修士論文

CMB偏光観測実験GroundBIRDで用いる真空窓の開発研究

京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室

学生番号 0530-29-7541

小峯 順太

2019年1月24日

インフレーション理論は従来のビックバンモデルでは解決できない様々な課題を解決する。イ ンフレーションは原始重力波の存在を予言し、原始重力波は宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)の数 度角以上の領域に B モードと呼ばれる空間非対称の偏光パターンを作る。つまり、大角度スケー ルの B モード観測はインフレーション理論の検証になる。GroundBIRD は大角度スケールの観測 に特化した望遠鏡である。2019 年春からスペイン領テネリフェ島で観測開始を予定している。こ の望遠鏡は 1 分間に 20 回転することで大気が変動する前に広い領域の観測を行う。望遠鏡の焦点 面に搭載した検出器は 145±15 GHz と 220±15 GHz の 2 つの帯域に感度を持ち、250 mK 以下で使 用する。極低温の実現に真空断熱を用いるため、検出器は真空容器で覆われている。真空容器で 覆われた検出器に CMB を導くため、大気圧に押されても割れずに真空を維持しつつ、上記帯域 で透過な超高分子量ポリエチレンを「真空窓」として用いる。

本研究では GroundBIRD の観測帯域で高い透過率を実現する真空窓の開発を行った。屈折率 1.53の超高分子量ポリエチレンに反射を防止する膜を貼り付けて、表面での反射を抑えて高透過率 を実現する。超高分子量ポリエチレンは上記帯域で 8%の反射率と 2%程度の吸収率をもつ。反射 率と吸収率を同程度にすることを目指し、透過率への要求値は両帯域で平均 95%以上とした。反 射防止膜は超高分子量ポリエチレンと空気の中間である 1.2 程度の屈折率をもつ素材が望ましい。 また、貼り付けには低密度ポリエチレンを加熱によって溶かし、糊材として膜を接着する。これ らの素材は安価かつ短時間の製作を目指し、国内の流通品を用いる。反射防止膜と低密度ポリエ チレン、超高分子量ポリエチレンからなる系の透過率シミュレーションを行い、目標透過率を達 成できる素材を選定した。反射防止膜に ADVANTEC 東洋株式会社の PF050 と呼ばれる多孔質 PTFE を用い、低密度ポリエチレンにアラム株式会社の NSP-0.3 を用いる。

超高分子量ポリエチレンの融点未満かつ低密度ポリエチレンの融点以上の温度で加熱して貼り 付けを行った。1枚の真空窓を作るためにかかる時間は10時間、単価はおよそ25000円であった。 加熱による膜の貼り付けに成功したが、新たな課題として、融点を下回っているにも関わらず超 高分子量ポリエチレンが変形することがわかった。変形によって5%厚さが増える。厚さの増加 によって透過率性能と強度性能の変化を評価することが新たな課題として挙げられ、その評価も 行った。超高分子量ポリエチレンの厚さの変化と透過率の関係を再度シミュレーションしたとこ ろ、透過率に影響しないことがわかった。さらに、加熱前後の超高分子量ポリエチレンの透過率 測定から厚さ以外の物性値に有意な変化がないことも確認した。続いて、同一の方法で4枚の反 射防止膜付きの真空窓を製作し、4枚中3枚の中央部の透過率と、3枚の内1枚について中央と 異なる上下部の透過率を測った。測定の結果、3枚の真空窓の中央部の透過率は測定精度の範囲 内で一致し、145 GHz 帯で平均97.3±0.1%、220 GHz 帯で平均97.1±0.2%を得た。また、場所ご との透過率の違いについては1.5%程度であり、要求値95%を上回る。次に、真空窓を望遠鏡に取 り付けて真空引きし、真空引きの際に負荷がかかっても破損しないことを確認した。24時間の試 験も行い、真空を維持することも確認した。

以上、GroundBIRD で用いる真空窓の作製手法を確立した。これは透過率への要求と大気圧に 耐える強度要求を満たすだけでなく、安価かつ短時間での製作を実現する。

目 次

第1章	大角度スケール CMB 偏光観測の意義	1
1.1	CMBの揺らぎ	2
	1.1.1 密度揺らぎ	2
	1.1.2 テンソル揺らぎと原始重力波	2
1.2	CMB の偏光	3
	1.2.1 偏光生成のメカニズム	3
	1.2.2 偏光パターン	4
1.3	原始重力波由来の <i>B</i> モードを観測する意義	5
第2章	GroundBIRD 実験	6
2.1	望遠鏡概要	6
2.2	高速回転スキャン・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
2.3	回転継ぎ手	7
2.4	極低温光学系	8
2.5	超伝導検出器	11
2.6	真空窓	13
	2.6.1 真空窓に対する要求	14
第3章	反射防止膜のシミュレーションと材料選定	16
3.1	反射防止膜の原理....................................	16
	3.1.1 光学薄膜の数学的取り扱い	16
	3.1.2 反射防止コーティング	20
	3.1.3 電磁波の吸収を考慮する場合	20
3.2	透過率のシミュレーションと材料選定	20
	3.2.1 超高分子量ポリエチレンの透過率シミュレーション	21
	3.2.2 材料選定	21
	3.2.3 選定材料における透過率シミュレーション	22
第4章	反射防止膜の貼付	26
4.1	貼付方法の概要	26
4.2	貼付条件の最適化....................................	26

	4.2.1 低密度ポリエチレンの融点の確認	28
	4.2.2 貼付時の温度制御の最適化	30
4.3	GroundBIRD 用真空窓の外形	33
4.4	反射防止膜の貼付....................................	35
4.5	貼り付け時の加熱による超高分子量ポリエチレンの収縮...........	39
	4.5.1 加熱温度の違いによる変形の有無	39
	4.5.2 変形による懸念	39
4.6	GroundBIRD 用真空窓の製作	41
第5章	真空窓の透過率の測定	43
5.1	測定試料	43
5.2	透過率の測定系	45
	5.2.1 各機器の名称と役割	46
	5.2.2 測定方法	49
5.3	透過率測定の結果と考察	49
	5.3.1 超高分子量ポリエチレンの透過率	49
	5.3.2 反射防止膜を貼った真空窓の透過率	51
第6章	真空窓の大気圧耐久試験	55
6.1	大気圧による真空窓の変形.................................	55
6.2	耐久試験方法	55
6.3	耐久試験結果	56
第7章	結論	58
	謝辞。	59
	参考文献	60

図目次

1.1	宇宙の膨張と最終散乱面の概略図	1
1.2	密度揺らぎによる CMB の温度異方性	2
1.3	原始重力波による CMB の温度異方性	2
1.4	トムソン散乱による偏光生成..................................	3
1.5	CMB 偏光の生成過程の概念図	3
1.6	密度揺らぎが作る偏光パターン	4
1.7	テンソル揺らぎが作る偏光パターン................................	4
1.8	GroundBIRD の観測範囲と予想される B モードのパワースペクトル	5
2.1	GroundBIRD 望遠鏡	7
2.2	GroundBIRD 望遠鏡と冷凍機の模式図	9
2.3	極低温光学系	9
2.4	冷却シールド	10
2.5	焦点面の入れ子構造	10
2.6	MKID の構成	12
2.7	MKID の検出原理	12
2.8	GroundBIRD で使用する超伝導検出器 MKID	12
2.9	CMB と前景放射の周波数依存性	13
2.10	超高分子量ポリエチレン	15
2.11	反射防止膜を貼り付ける前の超高分子量ポリエチレンの透過率のシミュレーション	15
3.1	薄膜中の電磁場	17
3.2	反射防止膜付き真空窓の透過率シミュレーションを行う系の模式図	23
3.3	低密度ポリエチレンの厚さを変えた時の 145 GHz 帯の透過率シミュレーション	24
3.4	低密度ポリエチレンの厚さを変えた時の 220 GHz 帯の透過率シミュレーション	24
3.5	反射防止膜の有無に対する超高分子量ポリエチレンの透過率シミュレーション	25
4.1	反射防止膜付き真空窓の模式図	26
4.2	貼り付けに用いる NDO – 510 型オーブン	27
4.3	熱電対温度計を用いたオーブン温度計と加熱対象の温度の同時モニター......	27
4.4	低密度ポリエチレンを加熱して, 融点を確認するためのセットアップ	28

4.5	低密度ポリエチレンを 110 ℃まで加熱した時の温度変化
4.6	低密度ポリエチレンを 120 ℃まで加熱した時の温度変化
4.7	加熱温度の違いによる低密度ポリエチレンの融解度合いの違い
4.8	PTFE の超高分子量ポリエチレンへの貼り付け 30
4.9	オーブンの設定を 130 ℃ 3 時間維持した時の温度と加熱時間の関係
4.10	オーブン設定を 130 ℃ 3 時間維持した時の結果
4.11	オーブンの設定を 140 ℃ 3 時間維持した時の温度と加熱時間の関係
4.12	オーブン設定を 140 ℃ 3 時間維持した時の結果
4.13	望遠鏡の真空窓部
4.14	真空窓フランジの設計図 33
4.15	真空窓抑えの設計図
4.16	真空窓用超高分子量ポリエチレンの設計図 34
4.17	反射防止膜を貼り付ける超高分子量ポリエチレン
4.18	反射防止膜の素材を切り出す台紙 36
4.19	切り出される低密度ポリエチレン 36
4.20	切り出した多孔質 PTFE, 低密度ポリエチレンと位置合わせのジグ 36
4.21	反射防止膜を仮留めした超高分子量ポリエチレン (加熱前)
4.22	加熱による超高分子量ポリエチレンの反りを防ぐアルミ製固定板
4.23	加熱時のオーブン内の様子
4.24	加熱による反射防止膜付き超高分子量ポリエチレンの収縮
4.25	超高分子量ポリエチレンの厚さが変わる時と 10 mm の時の 145 GHz 帯の平均透過率の差
	のシミュレーション 40
4.26	超高分子量ポリエチレンの厚さが変わる時と 10 mm の時の 220 GHz 帯の平均透過率の差
	のシミュレーション 40
4.27	収縮を考慮した超高分子量ポリエチレンの図面41
4.28	反射防止膜を貼り付ける前の超高分子量ポリエチレン
4.29	GroundBIRD で使用する反射防止膜付き超高分子量ポリエチレン 42
5.1	測定田超喜分子量ポリエチレン 43
5.2	加熱した測定田紹高分子量ポリエチレン 43
5.3	
5.4	週回平例ために設下した反射的工族内と真主応
5.5	孤海家測定系の模式図 45
5.6	² 2-1-102-102-102-102-102-102-102-102-102-
5.7	発振器の外観 47
5.8	通倍器の外観 47
0.0	

