉書店, 2005, 226p.



岡田 直忠 OKADA Naotada, Ph. D.

生産技術センター 光技術研究センター主任研究員, 博士(工学)。光学部品, 光学システム, 光学検査, 及び光プロセスの研究に従事。応用物理学会, 日本光学会, レーザー学会会員。Optical Technology Research Center