

著者	ふりがな 氏名	さかぐり かな 坂栗 佳奈
表題	CMB 偏光観測に用いる反射防止膜の開発	
論文概要 (頁を増やして構いません)		
<p>1. 研究背景</p> <p>宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) は、宇宙誕生後約 38 万年から届く宇宙最古の電磁波であり、温度と偏光の情報を持つ。特に、B モード偏光と呼ばれる偏光を観測することで、<u>初期の宇宙が指数関数的膨張を起こしたとされるインフレーション宇宙モデルを証明</u>できる。偏光観測は微弱な信号を高精度で測定しなければならず、これまで統計的に優位な信号は検出されていない。そこで、高統計かつ系統誤差を低減する光学系の装置開発が盛んに行われている。</p> <p>現行実験から、B モード偏光の大きさは温度揺らぎと比べて <math>O(10^{-7})</math> と非常に小さいことが示唆されている。そのため、<u>装置の非理想性に起因する「温度揺らぎから偏光への漏れこみ」</u>が大きな問題となる。漏れこみは、温度の信号が装置によって偏光として観測されてしまう、系統誤差の一種である。この漏れこみは、反射率の大きな光学素子で顕著に表れるため、<u>これらの素子に反射防止加工を行う必要がある</u>。</p> <p>CMB の信号は中心周波数約 90/150 GHz が観測に適し、比帯域約 30% の広帯域で観測を行う。そのため、反射防止膜によって、この広帯域で反射率 3% 以下まで減少させる必要がある。また、望遠鏡の光学素子は、直径約 50 cm の大口径であり、高い精度で均質な反射防止膜を塗布する必要がある。さらに、素子は 50 K 以下の低温で使用されるため、冷却した際に反射防止膜の層間で剥離しない必要がある。</p> <p>そこで、これらの広帯域で低反射率・大口径で<u>均一・低温で剥離しない条件を満たすために 2 層の反射防止膜を開発</u>した (図 1)。なお、対象とする周波数帯は CMB 観測に適した 90/150 GHz と、前景放射であるダストを見積もるための約 220/280 GHz とした。また、ここで得られた装置の性能を基に「温度から偏光への漏れこみ」が CMB 観測に対して与える影響と望遠鏡の感度を考察した。開発した素子は、Simons Array 実験や Simons Observatory 実験と呼ばれる、チリでの地上 CMB 観測実験に使用される。</p>		

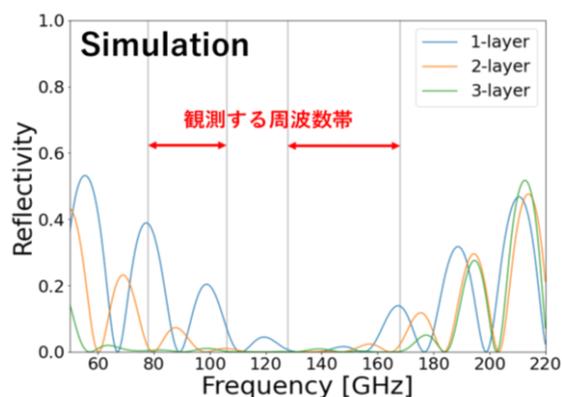


図 1: 反射防止膜の層数の違いによる反射率の比較  
観測する周波数帯は地上実験の 1 つである SO 実験を例に示した。観測周波数が広帯域なため、1 層では低反射率を実現できず、複数層必要である。

## 2. 反射防止膜の作製

望遠鏡に使用する光学素子の中で、連続回転式半波長板と呼ばれる素子と赤外線 (IR) カットフィルターの反射防止膜を作製した。これらはそれぞれサファイア、アルミナから作られる。屈折率はともに約 3.1 とほぼ等しいため、同様の開発技術を両素子に適用できる。

屈折率や熱収縮率の観点から、コーティング材として 1 層目には屈折率 2.5 の mullite と呼ばれるセラミックス、2 層目には屈折率 1.4 の Duroid 5880LZ (PTFE とマイクログラスファイバーをベースとした複合材) を用いた (図 2)。各層はそれぞれ熱溶射技術、糊剤 (Epo-Tek 301-2) を用いて貼り付けを行った。