5.9	送信機の外観	47
5.10	チョッパーの外観....................................	47
5.11	チョッパー制御装置の外観.................................	47
5.12	送信機側の放物面鏡の外観..................................	47
5.13	アテネーターの外観	48
5.14	ホルダージグの外観	48
5.15	ホルダーの外観	48
5.16	受信機側の放物面鏡の外観・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	48
5.17	受信機の外観	48
5.18	ロックインアンプの外観	48
5.19	USB DAQ の外観	48
5.20	空気の測定	49
5.21	試料の測定	49
5.22	加熱していない超高分子量ポリエチレンの透過率	50
5.23	加熱した超高分子量ポリエチレンの透過率	50
5.24	反射防止膜を施した超高分子量ポリエチレンの透過率1枚目中央	52
5.25	反射防止膜を施した超高分子量ポリエチレンの透過率2枚目中央	52
5.26	反射防止膜を施した超高分子量ポリエチレンの透過率3枚目中央.........	52
5.27	反射防止膜を施した超高分子量ポリエチレンの透過率3枚目上	53
5.28	反射防止膜を施した超高分子量ポリエチレンの透過率3枚目中央.........	53
5.29	反射防止膜を施した超高分子量ポリエチレンの透過率3枚目下	53
61	直空窓として田いた超高分子量ポリエチレンの変形	55
6.2	反射防止膜を貼った超高分子量ポリエチレンの耐圧試験	56
6.3		56
6.4	反射防止膜を貼った超高分子量ポリエチレンの耐圧試験後の様子	57
6.5	耐圧試験後の反射防止堕	57
0.0		01

初期宇宙には荷電粒子が数多く飛び交っており、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) はそれらの粒子に よって絶えず散乱されて直進できず、この時期の情報を保持したまま観測者まで到達できない。CMB が 荷電粒子との間で散乱せず直進できる時期を宇宙の晴れ上がり (赤方偏移 z が z ~ 1100) と呼び、観測者 から見て、CMB が自由電子と最後に散乱した時空面を最終散乱面^[1] と呼ぶ (図 1.1)。これ以後、宇宙の 自由電子の数密度は再電離期 (z ~ 20) まで増えないため、観測される CMB の偏光情報の多くは、最終散 乱面で CMB に付与された情報となる。最終散乱時刻における宇宙の地平線の距離は、現在の天球上の 視直径 θ で約 2°^[2] であり¹、天球を球面調和関数で展開した時の次数 Multipole *l* で表すと、*l* = 180°/ θ , より *l* ~ 100 となる。最終散乱時刻の地平線は現在に至るまでに宇宙の膨張によって広がり続けるため、 この時代の情報は約 2° 以上の領域に広がる。従って、大角度スケールにわたる CMB の偏光情報を観測 できれば、そこから原始重力波の痕跡を引き出すことができる。これが、最終散乱時刻に CMB に刻ま れた偏光を観測し、そこから原始重力波の痕跡を抽出するために大角度スケールを観測しなくてはなら ない理由である。



図 1.1 宇宙の膨張と最終散乱面の概略図

1.1 CMBの揺らぎ

1.1.1 密度揺らぎ

重力ポテンシャルの大きい領域から出る光子は、重力によって空間が伸びているため赤方偏移してエ ネルギーを失う。逆に、重力ポテンシャルの大きい領域に入り込む光子は、青方偏移してエネルギーを 得る。宇宙初期に物質の密度分布に疎密の揺らぎがあれば、重力ポテンシャルも同様に揺らぐため、光 子にも四重極の温度異方性が生じる。物質の密度の揺らぎは、縦波のように振る舞いながら最終散乱面 を進む。この時、CMB に図 1.2 のような温度異方性が形成される。



図 1.2 密度揺らぎによる CMB の温度異方性

1.1.2 テンソル揺らぎと原始重力波

重力波は + モードと呼ばれる振動モードと × モードと呼ばれる振動モードの2つをもつ。+ モード を 45°回転させると × モードにうつる。原始重力波が存在する場合、最終散乱面において CMB は空間 の伸縮による実効的な温度異方性をもつ (図 1.3)。



図 1.3 紙面に垂直に進む原始重力波による CMB の温度異方性

1.2 CMBの偏光

1.2.1 偏光生成のメカニズム

CMB の偏光は自由電子とのトムソン散乱と自由電子の静止系からみた四重極の温度異方性によって 作られる。z 軸方向に振動する電場をもつ光が x 軸の負の方向から来て原点にいる電子と相互作用する と、電子は電場によって力を受けて z 軸方向に振動し、z 軸方向に振動する電場を持った散乱光が生成 される。光は横波であるため、自身の振動方向と同じ方向には進めないため、この場合、z 軸方向に偏 光する散乱光は x-y 平面上に放射される (図 1.4(a)) 図 1.4(b) は入射光が y 軸方向に偏光する電場をもつ 場合であるが、これも同様に、x-z 平面上に y 方向に偏光した散乱光が放射される。無偏光の光が電子に 入射して y 軸方向に散乱される場合は、y 軸方向の偏光は消えて z 軸方向の偏光だけが残り、直線偏光 が生成される (図 1.4(c))。

これを晴れ上がり期の場合で考えると、電子に対してあらゆる方向から CMB が入射することになる。 x 軸と z 軸から電子に向かって入射する無偏光の強度が同じであれば、y 軸方向に散乱された光は無偏光 である (図 1.5(a))。一方で、もし電子の静止系からみた時に四重極の温度異方性があって無偏光の入射 光子の強度が等しくなければ、y 軸方向に散乱される光はゼロでない偏光をもつ (図 1.5(b))。



図 1.4 トムソン散乱による偏光生成



図 1.5 CMB 偏光の生成過程の概念図

1.2.2 偏光パターン

CMBの偏光パターンには「Eモード」と「Bモード」の2種がある。どちらも前節で紹介した「揺 らぎ」によって形成される。密度揺らぎを揺らぎの進行方向に平行な面で見ると、図1.6 に示す四重極 の温度分布を持つ。この温度分布のもとでは、偏光の向きは揺らぎの進行方向に垂直または水平となる。 この偏光パターンを Eモードと呼ぶ。テンソル揺らぎでは図1.7 に示すように、+モードは密度揺らぎ 同様 Eモードを形成する。その一方で、×モードでは+モードが形成する偏光に対し、45°傾く。この 偏光パターンを Bモードと呼ぶ。



図 1.6 密度揺らぎが作る偏光パターン



図 1.7 テンソル揺らぎが作る偏光パターン

1.3 原始重力波由来の*B*モードを観測する意義

CMBの偏光モードとその起源を表 1.1 にまとめた。本章冒頭で述べたように、CMB に刻まれた情報 の多くは最終散乱面で付加される。これは現在の天球で約 2°以上の領域 (Moltipolel が 100 よりも小さ い)になる。もし、大角度スケールで CMB の偏光パターンから B モードが見つかれば、原始重力波の × モードが存在し、計量テンソルに摂動項が含まれている証拠となって、インフレーション理論の検証 に繋がる。そのためには、2°以上の大角度スケールの探索に特化した実験による観測が必要になる。

2019 年現在、原始重力波由来のBモード探索は南極で行われている CMB 偏光の地上観測実験 BI-CEP2 (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization 2)Keck array が先行している。この実 験と宇宙探査衛星 Planck から得られたデータ解析によって、Bモードを観測する際の指標となるテン ソル・スカラー比rはr < 0.06という制限がつけられている^[3]。GroundBIRD 実験は図 1.8 に示す領域 を探査でき、原始重力波由来のBモード観測に特化した実験である。

衣 I.I しMB の 偏元 モート こ 起	起渡	と	ド	の偏光モー	CMB	表 1.1	111
------------------------	----	---	---	-------	-----	-------	-----

偏光モード	起源
<i>E</i> モード	密度揺らぎと原始重力波の + モード
<i>B</i> モード	原始重力波の × モード



本章は沓間弘樹氏の修士論文^[4]を参考にした。

第2章 GroundBIRD実験

GroundBIRD 実験は地上に設置した望遠鏡を用いて原始重力波に由来する CMB 偏光 Bモードの観 測を目的とする。Bモードを観測する際の指標となるテンソル・スカラー比rの精度は 0.01 程度を目標 としている。本実験は初めての国産 CMB 偏光観測実験である。本実験は京都大学の他に理化学研究所、 高エネルギー加速器研究機構、国立天文台、東北大学、コリア大学、カナリア宇宙天体観測所が参加し ている。

2.1 望遠鏡概要

原始重力波に由来する Bモードを観測するためには Multipole *l* が *l* < 100 となる大角度領域の観測と 雑音の少ない環境下で優れた感度を持つ検出器を動作させる必要がある。目的を達するために、望遠鏡 (図 2.1) は

- 1. 高速回転スキャン
- 2. 極低温光学系
- 3. 超伝導検出器

という3つの特徴を有する。

望遠鏡は高さ約3mでその仕様は表2.1の通りである。2019年初頭につくば市にある高エネルギー加速 器研究機構 (KEK) からスペイン領カナリア諸島にあるカナリア宇宙天体観測所 (Institute de Astrofisca de Canarias; IAC) に輸送される。現地での動作確認の後、2019 年春から Bモードの観測を開始する予 定である。

2.2 高速回転スキャン

地上から CMB を観測するとき、受信機は CMB だけでなく地球大気の放射も受信する。地球大気の 放射強度は大気中の酸素や水蒸気が気流の変動などで揺らぐために時間変化する。地上から観測する望 遠鏡は強度が変動する放射の中から目的の情報を手に入れなくてはならない。

地上から観測する望遠鏡の観測領域は大気の放射強度が揺らがない範囲に限定される。望遠鏡の掃天 速度が早いほど大角度領域の観測が可能になる。従来の CMB 望遠鏡の掃天速度では,大気の放射強度の 揺らぐ前に観測できる領域に限界があった。そのため地上に設置した望遠鏡では大角度領域の観測は不



図 2.1 GroundBIRD 望遠鏡と模式図

可能とされた。大気の放射強度の変動の影響はおよそ 0.1 Hz である¹。従って、数秒以内に掃くことの できる天域であれば大気放射の影響を差し引きし、CMBの情報を抽出できる。

GroundBIRD は方位角方向 (地表に対して水平な方向) に 1 分あたり 20 回転 ($f_{scan} \sim 0.33 \text{ Hz}$) する望 遠鏡である。従来の望遠鏡に比べて 100 倍速のスキャン速度を達成し、大気の放射強度が変動する前に 天域の観測を行って全天の 40% の領域を観測する。GroundBIRD 実験は Multipole l が 6 $\leq l \leq$ 100 と いう広い角度スケールにわたる観測を行う (図 1.8)。原始重力波の検出に特化した実験コンセプトとなっ ている。

2.3 回転継ぎ手

望遠鏡の回転と極低温光学系の両立のために回転継ぎ手と呼ぶ、望遠鏡を回転させながら冷却できる 機構が開発された^[8]。冷凍機の電源ケーブルと冷媒用の配管を継手を介して電源やコンプレッサーとつ なぐことで望遠鏡を回転させながら冷凍機を動作できる (図 2.2)。

¹大気のゆらぎに由来する 1/f ノイズは 10 Hz 以下で大きくなる ($f_{\text{knee}} \sim 10$ Hz). 大気の放射は無偏光であるが, もし観測 装置に無偏光を偏光と見誤るクロストークが 1 %程度あると, 検出する際にその強度の ~ 1 % は偏光成分として漏れ込んでし まう。

