

LiteBIRD 衛星搭載広視野光学系の評価

○岡田 望, 木村 公洋, 井上 将徳, 大西 利和, 小川 英夫 (大阪府立大学), 関本 裕太郎, 稲谷 順司, 鹿島 伸悟 (NAOJ), 羽澄 昌史 (KEK), 松村 知岳, 村田 泰宏, 西堀 俊幸, 紀伊 恒男 (JAXA), 大田 泉 (甲南大学), LiteBIRD working group

Abstract

現在、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 偏光観測衛星 LiteBIRD の開発が進められている。この開発はインフレーション理論で提唱されている初期宇宙の指数関数的な急膨張 (インフレーション) モデルの実験的検証を行うことを目的としており、LiteBIRD 衛星は CMB の中でも特に原子重力波起因で発生した偏光パターン B モードの観測からインフレーションの痕跡を得ることが期待されている。LiteBIRD 衛星の観測周波数帯域は 60/78/100 GHz 帯 (比帯域 :0.23) および 140/195/280 GHz 帯 (比帯域 :0.30)、検出器は 2022 素子からなる多色超伝導検出器アレイ (TES または MKID) を予定しており、電波望遠鏡の中でもかなり広視野かつ広帯域な光学系が要求される。また観測対象である B モードは CMB の中でも大変微弱である為、高感度であることも要求されている。我々はこの要求を満たす為、クロスドラゴン光学系を採用している。この光学系は主鏡、副鏡およびフィードで構成され、光学系全体の大きさが比較的コンパクトかつ広い焦点面が獲得できるという利点を持つ。しかし一方で、アンテナビームパターンにスピルオーバーや多重反射の影響が顕著に見られることも懸念されている。その為、物理光学手法を用いたシミュレーションによりアンテナビームパターンの評価を進めている。また性能追及の為、2014 年秋より新しい光学系モデルの設計・評価やスケールモデルの製作による検証を進めている。

LiteBIRD 衛星について

我々は LiteBIRD 衛星の開発を目指している。この LiteBIRD 衛星は宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 偏光超精密観測を行うものであり、CMB の中でも特に CMB 偏光 B モードの検出に特化した全天観測衛星を目的としている。CMB は地球上の全方向からほぼ等方的に観測可能な 2.7 K (ピーク周波数 :150GHz) の連続波のことであり、ここでほぼ等方的と述べたのは、CMB 偏光は空間偏光パターン E モードと B モードと呼ばれる異方性をわずかながら持っているためである。この B モード偏光は「1. インフレーション理論で提唱された原始重力波」、「2. 銀河系内からの放射」、「3. E モードが宇宙大規模構造を通過した際に現れる弱重力レンズ効果」の三つに由来する。本計画では「1. インフレーション理論で提唱された原子重力波」に由来する B モードの検出を目指している。その科学目的を実現する為に LiteBIRD に要求されるスペックは、中心周波数 150GHz において角度分解能が 30 arcmin、検出器の感度 $2 \mu\text{K} \cdot \text{arcmin}$ が求められる。また銀河系内からのダストとシンクロトロン放射の除去を行う為にテンプレート法と呼ばれる手法を仮定した場合、50-270 GHz にて 4 つ以上の観測帯域をカバーすることが要求されており、現在のデザインでは 6 帯域をカバーする予定である。

