

応答曲面法を用いたシミュレーションによる光学製品の設計技術

Design Technology for Optical Products Using Simulation Based on Response Surface Method

玉置 紗矢加 遠島 未希

■TAMAOKI Sayaka

■TOSHIMA Miki

近年、光学製品の設計には、光学シミュレーションが広く用いられている。光学シミュレーションでは設計対象の大きさによって波動光学解析と幾何光学解析が使い分けられており、これらの光学シミュレーション手法を用いることで、試作を行うことなく光学製品の性能を推定できる。しかし製品の構造が複雑になり設計パラメータが多くなると、シミュレーションの条件数が増大し計算時間が膨大になるため、効率的な設計技術の確立が求められている。

東芝はこれに応じて、少ないシミュレーション条件から大域的な範囲の結果を推定する“応答曲面法”を、光学シミュレーションと組み合わせることにより、効率的な光学製品の設計技術を確立した。その結果、シミュレーションの条件数を削減して設計することができ、開発期間を短縮することが可能になった。

Optical simulation technologies are now widely used in the design of optical products, such as light-emitting diodes (LEDs), complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) image sensors, and so on, instead of trial production in order to shorten the development period. Either wave-optics analysis or geometrical-optics analysis is generally applied according to the scale of the target product structure. With the increasing number of design parameters resulting from the growing complexity of structures in recent years, a great deal of time is required to implement all of the simulation conditions. In line with this trend, there is a need for efficient design technologies to reduce the time required for simulations.

Toshiba has developed an efficient design technology for optical products by combining the most suitable response surface method and optimization method with optical simulation technologies. Through the application of this technology to the development of optical products, we have confirmed that it can reduce the number of simulation conditions and shorten the product development period.

1 まえがき

東芝は、照明器具に使われているLED（発光ダイオード）や、スマートフォンやデジタルカメラに使われているCMOS（相補型金属酸化膜半導体）イメージセンサなど、様々な製品に光学設計技術を適用している。近年、製品のライフサイクルが短くなっていることから、光学製品においても開発期間の短縮が求められている。

製品の開発期間を短縮するには試作回数を削減することが重要であり、試作回数を削減するには光学シミュレーションによる性能予測が有効である⁽¹⁾。しかし、構造が複雑な製品では設計パラメータが多く、考慮可能な全ての設計パラメータの組合せについて光学シミュレーションを実施すると、膨大な計算時間を要してしまう。そこで光学シミュレーションに要する時間を短縮するために、応答曲面法と最適化手法を導入した。しかし、応答曲面法や最適化手法には様々な方法が存在するため、光学製品の設計に適した方法を選定する必要がある。

ここでは、応答曲面法や最適化手法の選定方法と、その適用例について述べる。

2 応答曲面法を用いた光学製品の設計

シミュレーションによる光学製品の設計フローを図1に示す。

- (1) 光学シミュレーション手法の選定 光学シミュレーションの手法には、大きく分けて幾何光学解析と波動光学解析の2種類がある。前者は光を光線として扱う手法で、解析する対象物が光の波長に比べて十分大きい場合に適用する。一方、後者は光を電磁波として扱う手法で、解析する対象物が光の波長と同程度か、それ以下の微細な構造の場合に適用する。一般に、波動光学解析は偏微分方程式を解くため、幾何光学解析に比べて計算時間が長い。そのため、1回のシミュレーションに要する時間や、設計パラメータの数、シミュレーションの条件数などを考慮して、現実的な計算時間に収まるかどうかを見積もる必要がある。
- (2) 応答曲面モデルの作成 限られた開発期間で設計を完了させるためには、少ないシミュレーション条件で解空間を把握する必要がある。そのために、シミュレーション条件をサンプリングする。サンプリングの方法には、設計パラメータの全ての組合せについて考慮する要因計画法や、直交表を用いてサンプル数を削減する方法、サン