開口径	$300\mathrm{mm}$
光学系	クロス-ドラゴン反射光学系
検出器	超伝導検出器 MKID
視野角	± 10 °
角度分解能	0.5°
方位角スキャン速度	$120^{\circ}/\mathrm{s}$
観測範囲	全天の 40 %
観測帯域	2
中心周波数	$145\mathrm{GHz},220\mathrm{GHz}$
周波数幅	$\pm15\mathrm{GHz}$
真空窓素材	超高分子量ポリエチレン

表 2.1 望遠鏡の仕様

2.4 極低温光学系

微弱な信号である CMB を検出するために真空断熱と冷却を用いて検出器へ至る光学系からの熱雑音 を抑制している。スクロールポンプとターボ分子ポンプを用いての真空引きに加えて、極低温冷却によ るクライオポンプ効果で真空容器内の真空度は 10⁻⁵ Pa 程度に到達する。図 2.3 に示すように真空容器 内部は3つの熱放射シールドからなる入れ子構造になっており、温度は段階的に下がる。段階的に温度 を下げることで、外側からの熱放射によって検出器が温められることを防ぐ。最外部の真空容器 (300 K) の内側にアルミニウム製の 60 K シールドが収まる。60 K シールドの内側には無酸素銅製の 4 K シール ドが入っている。60K シールドと4K シールドはパルス管冷凍機(Pulse Tube Cooler; PTC)によって 冷却する。60K シールドと4K シールドはそれぞれ Multi Layer Insulation (MLI) と呼ばれる多層断熱 材で包まれている。MLIによって外側の容器から生じる熱放射が内側の容器を温めることを抑制する。 4K シールドの内部に2枚の鏡と検出器が置かれる焦点面がある。2枚の鏡は水口-ドラゴン条件を満た すクロス · ドラゴン反射光学系となっており、この光学系は鏡面反射による疑似偏光を打ち消す機能を 有する^[5]。従来の望遠鏡は鏡を常温に配置していたが、鏡からの熱放射の強度が実効的に3K程度あり、 CMBの強度と比較して優位なノイズ源であった。一方、本研究では鏡を4K未満に冷却することで鏡 からの熱放射の寄与を常温の場合に比べ1/80程度に抑制する。焦点面は2つのシールドの入れ子構造に なっている (図 2.5)。焦点面の温度は 250 mK 以下まで到達する。これらはヘリウム吸着型冷凍機を用い て冷却する。ヘリウム吸着型冷凍機は3つのコールドヘッドから成り、それぞれ1K、350mK、220mK 程度まで到達する。350mK まで到達するコールドヘッドによって外側のシールドを冷却し、220mK 程 度まで到達までするコールドヘッドで内側のシールドを冷却する. 検出器は焦点面の 250 mK シールド 内に設置される。GroundBIRD で用いている冷凍機とその型番を表 2.2 にまとめた²。

²パルス管冷凍機にはコンプレッサ (型番 CP1110 (CRYOTCH)^[6]) がつながる。



図 2.2 GroundBIRD 望遠鏡と冷凍機の模式図



図 2.3 極低温光学系



図 2.4 冷却シールド



図 2.5 焦点面の入れ子構造

第2章 GroundBIRD 実験

表 2.2 望遠鏡に用いる冷凍機

冷凍機	型番	カタログ値の冷凍能力	冷却場所
パルス管冷凍機 (PTC)	PT415-RM (CRYOTCH)	$4.2\mathrm{K}~(1.35\mathrm{W})$	4Kシールド
		$45 \mathrm{K} $ (36 W)	40 K シールド
ヘリウム吸着型冷凍機	CRC GL10-008	$\sim 250\mathrm{mK}(3\mu\mathrm{W})$	250 mK シールド
	(CHASE RESEARCH	${<}350\mathrm{mK}$	350 mK シールド
	CRYOGENICS LTD) $[7]$		

2.5 超伝導検出器

MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector)と呼ばれる超伝導検出器を用いて観測を行う。MKID は図 2.6(a) に示すように、1つの素子がアンテナと 1/4 波長マイクロ波共振器からなり共振器は誘電結 合で読み出し線に接続されている。MKID は図 2.6(b) に示すように、固有周波数 $\omega = \sqrt{LC}$ を持つ LC 回路と等価である。アンテナで受信した電波のエネルギー $h\nu$ が $h\nu > 2\Delta$ (Δ は超伝導化した物質の ギャップエネルギー)を満たす時に共振器内のクーパー対が壊れ、共振器のインピーダンスが変化する。 インピーダンスの変化は MKID の共振周波数や振幅、位相の変化を引き起こす (図 2.7)。これらの変化 量から入射した光のパワーを求める。共振器の長さに比例して共振周波数が変わるため、各素子の共振 器の長さを変えることによって1本の読み出し線で複数の素子からの信号を読み出せる。

MKID は超伝導検出器の中では時間応答性に優れている。その時定数は 250 mK 環境下で 30 – 80 μ s 程度で、GroundBIRD の角分解能とスキャン速度から要求される時間分解能 1 ms よりも十分に小さい。 GroundBIRD では、1 つの同軸線で 120 個の素子を同時に読み出す。表 2.3 に GroundBIRD に搭載さ れる MKID の目標値をまとめた。NET(Noise Equivalent Temperature; 雑音等価温度) は検出器の S/N比が1になる時の入射光子のエネルギーを温度で表した量である。この値が小さいほど低エネルギーの 光子を検出できる。

GroundBIRD では 6 枚の 145 GHz 帯に対応した MKID と 220 GHz 帯に対応した MKID を一つの平 面に並べて検出器群を作る (図 2.8)。2 つの周波数帯域に対応した検出器にすることで図 2.9 に示す銀河 からのシンクロトロン放射や星間物質の熱放射に由来するダスト放射といった、CMB と異なる信号を 周波数依存性の違いから区別する狙いがある。

観測帯域	$D_{\text{pixcel}}(3\lambda)$	NET	ピクセル	ウエハー	MKID
GHz	mm	$\mu K \sqrt{s}$	pix/枚	枚	個
145	6.3	310	55	6	660
220	4.1	530	112	1	224

表 2.3 GroundBIRD で使用する MKID の目標値









図 2.7 MKID の検出原理



図 2.8 GroundBIRD で使用する超伝導検出器 MKID



図 2.9 CMBと前景放射の周波数依存性と GroundBIRD の観測帯域

2.6 真空窓

GroundBIRD は望遠鏡内部を真空に引き,真空断熱によって極低温を保つ。望遠鏡内部は 10⁻⁵ Pa 程 度に保たれている。望遠鏡の真空維持と検出器に至る光路の確保を両立するために厚さ 10 mm の超高分 子量ポリエチレンを真空容器の窓に用いる (図 2.10)。超高分子量ポリエチレンとは、エチレン C₂H₄ を 重合して得られる結晶性樹脂で分子量が 100 万から 700 万のものを指す。融点は 136°C^[10] で衝撃や曲 げに強く、ミリ波 (数百 GHz の電磁波) に対して高い透過性質を持つため多くの CMB 観測器で窓材に 使われる ^[11]。

CMB 偏光観測は、背景事象に由来する信号と CMB に由来する信号を区別するために複数の帯域で 観測する必要がある。観測器の多くのは複数の帯域観測のために観測周波数の異なる検出器と複数の真 空窓を用意し、全体では複数帯域の観測を行うものの、個々の帯域の観測は1つの真空窓と光路で1帯 域を観測する。そうすることで観測器は大型化する一方、真空窓の透過率は1つの周波数帯域のみに特 化すれば良いという利点を持つ。一方、GroundBIRD は望遠鏡を回転させるために大型化できない。そ のため、1つの真空窓で2つの周波数帯域の検出器を動作させなければならず、GroundBIRD の真空窓 は2つの周波数帯域に対して高透過率を有する必要がある。超高分子量ポリエチレンの透過率は全反射 と電磁波の吸収の両方を加味すると90%になる (図 2.11)。厚さ 10 mm の超高分子量ポリエチレンはミ リ波に対し、約 2%の吸収率と約 8%の反射率をもつ。

第2章 GroundBIRD 実験

2.6.1 真空窓に対する要求

CMB 偏光観測では、統計量を増やすことが求められている。統計量は、観測時間を増やすことや、観 測する検出器の数を増やすことで増やすことができる。他にも、検出器に至るまでの損失を減らす事に よって統計量の増加を実現できる。真空窓は望遠鏡の先頭に位置する光学系で検出器に至る光は全て真 空窓を通るため、高透過率が望ましい。

吸収率は媒質の厚さに依存するため真空窓が薄いほど小さくなる。しかし、薄いと大気圧の負荷に耐 えきれず、強度不足で破損する可能性がある。

反射は超高分子量ポリエチレンと空気や真空との界面で屈折率が異なるために生じる。従って、超高 分子量ポリエチレンの屈折率が連続的に変化すれば反射を抑制できる。その手段として、超高分子量ポ リエチレンの表面をモスアイ構造と呼ばれる多数の柱状突起に加工することがあげられる。そうするこ とで界面での屈折率の変化を連続的に変化させることができる。しかし、モスアイ加工を大型の真空窓 に施すには開発要素が多く、実装に時間がかかる。

本研究ではまず、超高分子量ポリエチレンの反射率を抑えることで複数帯域に対応した高透過率真空 窓の実現を追求する。そうすることで、GroundBIRD で使用できる高透過率真空窓を短期間で実装する。 反射防止膜と呼ばれる薄膜を超高分子量ポリエチレンの表面に貼り付けることで界面での屈折率の変化 を抑える。適した屈折率を持つ薄膜を貼り付けることで表面の加工に比べ、短時間での製作が可能にな る。薄膜の導入によって反射率を吸収率と同程度の約2%とし、透過率に対する要求値を GroundBIRD が観測する2つの帯域で95%以上とする。真空窓の透過率が5%上がれば、観測感度が5%向上すること に相当する。また、高透過率の真空窓を製作できても、大気圧で破損しては意味がなく、その強度を担 保する必要がある。製作する真空窓に対する要求を表2.4 にまとめておく。

表 2.4 真空窓に対する要求

145 GHz 帯の透過率	95%以上
220 GHz 帯の透過率	95%以上
耐圧性能	長期間にわたり真空を維持する



図 2.11 反射防止膜を貼り付ける前の超高分子量ポリエチレンの透過率のシミュレーション

反射防止膜とは媒質の界面で生じる反射波を干渉によって打ち消して透過率を向上させる光学薄膜で ある。干渉の条件は電磁波の波数と媒質の屈折率、反射防止膜の屈折率と厚さで決まるため、屈折率と 厚さを最適化し GroundBIRD で観測を行う周波数帯域の透過率を最大化するデザインを策定する。

3.1 反射防止膜の原理

3.1.1 光学薄膜の数学的取り扱い

本節はヘクト光学^[12]を参考に記述する。図 3.1 に定義するように空気と屈折率 n_1 及び厚さ d_1 の薄 膜, 屈折率 n_m の媒質からなる系の境界における電場と磁場を考える。 ϵ_0 を真空の誘電率, μ_0 を真空の透 磁率としする。空気の屈折率は n_0 とする。電磁場の境界条件から境界 I では以下が成り立つ。

$$E_{\rm I} = E_{i\rm I} + E_{r\rm I} = E_{t\rm I} + E_{r\rm I\rm I}', \qquad (3.1)$$

$$H_{\rm I} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (E_{i\rm I} - E_{r\rm I}) n_0 \times \cos\theta_{i\rm I} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (E_{t\rm I} - E_{r\rm I\rm I}') n \times \cos\theta_{i\rm I\rm I} \,. \tag{3.2}$$

