

先端技術センターにおける光学設計開発 II –2019 年度のトピクー

○都築俊宏（国立天文台 先端技術センター）

概要 (Abstract)

国立天文台先端技術センターでは、光学エンジニアがプロジェクト横断的に関与することにより、紫外線から電波までさまざまな波長のプロジェクトでの光学設計開発に貢献してきた。本発表では今年度の活動の概要を報告するとともに、最新の開発トピックとして、電磁場解析が必要な Echelle 回折格子を持つ分光装置の迷光解析手法と、業者とともに実施した多層膜フィルターのコーティング後面精度 6 nm RMS への挑戦について述べる。

1. ATC の光学設計開発の概要

国立天文台先端技術センター（Advanced Technology Center、以下 ATC）の光学設計開発は民間出身の光学設計エンジニア 1 名からなる。ATC の光学設計開発はこれまで、国立天文台の各プロジェクトの依頼および大学からの共同利用申請に応じる形で、光学設計・解析・測定・調達などの天文光学装置の開発を実施してきた。その結果として、波長は紫外光から電波まで、対象は地上観測装置から宇宙用観測装置までの幅広い天文観測装置での開発実績を持つに至った。図 1 に ATC の光学設計開発が現在までに関与したプロジェクトと依頼の流れを示す。

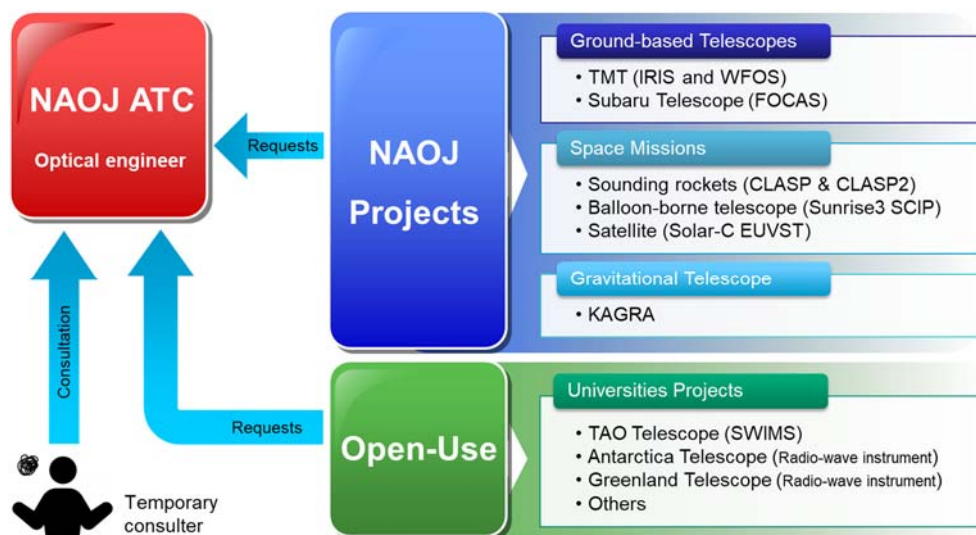


図 1 ATC の光学設計開発の関与したプロジェクト

このようなプロジェクト横断的な開発は、エンジニア、プロジェクト双方に恩恵がある。エンジニア側は、複数プロジェクトの開発に携わることで”生の”技術的知見を継続的に得ることができる。それにより、それらの技術的知見を蓄積することに加えてスキルを維持することができる。一方、プロジェクト側は、エンジニアが他のプロジェクトで得た知見を利用することができる。その結果、開発コストとリスクの低減、開発期間の短縮ができ、結果として開発の効率化につなげることができる。このよう

な双方のメリットを最大化するため、ATCの光学設計開発では、他のプロジェクトで役立つ可能性のある技術開発について技術シンポジウムなどの機会に報告することとしている。今年度は大気球太陽望遠鏡 SUNRISE-3 に搭載する偏光分光装置 SCIP (Sunrise Chromospheric Infrared spectro-Polarimeter) の開発で得られた2つのトピックについて報告する。

2. 開発トピック 1 (電磁場解析が必要な Echelle 回折格子を持つ分光装置の迷光解析手法の構築)

