

# 先端技術センターにおけるオプトメカ連携設計

○浦口史寛、都築俊宏（国立天文台 先端技術センター）

## 概要(Abstract)

オプトメカ設計では構造、熱、光学が連成したシステムに対し、分野横断的に性能保証・最適化に取り組む必要がある。先端技術センターでは光学技術者と機械技術者の連携によるオプトメカ設計を進めており、より効率的な設計・評価手法の確立を目指している。本講演では大気球太陽観測実験向けオプトメカ設計を例にとり、構造・熱解析に基づく波面誤差バジェット最適化の流れを紹介する。

## 1. 背景

先端技術センターメカニカルエンジニアリング(ME)ショップは、機械設計・加工・評価を一貫して行なうことで機器開発におけるさまざまな要求に応えている。この要求は、科学的要求をもとに策定された光学仕様を源泉とする。天文用機器の光学仕様は結像性能が厳しいといわれ、特に回折限界を狙う TMT/IRIS や後述の Sunrise3/SCIP のような高分解能光学装置では波面誤差が問われる。この光学仕様をどのような成分に分解・配分するかは光学システムズエンジニアが検討し、設置・調整・保持・環境などに配分された機械仕様が、ME ショップ等の構造、熱そして制御エンジニアに受け渡される。このように各分野にフローダウンされた仕様をもとに、それぞれを専門とする人々が独立に取り組むのが一般的である。このフローダウンにより各分野が独立に作業できる一方、独立に設定した設計マージンが蓄積され、結果、それぞれの仕様が厳しくなり過剰設計傾向となる課題もある。このような方法ではより厳しい科学的要求に対してたちうちできなくなるともいわれており、Multidisciplinary Design Optimization など光学・構造など分野を横断した設計手法の有効性が報告されている。そこで高分解能光学装置にも対応可能な、光学技術者と機械技術者の連携による、動的な仕様策定が可能な設計手法確立に取り組んだ。

## 2. オプトメカ設計

Optomechanical engineering を調べると、光学システムの設計、製造、組み立て、試験にかかわる機械工学の応用分野とある。いかに高い精度で光学素子の位置・姿勢・形状を維持するかというところに難しさがあるが、機械設計に関しては一般的な設計と同様と考えられる。初期段階では理論式などを用いた手計算を進め、より詳細な検討を行う際には有限要素解析が有効とされる。

ME ショップで行なわれている従来の手法は図 1 のとおりである。まず、光学設計ソフト Zemax OpticStudio で光学素子ソリッドデータを出力し、次に Solidworks のような CAD ソフトウェアで機械部品と結合して設計して、最後に出図する。有限要素解析は必要に応じて、専用の CAE 環境 NX (ソルバは NX Nastran) で行う。この手法は一方通行であるため、機械設計の不確実性に対するマージンを含めた厳しい機械仕様となる傾向にある。

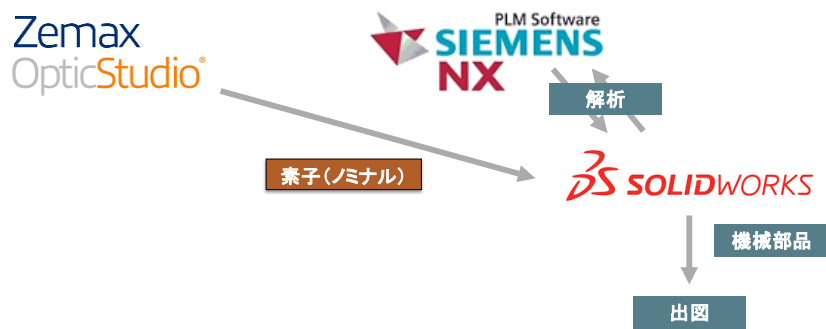


図1 従来のオプトメカ設計手法

今回試したオプトメカ解析手法は図2のような **Integrated Optomechanical Analysis** と呼ばれるものである。まず、ノミナル状態（位置・姿勢・形状）の光学素子ソリッドデータを OpticStudio で出力し、NX で機械部品と結合し有限要素モデルを作成する。その後、同じく NX の CAE 環境上で加速度・熱などの擾乱を与える。擾乱を受けた有限要素モデルの各ノード変位をもとに、各素子の位置・姿勢・形状をオプトメカ変換ソフト（SigFit）で Zemax マクロファイルに変換し出力する。最後に、OpticStudio で擾乱をうけた光学面をマクロファイルから取り込み、波面誤差等の評価を行なう。ここで問題点の抽出が行なわれ、メカ設計へのフィードバックを行なう。この手法の場合、機械設計の不確実性は解析誤差のみであるので、機械仕様の緩和による効率化や定量的な性能評価が可能になる。

