

構造・熱・光学性能分析 典型的なマルチフィジクスモデル

クリストファー・バウチャー

光学の光線追跡ソフトウェアが熱影響を明らかにするために、レンズシステムの構造・熱・光学性能の分析を連動させる。

数値シミュレーションは、光学システムの設計、最適化、評価において欠かせないツールとなっている。高い忠実度を持つ計算モデルは、試作や、関連する実験作業に費やす時間や努力を大量に削減できる。

高忠実度のモデルを設計することは、極限環境におけるカメラ、望遠鏡、分光計、同類デバイスの操作の分野でより困難になっている。この困難はおそらく、宇宙探査機の光学システムで最も人々を萎縮させる。宇宙環境では、機器は極端な温度勾配の支配下に置かれる。宇宙そのものの極寒な真空から太陽の灼熱まで、そしてその間にある温度勾配だ。

実際の素材のほとんどは温度依存性の屈折率を持つため、温度変化は光学システムの性能に直接影響を与える。さらに、熱ストレスは他の運用荷重と合わせて、さらなる性能低下となり得る変形の原因となる。そこで我々は、構造・熱・光学性能(STOP)分析を連動させたシミュレーションソフトウェアを用いて、ユニークな挑戦に挑もうとしている。

シンプルな ペッツバルレンズシステム

例えばペッツバルレンズシステムは、温度が均一で、力が加わらないように設計されている。ペッツバルレ

ンズは、フィールド平坦化レンズと、その後方にあるレンズグループから構成される。図1で示すように、平行な光線が左(緑)から右(赤)にあるイメージ面に向かって伝わる。レンズグループの間にあるイメージ面と開口絞りも示す。

ここで、このシンプルなレンズシステムが、ストレスや温度勾配にさらされた現実環境下の装置に組み込まれることを考えよう。STOP分析を正確に実施するためには、レンズそのものだけでなく周囲の装置も製作しなければならない。これには、考慮すべき次の疑問が挙げられる。

- ・レンズをどのようにマウントするか
- ・構造分析に対する境界条件は何か
- ・温度における境界条件は何か

このワークフローを実演するため、以前のペッツバルレンズの配列を工夫し、熱真空チャンバの内部にあるドラムにレンズをマウントする。ここでは、圧と温度の両方を制御して、宇宙空間の再現を目指す。図2に、レンズ、ドラム、マウント、チャンバの横断面の略図を示す。このようなチャンバは、宇宙に設置する前に、制御された実験室環境の低温下で、カメラや望遠鏡の試験を行うのに使えるだろう。

すべてのドラムは熱シュラウド境界(1)の中に格納されている。この中には、例えば-50℃設定の低温が維持され、液化ガスが壁に沿って上下に移動でき

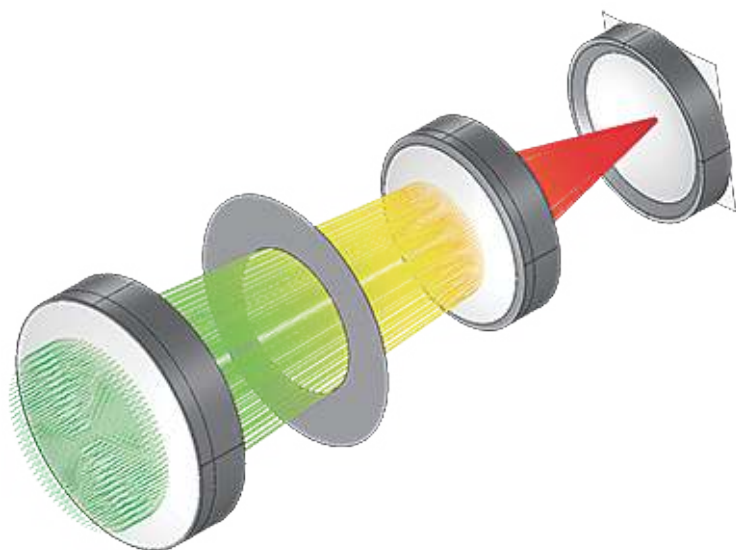


図1 光線の略図としてここに示すペッツバルレンズには、左から右に向かって、第一の集束レンズ、開口絞り、第二の集束レンズ、フィールド平坦化レンズ、イメージ面が含まれる。(提供: コムソル社)

るだろう。そして放熱は外側の真空窓(2)ともう1つの熱窓(3)を通して熱シユラウドに入る。このもう1つの熱窓は、レンズにおける温度勾配を制御するために適所に置かれる。熱シユラウドの外側の周囲の環境は、研究室の気温である25℃だ。

レンズグループ(4)、(5)、(6)、イメージ面(7)、ドラム(8)、固定支柱(9)も示した。固定支柱は、変位がゼロと仮定する。解くべき数量は、レンズとドラムと窓を通じた温度、レンズとドラムにおける構造の変位、システムを通過する光線だ。