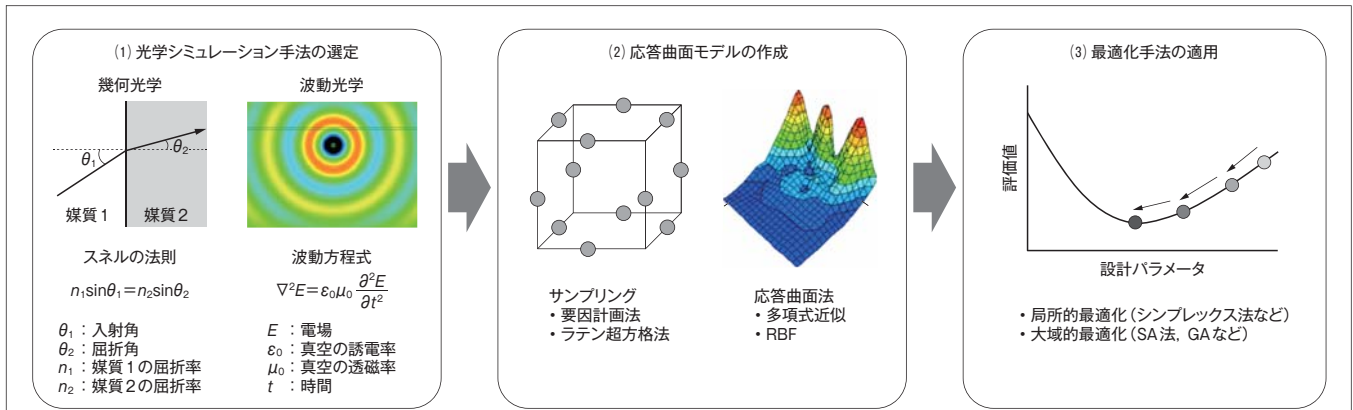


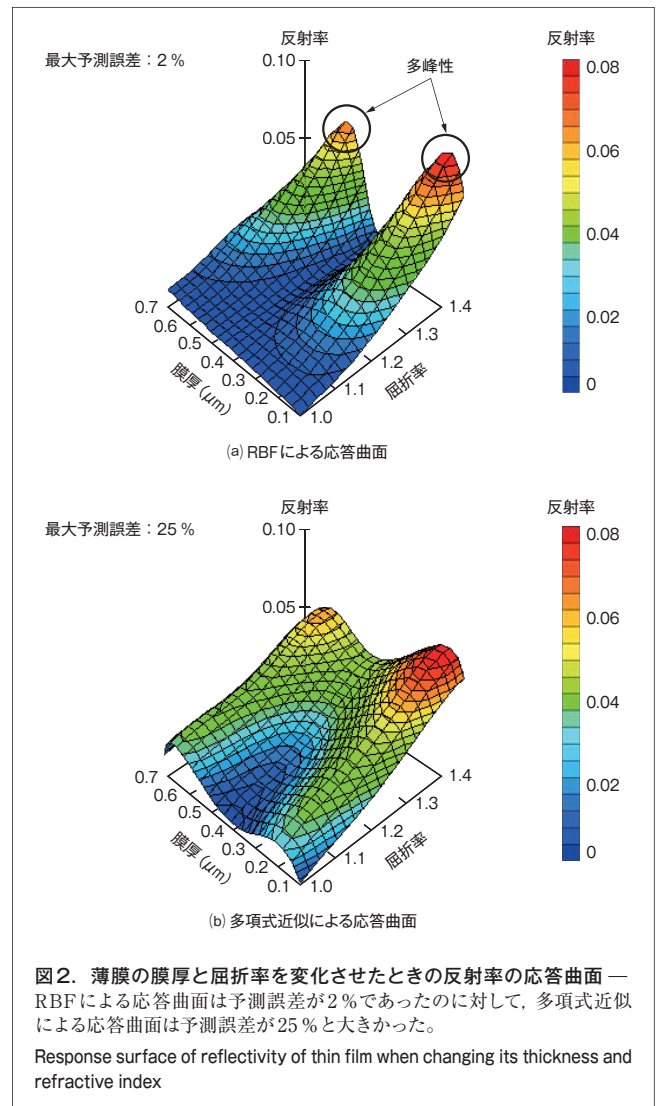
図1. シミュレーションによる光学製品の設計フロー — 解析対象の大きさによって光学シミュレーションの手法を選定し、サンプリングした条件ごとにシミュレーションを実施して応答曲面を算出する。この応答曲面を用いて最適化することで、適正な構造を導出する。

Flowchart of optical product design using simulation

ル数をあらかじめ指定して均等にサンプリングするラテン超方格法⁽²⁾などがある。シミュレーションの条件数や、予測精度、相互作用の有無などによって、これらの方法を使い分ける必要がある。選定した方法でサンプリングした各シミュレーション条件についてシミュレーションを実施し、サンプリング点での離散的な解から応答曲面法を用いて解空間を作成する。応答曲面法は複数のサンプル点を補間して連続的に解を表現するもので、シミュレーションを実施していない条件での解を予測できる。予測精度は、サンプル点数や、近似関数、補間法などに依存する。応答曲面法には多項式近似のモデルや、ベースとなる関数を用いてデータを補間するRBF (Radial Basis Function) モデル⁽³⁾などがある。