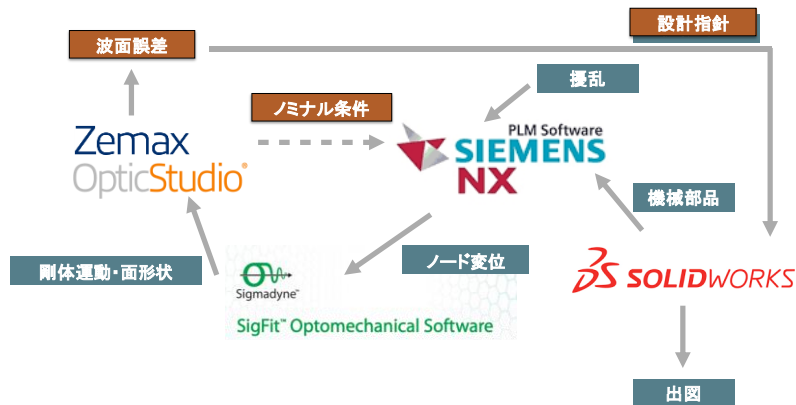


図2 試行したオプトメカ設計手法

以上、さまざまなツールを用いているがそれらはアシストするのみである。解析誤差に関しては十分な注意が必要で、いずれの手法も各分野を専門とする人々が解析・評価することで初めて成立することになり変わらない。

### 3. 実例

オプトメカ連携設計の実例として Sunrise-3/SCIP のオプトメカ設計を紹介する。Sunrise は口径 1m の光学望遠鏡で太陽観測を行う気球実験で、3 度目の飛翔が 2021 年に予定されている。SCIP とはこの Sunrise に搭載される日本主導で開発する近赤外線偏光分光装置である。この SCIP の性能を決定するオプトメカ設計に我々が連携して取り組んだ。

SCIP のオプトメカ設計の流れは以下のとおりである。SCIP の科学的要求 48 nm rms に対し、まず光学設計者から波面誤差バジェットが提案された。波面誤差はオプトメカに対し設置誤差、調整誤差、表面形状誤差、環境誤差に配分された。設置誤差、調整誤差は機械的な寸法値で与えられるため、標準的な機械設計と同じく公差解析で仕様を保証する。表面形状誤差は接着保持など理論や解析で推定が困難なものについては実証実験で保証した。そして最後の環境誤差に対しては先に挙げたオプトメカ解析手法を試みた。