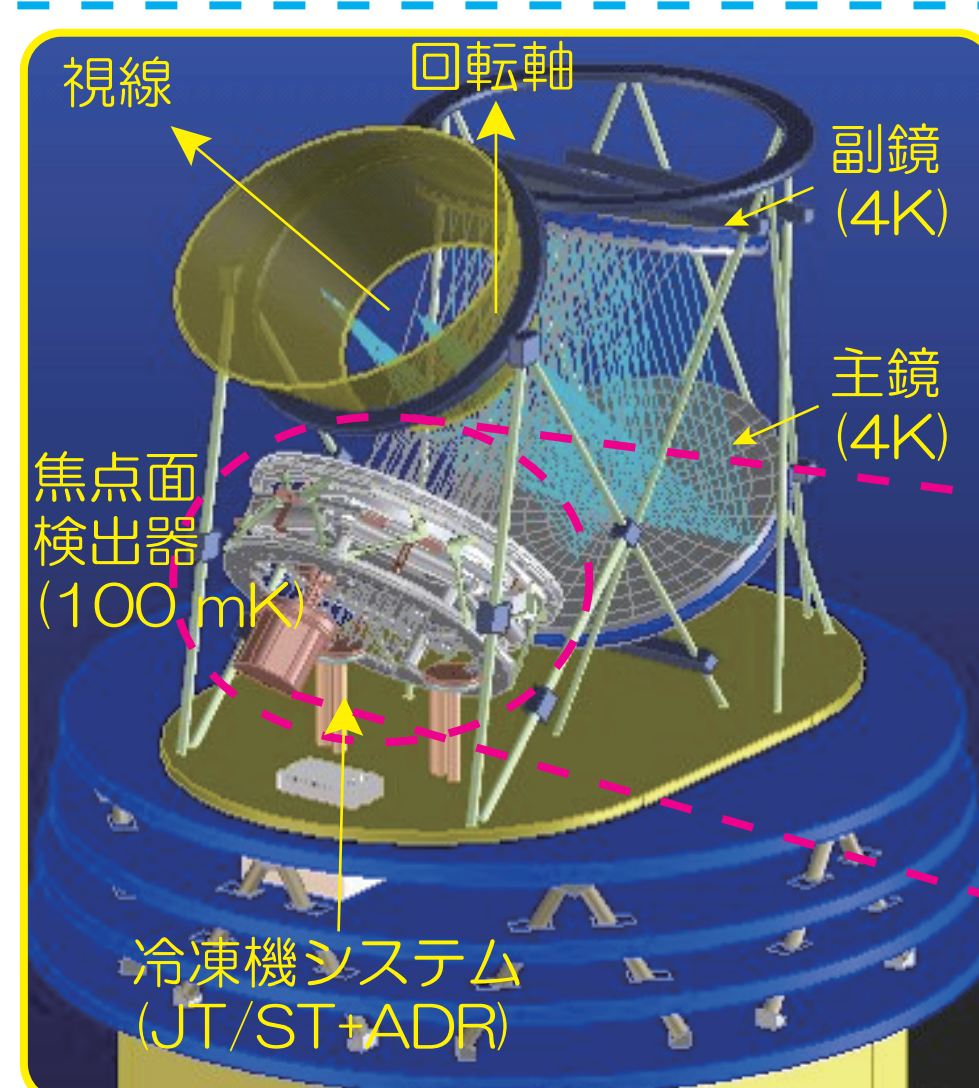


図 1. 衛星搭載観測装置イメージ図

左図が観測装置全体の構成図、右図が焦点面に置く検出器の配置図である。

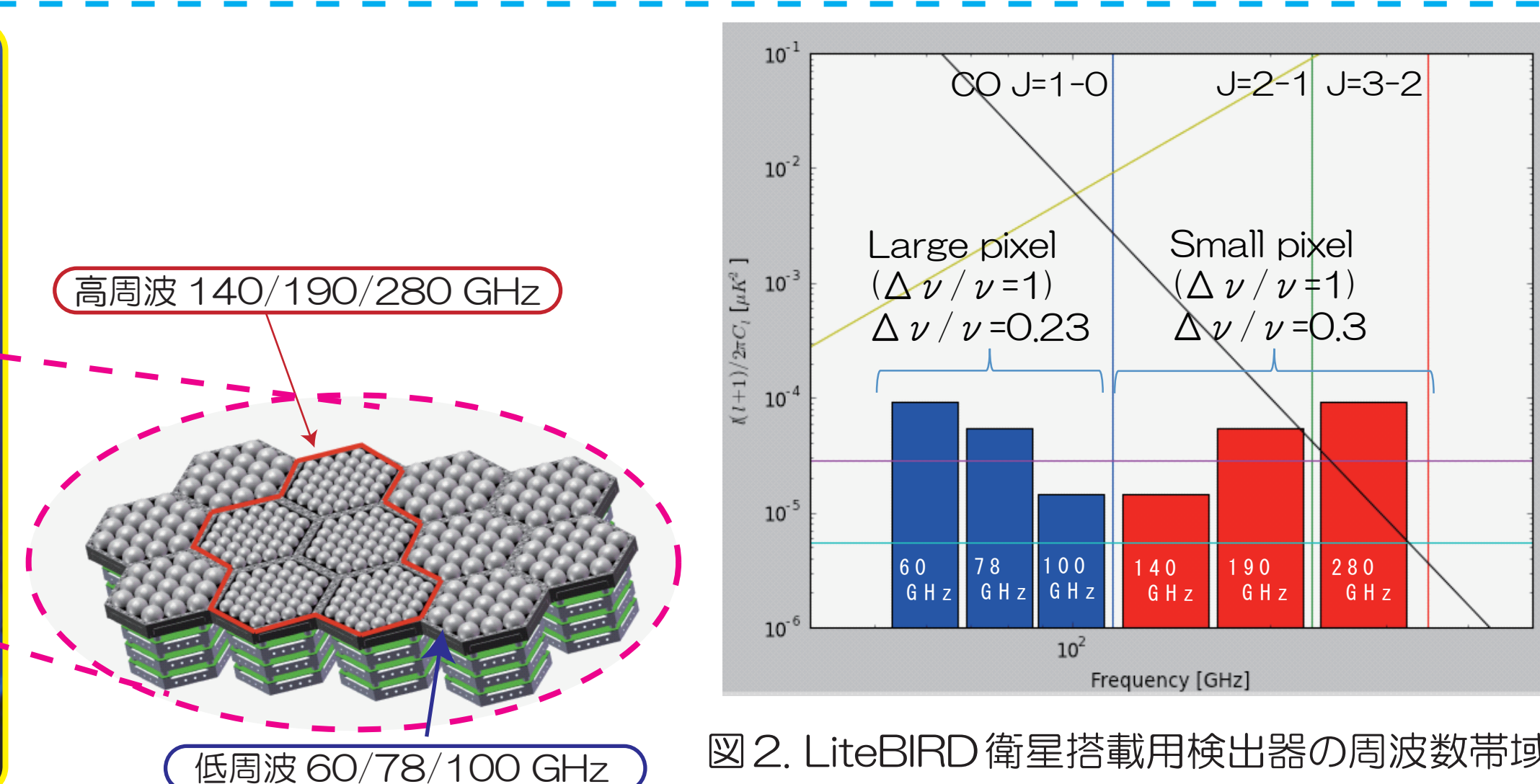


図 2. LiteBIRD 衛星搭載用検出器の周波数帯域。我々は検出器帯域内に CO の輝線が入らない帯域選択を行っている。

光学系について

LiteBIRD へ搭載する光学系方式として、現在クロスドラゴン光学系の採用を予定している。クロスドラゴン光学系とは、オフセットパラボラ鏡である主鏡、双曲面鏡である副鏡およびフィードで構成されるものである。この光学系の特徴として、主鏡の大きさに対して構造が比較的コンパクトに収まり、かつ、広い焦点面が確保できることが挙げられる。その反面、迷光や回折の影響がサイドローブに現れるという欠点をもつことが懸念される。LiteBIRD 光学系は低いファースイドローブレベルが要求されており、懸念されている迷光等の影響が全天方向のアンテナビームパターンにどのような影響を与えるかの評価は重要である。そこで、我々は物理光学手法を用いたシミュレーションソフト GRASP を用いて「アンテナビームパターンへの迷光による影響」や「迷光対策を目的としたバッフルを設置した際に迷光がどの程度低減できるか」、「焦点面内でフィードの設置位置を変更することでどの程度ポインティングがずれるか」等の計算を行った。これらの計算結果は周波数 : 60GHz (検出器帯域 (図 2) の中で最も回折の影響が大きい低周波を選択。)、フィード : コニカルホーン (検出器の有すビームパターンのアンテナビームパターンへの寄与の確認。) を設定した。

