

# 高精度ゴーストシミュレーションツールの開発

Development of High-Precise Ghost Simulation Tool

生野 恵子*	古後 将司**	松坂 慶二*
Keiko IKUNO	Shouji KOGO	Keiji MATSUSAKA
中谷 通*	直井 由紀*	棚橋 大輔*
Toru NAKATANI	Yuki NAOI	Daisuke TANAHASHI

## 要旨

撮像用途の光学系では、正規の光路以外の光路を経て撮像面に到達する光束は、ゴースト光として画像品位低下の原因となる。これまで実施されてきたゴーストシミュレーションでは、計算結果と実写結果とで乖離がある等の課題があり、設計段階でゴーストを把握することが困難であった。

今回、レンズ面での反射に起因するゴーストを、精度高くシミュレーション可能なツールを開発した。本ツールではレンズ面のコート特性も反映でき、波長ごとのゴースト強度を高精度で計算することでコート特性に依存するゴーストの色味を設計段階で確認可能である。合わせて計算結果を画像化するツールも開発し、実写評価を代替する手法としての有用性を高めた。本ツールを使用することにより、課題となるゴーストの抽出、および対策の効果確認を設計段階で実施でき、試作コストの削減、納期短縮が可能である。本稿では、新たに開発したシミュレーションの有用性について報告する。

## Abstract

In imaging apparatuses, image quality is often degraded by ghosts arising from light flux entering the image surface, without passing through the normal path. There were some problems in terms of preciseness in past ghost simulation, so it was difficult to predict ghost effects in the designing stage.

We developed a new method to precisely simulate ghosts caused by reflections on lens surfaces. Our new method also can take into account of surface coating specification, so that it is possible to simulate ghosts at specific wave lengths. By composing ghost images of each wave length, we can estimate color distribution of a ghost image. Moreover, we also developed a display tool that helps us figure out simulated ghost images. The results of our simulation closely correspond with photographed images. Our new method can be used as a substitution for ghost evaluation instead of photographed images. It enables us to estimate ghost effects and take counter-measures for ghost reduction in the designing stage. It is effective to reduce preproduction cost, and shorten the preproduction stage.

Here, we report the results of our ghost simulation.

\* コニカミノルタオプト(株) 技術開発本部 技術開発センター  
\*\* コニカミノルタオプト(株) 光学事業本部 開発統括部

## 1 はじめに

撮像光学系の開発において、ゴースト光は重大な性能劣化の原因となるため、その対策は大きな課題となっている。試作機でゴーストが発生すると、原因解析、対策に多大な工数が必要となり、開発日程の遅れにつながる場合もある。効率の良い開発のためには、設計段階でゴーストを発見し、早期のフィードバックをかけることが重要である。

ゴースト光の発生要因には、大きく分けて、「レンズ有効領域内での面間反射」、「レンズ有効領域外での反射」、「メカ部材での反射」、およびそれらの複合ゴーストが挙げられる。このうち、「レンズ有効領域内での面間反射」によるものは多くの撮像光学系で頻繁に発生し重要度が高い。

弊社では、従来から、シミュレーションによるゴースト光解析の取り組みを実施しているが、これまでの手法では、出力される照度値が正確とは言えず、シミュレーション結果と実写が必ずしも一致しないという課題があった。あるゴーストが問題となるか否かは、ゴーストのピーク強度だけでなく、画面上での2次元分布、正規光のパワーなど複数の要因が影響する。これまでは問題となるゴーストについての明確な基準がなく、判断が曖昧になっていたため、試作後に初めて問題となるゴーストが指摘されるという事例も多くみられた。以上の課題から、定量的なゴースト評価手法の開発が求められていた。

今回の取り組みでは、「レンズ有効領域内での面間反射」のゴーストに焦点を当て、解析ツールを開発した。自社製ソフトをベースに、正確な照度分布を出力するための計算アルゴリズムを開発したほか、ゴースト像の2次元画像表示など、判断を助ける表示機能を追加した。