2.1 検討の背景

偏光分光装置 SCIP では、高波長分解能を実現するため分散素子として Echelle 回折格子を使用している。この Echelle 回折格子は高次の回折光を効率よく利用できるように溝の形が工夫されており (図 2 参照)、その光学特性はミクロンオーダーの格子形状によって決まる。一般に、回折格子の設計回折次数以外の次数での回折光は不要光となるため、迷光解析による評価が必要である。しかしながら、迷光解析は通常光線追跡ベースで行われるため、回折の影響を導入できないことが課題であった。

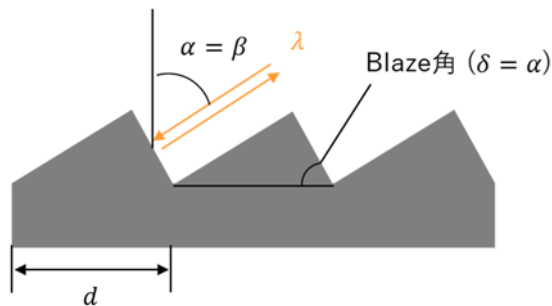


図 2 Echelle 回折格子の模式図

2.2 提案手法

光線追跡ベースで行われる迷光解析ソフトウェア上で回折格子の特性を正確に表現するため、回折格子特性を電磁場解析ソフトで計算し、結果を迷光解析ソフトに取り込むという手法を検討した。図 3 にその手法を模式図で示す。電磁場解析ソフトウェア (RSOFT) で回折格子をモデル化し、複数の入射角、次数、波長での回折特性を計算させる。その計算結果を迷光解析ソフトウェア (LightTools) で読み込むことが可能な形式 (BSDF: 双方向散乱分布関数) として出力させ、それを LightTools 上で回折格子の面特性として取り込むというものである。

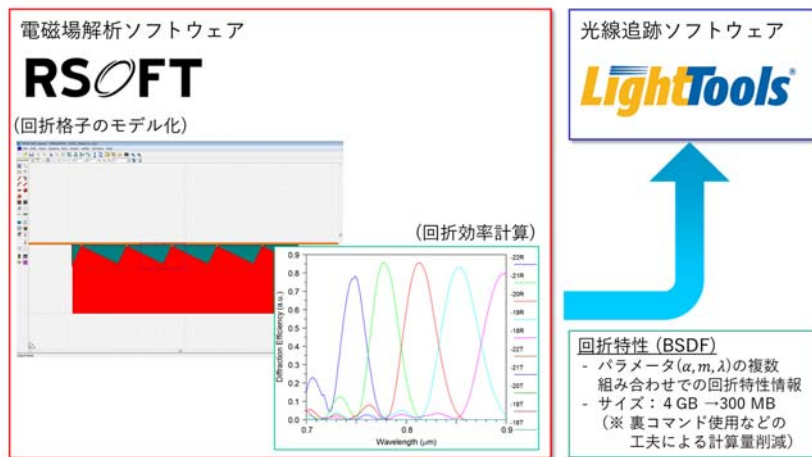


図 3 今回提案した Echelle 回折格子の迷光解析手法

2.3 手法の検証

提案手法の妥当性を検証するため、迷光解析ソフトウェア上にて光学系モデルを実装し、設計波長帯の中心波長および両端波長の光について検出器面での結像位置を確認した。回折格子の特性が正しく反映されていれば、設計通りの位置 (検出器の中心および両端) に光線が到達するはずである。結果、図