具体的な適用例として、吸収がある薄膜に波長 $1 \mu\text{m}$ の光を入射したときの反射率を求める計算をモチーフとして、これらの方法を検討した結果について述べる。ラテン超方格法でサンプリングを行い、薄膜の膜厚と屈折率を変化させたときの反射率の応答曲面を図2に示す。応答曲面の精度を検証するために、膜厚と屈折率を網羅的に変化させた場合のシミュレーション結果と比較したところ、RBFでは最大予測誤差が2%であったのに対し、多項式近似では最大予測誤差が25%と大きかった。RBFモデルは、多峰性を示す複雑な解空間の近似に適しているため、反射率計算においてはラテン超方格法とRBFモデルを組み合わせることで、少ないサンプル数で十分な精度の応答曲面が得られることがわかった。

(3) 最適化手法の適用 作成した応答曲面から最適化手法を用いて最適解を求める方法について述べる。一般に解空間がパラメータに対して比較的単調な変化を示している場合は局所的最適化を使用し、解空間が多峰性の場合には大域的最適化を使用して広範囲に最適解を探



索する。局所的最適化にはシンプレックス法などがあり、大域的最適化にはSA (Simulated Annealing) やGA

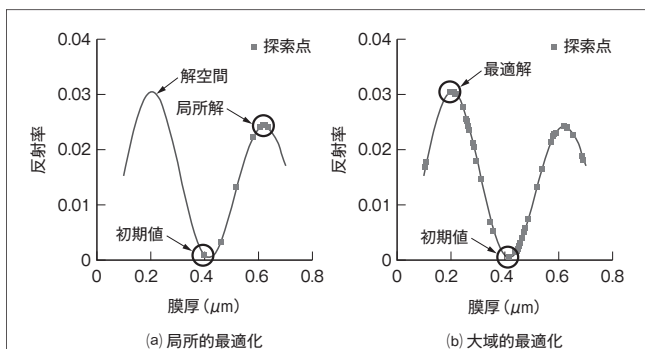


図3. 局所的最適化と大域的最適化 — 局所的最適化は、探索点数が少ないが局所解になっている。一方、大域的最適化は、探索点数が多いが最適解を探索できている。

Examples of relationship between reflectivity and film thickness obtained by local optimization and global optimization methods

(Genetic Algorithm) などがある⁽⁴⁾。

適用例として(2)でも用いた薄膜での反射率の計算をモチーフに、局所的最適化と大域的最適化の比較を行った結果について述べる(図3)。ここでは、薄膜の屈折率をある値に固定し、膜厚の初期値を0.4 μmとしたときに、反射率が最大になる膜厚を求めた。局所的最適化では探索回数が少ないものの局所解に陥っていることがわかる。一方、大域的最適化では探索回数が多いものの全体での最適解が得られている。これらの結果から、解空間が単純であれば局所的最適化を使用し、局所解が複数存在する複雑な解空間の場合は大域的最適化を使用して広範囲に最適解を探索する方法が適していることがわかった。

3 CMOSイメージセンサへの適用例

CMOSイメージセンサは光や画像を電気信号に変換する電子部品で、デジタルカメラやスマートフォン、車載用カメラなど、様々なデバイスに搭載されている。その受光面の構成はR(赤)、G(緑)、及びB(青)から成る3色の画素の集合体となっており、特にモバイル製品向けのセンサは画素の配列ピッチが約1 μmである。解析対象となる画素構造が可視光の波長に近い大きさであるため、光は回折や干渉などの電磁波としての性質を強く示すことから、光学シミュレーションの手法は波動光学解析を適用した。センサ内での光の伝搬をシミュレーションすることで、センサの受光感度とノイズの指標である画素間の混色の程度を把握できる。

今回のシミュレーションに適用したCMOSイメージセンサの断面構造を図4に示す。光を集光するマイクロレンズの厚さと曲率、光をR、G、及びBの3色に分離するためのカラーフィルタの膜厚、及びその他の構造の膜厚を設計パラメータとした。