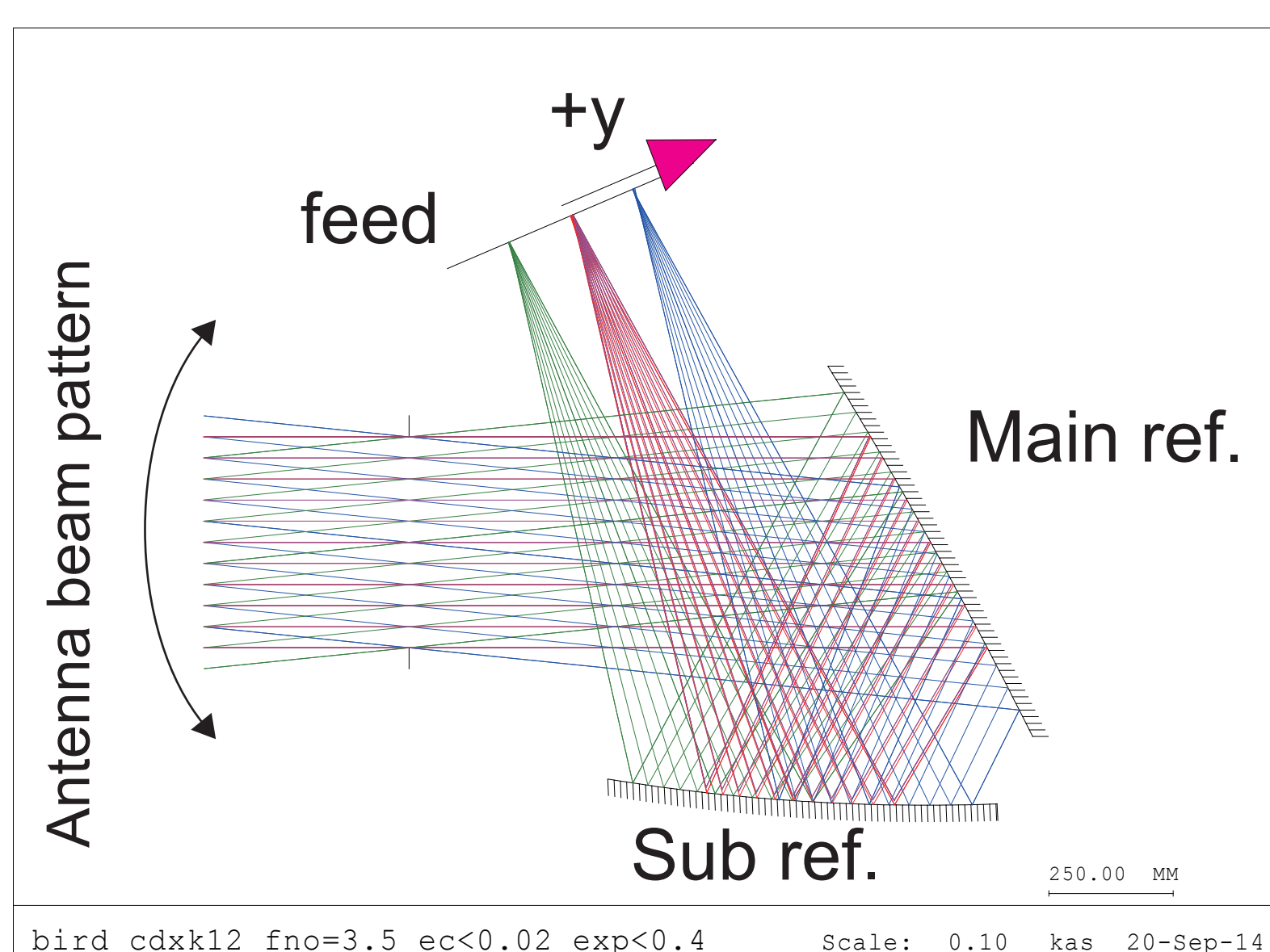


図 3. LiteBIRD 光学系モデル

本光学系設計は光線追跡手法を用いた計算ソフト CODE-V を用いて設計した。開口は $\phi 400 \text{ mm}$ を設定しており、図は天体からの信号が $-5 \text{ deg}, 0 \text{ deg}, 5 \text{ deg}$ の三種類の光線束が入射した際にそれぞれが焦点面で焦点を結ぶことを示している。

フィード位置の変更とポインティングのずれ

焦点面のうち、フィードが焦点面に設置した場合 ($y=0 \text{ mm}$) および $y=\pm 60 \text{ mm}$ (図 3 記載の y 軸定義参照) にフィードを設置した場合のビームパターンを確認し、ポインティングのずれや、ビームパターンの形状の変化を確認した。その結果、フィードが 60 mm 移動することでポインティングが $2 \sim 3 \text{ deg}$ ずれることや、図 4 で確認したスピルオーバーや多重反射の影響が依然見えることを確認した。