コーティング開発は、10 cm 角の小サンプルを用いて、作製・光学測定・デザイン変更を繰り返すことで実現した (図 3)。光学的な厚さは設計値と異なるため、1 層貼り付けごとに光学試験を行い、得られた結果からコーティング層の厚さの傾向を理解した。この過程を経ることで、コーティングの厚さを最適化した。これらの繰り返し試験が終わった段階で、大口径の本番素子へのコーティングを行った。素子の性能評価項目は、低温で剥離しないことを確認する冷却試験と、低反射率が実現していることを確認する光学試験の 2 つである。冷却試験では、冷凍機を用いて作製したサンプルを 30 K に冷却し、剥離がないことを確認した。光学試験は本研究の主要項目の 1 つであり、次章で詳細を記述する。

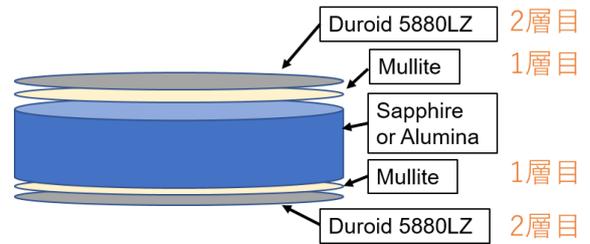


図 2: 反射防止膜の概念図

サファイアまたはアルミナの両面にコーティングを行う。

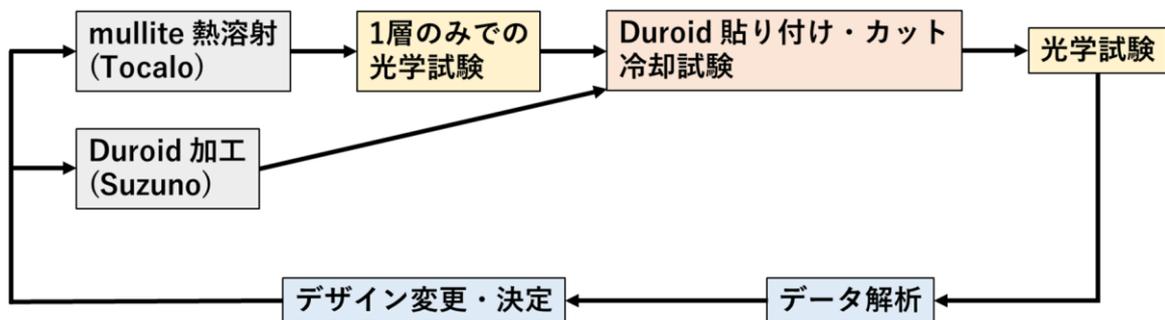


図 3: 反射防止膜作製過程

テスト用の小サンプルでこの工程を繰り返すことにより、コーティング層の厚さを最適化した。

## 3. 常温での光学性能評価

光学性能評価には、Vector Network Analyzer (VNA) を使用し、反射率・透過率の測定を行った。図 4 は、10 cm 角小サンプルの測定系写真を示す。反射率の測定には、サンプルに入射角 45 度で入射させた S 偏光を用いた。得られた反射率から各コーティング層

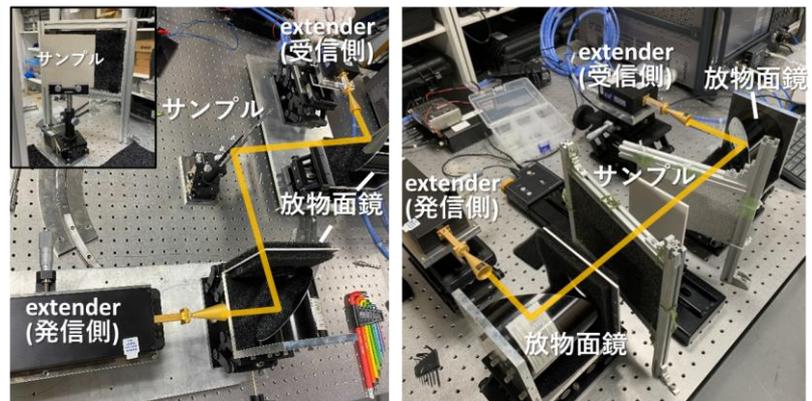


図 4: 光学測定系の写真 (@IPMU)

(左) 反射率測定系、(右) 透過率測定系。黄色い矢印が光学パスを表す。発信側の extender から出た光はサンプルを反射/透過し、受信側の extender に届く。