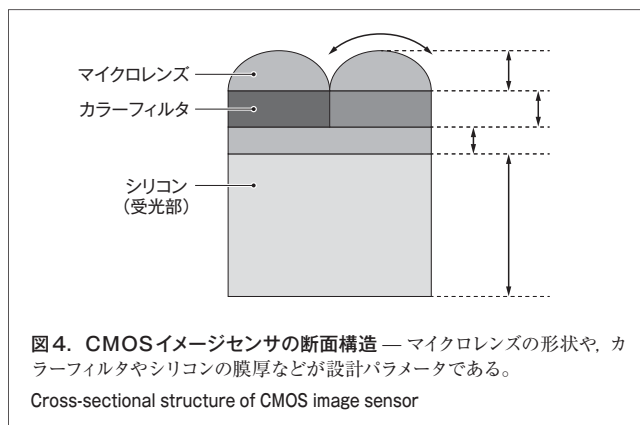


図4. CMOSイメージセンサの断面構造 — マイクロレンズの形状や、カラーフィルタやシリコンの膜厚などが設計パラメータである。

Cross-sectional structure of CMOS image sensor

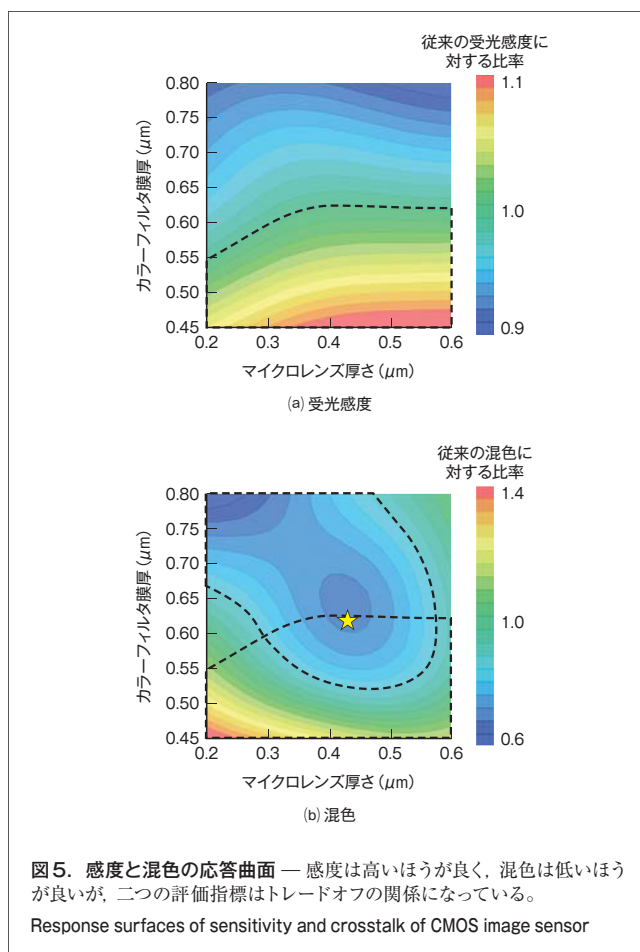


図5. 感度と混色の応答曲面 — 感度は高いほうが良く、混色は低いほうが良いが、二つの評価指標はトレードオフの関係になっている。

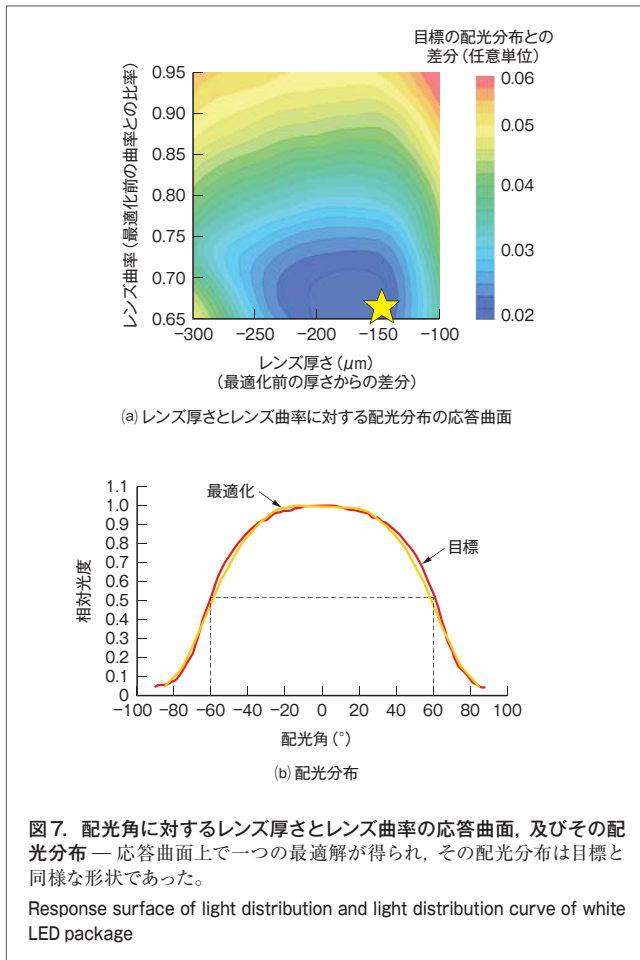
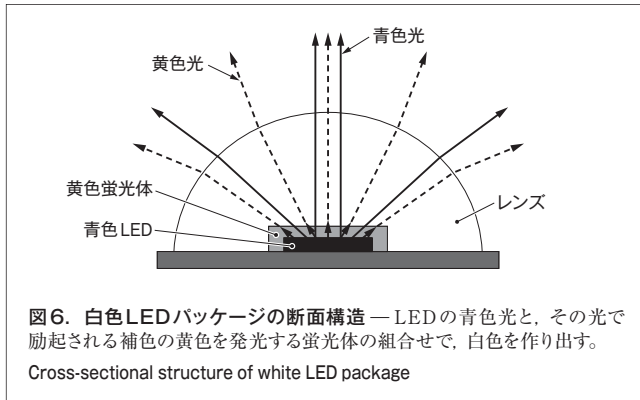
Response surfaces of sensitivity and crosstalk of CMOS image sensor