光学系開発の初期段階でゴースト解析を行ない、結果を随時フィードバックすることによって、最適な設計を早期に行うことが可能となった。また、波長毎に照度分布を解析することにより、ゴーストの色味を予測することが出来、コート設計への的確なフィードバックが可能になった。さらにゴースト像を2次元表示することで、コート変更時の色味変化をわかりやすく表示できるため、顧客への提示資料としても有効である。

本稿では、我々が開発したゴーストシミュレーションツールを紹介し、量産機種に適用した事例を通して、本シミュレーションツールの有用性について報告する。

## 2 ゴーストシミュレーション

### 2.1 開発プロセスにおける活用の流れ

開発プロセスにおける活用について、Fig.1 の流れに沿って説明する。

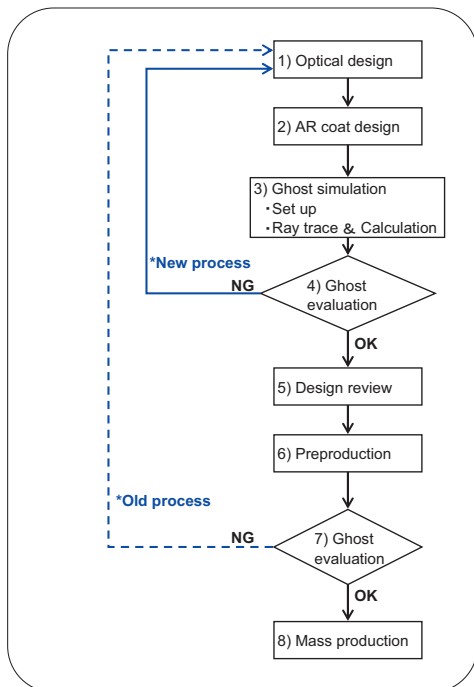


Fig.1 Flow chart of development process and ghost evaluation stage

#### 1) 光学設計

最初に、要求仕様や目標を達成できるように光学設計を行う。

#### 2) 反射防止 (AR) コート設計

次に、設計した光学系の各レンズ面の反射防止コートを設計する。波長帯域やレンズ材料ごとに標準的に使用されているコート構成がある場合には、それを使用しても良い。

#### 3) ゴーストシミュレーション

コートを設定した光学系に対し、ゴーストシミュレーションを実施する。光学系の用途等に合わせ、シミュレーション条件を設定する。抜けが無いよう網羅的に条件を設定し (例えば、全ての2面反射の組み合わせ、光源位置は半面角0度から90度まで5度きざみ等)、シミュレーションする。

#### 4) ゴースト評価

各種出力結果より、ゴーストを評価し、問題性の有無を判断する。例えば、ゴーストのピーク強度を既存の光学系で問題となったゴースト光の値と比較する事で、定量的な評価が可能である。また、波長毎の解析結果を合成することで、ゴーストの色味を確認することも可能である。

ゴースト実写画像とシミュレーション結果のデータを蓄積する事により、問題となるゴースト光のピーク強度

の閾値を設定する事も可能である。ゴーストの評価には、ピーク強度以外にも、画面上での位置、分布、色味等、様々な要素があり、光学系の用途や使用者の嗜好によっても判断が分かれるため、ピーク強度のみから一概に問題となるかどうかの判断をすることは難しいが、ピーク強度と出力したゴーストの2次元画像を用いることにより、ゴーストを視覚的に把握できるので、評価時の判断が容易となる。また、光学を専門としない他部門や顧客への説明にも有効である。

発生するゴーストを問題と判断した場合には、ゴーストの原因箇所を特定し、対策を検討する。後述の各ゴースト光路の照度、およびパワー一覧表により、課題となるゴーストが発生する光源位置やゴースト光路 (反射面の組み合わせ) が確認できる。ゴースト光の経路や入射角度等は、光路図で確認可能である。対策としては、主に次の2つがある。1つは、反射面のコートの変更で反射率を下げ、ゴースト光全体のパワーを弱める方法。もう1つは、曲率の変更等、光学構成を修正することによりゴースト光の経路を変更する方法である。対策後、再度シミュレーションを実施し、ゴースト光への効果を確認する。