の屈折率・厚さのフィットを行った。これらの値を垂直入射での値に外挿して平均反射率を導出することで、性能評価を行った（図5）。

観測周波数帯での平均反射率は2.7%であり、要求値を満たす低反射率を実現した。

本番用の大口径素子についても、45度入射でのS偏光を測定し、小サンプルと同様の解析手法で評価した。図6に、測定系と測定サンプルの写真を示す。直径が約50 cmと大きいため、小サンプルと同様の低反射率を実現できているかの確認に加え、複数箇所での測定を行い、反射防止膜の均一性を確認した（図

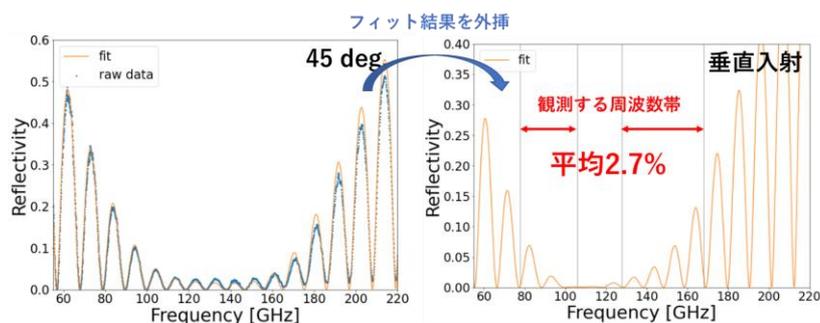


図5: 10 cm 角小サンプルの測定結果

(左) 入射角 45 度での測定データ[青]とフィット曲線[橙]

(右) 垂直入射での反射率。左のフィット結果を外挿した。観測周波数帯での平均反射率は、約 2.7%を実現した。

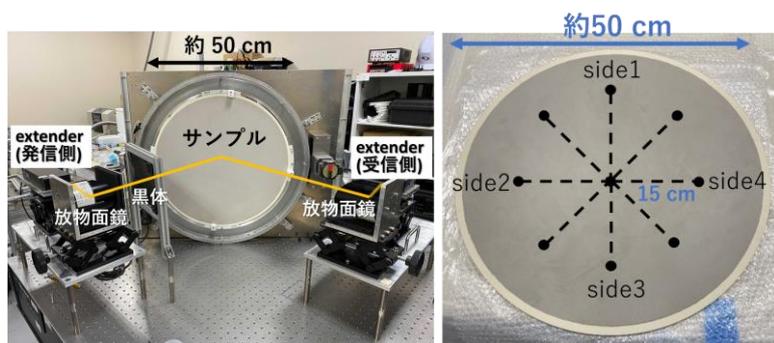


図6: 本番用素子の測定系

(左) IPMU での反射率測定の様子。小サンプルと同様に入射角 45 度での反射率を測定した。(右) サンプルの測定場所。均一性を確認するため、点で示した 9 箇所について測定を行った。

6)。全測定箇所での平均反射率は約 2.6%であり、大口径でも低反射率を実現できていることが確認された。

望遠鏡の検出器に届く光は素子の透過率で特徴づけられるため、反射率に加え透過率も測定した。反射率測定のみでは不十分な理由は、コーティング材である誘電体に吸収が存在するためである。(反射率)+(透過率)+(吸収率)=1 となり、3要素を決定するには透過率測定も必須となる。吸収率は周波数依存性を持ち、高周波になるほど大きく、つまり、透過率が減少する。そのため、220/280 GHz の高い周波数帯で用いる素子进行评估した。サンプルの常温測定から、約 82%の透過率を得た。

#### 4. 低温での光学性能評価

常温測定から得られた透過率約 82%は、CMB 観測には不十分である。ただし、コーティング材の吸収率は温度依存性を持ち、一般に低温で減少することが知られているため、望遠鏡内で透過率は上昇すると予想される。そ

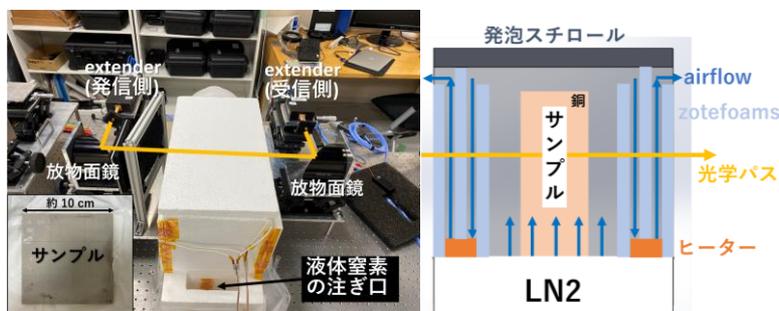


図7: 低温測定系

(左) 外観写真。常温測定と同様の VNA を用いる。写真中央には発泡スチロールで構造を作った箱を設置し、内部に 10 cm 角小サンプル(写真左下)を置く。(右) 発泡スチロールの断面図。発泡スチロールには、ミリ波に対して透明な Zotefoams を用いた。液体窒素の蒸気は、青い矢印で示した経路で外へ出る。