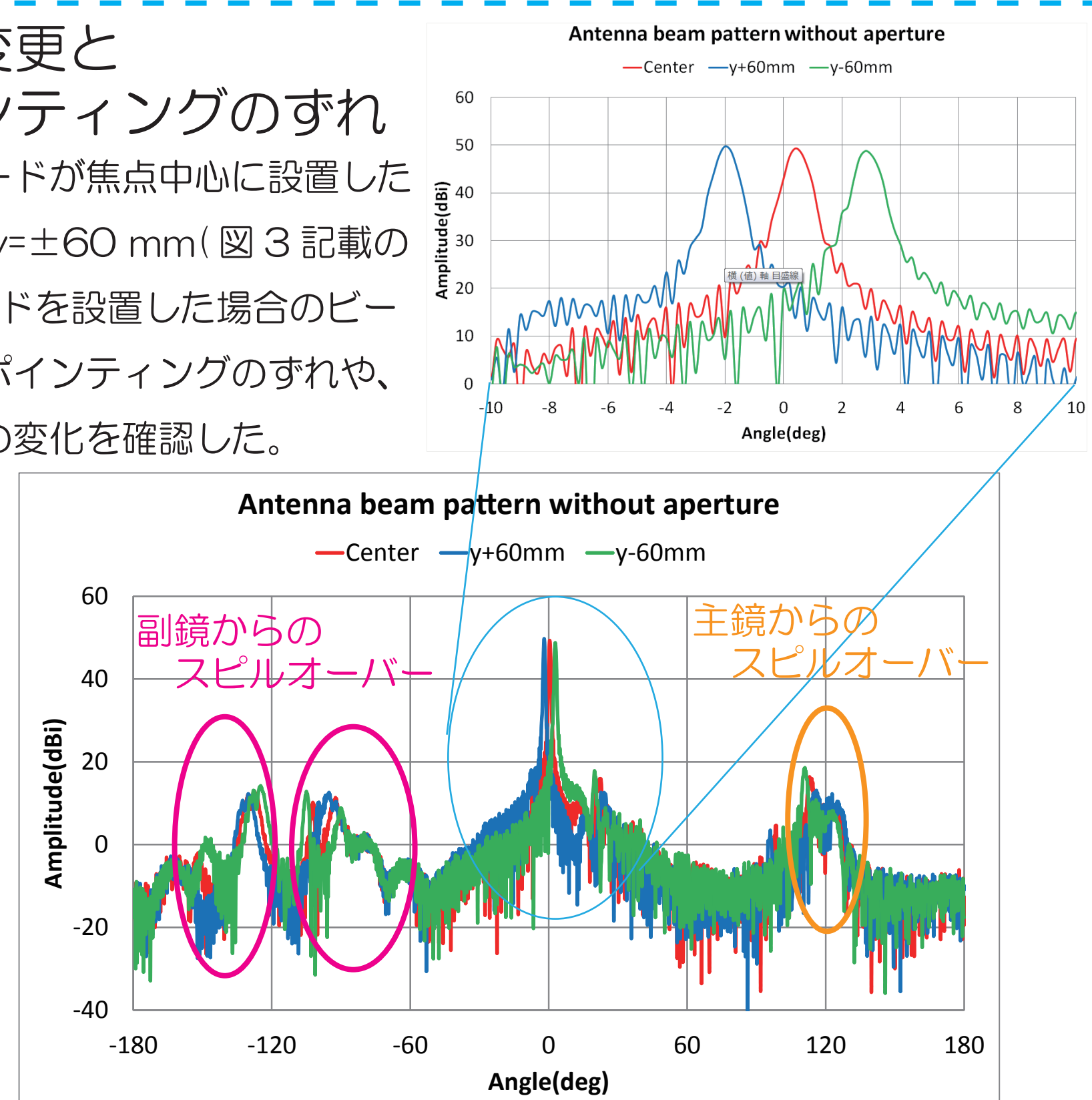


図 5. フィードを $y = -60, 0, +60 \text{ mm}$ に設置した際のビームパターン

アンテナビームパターンへの迷光の影響

今回、我々はクロスドラゴンに期待される正規の伝送経路 (経路 03) およびスピルオーバーや多重反射等の多重反射の影響が予想される 10 経路の計 11 経路 (表 1 参照) を想定し、GRASP で計算を行った。その結果、副鏡や主鏡からのスピルオーバーや経路 06, 07, 08 が原因で現れるピークがビームパターンに現れることが判明した。

表 1. GRASP の計算で考慮した光学系伝送経路

光学系伝送経路
01. feed \rightarrow sky
02. feed \rightarrow sub ref \rightarrow sky
03. feed \rightarrow sub ref \rightarrow main ref \rightarrow sky
04. feed \rightarrow sub ref \rightarrow main ref \rightarrow sub ref \rightarrow sky
05. feed \rightarrow sub ref \rightarrow main ref \rightarrow sub ref \rightarrow main ref \rightarrow sky
06. feed \rightarrow main ref \rightarrow sky
07. feed \rightarrow main ref \rightarrow sub ref \rightarrow sky
08. feed \rightarrow main ref \rightarrow sub ref \rightarrow main ref \rightarrow sky
09. feed \rightarrow main ref \rightarrow sub ref \rightarrow main ref \rightarrow sub ref \rightarrow sky
10. feed \rightarrow main ref \rightarrow sub ref \rightarrow main ref \rightarrow sub ref \rightarrow main ref \rightarrow sky
11. feed \rightarrow main ref \rightarrow sub ref \rightarrow main ref \rightarrow sub ref \rightarrow main ref \rightarrow sub ref \rightarrow sky