#### 5) 出図

ゴースト評価の結果、問題ないと判断できれば、出図、試作へと進める。

従来から、出図前のゴーストシミュレーションは行われていたが、シミュレーション精度の不足から問題となるゴーストを予測することが出来ず、試作後に初めてゴーストの存在が明らかになる事例もあった。このような場合、一旦試作まで進んだ段階で、光学設計、コート設計をやり直すことになり、開発工数のロスが大きい (Fig.1 : 7→1, 2)。

今回の取り組みでは、シミュレーションツールの精度を向上させ、出図前に問題となるゴーストを発見し、対応することが可能となった。

以上のように、本ツールによるゴーストシミュレーションを開発プロセスの初期段階で取り入れることにより、ゴーストによる工数ロスの削減、開発効率の向上が期待できる。

### 2.2 ゴーストシミュレーションの高精度化

今回我々が開発したゴーストシミュレーションツールについて、高精度化した部分に重点を置き説明する。シミュレーションの過程は、1) 条件設定、2) シミュレーション実行、3) 出力の3段階に大別される。Fig.2 のゴーストシミュレーションの模式図に沿って説明する。

#### 1) シミュレーション条件の設定

##### ①各レンズ面のARコートの設定

各レンズ面に施すARコートは、各層の屈折率、膜厚のデータにより設定する。

従来のシミュレーションでは、簡便のために、各面に

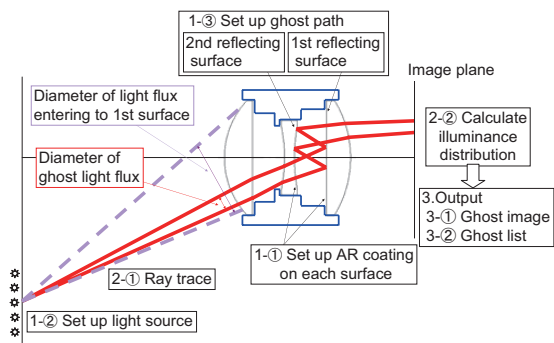


Fig.2 Diagram of the ghost simulation

一律の反射率を与える方法が用いられる場合が多かった。コートは反射率は光線の波長と入射角度に依存し、各面への光線の入射角度は光源位置（画角）や、ゴースト光路により異なることから、反射率を一定としてシミュレーションを行うと、結果に誤差が生じる要因となりうる。本ツールではコート構成データから光線ごと、および波長ごとに入射角に応じて反射率を求めているため、ゴースト光の強度を正確に計算できる。

### ②光源の設定

光源の位置や波長を設定する。複数の波長とウェイトを設定することで、実際の光源のスペクトルに合わせた計算が可能である。さらに、光源をRGBの3成分に分け、それぞれについて像面上での照度分布を計算することで、ゴーストのカラー画像生成も可能である。

また、点光源だけでなく、複数の点光源の結果を合成することで、面光源でのシミュレーションも可能である。シミュレーション時に光源サイズを考慮することで、より正確な照度分布が計算できる。

### ③ゴースト光路の設定

反射面を指定することで、ゴーストの光路（各面を通過する順序）を設定する。通常、問題となるゴーストの光路は、2つの面での反射によるものである。反射回数が4回あるいは、6回以上のゴースト光路も存在するが、通常は1面での反射率は数%以下であり、反射回数が多くなるに従ってゴーストのパワーが弱くなるため、実用上は問題とならないことが多い。

## 2) シミュレーション実行

### ①光線追跡

設定したシミュレーション条件で、ゴースト光の光線追跡を実施する。今回開発したツールでは、像面に到達する光束範囲を事前に計算することにより、効率的に光線追跡を行い、実用的なシミュレーション時間を実現している。従来は、光学系の第1面の有効径全体に光線を入射させる方法がとられる事が多く、第1面の有効径に対しゴーストの光束径が非常に小さい場合には、像面に到達しない光線を多数追跡する事となり、非効率であった。特に広角レンズでは、その傾向が顕著であり、計算時間が膨大となるため実質上シミュレーションできない

