

LiteBIRDのためのクロスドラゴン望遠鏡と連続回転偏光変調器

“Crossed Dragone telescope with continuously rotating half-wave plate modulator for LiteBIRD”

菅井 肇(カブリIPMU(WPI))、木村 公洋(大阪府立大学)、松村 知岳(JAXA)、井上 将徳、伊藤 誠(大阪府立大学)、西堀 俊幸(JAXA)、鹿島 伸悟、関本 裕太郎(国立天文台)、石野 宏和(岡山大学)、桜井 雄基(早稲田大学)、他 LiteBIRD WG

概要

LiteBIRDの科学目的は、ビッグバン以前の宇宙の姿、つまり宇宙の始まり直後の指数関数的膨張時代（インフレーション期）の存在を検証することである。これにより発生する原始重力波の痕跡として宇宙背景放射(CMB)に現れる偏光の空間的パターン（Bモード）を測定する。このためCMBにおける直線偏光の全天・大角度の観測を3年間行うことでテンソル・スカラー比 $r < 0.001$ を達成する。

CMBはミリ波帯域にてスペクトルピークを持つ。CMB以外に銀河系内からの放射（シンクロトロン放射やダスト放射など）をスペクトル形状から成分分離するために35GHzから450GHzの観測帯域にて偏光測定を行う。

主光学系はコンパクトでありながら広視野に対応したクロス・ドラゴンタイプで、主鏡・副鏡ともにアナモルフィック非球面を持つ。主鏡より空側にある開口位置に、空からの直線偏光成分を望遠鏡以降に人工的に持ち込まれる成分から分離するための連続回転偏光変調器が設置される。熱放射を極力抑えるために光学系全体が4 K程度に冷却される。現在、鏡面材料の選定を含む、設計検討を行っている。

本講演では、LiteBIRDの成立性検討及び概念設計にて検討している以下の項目を中心に発表する。光学設計には、光線追跡に基づく最適探索と物理光学に基づく厳密な設計解獲得（GRASP）を併用し、複数の光学系を検討しサイズ、迷光の観点からトレードオフを行った。また、シミュレーションで対応しきれない詳細なバッフル形状等の検討のため、設計した光学系を1/3 スケールにてアルミ鏡を製作した。電波特性測定・解析が進行中である。

鏡面材料選定の候補としてCFRP、C/SiC、SiC、アルミニウムがある。これら候補材料の熱物性特性を測定している。また、鏡の軽量化のためにCFRPによるハニカム構造を採用した場合に、その構造に起因した鏡面上の微小な凹凸がグレーティング効果を起こすことによりビーム形を乱し偏光観測に誤差を与える可能性があるが、この影響を設計上定量的に評価する手法を開発した。

偏光変調器は低温にて連続回転する半波長板にて構成され、検出器システムの1/f揺らぎ、及び系統誤差を低減する。現在小型試作機を作成し要素技術である、軸受けの摩擦、発熱、エンコーディング、保持機構等に関する開発及び検証を行っており、その現状を報告する。