STOP解析には 数値的方法の組み合わせが必要

数学的な視点から、STOP解析には他に類を見ない課題がある。なぜなら、構造・熱モデルには、光学モデルと比較して異なる種類の数値的アプローチが必要だからだ。構造・熱シミュレーションに最も柔軟なアプローチは有限要素法(FEM)である。この手法では、配置を大量の別々の数値的セルまたは要素として描き、その要素で定義された区分関数として各要素でひずみと温

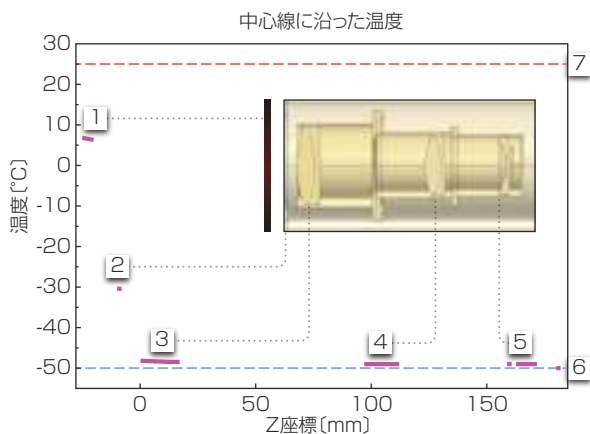


図3 ペッツバルレンズ、ドラム、熱シユラウドの横断におけるz座標の関数(ピンクの線)としての温度を示す。真空チャンバの外側の窓(1)は、周囲の環境(7)による放熱の伝達にさらされるため、最も温度が高い。熱窓(2)は約-30℃と、周囲よりもはるかに低温だが熱シユラウド(6)より明らかに高温である。レンズグループ(3, 4, 5)は熱シユラウドから2℃の範囲内にある。

度を近似する。

光学性能は、光線追跡のアプローチを用いることで最もよく予測できる。なぜなら、光学シミュレーションのFEM実装は通常個々の波長を解像するのに十分なメッシュを必要とするが、この必要性は光周波数において実用的でないためだ。

もし、FEMを用いて配列の離散化描写において構造・熱シミュレーションを実行し、光学シミュレーションが光線追跡アプローチを使用するなら、光学性能における構造変形と温度変化の影響をどう組み込めばよいだろうか。

COMSOL Multiphysicsというシミュレーションソフトウェアは、これらの異なる数値的方法を網羅的なユーザーインターフェースにシームレスに統合する。これには、配列設定、メッシング、解法、後処理などのツールも含まれる。COMSOL Multiphysicsの最新版であるバージョン5.4には、連動したSTOP解析に特化したツールと、いくつかの新しい例が含まれている。

熱シミュレーションの想定

真空窓と熱窓を通じて入る放熱は、広いスペクトル領域を持つ。可視光の周波数では、光はレンズによって屈折すると想定される。しかし赤外部では、レンズが不透明になると想定される。これは、入ってくる放熱を吸収して全方向に散乱するよう再び放射することを意味する。そのため実際には、チャンバに入る放熱に対して、実際には2つの異なるモデル化法を組み合わせる必要がある。光学領域では、集束動作を観察するために光線追跡が使われる。一方、赤外部では、レンズとドラム集団を通じた伝熱と組み合わせて、放熱がモデル化される。

マルチフィジックスなシミュレーションを用いると、理想的な拡散表面を

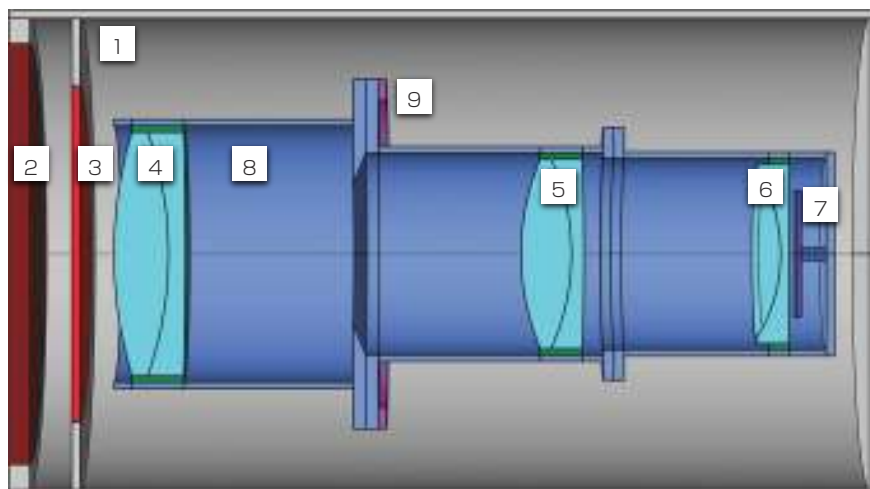


図2 ペッツバルレンズ組の概。レンズ、ドラム、熱真空チャンバが含まれる。(提供: コムソル社)