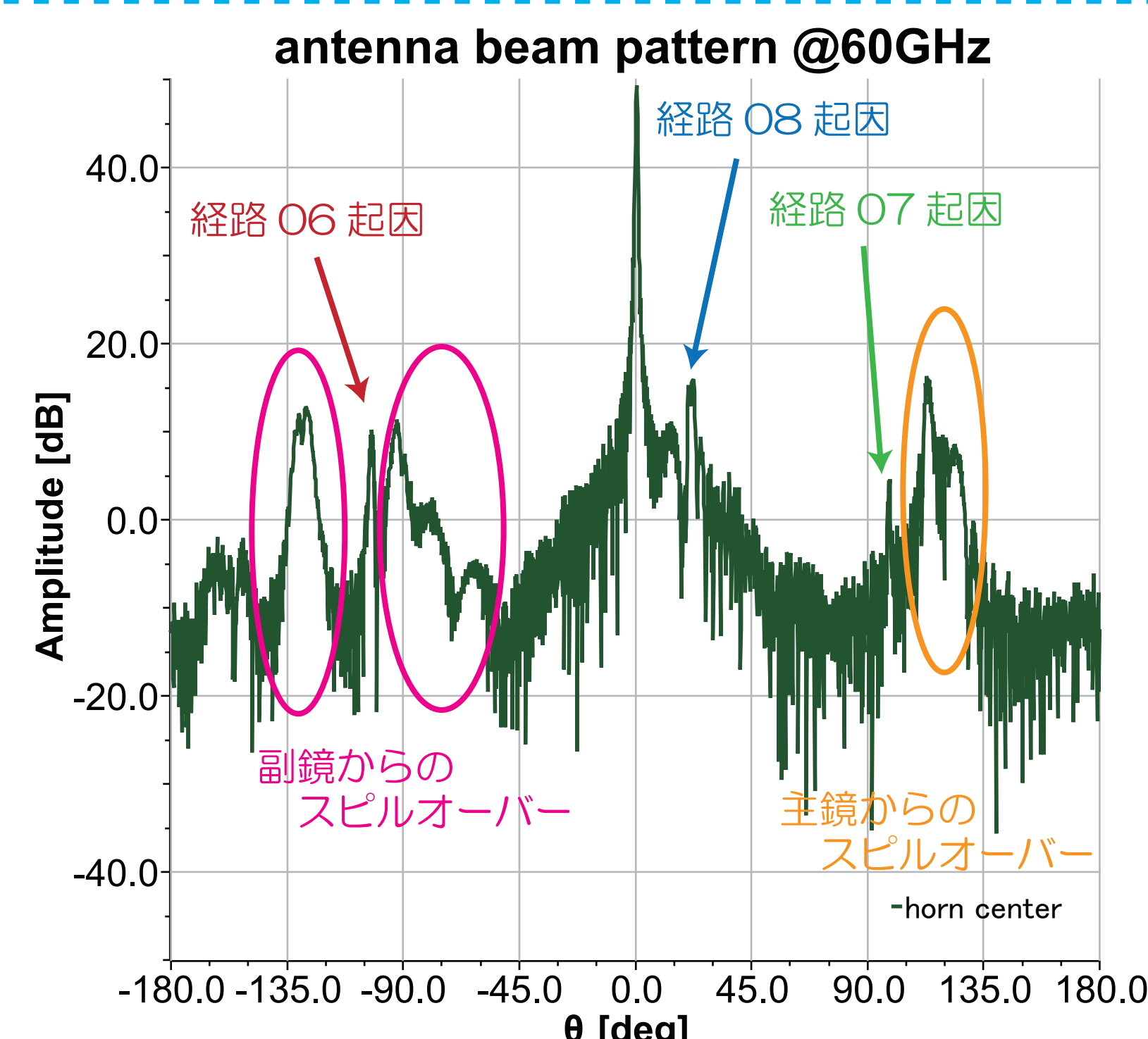


図 4. 全 11 経路を考慮した際のアンテナビームパターン。フィードを焦点面の中心に設置した際のビームパターンを示す。副鏡や主鏡からのスピルオーバーや経路 06, 07, 08 が原因で現れるピークがビームパターンに現れることが確認された。

バッフルの設置

ビームパターンに見られる迷光の影響を低減する為、我々は迷光対策装置バッフルの設置を検討している。バッフルの形状としては、光学系全体を電波吸収体で覆った上で開口に $\phi 400 \text{ mm}$ で高さのある、筒上の窓を設置するようなものとなっており、これによりスピルオーバーや迷光の成分が低減されることが期待されている。このバッフルの高さがどれ程度であれば迷光を十分低減できるかの確認を GRASP を用いて行ったところ、高さ 300 mm でかなり迷光成分を低減できることが確認できた。