0. 目次

1. 主光学系基本デザイン

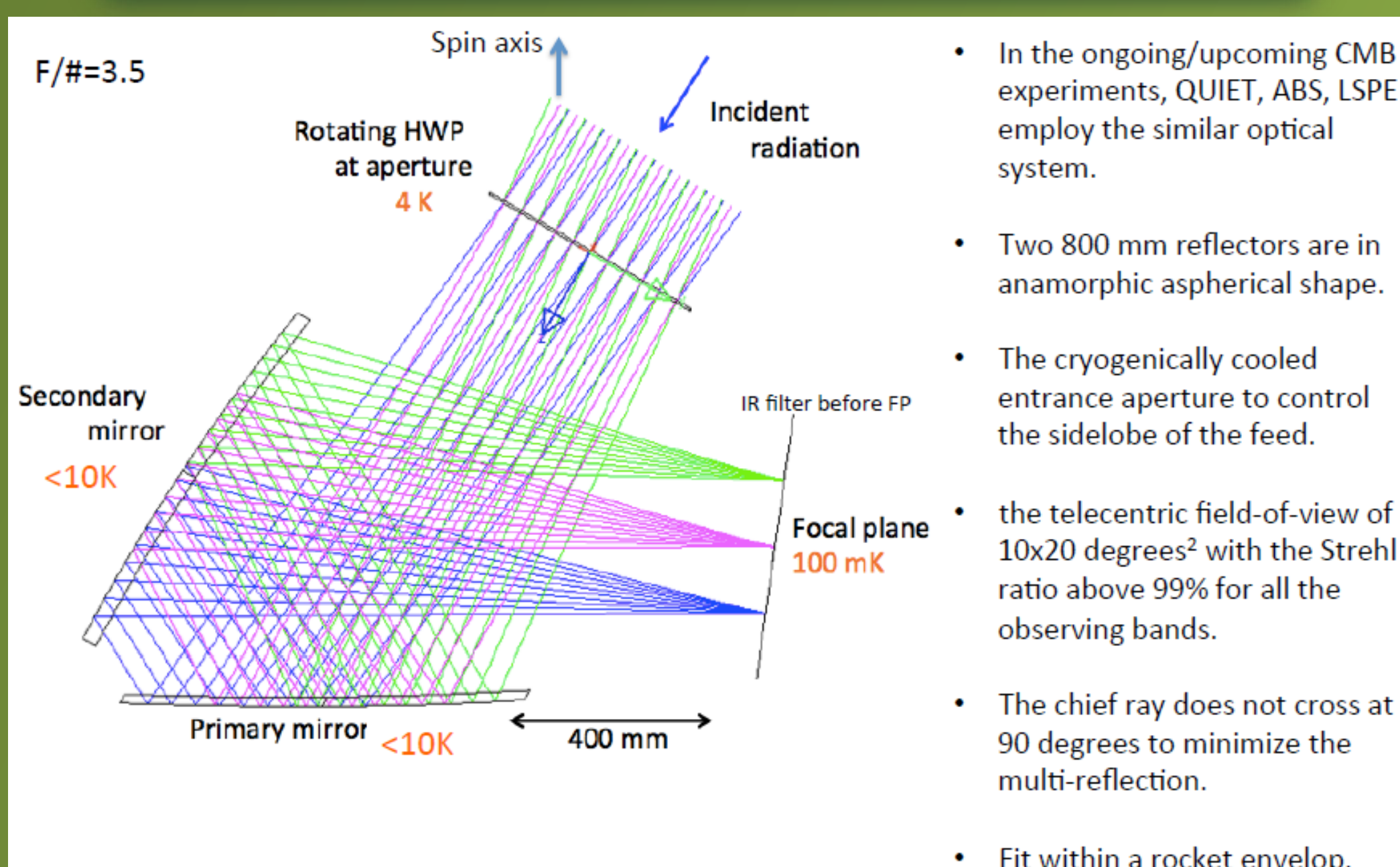
2. デザインアプローチ

- 光線追跡手法
- 物理光学手法
- 光線追跡と物理光学の比較
- 1/3スケールモデルによる物理光学モデル検証（バッフル/フード含む）

3. 進捗状況

- 鏡面の微小凹凸パターンによる影響の評価手法の確立
- High Frequency Telescopeの概念設計検討
- 開口径とF/#の最適化の検討
- 偏光変調器小型試作機の開発

1. 主光学系基本デザイン－クロスドラゴン



2. デザインアプローチ

①光線追跡手法

計算時間が短い光線追跡の手法でシミュレートし設計するツールを用いて光学系の大雑把な設計候補の絞り込みを行う。

- Code V (Beam Synthesis Propagation (BSP)の有無含め)
- LightTools (迷光について)