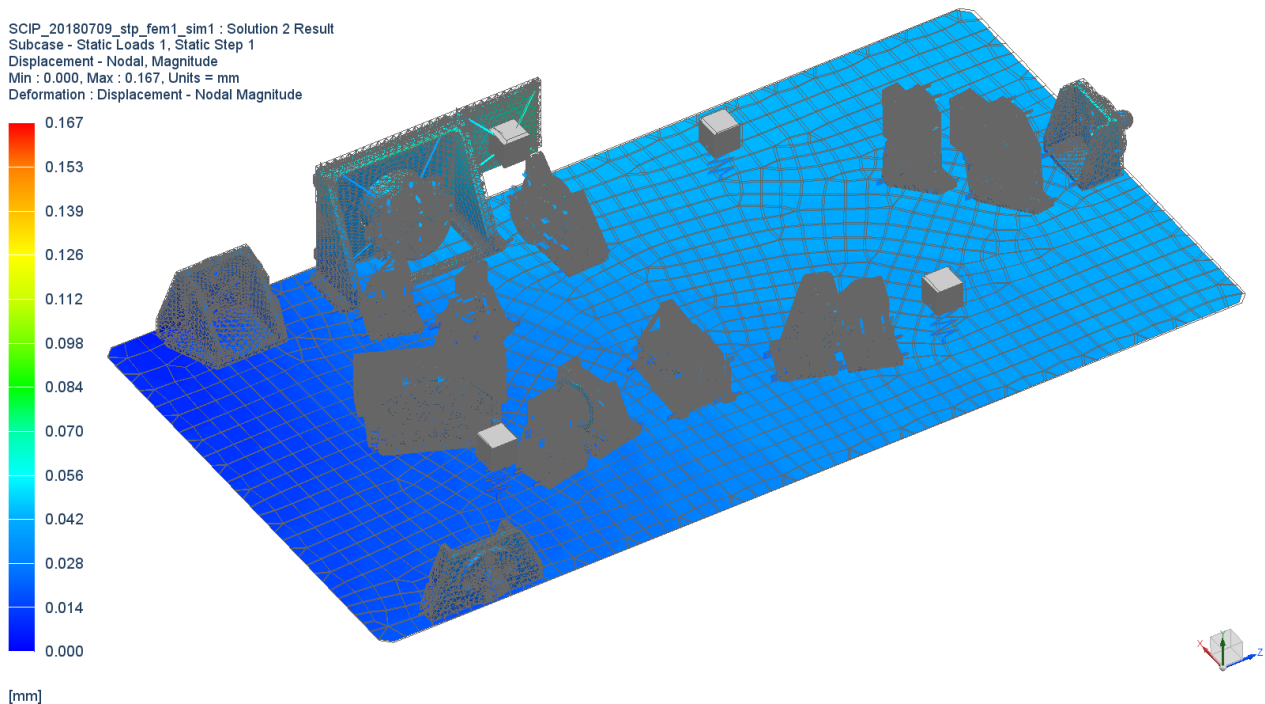


図3 Sunrise-3 SCIP 構造有限要素モデル

環境誤差は重力や温度の変化が光学素子の位置や表面形状に影響を与えることに起因する誤差である。まず、主要な光学素子とその保持構造ならびに光学ベンチについて有限要素モデル（図3）を作成し、重力と温度変化を外乱とする熱構造解析を行った。重力は光学ベンチの面外方向、温度変化は SCIP の運用温度範囲 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ を与えた。光学ベンチは CFRP-アルミハニカムのサンドイッチパネル製で、その物性は CFRP を構成する繊維や樹脂によって様々であり、性能と価格の両面で有利なものを選定する必要がある。初期条件として、低価格だが熱膨張率大きい  $6\text{ppm/K}$  を想定して解析を行った。

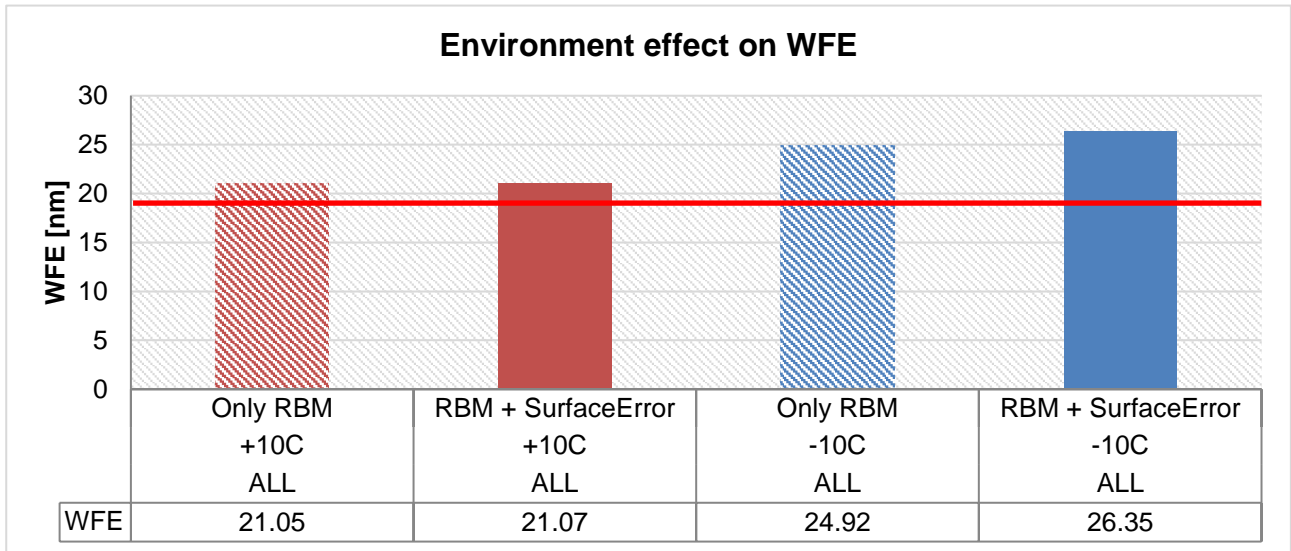


図4 環境起因の波面誤差(WFE)推定の結果。仕様の 18nm rms を太実線で示している。左2つがノミナル+10℃、右2つがノミナル-10℃のときの波面誤差推定値。それぞれ左側の斜線が剛体運動の寄与で、右側は剛体運動と形状誤差の総計となっている。

解析の結果、波面誤差推定値は当初の誤差配分を超えることがわかった。誤差要因を理解するため、波面誤差を各素子の剛体運動（素子全体の並進と傾き）と表面形状変化それぞれの成分に分解したところ、剛体運動の成分が支配的であることがわかった（図4）。

その後、機械設計の制限から行なった誤差再配分を経ながら、光学ベンチの熱膨張率を抑えた解析を行ったところ、光学ベンチの熱膨張率が 3.5ppm/K では仕様未達、そして 2ppm/K であれば仕様達成の見込みとなった。このように性能を決定づける重要なコンポーネントの設計指針を得ることができ、科学的要求を満たす設計解に近づいた。

以上は最適化が比較的容易に進んだ例であるが、優れた光学設計により波面収差設計値と公差感度が非常に低く抑えられ、環境等のバジェットに余裕があった点、またミラーマウント構造がアサーマルに設計されているため光学ベンチの伸縮のみだけで性能が改善した点など、基本を押さえた技術力の積み重ねによって実現したものである。

#### 4. 今後

先端技術センターには、光学エンジニアと機械エンジニアとの連携により、解析をベースとした光学性能推定や仕様の策定を行なう土壌と能力がある。オプトメカ解析の手法は確立しつつあるので、より多くのケーススタディを経てノウハウを蓄積し、設計のみでなく検証フェーズにおいても幅広い要求に応えたい。

#### 謝辞

先端技術センターME ショップとくにショップ長と設計チーム各位には多大なご理解を、そしてTMT/IRISにはソフトウェア維持の支援をいただいている。ここに深く感謝の意を表す。