境界Ⅱでは以下が成り立つ。

$$E_{\rm II} = E_{i\rm II} + E_{r\rm II} = E_{t\rm II}, \qquad (3.3)$$

$$H_{\rm II} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (E_{i\rm II} - E_{r\rm II}) n \times \cos\theta_{i\rm II} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_{t\rm II} \times n_m \times \cos\theta_{t\rm II} \,. \tag{3.4}$$

ここで屈折率 n の非磁性媒質中において電場と磁場が伝播ベクトル k を用いて以下のようにかけること を用いた。

$$\boldsymbol{H} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n \boldsymbol{k} \times \boldsymbol{E} \,. \tag{3.5}$$

また,薄膜を1回横切った電磁波は位相が,

$$\phi_1 = \frac{k_0 (2n_1 d_1 \cos \theta_{i \mathrm{II}})}{2} = k_0 n_1 d_1 \cos \theta_{i \mathrm{II}}, \qquad (3.6)$$

だけ変化する。ここで ko は真空中での波数である。



図 3.1 薄膜中の電磁場

位相の変化分を加味すると以下の関係が成り立つ。

$$E_{i\mathrm{II}} = E_{t\mathrm{I}} \exp^{-i\phi_1}, \qquad (3.7)$$

$$E_{r\mathrm{II}} = E_{r\mathrm{II}}^{\prime} \exp^{+i\phi_1} . \tag{3.8}$$

(3.7) 式と (3.8) 式を (3.3) 式と (3.4) 式の *E*_{iII} と *E*_{rII} に代入すると、

$$E_{\rm II} = E_{t\rm I} \exp^{-i\phi_1} + E'_{r\rm II} \exp^{+i\phi_1}, \qquad (3.9)$$

$$H_{\rm II} = (E_{t\rm I} \exp^{-i\phi_1} - E'_{r\rm II} \exp^{+i\phi_1}) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \times n \times \cos\theta_{i\rm II} , \qquad (3.10)$$

となる。さらに (3.9) 式と (3.10) 式を *E*_t と *E*'_{rII} について解いて (3.1) 式の再右辺と (3.2) 式の最右辺に 代入すると、境界 I と境界 II における電磁場が以下のように結び付けられる。

$$E_{\rm I} = E_{\rm II} \cos \phi_1 + \frac{H_{\rm II}(i \sin \phi_1)}{\Upsilon_1} \,, \tag{3.11}$$

$$H_{\rm I} = E_{\rm II} \,\Upsilon_1 i \sin \phi_1 + H_{\rm II} \cos \phi_1 \,. \tag{3.12}$$

ここで Υ_1 は

$$\Upsilon_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n \cos \theta_{i\mathrm{II}} \,, \tag{3.13}$$

である。

なお、電場が入射面内に存在する場合は (3.13) 式で書かれる Υ_1 を

$$\Upsilon_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{n}{\cos \theta_{i\mathrm{II}}} \,, \tag{3.14}$$

に置き換えることで同じ結果になる。

ここで、次のような行列 M₁を

$$\boldsymbol{M}_{1} \equiv \begin{pmatrix} \cos \phi_{1} & \frac{i \sin \phi_{1}}{\Upsilon_{1}} \\ \Upsilon_{1} i \sin \phi_{1} & \cos \phi_{1} \end{pmatrix}, \qquad (3.15)$$

と定義すると (3.11) 式と (3.12) 式で表現される境界 I と境界 Ⅱの電磁場の関係は行列 M₁を用いて

$$\begin{pmatrix} E_{\rm I} \\ H_{\rm I} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_1 & \frac{i \sin \phi_1}{\Upsilon_I} \\ \Upsilon_1 i \sin \phi_1 & \cos \phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{\rm II} \\ H_{\rm II} \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} E_{\rm II} \\ H_{\rm II} \end{pmatrix}, \quad (3.16)$$

とかける。隣り合う2つの境界における電磁場を結びつける行列 M₁を特性行列と呼ぶ。

ここまでで、媒質に1層の薄膜を付けた場合を考えた。ここまでの考え方を元に、媒質に2層の薄膜 が着けられている場合も考えることができる。薄膜が2層になっても、1層目の電磁場の関係は(3.16) 式の通りである。一方、2層目ができたことで境界の数は3個になった。境界Ⅱと境界Ⅲの間の電磁場 の関係は,(3.16) をそのまま境界Ⅱと境界Ⅲの関係に置き換えてやればよくて

$$\begin{pmatrix} E_{\rm II} \\ H_{\rm II} \end{pmatrix} = M_2 \begin{pmatrix} E_{\rm III} \\ H_{\rm III} \end{pmatrix}, \qquad (3.17)$$

とかける。2 層目の特性行列 M_2 の具体形は (3.16) 式の ϕ_1, Υ_1 をそれぞれ 2 層目の屈折率や厚さ、屈折 角で表現した ϕ_2, Υ_2 に置き換えてやれば良い。

(3.17) 式の両辺に、右から M₁ をかけて (3.16) 式を用いると

$$\begin{pmatrix} E_{\rm I} \\ H_{\rm I} \end{pmatrix} = \boldsymbol{M_1} \boldsymbol{M_2} \begin{pmatrix} E_{\rm III} \\ H_{\rm III} \end{pmatrix}, \qquad (3.18)$$

となり、薄膜が2層取り付けられた場合における電磁場の関係が得られる。

一般に、媒質の上に p 層の薄膜が存在し, 各層が固有の屈折率と厚さ、屈折角を持つとき, 薄膜系の最初の境界 I と最後の境界 p + I における電磁場は

$$\begin{pmatrix} E_{\rm I} \\ H_{\rm I} \end{pmatrix} = \boldsymbol{M_1} \boldsymbol{M_2} \cdots \boldsymbol{M_p} \begin{pmatrix} E_{\rm p+I} \\ H_{\rm p+I} \end{pmatrix}, \qquad (3.19)$$

で関係づけられる。全系の特性行列 M は個々の層における 2×2の特性行列の積

$$M = M_1 M_2 \cdots M_p = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix},$$
 (3.20)

である。

(3.16) 式や (3.19) 式で表現された電磁場の関係は電磁場の接続条件を用いることで反射振幅 r や透過 振幅 t を与える関係に書き換えることができる。図 3.1 で描かれる薄膜が 1 層の場合を例に、(3.16) 式の $E_{\rm I}$ や $H_{\rm I}, H_{\rm II}$ に (3.1) 式や (3.2) 式,(3.4) 式, をそれぞれ代入すると

$$\begin{pmatrix} E_{iI} + E_{rI} \\ (E_{iI} - E_{rI}) \gamma_0 \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} E_{tII} \\ E_{tII} \gamma_m \end{pmatrix}, \qquad (3.21)$$

とかける。ここで Υ_0 と Υ_m は

$$\Upsilon_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_0 \cos \theta_{i\mathrm{I}} \,, \tag{3.22}$$

$$\Upsilon_m = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_m \cos \theta_{t\mathrm{II}} \,, \tag{3.23}$$

である。

反射振幅 r と透過振幅 t は

$$r = \frac{E_{r\mathrm{I}}}{E_{i\mathrm{I}}},\tag{3.24}$$

$$t = \frac{E_{t\mathrm{II}}}{E_{i\mathrm{I}}},\tag{3.25}$$

であるから,(3.21) 式の両辺を E_iI で割ることで

$$\begin{pmatrix} 1+r\\ (1-r)\,\Upsilon_0 \end{pmatrix} = \boldsymbol{M}_1 \begin{pmatrix} t\\ t\,\Upsilon_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12}\\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t\\ t\,\Upsilon_m \end{pmatrix}, \qquad (3.26)$$

とかける。

(3.26) 式から反射振幅 r, 透過振幅 t について解くと

$$r = \frac{\Upsilon_0 m_{11} + \Upsilon_0 \Upsilon_m m_{12} - m_{21} - \Upsilon_m m_{22}}{\Upsilon_0 m_{11} + \Upsilon_0 \Upsilon_m m_{12} + m_{21} + \Upsilon_m m_{22}},$$
(3.27)

$$t = \frac{2 \Upsilon_0}{\Upsilon_0 m_{11} + \Upsilon_0 \Upsilon_m m_{12} + m_{21} + \Upsilon_m m_{22}},$$
(3.28)

となる。任意の膜構成において反射振幅 r や透過振幅 t を求めるには (3.22) 式と (3.23) 式,(3.20) 式から 計算した薄膜系全体の特性行列の結果を (3.27) 式や (3.28) 式に代入するだけで良い。

3.1.2 反射防止コーティング

薄膜系に垂直に電磁波が入射する場合を考える。前節で考えた薄膜1層の系では

$$\theta_{i\mathrm{I}} = \theta_{i\mathrm{II}} = \theta_{t\mathrm{II}} = 0, \qquad (3.29)$$

が成り立つ。単層膜から成る系の反射振幅 r₁ は (3.16) 式の特性行列の要素を (3.27) 式に代入して整理 することで

$$r_1 = \frac{n_1(n_0 - n_m)\cos\phi_1 + i(n_0n_m - n_1^2)\sin\phi_1}{n_1(n_0 + n_m)\cos\phi_1 + i(n_0n_m + n_1^2)\sin\phi_1},$$
(3.30)

となる。この系の反射率 R1 は反射振幅 r1 とその複素共役 r1 の積であるから

$$R = r_1 \times r_1^* = \frac{n_1^2 (n_0 - n_m)^2 \cos^2 \phi_1 + (n_0 n_m - n_1^2)^2 \sin^2 \phi_1}{n_1^2 (n_0 + n_m)^2 \cos^2 \phi_1 + (n_0 n_m + n_1^2)^2 \sin^2 \phi_1},$$
(3.31)

となる。ここで $\phi_1 = k_0 n_1 d_1$ である。

(3.31) 式は, $\phi_1 = \frac{\pi}{2}$, つまり薄膜の光学的厚さ *nd* が真空中での波長 λ_0 に対して $\frac{\lambda_0}{4}$ の奇数倍の値をとる時、

$$R = \frac{(n_0 n_m - n_1^2)^2}{(n_0 n_m + n_1^2)^2},$$
(3.32)

となる。(3.32) 式から薄膜の屈折率 n₁ が

$$n_1^2 = n_0 n_m \,, \tag{3.33}$$

を満たすとき反射率 Rは0になることがわかる。超高分子量ポリエチレン $n_{\rm m} = 1.53$ に最適な反射防止 膜は $\sqrt{1.53} \sim 1.2$ の屈折率をもつ素材となる。