場合が多かった。効率的な光線追跡により、従来はシミュレーションが困難であった光束径の小さいゴーストにも対応可能となった。

### ②照度分布計算

光線追跡結果より、ゴースト光の像面上での照度分布、そのピーク強度、パワー等を計算する。一般に照度分布は一様ではなく、ゴースト光によって、中心部が強い場合や、周辺部が強い場合等、様々である。ピーク強度はその照度分布中のピーク値である。また、像面上に到達した全エネルギーがパワーである。ピーク強度やパワーを、正規の結像に寄与する光束の値に対して規格化する事により、異なる光学系間でもゴースト光の影響を定量的に比較可能である。

## 3) 各種出力

### ①ゴースト光のシミュレーション画像

2面反射の全ての組み合わせのゴースト光を重ね合わせた、実写に近いシミュレーション画像や、特定の光路のみのゴースト光のシミュレーション画像が出力可能である。実際の出力例については後述する。

### ②各ゴースト光路のピーク強度一覧表

各光源位置、波長、反射光路ごとに、ゴースト像のピーク強度やパワーの一覧表を出力することにより、問題となるゴースト光の発生条件やゴースト光路をすばやく特定できる。例としてデジタルスチルカメラ用レンズにおけるシミュレーション結果をTable 1 に示す。Fig.3 は、Table 1 に対応するゴーストの実写画像である。Fig.3 中の各ゴースト像の記号は、Table 1 のゴースト光路の記号と対応している。今回開発したツールによるシミュレーション結果のピーク強度と、実写画像での目立ちやすさには相関があること、従来と比較して相関が改善していることが確認できる。

Table 1 Example of simulation results

Ghost path	New simulation		Old simulation	
	Peak intensity (arb. unit)	Power (arb. unit)	Peak intensity (arb. unit)	Power (arb. unit)
A	1.00	0.16	1.00	0.20
B	0.26	0.03	0.13	0.04
C	0.15	0.02	0.17	0.02
D	0.13	1.00	0.01	1.00

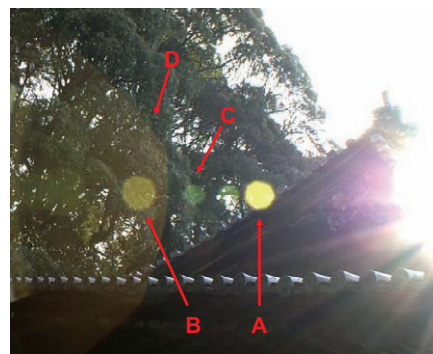


Fig.3 Photographed ghost image corresponding with Table 1

### 3 適用例

今回開発したシミュレーションツールの適用例を2例紹介する。

#### 3.1 DSC用レンズ

本シミュレーションツールの効果を実証するため、デジタルスチルカメラ用レンズの1つのレンズ面に、異なる反射防止コート（コート1および、コート2）を施した2種類のレンズユニットを作成し、反射防止コートの違いによるゴースト光の色味変化をシミュレーションと実写とで比較した。Fig.4 のa)とb)がコート1を施した場合の実写画像とシミュレーション結果、c)とd)がコート2を施した場合の実写画像とシミュレーション結果である。それぞれの実写では、同一条件の光源を用いて撮影を実施し、シミュレーションでは実写と同条件の光源を設定した。Fig.4 a), b)は全体的に赤みの強いゴーストが発生しており、Fig.4 b)で見られる強度の強い赤いゴーストが、Fig.4 a)の実写でも観察できる。コート2を施したレンズユニットでは、実写においても、シミュレーションにおいても、Fig.4 a), b)で見られる赤いゴーストはなくなり、全体的に青味が強いゴーストとなっている。ゴーストの形状および色味は、レンズ面のコート特性に依存して変化するが、シミュレーションによる出力は、実写とよく一致することが確認できた。今回開発したツールでは、レンズ面のコート特性を正確に反映でき、設計段階でゴーストの色味、照度分布を確認できることから、試作前に光学系に最適なコートを選定する場合にも、有効である。