4 右のように設計通りの位置に光線が到達することが確認できた。以上から、回折格子の特性は正しく迷光解析ソフトウェア上で反映されていると結論づけた。

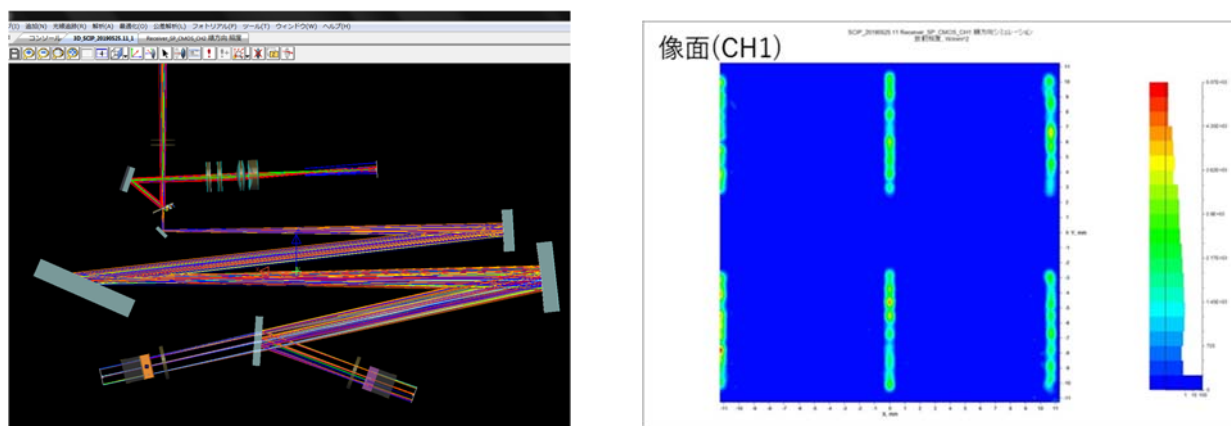


図 4 (左) 迷光解析ソフトウェアでの迷光解析例、(右) 3つの波長を入射させた際の像面の強度分布

2.4 本検討のその後の展開

Echelle 回折格子の光学特性を迷光解析ソフトウェアへ実装することが可能となったことにより、SCIP 光学系全体の迷光解析が可能となる。実際に迷光解析を行なった結果、迷光混入量は 1 %程度であることが判明した。また、迷光源を解析した結果、迷光のおよそ半分はスリット裏面での多重反射が原因であることが判明した。この結果をふまえて、スリットの裏面の一部を黒色化する対策を実施した。

3. 開発トピック 2 (多層膜フィルターのコーティング後面精度 6 nm RMS への挑戦)

3.1 検討の背景

偏光分光装置 SCIP は回折限界の空間分解能を実現するため、一つの光学素子に許される表面形状誤差は 6 nm RMS と極めて小さい。この表面形状誤差レベルを研磨後の表面形状誤差として保証できる業者は複数あるが、コーティング後の表面形状誤差として保証できる業者はほとんどない。そこで、今回我々は、コーティング後（特に変化量の大きい多層膜コーティング後）の表面形状誤差として、6 nm RMS を実現する方法を検討した。

3.2 手法の検討

コーティングによる表面形状歪みを減らす代表的な方法は以下の 4 つが挙げられる。

- (1) コーティングによる変形量が小さくなるように基板形状を変える。(基板を厚くする、層数を減らして膜応力を減らす etc.)
- (2) コーティングによる変形を曲率半径公差に入れ込む
- (3) コーティングによる変形を見越して基板表面形状をあらかじめ歪ませる
- (4) コーティングによる変形を裏面コートの変形で相殺する (カウンターコーティング)。

厚みを比較的自由に变化できる反射光学素子に関しては主に手法 (1) で対処できるが、問題となるのは反射と透過を使用する光学素子である。SCIP で使用している波長分割フィルターはロングパスフィ

ルターの特性を持ち、長波長成分を透過させ、短波長成分を反射させる。反射と透過を使用するため厚みを自由に変えられないことに加え、表面はロングパスコーティング、裏面はARコーティングと表裏で異なる多層膜コーティングを行なっているため、コーティングによる歪みの相殺が難しい。

3.3 提案手法

この波長分割フィルターに対して我々は「カウンターコーティング+相殺膜厚最適化」という手法を業者とともに検討した。これは裏面側に光学特性に影響しない相殺膜を追加し、その厚みを最適化することで、表面側の歪みを相殺するというものである（図6参照）。具体的には、複数のテスト基板（本番品と同形状、低面精度品）を用いて相殺膜厚を最適化し、本番基板（高面精度品）に実装するという方法を行った。（コート前）