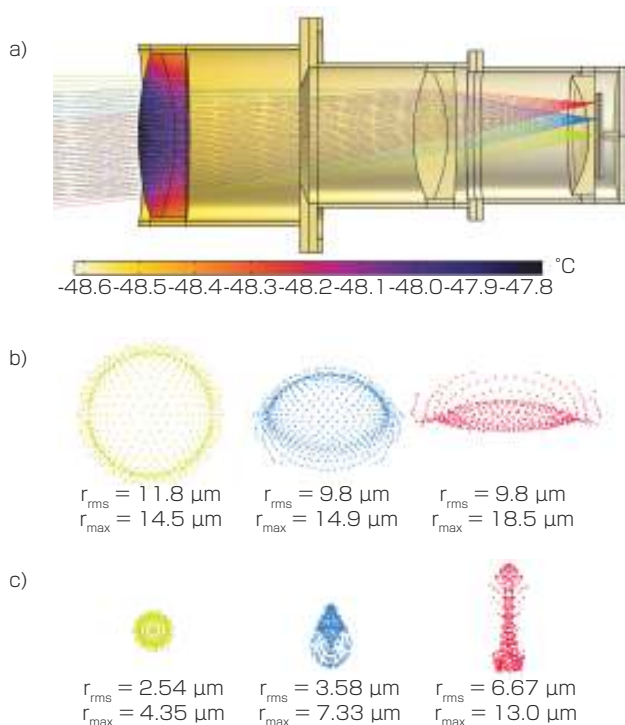


図4 加熱されたペッツバルレンズ装置の、3つの角度のフィールドに対する光線の概 示す (a)。この熱真空チャンバと室温(20°C)における光学性能を比較するのに都合のよい方法は、スポット図形を作成することだ。ここでは、イメージ面における光線の分布を示す。熱真空チャンバ内(b)と室温(c)における、ペッツバルレンズシステム の3つのフィールドの角度それぞれのスポット図形を示す。

レンズ装置で温度を制御するために追加の熱窓を使用することの重大性が証明された。図3に、レンズ、ドラム、熱シュラウドの横断面における温度を示す。ドラム内の温度変化は可視化しにくいので、装置の中心線に沿って1Dのグラフとして温度をプロットした。

これは、熱窓の必要性を適切に証明している。熱窓がなければ、レンズグループの間の温度差は2°Cではなく20°C以上になり、重大な熱ストレスとなるだろう。これは、部屋の断熱のために二重窓を使う原理と似ている。

光線追跡の結果

光線は、3つの異なるフィールドの角度に対して熱的に変形したシステムを通じて追跡される。その軌道を図4に示す。レンズとドラムの温度場も示す。

スポット図形から、温度変化が光学性能に重大な影響を与えていることはより明らかである。スポットが視覚的に異なるだけでなく、二乗平均平方根(RMS)のスポットサイズは有意に異なる。

展望

マルチフィジックスシミュレーションを用いることで、連動するSTOP解析が単一の自己完結型なシミュレーションソフトウェアパッケージとして実行できる。さらに、より大きなユーザー基盤に向けた数値モデルを展望する手段は、近年急速に向上している。シミュレーションの民主化は、近年のSTOP分析ツールの使い勝手のよさと合わせて、光学設計におけるシミュレーションの使用がより必要不可欠となり、将来はさらに広がることを示唆する。

想定する場合、放熱をモデル化する正確な方法のほとんどはラジオシティー法だ。すなわち、熱モデルは、表面の放熱をモデル化するためのラジオシティー法と、固体を通じた電熱をモデル化する有限要素法を組み合わせる。レンズとドラムは真空内にあるので、対流による電熱を考慮することはない。

変形配列における光線追跡

光線追跡アルゴリズムは、熱光学分散や光学ストレスを自動的に解析する。光線は解析の表現ではなく、配列における境界のメッシュ表現と相互作用する。これにより、変形配列による反射や屈折をモデル化するのに非常に簡便になる。なぜなら、各境界の要素における変位場はFEMシミュレーションからわかるからだ。言い換えれば、同じメッシュは、構造の変位と温度のFEM計算における自由度を割り当て、光線と境界の相互作用における位置と通常

の方向をクエリするために使われる。

熱光学分散を解析するために、光線はレンズ内のあらゆる場所における温度場をクエリできる。この温度と光線の真空波長は、各光線が当たる屈折率を計算するために用いられる。

つまるところ、マルチフィジックスモデリングによって次のことが同時に可能になる。

- ・FEMを用いて熱伝導と構造変形をモデル化する
- ・ラジオシティー法を用いて拡散する灰色体の間の放熱の伝熱をモデル化する
- ・加熱、変形したレンズシステムを通じて光線を追跡する

熱シミュレーションの結果

熱モデルの結果から、ペッツバル

著者紹介

クリストファー・パウチャーは、米COMSOL社(COMSOL)の技術製品マネージャーである。
e-mail: christopher.boucher@comsol.com URL: www.comsol.com