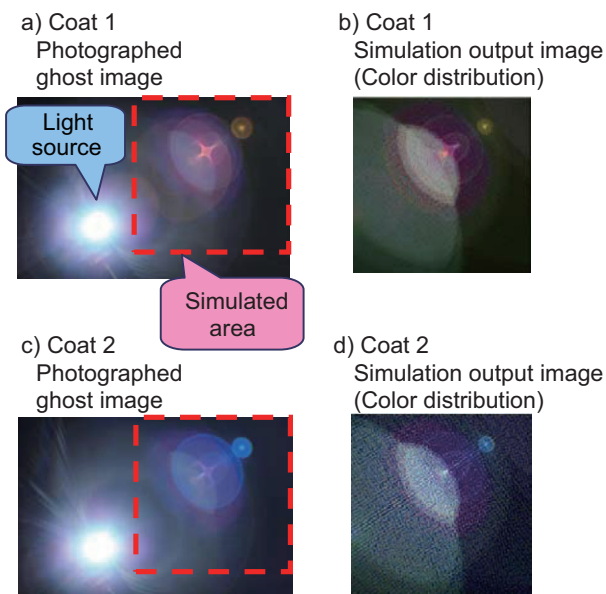


Fig.4 Ghost image in a DSC lens

#### 3.2 超広角レンズ

従来はシミュレーションが困難であった、画角100度以上の超広角撮像光学系について、シミュレーションと実写とでゴーストを比較した。Fig.5 のa)が実写画像、b)がシミュレーション結果の照度分布（logスケール）、c)がシミュレーション結果の色分布である。Fig.5 c)では、Fig.5 a)の右上に見られる、2つの特徴的なゴーストの色分布のみを示している。実写の右上部に見られる特徴的なゴーストは、シミュレーション結果でも見られ、ゴーストの色も実写とシミュレーションとで良く一致している。これまでは画角が100度を超えるような超広角撮像光学系では、第一面の有効径に対してゴースト光の光束が小さいため、シミュレーションでゴースト強度を求めることが困難であった。今回開発したツールを用いることにより、超広角の光学系であっても、ゴースト光の正確な照度分布をシミュレーションすることが可能となった。

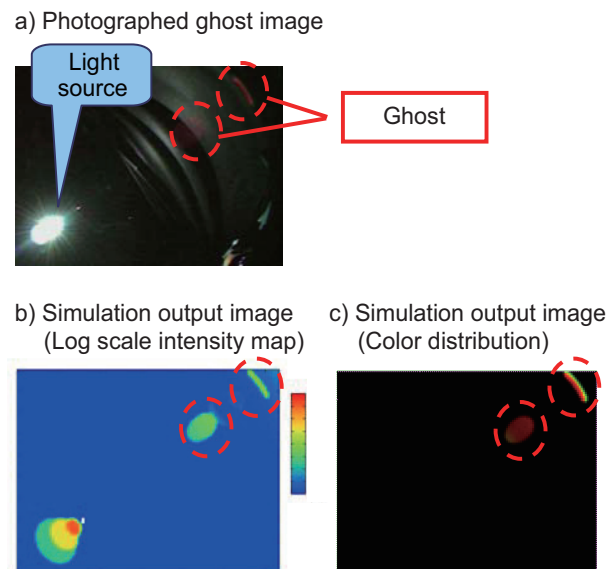


Fig.5 Ghost image in an ultra-wide lens

### 4 まとめ

今回の取り組みでは、ゴーストシミュレーションの精度を向上し、ゴーストの照度分布を正確、かつわかりやすく出力するツールを開発した。本ツールの活用により、設計段階で課題となるゴーストを把握し、ゴーストを低減するためのフィードバックを実施することが可能となり、試作コストの削減につながる。さらに、波長毎のゴーストの照度分布から、ゴーストの色味評価が可能となり、試作レスで最適なコート選定を可能とした。

今回開発したツールでは、レンズ面間で発生するゴーストを対象としているが、今後はレンズ有効領域外やメカ部材での反射も含めた複合的な要因によるゴーストにも対応できるよう、ツールの改良を進めたい。