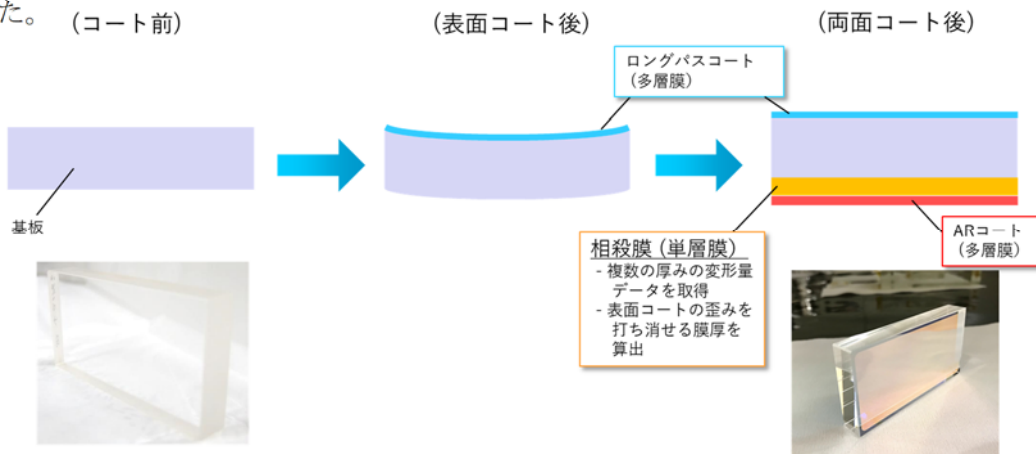


図6 カウンターコーティング+相殺膜厚最適化の説明図

3.4 手法の検証と結果

提案手法でのコーティング前後の面精度測定結果を図7に示す。最終的な面精度として両面4nm RMSが実現できた。本検討により、相殺膜厚を調整することで、片面のコーティングによる変形を完全に打ち消すことができるだけでなく、基板自体のパワー成分も相殺することが可能であることがわかった。

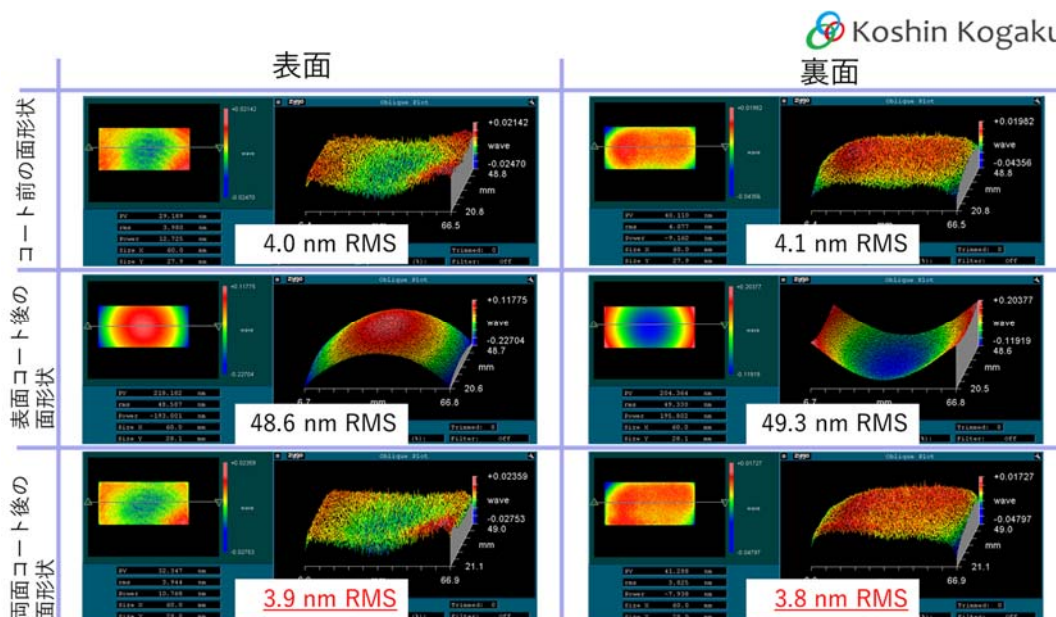


図7 相殺膜厚最適化コーティング前後の面精度の比較