ここで、低温での透過率測定系を開発し、目標透過率 90%として光学性能を評価した(図7)。

測定系は、ミリ波に対して透明な発泡スチロールを用い、液体窒素の蒸気でサンプルが冷えるよう作製した。測定には、以下の2つの条件を満たす必要がある。

- ・光学パスに水滴がつかない。
- ・サンプルが約 100 K まで冷える。

水滴は、外気が液体窒素によって急激に冷却されることで生じる。そのため、液体窒素が外に出るまでの距離を長くとり、かつヒーターを用いて蒸気を温めることで水滴を防いだ。また、サンプルを十分に冷却するため、熱伝導の良い無酸素銅を使用し、光学パスに被らないようサンプルの周囲を固定した。

図8は、低温での透過率測定結果を示す。常温と比較して透過率の上昇が確認でき、平均約 90%が得られた。この値は素子が使用される約 50 K でさらに上昇することが予想される。よって、測定結果は透過率の下限値としてとらえることができ、目標値約 90%を達成した。以上より、反射率・透過率の両面で十分な性能を満たす反射防止膜を開発できた。

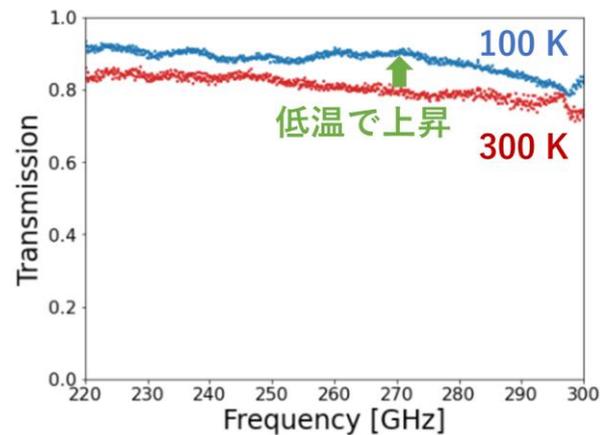


図8: 常温と低温の透過率測定結果の比較  
常温では約 82%の透過率が、冷却により約 90%まで上昇した。

#### アピールポイント

(本論文において特に自身が力を入れた部分や独自のアイデアがあれば記載してください。頁は増やして構いません。)

常温光学性能評価については、測定で得られたデータの解析と、それを用いた次作製へのフィードバックに特に力を入れた。ミリ波で測定した光学的な厚さは、設計値と違いが見られる。そこで、光学測定の結果を基に、設計値の厚さを微調整しながら解析・作製・測定を繰り返し行い、低反射率を実現した。また、隣の研究室である湯本研に協力を仰ぎ、作製サンプル断面の X 線 CT 画像を撮り、各層の実測厚さと組織を直接観察した。設計・光学測定・直接観察の3測定を比較することで、低反射率の実現だけでなく、なぜ光学的厚さが設計値と異なるかという物理的な解釈も行った。

低温光学性能評価については、測定系を開発を独自に行った。素子の誘電正接は周波数・温度の依存性を持つため、望遠鏡の光学素子が使用される 100 K 以下で評価しなければならない。そこで、液体窒素およびミリ波に対して透明な発泡スチロールを用い、冷凍機を使用する従来の測定と比較して短時間でサンプルの測定を実現した。液体窒素の使用により、空気は急激に冷却され水滴となる。水は屈折率が大きく測定の妨げとなるため、光学パスに水滴がつかないようにする工夫が必要であり、また、開発において一番難しい要求であった。申請者はこの困難な問題を解決するため、何度も試作品を作成し、最終的には、液体窒素蒸気の経路を長くとり徐々に温める設計を用いて完成までこぎつけた。この測定系を使用することで、文献値が存在しなかったコーティング材の誘電正接を初めて測定し、開発した反射防止膜の低温性能を評価した。これは、測定系を開発からデータ解析までを一連の研究として行った申請者ならではの成果である。