②物理光学手法

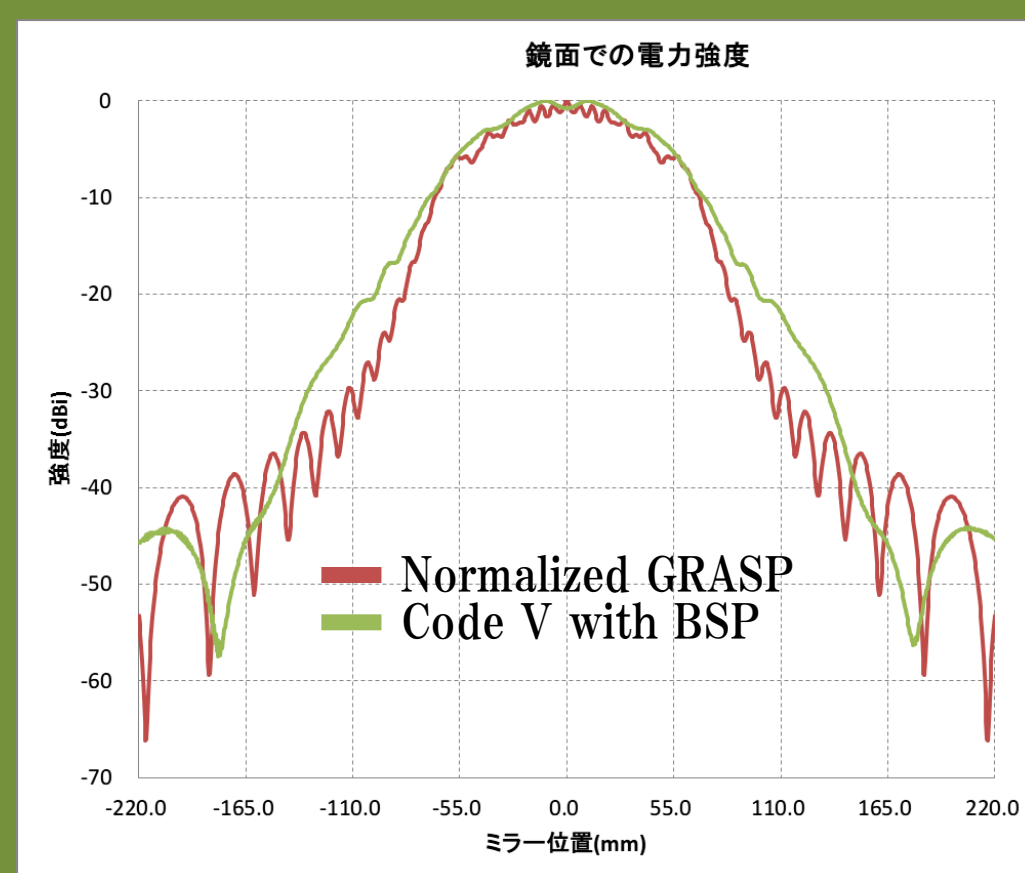
物理光学に基づくツールを用いて、厳密な電磁場解析を用いて、最終的な最適解を持つ候補を見つける。

- GRASP (for precise modelling of reflector antennas)

光線追跡と物理光学の比較

どこまで光線追跡手法が近似として成り立っているか？
(①→②という流れのアプローチの妥当性)