3.1.3 電磁波の吸収を考慮する場合

本節は光学薄膜の基礎論 増補改訂版 ^[15] と Lamb(1996)^[13] を参考に記述する。吸収を考慮する場合は 前節の位相 ϕ と Υ に含まれる屈折率 n を複素屈折率 N に置き換えた上で特性行列の要素を求める。求 めた行列要素を透過振幅に代入し、それを用いて透過率を計算したら良い。また、本研究で扱う物質は 誘電体であるため複素屈折率 N は屈折率 n と誘電正接 tan δ を用いて以下となる。

$$N = n\left(1 - i\frac{\tan\delta}{2}\right),\tag{3.34}$$

3.2 透過率のシミュレーションと材料選定

GroundBIRD は 145 GHz 帯と 220 GHz 帯に感度を持つ検出器で観測するため幅広い帯域にわたって 全反射を抑制する必要がある。超高分子ポリエチレン単体の 145 ± 15 GHz と 220 ± 15 GHz における透

過率のシミュレーションを示した後に入手可能な膜材料のもとで透過率のシミュレーションを行い、最 適な素材を選定する。

3.2.1 超高分子量ポリエチレンの透過率シミュレーション

空気と真空に挟まれた時の超高分子量ポリエチレンへ垂直に入射する電磁波の透過率 $T_{\rm UHMW}$ は透過振幅 $t_{\rm UHMW}$ とその複素共役 $t_{\rm UHMW}$ によって次の式で与えられる。

$$T_{\rm UHMW} = \frac{n_f}{n_0} \times t_{\rm UHMW} \times t_{\rm UHMW}^* \,. \tag{3.35}$$

ここで n₀ は空気中の屈折率,n_f は真空中の屈折率である。

超高分子量ポリエチレン (屈折率 n_{UHMW}, 厚さ d_{UHMW}) による吸収を考えると透過振幅 t_{UHMW} は

$$t_{\rm UHMW} = \frac{2\Upsilon_0\Upsilon_{\rm UHMW}}{\Upsilon_0\Upsilon_{\rm UHMW}\cos\Delta + \Upsilon_0\Upsilon_f(i\sin\Delta) + \Upsilon_{\rm UHMW}\Upsilon_{\rm UHMW}(i\sin\Delta) + \Upsilon_{\rm UHMW}\Upsilon_f\cos\Delta}, \quad (3.36)$$

となる。

ここでΔは、

$$\Delta = k_0 N_{\text{UHMW}} d_{\text{UHMW}} = k_0 n_{\text{UHMW}} (1 - i \frac{\tan \delta_{\text{UHMW}}}{2}) d_{\text{UHMW}}.$$
(3.37)

ここで k_0 は波数, N_{UHMW} は超高分子量ポリエチレンの複素屈折率、 d_{UHMW} は超高分子ポリエチレンの厚さ、 n_{UHMW} は超高分子量ポリエチレンの実屈折率、i は虚数単位、 $\tan \delta_{\text{UHMW}}$ は超高分子量ポリエチレンの誘電正接である。

 Υ は ϵ_0 を真空の誘電率、 μ_0 を真空の透磁率、電磁波が系に垂直に入射するとした時

$$\Upsilon_{\rm symbol} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_{\rm symbol} \,, \tag{3.38}$$

で、添字の symbol は、空気の場合は 0 となり右辺は n_0 が、超高分子量ポリエチレンの場合は UHMW となり右辺は $N_{\rm UHMW}$ が、真空中では f となり右辺は n_f が対応する。

(3.35) 式に $n_0 = 1$ 、 $n_f = 1$ 、 $n_{\text{UHMW}} = 1.53$ ^[11]、 $d_{\text{UHMW}} = 10 \text{ mm}$, $\tan \delta_{\text{UHMW}} \sim 3.0 \times 10^{-4}$ ^[11]を代入する。この時、90 – 260 GHz における超高分子量ポリエチレンの透過率は図 3.5 となる。GroundBIRDが観測する 145 GHz 帯と 220 GHz 帯の平均の透過率は約 90%となる。

3.2.2 材料選定

反射防止膜

屈折率 1.2 付近の素材で入手が容易な素材は多孔質 PTFE (Poly Tetra FluoroEthylene) である。多孔 質 PTFE は PTFE 内部に多数の細孔を持つ素材を指す。PTFE の屈折率は 1.43^[13] だが、多孔質 PTFE

の屈折率は細孔を増やし、それが保持する空気量を増やすことで PTFE よりも小さくなる。

本研究は安価短時間で目標とする透過率の反射防止膜を製作するため、国内で流通する多孔質 PTFE から 製作に適した素材を選定する。購入先は ADVANTEC 東洋株式会社^[16] である¹。表 3.1 に ADVANTEC 東洋株式会社が提供する多孔質 PTFE の屈折率と厚さを示す。なお、屈折率は空隙率をもとに

(空隙率%) ×
$$n_{\rm air}$$
 + (100 - 空隙率%) × $n_{\rm PTFE}$, (3.39)

より推定した。次節のシミュレーションを元に真空窓の透過率を最大にする PTFE を選択する。

パラメカ	型番				
	PF020	PF040	PF050	PF060	PF100
厚さ mm	0.54	0.95	0.36	0.50	1.00
空隙率 %	54	75	73	75	77
屈折率 (推定値)	1.20	1.11	1.12	1.11	1.10

表 3.1 ADVANTEC 東洋社の多孔質 PTFE

糊材

多孔質 PTFE と超高分子量ポリエチレンはそのままでは張り付かないため、超高分子量ポリエチレン よりも融点が低く、屈折率が同程度の物質を糊として用いて貼り付ける。糊材として低密度ポリエチレ ンを選択した。低密度ポリエチレンは屈折率が 1.51^[13]、融点が 110° – 120°^[17] である。低密度ポリエ チレンも国内で流通している製品から適した素材を選定することにし、材質に低密度ポリエチレンと明 記されていたアラム株式会社製のものをモノタロウ^[18] から購入した。表 3.2 にアラム株式会社が提供す る低密度ポリエチレンの型番と厚さを示す。アラム株式会社が提供する低密度ポリエチレンの厚さは、 最も薄い 0.3 mm から最も厚い 3.0 mm まで幅がある。次節のシミュレーションで低密度ポリエチレンの 最適な厚さも決める。

表 3.2 アラム社の低密度ポリエチレン

型番	NSP-0.3	NSP-0.5	NSP-0.8	NSP-1.0	NSP-1.5	NSP-2.0	NSP-3.0
厚さ mm	0.3	0.5	0.8	1.0	1.5	2.0	3.0

3.2.3 選定材料における透過率シミュレーション

真空中に置いた系 (図 3.2) に対して、低密度ポリエチレンの厚さ、多孔質 PTFE の厚さと屈折率を変 えた時の 145GHz 帯と 220GHz 帯の平均透過率を調べた。式 (3.20) を 5 層 (上から多孔質 PTFE, 低密

¹Zitex と呼ばれる SAINT-GOBAIN 社が提供する多孔質 PTFE は 50 %を細孔が占めたものもある。その屈折率は凡そ 1.2^[14] であり、PF020 と同種の屈折率となる。

度ポリエチレン、超高分子量ポリエチレン、低密度ポリエチレン、多孔質 PTFE) の特性マトリックス を用いて透過振幅 (式 (3.28)) を導く。シミュレーションのパラメタを表 3.3 にまとめた。

透過率のシミュレーション結果は表??と図 3.3、図 3.4 にまとめた。2 つの帯域で要求透過率 (95%以上)を満たすものは PF050(厚さ 0.36 mm 屈折率 1.12)のみで、最も高い透過率は厚さ 0.3 mm の低密度 ポリエチレンを用いた時である。これらの素材での透過率を図 3.5 に示す。反射防止膜を張って無い超 高分子量ポリエチレンの透過率のシミュレーションに比べて振幅や位相が変化し、透過率が 100%に近 づくことが分かる。



図 3.2 反射防止膜付き真空窓の透過率シミュレーションを行う系の模式図

表 3.3 透過率シミュ	ノーショ	ンのパラ	メタ
--------------	------	------	----

物質	厚さ $d\mathrm{mm}$	屈折率n	誘電正接 $tan \delta$
超高分子量ポリエチレン	10	1.53	$3.0 imes 10^{-4}$
低密度ポリエチレン	製品依存	1.51	$3.0 imes 10^{-4}$
多孔質 PTFE	製品依存	製品依存	0



図 3.3 低密度ポリエチレンの厚さを変えた時の 145 GHz 帯の透過率シミュレーション



図 3.4 低密度ポリエチレンの厚さを変えた時の 220 GHz 帯の透過率シミュレーション



図 3.5 反射防止膜の有無に対する超高分子量ポリエチレンの透過率シミュレーション 上:反射防止膜有り,下:反射防止膜無し

第4章 反射防止膜の貼付

製作する真空窓にはアラム社製の厚さ 0.3 mm の低密度ポリエチレン NSP-0.3 を糊材に ADVANTEC 東洋社製の屈折率 1.12, 厚さ 0.36 mm PF050 の多孔質 PTFE を反射防止膜として貼る。本章では超高分 子量ポリエチレンに反射防止膜を貼り付ける手法の開発研究と、確立した手法に対する新たな課題につ いて述べる。

4.1 貼付方法の概要

低密度ポリエチレンを糊材に使って多孔質 PTFE を超高分子量ポリエチレンに貼り付けたものとして 図 4.1 に示すものを製作する。



図 4.1 反射防止膜付き真空窓の模式図

4.2 貼付条件の最適化

東京理化器株式会社製 NDO – 510 型のオーブン (図 4.2) で糊材を溶かす。オーブンは備え付けの温度 計で設定された温度を設定された時間維持できる。しかし温度計は加熱対象から離れているため、加熱 対象の実際の温度と異なる。そこで熱電対型温度計と GRAPHTEC 社製データロガー GL220 を用いて オーブン温度計と加熱対象をモニターし、貼り付けに適した温度と加熱時間を調べる (図 4.3)。

第4章 反射防止膜の貼付



図 4.2 貼り付に用いる NDO – 510 型オーブン



図 4.3 (a):熱電対温度計とロガー (b):オーブン温度計と加熱対象の温度を同時モニター

4.2.1 低密度ポリエチレンの融点の確認

低密度ポリエチレンの融点は110°C~120°Cとカタログ値に幅がある。まずは本研究で用いるアラム 社製 NSP-0.3 の低密度ポリエチレンの融点を調べる。低密度ポリエチレンに温度計をつけてオーブン に入れ、加熱時間と加熱温度の2つのパラメータを変化させたときの溶融の有無をみる。

図 4.4 のようなセットアップを用いて、110°C で 60 分低密度ポリエチレンを加熱し場合と、120°C で 30 分低密度ポリエチレンを加熱した場合を調べた。その結果は表 4.1 の通りである。それぞれのパラメ タでの低密度ポリエチレンの加熱温度と加熱時間の関係は図 4.5 と図 4.6 にまとめた。120°C で 30 分以 上加熱すれば低密度ポリエチレンが十分に溶け、糊材として機能することが分かった (図 4.7)。



図 4.4 低密度ポリエチレンを加熱して、融点を確認するためのセットアップ

加熱温度(C°)	加熱時間(min)	溶融
110	60	溶けなかった
120	30	溶けた

表 4.1 低密度ポリエチレンの温度と加熱時間に対する応答



図 4.5 低密度ポリエチレンを 110 ℃まで加熱した時の温度変化



図 4.6 低密度ポリエチレンを 120 ℃まで加熱した時の温度変化



図 4.7 加熱温度の違いによる低密度ポリエチレンの融解度合いの違い

4.2.2 貼付時の温度制御の最適化

つづいて、30 分以上超高分子量ポリエチレンの温度を 120°C に維持できるオーブンの設定条件を調べる。φ90 の PF050 と低密度ポリエチレン、10 cm 四方に切った厚さ 10 mm の超高分子量ポリエチレン からなる小型の系を用いて調べた (図 4.8)。