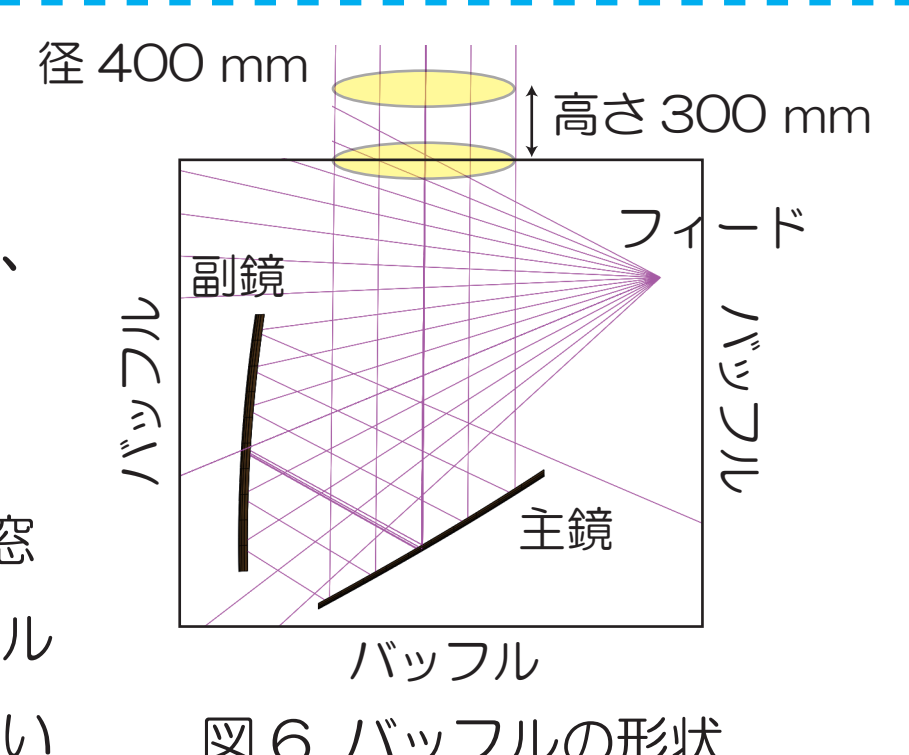


図 6. バッフルの形状

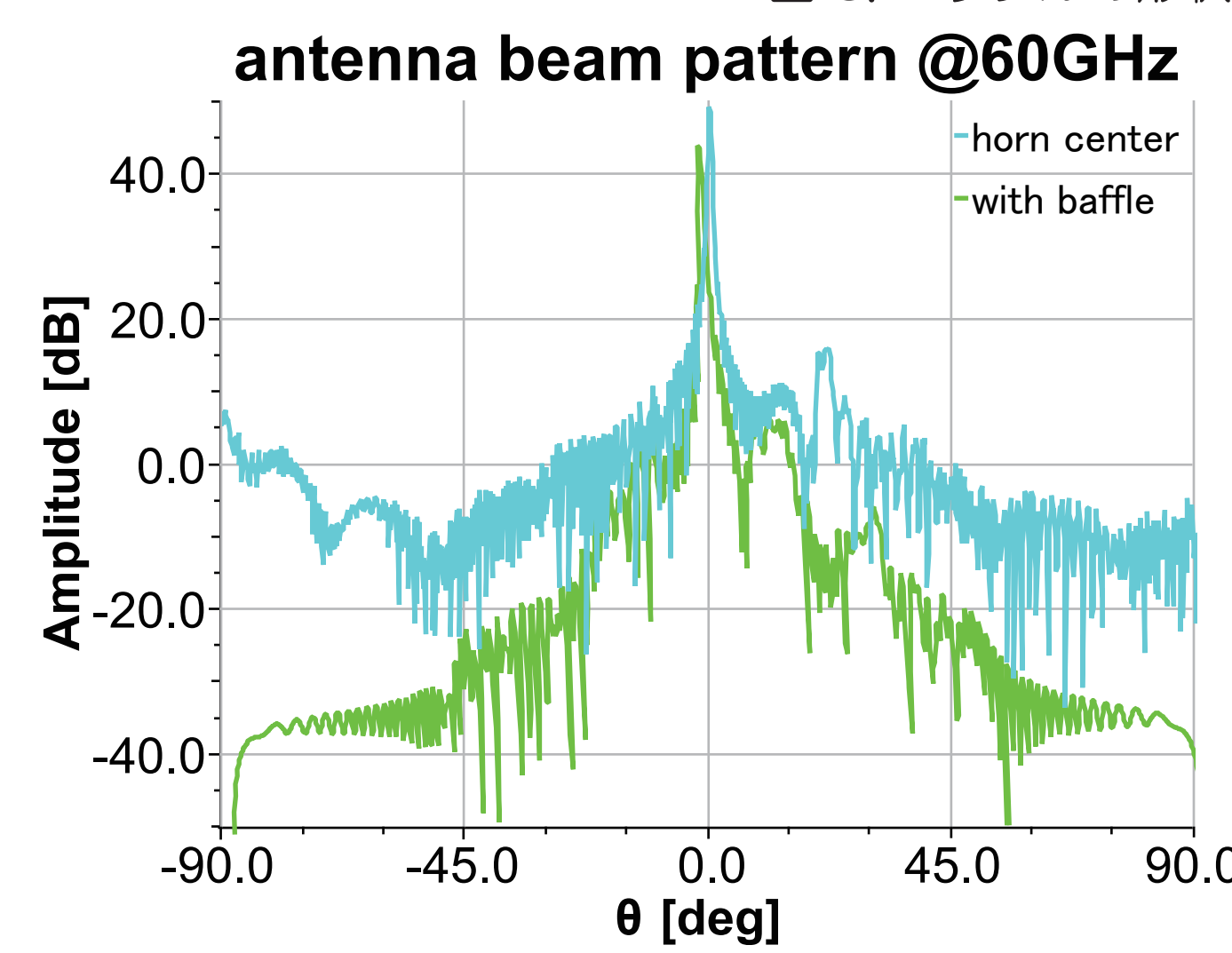


図 7. バッフルの有りと無しの場合のビームパターン

まとめと今後

今回、GRASP を用いてアンテナビームパターンへの迷光による影響やフィード位置の変更によるビームパターンの変化、バッフル設置による迷光成分の低減について確認を行った。その結果、主鏡・副鏡のスピルオーバーや伝送経路 06, 07, 08 の影響がビームパターンに現れることやフィード位置の移動に伴い、ポインティングがどの程度ずれるかが判明した。