ここでは受光感度を低下させずに、ノイズ成分である混色を抑制する構造を探索した。図5がその探索結果であり、カラーフィルタの膜厚とマイクロレンズの厚さに対する感度と混色の応答曲面を示している。図5(a)、(b)の応答曲面図において、それぞれ右側のスケールバーの1.0が現状の性能であり、これらの応答曲面図から感度の高さと混色の少なさはトレードオフの関係にあることがわかる。また、応答曲面図中に破線で示した領域が許容スペックであり、黄色の星印が感度を維持したまま混色をもっとも抑制できるカラーフィルタ膜厚と

マイクロレンズ厚さを示している。

4 白色LEDパッケージへの適用例

近年、白色LEDは長寿命で高効率な照明用光源として注目されており、窒化ガリウムをベースにした高輝度青色LEDの実用化により実現された。白色LEDパッケージの断面は図6に示した構造になっており、青色LEDチップの周りに黄色の蛍光体を配置し、レンズで封止している。LEDの青色光と、



その光で励起される補色の黄色を発光する蛍光体を組み合わせることで白色を作り出している。白色LEDパッケージの構造は数mmと可視光の波長に対して十分大きいため、幾何光学解析を適用した。白色LEDパッケージでは、配光分布が重要な指標となっている。配光は光源からどの方向にどのくらいの強度の光が出ているかを示す指標であり、所望の配光分布を得るための構造設計が必要になる。

シミュレーション結果の例として、図7(a)にレンズの厚さと曲率をパラメータとした場合の配光分布について、目標の配光分布との差分を応答曲面で示す。青色の領域が目標の配光分布に近いことを示しており、この結果から配光分布はレンズの厚さと曲率の両方のパラメータに依存していることがわかる。この応答曲面を用いて最適化を実施したところ、図7(a)に黄色の星印で示したレンズ厚さとレンズ曲率において、図7(b)に示すようにほぼ目標どおりの配光分布が得られた。

5 あとがき

光学製品の設計において短時間で高度な設計を行うために、光学シミュレーションに応答曲面法と最適化手法を組み合わせた設計技術を確立した。2種類の製品に対して、開発した光学シミュレーションと最適化手法を適用したところ、それぞれ現実的な時間内で所望の性能が得られることを確認した。

今後、新たな光学製品や光プロセスの設計に対しても、今回確立した設計技術を適用することによって、設計の効率化を図っていく。

文献

- 岡田直忠. 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. 東芝レビュー. 64, 5, 2009, p.34 - p.37.
- Stocki, R. et al. Efficient sampling techniques for stochastic simulation of structural systems. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences. 14, 1, 2007, p.127 - 140.
- Buhmann, M. D. Radial basis functions. Acta Numerica. 9, 2000, p.1 - 38.
- 長尾智晴. 最適化アルゴリズム. 東京, 照晃堂, 2000, 209p.



玉置 紗矢加 TAMAOKI Sayaka

生産技術統括部 生産技術センター 光技術研究部。
光学設計及び光学シミュレーション技術の開発に従事。
Optical Technology Research Dept.



遠島 未希 TOSHIMA Miki

生産技術統括部 生産技術センター 光技術研究部。
光学設計及び光学シミュレーション技術の開発に従事。
Optical Technology Research Dept.