→以下の例のように、10dB程度は比較的良好そう。それ以下は特に注意が必要。



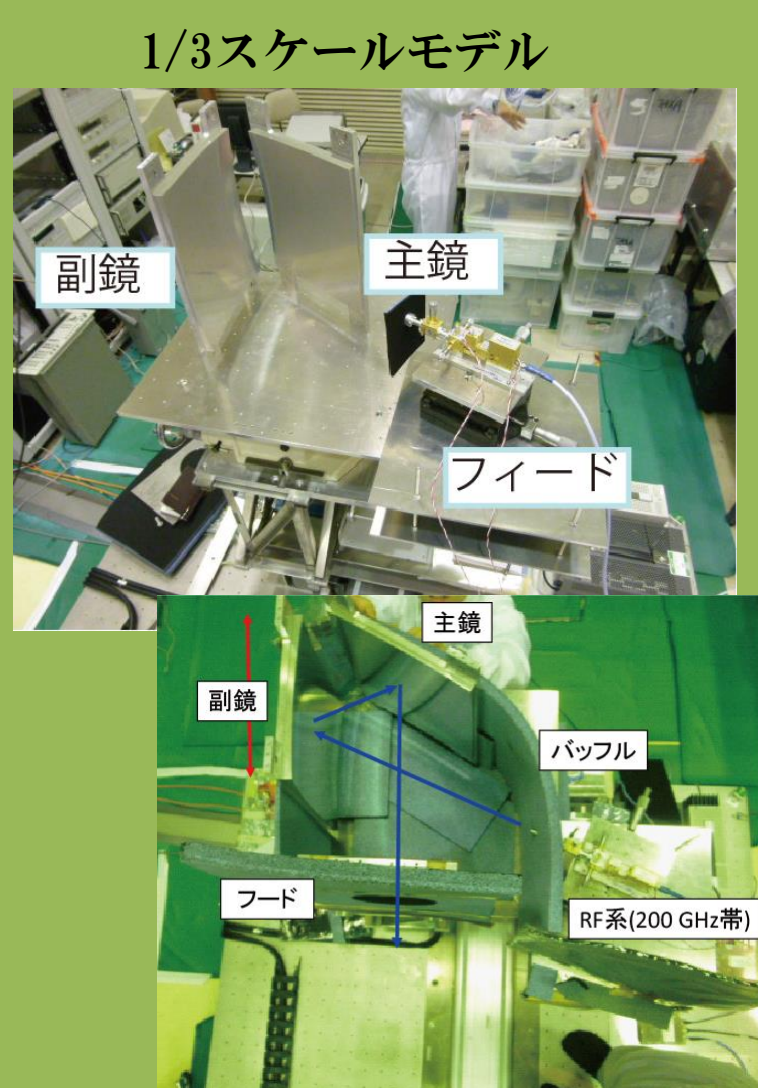