また迷光を十分低減できるようなバッフルのサイズを GRASP の計算結果から求め、バッフルの高さが 300 mm 程度であれば光学系の迷光低減が期待できることを確認した。今後としては、現在進めている $1/3$ スケールモデルの製作およびビームパターンの測定を行い、GRASP での計算結果と実測結果の比較や計算精度の向上を図る。

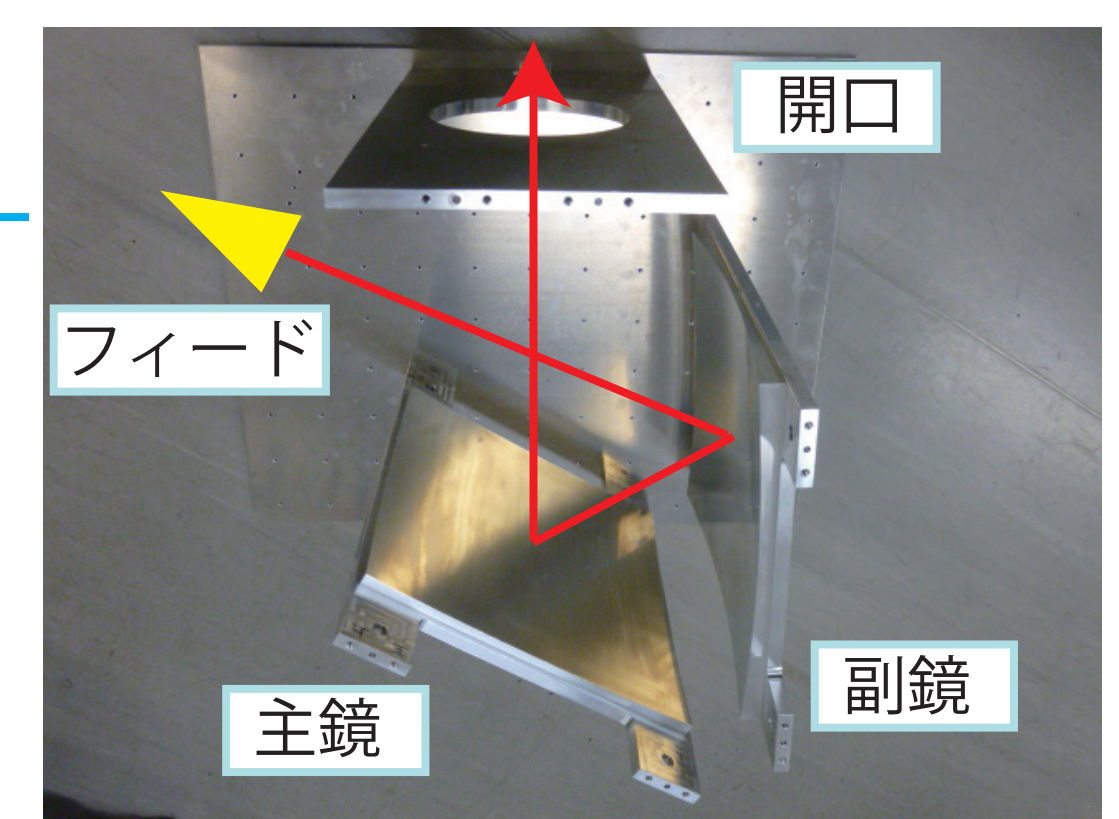


図 8. 製作した $1/3$ スケールモデルの光学素子写真