図 4.8 PTFE の超高分子量ポリエチレンへの貼り付け

貼り付けるためのオーブンの設定温度として、まずは目標温度よりも 10°C 高い、130°C で張り付きの 有無を調べることにした。維持時間は 180 分とした。設定温度 130°C、維持時間は 180 分とした時の超 高分子量ポリエチレンの温度変化は図 4.9 の通りである。この条件では、反射防止膜は張り付かなかっ た (図 4.10)。超高分子量ポリエチレンの温度は 120°C を下回り低密度ポリエチレンが溶けないために PTFE が張り付かなかったと考えられる。設定温度 130°C では低密度ポリエチレンの融点を下回るため 設定温度を 140°C にして張り付きの有無を調べることにした。維持時間は 130°C の場合と同じ 180 分と した。

オーブンの加熱温度を140°C、維持時間を180分にした時の超高分子量ポリエチレンの温度変化は図 4.11の通りである。この設定で加熱すると超高分子量ポリエチレンに多孔質 PTFE を貼り付けられるこ とが分かった (図 4.12)。この時超高分子量ポリエチレンは、低密度ポリエチレンの融点以上超高分子量 ポリエチレンの融点未満の温度になるため PTFE が張り付いたと考えられる。



図 4.9 オーブンの設定を 130 ℃ 3 時間維持した時の温度と加熱時間の関係



図 4.10 オーブン設定を 130 ℃ 3 時間維持した時の結果、多孔質 PTFE が張り付いていないことがわかる.



図 4.11 オーブンの設定を 140 ℃ 3 時間維持した時の温度と加熱時間の関係



図 4.12 オーブン設定を 140 ℃ 3 時間維持した時の結果、多孔質 PTFE がしっかりと張り 付いている事が目視で確認できる.

4.3 GroundBIRD 用真空窓の外形

図 4.13、図 4.14 のように、望遠鏡の真空窓部は直径 310 mm の穴が空いているため円形で直径 310 mm の反射防止膜を超高分子量ポリエチレンの両面に貼る。超高分子量ポリエチレンは板 (図 4.15) と 12 本の M12 ネジ (長さ 30 mm) で止められる。そこで、超高分子量ポリエチレンは図 4.16 に示す形状を用いる。



図 4.13 望遠鏡の真空窓部



図 4.14 真空窓フランジの設計図



図 4.15 真空窓抑えの設計図



図 4.16 真空窓用超高分子量ポリエチレンの設計図

4.4 反射防止膜の貼付

4.2.2 で調べた加熱条件の下で多孔質 PTFE を超高分子量ポリエチレン (図 4.17) に貼り付ける。多孔 質 PTFE と低密度ポリエチレンは直径 310 mm の円形の台紙を使って切り出す (図 4.18,4.19)。切り出し た多孔質 PTFE と低密度ポリエチレンは外径 400 mm,内径 310 mm の円形状のジグ (図 4.20)を使って 超高分子量ポリエチレン上で位置を合わせて重ねる。重ねた後は隅に耐熱テープを使って多孔質 PTFE と低密度ポリエチレンを仮留めする (図 4.21)。仮留めが済んだら反射防止膜と超高分子量ポリエチレン の両面を厚さ 15 mm,415 mm 四方のアルミ板で挟む (図 4.22)。これは加熱によって超高分子量ポリエチ レンが反らないようにするために重しである。アルミ板で挟んだら板の四方に開けた 4 つの穴に M12 の ネジを通し、ナットで固定する。この時、電動ドリルを用いてトルク 20 でネジを締めた。アルミ板で固 定したらオーブンに入れ、上側のアルミ板と超高分子量ポリエチレンに温度計をつける (図 4.23)。超高 分子量ポリエチレンはアルミ板の隙間から温度計をつけた。オーブンの設定を 140°C、180 分維持にし て加熱することで反射防止膜付きの真空窓ができる。

上記の方法で超高分子量ポリエチレンの両面に多孔質 PTFE を貼り付けることができたが、超高分子 量ポリエチレンが加熱によって変形する問題が生じた。図 4.24 は加熱前後の超高分子量ポリエチレンを 右端を合わせて重ねたものである。反射防止膜を張った超高分子量ポリエチレンの穴位置がずれてる。 これに対する議論は次節で行う。



図 4.17 反射防止膜を貼り付ける超高分子量ポリエチレン

第4章 反射防止膜の貼付



図 4.18 反射防止膜の素材を切り出す台紙

図 4.19 切り出される低密度ポリエチレン





図 4.20 切り出した多孔質 PTFE, 低密度ポリエチレンと位置合わせのジグ



図 4.21 反射防止膜を仮留めした超高分子量ポリエチレン (加熱前)



図 4.22 加熱による超高分子量ポリエチレンの反りを防ぐアルミ製固定板



図 4.23 加熱時のオーブン内の様子



図 4.24 加熱による反射防止膜付き超高分子量ポリエチレンの収縮 表側が反射防止膜を貼り付けた超高分子量ポリエチレン,裏側が加熱前の超高分子 量ポリエチレン

4.5 貼り付け時の加熱による超高分子量ポリエチレンの収縮

4.5.1 加熱温度の違いによる変形の有無

貼り付けできる加熱条件 140 C°、180 分維持以外でも超高分子量ポリエチレンが変形するか調べる。 多孔質 PTFE が張り付かない加熱条件 130 C°、180 分でも超高分子量ポリエチレンが変形するか調べ た。加熱前の超高分子量ポリエチレンの直径と厚さはそれぞれ 400 ± 1 mm と 10.1 ± 0.1 mm である。 この温度条件では多孔質 PTFE が張り付かない事は既に明らかであるため、アルミ板をネジで挟まず、 単に重石として置いて超高分子量ポリエチレンだけを加熱した。その結果を表 4.2 に示す。ネジによっ て挟む効果がない分、140 C°の場合よりも厚さの変化は大きくでたと考えられるが、多孔質 PTFE を 貼り付けらないような低い温度の加熱でも超高分子量ポリエチレンの変形が明らかになった。

表 4.2 加熱による超高分子量ポリエチレンの変形

オーブン設定温度 C°	加熱後の直径 min	加熱後の厚さmm
130	390 ± 1	10.8 ± 0.1
140	390 ± 1	10.5 ± 0.1

4.5.2 変形による懸念

加熱温度が超高分子量ポリエチレンの融点を下回っているにも関わらず超高分子量ポリエチレンが変 形するという新たな課題が明らかになった。

これにより次の2点が懸念される。

1. 屈折率や厚さの変化によって透過率が変化する

2. 強度が変化する.

厚さの変化は透過率の周波数依存性に影響し、シミュレーション通りの透過率が得られない懸念が あるされる。そこで 3.2.3 節で行ったシミュレーションを, 超高分子量ポリエチレンの厚さ変数にして、 10.0 mm から 11.0 mm までを 0.1 mm 刻みずつ変化させてた時の透過率を調べた。表 4.3 にシミュレー ションのパラメタを示す。その上で超高分子量ポリエチレンの各厚さにおける透過率の平均値から、3.2.3 節で行ったシミュレーションで求めた平均透過率 (表 4.4) の差を考える。145 GHz 帯の平均透過率から の差を図 4.25 に描画した。また、220 GHz 帯の平均透過率からの差を図 4.26 に示す。超高分子量ポリエ チレンの厚さが 1%変化しても透過率の変化は 1%を超えず、2 つの帯域の平均透過率は超高分子量ポリエ チレンの厚さが変化しても影響を受けない。反射防止膜を貼り付ける過程で超高分子量ポリエチレン が変形、厚さが変化しても屈折率が変化しない限り透過率に影響しないことがわかった。その他、屈折 率や吸収等の変化は透過率を実際に測ることで確認、検討する (5 章)。強度に関しては 6 章で確認、検 討を行う。



図 4.25 超高分子量ポリエチレンの厚さが変わる時と 10 mm の時の 145 GHz 帯の平均透過 率の差のシミュレーション



図 4.26 超高分子量ポリエチレンの厚さが変わる時と 10 mm の時の 220 GHz 帯の平均透過 率の差のシミュレーション

表 4.3 超高分子量ポリエチレンの厚さが変化する時の透過率シミュレーションのパラメタ

	厚さdmm	同垢素の	季電正控 ton δ
初員	序Cumm	油 川平11	防电止按 tall 0
超高分子量ポリエチレン	変数	1.53	3.0×10^{-4}
低密度ポリエチレン	0.3	1.51	$3.0 imes 10^{-4}$
多孔質 PTFE	0.36	1.12	0

表 4.4 厚さ 10 mm の超高分子量ポリエチレンの透過率のシミュレーションの平均値

周波数帯域 GHz	145	220
平均透過率%	96.3 ± 0.1	95.6 ± 0.2

4.6 GroundBIRD 用真空窓の製作

加熱による収縮を考慮して直径 415 mm の超高分子量ポリエチレン (図 4.27) に多孔質 PTFE を貼る。 超高分子量ポリエチレンに空けた穴径も収縮の影響を受けるため、固定用のネジ穴は貼り付け後に空け る。図 4.29 が GroundBIRD で使用するために製作した反射防止膜付き超高分子量ポリエチレンである。

前述のように、加熱による形状変化は超高分子量ポリエチレンの組成や強度に変化を生んでいると懸念 される。組成の変化による屈折率の変化は透過率に影響する。作成した反射防止膜付き超高分子量ポリ エチレンの透過率については5章で議論する。強度の変化は真空窓の機能につながる。真空引きによっ て大気圧がかかっても反射防止膜付きの超高分子量ポリエチレンが割れないことを担保する必要がある。 これは6章で議論する。



図 4.27 収縮を考慮した超高分子量ポリエチレンの図面



図 4.28 反射防止膜を貼り付ける前の超高分子量ポリエチレン



図 4.29 GroundBIRD で使用する反射防止膜付き超高分子量ポリエチレン

第5章 真空窓の透過率の測定

5.1 測定試料

加熱による物性値の変化を比較するために、貼り付け条件で加熱前後の超高分子量ポリエチレン (図 5.1、図 5.2)を用意して透過率を測り、比較する。さらに、前章で説明した手法で反射防止膜を貼り付 けた超高分子量ポリエチレンを3枚製作し、期待した透過率性能が達成できていることを確認する (図 5.3)。製作した真空窓は後述の測定系に収まらないため、一部分を切り出して透過率の評価を行う (図 5.4)。透過率を測定する試料は超高分子量ポリエチレンと反射防止膜を貼り付けた超高分子量ポリエチ レンの2種7枚である (表 5.1)。表 5.1 中の上部と下部はオーブンに入れた時の奥側と入り口側に対応 する。