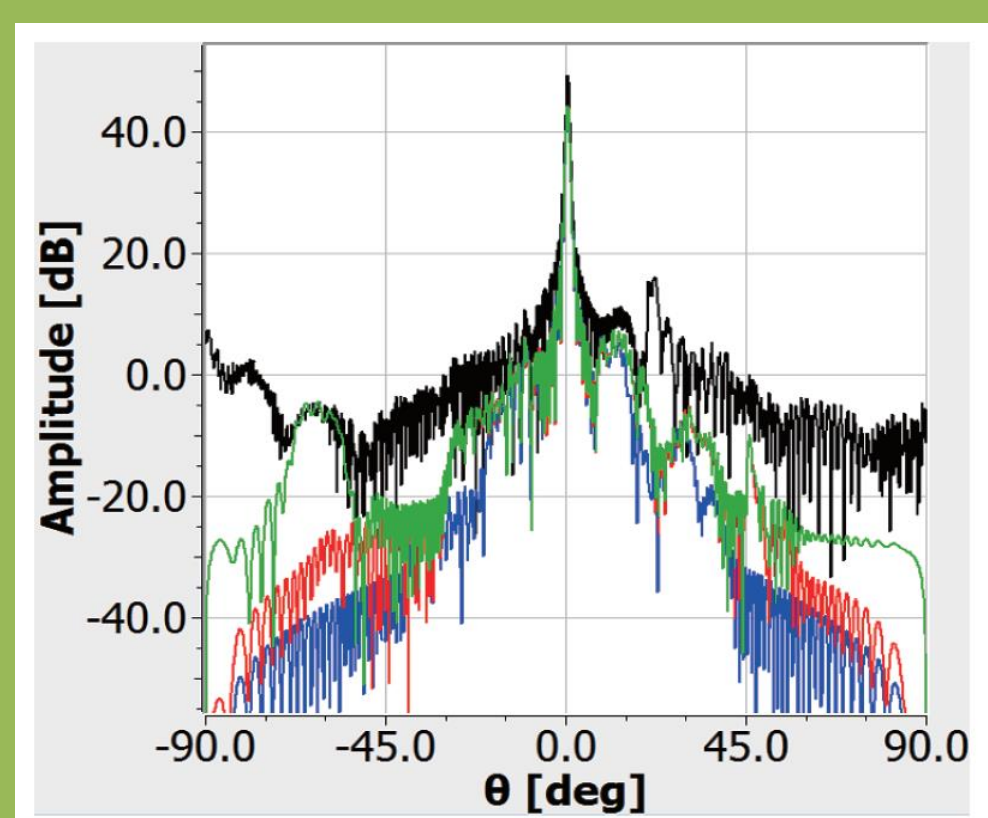
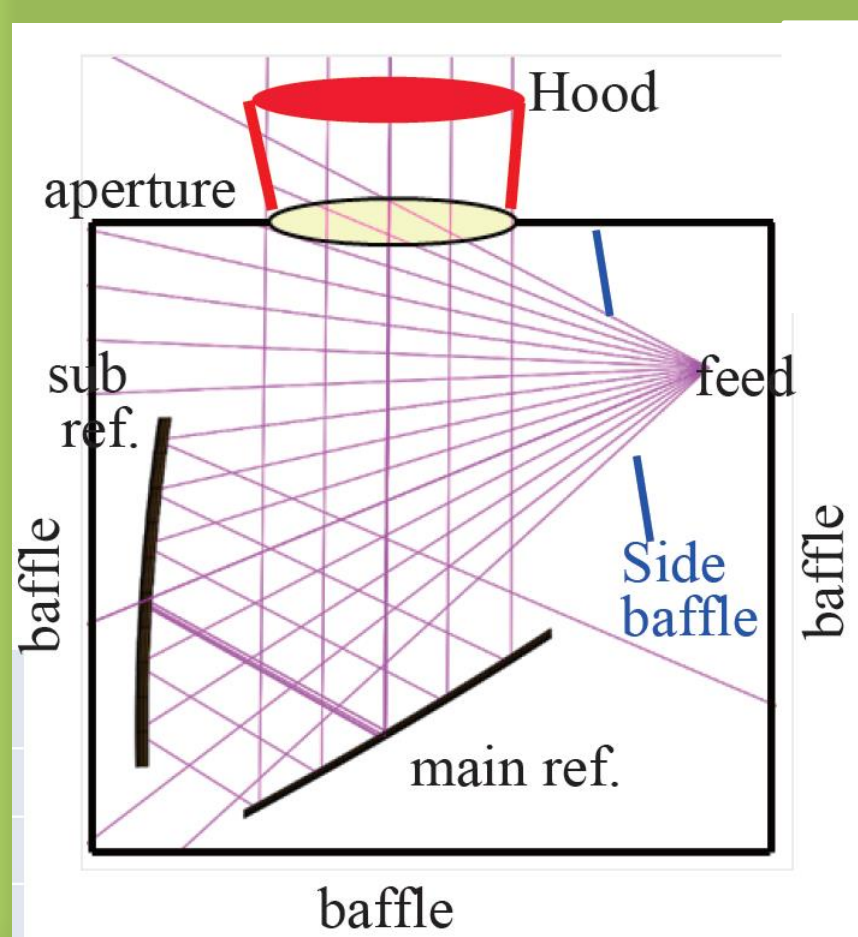
評価面(正方形平面鏡) 440mm×440mm

200GHz ビームウエスト

開口面 (円形平面鏡) 半径25mm

1/3スケールモデルによる物理光学モデル検証(バッフル/フード含む)

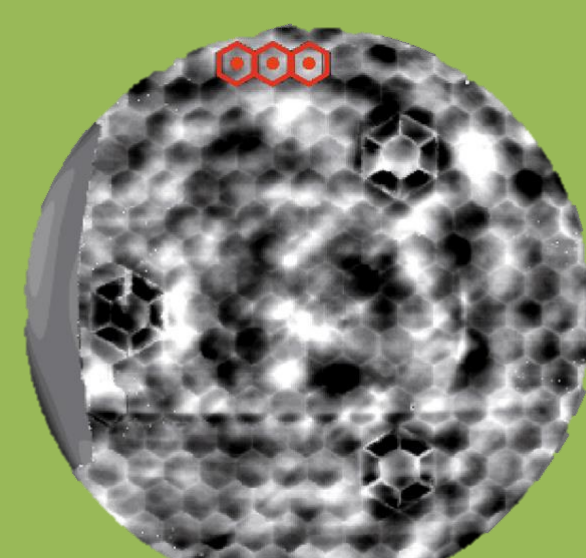
物理光学計算において、悪影響のある全ての多重反射、迷光成分を計算に取り込めたかの検証を行う必要。さらに物理光学手法の原理は、ビームを伝送する鏡面上の物理状態を計算して放射パターンを求めるため、開口やバッフル等の評価には不向き。そこで実機を模した1/3スケールアルミ鏡を製作し物理光学計算との比較検証を進めている。



3. 進捗状況

－ 鏡面の微小凹凸パターンによる影響の評価手法の確立

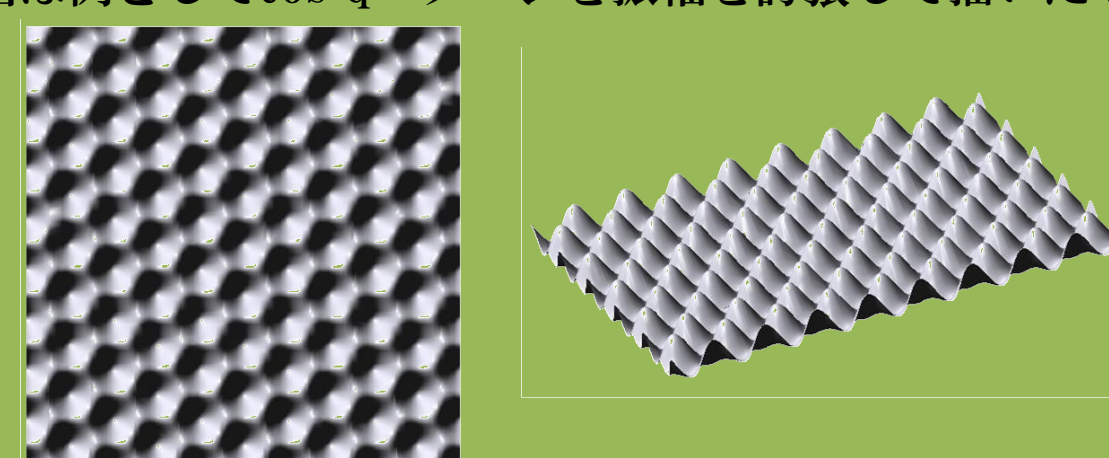
表面における周期性のあるうねりについてCode Vベースで交差偏光を含め評価する手法を開発した。この手法を用いた“グレーティング”効果の評価もフルに取り込み、系統誤差配分から表面形状仕様を確定する。



CMB衛星プランク副鏡における微小凹凸パターン測定の実例 (10um干渉計使用：Tauber et al. 2010)

プランクの場合、低熱収縮・軽量材質であるCFRPのハニカム構造が凹凸の原因となっていたが、他の鏡材を用いた場合でも、軽量化のための裏面くりぬき構造などにより、微小凹凸パターンは生じうる。

Code Vにおけるハニカムタイプパターン生成の開発 (下図は例としてcos²qパターンを振幅を誇張して描いたもの)



例：パターンのピッチ30mm, 振幅8umの場合の0° 偏光と90° 偏光でのPSFの差の視野全体における統計(1エントリーが視野の1点)