表 5.1 測定試料

試料名	形状	寸法 (直径または縦横)
加熱していない超高分子量ポリエチレン	円形	$\phi200$
加熱した超高分子量ポリエチレン	長方形	$100 \times 180 \text{ mm}^2$
反射防止膜付き超高分子量ポリエチレン (1 枚目 中央部)	長方形	$100 \times 180 \text{ mm}^2$
反射防止膜付き超高分子量ポリエチレン (2 枚目 中央部)	長方形	$100 \times 180 \text{ mm}^2$
反射防止膜付き超高分子量ポリエチレン (3 枚目 中央部)	長方形	$100 \times 180 \text{ mm}^2$
反射防止膜付き超高分子量ポリエチレン (3 枚目 上部)	長方形	$100 \times 180 \text{ mm}^2$
反射防止膜付き超高分子量ポリエチレン (3 枚目 下部)	長方形	$100 \times 180 \text{ mm}^2$



図 5.1 測定用超高分子量ポリエチレン



図 5.2 加熱した測定用超高分子量ポリエチレン



図 5.3 透過率測定のために製作した反射防止膜付き真空窓



図 5.4 測定のために裁断した反射防止膜付き超高分子量ポリエチレン

5.2 透過率の測定系

測定系は Kavli IPMU にある装置を借りた。この装置は 33 – 140 GHz と 150 – 260 GHz の帯域で透過 率を測定できる。測定系は電磁波を送る領域 (図 5.5 点線領域) と試料の領域 (図 5.5 直線領域)、透過波 を受信し、その強度を記録する領域からなる (図 5.5 破線領域)。図 5.6 に装置の外観写真を示す。



図 5.5 透過率測定系の模式図



図 5.6 透過率を測定する系の外観

第5章 真空窓の透過率の測定

5.2.1 各機器の名称と役割

測定系を構成する各機器について送信領域、試料領域、受信と記録領域の順にその名称と役割を表 5.2 から表 5.4 に示す。送信機と受信機は対となって用いるが、1 組のペアだけでは動作できる周波数の範囲 に制限がある。そこで前述の帯域を 6 つに分け、それぞれの帯域毎に対となる送信機と受信機を用いて 測定を行う。本研究の透過率は 90 – 260 GHz を表 5.5 に示す 3 つの帯域で観測する。

表 5.2 送信領域を構成する機器の名称と役割

名称	役割
発信機 (図 5.7)	1 – 20 GHz までの電磁波を出力
逓倍器 (図 5.8)	発振器から送られる信号の周波数を設定値だけ倍増させる
送信機 (図 5.9)	電磁波の出力
チョッパー (図 5.10)	送信機から出る電磁波をある周波数で物理的に遮ってパルス状にする
チョッパー制御装置 (図 5.11)	チョッパーの遮断周期を制御
放物面鏡 (図 5.12)	送信機 (放物面の焦点に位置) から出た電磁波を集光して試料領域へ送る

表 5.3 試料領域を構成する機器の名称と役割

名称	役割
アテネーター (図 5.13)	黒体シート. 試料からの反射を減衰させて送信機や受信機に向かうことを防ぐ
ホルダージグ (図 5.14)	試料ホルダーを光路上に設置するための治具. 300mm の立方体構図
試料ホルダー (図 5.15)	試料を光路上に固定する

表 5.4 受信と記録の領域を構成する機器の名称と役割

名称	役割
放物面鏡 (図 5.16)	試料領域から出た電磁波を集光して受信機 (放物面の焦点に位置) へ送る
受信機 (図 5.17)	電磁波の受信
ロックインアンプ (図 5.18)	受信した信号から送信機が出力した信号をチョッパーの遮断周期を元に抽出
USB DAQ($\boxtimes 5.19$)	ロック イン アンプが抽出した信号を PC で記録できるように変換
PC	試料の透過率データを記録

表 5.5 観測帯域

帯域名	周波数帯域 GHz
F	90 - 140
G	150 - 220
Υ	210 - 260



図 5.7 発振器の外観

図 5.8 逓倍器の外観



図 5.9 送信機の外観



図 5.11 チョッパー制御装置の外観

試料
 ホルダー
 発振器へ

図 5.10 チョッパーの外観

図 5.12 送信機側の放物面鏡の外観

第5章 真空窓の透過率の測定



図 5.13 アテネーターの外観

図 5.14 ホルダージグの外観



図 5.15 ホルダーの外観





図 5.17 受信機の外観



図 5.19 USB DAQ の外観

図 5.18 ロックインアンプの外観

第5章 真空窓の透過率の測定

5.2.2 測定方法

送信機から出力された電磁波は試料領域に置かれた試料を透過し、受信機へ向かう。試料ホルダーに 試料が有る場合と、試料が無く空気だけの領域を電磁波が通る場合の信号強度の比を取ることで透過率 が求まる。

試料の透過率を測る際の測定手順は次の通りである。

- 1. 空気だけの場合の強度データを測定(図 5.20)
- 2. 試料を取り付け, 試料がある場合の強度データを測定図 5.21)

3. 空気だけの場合の強度データを再度測定

初めにとった空気と試料の強度データの比を取ることで試料の透過率を求める。空気の強度データを 再度測定し、初めにとった空気のデータとの比をとることで一連の測定の間に出力が変動していないこ とを確認する。



図 5.20 空気の測定

図 5.21 試料の測定

5.3 透過率測定の結果と考察

5.3.1 超高分子量ポリエチレンの透過率

超高分子量ポリエチレンの内、加熱していないものの透過率の測定データとフィット曲線を図 5.22 に 示す。また、加熱したものの測定データとフィット曲線を図 5.23 に示す。測定時間の都合で加熱した方 のデータを 90-220 GHz までしか取れなかったため、90-220 GHz までで比較を行った。フィットの際の パラメタは屈折率と厚さ、誘電正接の 3 つで、屈折率と誘電正接はカタログ値を用い、厚さの初期値は ノギスによる測定値を用いた (表 5.6)。フィット関数は (3.35) 式である。フィットの結果を表 5.7 に示 す。両者の屈折率と誘電正接に有意な変化は見られなかった。このことから加熱による影響は厚さだけ に及び、光学的な物性の変化はないと結論づけた。

表 5.6 超高分子量ポリエチレンの透過率のフィットパラメタと初期値

フィットパラメタ	初期値		
	加熱していない場合	加熱した場合	
屈折率	1.53	1.53	
厚さ mm	10.0	10.4	
誘電正接	3.0×10^{-4}	$3.0 imes 10^{-4}$	

表 5.7 超高分子量ポリエチレンの透過率のフィット結果

フィットパラメタ	フィット結果		
	加熱していない場合	加熱した場合	
屈折率	1.51 ± 0.01	1.49 ± 0.01	
厚さ mm	10.1 ± 0.1	10.6 ± 0.1	
誘電正接	$(3.0 \pm 0.6) \times 10^{-4}$	$(2.6 \pm 0.5) \times 10^{-4}$	
χ^2/ndf	1.0	2.6	





図 5.23 加熱した超高分子量ポリエチレンの透過率

5.3.2 反射防止膜を貼った真空窓の透過率

反射防止膜を貼った真空窓は9個の物理量を持ち、解析は9個のうち5つをフィットのパラメタ、4 つを固定値とした(表5.8)。各真空窓の透過率の解析におけるフィットパラメタは表5.9に示す。フィッ トに用いた関数は3.2.3節で用いた関数と同じである。反射防止膜付き真空窓の透過率の測定データと フィット曲線を図5.24から図5.29に示す。前半の3つは、3枚の真空窓について同じ場所の透過率に関 する図である(図5.24-図5.26)。後半の3つは、1枚の真空窓について異なる場所の透過率に関する図で ある(図5.27-図5.29)。

5個の真空窓の試料についてフィットした結果を表5.10に示す。フィットから求めたパラメタを使っ て観測帯域の透過率の平均を算出した(表5.11、表5.12)。算出した透過率は設計時のシミュレーション よりも約1%高くなった。フィットの初期値(表5.9)と中央部のフィット結果(表5.10)を見比べると、多 孔質 PTFE の屈折率が増えつつ厚さが減り、逆に低密度ポリエチレンの屈折率が減りつつ厚さが増えて いる。この結果から、低密度ポリエチレンが溶ける過程で多孔質 PTFE に空いている穴に入り込み、多 孔質 PTFE と低密度ポリエチレンの間に、PTFE と低密度ポリエチレンからなる中間的な層ができてい ると考えられる。さらに、中間層の存在によって屈折率の変化が設計時のシミュレーションのものより 滑らかになり透過率の上昇に寄与したと考えられる。また、表5.10 から多孔質 PTFE の屈折率は上、中 央、下の順に大きく、厚さは下、中央、上の順に厚いことが分かる。その原因の一つに、熱の伝わり方 の違いによる低密度ポリエチレンの融解度合いの違いがあると考えた。加熱に使ったオーブンは、真空 窓の上側がオーブンの奥側、真空窓の下側が扉側になっている。オーブンは奥側と両脇の側面が熱源に なっており、扉側は内部を覗く窓があるため、熱源が無い。そのため下側に比べて上側の方が先に温ま ると考えられ、このことから、上側に行くほど多孔質 PTFE に低密度ポリエチレンが溶け込みやすいと 考えられる。なお、1.5%程度の場所依存性はあるが、要求を満たすため実用上は全く問題ない。

パラメタ	多孔質 PTFE	低密度ポリエチレン	超高分子量ポリエチレン
屈折率	フィットパラメタ	フィットパラメタ	1.5 に固定
厚さ mm	フィットパラメタ	フィットパラメタ	フィットパラメタ
誘電正接	0 に固定	3.0×10 ⁻⁴ に固定	3.0×10 ⁻⁴ に固定

表 5.8 反射防止膜をつけた真空窓の透過率のフィットパラメタと固定パラメタ



図 5.24 反射防止膜を施した超高分子量ポリエチレンの透過率1枚目中央





図 5.25 反射防止膜を施した超高分子量ポリエチレンの透過率2枚目中央

図 5.26 反射防止膜を施した超高分子量ポリエチレンの透過率3枚目中央





図 5.29 反射防止膜を施した超高分子量ポリエチレンの透過率3枚目下

フィットパラメタ	初期値		
	1 枚目	2枚目	3枚目
多孔質 PTFE の屈折率	1.12	1.12	1.12
多孔質 PTFE の厚さ mm	0.4	0.4	0.4
低密度ポリエチレンの屈折率	1.51	1.51	1.51
低密度ポリエチレンの厚さ mm	0.3	0.3	0.3
超高分子量ポリエチレンの厚さ mm	10.6	10.4	10.5

表 5.9 反射防止膜をつけた真空窓の透過率のフィットパラメタの初期値

表 5.10 反射防止膜をつけた真空窓の透過率のフィット結果

フィットパラメタ	フィット結果				
	1枚目中央	2枚目中央	3枚目中央	3枚目上	3枚目下
多孔質 PTFE の屈折率	1.17 ± 0.01	1.16 ± 0.01	1.18 ± 0.01	1.22 ± 0.03	1.01 ± 0.01
多孔質 PTFE の厚さ mm	0.33 ± 0.01	0.37 ± 0.01	0.33 ± 0.01	0.26 ± 0.01	0.4 ± 0.3
低密度ポリエチレンの屈折率	1.47 ± 0.01	1.37 ± 0.01	1.47 ± 0.01	1.47 ± 0.02	1.32 ± 0.03
低密度ポリエチレンの厚さ mm	0.40 ± 0.03	0.80 ± 0.01	0.42 ± 0.03	0.7 ± 0.1	0.19 ± 0.01
超高分子量ポリエチレンの厚さ mm	10.4 ± 0.1	9.6 ± 0.1	10.3 ± 0.1	9.7 ± 0.1	11.0 ± 0.1
χ^2/ndf	0.7	1.5	1.2	1.1	0.6

表 5.11 フィット結果を使って求めた観測帯域の平均透過率

<u> </u>	平均透過率 %				
電光积中以	1枚目中央	2枚目中央	3枚目中央	3枚目上	3枚目下
145 GHz 帯	97.3	97.2	97.3	95.9	94.3
220 GHz 帯	96.9	97.5	97.0	97.5	95.8

表 5.12 窓毎、場所毎の平均透過率

観測帯域	窓毎の平均透過率%	場所毎の平均透過率%
145 GHz 帯	97.3 ± 0.1	95.8 ± 0.9
$220\mathrm{GHz}$	97.1 ± 0.2	96.8 ± 0.5

第6章 真空窓の大気圧耐久試験

6.1 大気圧による真空窓の変形

真空窓は絶えず大気から押されるため、その圧力で変形する。真空窓として用いた超高分子量ポリエ チレンは中央が湾曲している (図 6.1)。真空窓はこの圧力変形で破損せず真空を維持することが求めら れる。

本研究では超高分子量ポリエチレンを融点未満の温度で加熱し、糊材である低密度ポリエチレンを溶 かし反射防止膜を貼り付けた。しかし融点未満の加熱であっても超高分子量ポリエチレンは収縮した。 本章では貼り付けの加熱によって変形した超高分子量ポリエチレンが真空窓としての機能を有すること を確認する。



図 6.1 真空窓として用いた超高分子量ポリエチレンの変形

6.2 耐久試験方法

反射防止膜を張った超高分子量ポリエチレンを GroundBIRD 望遠鏡に取り付け、24 時間以上真空度 を維持できることを確認する (図 6.2)。



図 6.2 反射防止膜を貼った超高分子量ポリエチレンの耐圧試験

6.3 耐久試験結果

耐久試験を開始してから終了するまでの圧力変化は図 6.3 の通りである。試験中、反射防止膜を施し た超高分子量ポリエチレンは破損しなかった。試験後の反射防止膜付き超高分子量ポリエチレンは大気 に押されて中央が湾曲するが、これは実用上問題ないことが過去の実験で検証されている (図 6.4)。な お、大気圧によって湾曲しても裏側の膜が剥がれない事も確認した (図 6.5)。



図 6.3 耐圧試験中の圧力と経過時間の関係



図 6.4 反射防止膜を貼った超高分子量ポリエチレンの耐圧試験後の様子



図 6.5 耐圧試験後の反射防止膜

第7章 結論

GroundBIRD は145±15 GHz と220±15 GHz の2つの帯域を用いた大角度スケールの CMB 偏光の観 測に特化した望遠鏡である。本研究ではその観測帯域で高い透過率を実現する真空窓の開発を行った。 真空窓として使われている超高分子量ポリエチレンに反射防止膜を付加することで反射率を減らす。そ の製作手法を確立し、透過率の向上を目指した。超高分子量ポリエチレンは上記帯域で 8%の反射率と 2%の吸収率をもつ。反射率と吸収率を同程度にすることを目指し、透過率への要求値は両帯域で平均 95%以上とした。

安価かつ短時間での製作を目指し、必要な素材は国内に流通する物品から調達した。糊材の加熱によっ て反射防止膜を超高分子量ポリエチレンに貼り付ける。シミュレーションを行い、要求を満たす最適な 素材を選定した。反射防止膜は ADVANTEC 東洋株式会社の PF050 と呼ばれる多孔質 PTFE を用い、 糊材にはアラム株式会社の NSP-0.3 と呼ばれる低密度ポリエチレンを用いる。

これらの素材を用いて、超高分子量ポリエチレンの融点未満かつ低密度ポリエチレンの融点以上の温 度で加熱する条件出しを行い、反射防止膜を張った真空窓の製作手法を確立した。同一の方法で4枚の 反射防止膜付きの真空窓を製作した。1枚の真空窓を作るために必要な時間は10時間、単価はおよそ 25000円であった。その際に新たな課題も出た。融点を下回っているにも関わらず超高分子量ポリエチ レンの大きさが変わってしまう。変形によって厚さが5%増える。透過率性能と強度性能の変化を評価 することが新たな課題として挙げられ、その評価も行った。

まず、超高分子量ポリエチレンの厚さの変化と透過率の関係を再度シミュレーションし、透過率に影響しないことを確認した。さらに、加熱前後の超高分子量ポリエチレンの透過率測定から厚さ以外の物性値に有意な変化がないことも確信した。続いて、製作した真空窓4枚の内の3枚について透過率を測定した。3枚の中央部の透過率と、3枚の内1枚について上下2カ所の中央以外の部分の透過率を測った。測定の結果、3枚の中央部の透過率は測定精度の範囲内で一致し、145 GHz 帯で平均97.3±0.1%、220 GHz 帯で平均97.1±0.2%を得た。また、中央と上下部の透過率の違いは1.5%程度であったが、要求値95%を上回っており、十分な性能であることを確認した。その後、真空窓を望遠鏡に取り付けて真空引きし、大気圧の負荷がかかっても破損しないことを確認した。24 時間の試験を行い、真空を維持することも確認した。

上記研究を通して、GroundBIRD で用いる真空窓の作製手法を確立した。これは透過率への要求と大 気圧に耐える強度要求を満たすだけでなく、安価かつ短時間での製作を実現する。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々からお力添えを頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。 指導教官である田島治准教授は研究の進め方や発表スライドの作り方、論文の添削など、細やかな指 導によってこの研究を支えて頂きました。また、研究に必要な資金に不自由のない環境を提供してくだ さいました。

京都大学の本多俊介研究員には、実験の進め方や解析のプログラム技術などで手解きを頂きました。 また、IPMU での透過率測定には共に実験現場に赴いてくださり、測定を行う上で助言を頂きました。

IPMUの松村知岳特任准教授と岡山大学の小松国幹さん、IPMUの高久涼太さんには透過率の測定環境を提供して頂きました。透過率の測定において装置の使い方を教えて頂き、また、測定の準備や測定中における助言など実験を進める上で多くのサポートを頂きました。この研究の核である透過率の測定を無事に行うことができたのは、3氏のお力添えがあったからに他なりません。

理化学研究所の小栗秀悟研究員、高エネルギー加速器の長崎岳人研究員、鈴木惇也研究員、東北大学 の沓間弘樹さんからは望遠鏡周りの作業の手解きから始まり、研究で煮詰まった際にすぐに相談にのっ てくださり、助言を頂いた他、多くの経験や知識を頂きました。また、夜通し、物理や解析の話をしたこ とは高エネルギー加速器機構での生活において、楽しいひと時でした。本多俊介研究員を交えた5氏と 作業した現場は笑いが絶えない楽しいものでした。望遠鏡製作に参加できた日々は忘れ難い思い出です。

理化学研究所の大谷知行教授には、本研究を資金面から支えて頂きました。大谷教授が代表となって 獲得された資金によってこの研究は形になりました。

理化学研究所の美馬覚研究員には、反射防止膜の選定について議論、助言を頂きました。

高エネルギー加速器研究機構の長谷川雅也講師には、反射防止膜の貼り付けるための環境を提供してく ださった他、貼り付け手法の助言や貼り付けで生じた困難の切り分けの際に助言を頂きました。外部の 学生である私が高エネルギー加速器研究機構で研究生活を進めれたのは長谷川講師の助力のおかげです。

京都大学の安達俊介研究員には透過率や反射率に関して議論、助言を頂きました。

高エネルギー加速器研究機構の南雄人研究員には本論文の添削をして頂きました。

また、高エネルギー加速器研究機構 CMB グループの皆様とは、議論をしたり装置の使い方について 助言を頂いた他、高エネ研での研究生活を快適に行えるように支えて頂きました。

京大 CMB グループの阿部倫史さん、池満拓司さんには、宇宙論のゼミでお世話になりました。

京都大学高エネルギー物理学研究室の皆様に感謝申し上げます。京都での研究生活もまた、楽しいも のでした。

最後に、ここまで支えてくれた家族に感謝いたします。

参考文献

- [1] http://astro-dic.jp/last-scattering-surface/
- [2] http://astro-dic.jp/horizon-problem/
- [3] P. A. R. Ade *et al.* (Keck Array and bicep2 Collaborations), Constraints on Primordial Gravitational Waves Using Planck, WMAP, and New BICEP2/Keck Observations through the 2015 Season, Phys. Rev. Lett. 121, 221301, 2018.
- [4] 沓間弘樹, CMB 偏光観測に向けた超伝導検出器"MKID"のノイズ低減法の研究開発, 2018.
- [5] Y. Mizugutch, et al. Offset dual reflector antenna. Proceedings of Antennas and Propagation Society International Symposium, 1976.
- [6] パルス管冷凍機

http://www.cryomech.com/specificationsheet/PT415RM_ss.pdf

- [7] ヘリウム吸着型冷凍機
- [8] O. Tajima *et al.* Groundbird: an experiment for cmb polarization measurements at a large angular scale from the ground. *Proc. SPIE*, 8452:84521M-84521M-9, 2012.
- [9] R. Adam, et al. Planck 2015 results. x. diffuse component separation: Foreground maps. Astronomy & Astrophysics, 594:A10, 2016.

http://www.chasecryogenics.com

[10] 超高分子量ポリエチレンの融点

http://www.jushikakou.com/sozai-uhmwpe.html

- M. H. Abitbol et al. CMB-S4 Technology Book, First Edition, arXiv:1706.02464, July 2017 https://arxiv.org/pdf/1706.02464.pdf
- [12] E. Hecht 著 尾崎義治 · 朝倉利光 訳, ヘクト 光学, 丸善株式会社, 2003
- [13] J. W. Lamb, Miscellaneous data on materials for millimetre and submillimetre optics, International Journal of Infrared and Millimeter Waves, December 1996

参考文献

- [14] D. J. Benford, M. C. Gaidis, and J. W. Kooi, Optical properties of Zitex in the infrared to submillimeter, APPLIED OPTICS, Vol. 42 No. 25, 1 September 2003
- [15] 小檜山光信,光学薄膜の基礎論増補改訂版,株式会社オプトロニクス社,2011,増補改訂版第1刷発
- [16] ADVANTEC 東洋株式会社 PTFE ろ紙商品ページ

 $https://www.advantec.co.jp/products/detail/?id{=}742$

[17] 低密度ポリエチレンの融点

http://www.housougijutsu.net/word/000109.html

[18] モノタロウ アラム社製軟質ポリエチレンシート商品ページ
 https://www.monotaro.com/g/02944545/?t.q=%83%7C%83%8A%83G%83%60%83%8C%83%93
 %83V%81%5B%83g%81%40%83A%83%89%83%80